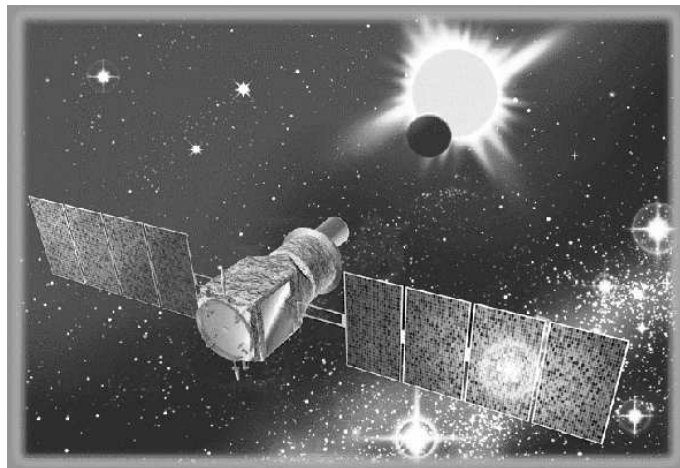


M2 Outils & Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace 2006-2007
Observatoire de Paris & Universités Paris 6, 7, 11



“PROJETS”

B. Mosser
LESIA, Observatoire de Paris
benoit.mosser@obspm.fr

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1 Les Projets du M2pro OSAE | 5 |
| 1.1 Buts | 5 |
| 1.2 Modalités pratiques | 6 |
| 1.3 Modalités de contrôle | 6 |
| 1.4 Sujets | 7 |
| 1.5 Intervenants | 7 |
| 1.6 En clair | 7 |
| 2 Etude de cas : “Jovis” - présentation | 9 |
| 2.1 Contexte du projet “Jovis” | 9 |
| 2.2 Spécifications scientifiques | 9 |
| 2.3 Quelques données | 11 |
| 3 Quelques dimensionnements | 12 |
| 3.1 Le montage optique | 12 |
| 3.2 Orbite et cycle utile | 17 |
| 3.3 Sources parasites, baffle et cône de protection | 20 |
| 3.4 Le détecteur | 22 |
| 3.5 Pointage | 26 |
| 3.6 Thermique | 27 |
| 3.7 Bilan télémétrique | 29 |
| 3.8 Traitement des données ; segment sol | 30 |
| 3.9 Bilan de l'étude | 31 |
| 4 Propositions de sujets | 32 |

Liste des tableaux

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1 Phases d'un projet spatial | 5 |
| 2 Analyse et synthèse | 6 |
| 3 Mots-clefs pour une étude système | 8 |
| 4 Contraintes μ -missions | 10 |
| 5 Spécifications scientifiques | 10 |

Liste des figures

| | |
|--------------------------|----|
| 1 Oscillations joviennes | 11 |
| 2 Montage optique | 14 |

4 OUTILS & SYSTÈMES

| | | |
|----|---|----|
| 3 | Spectres avec ou sans fenêtre | 16 |
| 4 | Orbite GTO | 17 |
| 5 | Précession | 18 |
| 6 | Périgée | 18 |
| 7 | Angle de protection | 19 |
| 8 | Cycle utile orbital | 20 |
| 9 | PRNU et dépointage | 22 |
| 10 | Traînage | 25 |
| 11 | Jupiter vu par JOVIS | 28 |
| 12 | Photométrie | 30 |

1. Les Projets du M2pro OSAE

1.1. Buts

La conduite d'un Projet de M2pro a pour ambition de reproduire une ou plusieurs étapes du travail de phase **0** à **B** d'un projet spatial ou d'instrumentation au sol. Les différentes phases d'un projet spatial, selon la nomenclature en vigueur, sont répertoriées dans la Table 1.

| | |
|---------|----------------------------|
| Phase 0 | analyse d'une mission |
| Phase A | faisabilité |
| Phase B | définition préliminaire |
| Phase C | définition détaillée |
| Phase D | réalisation, qualification |
| Phase E | utilisation |
| Phase F | retrait du service |

TAB. 1: *Phases d'un projet spatial*

Le travail demandé consiste en l'étude de pré-définition et de faisabilité d'un système : une problématique scientifique étant exposée et traduite en terme de *spécifications scientifiques*¹, les étudiants ont à proposer des *spécifications techniques*² permettant de répondre aux buts souhaités, et à analyser diverses solutions.

- Le Projet comprend les étapes suivantes :
 - Recherche bibliographique.
 - Contacts et interactions avec les scientifiques et ingénieurs des labos spatiaux ou instrumentaux
 - Compréhension du système étudié
 - Détermination des outils nécessaires pour traiter le système
 - Mise en œuvre des outils acquis dans les modules d'enseignement du M2pro.
 - Établissement de spécifications techniques précises et argumentées.

1. P.ex.: réaliser une mesure physique avec une précision relative de 10^{-5}

2. P.ex.: température du détecteur stabilisée à 0.1 K pour assurer la précision mentionnée ci-dessus

- Le Projet aidera à préparer le travail de stage : rédaction d'un rapport écrit, soutenances orales. Il nécessite un travail d'analyse puis de synthèse (Table 2).

| | |
|---------------------|--|
| Approche analytique | Les différents aspects du système, sont à analyser précisément. Des choix motivés permettent de bien définir le travail. |
| Travail synthétique | La démarche et le choix finalement adopté pour répondre aux objectifs sont à argumenter précisément. Un travail se résumant en une compilation de divers apports extérieurs sera sanctionné. |

TAB. 2: *Analyse et synthèse*

1.2. Modalités pratiques

- La conduite du Projet compte pour 56 heures dans le cursus du M2pro : 6 heures de présentation + 50 h de travail à gérer personnellement.
- Il s'agit d'un travail en binôme, sur un sujet libre ou choisi parmi une liste de sujets proposés.
- Le travail fait l'objet d'un mémoire.
- Le projet est conduit en binôme, avec le support d'un enseignant du M2pro et d'intervenants extérieurs.
- Le choix des sujets s'effectue *fin septembre* ; et le projet est présenté début *janvier*.
- Chaque binôme conduit un Projet différent.
- Une présentation succincte à mi-parcours est demandée.

1.3. Modalités de contrôle

- Chaque projet est concrétisé par un petit rapport, de l'ordre de 25 pages, et par une soutenance orale de 30 minutes.
- Ce rapport consiste en une présentation analytique de la problématique étudiée, et une présentation synthétique des résultats.
- La note attribuée pour le Projet est commune aux 2 étudiants du binôme ; elle représente $\simeq 6$ ECTS et compte pour $\simeq 10\%$ de la note finale du M2pro.

1.4. Sujets

- La thématique des sujets, dans le contexte d'une expérience spatiale ou d'un projet d'observation au sol passés ou à venir, cible un nombre restreint d'objectifs précis.
- Un sujet proposé est brièvement défini ; au binôme, en interaction avec les intervenants enseignants et extérieurs, de cadrer précisément le travail, le but n'étant pas de décrire exhaustivement une expérience sol ou spatiale, mais de cibler précisément le(s) système(s) et sous-système(s) répondant aux spécifications scientifiques étudiées.
- La nature du travail dépend de l'avancement du sujet choisi :
 - Un projet en fin de réalisation (phase plus avancée que **D**) présente peu d'ouverture (tous les choix à faire ont été faits), mais une quantité de documentation impressionnante. Le travail du Projet consiste alors à aborder cette doc et à y retrouver le sens du travail accompli pour un système donné.
 - Un projet en cours de réalisation sera moins bien documenté (ou la documentation moins accessible), mais plus ouvert. Le travail du projet peut alors consister à accompagner une problématique en cours.
 - Un projet en phase **0** ou **A** reste très ouvert ; défis techniques, contraintes ahurissantes a priori et points durs sont légions, et restent à analyser.
- Il est possible que plusieurs binômes choisissent une même expérience, et l'abordent sous différents aspects.

1.5. Intervenants

- Un enseignant du M2pro oriente les étudiants, du choix du sujet jusqu'à la rédaction du mémoire.
- Des intervenants extérieurs peuvent être sollicités pour apporter un regard d'expert. Leur intervention reste limitée : un contact scientifique peut être utile pour présenter la problématique dans ses grandes lignes, un contact technique pour donner accès aux documents nécessaires, un autre pour éclairer un point donné...

1.6. En clair

- Un bon projet
 - a clairement identifié les problématiques *scientifique* et *technique*
 - a résolument adopté une démarche *systemique*

8 OUTILS & SYSTÈMES

- a mis en valeur les *spécifications techniques* importantes
- a évalué des *paramètres dimensionnants* et d'éventuels points durs

durs

- Un projet mal conduit
 - reste vague, ou trop général
 - n'a pas vu les enjeux réels
 - n'a pas cerné le système dans toute sa complexité
 - s'est contenté d'être descriptif
 - n'a pas identifié les facteurs vraiment dimensionnants
 - a proposé des solutions irréalistes
 - a négligé les mots-clefs de l'approche systémique et les notions constitutives du M2pro OSAE (Tab. 3)

| Mots-clefs | abréviations dans le poly |
|------------------------|------------------------------|
| Systeme, sous-systeme | |
| Signal, bruit | |
| Rapport signal à bruit | |
| Spécifications | S |
| Contraintes | C |
| Dimensionnement | D |
| Accomodation | |
| Points durs | !!!! |
| État de l'art | |

TAB. 3: *Mots-clefs pour une étude système*

2. Etude de cas : “Jovis” - présentation

★ Cette présentation d’un système particulier et de plusieurs de ses sous-systèmes n’imite pas la réalisation d’un Projet. Elle a pour but d’introduire de multiples pistes d’étude, dans un cas concret, en phase 0. Les diverses pistes proposées dans cette étude de cas ne sont pas poursuivies bien loin ; c’est la diversité de ces pistes et leurs interactions qui doivent vous guider pour la réalisation de *votre* Projet.

★ Le travail sous-tendu par cette présentation représente à l’heure actuelle bien plus que 50 h.

2.1. Contexte du projet “Jovis”

- Projet de mission μ -satellite JOVIS, présenté par le LESIA (Observatoire de Paris, campus de Meudon) au CNES, en réponse à l’appel à propositions μ -satellite
- Filière μ -satellite du CNES : lancement ASAP = opportunité de charge utile auxiliaire sous la coiffe d’Ariane V. Un μ -satellite est une sorte de passager clandestin sous la coiffe d’Ariane V, qui profite de la place que veut bien laisser le ou les clients principaux qui payent le vol.
- Quelques contraintes propres aux micromissions du CNES (Tab. 4)

2.2. Spécifications scientifiques

- But de la mission : étude de la structure interne de la planète géante Jupiter, par la détection et l’analyse des oscillations joviennes
 - via la mesure avec une très grande précision du flux solaire réfléchi par la planète (Fig. 1)
 - avec imagerie à faible résolution spatiale
- La liste des spécifications est donnée par la Table 5. La spécification **S1** est très importante ; elle impose d’emblée que JOVIS soit une *expérience spatiale*, la photométrie CCD de très grande précision étant réalisable uniquement dans l’espace.
- Le travail qui suit va s’attacher à analyser le *système*
 - en respectant les *spécifications scientifiques* (**S**) pour définir l’instrument
 - en analysant les *points durs* (!!!!)

10 OUTILS & SYSTÈMES

C 1 - Volume : $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 80\text{ cm}$, pour l'ensemble plateforme + charge utile

C 2 - Masse : $< 120\text{ kg}$, dont charge utile $< 50\text{ kg}$

C 3 - Télémétrie : $< 60\text{ Mbit/jour}$

C 4 - Puissance : puissance électrique pour la charge utile inférieure à 35 W

C 5 - Budget : $\simeq 20\text{ Meuros}$, dont $1/3$ pour la charge utile, $1/3$ pour la plateforme et $1/3$ pour le lancement

| |
|---|
| TAB. 4: Contraintes des μ -missions du CNES |
|---|

S 1 - Précision photométrique : 0.5 ppm en 5 jours

S 2 - Résolution spatiale : $1.2''$ à 500 nm

S 3 - Image jovienne : sur 2000 pixels

S 4 - Couleurs : en 2 couleurs

S 5 - Cadence : 1 image de chaque couleur par minute

S 6 - Analyse temporelle : les périodes du spectre scientifique vont de 4 à 40 minutes ; ce domaine fréquentiel est à préserver de tout signal parasite

S 7 - Durée de mission : 2.5 ans

S 8 - Observation continue : 5 mois

S 9 - Cycle utile : supérieur à 60% sur la moitié de la mission, avec $3 \times 1\text{ mois}$ à 90%

| |
|--|
| TAB. 5: Spécifications scientifiques du projet JOVIS |
|--|

- en mettant en évidence les *facteurs dimensionnants* (**D**)
- en énonçant des *spécifications technologiques* (**ST**)

2.3. Quelques données

- Période de révolution synodique : 13 mois ; sidérale : 12 ans³
- Diamètre angulaire jovien de 36 à 48'' (valeur maximale à l'opposition)
- Magnitude V de l'ordre de -2.5
- En lumière visible, la luminance jovienne est de l'ordre de $n = 10^4 \text{ photons } \text{Å}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ pour une observation au niveau de la Terre.

3. Synodique \equiv vu depuis la Terre ; sidéral \equiv vu depuis les étoiles

BM-SC/IAP -- JOVIS -- 07/00

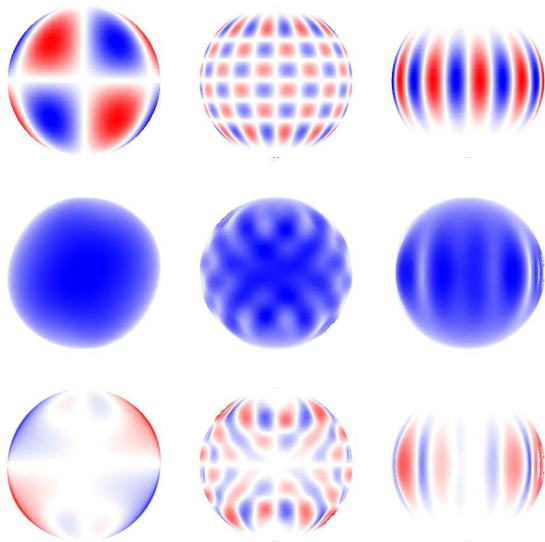


FIG. 1: Modulation du flux pour 3 modes développés dans 3 harmoniques sphériques différentes. Haut: les 3 harmoniques sphériques; milieu: le disque jovien modulé selon les 3 modes précédents; bas: la signature de la seule modulation.

3. Quelques dimensionnements

3.1. Le montage optique

Quel montage optique peut rendre compte des spécifications **S1** à **S3** ?

a. Bruit de photons

★ Le nombre de photons détectés en 5 jours doit permettre d'atteindre la spécification **S1**

– Pour une mesure limitée par le bruit de photons, on doit avoir récolté au bout de 5 jours un nombre de photons N_{5j} vérifiant :

$$\frac{1}{\sqrt{N_{5j}}} = 0.5 \text{ ppm}$$

?! Calculer les nombres de photons N_{5j} et N_1 à collecter en respectivement cinq jours et une seconde pour satisfaire la spécification **S1**, ainsi que le bruit de photons et la qualité de mesure rapportés à 1 s ⁴

⇒ **ST** : On garde en mémoire le bruit de photons en 1 s , $\sigma_{\text{br-phot } 1\text{s}}$ auquel on comparera toute autre source de bruit caractérisée par σ_{bruit} , avec la condition suivante :

$$\sigma_{\text{bruit}} \leq \frac{1}{10} \sigma_{\text{br-phot } 1\text{s}}$$

Cette condition nous assure que les autres sources de bruit seront négligeable devant celle, impondérable, du bruit de photons.

b. Le collecteur

Avec un filtre de largeur $\Delta\lambda$, le nombre de photons détectés durant Δt derrière un collecteur de diamètre a

$$N = n \Delta\lambda \frac{\pi a^2}{4} \Delta t$$

⁴. $N_{5j} = 4.10^{12}$; $N_1 = 10^7$, soit un bruit de 3000 ph.s^{-1} ; $\Delta \log \Phi \simeq 3.10^{-4}$

– La position et la largeur du filtre sont le plus souvent fixées par une spécification scientifique selon des objectifs spectraux précis⁵. Ici, on suppose l'absence de contrainte spécifique, hormis la spécification **S4** (2 couleurs)

?! Proposer une estimation de $\Delta\lambda$ ⁶

• Diamètre du collecteur

– En fonction de ce qui précède, on peut estimer le diamètre a du collecteur.

?! Faire l'application numérique. Commenter le résultat.⁷

• Résolution spatiale

– La tache de diffraction ne doit pas excéder 1.2'' à 0.5 μm (**S2**)

★ Ce qui fixe le diamètre a du miroir collecteur :

$$1.22 \frac{\lambda_V}{a} < 1.2''$$

5. Exemple jovien : filtre étroit sélectionnant quelques raies du méthane ou de tout autre composant de l'atmosphère planétaire

6. On observe Jupiter en lumière solaire réfléchie ; indépendamment d'autres contraintes scientifiques (p.ex. une observation en bande étroite centrée sur un motif spectral particulier) $\rightarrow \Delta\lambda$ de l'ordre de 200 nm (2 images en bande large se partageant le domaine visible de 400 à 800 nm)

7. Cette spécification donne a de l'ordre de seulement 0.8 cm (Jupiter est une cible très brillante !)

[?!] Faire l'application numérique pour cette nouvelle contrainte sur a ⁸

(D) D'après les deux contraintes sur le diamètre du collecteur, il apparaît que c'est la diffraction qui est *dimensionnante*.

⇒ **ST** : : collecteur de diamètre $a = 10$ cm

C. Focale

- La spécification **S3** demande une tache image de $n_{\text{pix}} = 2000$ pixels → le diamètre planétaire doit couvrir $n_{\odot} = 2\sqrt{n_{\text{pix}}/\pi} \simeq 50$ pixels
 - Ceci fixe la focale résultante de l'instrument, les pixels ayant

8. Il est utile de connaître $1'' \simeq 5 \cdot 10^{-6}$ rad, et $\lambda_V \simeq 0.5 \mu\text{m}$; d'où a de l'ordre de 10 cm

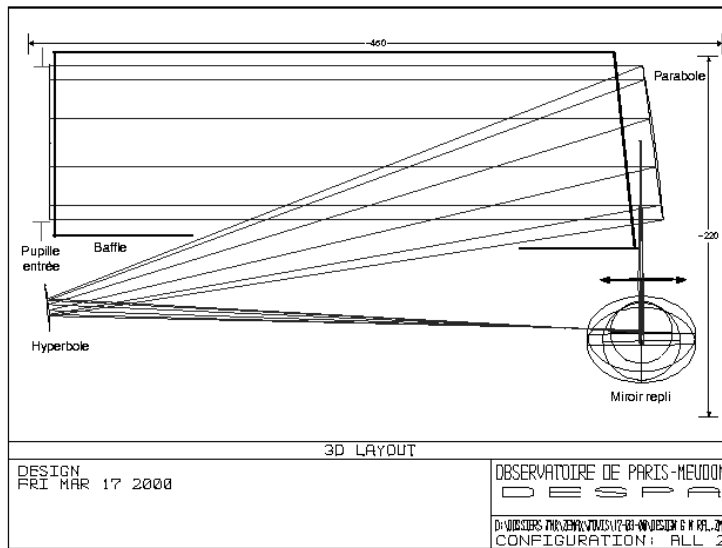


FIG. 2: Montage optique hors-axe pour JOVIS

une taille déterminée d_{pix} :

$$f \alpha_{\text{Jup}} = n_{\odot} d_{\text{pix}}$$

?! *Faire un schéma pour s'en convaincre*

?! *Estimer f , avec à l'opposition planétaire $\alpha_{\text{Jup}} \simeq 48''$, pour les tailles de pixels de 13 ou 25 μm ⁹*

⇒ **ST** : La contrainte **C1** impose un télescope de volume restreint, donc une focale résultante pas trop longue ; il apparaît préférable d'utiliser une matrice CCD avec des petits pixels.

d. Schéma optique

Le schéma optique (Fig. 2) doit tenir compte des contraintes d'encombrement **C1**

– Solution optique hors-axe : adaptée pour l'élimination de la lumière parasite (cf **S1**)

– Etude complète de l'optique ici hors-sujet ; solution proposée par un ingénieur opticien avec un logiciel de calcul optique

⇒ **ST** : ouverture $f/30$

⇒ **ST** : association parabole + hyperbole + miroir de renvoi

Etude à suivre : *Définition plus précise du chemin optique ; tracé de rayons. Reprendre les dimensionnements en tenant compte du rendement non parfait de la chaîne optique.*

9. Focales de respectivement 2.7 et 5.2 m

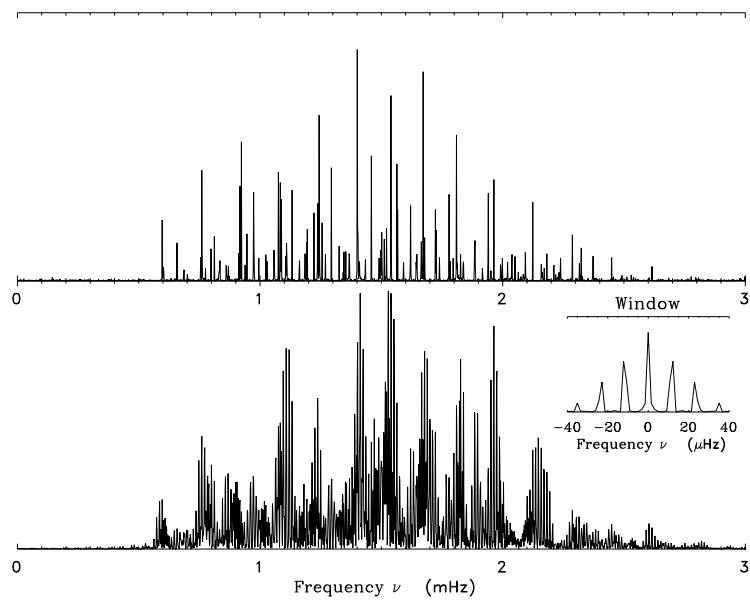


FIG. 3: *Spectre synthétique d'oscillations joviennes :*
a) *Condition d'observation continue pendant 5 jours. b)*
Le même spectre observé depuis un seul site. La fenêtre monosite dégrade très fortement le spectre ; seuls les pics principaux subsistent, souvent avec des décalages en fréquence de $\pm 11.6 \mu\text{Hz}$ ($1/24 \text{ h}$).

3.2. Orbite et cycle utile

Quelle orbite et quel profil de mission peuvent répondre aux spécifications **S6** à **S9** ?

Le profil de lancement pour une mission μ -satellite propose une orbite polaire basse, ou une orbite de transfert géostationnaire (GTO, Fig. 4). Ce dernier cas optimise au mieux les spécifications **S8** et **S9**, et c'est lui que l'on choisit de traiter.

a. *Un intérêt du spatial pour l'astérosismologie*

Les observations au sol, sur une durée de l'ordre de 5 jours, sont *hachées* par l'alternance jour-nuit. Le signal scientifique $s_0(t)$ est multiplié par la fenêtre $f(t)$ (Fig. 3). Il s'ensuit une convolution plus que nuisible dans le spectre. Au signal observé au sol :

$$s(t) = s_0(t) \cdot f(t)$$

correspond le spectre obtenu par TF :

$$\tilde{s}(\nu) = \tilde{s}_0(\nu) \otimes \tilde{f}(\nu)$$

qui peut être fort éloigné du spectre idéal $\tilde{s}_0(\nu)$. C'est pourquoi l'observation spatiale apporte un atout certain : une fenêtre potentiellement performante. Mais pour réaliser ce potentiel, l'orbite doit être bien choisie.

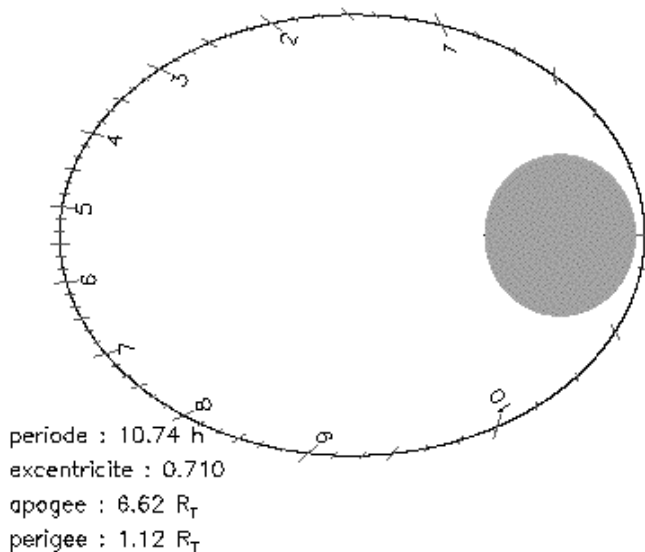


FIG. 4: *Orbite de transfert géostationnaire, avec indication de l'équation horaire (10 min entre 2 tirets)*

b. Orbite GTO

Une orbite GTO précesse très rapidement, sous l'effet de diversions perturbations, dont principalement la non-sphéricité terrestre. Des simulations faites au CNES, avec différents logiciels de calculs d'orbite, montrent que l'évolution de la trajectoire dépend fortement de la hauteur du périégée (Fig. 5), qui elle-même évolue

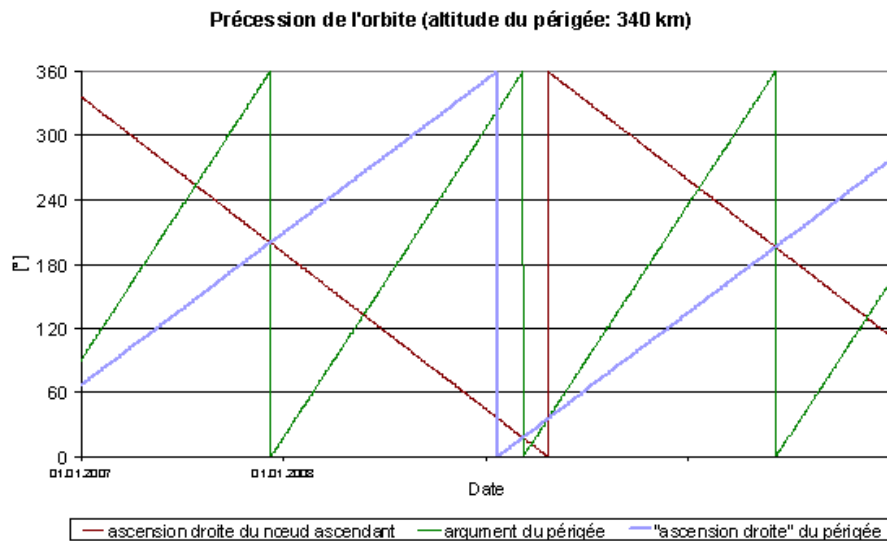


FIG. 5: Evolution de paramètres orbitaux (ascension droite du nœud ascendant, argument du périégée) en fonction du temps, pour une orbite GTO. La précession de l'orbite apparaît plus rapide que le mouvement orbital propre de Jupiter.

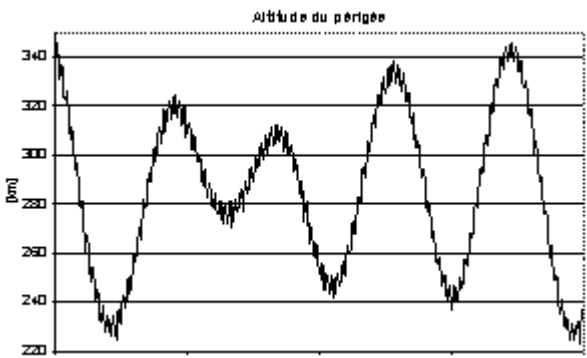


FIG. 6: Evolution de l'altitude du périégée sur une mission de 4 ans (orbite GTO)

fortement (Fig. 6).

?! Pourquoi l'apogée d'une orbite GTO est-il précis, et non le périhélie?¹⁰

c. Influence sur le cycle utile

- Comme Jupiter est toujours proche de l'écliptique, l'observation de la planète est régulièrement impossible :
 - avec un rythme annuel (année synodique jovienne) : le baffle voit directement le Soleil, ce qui est interdit (voir § 3.3)
 - avec un rythme orbital : la Terre éclipse Jupiter, et ce dernier point joue sur le cycle utile, c'est la spécification **S9**.
- Le cycle utile orbital dépend de l'angle entre Jupiter et l'apogée. Le cas le plus favorable, quelque soient par ailleurs les autres conditions, apparaît lorsque l'apogée de l'orbite pointe vers Jupiter (Fig. 8). Le cycle utile orbital dépend aussi de l'angle de protection, angle minimal entre Jupiter et la Terre vu depuis le satellite (Fig. 7).

10. Les moteurs d'appoint du client étant de puissance limitée, ils ne servent qu'à circulariser l'orbite, pas à gagner de l'altitude : l'apogée se doit donc d'être précisément à l'altitude géostationnaire.

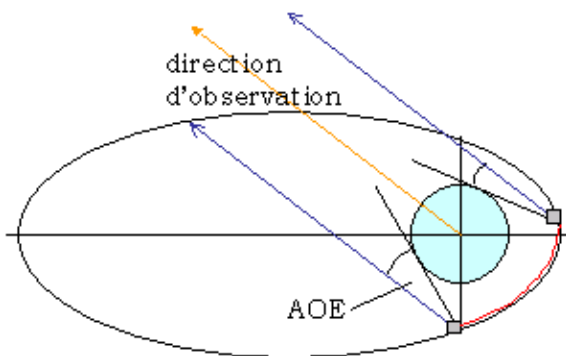


FIG. 7: Angle de protection, mesurant le rapprochement minimal entre la ligne de visée et le limbe terrestre

?! Expliquer l'allure de la Fig. 8¹¹

3.3. Sources parasites, baffle et cône de protection

En fonction de ce qui précède, la spécification **S1** est-elle bien tenue, pour éliminer tout photon indésirable?

a. Sources parasites

La tenue de spécification **S1** implique une limitation drastique du nombre de photons parasites. On peut identifier 4 sources

11. Le cycle utile est limité par les éclipses de Jupiter par la Terre. L'éclipse peut avoir lieu lorsque le satellite passe au périégée, avec une vitesse orbitale élevée : elle est alors de durée limitée ; à l'apogée, en revanche, la durée de l'éclipse est bien plus longue. La longueur de l'éclipse dépend également de la position de Jupiter dans le ciel. Jupiter est dans l'écliptique, et le plan écliptique se distingue bien du plan équatorial orbital lorsque la déclinaison de la planète atteint $\pm 23^\circ$: dans ce cas les éclipses sont limitées, voire inexistantes. En revanche, à déclinaison proche de 0° , les éclipses sont inévitables.

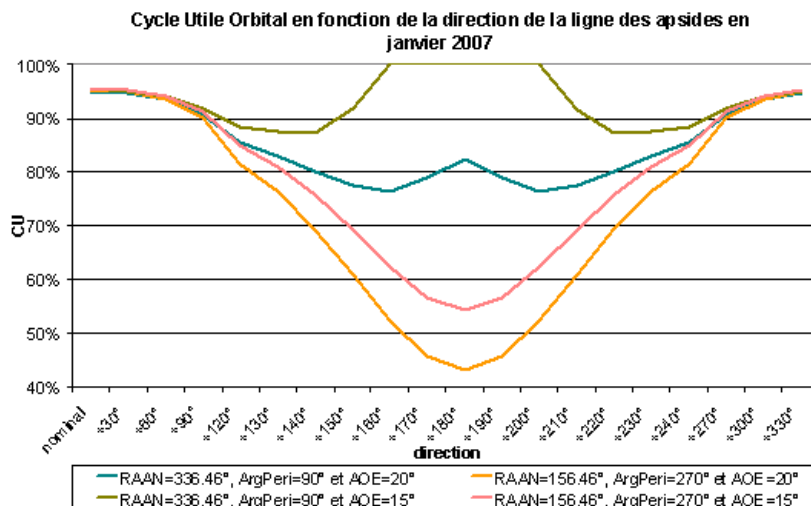


FIG. 8: Evolution du cycle utile orbital en fonction de la direction de la ligne des apsides

lumineuses.

- Les photons solaires
 - La lumière diffusée par la Terre, atteignant la pupille d'entrée. Ces photons sont d'une part nombreux, d'autre part "bruyants".
 - Les satellites galiléens
 - La lumière zodiacale
- Les photons solaires et diffusés par la Terre doivent être exclus par un baffle, qui a pour but de protéger la pupille d'entrée, afin d'éviter l'intrusion de photons pas trop éloignés de la ligne de visée.
 - Les effets de la lumière zodiacale et celle des satellites joviens ne peuvent pas être corrigés, car ils apparaissent directement dans le champ de vue et mêlent leurs photons à ceux de la source jovienne. La contribution des satellites n'est pas de type bruit, mais c'est un signal qui peut être corrigé, car les éphémérides des satellites sont connus avec un très grande précision.

Etude à suivre : *Modélisation de la lumière zodiacale ; l'expérience COROT montre que ça ne doit pas être un effet gênant. Modélisation précise du ballet des satellites joviens vus par JOVIS.*

b. Les propriétés du baffle

?! Estimer le rapport du nombre de photons solaires et joviens, pour une incidence des rayons solaires de 89° , et nulle pour les rayons joviens. La magnitude visible du Soleil est $V_\odot = -26.5$ ¹²

⇒ **ST :** Une protection, par bafflage, de la pupille d'entrée est indispensable, et il est en fait exclus que le baffle voit le soleil : JOVIS doit viser dans le demi-espace opposé au soleil

⇒ **ST :** Un angle de protection limite l'angle entre la ligne de visée et le limbe terrestre (Fig. 7). Il mesure le cône d'interdiction : toute observation devient impossible si ce cône intercepte la Terre.

12. Ce rapport vaut $10^{(V_{\text{Jup}} - V_\odot)/2.5} \cdot \cos 89^\circ$, soit de l'ordre de presque 10^8

?! Montrer que ceci réduit d'emblée de moitié la durée d'observation au cours de l'année jovienne synodique ; quel gain apporte un baffle taillé en sifflet à 45°? Faire un schéma.¹³

Etude à suivre : L'analyse détaillée du baffle reste à mener.

3.4. Le détecteur

Quelles influences les qualités et défauts d'une matrice CCD peuvent-ils avoir sur les spécifications **S1** à **S5** ?

a. Efficacité du transfert

13. Un baffle en sifflet à 45° permet une observation sur les 3/4 de l'année, sous réserve d'un retournement du satellite à mi-parcours

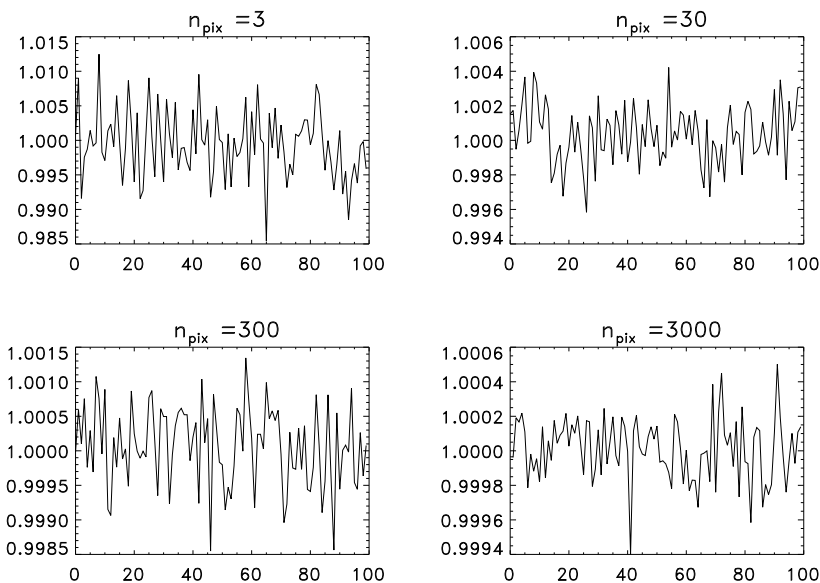


FIG. 9: Fluctuations relatives du flux mesuré liées au dépointage, pour une non-uniformité de la réponse des pixels (PRNU) de 1%, et différentes valeurs du nombre de pixels sur la tache image

- Rendement quantique η , ou combien 100 photons donnent-ils de photo-électrons
 - dépend du matériau utilisé, de sa géométrie, de la température du détecteur
 - et bien-sûr de la longueur d'onde λ du photon
- Influence du rendement quantique : les performances de la détection reposent sur le nombre de *photo-électrons* effectivement détectés, et non sur le nombre de *photons* collectés.

?! Reprendre les AN précédentes en supposant un rendement de 40% pour l'ensemble optique + détecteur

b. PRNU

- “Pixel response non uniformity” : variation de la réponse d'un pixel à un autre
 - Comment compter précisément le nombre de photons lorsque les pixels ont chacun une réponse différente, et donc que, p.ex., un simple dépointage suffit à provoquer une variation de flux (Fig. 9), et donc à imiter une telle variation (cf. §3.5).

?! On suppose une PRNU de l'ordre de 2%. Estimer la variation relative de flux de la tache image, étalée sur un nombre n_{pix} de pixels, pour un dépointage de 1 pixel¹⁴

c. Courant d'obscurité

- Photo-électrons apparaissant sans photons associés, mais par génération thermique de paires électrons-trous.
 - Valeur typique à -40°C : $0.5 \text{ e}^-/\text{pix}/\text{s}$
 - Le courant d'obscurité moyen est corrigé ; restent les fluctuations.

14. Varie comme la racine carrée $\sqrt{n_{\text{pix}}}$ du nombre de pixels de la tache image : $\Delta \log \Phi \simeq 5.10^{-4}$

?! Estimer le nombre d'électrons dus au courant d'obscurité sur la tache image. Le comparer au bruit de photons en 1 s $\sigma_{\text{br_phot } 1\text{s}}$ pour atteindre la spec **S1** et conclure¹⁵

d. *Bruit de lecture*

Le bruit de lecture apparaît lors du transfert des photo-électrons, des pixels vers le système de lecture.

On résume le bruit de lecture à l'écart-type par pixel : typiquement de l'ordre de $10\text{ e}^-/\text{pix}$ dans le cas présent.

?! Le courant d'obscurité et le bruit de lecture dépendent-ils de la source?¹⁶

?! Estimer l'influence du bruit de lecture global¹⁷

e. *Traînage (smearing)*

– Lorsque le CCD reste exposé lors de la lecture, par transfert de trame (Fig. 10)

15. Le bruit varie comme la racine carrée du nombre de pixels de la tache image ; il est totalement négligeable devant $\sigma_{\text{br_phot } 1\text{s}}$ (car Jupiter, comme on l'a déjà dit, n'est vraiment pas avare en photons ; sur une source de magnitude 8, ce ne serait plus le cas)

16. Le bruit de lecture est proportionnel à l'intensité de la source, contrairement au courant d'obscurité

17. Également négligeable devant $\sigma_{\text{br_phot } 1\text{s}}$

– Ceci conduit à recueillir des photons là où l'on ne les attend pas, et déforme la tache image.

Etude à suivre : *Influence à modéliser*

f. *Détecteur à l'étude*

Actuellement étudié : détecteur GEC-EEV 4720, CCD à transfert de trame, avec une surface utile de $1k \times 1k$, pixel de $13 \mu m$, éclairés par l'arrière, refroidi à -30° par radiateur passif.

Etude à suivre : *Caractérisation détaillée*

g. *Temps de pose*

– La spécification **S1** conduit à l'enregistrement d'au-moins 10^7 photons ; la spécification **S2** a conduit à multiplier par 10 la taille du miroir collecteur, et donc par 100 le nombre de photons reçus

– La capacité de stockage d'un pixel en photo-électrons N_{stock} étant limitée à environ 10^6 , la cadence de lecture du CCD doit s'adapter à cette contrainte

– Une pose élémentaire doit collecter, par pixel sur la cible, un nombre de photons de l'ordre d'une fraction de N_{stock} .

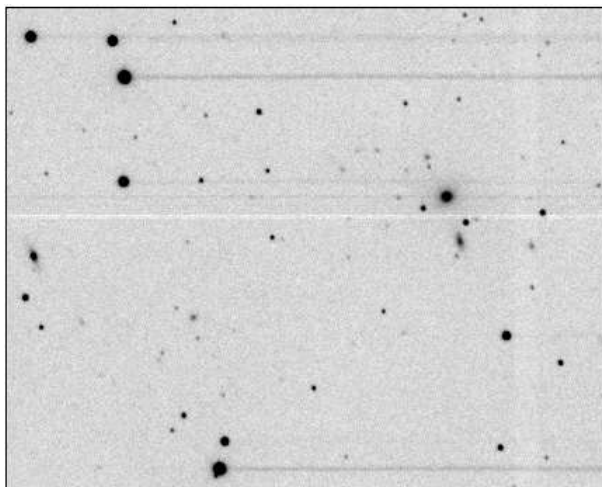


FIG. 10: *Traînage (smearing), rencontré pour un CCD à lecture par transfert de trame, sans obturateur*

?! Estimer la durée t_{pose} d'une pose élémentaire¹⁸

?! Quelle contrainte a-t'on alors sur le temps de lecture t_{lec} de la matrice CCD?¹⁹

⇒ **ST** : Une image scientifique, acquise en une minute (cf. **S5**), est la somme de plusieurs ($\simeq 30$) images élémentaires
 ⇒ **ST** : Le CCD doit avoir un temps de lecture très rapide.

3.5. Pointage

A quelles spécifications le pointage doit-il obéir ?

a. Les contraintes

- On a vu précédemment que le couplage dépointage/gradient de réponse du CCD conduit à des variations parasites.
- La valeur obtenue pour une dépointage de 1'' est apparue bien trop importante pour respecter **S1**. Elle doit être divisée d'un facteur $\simeq 20$.

b. Le pointage de la plateforme

Les senseurs stellaires assurent à la plateforme une précision de pointage de l'ordre de 0.01° , soit $36''$. Cette valeur apparaît bien trop importante.

(!!!!) Le pointage à cette précision requise n'est pas assuré par la plate-forme seule : un dialogue entre la charge utile et la plateforme apparaît nécessaire pour améliorer la précision. Ce point est à l'étude pour le projet de μ -satellite PICARD, accepté, qui a des contraintes de pointage analogues à celles de JOVIS.

18. Cadence rapide, de l'ordre de 2 s

19. Si t_{lec} est grand devant t_{pose} , le CCD passe le plus clair de son temps à être lu, plutôt qu'à enregistrer les photons de la cible, ce qui n'est évidemment pas souhaitable

?! *Discuter d'autres formes de pointage précis : p.ex. une charge utile agile, ou un miroir actif corrigeant le dépointage par tip-tilt²⁰*

?! *Quelle autre contrainte sur le pointage apporte la spécification **S6**?²¹*

⇒ **ST** : La plateforme doit assurer un pointage sans composantes de fréquence importantes dans le domaine des fréquences scientifiques.

Etude à suivre : *Des simulations vont devoir être entreprises avec un modèle de vol.*

3.6. Thermique

*Avec quelles précisions les variations thermiques doivent-elles être maîtrisées pour le respect des spécifications **S1** (stabilité photométrique), **S6** (éventuelles fréquences parasites), **S9** (indisponibilité opérationnelle)...*

a. Thermique

- Comme il a été vu au §3.2, la cible jovienne est, dans la plupart des cas, éclipsée à chaque orbite. Ceci implique que le plan focal voit la Terre, de jour ou de nuit, et ne peut qu'avoir des conséquences sur les contraintes thermiques.

20. Une instrumentation agile est possible lorsque le rapport des masses masse mobile/plateforme est très faible, ce qui n'est pas le cas ici ; une correction par miroir actif n'est pas compatible avec la spécification **S1** : la mobilité du miroir suffirait à moduler les conditions d'éclairement du plan focal image.

21. Elle nous dit que le spectre temporel du dépointage doit éviter le domaine des périodes scientifiques : les corrections de pointage peuvent être très rapides ($\nu_{\text{corr}} \gg 1/4 \text{ min}$) ; de très lentes dérives $\nu_{\text{dérive}} \ll 1/40 \text{ min}$ sont également acceptables

– Une composante de ces dernières concerne bien-sûr l’insolation solaire, générique pour tout satellite autour de la Terre. Elle n’est pas abordée ici.

- Deux approches sont possibles pour limiter l’influence des perturbations thermiques.

- donner au détecteur et au plan focal une grande capacité calorifique : le choc thermique, limité dans le temps, n’arrivera pas à perturber le détecteur

- ou au contraire s’arranger pour minimiser la capacité calorifique : le détecteur encaissera alors une forte variation de température, mais l’évacuera également très vite

- Dans le cadre de la filière μ -satellite, on peut penser que la 2ème approche est plus féconde, car la limitation en masse (**C2**) implique de facto une limitation en inertie thermique. Dans tous les cas le choc thermique aura pour conséquence de prolonger, après la sortie d’éclipse, la durée d’inopérabilité, et donc de dégrader le cycle utile.

(!!!!) On est en présence d’un point dur potentiel. Il faut prouver la faisabilité d’une solution technique réalisable dans le cadre μ -satellite.

b. Équilibre

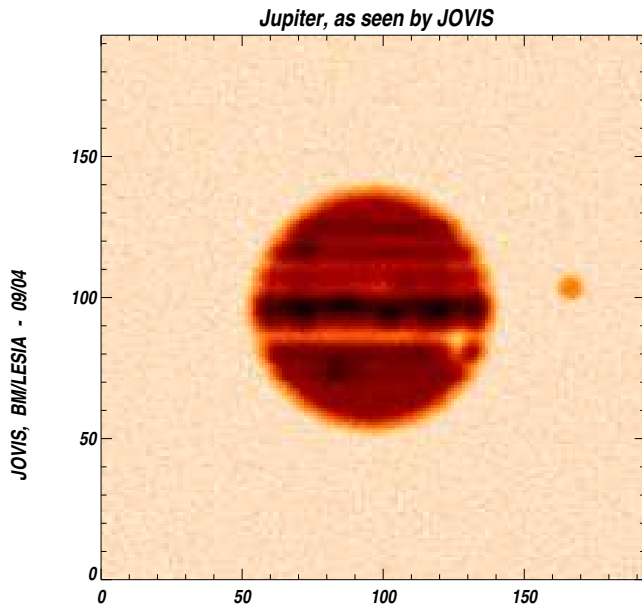


FIG. 11: Jupiter vu par JOVIS

La vue de la Terre nécessite également de couper l'alimentation des détecteurs.

Etude à suivre : *L'analyse thermique est à entreprendre, dès lors que le profil de mission est défini, et l'architecture satellite plus précisément contrainte.*

3.7. Bilan téléométrique

Le respect de la contrainte **C3** de bilan de téléométrie impose-t-il un traitement à bord, ou bien peut-on descendre toute la fenêtre ?

?! Que coûte le transfert de 2 champs de CCD de 1024 par 1024 pixels, avec un codage d'un pixel sur 16 bits?²²

– La contrainte **C3** nécessite donc une réduction drastique de la quantité de données à transférer.

– Il est nécessaire de définir une fenêtre de l'ordre de 2000 pixels seulement qui seule sera transférée²³

?! Quel est le nouveau volume journalier de données à transférer?²⁴

⇒ **ST :** Compression de données nécessaire ; l'analyse de ce point, ici non effectuée, nécessite d'avoir plus d'informations sur l'image scientifique (Fig. 11).

22. La bagatelle de 50 Gbits

23. De temps en temps, une image de Jupiter sur le fond de ciel pourra être traitée à bord puis descendue pour procéder à diverses mesures ou calibrations

24. 92 Mbits, ce qui se rapproche de la contrainte, mais reste encore trop élevé

?! Définir sommairement les propriétés spatiales de l'image (Fig. 11): l'image d'un objet étendu comme Jupiter est-elle dominée par les hautes ou les basses fréquences spatiales (comparer p.ex. à un champ stellaire)²⁵

3.8. Traitement des données ; segment sol

Comment compter les photons d'une source ponctuelle dont l'image n'est pas ponctuelle (Fig. 12), en respectant la spécification **S1**?

- Artefact sur la tache image : cf § Traînage

25. Les basses fréquences dominent

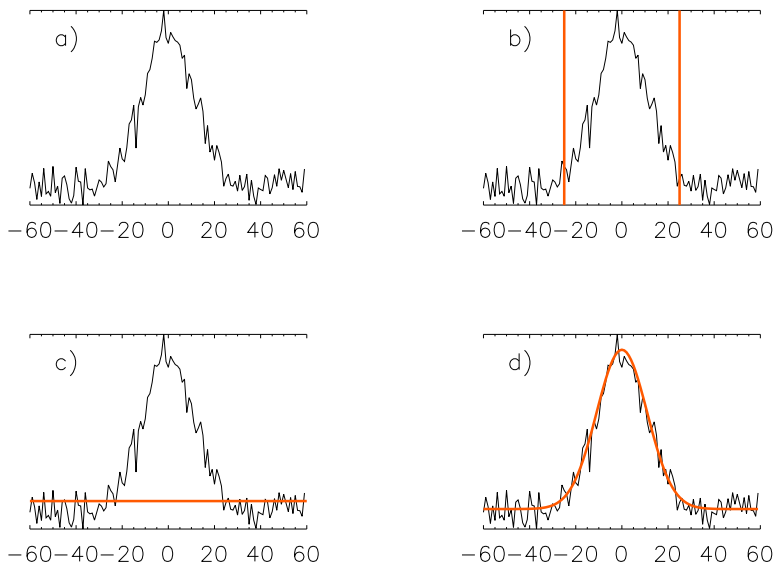


FIG. 12: **a)** Simulation d'une coupe de l'image jovienne (le bruit a été accentué). Quels photons faut-il compter, et avec quelle méthode? **b)** photométrie d'ouverture; **c)** photométrie à seuil; **d)** photométrie par ajustement.

a. *Méthodes de photométrie*

- Photométrie d'ouverture
 - choix de la taille d'un diaphragme circulaire
 - masque fixe ou variable
 - photométrie d'ouverture à seuil
- Photométrie par ajustement
 - ajustement de PSF (point spread function)

b. *Adéquation méthode / performance du CCD*

- Les différentes méthodes donnent divers résultats selon les qualités du détecteur (gradients de réponse dus à des gradients d'épaisseur p.ex), d'où la nécessité d'adapter la méthode aux performances du CCD.

Etude à suivre : *Analyse complète, fonction des possibilités de traitement à bord, télémétrie, et infos souhaitables à communiquer en intégralité au sol.*

3.9. Bilan de l'étude

Cette étude particulier met en évidence plusieurs points important pour le module Projet :

- La multiplicité des domaines qui interfèrent pour comprendre un sous-système donné.
 - La nécessité de maîtriser de manière parfaitement opérationnelle les notions des base dans différents domaines, et de dominer ces domaine.
 - Le caractère ouvert du travail de projet.
- ★ De nombreux points restent absents de cette étude : électronique, mécanique... qui pourront être présents dans votre travail personnel.

4. Propositions de sujets

★ La liste suivante propose des thèmes d'étude, pour des missions en cours ou en projet, avec un site web d'entrée et éventuellement un labo à contacter. Certains thèmes traités les années passées restent abordables, sous réserve d'un angle d'attaque différent.

Mission, expérience, projet

Descriptif; éventuel sujet plus ou moins précisé (TBD = à déterminer)

Labo et intervenant pouvant être contactés :

[http://page.web.à.consulter](#)

a. Sol

ALMA

Projet de réseau interférométrique submillimétrique ; priorité de l'astronomie au sol de la décennie

TBD

Labo pouvant être contacté : LERMA

<http://www.eso.org/projects/alma/>

TAROT 2

Nouveau concept de télescope léger à action rapide

Labo et intervenant pouvant être contactés : IAP, JB Marquette

<http://www.dt.insu.cnrs.fr/tarot/tarot.php>

VLTI

Le VLT en configuration interférométrique

Ligne à retard

Labo pouvant être contacté : LESIA

<http://www.eso.org/projects/vlti/>

HARPS

Spectromètre en service à la Silla, Chili

Détection d'exoplanètes : spectromètre précis à 1 m.s^{-1}

Labo pouvant être contacté : LESIA

<http://obswww.unige.ch/Instruments/harps/Welcome.html>

MEGACAM

Caméra visible grand champ au foyer primaire du CFH

Traitement de données

Labo pouvant être contacté : IAP

<http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/>

OWL

Projet de nouvelle génération de télescope, de diamètre jusqu'à 100 m

Etude de faisabilité

<http://www.eso.org/projects/owl/>

b. Espace

SOHO

Observatoire solaire ESA/Nasa en vol

Mesure des modes de gravité avec l'instrument GOLF.

Labo pouvant être contacté : IAS

<http://www.medoc-ias.u-psud.fr/>

PICARD

μ -mission CNES en cours de réalisation

Instrument SODISM : mesure du diamètre solaire à 1 mas près

Labo pouvant être contacté : IAS, SA

<http://smsc.cnes.fr/Fr/HomeFr.html>

COROT

Petite mission CNES devant être lancée en octobre 2006

Astérosismologie : mesure des variations du flux stellaire avec une sensibilité de 0.5 ppm en 5 jours. Recherche d'exoplanètes.

Labo pouvant être contacté : LESIA

<http://smsc.cnes.fr/COROT/Fr/>

DARWIN

Projet ESA

Détection de signatures d'activité biologique par spectroscopie à 10 microns de planètes de type tellurique

Labo pouvant être contacté : LESIA, IAS

http://www.esa.int/esaSC/120382_index_0.m.html

LISA

Projet ESA

Détection d'ondes gravitationnelles, test de la gravitation

http://www.esa.int/esaSC/120376_index_0.m.html

GAIA

Retenue comme future mission pierre angulaire de l'ESA

Mesure de précision astrométrique de $10 \mu\text{as}$ à $V = 15$.

Labo pouvant être contacté : LESIA, GEPI

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=26>

HSO

Troisième pierre angulaire de l'ESA devant être lancée en 2007

TBD

Labo pouvant être contacté : LERMA

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=16>

PLANCK

Mission intermédiaire de l'ESA, à lancer conjointement à HSO en 2007

Contraintes thermiques, détecteurs, pour l'observation du fond cosmologique

Labo pouvant être contacté : IAP, IAS

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=17>

... et cette liste n'est bien-sûr pas exhaustive. Voir les sujets traités les années précédentes.