

# Spécifications techniques Neo-Narval

Prepared by	Signature
Name: T. Böhm, R. Cabanac, A. Lopez Ariste, L. Parès Institute: OMP Date:	
Accepted by	Signature
Name: Institute: Date:	
Approved and Application authorized by	Signature
Name: Institute: Date:	

**Summary:** This document ...

**Keywords:** Neo-Narval, ...

## DOCUMENT CHANGE RECORD

Issue	Revision	Date	Modified pages	Reason for change / Observations
V1		June 2016		
	1.1	14/06/2016	3 3-30 47	Table of content cosmetics Polissage, typos correction Nouvelle figure

# Table of Contents

## 1. Spécifications scientifiques

### 1.1 La science

### 1.2 Spécifications technique de haut niveau

#### Stabiliser l'angle de faisceau

### 1.3 Description système des composants Narval

## 2. Spécifications techniques Neo-Narval

### 2.1 Concept Neo-Narval

### 2.2 Analyse composant par composant

#### Prismes, objectifs, banc optique

#### Réseau

#### Dilatation mécanique des optiques et monture

#### Stabilité image slicer, stabilité entre deux fibres

## 3. Choix du détecteur CCD

### 3.1 Spécifications scientifiques vs techniques du CCD

### 3.2 Stratégie de la calibration, besoin d'un vide constant sans re-pompage sur le long-terme

### 3.3 Choix d'un détecteur "simple" ou "deeply depleted" et du coating

### 3.4 Impact de la taille du CCD et de la couverture du domaine FP parallèle sur la vélocimétrie

### 3.6 Comparaison des rapports S/N entre les détecteurs

#### 3.6.1 Rapport S/N, générique

#### 3.6.2 Impact sur la vélocimétrie

#### 3.6.3 Impact sur la Magnétométrie

### 3.7 Impact de la perte de résolution sur la vélocimétrie

### 3.8 Grade 0 ou grade 1?

## 4. Spécifications calibration

## Conclusions

## Annexes

### Annexe A1: Effet de P et T sur l'indice de réfraction

#### Stabiliser l'indice de réfraction

#### Stabiliser l'angle de faisceau

### Annexe A2: Considérations générales taille CCD - taille pixel, layout optique

### Annexe A3: CCD deeply depleted ou non? Impact sur les photons "utiles" en fonction de $T_{eff}$ de l'étoile

### Annexe A4: Calculs d'erreur sur les composants Narval

### Annexe A5: Unité de calibration

#### 5.1 Description of the calibration needs

##### 5.1.1 Spectropolarimetry

##### 5.1.2 Velocimetry

#### 5.2 Technical constraints on Neo-Narval calibration unit

#### 5.3 Existing Calibration Units

##### 5.3.1 Narval

###### Technical description

###### Narval CU physical location

### [5.3.2 SOPHIE](#)

[Technical description](#)

[SOPHIE CU physical location](#)

### [5.3.3 SPIRou](#)

[Technical description](#)

## [5.4 Neo-Narval CALIBRATION UNIT](#)

### [5.4.1 Neo-Narval CU conceptual design](#)

### [5.4.2 Neo-Narval CU possible designs](#)

[Upgrade of Narval CU](#)

[Copy SPIRou CU](#)

[Location of Neo-Narval CU](#)

[Narval CU components](#)

# 1. Spécifications scientifiques

## 1.1 La science

Le cas scientifique de Neo-Narval est décrit dans le document Neo-Narval\_science\_case.pdf. En résumé, trois cas scientifiques ont été identifiés. L'étude du jitter magnétique des étoiles, une étude des exoplanètes géantes autour de leur étoiles évoluées (incluant un certain nombre de suivi de la mission spatiale TESS), une poursuite de l'étude du magnétisme stellaire (cas scientifique de Narval). Nous avons évalué le nombre de cibles potentielles à plusieurs centaines sur les deux premiers cas scientifiques, couvrant des centaines de nuits d'observations, le troisième cas est illustré par les histogrammes des observations faites depuis presque 10 ans avec Narval dans les histogrammes de la Fig 1. Les cas scientifiques de Neo-Narval glissent vers les étoiles les plus froides (sous-géantes et géantes G, K, M). Il est donc important d'évaluer l'impact des choix des composants Neo-Narval sur la sensibilité dans ce domaine des étoiles froides.

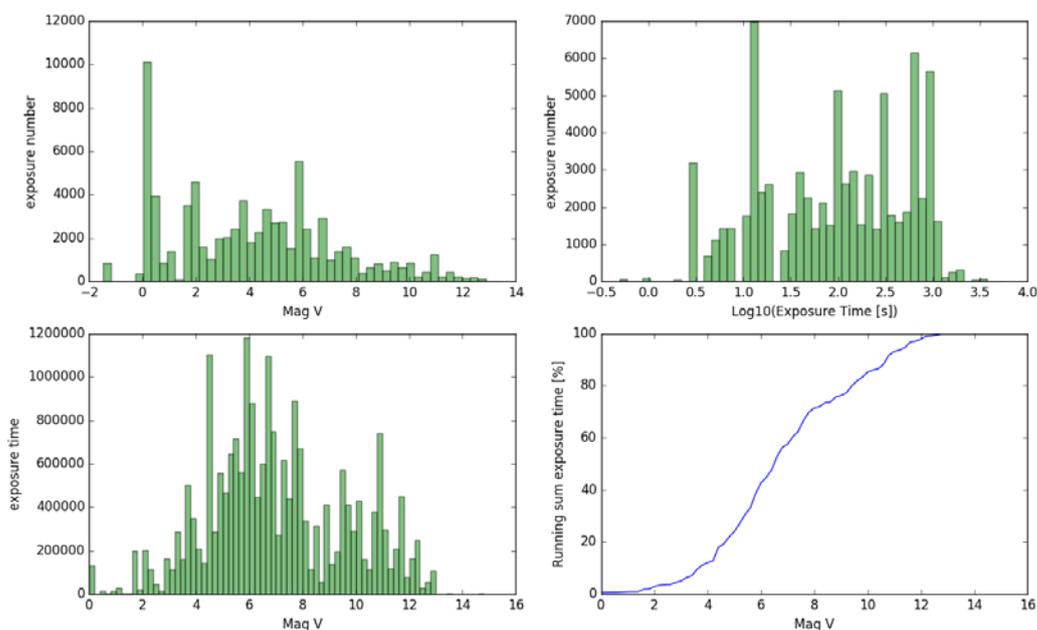


Figure 1: Les étoiles observées avec Narval depuis 2007, en haut à gauche: répartition des poses en fonction de la magnitude V des objets, en haut à droite: histogramme des temps de pose depuis 2007, en bas à gauche: histogramme du temps total observé en fonction des magnitudes V, en bas à droite: somme du temps de pose intégré par magnitude, 75% du temps d'observation est passé sur étoiles avec Mag V<8.

	G0 V	G0 III	K0 V	K0 III	M0 V	M0 III	M3III	M5III
CDS/SIMBAD #obj (mag I < 8)	323 (G*)	50 (G*IV) 68 (G*III)	238 (K*)	29 (K*IV) 145(K*III)	31 (M*)	0 (M*IV) 49 (M*III)	-	-
CDS/SIMBAD #obj (mag I <10)	490 (G*)	77 (G*IV) 99 (G*III)	369 (K*)	38 (K*IV) 209(K*III)	141 (M*)	0 (M*IV) 58 (M*III)	-	-
CDS/SIMBAD #obj (mag I <12)	536 (G*)	82 (G*IV) 117 (G*III)	422 (K*)	52 (K*IV) 224(K*III)	210 (M*)	0 (M*IV) 63 (M*III)	-	-
Massarotti et al. # Obj (<100 pc)	761 <u>Hipparcos</u> giants between $20^\circ < \delta < 60^\circ$							

L'instrument Narval actuellement en fonction montre des instabilités vélocimétriques se traduisant par des déplacements importants des spectres sur le détecteur en cours de nuit et à plus long terme — instabilités qui ne sont pas dues à des défaillances instrumentales, mais à un concept initial non optimisé pour la vélocimétrie précise. L'évolution de la thématique de recherche vers une étude intensive des étoiles similaires au Soleil, actives magnétiquement et hôtes de planètes, nécessite un instrument bien mieux stabilisé en vitesse radiale. Néo-Narval permettra non seulement d'assurer cette nouvelle fonction, mais aussi de poursuivre les études spectropolarimétriques en cours, extrêmement prometteuses, sur les champs magnétiques des géantes rouges, c'est-à-dire de systèmes stellaires et planétaires en fin de vie – domaine sur lequel Narval a été véritablement pionnier.

Science requirements	Technical <u>spécification</u>
Detect 1-Gauss magnetic fields on MS and evolved stars	<u>Narval</u> polarimeter is already on specs
Detect 1- $M_J$ planet at 1 AU of a 8-mag 2- $M_\odot$ star	long-term stability of the spectrograph = 3m/s
Detect a magnetic modulation on activity jitter on MS and sub-giant stars	long-term stability of the spectrograph = 3m/s
Exoplanet confirmation of Transit candidates around evolved stars	long-term stability of the spectrograph = 3m/s

Concrètement, il s'agit d'amener Néo-Narval à un niveau de précision vélocimétrique de 2-3 m/s sans pour autant toucher au cœur de l'instrument existant.

**But: atteindre une stabilité en vitesse radiale sur le long-terme meilleure que 3m/s (avec comme but entre 1 et 2 m/s)**

## 1.2 Spécifications techniques de haut niveau

Dans un spectrographe ou spectropolarimètre traditionnel on se contente en général d'effectuer régulièrement des poses de calibration (en général lampe Th/Ar en ce qui concerne le polynôme de dispersion), et d'effectuer des calibrations grossières grâce à ces mesures. Sans trop de peine on peut arriver à des précisions vélocimétriques de quelques dizaines de m/s. En revanche, si on veut augmenter d'un ou de deux ordres de grandeur la précision vélocimétrique, il faut effectuer une analyse détaillée des sources d'instabilité ou de mauvaise calibration et d'analyse de données. Dans un premier temps, en suivant le trajet de la lumière, on peut distinguer à priori plusieurs sources d'une telle instabilité:

- Perturbation d'intensité de la pupille (seeing, nuages, guidage...).
- Injection polarimètre dans fibre et fibre dans spectrographe
- Stabilité mécanique image slicer
- Indice de réfraction de l'air (dépendant de la pression et de la température ambiante)
  - Impact sur l'action du réseau disperseur
  - Impact sur les prismes cross-disperseurs
- Déformation mécaniques (dilatation thermique, flexions sous changement de pression,...)
- Indice de réfraction des optiques (prismes, lentilles) en fonction de la température
- Déformations optiques (dilatation du verre)
- Changement de foyer objectif (effet de la température sur la mécanique et l'indice du verre)
- Résolution détecteur (sampling)
- Imperfection détecteur (charge transfer efficiency, cosmétiques,...)

Nous allons étudier chacun de ses effets dans la suite de ce document par une analyse composant par composant puis une analyse combinée.

Les contraintes observationnelles du cas scientifique se traduisent par des spécifications techniques de haut niveau à la fois sur la spectropolarimétrie avec les spécifications de Narval,

**Spécifications scientifiques existantes:** Spectral range : 370-1000 nm, Résolution 65 000, Polarimètre QUV, efficacité totale (ciel vers le détecteur) 15%, et une nouvelle contrainte de haut niveau liée à la stabilité vélocimétrique.

**Spécification scientifiques à atteindre avec Neo-Narval:**

Stabilité meilleure que 3m/s (but 1m/s)

Les calculs décrits en Annexe A1 montrent que  $\Delta v_{\text{rad}} = 1\text{m/s}$  correspond à

- $\Delta n = \partial n = 3.3 \times 10^{-9}$  (variation de l'indice de réfraction).

Les conditions suivantes ont alors été déduites:

- Contrôle de la température de l'enceinte du spectrographe à  $\Delta T < 0.01\text{ K}$
- Variation de volume

Si on stabilise en température à 1/100K (facilement atteignable), l'impact sur l'indice de réfraction via le changement de volume par *effet de dilatation thermique* (sous hypothèse gaz parfaits, et zéro fuites) est totalement négligeable.

Pour un changement d'indice de réfraction correspondant à un déplacement de 1m/s (loi des réseaux) on a  $\delta n < 3.3 \times 10^{-9}$ , et un changement de volume maximum autorisé de:

$$\Delta V/V < 10^{-5}$$

Cette valeur est une condition à respecter pour la stabilisation de la cuve englobant le réseau diffracteur. Cette variation de volume ne devra pas non plus être dépassée par les effets de la déformations dues aux changements de pression ambiante.

Une stabilisation en température au 1/100K et une variation de volume d'une cloche autour du réseau tel que décrite ci-dessus assurera, au niveau de l'indice, le respect d'un  $\Delta v_{\text{rad}} = 1\text{m/s}$ .

### Stabiliser l'angle de faisceau

Les composantes du spectro sensibles aux variations de température :

Table optique (trajet optique 10.3m):

$$\rightarrow \Delta f \equiv \text{variation de foyer} = f \times \text{CTE} \times \Delta T = 10.3 \times 11 \times 10^{-6} \times 0.01 = 1.1 \times 10^{-6}\text{m}$$

$$\rightarrow \Delta \text{position PSF} (\equiv \Delta x = \Delta f \times \sin \theta) \quad \theta \equiv \text{inclinaison du CCD sur l'axe optique} \approx 10'$$

$$\Delta x = 1.1 \times 10^{-6} \times \sin(10/60) = 3.3 \times 10^{-9}\text{m} (\Rightarrow \Delta v_{\text{rad}} = \mathbf{0.66\text{m/s}})$$

Montures 3-point des miroirs: On peut retrouver un effet d'angle sur une expansion différentielle des trois points pour toutes les composantes montées sur une monture à trois points: Main Collimator, Transfert Collimator, Flat Mirror, Réseau et Prisme

Chaque axe des supports des montures à trois points est une des tiges d'acier (stub) de 50 mm de long sur les collimateurs M1 et M2 et réseaux, et miroir plan, les leviers vont de 450 mm sur l'axe z, à 145 mm. L'effet d'une variation de température sera de changer l'angle du faisceau en supposant que la déviation  $\Delta\alpha$  sera dominé par une expansion différentielle d'une tige par rapport à l'autre, la tolérance d'usinage sur les tiges est définie comme  $\Delta L = \pm 0.15$  mm pour des objets de cette taille, pour  $\Delta T < 0.01\text{K}$ :

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &< |\pm| \Delta T \times \Delta L \times \text{CTE} / L^2 \\ &< |\pm| 0.1 \times 150[\mu\text{m}] \times 12 \times 10^{-6} [\text{K}^{-1}] / 145 \times 10^3 [\mu\text{m}] \\ &< \mathbf{1.24 \times 10^{-10} \text{rad}}, \end{aligned}$$

qui est un facteur 150 fois plus faible que la limite.

## 1.3 Description système des composants Narval

Nous avons analysé les contributions de chaque composant de Narval au budget d'erreur de  $\Delta v_{rad}$ . L'analyse confirme que le budget d'erreur est dominé par l'impact de la variation de l'indice de réfraction sur les optiques réfractantes (réseau, prisme), la variation d'illumination de la pupille d'entrée (seeing, erreurs de guidage, nuages) et la variation de foyer due à l'instabilité en température (cf Table ci-dessous).

Table: contribution au budget d'erreur des composantes Narval

Nom	Source d'erreur	Sensibilité $\Delta v_{rad}$ (m/s)	commentaires	Actions
Pupille d'entrée (Polarimètre)	Seeing, atténuation nuageuse, guidage	<b>~15-30</b>	Observations Narval	Installation brouilleur et fibre octogonale réduit cette instabilité à < 1 m/s
Slicer	$\Delta T, \Delta P$	<b>~0.95</b> (rms entre deux fibres)	Mesures Narval JF Donati	Pas d'action nécessaire
Dekker	$\Delta T, \Delta P$	$\Delta T=0.1K$ <b>&lt;0.007</b>	modélisation	Pas d'action nécessaire
Banc optique	$\Delta T, \Delta P$	$\Delta T=0.1K$ inclinaison CCD 10' <b>&lt;7</b>	modélisation	Pas d'action nécessaire
Collimateur 1	$\Delta T, \Delta P$	$\Delta T=0.1K$ <b>&lt;0.007</b>	modélisation	Pas d'action nécessaire
Réseau	$\Delta T, \Delta P$	$\Delta P$ 1mbar $\Delta T$ 1K <b>~100</b>	Loi des réseaux et loi de Glastone	Cuve isobare $\Delta P$ 5 $\mu$ bar ~ 0.5 m/s
Collimateur 1	$\Delta T, \Delta P$	$\Delta T=0.1K$ <b>&lt;0.007</b>	modélisation	Pas d'action nécessaire
Miroir plan	$\Delta T, \Delta P$	$\Delta T=0.1K$ <b>&lt;0.007</b>	modélisation	Pas d'action nécessaire
Collimateur 2	$\Delta T, \Delta P$	$\Delta T=0.1K$ <b>&lt;0.007</b>	modélisation	Pas d'action nécessaire
Prisme	$\Delta T, \Delta P$	$\Delta T=0.1 K$ <b>&lt;1</b>	Loi des prismes et loi de Glastone	Pas d'impact majeur en cas d'ajout d'un prisme.
Objectif optique	Foyer ( $\Delta T$ ), $\Delta T, \Delta P$	$\Delta T=0.1 K$ <b>&lt;1</b>	opti. réfractante, loi de Glastone	Pas d'action nécessaire
cryostat-CCD	$\theta$ , flexions, $\Delta T, \Delta P, QE$ , pixels, CTE	$\Delta T=0.1 K$ <b>&lt;0.1</b>	modélisation	Nouvelle camera avec CCD E2V 4k x 4k DD. Nouveau logiciel reduction

**Si on réussit à ramener les erreurs "réseau", "prisme", "illumination" à 1 m/s, le budget d'erreur totale du spectrographe est ramené à 2.1 m/s.**

## 2. Spécifications techniques Neo-Narval

### 2.1 Concept Neo-Narval

Idéalement, construire une structure verticale tenant les optiques, optimisée en symétrie, englobée dans une cuve isobarique ou mieux à vide serait optimal, mais cela représente un effort trop important pour la taille de notre projet (taille budgétaire, manpower, temps, ...). Une approche par niveau se profile donc : en stabilisant au maximum l'environnement du spectro en température, mais surtout en stabilisant l'indice de réfraction autour du réseau (plus grand contributeur d'instabilité, 1mbar -> 100m/s !) on gardera des instabilités liées aux prismes (indice non stabilisé) et à la structure même. Ce reliquat d'instabilité pourra être corrigé par la réduction de données s'appuyant sur la voie de calibration en parallèle.

Après analyse composant par composant, nous avons fait les choix suivants pour atteindre les spécifications scientifiques.

Partant du ciel jusqu'au détecteur, le concept Neo-Narval est le suivant:

1- Télescope: aucune modification ne sera apportée dans un premier temps sur le chemin optique dans la bonnette avant injection dans la pupille d'entrée. L'option d'insérer un tip-tilt en transmission, n'a pas été choisie pour des questions d'efficacité. Un tip-tilt diminuerait la transmission pour une efficacité finale relative à cause du seeing moyen dans le dome du TBL.

2- Le chemin optique dans le polarimètre reste identique à celui de Narval. Des jouvences souhaitables ont été identifiées sur les platines codeurs des rhomboèdres pour améliorer la fiabilité de positionnement. Ces modifications devront se faire en respectant strictement l'encombrement actuel du polarimètre de Narval.

3- L'unité de calibration de Narval sera remplacée par une unité de calibration ayant les mêmes fonctionnalités que l'unité de calibration de l'instrument SPIRou (section calibration). Les deux sorties de l'unité de calibration seront injectées (i) vers la voie de calibration actuelle du polarimètre et (ii) en entrée du spectrographe en amont du module de brouillage de champs proche et lointain. (cf section calibration)

4- Les variations d'illumination de la pupille seront corrigées par l'introduction d'une fibre à section octogonale. La fibre actuelle allant du polarimètre au spectrographe sera donc remplacée par une fibre octogonale. Cette fibre octogonale sera injectée dans un module de brouillage en entrée du spectrographe. Ce module de brouillage prendra les 3 fibres en entrée dans le spectrographe. (cf document optique)

5- Le signal injecté dans le spectrographe passera donc des deux fibres actuelles venant du polarimètre, à 3 fibres, (les 2 fibres polarimètre et 1 fibre de l'unité de calibration). Ces trois fibres seront injectées dans le Slicer. (cf document optique et mécanique)

6- La platine du slicer sera bloquée en position polarimétrique, Neo-Narval utilisera uniquement ce mode d'observation. Le slicer sera modifié pour découper trois fibres en entrée. Le dekker sera remplacé par un dekker avec une fente à 3 canaux de front. (cf document optique)

7- Toutes les platines actuelles seront bloquées et éteintes pour éviter une variation thermique dans le spectrographe. L'obturateur actuel sera remplacé par un obturateur bi-stable non-polluant. (cf document mécanique)

8- Le réseau sera enchassé dans une cuve isobarique. (cf document mécanique)

9- Le cross-disperseur passera de 2 prismes à 3 prismes. La déformation supplémentaire de la PSF sera corrigée par une lentille bi-cylindrique placée en entrée de la nouvelle caméra. (cf document optique)

10- La caméra actuelle sera remplacée par une nouvelle caméra 4k x 4k pouvant accueillir les trois canaux de front sur l'axe cross-dispersif. Cette caméra accueillera un CCD deeply depleted nouvelle génération à haute efficacité quantique dans le rouge, et franges d'interférence atténuées. La caméra sera refroidi à  $-100^{\circ}\text{C}$  par effet peltier et les joules seront évacuées par un circuit d'eau liquide. (cf section CCD)

11- La nouvelle caméra sera enchassée dans un bouclier isolé thermiquement. (cf document thermique)

12- Le dispositif d'alignement de la nouvelle caméra sera revu pour ajouter de la finesse d'ajustement. (cf document mécanique)

13- La stabilité thermique du spectrographe sera assurée par deux enceintes asservies. Une enceinte externe (actuelle) asservie à  $\Delta T=0.1\text{K}$  et une enceinte interne asservie à  $\Delta T=0.01\text{K}$ . (cf document thermique)

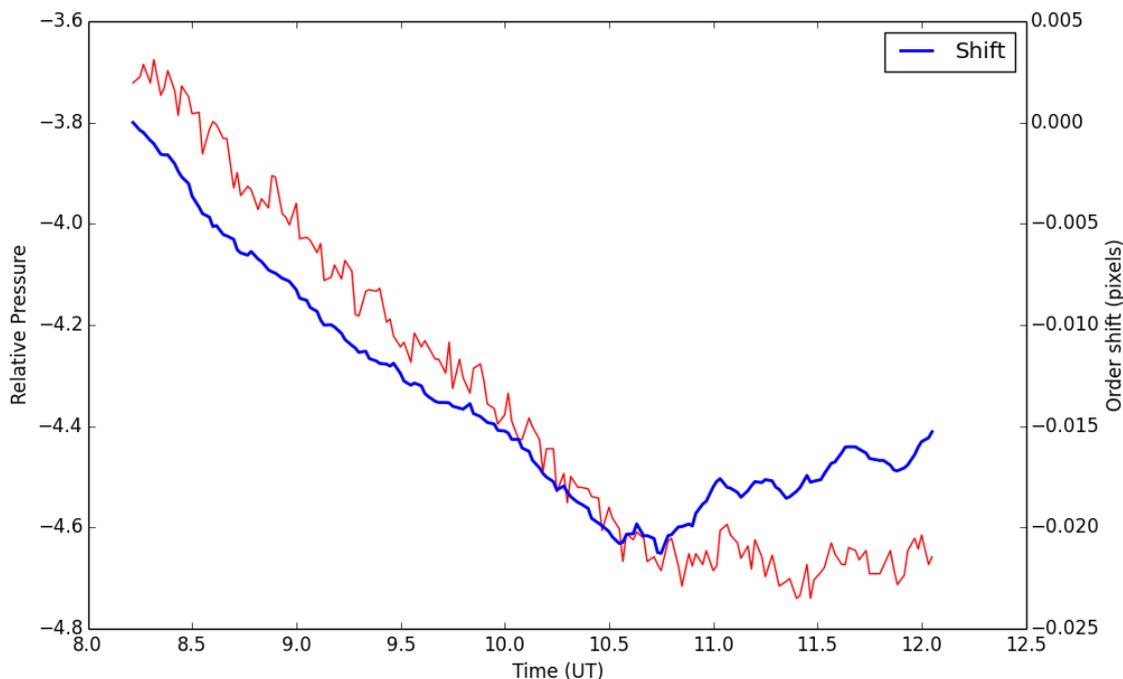
## 2.2 Analyse composant par composant

Prismes, objectifs, banc optique

Sur les quatre composantes critiques de Narval, les optiques réfractantes (prisme, objectif) et le banc optique sont ramenés dans les limites acceptables uniquement en contrôlant la température du spectrographe au centième de Kelvin.

La section 1.2 donne les modèles d'erreurs sur les optiques réfractantes et sur la dilatation du banc optique (également annexe A3).

La figure ci-dessous montre l'étude faite pour estimer l'impact des prismes de dispersion croisée dans l'erreur vélocimétrique. Une série d'image prise sur 3h a été analysée pour déterminer le



mouvement des ordres en fonction du temps. Superposée à cette mesure on voit aussi la variation mesurée de la pression dans le spectrographe.

On voit que les prismes, sous l'effet de variations de pression, provoquent un déplacement des ordres de 0.02 pixel/mbar. Ce chiffre a été confirmé par les calculs Zemax du spectrographe.

Ce mouvement est détecté et corrigé par dépouillement. En absence de correction, il a un impact sur la vélocimétrie parce que la fente est inclinée. L'effet des prismes sur la vélocimétrie est donc de 0.003 pixel/mbar ou encore 8 m/s/mbar. L'erreur de mesure est de 0.003 pixels dans la direction de la dispersion croisée ou, encore, de 1.4 m/s.

Nous concluons donc **que l'on peut se permettre de ne pas protéger particulièrement les prismes des variations de pression dans le spectrographe.**

## Réseau

L'analyse mécanique du réseau est décrite dans le document mécanique. Nous avons trouvé qu'une cuve isobarique permettait de stabiliser la pression à 5 $\mu$ bar sur une amplitude de 30mbar. L'essentiel est de garder les variations de volume petites (voir annexe A1) afin de garantir une variation minimale de l'indice de réfraction. Par contre, les effets de déformation sur la cuve isobarique ont un effet sur l'inclinaison du réseau.

Une simulation sous Zemax a été effectuée afin d'avoir des valeurs réalistes sur les conséquences d'une telle inclinaison. Quand on incline un réseau, on a une inclinaison double sur le rayon réfléchi.

Un pixel de 15  $\mu\text{m}$  correspond à 2600 m/s au niveau du CCD.

Dans le cas où l'on incline le réseau le long de ses traits (on accentue son angle qui est déjà à  $63.5^\circ$ ), on se déplace le long de l'ordre du réseau (donc on joue sur la vitesse radiale).  $10^{-5}$  degré de variation correspondent à 0.135  $\mu\text{m}$  ou 23.4 m/s au niveau du CCD.

Le design actuel de la cuve isobarique permet de limiter les variations d'inclinaison à un déplacement angulaire de  $2.5 \cdot 10^{-5}$  degré dans le sens de sa dispersion, ce qui crée un décalage en vitesse radiale de 58.6 m/s. Cette valeur correspond à une variation de pression extérieure de 30mbar. En partant du principe qu'une variation nocturne de la pression (dans une nuit "normale", de qualité) se situe aux alentours de 3 mbar, on aurait donc une dérive vélocimétrique de près de 6m/s. Il s'agit alors, **et les travaux sont actuellement en cours**, de baisser encore cette dérive d'un facteur 10 en jouant sur les matériaux, raidisseurs et supports internes. En revanche, la modélisation a montré que le design actuel de la cuve était parfaitement capable de limiter les variations de volume dans les spécifications.

Une inclinaison se faisant perpendiculairement aux traits du réseau, on se déplace dans le sens de la cross-dispersion, on pourra alors tolérer  $4.35 \times 10^{-5}$  degrés, ce qui correspond dans cette direction à 1m/s (calculs à raffiner).

#### Dilatation mécanique des optiques et monture

Les déformations mécaniques causées par la variation de température sur les composants optiques du spectro sont négligeables pour  $\Delta T=0.01\text{K}$ . Typiquement, les lentilles vont varier de 0.5nm d'épaisseur, les prismes de 5nm pour une variation totale de la focale de spectro de  $\sim 10\text{nm}$ , c'est négligeable pour une inclinaison réaliste du CCD vis à vis de l'axe optique.

De même, les dilatations relatives des montures à trois points sur lesquelles sont montés toutes les composants spectro du banc optique sont négligeables en variation d'angle de faisceau et donc d'impact sur la précision vélocimétrique.

#### Stabilité image slicer, stabilité entre deux fibres

Une question importante est celle de la stabilité d'un slicer de l'image en vélocimétrie. Le rapport de JF Donati sur données Narval montre que la stabilité d'un canal spectral sur l'autre est inférieur à 1m/s. Cette précision rentre dans les spécifications pour Neo-Narval.

En conséquence, **aucune modification de fond ne sera nécessaire sur le slicer de Narval.**

## 3. Choix du détecteur CCD

### 3.1 Spécifications scientifiques vs techniques du CCD

L'acquisition d'une nouvelle caméra CCD refroidie est au cœur du projet. En effet, afin de pouvoir injecter une 3<sup>ème</sup> fibre de calibration simultanée la taille du CCD doit être augmentée à 4k4k, avec des pixels de 15µm garantissant la couverture et résolution spectrale nécessaire. Le détecteur sera un grade 1, un grade 0 ne pouvant pas être commandé pour cette taille de capteur. Un capteur ayant une très bonne efficacité de transfert de charges (CTE d'une valeur près de 99.9999%) serait souhaitable. Un excellent traitement anti-reflet permettra un très haut rendement sur tout le spectre visible allant de 350-1000nm et assurera des S/B élevés. Un capteur aminci (deeply depleted) permettra d'éviter des franges dans le rouge et d'augmenter le rendement dans l'IR proche. Les puits de potentiels pouvant contenir plus de 250000 électrons (full well capacity) nous permettront d'observer des objets brillants. Une excellente combinaison de bruit de lecture bas à haute vitesse de lecture (jusqu'à 3 MHz) permettra d'optimiser le rapport temps observé – temps de lecture, surtout pour les courtes poses. Un vide garanti sur le très long terme (sans re-pompage!) est essentiel pour la bonne stabilité vélocimétrique sur plusieurs années. Un froid cryogénique de -100°C assurera un bruit minimal et une cosmétique améliorée tout en gardant une efficacité quantique de détection. Un refroidissement de l'électronique et du CCD par circuit d'eau réfrigéré sera préféré pour sa robustesse, simplicité d'utilisation et son absence de vibrations induites. Vu que l'enceinte dans laquelle se trouve la caméra sera asservie au 1/100K, un minimum de dissipation de chaleur sera privilégiée lors des différents cycles d'acquisition.

En cas de panne, une SAV rapide, une longévité des composantes et leur disponibilité, un interlocuteur compétent et disponible seront un atout majeur.

### 3.2 Stratégie de la calibration, besoin d'un vide constant sans re-pompage sur le long-terme

Tous nos études de sensibilité vélocimétrique en fonction du rapport S/N et de mesure des déplacements Doppler indiquent fortement que **le point critique est la calibration**. D'un point de vue du nombre de photons disponibles, Neo-Narval pourrait mesurer des cm/s. Ce qui nous contraint est la discrimination de l'origine de ces vitesses. Même au niveau spécifié du 1 m/s **le Fabry-Perot est un élément critique** pour la calibration permanente et la séparation des vitesses stellaires de toute autre source de signal. Un vide garanti sur le long-terme évite un repompage et donc une perte de référence absolue. Avec la résolution de Neo-Narval on aura une précision de référence absolue avec une lampe de Th/Ar de l'ordre de 2-3m/s. Une approche potentielle pour éviter cette erreur pourrait être un monitoring permanent du Fabry-Pérot.

### 3.3 Choix d'un détecteur "simple" ou "deeply depleted" et du coating

L'analyse suivante vise à étudier combien de photons DANS LES RAIES SPECTRALES on perd si le domaine au delà de 600nm est pollué par des franges, et donc inutilisable en vélocimétrie. Pour cela, nous avons utilisé l'ETC (exposure time calculator) de Narval, et nous l'avons fait tourner pour une étoile A0 (10000K), F0 (7500K), G0 (6000K) et K0 (5000K). Ceci nous a permis de récupérer le nombre de photons (du continu) enregistrés par Narval+CCD pour différentes longueurs d'ondes pour une étoile donnée. Nous avons alors calculé une nouvelle « efficacité » en divisant par l'efficacité quantique de l'ancien CCD (actuellement en utilisation), et en multipliant par l'efficacité quantique (QE) des nouveaux CCD potentiellement utilisables (« simple », « deeply depleted »). Ensuite, nous avons pris des listes de raies spectrales correspondant aux différentes étoiles étudiées. Une telle liste contient, parmi d'autres infos, la profondeur (« l'intensité ») de chaque raie. Ceci nous a permis de connaître les photons effectifs dans chaque raie, pour une étoile de température effective (Teff) donnée, tenant compte de la vraie efficacité de NARVAL, et extrapolé vers les nouveaux détecteurs potentiels. En sommant les photons dans le bleu (370nm - 600nm) et dans le rouge (600nm - 1micron) nous avons pu établir la fraction de *photons dans les raies* perdues si le rouge est frangé et non exploitable pour la vélocimétrie.

**Le résultat est bien sur le plus flagrant pour les étoiles froides. Pour une étoile de Teff = 5000K (K0), la fraction des photons dans les raies rouges pour Narval dépasse les 30% des photons disponibles entre les longueurs d'onde 370nm - 1 micron ! Ceci est clairement un argument pour un détecteur deeply depleted.**

Quelques autres arguments importants en faveur d'un CCD deeply depleted (DD):

- la grande sensibilité à l'effet Zeeman dans le rouge ; la correspondance avec le pic de la SED des étoiles de Type spectral ~ K
- Ca II IRT à 849-866nm : souvent utilisé pour l'activité chromosphérique et aussi l'accrétion sur les T Tauri : QE 50->75% entre les deux options
- FeH à 990nm : la bande moléculaire de référence pour les mesures d'élargissement Zeeman (Stokes I) sur les naines M : QE 5->10%. SPIRou/SPIP couvriront cette bande mais il peut être intéressant d'avoir un recouvrement.
- avoir un S/N crédible dans le rouge permet de mieux voir les effets de dépendance du jitter d'activité en fonction de la longueur d'onde et donc de le distinguer d'une vraie planète.

**Il paraît alors évident qu'une solution deeply depleted est fortement recommandée.**

Les détails de cette étude se trouvent en Annexe A3.

Illustration de l'efficacité quantique d'un détecteur moderne deeply depleted: ancien détecteur sur Narval (vert), nouveau CCD « simple » (rouge), Nouveau CCD deeply depleted (bleu):

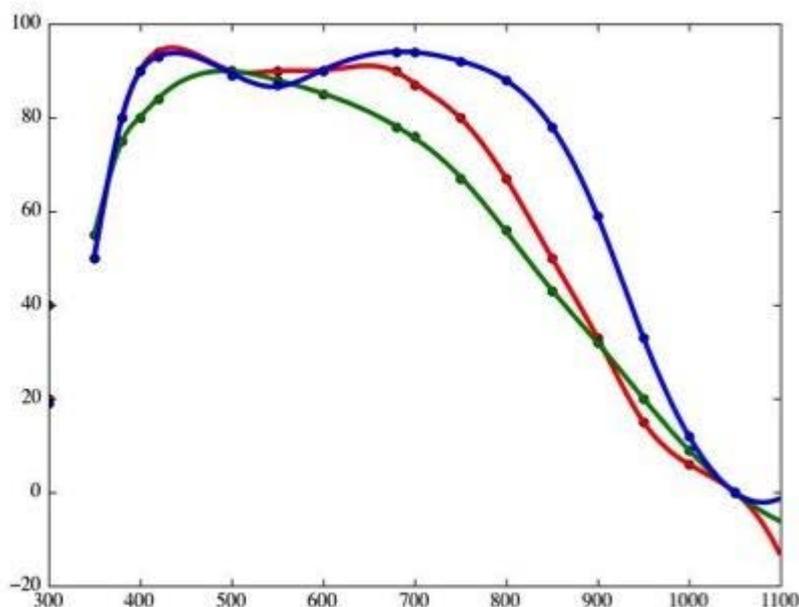


Figure 3.1 : QE de CCD sur la longueur d'onde sensible de Neo-Narval

### 3.4 Impact de la taille du CCD et de la couverture du domaine FP parallèle sur la vélocimétrie

La précision vélocimétrique ne peut pas dépendre que de la stabilité instrumentale. Dans la pratique Neo-Narval prend la philosophie contraire: Un signal stable en forme de peigne de fréquences d'un Fabry-Perot est introduit en simultanéité dans l'image acquise. Si l'instrument dans sa globalité est parfaitement stable ce signal Fabry-Perot restera stable; en cas contraire il faudra soustraire les mouvements en longueur d'onde de ce signal de calibration de la mesure stellaire.

Où et quand faut-il introduire ce signal de calibration? La proposition est que les deux voies (une par état de polarisation) du signal stellaire par ordre du spectrographe soient accompagnées à tout moment d'une troisième voie montrant le signal stable du Fabry-Perot. La géométrie des ordres ne facilite pas la présence de cette 3ème voie. Il faut modifier l'optique et cela nous impose une contrainte sur la taille du CCD qui doit passer d'une géométrie 2K x 4K à une géométrie 4k x 4k afin de couvrir le spectre complet.

Pour justifier cette contrainte nous avons pris une série de données Narval avec un Fabry-Perot non-stabilisé pendant plus de 3h et nous avons mesuré les déplacements spectraux des peignes ordre par ordre. Cf figure ci-dessous.

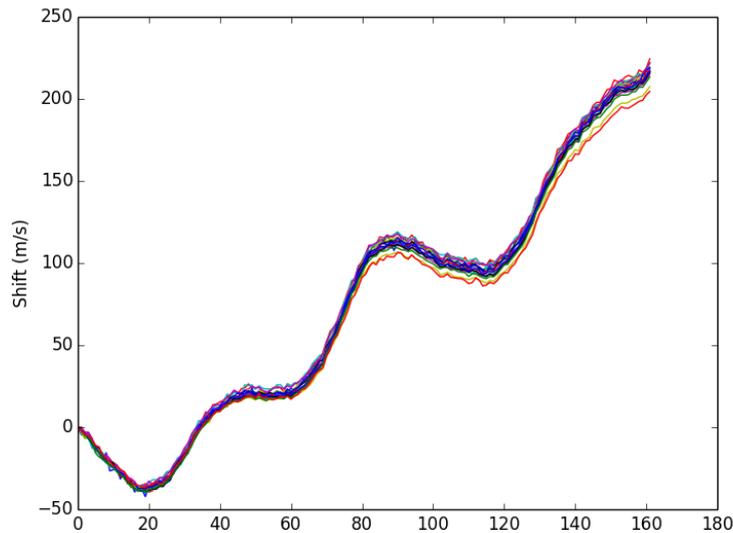


Figure 3.2 : dérive des ordres de Narval en fonction du temps, d'une séquence de FP.

L'abscisse montre le numéro des séquences, équivalent au temps, et les ordonnées montrent le déplacement mesuré en m/s. Chaque couleur correspond à un ordre. Tous les ordres dérivent, preuve que le Fabry-Perot n'est pas stable, mais ils le font en presque concordance. Les ordres bougent quasi-identiquement au premier ordre. Si on ramène la dérive à un ordre de référence, pour éliminer la dérive du Fabry Perot, on peut comparer plus en détail. On constate alors (figure suivante) qu'on peut récupérer, ordre à ordre, une précision de  $\pm 4$ m/s, mais qu'un ordre par rapport à lui-même est stable à 1m/s.

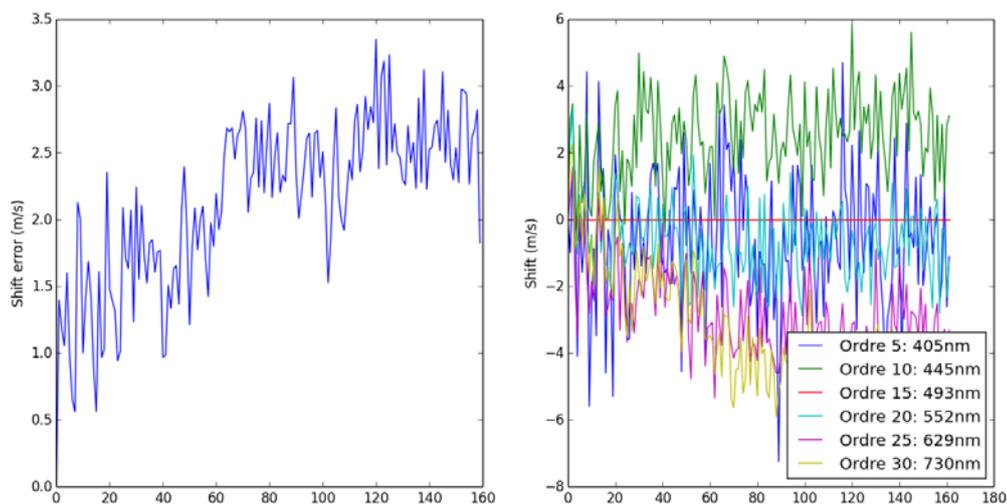


Figure 3.3 : dérive des ordres sur eux-mêmes en fonction du temps, d'une séquence de FP.

Exprimé autrement, **la vélocimétrie d'un ordre est précise à 4m/s si l'on calibre avec un autre ordre, mais elle est précise à 1m/s si l'on calibre chaque sur lui-même.**

On conclut alors à la nécessité d'une 3eme voie par ordre pour approcher le 1m/s de précision et, en conséquence, la nécessité du format 4k x 4k.

## 3.5 Comparaison des rapports S/N entre les détecteurs

### 3.6.1 Rapport S/N, générique

Ici nous étudions l'impact, entre des détecteurs fictifs, des différences de puits de potentiel (en électrons) et de vitesse de lecture (en sec) sur la vélocimétrie et la magnétométrie. Certaines simplifications, bien explicitées, ont été faites. Cela peut suggérer la nécessité d'une étude approfondie, même si les conclusions obtenues semblent être indépendantes de ces approximations.

Le détecteur 1 (D1) affiche un puits de potentiel de 300000 électrons et 3 vitesses de lecture: 3MHz, 1MHz et 100KHz. Les bruits de lecture dépendent de la vitesse de lecture et sont 8.2, 4.8 et 2.1 électrons/pixel respectivement. Dans les conditions des tests, ces bruits n'auront pas d'influence. À 3MHz, D1 est défini avec une numérisation à 16bits, et à 18bits pour les autres vitesses. L'efficacité quantique est fixée à 0.9. Dans les deux cas (détecteur 1 et 2) on prendra un chips typique (EEV), ce paramètre identique pour les deux détecteurs ne jouera donc pas de rôle.

Le détecteur 2 (D2) affiche un puits de potentiel de seulement 90000 électrons et deux vitesses de lecture 100KHz et 750KHz. Dans notre cas de figure, nous avons opter pour que ces petites vitesses n'améliorent pas les bruits de lecture qui ne sont que 3.3 et 3.9 électrons respectivement. On choisit une numérisation identique à D1 à 16bits.

La comparaison tourne autour de la formule suivante: On observe une étoile de flux F par pixel et par seconde pendant un temps total T. Ce temps T comprend le temps d'exposition additionné du temps de lecture  $t_{ro}$ . Si le flux F est suffisamment grand (ce qui sera souvent le cas pour les étoiles Neo-Narval) le puits de potentiel est vite rempli et l'observation se compose d'une suite de N expositions, définies par:

$$N = \frac{T}{\frac{W_{ell}}{QE \cdot F} + t_{ro}}$$

Si, par contre, l'étoile observée est faible, il n'y aura qu'une seule exposition (N=1) de temps T. Ici on laisse de côté le fait que la mesure polarimétrique demandera de toutes les façons plusieurs images pour compléter la modulation. Cette modulation tournera à l'avantage de la caméra la plus rapide (D1) mais on ne regardera pas ce cas de figure ici.

Pour les estimations du flux, on a recours au simulateur ETC de Narval pour une étoile de  $T_{\text{eff}} = 5000\text{K}$  et on cherche le flux dans l'ordre 45 (central). Pour des étoiles de magnitudes  $V = 1$  à 15 on trouve:

Mag V	1	2	3	4	5
F (Ph/bin)	37000	14800	5900	2300	930
Mag V	6	7	8	9	10
F (Ph/bin)	371	148	58.9	23.4	9.3
Mag V	11	12	13	14	15
F (Ph/bin)	3.7	1.48	0.59	0.23	0.09

La première figure montre le rapport S/N théorique obtenu par les deux détecteurs dans chacune des vitesses disponibles pour 3 étoiles de magnitudes 2, 5 et 9 respectivement. Pour des magnitudes faibles (9 et plus hautes), les temps totaux dédiés à l'observation (entre 1 et 120 minutes dans la simulation) ne suffisent pas à remplir le puits de potentiel, ni dans un détecteur ni dans l'autre. Ayant la même efficacité quantique, les deux détecteurs donnent les mêmes résultats.

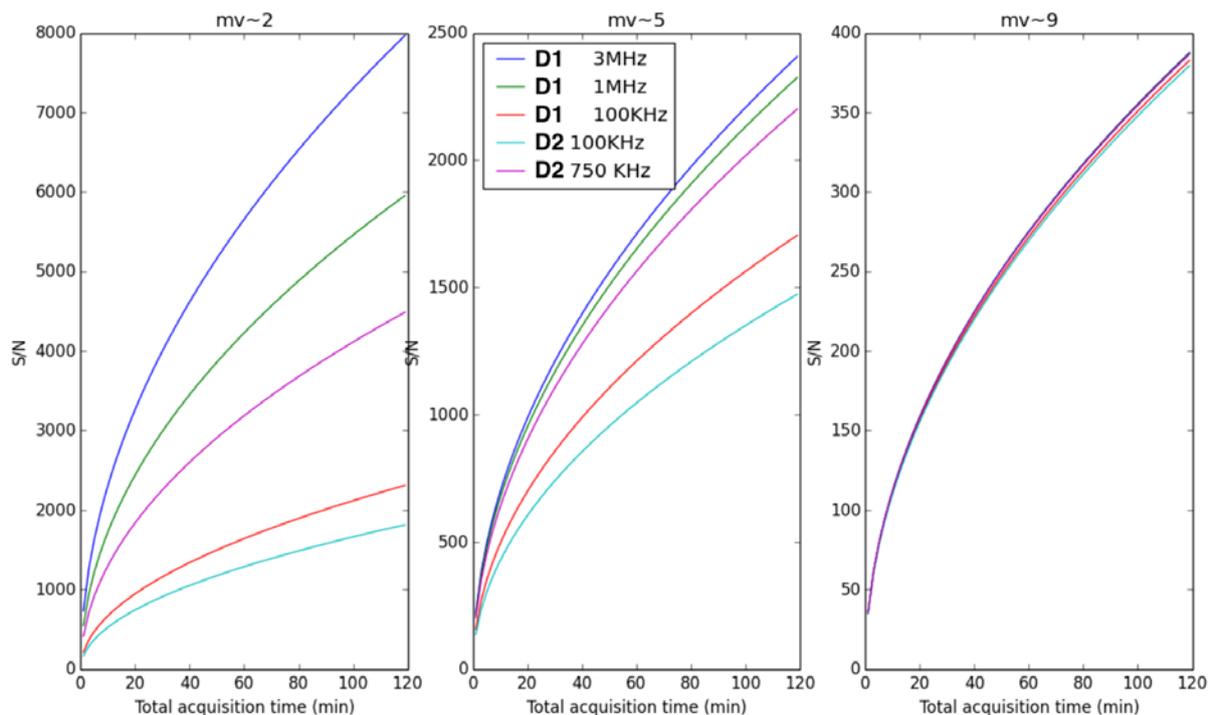


Figure 3.4: Performance en S/N détecteurs D1 et D2 à temps de pose constant sur le ciel, en fonction de trois vitesses de lecture. La différence de performance est due à un puits de potentiel plus profond pour D1.

Pour des étoiles brillantes, D2 remplit vite son puits de potentiel et dédie trop de temps à la lecture. Il est donc pénalisé. Pour une magnitude 2, cette pénalisation est de 100% en S/N entre les modes les plus rapides de l'un et l'autre détecteur.

Une autre façon d'interpréter est de définir une efficacité de détection qui tienne compte à la fois de l'efficacité quantique intrinsèque des détecteurs et du temps de lecture pendant lequel les photons ne sont pas détectés. La figure 3.5 suivante montre cette efficacité totale:

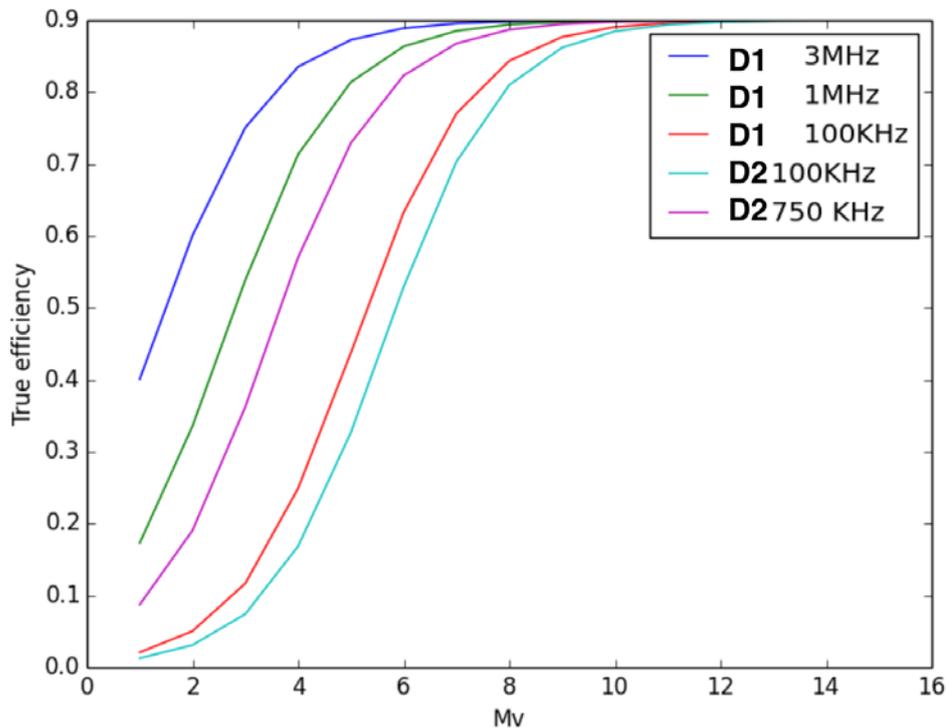


Figure 3.5: Performances des détecteurs D1 et D2, traduites en efficacité, tenant compte du temps de lecture du CCD, de l'efficacité quantique des chips.

**Les 2 modes plus rapides D1 sont plus efficaces que le meilleur mode D2. A titre d'exemple, pour une étoile A de  $M_v = 3$ , l'efficacité globale de la caméra D1 est plus de 200% celle de D2. Pour  $M_v = 8$ , cet écart a disparu complètement (temps de lecture négligeable devant temps d'exposition).**

### 3.6.2 Impact sur la vélocimétrie

Dans cette section on traduira les différences d'efficacité calculées auparavant en erreur vélocimétrique. Nous utilisons la méthode de Chelli (2000) et, en particulier, son équation 10 qui donne l'erreur en vitesse en fonction du setup instrumental. Nous avons calculé cette erreur pour deux cas:

- pour l'étoile 61CygB, observée avec Espadons (étoile choisie par Chelli pour ses simulations)
- pour un fichier Fabry-Perot (FP) de Narval.

La figure 3.6 montre le calcul pour les deux cas étudiés. À gauche, l'observation de 61CygB avec Espadons et temps de pose très court montre des erreurs de l'ordre de quelques m/s sauf pour le bleu où l'erreur explose. À droite, la même étude pour les données FP de Narval montre comme attendu des erreurs bien plus petites que le m/s. Ces résultats ne nous permettront pas de départager les deux détecteurs, car Narval reçoit suffisamment de photons et d'information dans ses spectres pour atteindre une précision vélocimétrique théorique à  $\sim$ cm/s, et seule l'instabilité du spectro et de la calibration empêche d'arriver à ces chiffres.

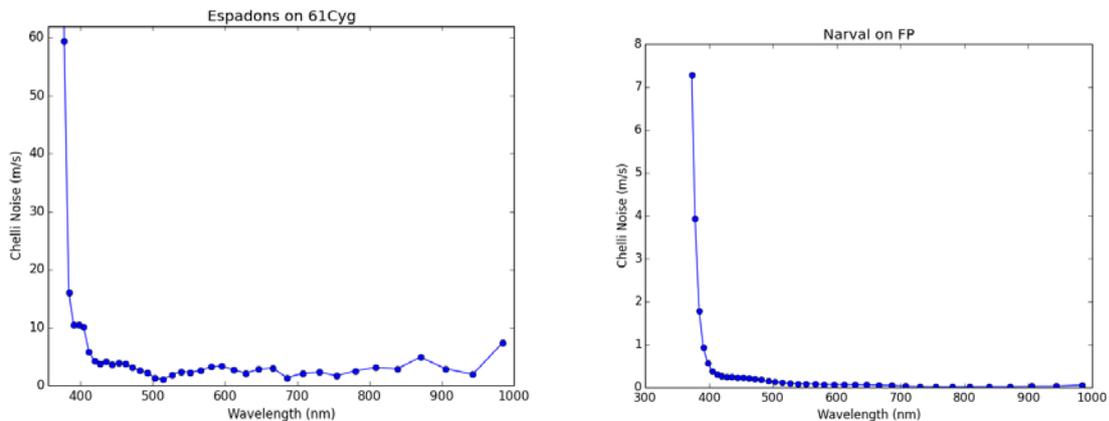


Figure 3.6: Deux tests de précision vélocimétrique théorique (en m/s) en fonction de la longueur d'onde. A droite, test sur 61Cyg observée avec Espadons, à droite une image Fabry-Perot de Narval.

Venons-en à la comparaison des caméras. D'abord, on s'attend à une variation de la précision vélocimétrique en fonction du rapport S/N. L'effet relatif est illustré Figure 3.7.

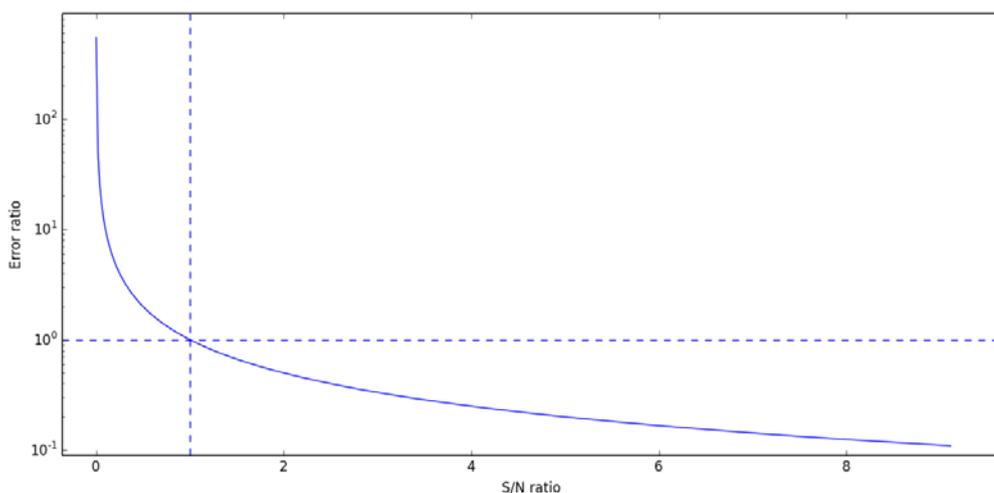


Figure 3.7: Rapport d'erreur vélocimétrique (normalisée arbitrairement à 1m/s pour S/N=3000) en fonction des rapports S/N.

On a pris comme repère une observation fictive où une erreur de 1m/s est atteinte avec un S/N de 3000.

La Figure 3.7 montre le rapport d'erreur en fonction du rapport de S/N. Par exemple, on peut lire que si le S/N est 2 fois plus grand, l'erreur en vélocimétrie est divisée par deux. Combinant les figures 3.6 et 3.7, on voit que pour une étoile de magnitude 2 observée pendant 1h avec une caméra SI on aura un S/N de moitié de celui obtenu avec D1, et donc un bruit 2 fois plus grand en vélocimétrie. Cette erreur n'est due qu'au bruit de détection.

On peut étudier la situation inverse: Si on fixe comme spécification instrumentale une erreur de 2m/s, Elle sera atteinte par le détecteur D1, pour une étoile de magnitude 2, avec seulement un rapport S/N de moitié, i.e. dans un temps total sur le ciel 4 fois plus court que pour la caméra SI. La stabilité mécanique du spectrographe et de la calibration peuvent être dégradées d'un facteur 4 en unités de temps sans que cela brouille nos mesures.

**Donc D1 est meilleur que D2, à partir de MagV < 9 (80% du temps de ciel actuel de Narval) plus les étoiles sont brillantes plus l'effet est marqué. Mais cet effet est négligeable pour des précisions vélocimétriques de ~m/s que l'on recherche.**

Pour illustrer le fait, nous calculons le cas d'une étoile K7V (comme 61Cyg) de magnitude V variable et un temps de pose de 10 minutes

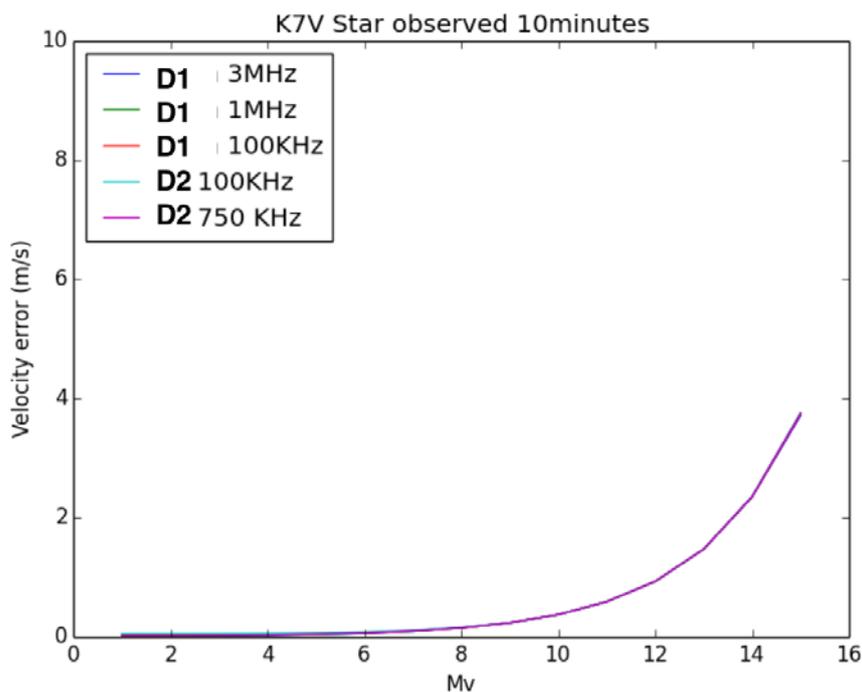


Figure 3.8: Précision vélocimétrique atteinte pour les différentes caméras et mode de lecture, pour d'une étoile K7V en fonction de la magnitude. Les performances sont identiques.

On voit que toutes les caméras montrent une performance identique. L'erreur en vélocimétrie est inférieure à 2 m/s jusqu'à la magnitude 12 ou 13. Pourquoi?

L'explication est que le S/N nécessaire pour atteindre 1m/s est très faible (rien à voir avec le cas polarimétrique donc) et que tous les modes et Caméras atteignent ce S/N et donc ~1m/s est atteint facilement. Pour confirmer cette conclusion les deux figures suivantes montrent le temps nécessaire pour atteindre respectivement les erreurs de 1m/s et 0.1 m/s pour des étoiles de différentes magnitudes (voir article de Bouchy et al. qui confirme ces conclusions)

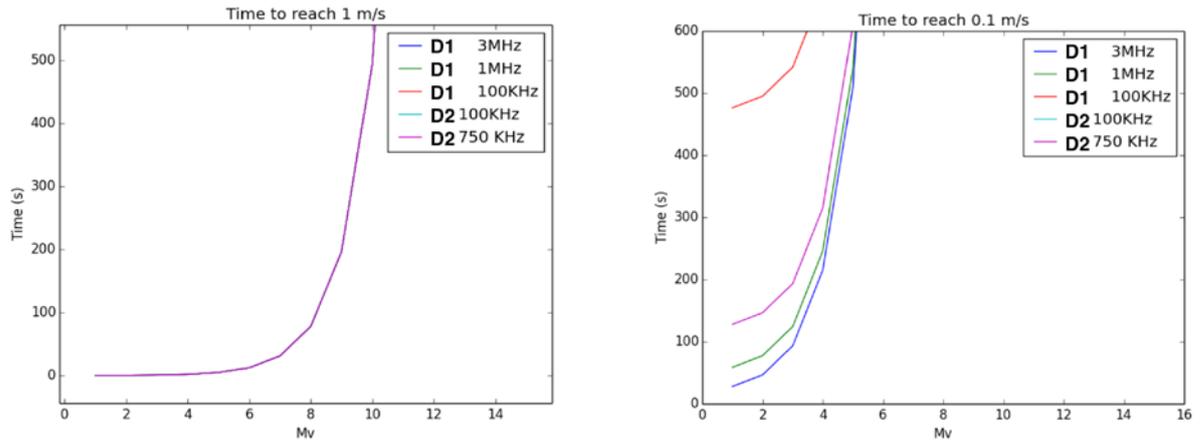


Figure 3.9: Précision vélocimétrique atteinte pour les différentes caméras et mode de lecture, pour d'une étoile K7V en fonction de la magnitude, à très haute précision.

Pour 1m/s, il n'y a pas de différence, une étoile de magnitude 8 arrive à la bonne S/N en moins de 2minutes, indépendamment du détecteur, temps de lecture inclus. Le S/N est suffisamment bas pour que la SI arrive sans avoir besoin de lire.

La différence entre les 2 détecteurs peut être vue si on demande une erreur de 0.1 m/s (figure de droite). Dans ce cas, le rapport S/N est suffisant pour demander plusieurs puits de potentiel remplis, surtout chez SI, et la différence est évidente.

Mais 0.1 m/s est au delà de ce que l'on peut prétendre avec Neo-Narval: la spécification scientifique est 1-2m/s et les modifications instrumentales sont prévues pour arriver à ces erreurs, mais pas au delà. Alors on doit conclure que, **au niveau de 1m/s, les deux détecteurs donnent des résultats identiques.**

### 3.6.3 Impact sur la Magnétométrie

L'erreur en magnétométrie dépend du rapport S/N atteint, mais il dépend aussi de la forme des raies et, si on utilise LSD, du nombre de raies utiles.

Pour pouvoir traduire les rapports S/N en erreurs magnétométriques il faut fixer certains de ces paramètres.

On suppose une raie gaussienne de largeur à mi-hauteur  $2.35\sigma$  où le pic de V a comme amplitude  $0.6/\sigma$ . Dans l'approximation dite de champ faible cette amplitude est aussi proportionnelle au champ longitudinal selon:

$$V_{max} = C \bar{g} B_{\parallel} \frac{0.6}{\sigma}$$

Le facteur de Landé effectif est pris égal à 1.2, et la constante de proportionnalité C est définie par (pour  $\sigma$  en km/s):

$$C = \frac{\mu_0 \lambda_0^2 c}{hc \lambda_0} = 4.67 \times 10^{-13} \lambda_0 [\text{\AA}] c [km/s]$$

On choisit une longueur d'onde caractéristique de 5000Å, ce qui fait que C=0.0007.

Pour la valeur de  $\sigma$ , nous allons prendre les températures effectives des types spectraux cités par Donati et al. (1997) dans son Tableau 2. L'élargissement thermique vient donné alors comme

$$\sigma = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$$

D'autres phénomènes viendront élargir le profil, en particulier la résolution spectrale de Narval; pour compenser on prendra  $m$  la masse de l'Hydrogène.

Avec ces formules on peut déjà calculer le rapport S/N nécessaire pour mesurer 1G dans une raie standard. Ceci est montré dans la Fig. de gauche

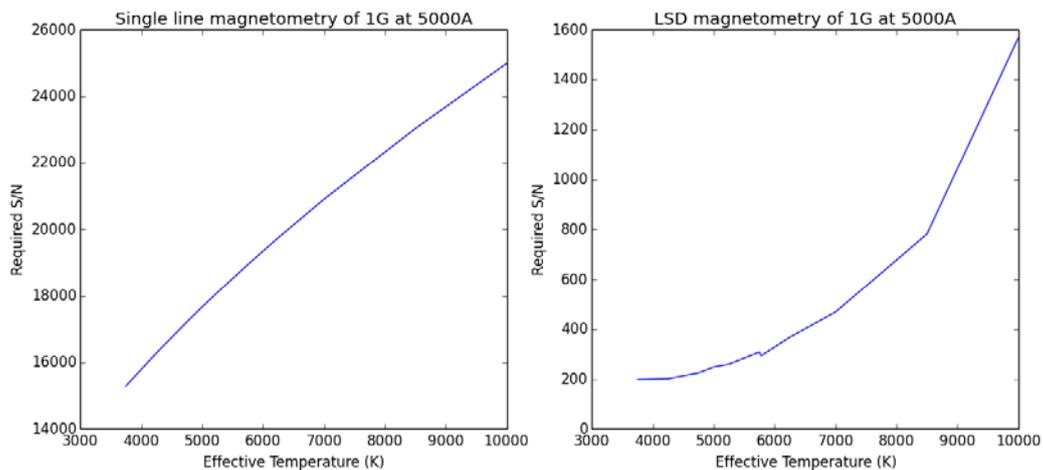


Figure 3.10: Précision magnétométrique vs type spectral en fonction du nombre de raies.

Pour référence, dans le cas solaire on a besoin d'un S/N jusqu'à 10 fois plus faible grâce à des résolutions spectrales plus grandes et a des raies de métaux lourds qui diminuent la largeur de la raie. Mais les chiffres obtenus peuvent être considérés typiques compte tenue de la faible résolution de Narval (5 fois plus faible que THEMIS), et des phénomènes d'élargissement non considérés comme le  $v \sin i$ .

Ces S/N sont hors d'atteinte pour un instrument nocturne comme Narval. La solution est la sommation de raies par LSD ou autres. Le S/N de la raie LSD est augmenté d'un facteur  $\sqrt{N}$ , où  $N$  est le nombre de raies dans le spectre. Dans le même Tableau cité plus haut, Donati et al. (1997) donnent le nombre de raies utiles en fonction du type spectral. Ils remarquent aussi que la loi en racine carrée est trop optimiste. Néanmoins, nous allons l'utiliser pour construire la figure de gauche qui montre le S/N nécessaire par pixel pour mesurer 1G après LSD. Cette fois-ci on retrouve des chiffres acceptables qui vont de 200 à 3000 pour les différents types spectraux d'étoile.

Il faut souligner que ces S/N donneront un bruit identique à l'amplitude du signal en V. A priori il faudrait un S/N 3 fois plus grand pour une détection fiable. Gardez à l'esprit que le S/N cité constitue un biais vers le détecteur 2.

Avec ces chiffres on reprend les simulations faites pour le cas de la vélocimétrie et on calcule le temps nécessaire pour mesurer 1G en fonction de la magnitude de l'étoile. La figure ci-dessous le fait pour 4 types spectraux

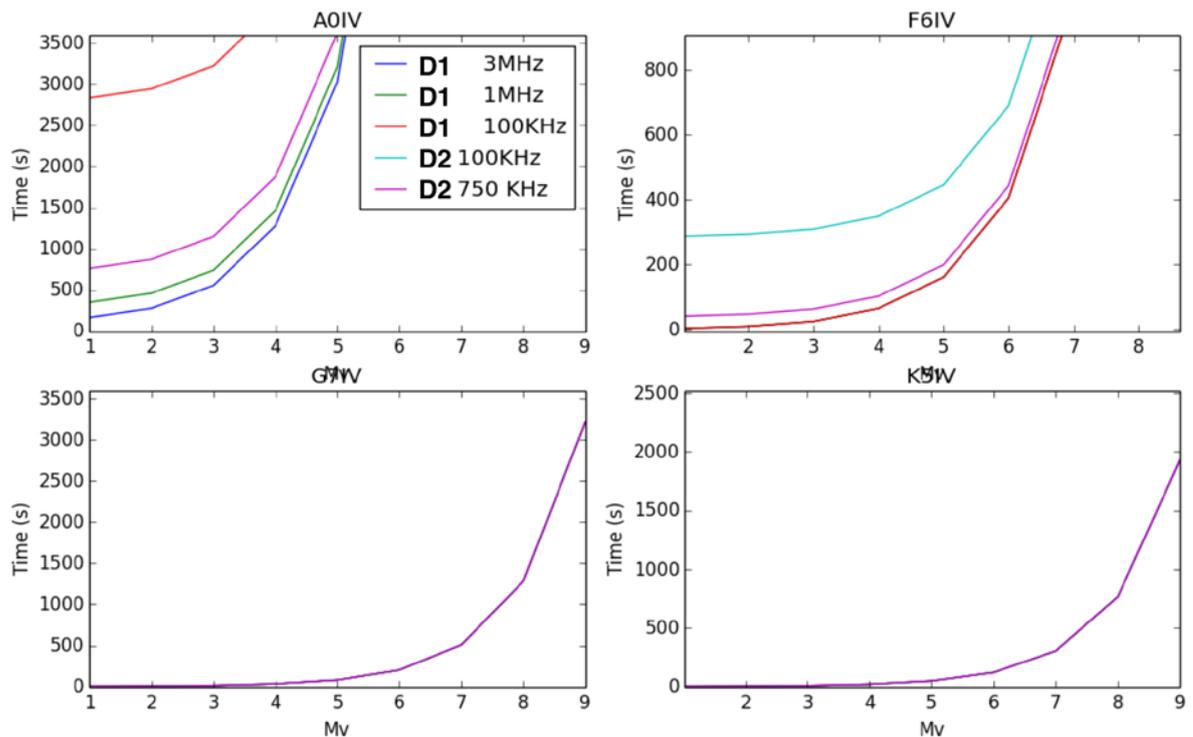


Figure 3.11 : Temps nécessaire pour mesurer 1G en fonction de la magnitude de l'étoile pour 4 types spectraux

Dans ces calculs, le temps de rotation des rhombs de Fresnel est pris égal à 0....Si on dit que ce temps est de 10sec, il n'y a pas une grande différence qualitative en ce qui concerne la comparaison des détecteurs.

La comparaison montre que pour des étoiles plus chaudes que le soleil, le détecteur D1 est meilleur. Pour ces étoiles, la différence est du double au simple en temps de pose pour une étoile de magnitude 3, ou de 10% pour une étoile de magnitude 6. Des étoiles plus faibles que la magnitude 6 ne peuvent que difficilement être mesurés avec 1G d'erreur avec Narval.

Pour les étoiles plus froides que le Soleil, les rapports S/N nécessaires, grâce au grand nombre de raies, sont plus petits et les deux détecteurs ont alors des performances similaires.

**Le détecteur D1 mesure des étoiles chaudes avec 1G d'erreur en moins de temps que le détecteur D2.**

## 3.6 Impact de la perte de résolution sur la vélocimétrie

Le choix d'un détecteur 4Kx4K pixels de 15 $\mu$ m au lieu de 4.5Kx2K pixels de 13.5 $\mu$ m donne lieu à une perte de résolution spectrale que l'on veut chiffrer.

On considère de premier abord le cas académique où le nombre de pixels à la sortie est le même (dispersion donc identique), mais que la fente équivalente de sortie est 4500/4000=1.12% plus grande. On cherche à mesurer les erreurs de vélocimétrie dues à la

convolution d'un spectre avec une fente de sortie carrée et 12% plus large. Le spectre est fait d'une série de gaussiennes en absorption sur un continu constant.

La convolution n'est pas normalisée, le test tient donc compte de la perte de résolution et du gain de flux simultané.

Nous trouvons que le résultat dépend du rapport entre les largeurs de ces gaussiennes et la largeur de la PSF au carré. Nous faisons donc l'expérience numérique où la FWHM des gaussiennes varie entre 1 et 20 km/s. Un S/N=1000 est utilisé mais la réalisation du bruit est identique entre l'expérience à 4000pixels et celle à 4500 pixels. Comme attendu, 4500 pixels permettent une meilleure vélocimétrie globalement. Mais la comparaison 4500 vs 4000 nous apporte deux informations complémentaires:

- 1) D'abord, l'erreur en vélocimétrie augmente dans les deux cas avec la résolution combinée qui, dans notre cas, varie en fonction de la FWHM des raies. Plus les raies spectrales sont étroites et résolues, plus l'erreur est petite. On a donc intérêt à avoir des raies étroites et très résolues pour calibrer et mesurer.
- 2) La perte en résolution avec 4000 pixels donne lieu à une erreur 20% supérieure en vélocimétrie quand les raies sont étroites et résolues. Mais la différence se réduit quand les raies observées sont larges et/ou moins résolues. Avec des FWHM de 5km/s ou plus, la perte entre 4500 et 4000 pixels est constante et d'environ 5%

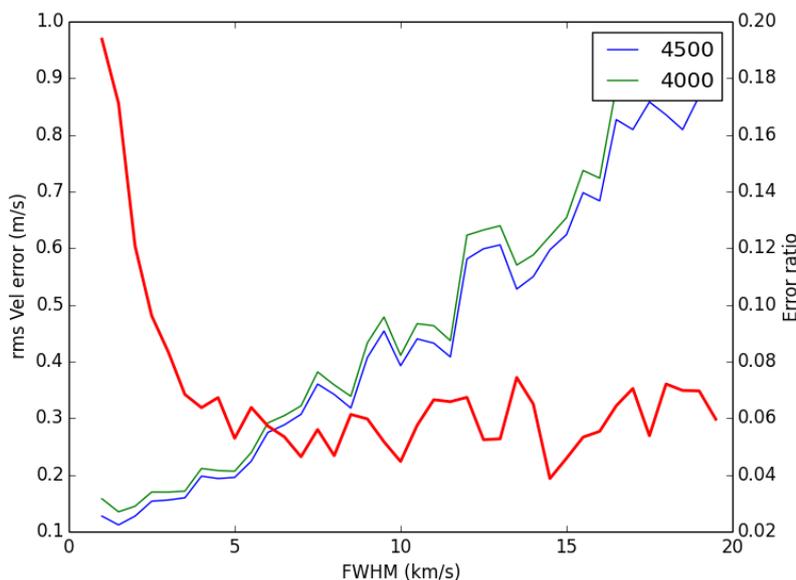


Figure 3.12 : erreur en  $v_{rad}$  en fonction de la FWHM des images.

La conclusion est que **notre intérêt est d'avoir des raies étroites et bien résolues**. Mais au delà d'une FWHM de 5km/s, **la différence entre 4500 et 4000 est de 5%**, plus petite que la différence de taille. Les étoiles ont toujours des raies avec FWHM>5km/s et donc on peut conclure en une perte de 5% en vélocimétrie si rien n'est fait.

Les chiffres correspondent à un échantillonnage de 1.8(km/s)/pixel. La valeur de l'erreur en vitesses (<1m/s) ne doit pas être tenue en compte car elle profite des avantages d'une simulation idéalisée. Seulement les rapports et tendances sont importants.

## 3.7 Grade 0 ou grade 1?

La vélocimétrie est basée sur une excellente extraction et calibration, facilitée par l'achat d' un détecteur sans faille, ayant un minimum de colonnes mortes et de trappes, mais surtout présentant une qualité extrême au niveau de la CTE (charge transfer efficiency). Pour le détecteur en question (EEV CCD231-84-1-F21 Back illuminated, Deeply Depleted, 4096 x 4112 pixels, avec une taille de pixels de 15x15 microns<sup>2</sup>, traitement anti-reflet : astro multi-2) il n'existe que le grade 1 garanti, en fonction de ce qu'EEV arrive à produire on peut avoir un très bon grade 1 (quasiment un grade 0, ou même un grade 0). Si par contre on commande un grade 0 et que EEV n'arrive pas à faire un grade 0, il n'y a pas d'engagement ferme pour la fourniture d'un grade 0. L'entreprise peut tout aussi bien décider qu'un grade 0 demandera trop d'effort ou d'investissement, et livrer le détecteur tel quel au tarif d'un grade 1. Dans tous les cas de figure il est alors avantageux de commander un grade 1.

## 4. Stratégie de calibration

Nous avons compris que l'acquisition simultanée de la 3ème fibre Fabry-Perot permettra une calibration dans les spécifications techniques de Neo-Narval. Un aspect fondamental est que cette voie doit être modulée en fonction de la magnitude de l'objet observée, ou plus précisément du temps de pose.

Un point particulièrement important concerne la détermination du barycentre de la pose. Des simulations sur la précision requise sont en cours. Nous savons déjà que la connaissance précise de l'heure locale (time-stamp), mais aussi du flux en fonction de l'avancement de la pose, sont primordiaux.

Les calibrations classiques (Flat, Th/Ar, Dark, Bias) seront bien entendu incluses et prévues dans la nouvelle unité de calibration (voir annexe A5).

Le dépouillement sera traité dans un prochain document, il est à noter que les simulations présentées en Section 3 ont déjà permis de clarifier des aspects majeurs de l'approche adoptée, ainsi que d'acquérir une série d'outils constitutifs des codes de dépouillement final (DRS). Une collaboration avec le projet SPIrou est envisagée pour la partie commune du code, surtout que dans le futur une coexistence et un fonctionnement simultanée du projet SPIP et de Neo-Narval sont envisagés et souhaitables.

**La solution préconisée à l'heure actuelle est de copier l'unité de calibration de SPIrou qui répond parfaitement au cahier des charges Neo-Narval, plutôt que de modifier l'unité de calibration Narval.**

# Conclusions

Après étude nous concluons qu'atteindre la précision en vélocimétrie souhaitée demande la présence permanente et simultanée d'une 3ème voie avec un signal de calibration des vitesses fournie par un FP stable.

Cette 3ème voie demande des modifications optiques de la sortie du spectrographe et une caméra CCD au format adapté. La nouvelle géométrie du détecteur a été étudiée et son impact sur les mesures déterminé et jugé acceptable.

La calibration faite avec la 3ème voie servira au mieux si on diminue les perturbations. Trois sources de faux signal vélocimétrique sont identifiées:

1. Les variations de la distribution de l'intensité à l'entrée du spectrographe, ce qui nous force à utiliser des fibres octogonales et un brouilleur pour les diminuer (étude à faire).
2. La variation d'indice de réfraction due à celle de la pression et de la température ont un impact très important sur la réponse du réseau de diffraction. Cette variation sera contrôlée par placement du réseau dans une enceinte isobarique.
3. Les vibrations du détecteur, ce qui nous laisse favoriser une solution d'un détecteur refroidi à distance avec une gestion du froid par chiller de préférence.

Dans l'ensemble, et en conclusion, notre étude nous confirme que Neo-Narval sera intrinsèquement stable à mieux que 2m/s et que les outils de calibration et dépouillement pourront partir de cette base pour s'approcher, voir dépasser, le 1 m/s en relatif.

# Annexes

## Annexe A1: Effet de P et T sur l'indice de réfraction

### Spécification scientifiques à atteindre avec Neo-Narval:

Stabilité meilleure que 3m/s (goal 1m/s).

Cette stabilité du faisceau de 1m/s implique physiquement de pouvoir rattraper des variations de  $\Delta x = 5\text{nm rms}$  (0.027  $\mu\text{rad}$ ) sens de la dispersion et  $\Delta x = 135\text{ nm rms}$  (0.73  $\mu\text{rad}$ ) cross-dispersion. Cette contrainte physique absolue ne doit pas forcément être atteinte, en revanche il est indispensable de définir une spécification de la précision de mesure nécessaire pour pouvoir rattraper les évolutions d'angle de faisceau dans le temps.

L'étude du système Narval et l'expérience de SOPHIE montrent que cette mesure de stabilité peut être atteinte si on stabilise à la fois, l'indice de réfraction, l'angle du faisceau, la PSF (Pepe et al 2014, Bouchy et al 2014, Halverson et al 2015) et que l'on mesure les évolutions avec un calibreur (Fabry-Perot stabilisé ou lampe à cathode creuse Thorium, Uranium) en temps réel pour des amplitudes d'angle de  $3.3 \times 10^{-6}$  deg.

### Stabiliser l'indice de réfraction

Les composantes du spectro sensibles à l'indice de réfraction sont:

Pour le réseau on a:

$$\Delta n / n = \Delta v / c \quad (1)$$

Pour  $\Delta v_{\text{rad}} = 1\text{ m/s}$  on a  $\Delta n = 3.3 \cdot 10^{-9}$

Pour un prisme on a:  $\sin i_o = \sin \alpha (n_2^2/n_1^2 - \sin^2 i_i)^{1/2} - \cos \alpha \sin i_i$  (2)

$$\Delta n \approx 10^{-7}$$

Pour trois prismes successifs (effet linéaire, correspondant à un grand prisme) on voit donc que la sensibilité est 30 fois moindre à la variation d'indice.

La variation relative de l'indice de réfraction en fonction de la température pour des verres classique tourne autour de  $\Delta n \sim 3 \times 10^{-8}$  pour  $\Delta T = 0.01\text{K}$ . Les prismes ne sont donc pas les éléments

critiques quant aux variations de température (au niveau changement d'indice). Une éventuelle variation géométrique due à la dilatation n'est pour le moment pas prise en compte.

On peut traduire la contrainte d'indice en contrainte ambiante. L'indice de réfraction de l'air dépend de la température et de la pression (loi de Gladstone) :

$$n-1 = 0.08 P(\text{bar})/T(\text{K}) \quad \text{à } \lambda = 500 \text{ nm} \quad (3)$$

Donc, dans un volume infini on a:

$$\partial n / \partial P (T=300\text{K}) = 0.08/300 = 2.7 \times 10^{-4} / \text{bar} \quad (4)$$

$$\partial n / \partial T (P=1\text{bar}) = -0.08/T^2 = -8.8 \times 10^{-7} / \text{K} (T \sim 300\text{K}) \quad (5)$$

Loi réseau:

$$\Delta n / n = \Delta v / c = 1/3 \times 10^{-8} = 3.3 \times 10^{-9} \quad (6)$$

On trouve pour un  $\Delta n$  toléré de  $3.3 \times 10^{-9}$  (cad 1m/s):

$$\Delta P (T=300\text{K}) = 1.2 \times 10^{-5} \text{ bar} = 12 \text{ } \mu\text{bar}$$

$$\Delta T (P=1\text{bar}) = -3.4 \times 10^{-3} \text{ K} = -0.0034 \text{ K}$$

Or, nous étudions le cas particulier d'un volume fini (une cuve autour du réseau).

Dans ce cas là, la loi des gaz parfaits s'applique comme suit:

$PV/T = \text{cste}$  (gaz parfaits  $\text{cste} = N_p \times k_B = 1113 \text{ J/K}$ ) (nombre particules \* constante de Boltzmann), donc à  $V$  constant,  $P/T$  est constant, donc  $n-1$  est constant.

$n$  ne va varier que pour  $V$  variable.

en remplaçant  $P/T$  dans la loi de Gladstone par la loi des gaz parfaits ( $P/T = 1113/V$ )  
(on a pris  $V = 3\text{m}^3$ ,  $T$  ambiante,  $22.4 \text{ l/mol}$  pour  $6.023 \times 10^{23}$  particules [1 mole])

$$n-1 = 0.08 / (1.013 \times 10^5) \times P/T \quad (\text{il faut se ramener en SI [donc Pa] pour la loi de Gladstone}) \quad (7)$$

$$n-1 = 0.08 / (1.013 \times 10^5) \times N_p k_B / V \quad (8)$$

Tout le terme  $0.08 / (1.013 \times 10^5) \times N_p k_B$  est une constante pour une enceinte fermée (sans fuites). Nous l'appellerons  $K$ , et on peut écrire tout simplement:

$$V = K / (n-1) \quad (9)$$

$$\partial V = - K \partial(n-1) / (n-1)^2 \quad (10)$$

$$\partial V / V = - \partial(n-1) / (n-1) \quad (11)$$

Pour l'air on a  $(n-1) = 0.0003$  et pour 1m/s  $\partial n = 3.3 \times 10^{-9}$  (issu de la loi réseau):

$$\Delta V/V < 10^{-5} \quad (12)$$

Cette relation est donc totalement indépendante de la forme de la cuve, de sa taille. Elle ne tient compte que du nombre de la variation relative de la densité de particules dans la cuve.

Pour une enceinte fermée,  $\Delta V = 3 \text{ CTE } \Delta T \cdot V$  (avec CTE coefficient de dilatation), et donc:

$$\Delta T = 3 \text{ CTE } \Delta V/V, \text{ avec } \text{CTE}_{\text{acier}} = 11 \cdot 10^{-6} / \text{K} \text{ on trouve}$$

$$\Delta T < 0.34^\circ \text{K} \quad (13)$$

Uniquement un changement de température au dessus de  $0.34^\circ \text{K}$  pourrait générer un pb Au niveau variation du à la dilatation thermique unique. Si on stabilise à  $1/100\text{K}$  (facilement atteignable), alors on voit bien que l'impact de cet effet sur l'indice de réfraction est totalement négligeable. Le bénéfice sur la stabilité mécanique doit également se retrouver par une telle stabilisation en température (à vérifier).

Il ne faut ceci étant pas perdre de vue que la relation (12) est également valable pour toute autre cause de changement de volume: il est impératif de vérifier que les changements de volume dues à des changement de pression ambiante (contraintes mécaniques) respectent la condition (12).

Une stabilisation en température au  $1/100\text{K}$  et une variation de volume d'une cloche autour du réseau tel que (12) est vérifiée assurera, au niveau de l'indice, le respect d'un

$$\Delta v_{\text{rad}} = 1 \text{ m/s.}$$

## Stabiliser l'angle de faisceau *hors réseau*

Les composantes du spectro sensibles aux variations de température :

Table optique (trajet optique 10.3m):

$$\rightarrow \Delta f \equiv \text{variation de foyer} = f \times \text{CTE} \times \Delta T = 10.3 \times 11 \times 10^{-6} \times 0.01 = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$\rightarrow \Delta \text{position PSF} (\equiv \Delta x = \Delta f \times \sin \theta) \quad \theta \equiv \text{inclinaison du CCD sur l'axe optique} \approx 10'$$

$$\Delta x = 1.1 \times 10^{-6} \times \sin(10/60) = 3.3 \times 10^{-9} \text{ m} (\Rightarrow \Delta v_{\text{rad}} = 0.66 \text{ m/s})$$

Montures 3-point des miroirs: On peut retrouver un effet d'angle sur une expansion différentielles des trois points pour toutes les composantes montées sur une monture à trois points: Main Collimator, Transfert Collimator, Flat Mirror, Réseau et Prisme

Chaque axe des supports des montures à trois points une des tiges d'acier (stub) de 50 mm de long sur les collimateurs M1 et M2 et réseaux, et miroir plan, les leviers vont de 450 mm sur l'axe z, à 145 mm. L'effet d'une variation de température sera de changer l'angle du faisceau en supposant que la déviation  $\Delta \alpha$  sera dominée par une expansion différentielle d'une tige par rapport à

l'autre, la tolérance d'usinage sur les tiges est définie comme  $\Delta L = \pm 0.15$  mm pour des objets de cette taille, pour  $\Delta T < 0.01K$ :

$$\Delta\alpha < |\pm| \frac{\Delta T * \Delta L * CTE}{L}$$

$$< |\pm| 0.1 \frac{150 [\mu m] * 145 * 210^{-9} [\mu m]}{1000 [mm]}$$

$$< \mathbf{1.24 \times 10^{-10} \text{ rad}},$$

qui est un facteur 150 fois plus faible que la limite.

## Annexe A2: Considérations générales taille CCD - taille pixel, layout optique

Le tableau ci-dessous compare les différentes combinaison taille du CCD - taille pixel. La précision vélocimétrique finale dépend, parmi d'autres aspects, de :

- nombre de raies
- flux total dans les raies
- résolution spectrale

Actuellement, le CCD 2k4.5k 13.5microns est optimisé pour une bonne couverture spectrale, et une résolution de  $R = 65000$  dans Narval. Sous hypothèse qu'il est indispensable de changer de CCD pour un modèle permettant l'acquisition simultanée d'une 3ème fibre de calibration, 4 détecteurs restent intéressants. En orange sont marqués les contraintes menant à l'« exit » d'un capteur.

Paramètre	4k4k 12 microns	4k4k 15 microns simple	4k4k 15 microns DD	4k4k 15 microns DD	2k4.5k 13.5 microns DD	Remarque

Slices	Peu importe	Peu importe	3	4	3	
Couverture spectrale	<b>non perte de 10% taille physique</b>	oui	oui	Oui	<b>Non</b> (oui sans 3ème fibre)	Triplet IR Call serait perdu
Efficacité QE		Bonne	Excellente	Excellente	Excellente	Plus de flux dans le rouge
Franges – domaine rouge inutilisable !		<b>très frangé dans le R</b>	Pas de franges	Pas de franges	Pas de franges	D > 30% flux utilisable dans le Rouge pour Teff = 5000K. <b>Voir étude en annexe !</b>
Résolution			Réduite de <10%	<b>100% ??</b>	<b>100%</b>	Précision vélocimétrique pour R réduite récupérable
3ème fibre FP sur 100% détecteur			<b>Oui</b>	<b>Que dans le B</b>	<b>Que dans le B</b>	Une 3ème fibre partielle peut suffir
Qualité image dans les coins du CCD			<b>Oui</b>	<b>mauvaise</b>		Champ trop peu corrigé – pas de solution optique viable (4 slices)
Vide sur > 5ans			<b>Oui</b>			Aspect très important
Refroidissement Peltier			<b>Existe</b>			Aspect très important
Conclusion			<b>solution retenue</b>			

A été réfléchi à une nouvelle option : 4k4k 15 microns DD, en version 4 slices, mais pour ne pas détruire la PSF sur les extrémités du détecteur on limite la cross-dispersion supplémentaire, et on n'intercale la 3ème fibre que sur une partie du domaine spectral/détecteur. Cette version n'est pas pleinement satisfaisante, car le gain maxi vient d'une calibration supplémentaire sur TOUT le détecteur, donc tout le domaine spectral.

## Annexe A3: CCD deeply depleted ou non? Impact sur les photons "utiles" en fonction de Teff de l'étoile

Dans les figures ci-dessus on voit trois courbes, la plus basse est pour le CCD actuellement en utilisé sur Narval, ensuite vient celle du CCD « simple », puis celle correspondant à la version « deeply depleted ». Nous avons utilisé des catalogues de raies spectrales, intégré la largeur équivalente totale disponible,

Teff = 5000 K

domaine bleu: nb raies: 7224 prof raies somme: 3912.842 prof moy 0.541644795127

photons b anciens: 1755385956.26 photons b simple: 1839262843.49 photons b dd: 1817654900.72

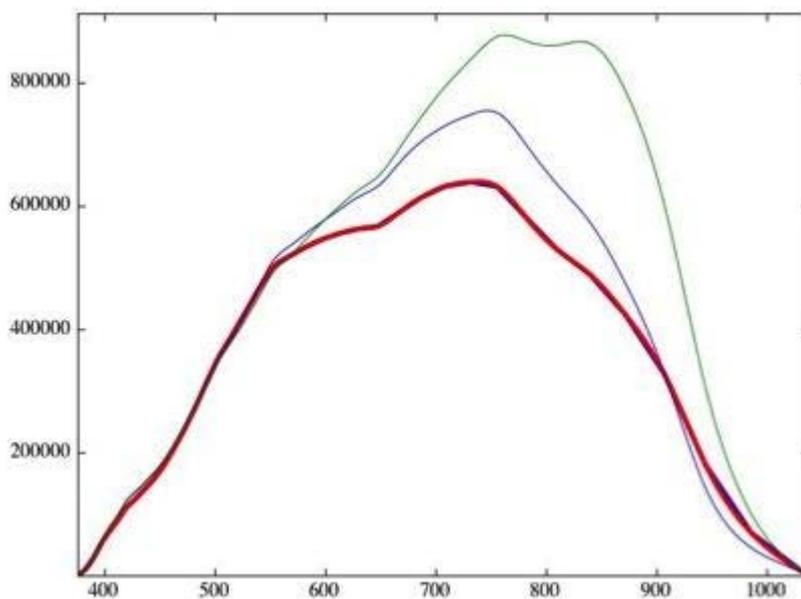
domaine rouge: nb raies: 1424 prof raies somme: 489.607 prof moy 0.343825140449

photons r anciens: 692052110.348 photons r simple: 787770743.953 photons r dd: 999576204.397

rapport flux r sur total old: 28.276593381 %

rapport flux r sur total simple: 29.9870830628 %

rapport flux r sur total dd: 35.4808025008 %



6000

domaine bleu: nb raies: 4825 prof raies somme: 2266.118 prof moy 0.469661761658

photons b anciens: 1252057443.64 photons b simple: 1314571584.5 photons b dd: 1299300331.98

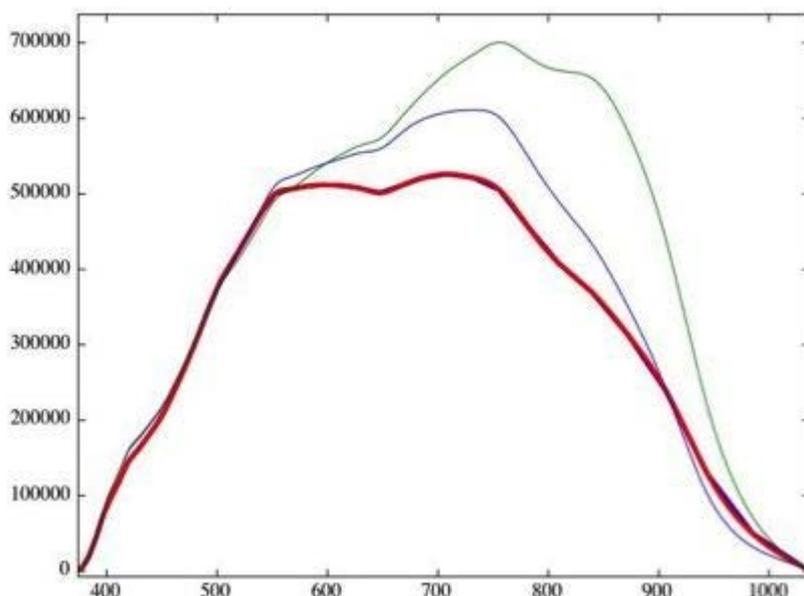
domaine rouge: nb raies: 953 prof raies somme: 267.429 prof moy 0.280618048269

photons r anciens: 368981298.51 photons r simple: 420048164.32 photons r dd: 528661108.92

rapport flux r sur total old: 22.7620283782 %

rapport flux r sur total simple: 24.2155760423 %

rapport flux r sur total dd: 28.9208019979 %



7500

domaine bleu: nb raies: 2827 prof raies somme: 1180.974 prof moy 0.417748142908

photons b anciens: 796717935.244 photons b simple: 839624764.25 photons b dd: 830606371.484

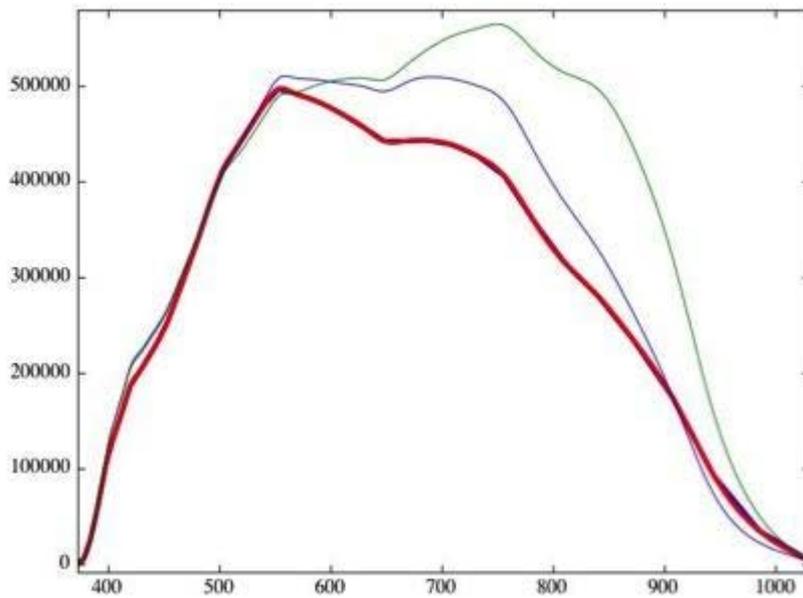
domaine rouge: nb raies: 587 prof raies somme: 148.388 prof moy 0.252790459966

photons r anciens: 168628473.624 photons r simple: 191429257.92 photons r dd: 248973488.287

rapport flux r sur total old: 17.4681826208 %

rapport flux r sur total simple: 18.5663654672 %

rapport flux r sur total dd: 23.0620723454 %



10000

domaine bleu: nb raies: 792 prof raies somme: 243.091 prof moy 0.306933080808

photons b anciens: 234253323.542 photons b simple: 248235675.87 photons b dd: 245358618.79

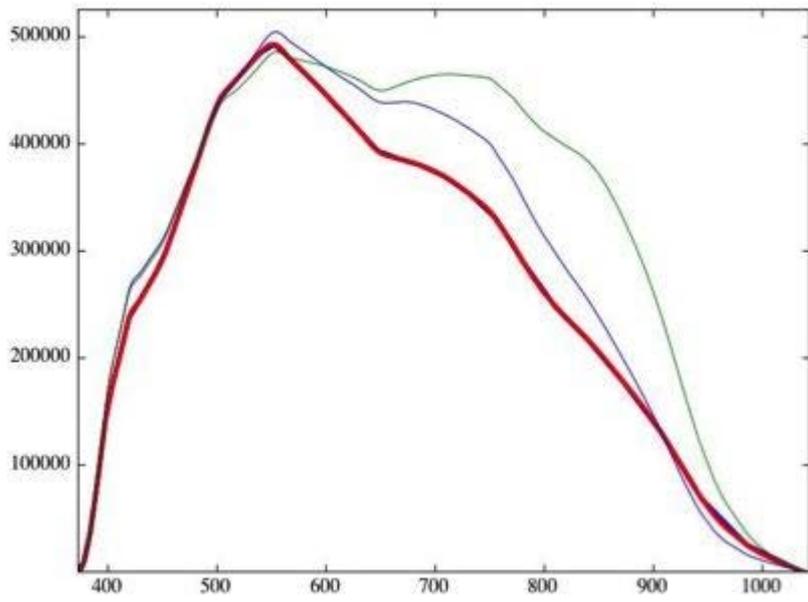
domaine rouge: nb raies: 180 prof raies somme: 46.5 prof moy 0.258333333333

photons r anciens: 35509427.7565 photons r simple: 40045415.5269 photons r dd: 56075621.6008

rapport flux r sur total old: 13.1632064047 %

rapport flux r sur total simple: 13.8911002913 %

rapport flux r sur total dd: 18.6029369219 %



## Annexe A4: Calculs d'erreur sur les composants Narval

La pression de l'air et la température (variables d'état) ont un impact direct sur les matériaux (flexion de la cuve, expansion thermique de la table du spectro, variation des positions physiques des composants C1, C2, ...), si le volume d'une cuve rigide est constant au premier ordre  $dV = 0$ . Les variations de volume de la cuve seront causées par des influences directes sur les matériaux (variation de pression externe, variation de température des parois).

Les effets thermiques sont-ils significatifs sur le volume de la cuve?

**Comme décrit en Annexe A1, afin de limiter l'erreur vélocimétrique à 1m/s, on a pour  $\Delta T < 0.34^\circ\text{K}$  une valeur maximale de variation de volume autorisée de  $\Delta V/V < 10^{-5}$ .**

Les flexions de pression sur la cuve sont plus complexes à calculer et demandent un modèle mécanique en éléments finis.

Chaque composant optique du spectrographe est posé sur une table optique et de sa position dans l'espace sur les 3 axes de translation et les 3 axes de rotation ( $x, y, z, \varphi, \theta, \rho$ ) dépend l'angle du faisceau. En toute rigueur nous devrions modéliser le spectrographe et calculer l'impact de chacune des composantes sur les 6 degrés de liberté. En pratique, certains axes n'ont pas d'impact. Le spectrographe Narval contient 8 composants optiques posés sur un banc optique. En suivant le faisceau:

- le slicer monté sur une monture à trois points, elle-même ajustable en rotation selon l'axe  $z$  à la verticale de la table optique. Un seul mode POL3 est utilisé pour Narval, une variation de la position du banc implique une variation de la position du dekker et de l'angle du faisceau.
- le collimateur principal M1 et de transfert M2 (zerodur,  $0.05 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) sont des sections d'un paraboloïde. Ajustable sur 6 degrés de liberté en invar ( $2 \times 10^{-6}$ )
- Le réseau est un réseau à échelle 79gr/mm, angle de blazer de  $63^\circ 26'$ , dont l'incidence de faisceau est à  $0.6^\circ$  de Littrow et  $0.6^\circ$  en axe  $z$ .
- un miroir plan monté sur une monture à trois point en invar.
- un prisme double (d'angle  $34.5^\circ$ ) monté dans une boîte avec un seul axe de rotation  $z$ .
- un objectif à 7 lentilles monté sur une platine fixée à un banc.
- le cryostat est attaché par le col à une monture ajustable sur 6 degrés de liberté

Pour chacun des composants une modification de sa position va induire une modification de l'angle  $\Delta\beta$  qui se traduira par une variation de position  $\Delta x$  en pixels sur le CCD. La sensibilité à un changement d'inclinaison du réseau a été traité en section 2.2.

Chaque axe des supports des montures à trois points une des tiges d'acier (stub) de 50 mm de long sur les collimateurs M1 et M2 et réseaux, et miroir plan, les leviers vont de 450 mm sur l'axe  $z$ , à 145 mm. L'effet d'une variation de température sera au premier ordre de changer la focale, pour  $\Delta T < 0.1^\circ$  de:

$$\begin{aligned}\Delta f &= -\Delta T * L * CTE \\ &= -0.1 * 50 \times 10^3 [\mu\text{m}] * 12 \times 10^{-6} = 0.06 \mu\text{m} \rightarrow \text{négligeable},\end{aligned}$$

et de changer l'angle du faisceau en supposant que la déviation  $\Delta\beta$  sera dominée par une expansion différentielle d'une tige par rapport à l'autre, l'erreur d'usinage sur les tiges est définie comme  $\Delta L = \pm 0.15$  mm pour des objets de cette taille, pour  $\Delta T < 0.1^\circ$ :

$$\begin{aligned}\Delta\beta &< |\pm |\Delta T * \Delta L * CTE / L_2 \\ &< |\pm |0.1 * 150 [\mu\text{m}] * 12 \times 10^{-6} [\text{K}^{-1}] / 145 \times 10^3 [\mu\text{m}] \\ &< 1.24 \times 10^{-9} \text{rad},\end{aligned}$$

qui reste un facteur 15 fois plus faible que la limite.

Toutes ces erreurs cumulées peuvent cependant aboutir à une somme non négligeable, elles sont donc incluses dans le modèle système avec une prise en compte de la géométrie de chaque composant.

## Annexe A5: Unité de calibration

### 5.1 Description of the calibration needs

#### 5.1.1 Spectropolarimetry

Technical specifications have not evolved from Narval to Neo-Narval. The reader is referred to Narval/Espadons online documentation and to the history of calibration maintenance on TBL www pages (and appendix 1).

In short, spectropolarimetry requires three levels of calibrations, (i) a CCD characterisation done with a bias image measuring the amplification off-set, a dark current quantification, a pixel-to-pixel sensitivity quantification (traditionally done with a flat illuminated image). (ii) A geometric calibration done by a series of flats (or Fabry-Perot) diffusing light across all orders as flat as the echelle-grating blazing function allows and a Fabry-Perot cavity used to fit the slit position. (iii) A wavelength calibration done with hollow cathode lamps providing many lines in all orders.

The broad wavelength range of Narval (370-1000 nm) makes the choice of halogen lamps and hollow cathode lamps tricky. Finding halogen and hollow cathode sets following the specs is not trivial and required to use 2 halogen lamps and 2 hollow cathode lamps for intensity and color balance. Another option is to use a solar spectrum for wavelength calibration. Of course, Neo-Narval has the same wavelength range than Narval so the current situation (Th Lamps and Halogens) works, hence the constraints from spectropolarimetry is to provide at least the current Narval calibration specifications.

A notable improvement of Narval in the red part of the spectrum will come from the new detector/camera, and progress made in the last 10 years in calibrators will tend to simplify the CU. It is expected that only one lamp for wavelength calib and one lamp for flats will be needed. Actually, a minimal solution can use only a Fabry-Perot file and solar spectrum as a complete calibration set (A. Lopez-Ariste, priv. com.).

The current wavelength solution given by the reduction software Libre-Esprit, gives an absolute Mean rms accuracy in radial velocity of ca. 200 m/s, averaged over all orders. The measured stability (cf document on detector choice) over a day/night with regard to temperature and pressure is much better (a few m/s) but not needed for spectropolarimetry.

#### 5.1.2 Velocimetry

Velocimetry is much more demanding in terms of wavelength definition and stability. The stability requirements of  $\Delta v < 3\text{m/s}$ , requires us to monitor any shift during the night to 1m/s. This means that :

1. an absolute wavelength solution can be found to  $\Delta v \sim 1\text{m/s}$  with some wavelength calibrator (Hollow cathode lamp) from one night to another. Given the number of Thorium reference lines (>3000), such precision ought to be feasible, and has been demonstrated by previous tests with Espadons and Narval

2. Any wavelength shift should be monitored to 1m/s during any night (and following day). That requires a constant calibrator to be fed in parallel to the science channel. This requires an additional stable reference, such as a stable Hollow cathode lamps or a stabilized Fabry-Perot cavity providing a continuous reference on the detector at the same time as science data is taken.

Geneva Team (priv. comm. F. Pepe), based on their CORALIE experience, suggests that night-to-night rv shifts < 3m/s can be corrected. Larger shifts might induce additional error in radial velocity.

## 5.2 Technical constraints on Neo-Narval calibration unit

The technical capabilities identified to reach the science specs can be summarized as follows, in order to give us a maximum redundancy:

- each calibration lamp (Thorium, Fabry-Perot, Halogen) must be injectable simultaneously or independently in each fibre. Either going through the polarimeter or fed directly to the spectrograph (calibration fibre only). cf Figure 3.1:
  - Namely, the Fabry Perot lamp must be injectable simultaneously in fibres 1,2 and 3, but also only in 3 (the calibration fibre) in parallel to science data. It must be the same lamp. A fibre must come from the Fabry-Perot box or calibration box to the polarimeter environment in order to be injected in fibres 1 & 2, while a 3rd fibre must take the same light and inject it directly in the scrambler and image slicer (fibre 3).
  - The same injection options must be possible for the absolute wavelength calibrator (Hollow Cathode Lamp Thorium+gaz), and Halogen lamps for flats. It must be ascertained that each time it's exactly the same lamp which is injected, we cannot make simultaneous use of two different lamps.
- The Fabry Perot lamp and absolute wavelength calibrators must have an adjustable neutral density wheel, and the density must be adapted automatically as a function of the total exposure time, in order to guarantee the same exposure level ( $\frac{2}{3}$  of full well?) independently of the exposure time.
- Not directly concerning the calibration unit, but important enough to be mentioned here is the fact to register continuously the flux rate via some counter and to register it, from beginning till the end of the true exposure. This enables us to derive the barycenter of the exposure. Once the barycenter is determined, the continuous flux count rate curve does not need to be kept, but it could be.

In short, all the following output permutation should be feasible (cf Fig 3.1):

Template	CU output towards Polarimeter	CU output towards spectrograph
#1	Stabilised Fabry-Perot	Stabilised Fabry-Perot
#2	Absolute calibrator (Sun, Th, ...)	Absolute calibrator (Sun, Th, ...)
#3	Flat	Flat
#4	Stabilised Fabry-Perot	Absolute calibrator (Sun, Th, ...)
#5	Absolute calibrator (Sun, Th, ...)	Stabilised Fabry-Perot
#6	Star/Sky	Stabilised Fabry-Perot
#7	Star/Sky	Absolute calibrator (Sun, Th, ...)

### 5.3 Existing Calibration Units

This section describes existing calibration units and analyses their capabilities with regard to the technical constraints (cf previous section).

#### 5.3.1 Narval

Reference documents: ESP-CB-FRD\_2.pdf: Espadons CU, [Narval elec vol1](#): Narval electronics vol1

## Technical description

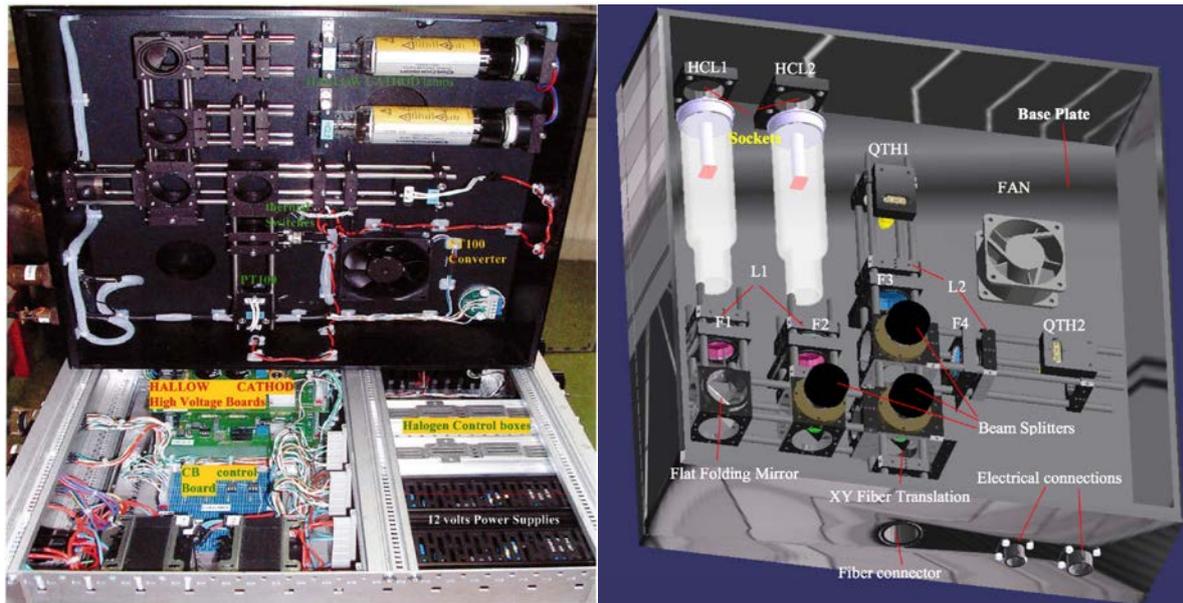


Fig 2.1: photo of Narval CU (left) and mechanical drawing (right), (credits L Parès)

Narval CU was designed to have no moving parts and multiple lamps lighting the pupil. It has two Hollow Cathode Lamps (originally a “blue” Th-Ar and a “red” Th-Ne) for wavelength calibration and two halogen lamps (again, one “blue”, one “red”) for flats. There is an additional Fabry-Perot cavity in the polarimeter, fed by the Halogen lamps, for order and slit definitions. All lamps are directed through a series of 45° (flat-folding) mirror and beam-splitters to a single output (800 $\mu$ m fiber) and fed to the polarimeter after the Atmospheric Dispersion Corrector, and before the guiding-mirror entrance pupil.

The Lamps type have evolved a bit since 2007. Current Hollow cathode lamps come from Australian Photron Corp. TBL tech team will be testing simple Th (no filling rare gas) lamps in order to quantify their reliability. Halogen lamps are still coming from the original provider, they are simple tungsten halogens (Heraeus QTH lamps, Mazda Xenon car light).

A better solution adopted by current instruments (SOPHIE, Fabry-Perot modules) are [Laser Driven Light Sources](#) providing stable flat emission across the UV-NIR spectrum.

## Narval CU physical location

Narval calibration unit is currently attached to TBL tube. The calibration box and the polarimeter electronics are attached on each side of Narval Polarimeter with a robust iron welded frame. This was done for injection purpose, the 800 $\mu$ m fiber is short and cannot flex easily, hence a non-moving CU with regard to the pupil was favored.

## 5.3.2 SOPHIE

### Technical description

SOPHIE calibration unit uses a very different concept than Narval. It uses a rack of calibration lamps feeding a moving fibre mounted on a chariot. The output fiber is then fed to the T193 bonnette. In the bonnette a moving mirror allows users to select the science pupil, the calibration pupil, or both (HR, LR, slit vs circle) at the same time. Among the rack incoming fibers are allowed, for instance a FP fiber can be injected in SOPHIE calibration unit and re-injected to the output fiber.

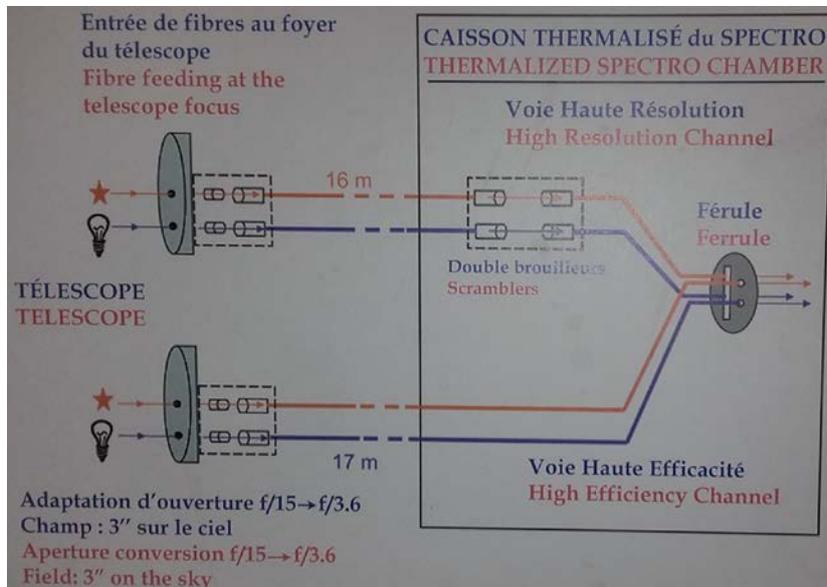


Fig 2.2: SOPHIE CU (photo credit R Cabanac)

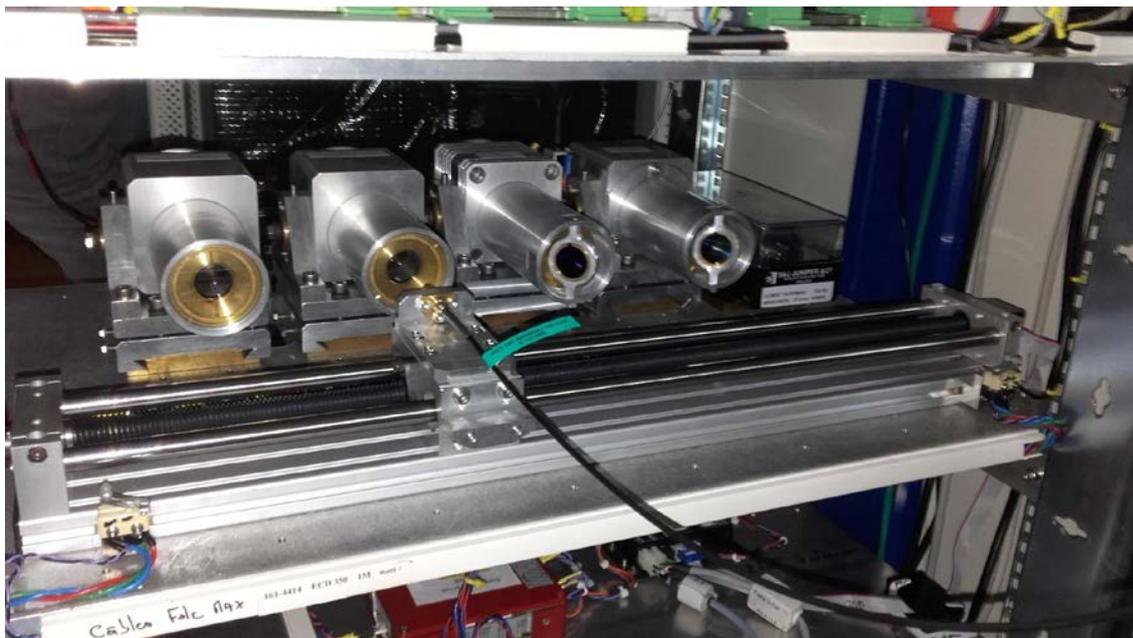


Fig 2.3: photo of SOPHIE CU chariot with output fiber (Photo credits R Cabanac).

The advantage of the SOPHIE CU is flexibility and simplicity of injection, but the single fiber output implies we need to re-build Narval polarimeter adding a 3rd channel for calibration all the way from the guiding mirror to the spectrograph. This is not a viable option for Neo-Narval, we

do not plan to redesign the polarimeter further than a possible upgrade of the optical encoders of the rhomb drawers.

#### SOPHIE CU physical location

SOPHIE CU was originally attached to the telescope in the dome, but it made any maintenance very cumbersome and the large temperature amplitude were suspected to have an impact on calibrators stability. The current upgraded version of SOPHIE CU is located close to SOPHIE in a thermally controlled room. Finally the stable temperature does not seem to play a major role in calibration stability, most of the error vanished through a careful optical reshuffling of near and far fields scramblers, and polygonal output fibers. The calibration injection is still done at the same location than before in the bonnette.

### 5.3.3 SPIRou

#### Technical description

Although SPIRou is an infrared spectrograph, the calibration unit is worth presenting here because TBL will house a copy of SPIRou (SPIP), and it does make a lot of sense to recycle as many components as possible between Neo-Narval and SPIP. The concept of SPIRou CU is very similar to the SOPHIE CU one (fig 2.3), but it has two chariots on top of each other each equipped with a folding mirror pointing to a different output fiber. In addition to refinements in the way lamps are aligned and handled compared to SOPHIE CU, SPIRou CU houses a cold pupil (mandatory for K IR Band but not for Neo-Narval).

#### 2.2.2 SPIRou CU physical location

The SPIRou CU is built in a rack that can be located anywhere, easy access and stable environment is of the essence.

## 5.4 Neo-Narval CALIBRATION UNIT

### 5.4.1 Neo-Narval CU conceptual design

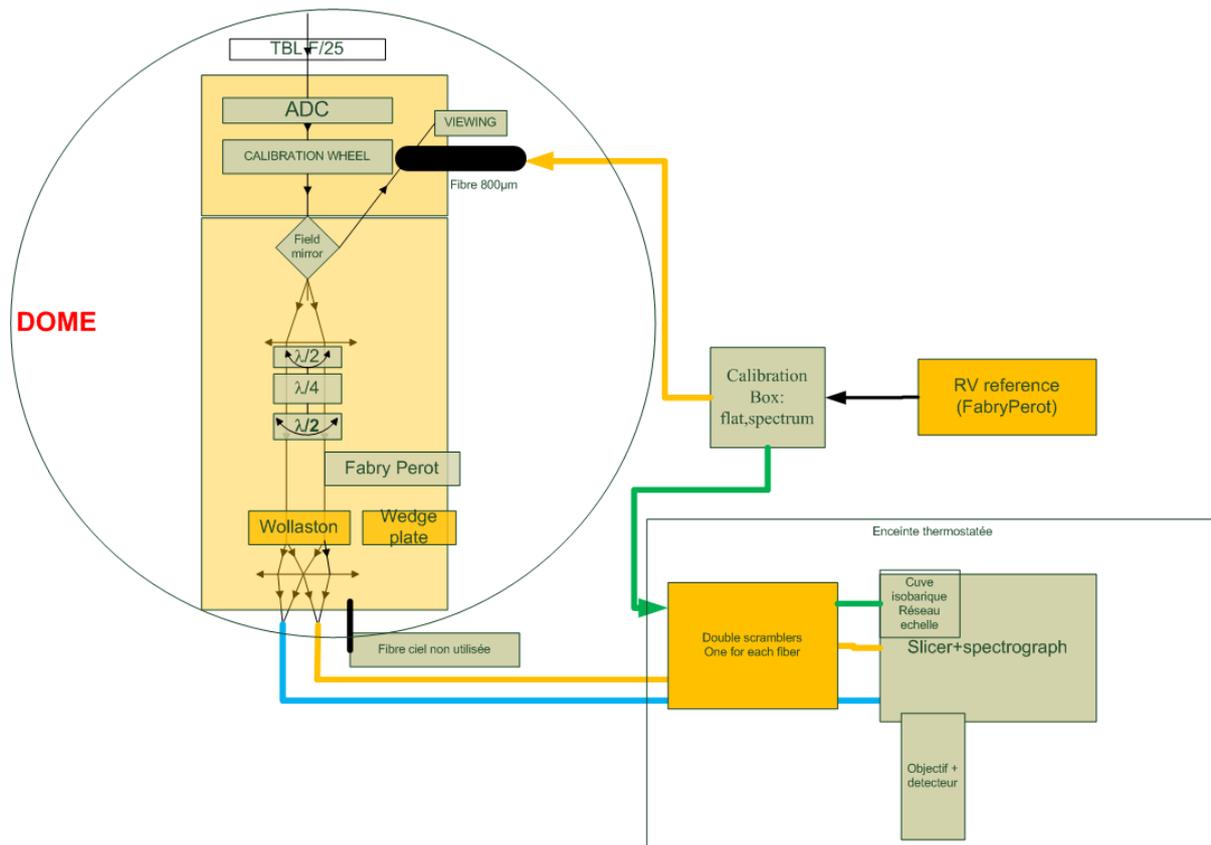


Fig 3.1: shows Neo-Narval functional design for the calibration box, with a simultaneous feed to the polarimeter and the spectrograph (Credits: Laurent Parès, IRAP)

#### 5.4.2 Neo-Narval CU possible designs

##### Upgrade of Narval CU

One solution is to keep the “no-moving-part” concept of Narval CU, but upgrade it to provide a dual output, one output would be fed to the polarimeter and the other to the spectrograph. Figure 3.2 shows the design for 4 lamps (or inputs).

At this time, each input is transmitted at 25% of its nominal intensity because of the number of reflexions.

An example of the lamps could be:

L1: [Laser Driven Light Sources](#) (flat), L2: Fabry-Perot fiber, L3: Thorium, L4: Sunlight fiber.

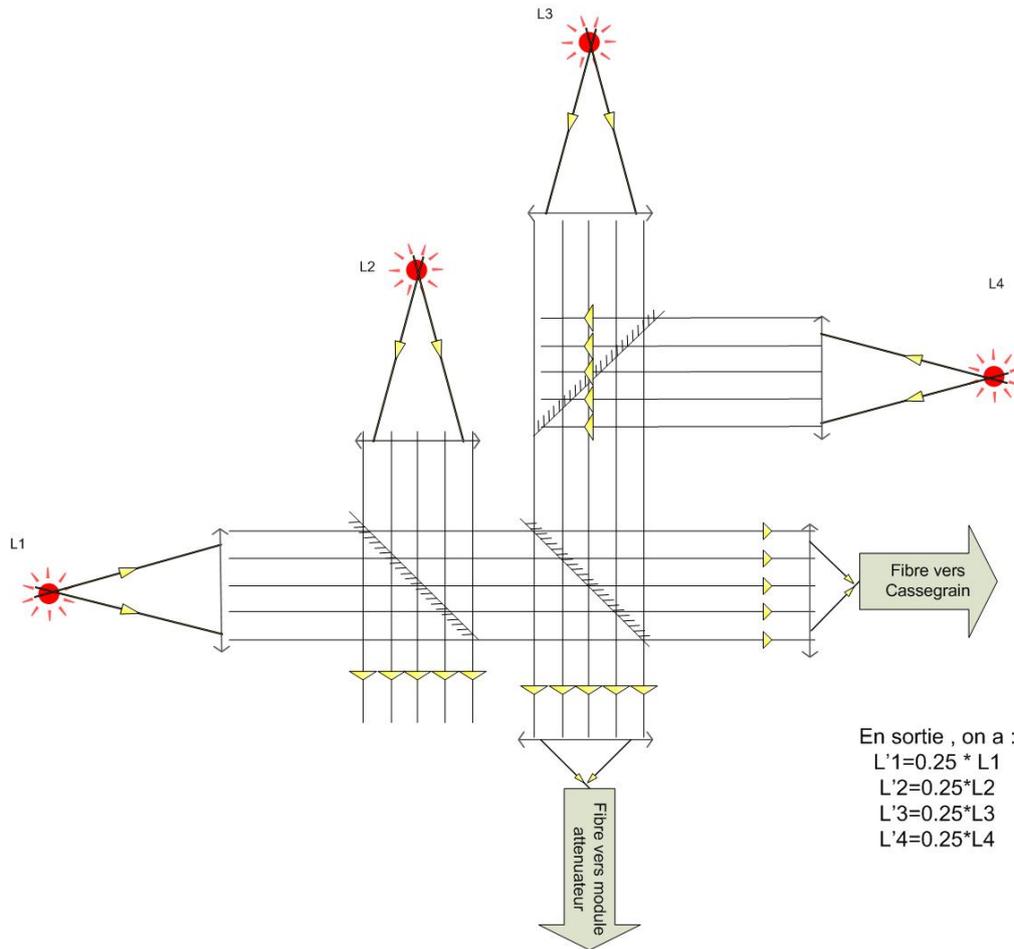


Fig 3.2: Neo-Narval no-moving part concept. This concept allows us to feed both the polarimeter and the spectrographe with both lamps. (Credits: Laurent Parès, IRAP)

Copy SPIRou CU

Another option would be to copy the mandatory features of SPIRou for Neo-narval with lamps L1: [Laser Driven Light Sources](#) (flat), L2: Fabry-Perot fiber, L3: Thorium, L4: Sunlight fiber.

Location of Neo-Narval CU

One of the Neo-Narval lamp will actually be a fiber feed from a stabilised Fabry-Perot. This makes a Narval-type calibration CU i.e. attached to the bonnette close to the polarimeter difficult unless the FP is in the dome. This also assumes that a moving FP fiber will deliver a stable signal to the calibration CU. On the other hand, the location of the CU will necessarily be either close to the polarimeter or close to the spectrograph, and one of the Calibration fiber output will necessarily be as long as the existing science fiber bundle. As there is no strong incentive for either location. The choice of the optimal location will boil down to technical feasibility and cost. This analysis will be done in the coming months.

Narval CU components

Lamps:

Hollow cathode: Thorium, Thorium-Argon: [Photron](#) Corp.

Halogen: Quartz-Tungstene-Halogen Lamp: [HERAEUS](#) Corp., Mazda: 50w; code:09117; 12v; GY.6.35; 091175, OSRAM: H7 silverstar; 64210SVS; 55w; PX26d

Mechanical and Optical components described in ESP-CB-FRD\_2.pdf