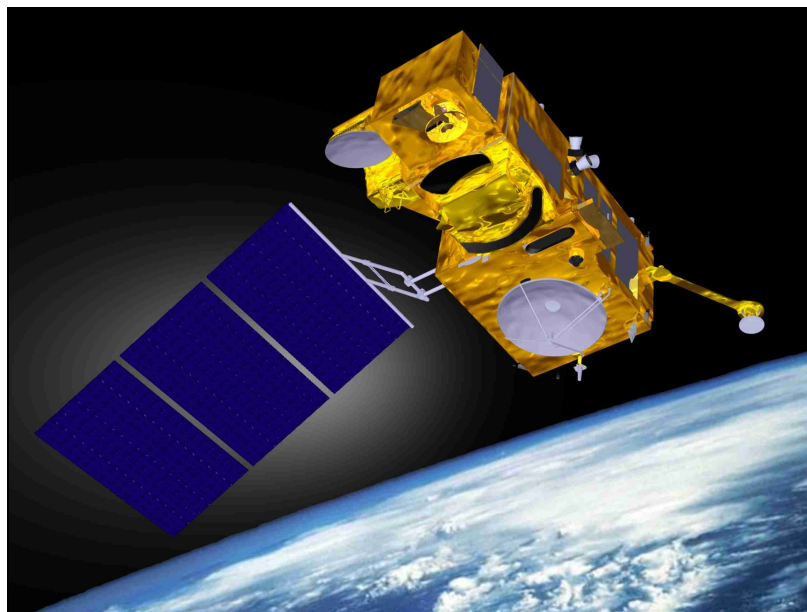


**Rapport de Stage de fin d'étude**  
**Mastère spécialisée Photogrammétrie, positionnement et**  
**mesures de déformations (PPMD)**

ANALYSE DE PERFORMANCE DE L'ALGORITHME  
D'APPARIEMENT DES IMAGES SENTINEL-3



François DUFAY

le 30 septembre 2009

Non confidentiel     Confidentiel IGN     Confidentiel Industrie    jusqu'au .....

## Jury

### Président du jury

Olivier Dissard, Directeur des études

### Commanditaire :

Franck LEMASSON,  
THALES ALENIA SPACE (TAS)  
101 boulevard du midi, 06400 CANNES.

### Encadrement de stage :

Dimitri LEBEDEFF, TAS, maître de stage  
Benjamin FRANCESCONI, TAS, Tuteur  
Raphaële HENO, DIAS, ENSG/IGN

### Responsable pédagogique du Mastère PPMD :

Raphaële HENO, Département Imagerie Aérienne et Spatiale

© ENSG

**Stage** du 15 avril au 28 août

**Diffusion Web :** Internet    Intranet Polytechnicum    Intranet ENSG

### Situation du document :

rapport de stage de fin d'études présenté en fin du mastère PPMD

**Nombre de pages :** 76 dont 9 d'annexes

**Système hôte :** Word 2003

### MODIFICATIONS

EDITION	REVISION	DATE	PAGES MODIFIEES
1	0	10/07/09	Création

# Remerciements

Je remercie Franck Lemasson, responsable du service Architecture Chaîne Image, pour m'avoir accueilli et donné les moyens de travailler sereinement.

Je tiens à remercier vivement mon responsable, Dimitri Lebedeff, et particulièrement mon encadrant, Benjamin Francesconi qui a pris le temps d'écouter mes questionnements et m'a aiguillé pendant la durée du stage.

Enfin, je tiens à saluer toute l'équipe du service Architecture Chaîne Image, pour leur accueil chaleureux et la bonne ambiance que j'y ai ressentie, et tout particulièrement Benjamin Francesconi, Jean-Michel Gaucel, Sylvain Abdon, Jean-Philippe Mur, Adrien Girard et sans oublier mes camarades stagiaires Camille Billaud et Blandine Pottier.

Enfin, je remercie Raphaële Héno pour ses conseils avisés quant à la rédaction de mon mémoire.

## Résumé

Dans le cadre du projet Sentinel-3, futur satellite d'observation de la Terre, il est nécessaire d'apparier les images issues de deux capteurs différents, un de type « push-broom » et l'autre « whisk-broom ». Cet appariement est effectué en mesurant les décalages autour de points de liaison, dont on connaît les positions, par mesure d'inter-corrélation et en appliquant ensuite un modèle de déformation splines plaques minces pour interpoler les décalages entre les points de liaison. Le stage consiste à analyser les performances de l'algorithme dans des cas de simulation simples mais représentatifs de la réalité. Ainsi, j'ai observé la sensibilité des performances à certains paramètres de la simulation (texture, perturbations géométriques haute et basse fréquences, etc...) et au paramétrage de l'algorithme. Dans certains cas, des pistes d'amélioration ont été proposées. Cette étude permet de fournir à l'équipe système du programme S3 une première valeur consolidée des performances de l'algorithme d'appariement, en vue de l'inclure dans un bilan d'erreur.

## **Abstract**

In the frame of project Sentinel-3, an Earth monitoring satellite, we have to co-register two images acquired by different sensors: a “push-broom”, the OLCI instrument, and a “whisk broom” named SLSTR. In order to achieve this co-registration, shifts are estimated around tie points whose positions are known, by a cross-correlation process. Finally, a global mapping function, based on thin plate spline, allows interpolating the shifts to all pixels between tie points. The study is intended to analyse the accuracy of the matching through simple but representative simulation cases. Thereby, I assessed the impact of some simulation parameters (textures, high or low frequencies geometrical distortions, and so on) on the registration accuracy and I tried to figure out the “best” algorithm’ parameters. In some cases, improvements were tested. This study shall provide a first evaluation of the accuracy which may be used by the S3 team to fill an error budget.

# Mots-clés

APPARIEMENT

CO-REGISTRATION

POINTS DE LIAISON

PERTURBATIONS

INTER-CORRELATION

FILTRAGE

ANALYSE DE PERFORMANCES

DETECTEUR DE HARRIS

TRANSFORMEE EN ONDELETTES

GRADIENT

SPLINES PLAQUES MINCES

# Table des matières

Remerciements.....	3
Résumé.....	4
Abstract.....	5
Mots-clés.....	6
Table des matières.....	7
Liste des figures.....	10
<a href="#">1 Introduction.....</a>	<a href="#">12</a>
<a href="#">2 PRESENTATION DE LA SOCIETE.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">2.1 Le groupe Thales.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">2.2 Thales Alenia Space.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">2.2.1 La société.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">2.2.2 Les secteurs d'activités.....</a>	<a href="#">15</a>
<a href="#">2.2.3 Organisation.....</a>	<a href="#">16</a>
<a href="#">2.2.4 Le site de Cannes et la BU Observation Optique et Science.....</a>	<a href="#">16</a>
<a href="#">3 LE PROGRAMME SENTINEL-3.....</a>	<a href="#">18</a>
<a href="#">3.1 Les missions Sentinel-3.....</a>	<a href="#">18</a>
<a href="#">3.2 Le satellite.....</a>	<a href="#">18</a>
<a href="#">3.3 Les capteurs optiques.....</a>	<a href="#">19</a>
<a href="#">3.3.1 OLCI.....</a>	<a href="#">19</a>
<a href="#">3.3.2 SLSTR.....</a>	<a href="#">20</a>
<a href="#">4 PROBLEMATIQUE : CO-REGISTRATION ENTRE OLCI ET SLSTR.....</a>	<a href="#">22</a>
<a href="#">5 ALGORITHME D'APPARIEMENT.....</a>	<a href="#">23</a>
<a href="#">5.1 Problématique de l'appariement.....</a>	<a href="#">23</a>
<a href="#">5.2 Présentation de la chaîne d'appariement.....</a>	<a href="#">23</a>
<a href="#">5.2.1 Extraction de la vignette de contexte.....</a>	<a href="#">25</a>
<a href="#">5.2.2 Extraction de la vignette de recherche.....</a>	<a href="#">26</a>
<a href="#">5.2.3 Calcul de la surface de corrélation.....</a>	<a href="#">27</a>
<a href="#">5.2.4 Modèle de déformations .....</a>	<a href="#">27</a>
<a href="#">6 Cadre de l'étude et simplifications.....</a>	<a href="#">29</a>
<a href="#">6.1 Le modèle numérique de terrain.....</a>	<a href="#">29</a>
<a href="#">6.2 La géométrie de la prise de vue.....</a>	<a href="#">29</a>
<a href="#">6.3 Les bandes spectrales.....</a>	<a href="#">30</a>
<a href="#">6.4 La détermination de l'erreur du corrélateur.....</a>	<a href="#">30</a>

7 CHAINE DE SIMULATION IMAGES.....	33
7.1 Image source et points de liaison.....	34
7.2 Calibration radiométrique.....	36
7.3 FTM.....	37
7.4 Perturbations géométriques BF.....	38
7.5 Perturbations géométriques HF.....	39
7.6 Ré-échantillonnage.....	39
7.7 Bruit radiométrique.....	41
8 TESTS ET ANALYSE DE PERFORMANCE.....	42
8.1 Protocole de tests.....	42
8.1.1 Performance autour des points de liaison.....	42
8.1.2 Performance de la chaîne globale.....	43
8.1.3 Paramètres ayant un impact sur la performance d'appariement.....	44
8.2 Aperçu des analyses réalisées.....	45
8.3 Analyse de sensibilité aux perturbations BF & HF.....	45
8.3.1 Impact des perturbations BF et diminution du biais du corrélateur.....	45
8.3.1.1 Rapport des FTM.....	46
8.3.1.2 Filtrage passe-bas de la vignette de recherche.....	48
8.3.2 Sensibilité du corrélateur aux perturbations HF.....	51
8.4 SELECTION DES POINTS D'INTERET.....	52
8.4.1 Sélection de textures caractéristiques.....	53
8.4.1.1 Approche gradient.....	53
8.4.1.2 Détecteurs d'angles et de contours.....	55
8.4.1.3 Transformée en ondelettes.....	57
8.4.2 Comparaison des résultats en fonction des méthodes.....	61
8.5 REGLAGE DES PARAMETRES DU CORRELATEUR.....	62
8.5.1 Choix de la taille de la fenêtre de contexte.....	62
8.5.2 Modèle de déformation splines plaques minces.....	65
9 Résultats de l'appariement sur des bandes représentatives des images Sentinel-3.....	69
Conclusion.....	70
9.1 Bilan.....	70
9.2 Intérêt pédagogique.....	70
9.3 Perspectives.....	70
Bibliographie.....	72
Annexe 1 Résultats du filtrage passe-bas de la fenêtre de recherche.....	1
Annexe 2 Points de liaison sélectionnés par ondelettes.....	2
Annexe 3 Comparaison des méthodes de sélection des points de liaison.....	3
Annexe 4 Influence de la taille de fenêtre sur la performance de la chaîne d'appariement.....	5



Annexe 5 Influence du paramètre de rigidité $\lambda$ du modèle de déformation sur la performance de la chaîne d'appariement.....	6
Echantillonnage des points de liaison favorable.....	6
Echantillonnage des points de liaison défavorable.....	7
Annexe 6 Comparaison de la performance de l'appariement sur trois paysages simulés S3.....	9

## Liste des figures

Figure 1 : Domaines d'activité et répartition du capital du groupe THALES.....	13
Figure 2: Implantation de Thales Alenia Space en Europe.....	14
Figure 3 : Répartition par client (2007).....	15
Figure 4: Répartition par domaine d'activité (2007).....	15
Figure 5: Vue générale du satellite Sentinel-3.....	19
Figure 6: Le capteur OLCI.....	20
Figure 7: Champ du capteur OLCI.....	20
Figure 8: Le capteur SLSTR.....	21
Figure 9: trace au sol du champ du capteur SLSTR.....	21
Figure 10 : Processus d'appariement.....	24
Figure 11: Extraction des vignettes de contexte et de recherche (ATBD).....	25
Figure 12: Extraction de la vignette de recherche (ATBD).....	26
Figure 13: Mise en correspondance des images grâce au modèle de déformation .....	27
Figure 14: Recouvrement des champs de prise de vue.....	29
Figure 15: Estimation de l'erreur et échantillonnage des points de liaison.....	30
Figure 16: Schéma de la chaîne de simulation des images.....	33
Figure 17 : Image source.....	34
Figure 18 : Image OLCI.....	35
Figure 19 : Image SLSTR.....	36
Figure 20: FTM des images OLCI et SLSTR.....	38
Figure 21: Biais du corrélateur.....	46
Figure 22: Rapport des FTM des images SLSTR et OLCI.....	47
Figure 23: Effet du rapport des FTM sur le biais.....	48
Figure 24: Influence du filtrage sur le biais.....	49
Figure 25: Influence du filtrage sur l'écart type.....	50
Figure 26: Influence du filtrage sur l'erreur RMS.....	51
Figure 27: Erreur RMS du corrélateur autour des points de liaison pour une perturbation BF nulle .....	52
Figure 28: Coupe de la dilatation morphologique sur l'image de la norme du gradient.....	55
Figure 29: Décomposition dyadique d'une image par l'algorithme « à trous ».....	58
Figure 30: Exemple de profil d'images de détails seuillées et points caractéristiques.....	60
Figure 31: Comparaison des méthodes de sélection des points de liaison.....	61
Figure 32 : Localisation des points de liaison.....	62

Figure 33: Influence de la taille de fenêtre de contexte..... 63  
Figure 34: Performance du modèle de déformation et échantillonnage des points de liaison .....66  
Figure 35: Influence de l'échantillonnage des points de liaison sur la performance d'appariement 68

# 1 INTRODUCTION

---

La co-registation fine des images satellites issues de capteurs différents est une nécessité pour bon nombre d'applications scientifiques et cartographiques. Cette opération n'est jamais parfaite et résulte de nombreux compromis mais doit atteindre les spécifications de précision imposées par le client et demandées par les utilisateurs.

Ainsi mon stage, qui s'inscrit dans le cadre du projet de satellite « Sentinel-3 », commandé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) à Thalès Alenia Space (TAS), a consisté à déterminer les performances de l'algorithme d'appariement des images issues de deux capteurs et, le cas échéant, à en proposer les améliorations pour respecter les spécifications.

L'appariement utilise une base de données de points de liaison, très caractéristiques, dont les coordonnées géographiques sont connues et s'appuie sur une mesure de similarité par inter-corrélation pour déterminer les décalages entre les images. Enfin un modèle de déformation est calculé pour trouver la correspondance entre les images en chacun des pixels.

Nous verrons la mise en place de la chaîne de simulation d'image et d'analyse de performance pour tester la maquette MATLAB existante de l'algorithme d'appariement, puis les améliorations possibles, les méthodes de sélection des points de liaison et enfin le réglage des paramètres de l'algorithme pour obtenir les meilleures performances.

## 2 PRESENTATION DE LA SOCIETE

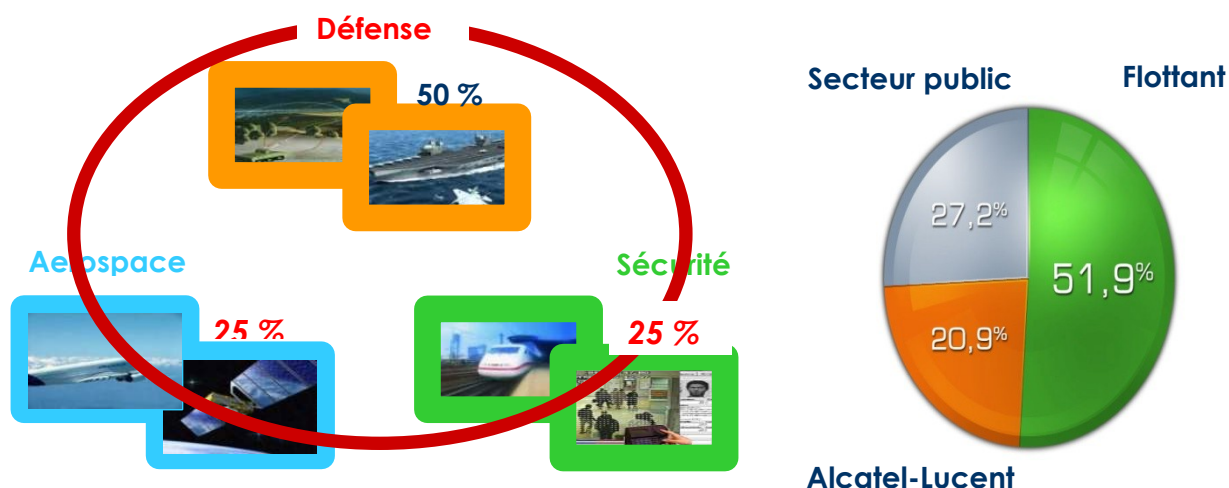
---

### 2.1 Le groupe Thales

Thales, anciennement Thomson-CSF jusqu'en 2000, est une société spécialisée en électronique exerçant dans l'aérospatial, la défense et les technologies de l'information.

Le groupe a une très forte dimension internationale avec plus de 68 000 collaborateurs répartis dans 50 pays, et réalise un chiffre d'affaires de plus de 12 milliards d'euros pour un bénéfice net de 1 milliard d'euros en 2007.

Figure 1 : Domaines d'activité et répartition du capital du groupe THALES



### 2.2 Thales Alenia Space

#### 2.2.1 La société

Thales Alenia Space a été créée le 10 avril 2007 avec l'entrée des activités spatiales d'Alcatel-Lucent dans le groupe Thales, augmentant ainsi le chiffre d'affaires du groupe de plus de 1,5 milliard d'euros. Thales Alenia Space est détenue à 67% par Thales et à 33% par Finmeccanica.

Thales Alenia Space constitue une référence mondiale dans le développement des technologies spatiales dans des domaines aussi divers que les télécommunications, la navigation, la gestion de l'environnement, la défense et la sécurité, l'observation ou les sciences.

Maîtrisant des technologies de pointe, Thales Alenia Space innove constamment pour conserver sa place de leader européen. Son savoir-faire, notamment dans les domaines des télécommunications et du traitement d'images n'est plus à démontrer. Sa capacité à s'adapter au marché en fait l'une des entreprises spatiales les plus actives en Europe. Les missions scientifiques ambitieuses planifiées par le CNES, l'ESA, la NASA ou d'autres agences spatiales conduisent également l'entreprise à s'investir largement dans ces projets, qui mobilisent des ressources technologiques très diversifiées.

Avec ses 35 ans d'expérience dans le domaine spatial, plus de 100 satellites ont déjà été lancés et 400 programmes spatiaux ont été menés.

En 2006, Thales Alenia Space a gagné des contrats pour la construction de 57 satellites d'observation et de télécommunication dont 3 militaires ce qui lui a permis de devenir numéro un mondial en terme de satellites commandés.

La société est dirigée par Reynald Sez nec, elle est composée de 7 200 salariés répartis sur 11 sites industriels principalement en France et en Italie.

*Figure 2: Implantation de Thales Alenia Space en Europe.*

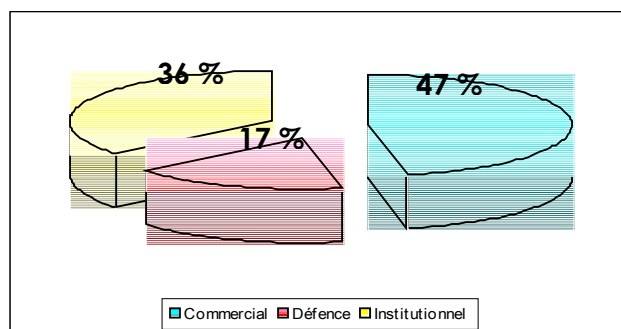


## 2.2.2 Les secteurs d'activités

L'entreprise possède un grand panel d'activités. Ses 3 principaux types de clients sont :

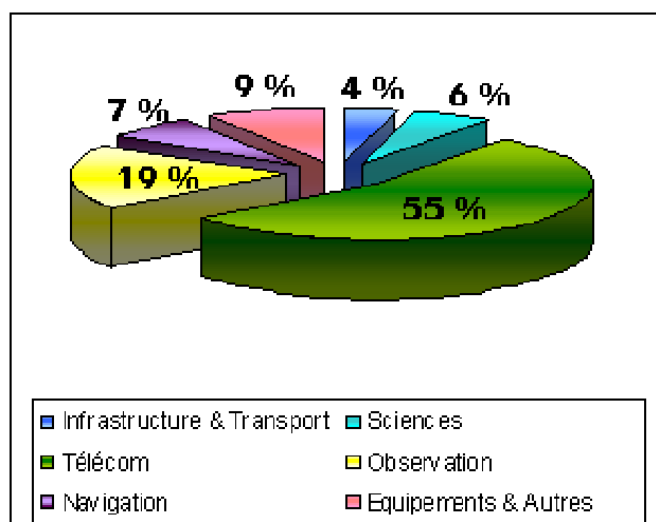
- Les secteurs institutionnels (observations scientifiques...);
- Le secteur commercial (Téléphonie, Galiléo...);
- Le secteur de la défense (OTAN, Armée française...).

Figure 3 : Répartition par client (2007).



Sa large gamme d'activités est présente dans beaucoup de secteurs :

Figure 4: Répartition par domaine d'activité (2007).



### **2.2.3 Organisation**

La société Thales Alenia Space est organisée en Business Units et Industrial Units :

- BU Observation Optique & Science ;
- BU Télécommunications ;
- BU Navigation et Communications aéronautiques ;
- IU Bord ;
- IU Sol.

Les BU sont responsables de la gestion des programmes spatiaux. Elles sont divisées en départements et services (Alimentation électrique, Structure mécanique, Orbite et Attitude...). Chacun a pour charge de développer la partie correspondante du satellite.

Les IU s'occupent de fournir les BU en matériel pour ces programmes : instruments embarqués (batterie, générateurs solaires...), et équipements sol (antennes, console de commande à distance...).

### **2.2.4 Le site de Cannes et la BU Observation Optique et Science**

Le siège social de Thales Alenia Space est basé à Cannes. Cet établissement emploie 1900 personnes dont une grande majorité d'ingénieurs et de cadres.

Il développe des spécialités de haute technologie mondialement reconnues (structures, contrôles thermiques, optiques spatiales...) qui permettent de réaliser des satellites scientifiques, d'observation de la Terre, de météorologie et de télécommunication.

Il comporte des bureaux d'étude, des centres de calculs, des laboratoires et des ateliers de fabrication.

L'établissement a la maîtrise d'œuvre d'une dizaine de programmes spatiaux. Le site fournit 8 satellites par an en moyenne.

Thales Alenia Space possède de nombreux pôles de compétitivités dans la région PACA. Comme le pôle « Mer » où elle participe notamment à la structuration des services en Europe pour la pollution marine et la qualité des eaux côtières.



J'ai été intégré, durant mon stage, au sein de la BU Observation Optique et Science (BUOOS) – Ingénierie et Avants-Projets et plus spécifiquement au service Architecture Chaîne Image. La BUOOS est en charge des chaînes de traitement et des systèmes d'information images. Les chaînes de traitement images sont orientées vers les données images issues des satellites d'observation de la Terre. Les systèmes d'information visent l'utilisation, l'archivage et les services concernant les produits satellitaires.

Le service Architecture Chaîne Image est en charge de nombreux et divers projets qui ont pour objectifs d'écrire des spécifications d'architecture de la chaîne Image en collaboration avec différents clients (CNES, ONERA), et de développer des blocs de ces architectures.

## **3 LE PROGRAMME SENTINEL-3**

---

La mission du satellite Sentinel-3 s'inscrit dans le cadre du projet européen GMES (Global Monitoring for Environment and Security) qui a pour objectifs la surveillance de l'environnement et la prévention des catastrophes naturelles dans la continuité du satellite ENVISAT. Je vais présenter succinctement les missions et les caractéristiques générales du satellite, d'après la présentation « powerpoint » du projet (Berruti *et al.*, 07) et l'ATBD (Algorithms Theoretical Baseline Document), et ensuite je m'intéresserai plus précisément aux capteurs dont on veut appairier les images.

### **3.1 Les missions Sentinel-3**

Le satellite Sentinel-3 assurera quatre missions principales dans la continuité des missions déjà existantes:

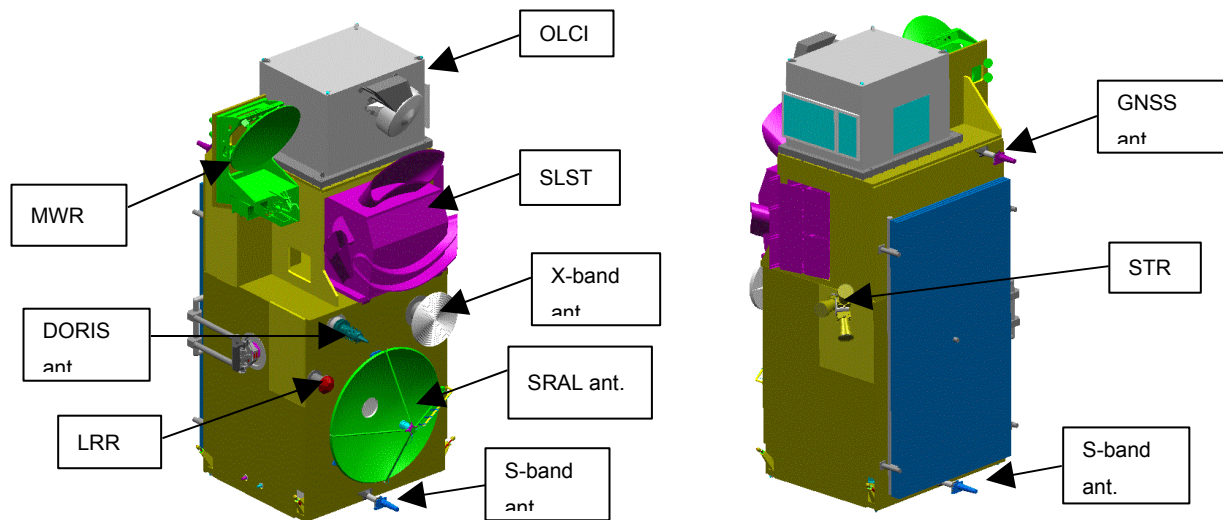
- La topographie de la surface des océans (SSH) et la mesure des hauteurs des vagues (SWH) avec une précision supérieure à celle d'ENVISAT-RA2;
- La mesure des températures des océans et des continents (SLSTR);
- Les prises de vues dans le domaine visible et infra-rouge pour étudier la nature des eaux côtières et océaniques avec une précision équivalente à celle de l'instrument MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), avec une couverture du globe en deux à trois jours et un appariement possible avec les images de l'instrument SLSTR;
- Des prises de vues dans le visible, le proche infrarouge, l'infrarouge moyen et lointain pour la surface terrestre avec une couverture mondiale de un à deux jours et des produits équivalents à ceux dérivés de MERIS, A/ATSR et SPOT VGT.

### **3.2 Le satellite**

Le satellite suivra une orbite polaire hélio-synchrone à une altitude d'environ 815 km pour couvrir entièrement le globe en quatre jours.

Il embarquera six instruments pour assurer les missions d'observations décrites précédemment.

Figure 5: Vue générale du satellite Sentinel-3



Nous allons nous intéresser aux instruments OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) et SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) qui produisent les images que l'on souhaite apparier.

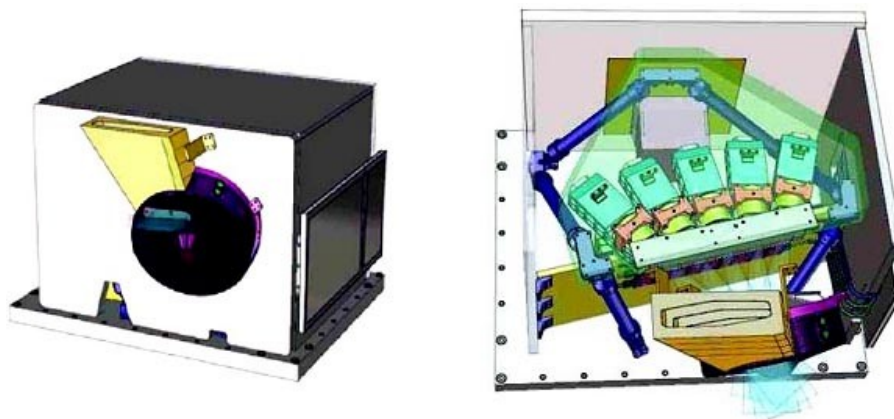
### **3.3 Les capteurs optiques**

#### **3.3.1 OLCI**

Le capteur OLCI est une amélioration de MERIS présent à bord du satellite ENVISAT. Il est constitué de cinq caméras de type « push-broom » montées en série, et possède 21 bandes spectrales entre 385 nm et 1040 nm.

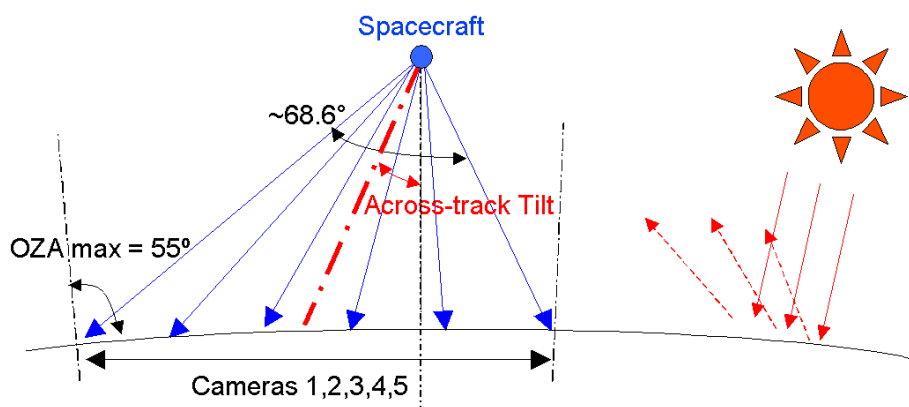
Les caméras permettent de couvrir un champ de 1269 km avec une résolution d'environ 270 mètres au nadir correspondant à une durée d'acquisition d'environ 40 ms. Chacune des caméras possède un champ de 14,2° et dispose d'un recouvrement de 0,6° avec ses voisines.

Figure 6: Le capteur OLCI



Le champ total est oblique de  $12,2^\circ$  par rapport au nadir pour réduire les réflexions spéculaires du soleil comme illustré ci-dessous :

Figure 7: Champ du capteur OLCI

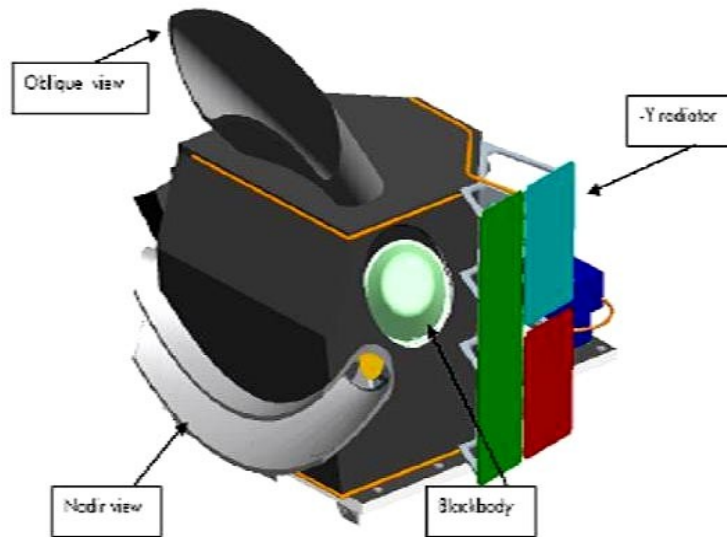


### 3.3.2 SLSTR

Il est issu de la famille (A)ATSR (Advanced Along-Track Scanning Radiometer) dont il reprend les fonctionnalités basiques et apporte de nouvelles améliorations avec notamment un champ plus large, de nouvelles bandes spectrales avec de meilleures résolutions dans certains cas. De type

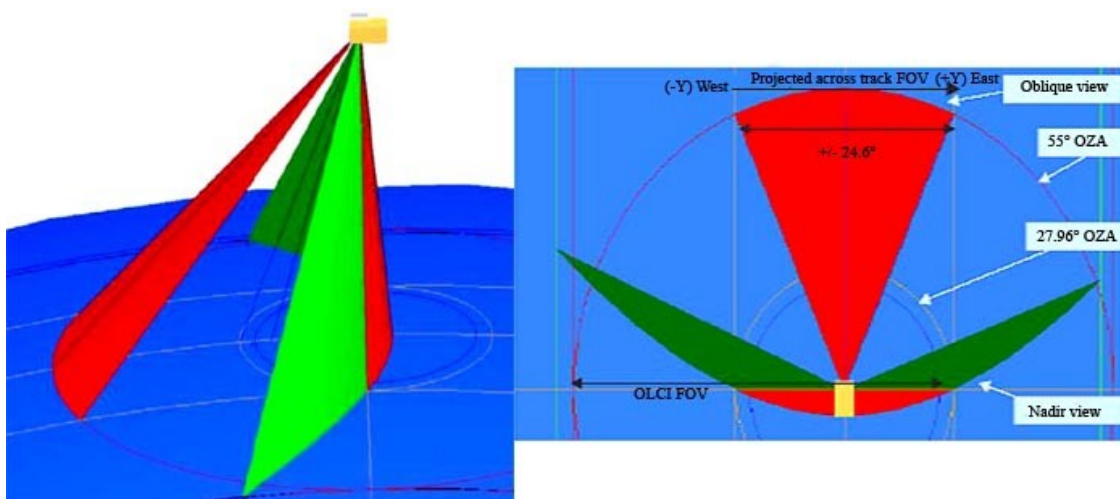
« whisk-broom », le scanner SLSTR capte 9 bandes spectrales entre 0,545  $\mu\text{m}$  et 12,5  $\mu\text{m}$ . Il est prévu utiliser deux miroirs, chacun effectuant 200 scans par minutes. Sa résolution est d'environ 500 mètres dans les bandes spectrales solaires et 1km dans les bandes thermiques.

Figure 8: Le capteur SLSTR



La géométrie d'acquisition, présentée ci-dessous, est conique et couvre un champ d'environ 1675 km au nadir et de 750 km le long de la trace.

Figure 9: trace au sol du champ du capteur SLSTR



## 4 PROBLEMATIQUE : CO-REGISTRATION ENTRE OLCI ET SLSTR

---

Comme il a été brièvement présenté, les deux images issues des capteurs OLCI et SLSTR doivent pouvoir être comparées dans les produits (niveaux L1b et L1c) qui seront distribués.

Avant d'arriver au niveau L1c qui correspond à la mise en correspondance, les images ont d'abord été égalisées puis géolocalisées au niveau L1b. Des masques sont également définis en L1b pour discriminer la terre, les surfaces d'eau et les nuages, ce qui sera utile pour ne pas effectuer de corrélation sur ces derniers.

Le traitement L1c doit fournir un modèle de correspondance entre les deux images, et entre bandes spectrales, qui permette d'obtenir une précision d'appariement inférieure à 0.3 pixel RMS dans la géométrie de l'image OLCI. L'appariement entre les deux instruments est réalisé dans une bande commune par l'algorithme que je vais présenter. L'appariement pour les autres bandes spectrales est réalisé en prenant en compte la caractérisation des capteurs effectuée au sol avant le lancement.

Le modèle de déformation est calculé en déterminant, grâce à une mesure d'inter-corrélation normalisée, les décalages autour de points de liaisons qui auront été judicieusement choisis comme nous le verrons plus loin.

La précision de 0,3 pixel a été spécifiée par le client sur la base de l'expérience de l'industriel et il est nécessaire d'en vérifier la validité grâce à une maquette MATLAB qui m'a permis d'effectuer des simulations. La version de cette maquette en début de stage comprenait l'algorithme de corrélation mais il était nécessaire de la compléter pour réaliser la chaîne globale, simulation et modèle de déformation inclus.

Les objectifs de mon stage ont donc été de:

- mettre en place la chaîne de simulation/analyse et d'y intégrer la chaîne d'appariement du niveau L1c;
- déterminer les performances du corrélateur;
- définir des critères de sélection des points de liaison et tester leur performance;
- implémenter le modèle de déformation et tester les performances.

# 5 ALGORITHME D'APPARIEMENT

---

## 5.1 Problématique de l'appariement

On veut superposer les deux images OLCI et SLSTR pour pouvoir les comparer. Ces images, qui ne sont pas dans la même géométrie ni à la même résolution, ont été géolocalisées au niveau L1b grâce aux données de position et d'attitude du satellite et à la connaissance du Modèle Numérique de Terrain. Cependant, le satellite subit de nombreuses micro-vibrations de basse amplitude dues aux dispositifs embarqués (Philippe Lier *et al.*, 08) mais aussi des vibrations basses fréquences de type thermo-élastique (période d'environ 120000 pixels), causées par le rayonnement solaire. Si nous pouvons déterminer les perturbations basses fréquences, il n'en est pas de même pour les micro-vibrations qui vont impacter la performance d'appariement.

Il existe diverses techniques d'appariement détaillées dans la littérature (Zitova *et al.*, 2003) et aucune ne donne de résultat parfait mais leur choix découle de nombreux compromis.

Ainsi, les méthodes d'appariement peuvent être divisées en deux catégories, avec d'un côté les méthodes basées sur l'appariement de points possédant certaines caractéristiques (« Features-based » methods). Ces points peuvent être par exemple des intersections de droites, des bords, des zones de courbure maximale, des barycentres de zones homogènes. La deuxième catégorie de méthodes détermine les décalages des pixels sur toute l'image et n'utilise pas de points caractéristiques (« area-based » methods). Ces dernières sont applicables lorsque les images possèdent peu de détails comme cela peut être le cas pour les images médicales.

Dans le cas présent, l'algorithme décrit dans l'ATBD utilise une méthode « area based » qui va mesurer la similarité par inter-corrélation normalisée entre deux vignettes autour de points de liaisons, répartis de façon homogène sur l'image, dont les coordonnées géographiques sont connues. Cette méthode est bien adaptée car on connaît déjà avec une certaine précision (grâce à l'information de géolocalisation) la relation qui lie les pixels de l'image OLCI à ceux de l'image SLSTR et on peut donc projeter les images SLSTR dans la géométrie OLCI. De plus, comme on calcule la similarité entre vignettes OLCI et SLSTR autour des points de liaison au lieu de le faire sur chaque pixel, le calcul sera relativement rapide, le modèle de déformation étant ensuite utilisé pour interpoler les décalages en chacun des pixels.

## 5.2 Présentation de la chaîne d'appariement

La présentation suivante est un résumé de la description de l'algorithme d'appariement issue de l'ATBD.

On utilise une base de données de points de liaisons judicieusement choisis.

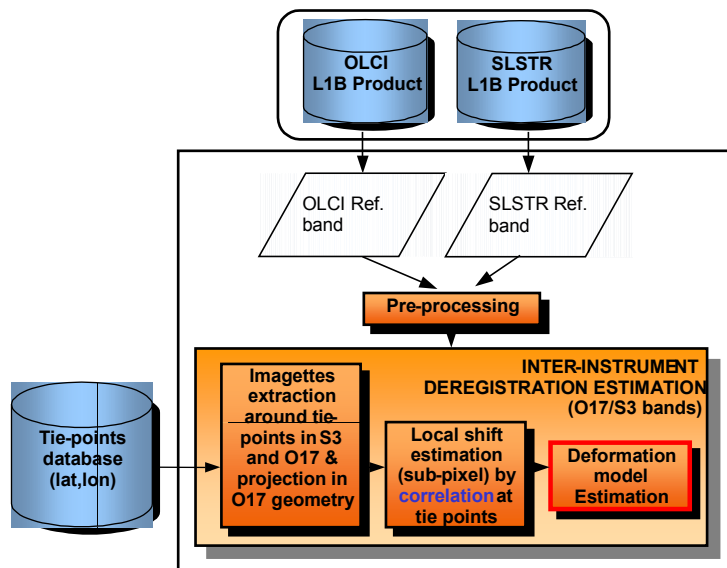
L'image OLCI est la référence et on va calculer le décalage nécessaire aux niveaux des points de liaisons pour obtenir leurs homologues dans l'image SLSTR. Les fonctions de géolocalisation directes sont notées :

$$(\lambda, \phi) = loc_1(k_1, j_1) \quad \text{Pour l'image OLCI} \quad [1]$$

$$(\lambda, \phi) = loc_2(k_2, j_2) \quad \text{Pour l'image SLSTR} \quad [2]$$

Avec k et j les indices des lignes et des colonnes des images ;  $\lambda$  et  $\phi$  respectivement la latitude et la longitude.

Figure 10 : Processus d'appariement



Remarque : O17 et S3 sont les bandes respectivement des images OLCI et SLSTR, de référence pour l'appariement (voir paragraphe 6.3).



## 5.2.1 Extraction de la vignette de contexte

Pour cela, on extrait une vignette de contexte autour du point de liaison de l'image OLCI et on lui applique un filtre sinus cardinal apodisé par une fenêtre de Blackman-Harris pour éliminer les hautes fréquences que l'on ne retrouvera pas dans l'image SLSTR. En effet, le domaine fréquentiel OLCI est environ deux fois plus grand que le domaine SLSTR.

La fenêtre de Blackman s'écrit sous la forme :

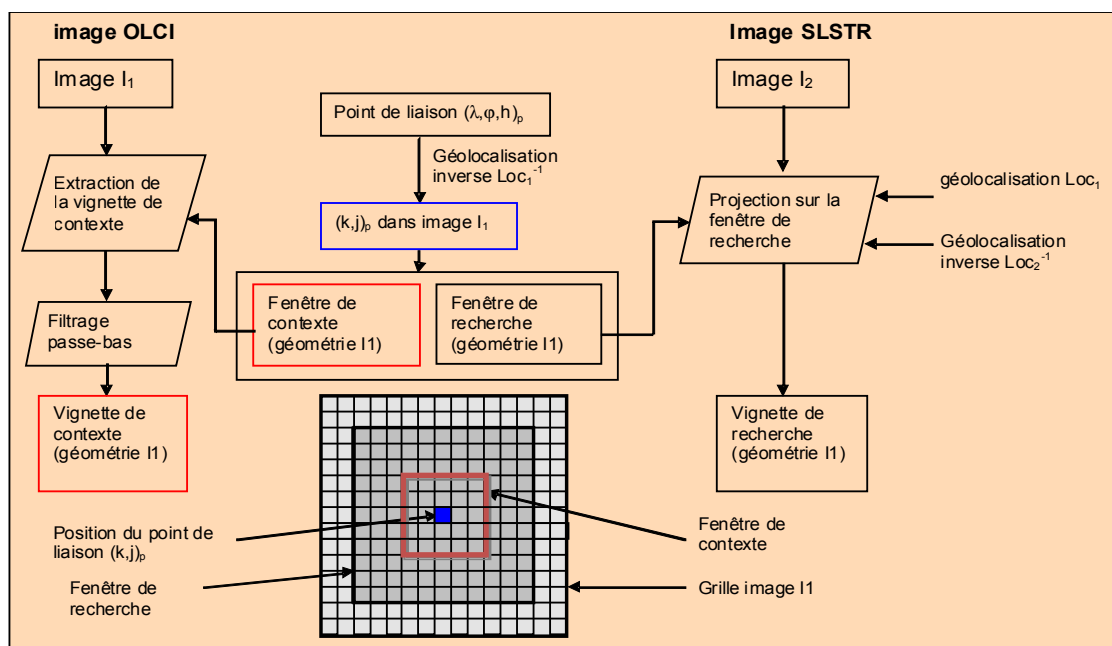
$$W(g) = \alpha_1 - \alpha_2 \cos(2\pi(g + ws)/(2ws)) + \alpha_3 \cos(4\pi(g + ws)/(2ws)) + \alpha_4 \cos(6\pi(g + ws)/(2ws)) \quad [3]$$

Avec **ws** le rayon du filtre égal à 8 fois le rapport des résolutions de l'image SLSTR sur l'image OLCI, soit **ws** = round(8\*18/10) = 15 (ATBD). **g** est le pixel courant  $\in [-ws, ws]$ .

$$\text{Avec } \begin{cases} \alpha_1 = 0.40217 \\ \alpha_2 = -0.49703 \\ \alpha_3 = 0.09392 \\ \alpha_4 = -0.00183 \end{cases}$$

L'intérêt de ce filtre est qu'il coupe au mieux le domaine fréquentiel et atténue fortement les rebonds du sinus cardinal dans le domaine spatial grâce à l'apodisation (Philippe Lier *et al.*, 08).

Figure 11: Extraction des vignettes de contexte et de recherche (ATBD)



## 5.2.2 Extraction de la vignette de recherche

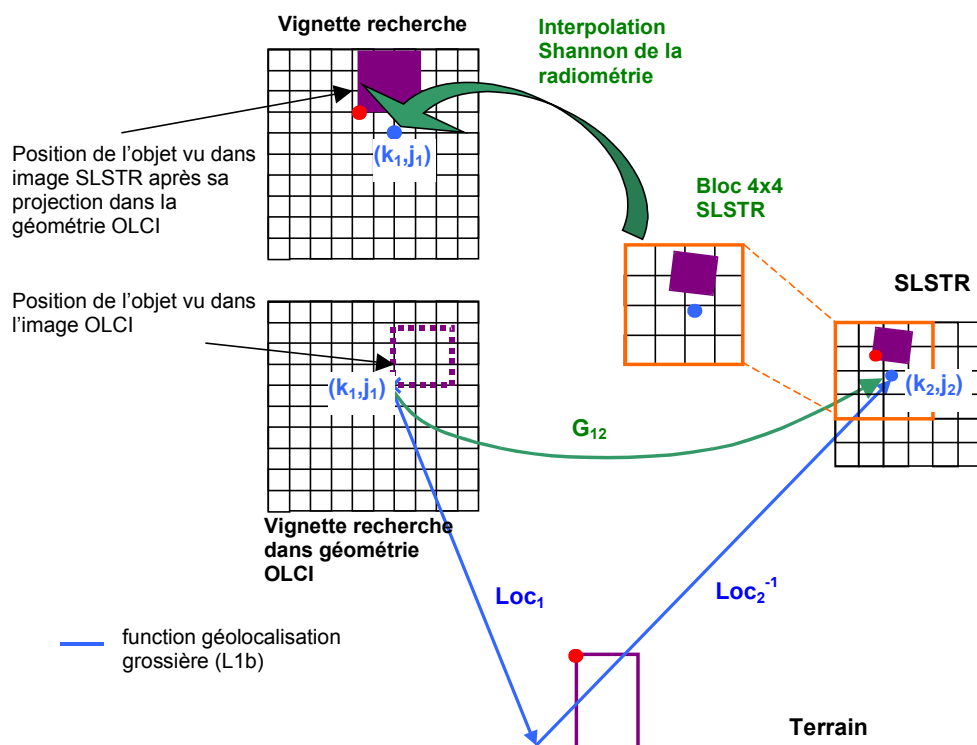
On va ensuite chercher la vignette de recherche (schéma précédent) correspondant à un décalage de  $\Delta$  pixels de la fenêtre de contexte dans les deux directions. Le décalage  $\Delta$  correspond à l'erreur de géolocalisation maximale. On projette la vignette de recherche dans la géométrie OLCI par une interpolation de Shannon qui est plus lente qu'une interpolation bi-cubique, comme le montre Jonathan Israël dans son rapport de stage, mais produit moins de repliement de spectre et s'avère plus proche du filtre idéal (Philippe Lier *et al.*, 08).

La correspondance entre les pixels de l'image OLCI et SLSTR est donnée en composant les fonctions de géolocalisation :

On a d'après [1] et [2] :

$$(k_2, j_2) = loc_2^{-1} \circ loc_1(k_1, j_1) = G_{12}(k_1, j_1) \quad [4]$$

Figure 12: Extraction de la vignette de recherche (ATBD)



### 5.2.3 Calcul de la surface de corrélation

On va ensuite chercher le maximum de la surface de corrélation calculée, pour chaque vignette de même taille que la fenêtre de contexte au sein de la fenêtre de recherche, par inter-corrélation normalisée. L'avantage de cette mesure est qu'elle est insensible aux variations globales de luminosité. L'inconvénient des méthodes basées sur la corrélation est qu'elles présupposent que les tous les pixels à l'intérieur des vignettes subissent la même translation. Les résultats sont donc dégradés lorsque d'autres perturbations sont présentes à l'intérieur des vignettes (rotations, changements d'échelle... (Zitova *et al.*, 2003)).

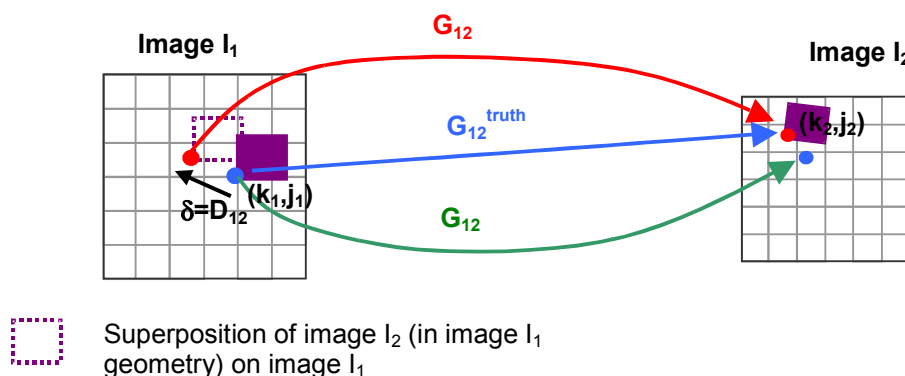
Il est aussi nécessaire de réaliser un contrôle de la qualité de l'appariement pour éliminer les mauvaises corrélations. Outre la validation de la corrélation en fonction d'un seuil sur le score, l'ATBD prévoit de convoluer la surface de corrélation par un filtre Laplacien pour estimer la forme de celle-ci. En effet, une surface avec une faible courbure ou avec des maxima secondaires du même ordre de grandeur que le maximum trouvé est synonyme de mauvaise corrélation.

On détermine ensuite la position sub-pixellaire du maximum par un processus dichotomique en interpolant la surface autour de la position donnée à l'itération précédente et en recherchant son maximum.

### 5.2.4 Modèle de déformations

Le corrélateur estime les décalages en ligne et en colonne aux points de liaison mais on veut les connaître en chaque pixel pour pouvoir estimer la correspondance entre les grilles d'échantillonnage des deux images. Pour cela, on utilise une interpolation basée sur les splines plaques minces qui permettent de déterminer le modèle de déformation basses fréquences (ce modèle n'est pas décrit ici, cf cours P. Julien sur les MNT).

Figure 13: Mise en correspondance des images grâce au modèle de déformation



On note (ATBD):

$$D_{12}(k_1, j_1) = \hat{\delta}_{col}(k_1, j_1) + \hat{\delta}_{row}(k_1, j_1) \quad [5]$$

$$G_{12}^{true}(k_1, j_1) = (k_2, j_2) = G_{12}((k_1, j_1) + D_{12}(k_1, j_1)) \quad [6]$$

$G_{12}$  est la fonction de correspondance, obtenue grâce aux géolocalisations du niveau L1b, qui lie approximativement les pixels OLCI et SLSTR.

$G_{12}^{true}$  est la fonction qui relie les pixels OLCI et SLSTR et que l'on cherche à estimer par application de l'algorithme d'appariement.

Avec  $D_{12}$  grille de déformation donnant le décalage à appliquer pour chaque pixel.

## 6 CADRE DE L'ÉTUDE ET SIMPLIFICATIONS

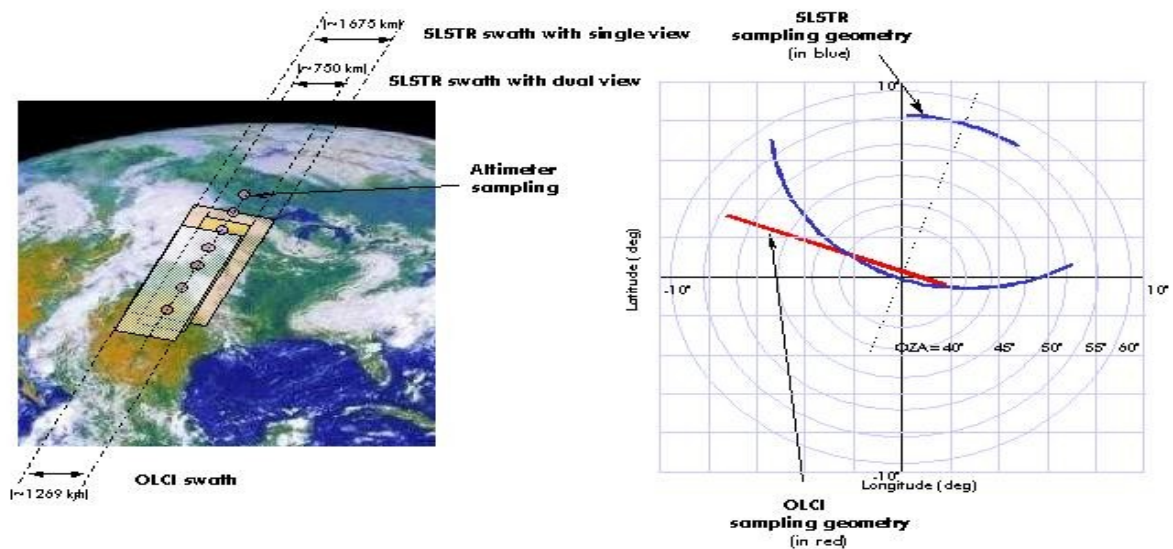
### 6.1 Le modèle numérique de terrain

L'impact du modèle numérique de terrain sur l'appariement est pris en compte au niveau L1b dans le calcul des fonctions de géolocalisation. L'influence de l'erreur du modèle sur le processus de corrélation est modélisée par des perturbations hautes fréquences d'après la présentation des traitements L1c (présentation BUOS, 08). Néanmoins et conformément à l'ATBD, le MNT est considéré comme parfait dans mon étude ce qui n'est pas très dommageable étant donné que l'on prend déjà en compte des perturbations hautes fréquences aléatoires liées aux micro-vibrations.

### 6.2 La géométrie de la prise de vue

Quelques simplifications ont été apportées à l'étude pour ce qui concerne la géométrie d'acquisition. Ainsi, on considérera la prise de vue au nadir sur la zone de recouvrement des images OLCI et SLSTR :

Figure 14: Recouvrement des champs de prise de vue



On ne tiendra pas compte de la géométrie de l'image SLSTR qui sera modélisée dans la géométrie de l'image OLCI mais sous-échantillonnée.

### 6.3 Les bandes spectrales

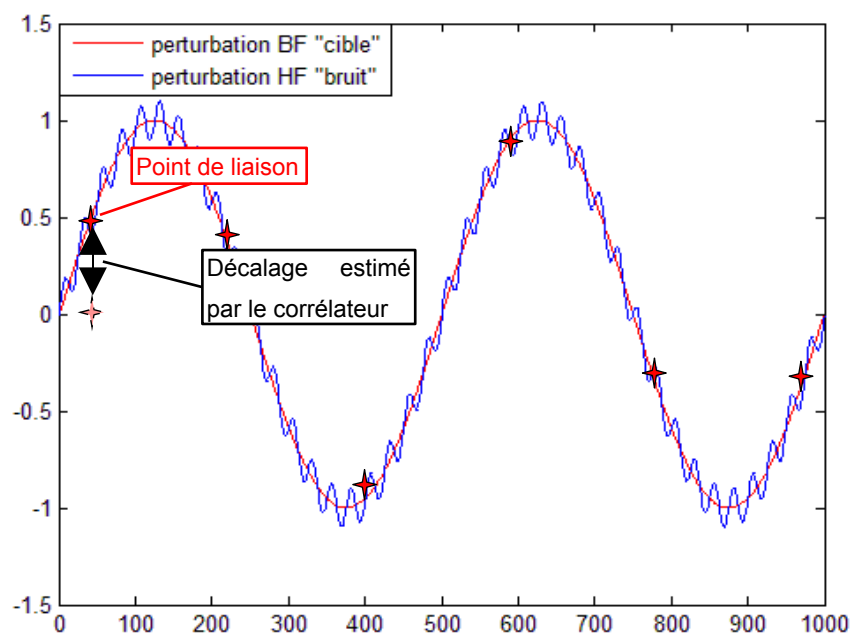
L'appariement entre les images OLCI et SLSTR est effectué dans une bande spectrale commune (ATBD) couvrant le domaine spectral de 855 à 875nm.

### 6.4 La détermination de l'erreur du corrélateur

La discrimination des différentes perturbations géométriques est liée à la taille de la vignette de contexte et à l'échantillonnage des points de liaisons, autrement dit à leur répartition. En effet, on mesure la similarité entre deux vignettes. Ainsi, les perturbations ayant une haute fréquence, au regard de la taille de la vignette de contexte, ne pourront pas être déterminées car le processus de corrélation suppose que tous les pixels inclus dans une vignette de contexte ont le même décalage. Au contraire ces perturbations HF dégradent la mesure faite par corrélation. La performance du corrélateur sera donc mesurée comme sa capacité à restituer la perturbation BF, la perturbation HF étant assimilée à un bruit.

Remarque : On voit ici l'intérêt de ne pas prendre une fenêtre de taille trop importante.

Figure 15: Estimation de l'erreur et échantillonnage des points de liaison





Pour simplifier la simulation, on considérera les perturbations HF comme étant entièrement reportées sur l'image SLSTR tant que l'on estimera les décalages au niveau des points de liaison. Ensuite, après implémentation du modèle de déformation, on appliquera les perturbations basses fréquences sur l'image OLCI pour pouvoir inverser facilement la relation entre les pixels SLSTR et OLCI (fonction  $G_{12}$ ) et connaître la valeur théorique des décalages au niveau de chaque pixel.

Le calcul de performance de l'appariement est réalisé en prenant en compte la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne définie par la formule suivante:

$$erreurRMS = \sqrt{E(\hat{\theta} - \theta)^2} = \sqrt{\text{var}(\hat{\theta}) + \text{biais}^2} \quad [7]$$

Avec  $\hat{\theta}$  l'estimation du décalage réalisé par l'algorithme et  $\theta$  le décalage appliqué.

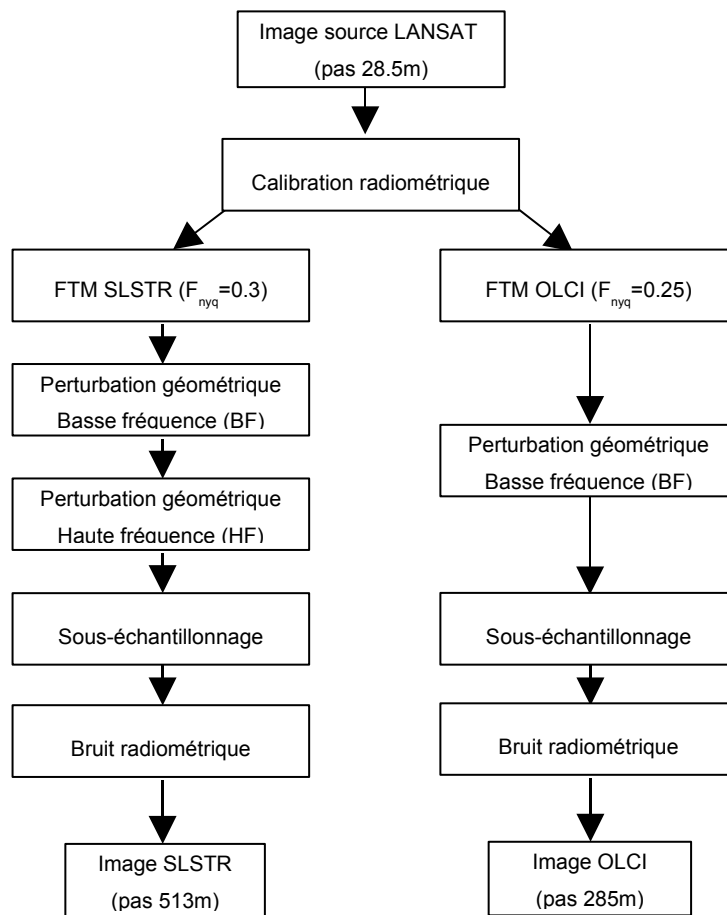


# 7 CHAÎNE DE SIMULATION IMAGES

---

Au début de mon stage, la chaîne image n'était pas en place et seul avait été testé l'algorithme sur une image quelconque. Il fallait donc simuler des images représentatives des capteurs aux simplifications précédentes près. J'ai donc mis en place, avec le soutien théorique de mes tuteurs, la chaîne suivante que je vais expliciter :

Figure 16: Schéma de la chaîne de simulation des images



## 7.1 Image source et points de liaison

Les images ont d'abord été simulées à partir d'une image LANDSAT au pas de 28,5m. Le rapport de résolution entre l'image source et les images OLCI et SLSTR est de 10 et 18 respectivement. Les images étaient initialement obtenues par agrégation des pixels de l'image source. L'image LANDSAT possède une bande spectrale comprise entre 775 et 900nm qui est en cohérence avec celles des images OLCI et SLSTR. La taille de l'image LANDSAT a été réduite pour des problèmes de mémoire MATLAB (3500 par 3000 pixels).

*Figure 17 : Image source*

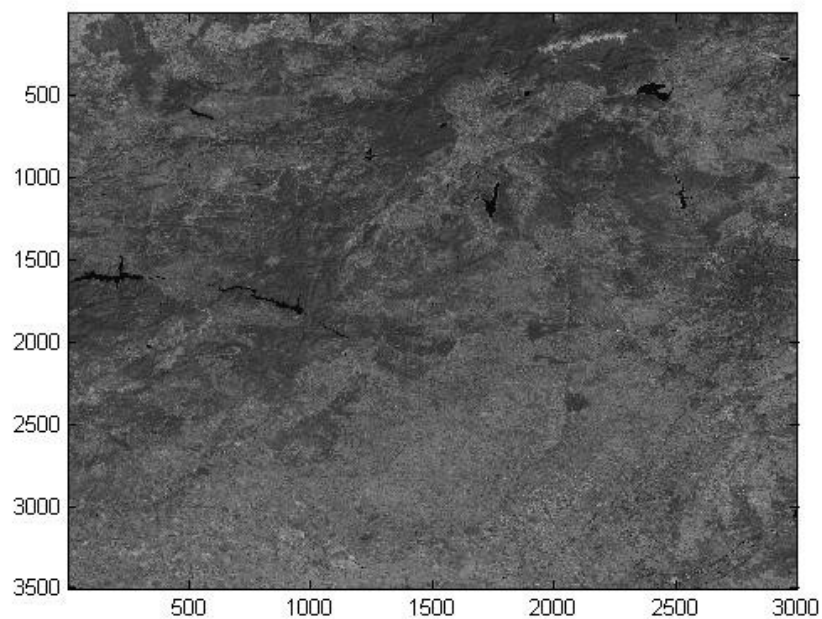


Figure 18 : Image OLCI

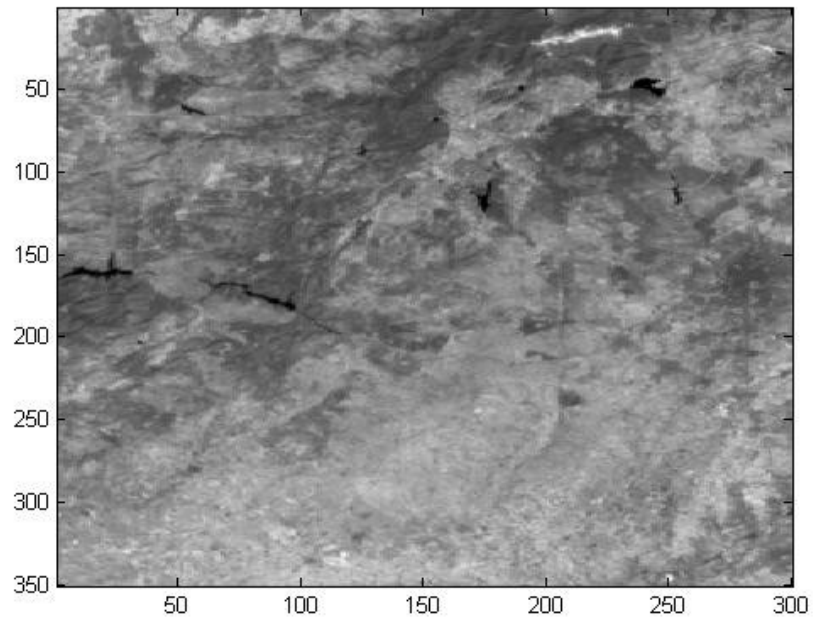
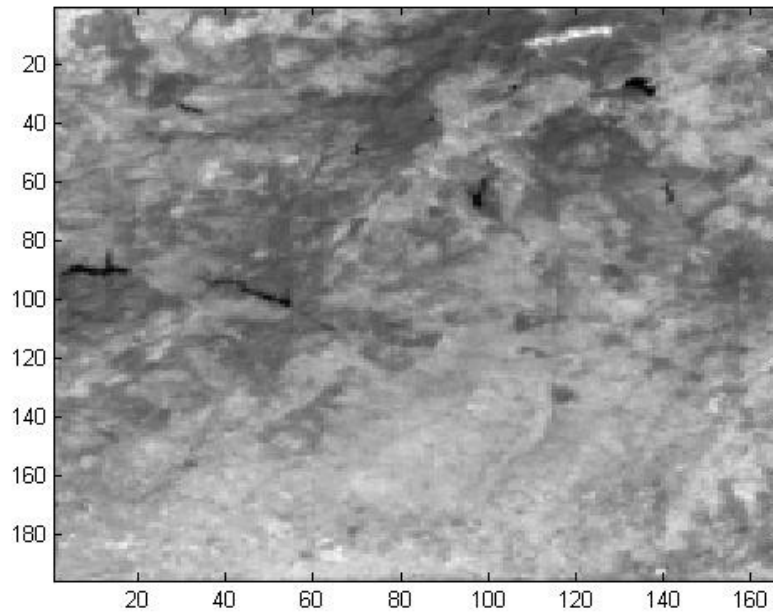


Figure 19 : Image SLSTR



Les points de liaisons ont d'abord été choisis régulièrement répartis sous forme de grille sans considérations sur leur qualité, ceci pour effectuer des statistiques. Je présenterai, par la suite, les méthodes testées pour les sélectionner et les résultats afférents.

## **7.2 Calibration radiométrique**

Cette calibration est nécessaire pour remonter aux paramètres physiques de prise de vue mais aussi pour simuler le bruit radiométrique et en mesurer l'impact.

J'ai utilisé les spécifications Sentinel-3 pour chaque instrument qui fournissent les luminances minimales et maximales admissibles par les capteurs. On peut, par une simple relation linéaire, en déduire les luminances dans toute l'image par la formule suivante :

$$L = \alpha \cdot I + \beta \quad (L : \text{luminance et } I : \text{niveaux de gris dans l'image source}) \quad [8]$$

OLCI :

SLSTR :

$$L_{\min} = 2.88 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m} \quad L_{\min} = 1.53 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$$

$$L_{\max} = 286.8 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m} \quad L_{\max} = 337.9 \text{ W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$$

On fait correspondre  $L_{\min}$  et  $L_{\max}$  respectivement à la plage de dynamique de l'image source.

### 7.3 FTM

La modélisation des FTM est très bien expliquée dans le livre « Imagerie spatiale » (Philippe Lier *et al.*, 08) et j'en reprends le principe.

Les FTM, optique et détecteur, sont respectivement modélisées par une fonction exponentielle décroissante et un sinus cardinal apodisé. La FTM est appliquée directement dans l'espace de Fourier par multiplication avec la transformée de Fourier de l'image source par soucis de gain de temps.

La FTM de l'instrument s'écrit littéralement :

$$FTM_{ins} = FTM_{opt} \times FTM_{det} = \sin c\left(\frac{f}{f_e}\right) \sin c\left(\alpha \cdot \frac{f}{f_e}\right) \times e^{-a \cdot f} \quad [9]$$

Avec  $\alpha$  le paramètre d'apodisation et  $f_e$  la fréquence d'échantillonnage du détecteur.

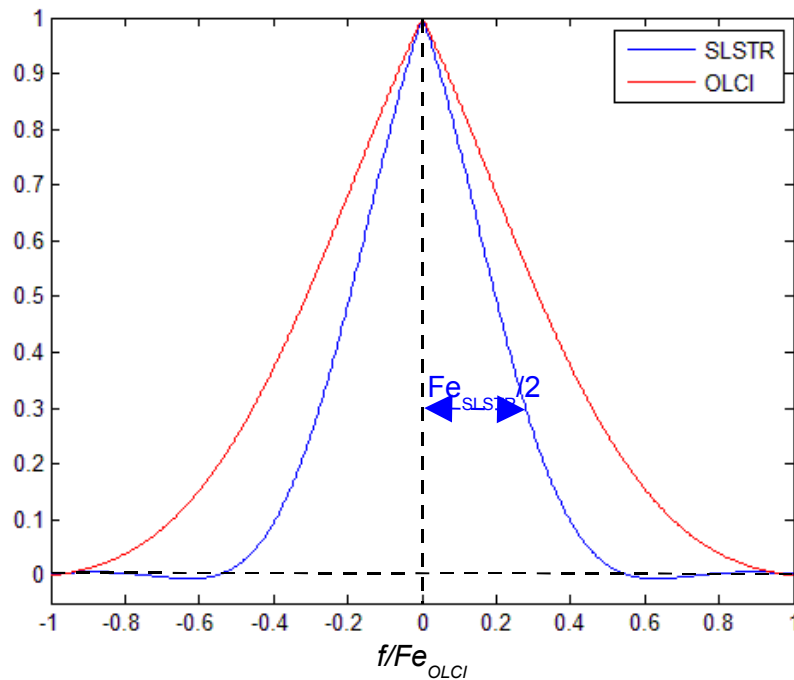
On impose la FTM à la fréquence de Nyquist notée  $f_{ny}$ , ce qui revient à écrire :

$$f_{ny} = \sin c\left(\frac{1}{2}\right) \sin c\left(\alpha \cdot \frac{1}{2}\right) \times e^{-a \cdot \frac{f_e}{2}}$$

Et on en déduit la valeur de  $a$  :

$$a = -\frac{\ln\left(\frac{f_{ny}}{\sin c(0.5) \cdot \sin c(0.5 \cdot \alpha)}\right)}{f_e/2} \quad [10]$$

Figure 20: FTM des images OLCI et SLSTR



Les valeurs de FTM à la fréquence de Nyquist n'étant pas nulles (0,25 pour l'image OLCI et 0,3 pour l'image SLSTR), il y a nécessairement un repliement de spectre lors du sous-échantillonnage ce qui peut avoir un impact sur la performance de l'algorithme d'appariement.

Nota : la FTM du capteur SLSTR n'est pas isotrope mais on ne le prendra pas en compte pour notre étude.

## 7.4 Perturbations géométriques BF

Dans un premier temps, mes tuteurs m'ont incité à modéliser les perturbations BF sur l'image SLSTR en décalant les lignes et/ou colonnes de l'image source avant de la sous-échantillonner. En effet, ceci est valable car on considère des perturbations BF de périodes importantes au regard de la taille de la vignette de contexte et donc localement, ces perturbations peuvent être approximées par des décalages constants dans les vignettes. De plus, nous effectuons des

statistiques indépendamment du modèle de déformation pour mesurer la performance de la corrélation seule.

Ensuite, pour estimer la performance de la chaîne entière, modèle de déformation inclus, nous appliquerons la perturbation BF sur l'image OLCI, au lieu de l'image SLSTR, sous la forme d'une sinusoïde afin d'estimer l'erreur du corrélateur sans problème d'inversion de la fonction de géolocalisation de l'image SLSTR :

En effet, d'après [6] le décalage BF, exprimé dans la géométrie OLCI, est :

$$D_{12}(k_1, j_1) = G_{12}^{-1} \circ G_{12}^{true}(k_1, j_1) - (k_1, j_1) \quad [11]$$

et donc il vaut mieux appliquer la perturbation BF sinusoïdale directement sur l'image OLCI pour construire  $G_{12}^{true}(k_1, j_1)$  et comparer les décalages estimés par le corrélateur avec les décalages théoriques.

## **7.5 Perturbations géométriques HF**

Mes tuteurs ont suggéré de modéliser les perturbations hautes fréquences sous forme aléatoire, traduisant les nombreux phénomènes sources d'erreur (micro-vibrations, MNT, géométrie d'acquisition). Ainsi, on crée une matrice de bruit grâce à une gaussienne de moyenne nulle et d'écart type sigma correspondant à une perturbation du satellite de 22" en roulis et en tangage, conformément aux données du bilan d'erreur Sentinel-3, ce qui, projeté dans la géométrie SLSTR équivaut à 0.17 pixel au nadir. Cette gaussienne est tronquée en abscisse à trois fois la valeur de sigma car les décalages ne peuvent pas physiquement être infinis (fonction matlab récupérée sur internet).

## **7.6 Ré-échantillonnage**

L'image source est sous-échantillonnée d'un facteur 10 et 18 pour produire respectivement les images OLCI et SLSTR.

Les perturbations géométriques sont appliquées en même temps que le sous-échantillonnage. Pour ce faire, on crée une grille de sous-échantillonnage à laquelle on ajoute la perturbation HF dans le cas de l'image SLSTR et la perturbation BF pour l'image OLCI lors de l'étude des performances avec modèle de déformation. La relation entre les images simulées et l'image source est de la forme :

$$(k, j) = s \times ((k', j') - 1) + 1 + Perturb(k', j') \quad [12]$$

$(k,j)$  : indice de l'image source avec  $k \in [1,M]$  et  $j \in [1,N]$ , M et N nombre de lignes/colonnes de l'image source.



$(k',j')$  : indice de l'image sous-échantillonnée avec  $k' \in [1,M']$  et  $j' \in [1,N']$ ,  $M'$  et  $N'$  nombre de lignes/colonnes de l'image sous-échantillonnée.

$s$  : facteur de sous-échantillonnage.

Perturb : perturbation géométrique HF ou BF.

## **7.7 Bruit radiométrique**

Le bruit radiométrique suit une loi gaussienne de modèle :

$$\sigma(L) = \sqrt{\alpha \times L + \beta} \quad (\text{Philippe Lier } et al., 08) \quad [13]$$

$L$  étant la luminance et  $\sigma$ , l'écart type du bruit.

On retrouve  $\sigma$  grâce aux valeurs du rapport signal sur bruit :

$$SNR = L/\sigma(L) \quad [14]$$

On prendra les valeurs de SNR suivantes issues des spécifications Sentinel-3 ; les valeurs  $L_{min}$  et  $L_{max}$  ont été fournies précédemment dans la partie « calibration » :

	SNR à $L_{min}$	SNR à $L_{max}$
SLSTR	32.7	1385
OLCI	226	1862

## 8 TESTS ET ANALYSE DE PERFORMANCE

---

Après avoir mis en place la chaîne image et l'algorithme d'appariement, je me suis efforcé d'appréhender le mode de fonctionnement du corrélateur pour déterminer quels paramètres influent sur ses performances, dans quelle mesure, et le cas échéant, comment les régler pour améliorer l'appariement.

### 8.1 Protocole de tests

La précision de l'appariement dépend de la performance de l'algorithme de corrélation qui doit estimer le plus justement possible les décalages au niveau des points de liaison, mais aussi du modèle de déformation qui réalise une interpolation entre les points de liaison pour fournir une information sur l'image entière. Par conséquent, mes tuteurs ont proposé de décorrélérer le problème en caractérisant la performance du corrélateur d'abord en chaque point de liaison, puis en rajoutant le modèle de déformation.

#### 8.1.1 Performance autour des points de liaison

Pour cela, j'ai réalisé des statistiques avec de nombreux points de liaison sans prendre en compte le modèle de déformations afin de voir comment se comporte le corrélateur et quelles améliorations peuvent être envisagées. J'applique donc la perturbation BF (voir paragraphe 7.4) sous forme d'un décalage sub-pixellaire des lignes et des colonnes de l'image SLSTR.

On peut écrire la relation liant les pixels SLSTR à ceux de l'image OLCI grâce aux géolocalisations:

$$G_{12}(k_1, j_1) = \frac{s_1}{s_2} \cdot (k_1, j_1) + \frac{s_2 - s_1}{s_2} = (k_2, j_2) \quad [15]$$

Je simule l'image SLSTR avec  $\delta_k$  et  $\delta_j$  les décalages BF en ligne et colonne dans l'image source avant sous-échantillonnage et avec  $\delta_{HF}$  la perturbation HF sur l'image SLSTR:

$$\begin{cases} (k, j) = s_1 \cdot (k_1, j_1) + 1 - s_1 \\ (k, j) + \delta_k + \delta_j = s_2 \cdot (k_2, j_2) + 1 - s_2 + \delta_{HF} \end{cases}$$

Ce qui permet d'obtenir la relation « vraie » entre les pixels OLCI et SLSTR lorsque l'on ne prend pas en compte la perturbation HF:

$$G_{12}^{true}_{BF}(k_1, j_1) = \frac{s_1}{s_2} \cdot (k_1, j_1) + \frac{s_2 - s_1}{s_2} + \frac{\delta_k}{s_2} + \frac{\delta_j}{s_2} = (k_2, j_2) \quad [16]$$

d'où d'après [11] le décalage BF appliqué au point  $(k_1, j_1)$  :

$$\delta_{théorique} = \frac{(\delta_k, \delta_j)}{s_1} \quad [17]$$

J'obtiens les erreurs au niveau des points de liaison en effectuant la différence avec les décalages trouvés par le corrélateur.

### 8.1.2 Performance de la chaîne globale

J'ai choisi d'appliquer la perturbation BF sur toute l'image OLCI pour connaître le décalage en chaque pixel et ainsi le comparer avec le modèle de déformation splines plaques minces. On peut écrire la formulation mathématique :

$$\begin{cases} (k, j) = s_2 \cdot (k_2, j_2) + 1 - s_2 + \delta_{HF}(k_2, j_2) \\ (k, j) = s_1 \cdot (k_1, j_1) + 1 - s_1 + \delta_{BF}(k_1, j_1) \end{cases}$$

avec  $\delta_{HF}$  la perturbation HF aléatoire et  $\delta_{BF}$  la perturbation BF sur l'image OLCI correspondant à un mouvement suivant l'axe de roulis  $\delta_{BF}^{col}$ , et l'axe de tangage  $\delta_{BF}^{row}$ :

$$\delta_{BF}(k_1, j_1) = \begin{bmatrix} \delta_{BF}^{row} \\ \delta_{BF}^{col} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k \cdot \sin(2\pi\nu_k k_1) \\ A_j \cdot \sin(2\pi\nu_j j_1) \end{bmatrix} \quad [18]$$

On a donc :

$$(k_2, j_2) = G_{12}^{true}_{BF}(k_1, j_1) = \frac{s_1}{s_2} (k_1, j_1) + \frac{s_2 - s_1}{s_2} + \delta_{BF}(k_1, j_1) \quad [19]$$

Or d'après [11] et [15], le décalage BF appliqué au point  $(k_1, j_1)$  est :

$$D(k_1, j_1) = \frac{s_2}{s_1} \left( \frac{s_1}{s_2} (k_1, j_1) + \frac{s_2 - s_1}{s_2} + \delta_{BF}(k_1, j_1) \right) + \frac{s_2 - s_1}{s_1} - (k_1, j_1) = \delta_{BF}(k_1, j_1) \quad [20]$$

Si l'on avait appliqué le décalage sur l'image SLSTR, nous n'aurions pas pu inverser la géolocalisation de manière simple.

### 8.1.3 Paramètres ayant un impact sur la performance d'appariement

Nous avons caractérisé, avec l'aide de mes tuteurs, les paramètres ayant un impact sur la performance d'appariement pour déterminer les meilleurs modes de fonctionnement :

<b>Paramètres ajustables de l'algorithme</b>	<b>Paramètres subis par l'algorithme nécessitant une analyse de sensibilité</b>
Texture / contenu de la vignette de contexte/recherche	Perturbation BF
Taille de la vignette de contexte	Perturbation HF (écart-type du bruit)
Interpolation	Géométrie des images
Modèle de déformation splines plaques minces (paramètre de rigidité $\lambda$ )	FTM
Densité des points de liaison	Bruit radiométrique
	Géométrie des pixels

Ne pouvant pas tester l'influence de tous ces paramètres indépendamment, mes tuteurs m'ont suggéré de ne retenir que les suivants :

- la perturbation HF qui n'est pas ajustable mais qui va entacher d'erreur la corrélation ;
- la perturbation BF que l'on cherche à modéliser ;
- la texture pour permettre d'optimiser le choix des points de liaison ;
- la taille de la vignette de contexte qui indique plus ou moins d'information ;
- la densité de point de liaison qui doit permettre de « reconstituer » la perturbation BF ;
- le paramètre de rigidité du modèle de déformation splines plaques minces.

Les deux derniers paramètres n'interviendront, bien évidemment, qu'à l'analyse de la chaîne entière.

## 8.2 Aperçu des analyses réalisées

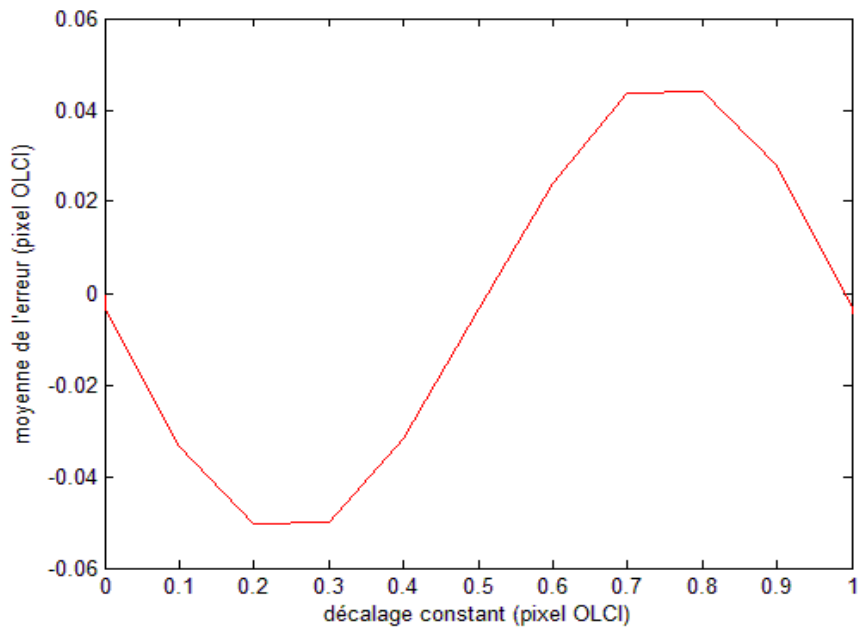
SENSIBILITE AUX PERTURBATIONS HF et BF		
Objectifs	Tests	N° de §
Sensibilité aux perturbations BF : Mise en évidence de la dépendance du biais aux perturbations BF. Tester des voies d'amélioration pour diminuer le biais du corrélateur. <i>Ne prendre en compte que les perturbations BF.</i>	Rapport des FTM	<b>8.3.1.1</b>
	Filtrage de la vignette de recherche <i>(plus graphique avec perturbations HF)</i>	<b>8.3.1.2</b>
Sensibilité/Robustesse aux perturbations HF	Ajout de perturbations HF en plus de BF. Perturbations HF de type aléatoire pour effectuer de nombreux tirages	<b>8.3.2</b>
Remarques : L'analyse des performances est réalisée autour des points de liaison Le mode de test avec perturbations HF est conservé pour les analyses suivantes qui emploieront ainsi la même statistique, soit plusieurs réalisations des perturbations HF aléatoires à différentes amplitudes.		
SELECTION DES POINTS D'INTERET		
Objectifs	Points de liaison sélectionnés par	N° de §
Détection des zones de l'image supposées offrir le meilleur appariement. Sélection et comparaison des méthodes. On comparera les méthodes testées avec des points sélectionnés arbitrairement suivant une grille régulière	Zone de fort gradient	<b>8.4.1.1</b>
	Technique basée sur les ondelettes	<b>8.4.1.2</b>
	Détecteur de Harris modifié	<b>8.4.1.3</b>
REGLAGE DES PARAMETRES DU CORRELATEUR		
Objectifs	Influence du paramètre	N° de §
Déterminer le mode de fonctionnement optimal du corrélateur	Taille de la fenêtre de contexte	<b>8.5.1</b>
	Paramètre $\lambda$ du modèle de déformation	<b>8.5.2</b>

## 8.3 Analyse de sensibilité aux perturbations BF & HF

### 8.3.1 Impact des perturbations BF et diminution du biais du corrélateur

Dans un premier temps j'ai testé l'algorithme pour des décalages constants (entre 0 et 1 pixel OLCI) sur 1575 points de liaisons sélectionnés suivant une grille régulière, sans les perturbations HF afin de mettre en évidence le biais du corrélateur illustré sur la figure suivante (biais suivant y):

Figure 21: Biais du corrélateur



On voit donc que le biais suit une sinusoïde approximativement nulle en 0, 0,5 et 1 pixel OLCI. Une partie de ce biais peut s'expliquer par la présence d'aliasing (repliement de spectre) dans les images comme le montre Philippe Blanc dans sa thèse (P. Blanc, 1999).

Par ailleurs, nous avons rencontré Philippe Blanc qui a suggéré deux pistes pour éliminer les fréquences subissant le repliement du spectre afin de diminuer le biais :

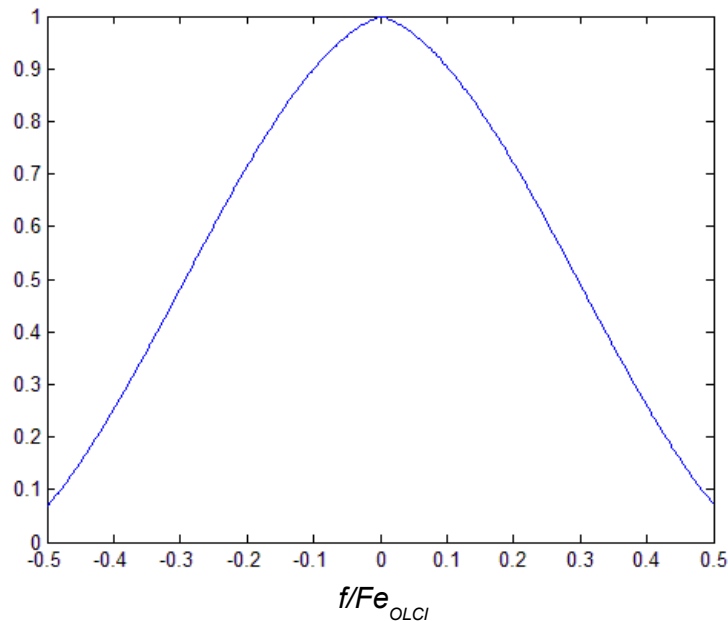
- un rapport des FTM ;
- un filtrage passe-bas de la vignette de recherche.

### 8.3.1.1 Rapport des FTM

Pour que l'appariement soit le meilleur possible, il est intéressant que les amplitudes des fréquences soient du même ordre de grandeur, ce qui revient à imaginer une image OLCI prise avec la même FTM que le capteur SLSTR.

Pour diminuer le biais du corrélateur, j'ai donc essayé un rapport de FTM pour « ramener » le contenu fréquentiel de l'image OLCI proche de celui de l'image SLSTR par analogie avec une déconvolution qui augmente les hautes fréquences (Philippe Lier *et al.*, 08). L'inconvénient de cette méthode est le risque de rehaussement du bruit radiométrique mais étant donné que le SNR de l'image OLCI est très bon, on suppose que cet effet sera très réduit.

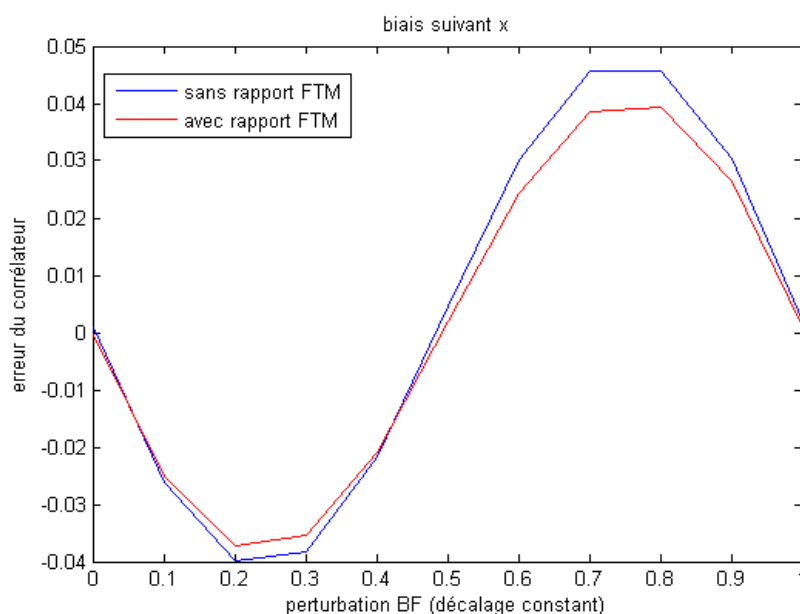
Figure 22: Rapport des FTM des images SLSTR et OLCI



En multipliant la transformée de Fourier de l'image OLCI par le rapport  $\frac{FTM_{SLSTR}}{FTM_{OLCI}}$ , on devrait intuitivement gagner en corrélation car les amplitudes des fréquences seront les mêmes. On pourra cependant remarquer que le repliement de spectre, dû à l'échantillonnage des images, ne sera pas supprimé par ce traitement.

Le résultat sur le biais est présenté ci-dessous :

Figure 23: Effet du rapport des FTM sur le biais



Le biais du corrélateur paraît légèrement plus faible. Il faudra cependant se méfier de ne pas diminuer le biais en contrepartie de la performance d'appariement.

**En effet, comme le montre la thèse de Philippe Blanc, l'écart type du corrélateur est inversement proportionnel à l'écart type du gradient ainsi qu'à la racine carrée du rapport signal sur bruit. Par conséquent, en éliminant les hautes fréquences, on enlève l'aliasing et le biais diminue mais en contrepartie l'écart type du gradient est plus faible ce qui augmente l'écart type du corrélateur. Ainsi, la performance de corrélation résulte d'un compromis entre le biais et l'écart type.**

### 8.3.1.2 Filtrage passe-bas de la vignette de recherche

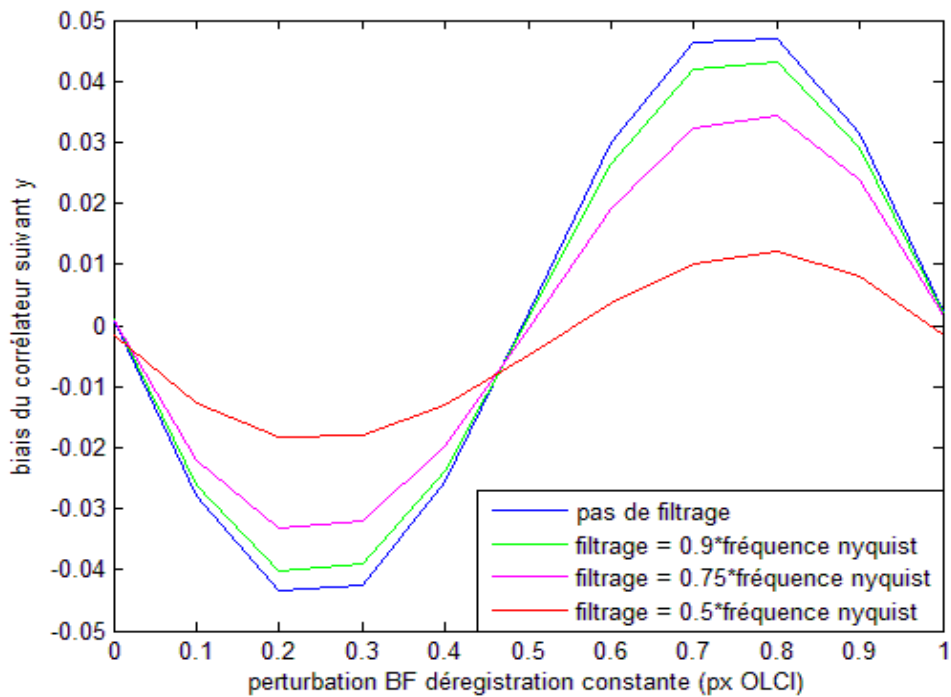
Pour diminuer l'influence du repliement du spectre sur le biais, Philippe Blanc nous a suggéré de réaliser un filtrage passe-bas de la vignette de recherche de l'image SLSTR, après sa projection dans la géométrie OLCI pour que le filtre soit appliqué suivant les axes de la géométrie OLCI de référence. Il sera aussi nécessaire d'augmenter le filtrage de la vignette de contexte OLCI afin de corrélérer sur le même domaine fréquentiel.



Mon tuteur m'a suggéré d'utiliser le même type de filtre que pour le filtrage de la vignette OLCI, soit un sinus cardinal apodisé par une fenêtre de Blackmann.

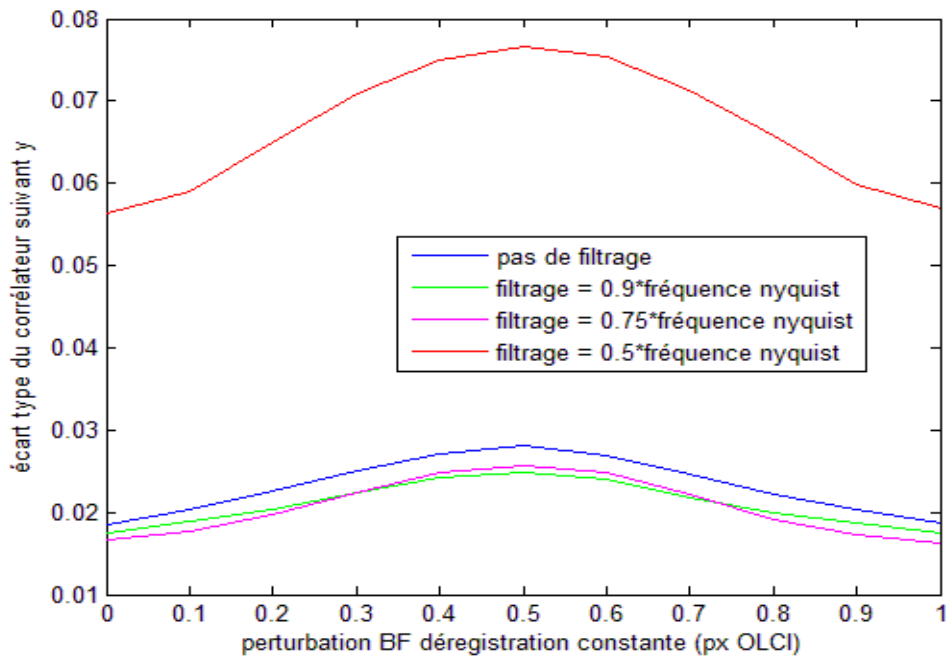
J'ai effectué quatre tests avec un filtrage passe-bas qui élimine de manière croissante les hautes fréquences, jusqu'à ne laisser passer que les fréquences inférieures à la moitié de la fréquence de Nyquist :

Figure 24: Influence du filtrage sur le biais



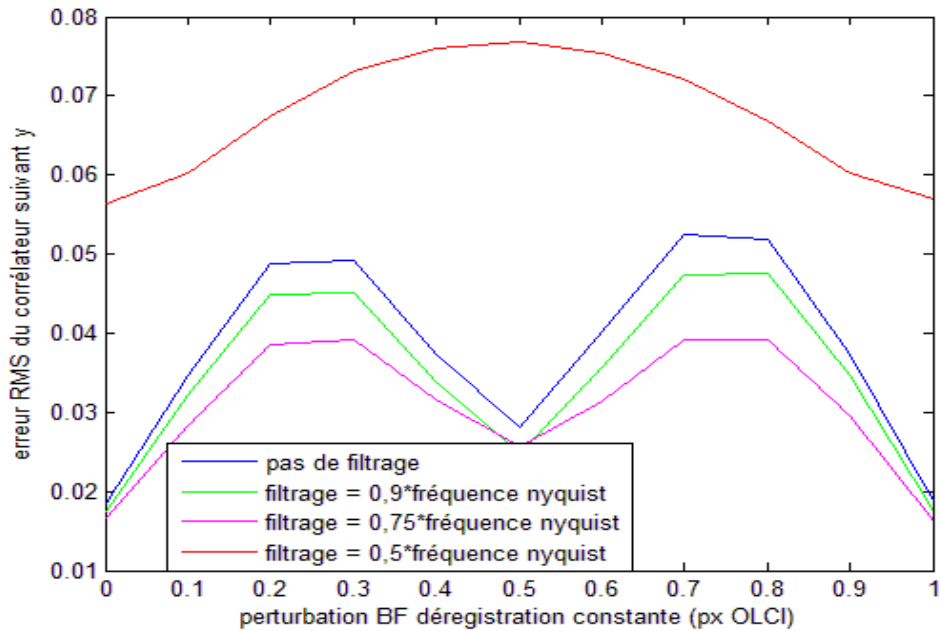
Suite à la remarque du dernier paragraphe concernant la dualité biais/écart type, je me suis intéressé à l'écart type, censé augmenter avec le filtrage :

Figure 25: Influence du filtrage sur l'écart type



On voit donc que le filtrage à 0,75 fois la fréquence de Nyquist semble le meilleur compromis et que le filtrage à la moitié de la fréquence de Nyquist augmente considérablement l'écart type. La figure suivante présente la valeur de l'erreur RMS :

Figure 26: Influence du filtrage sur l'erreur RMS

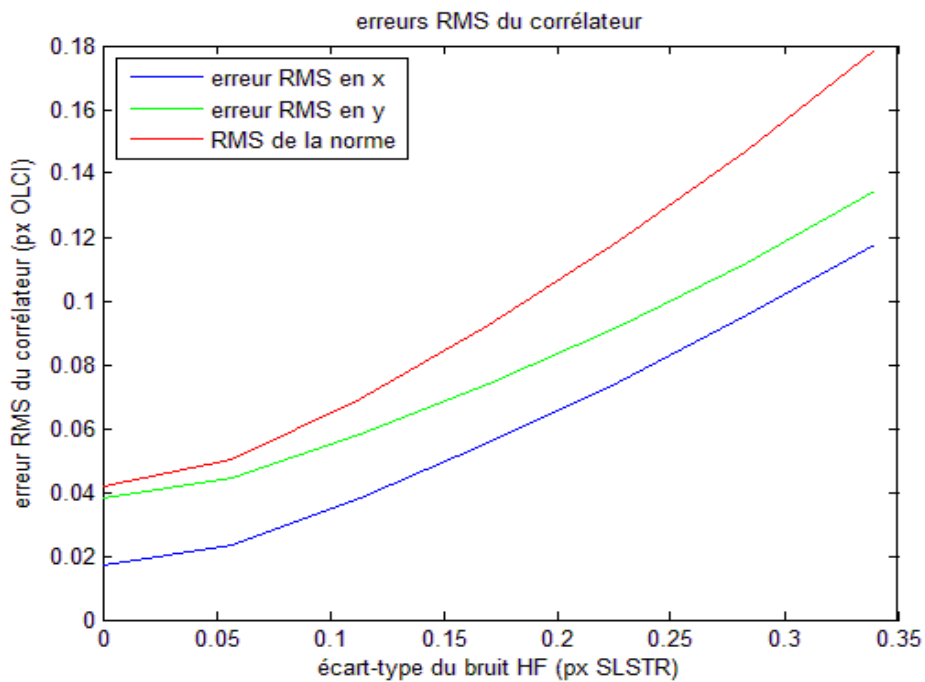


Remarque : J'ai, par la suite, effectué d'autres tests pour analyser la sensibilité du filtrage à la perturbation HF dont les résultats sont présentés dans l'annexe 1.

### 8.3.2 Sensibilité du corrélateur aux perturbations HF

Pour tester la sensibilité de l'algorithme aux perturbations HF et obtenir ainsi des statistiques représentatives, j'ai utilisé 48 textures/points de liaison, avec 100 perturbations HF aléatoires par texture pour 11 valeurs de l'écart type de la perturbation géométrique HF, ce qui me permet d'obtenir, pour une perturbation BF fixée, la courbe suivante qui montre une dégradation de la performance avec la perturbation HF:

Figure 27: Erreur RMS du corrélateur autour des points de liaison pour une perturbation BF nulle



*Remarque :* on constate une différence permanente de performance suivant les 2 axes de l'image qui, à ce jour, n'est pas expliquée. J'ai effectué des tests avec une image carrée pour exclure une éventuelle erreur due au format de la FTM mais cela n'a rien changé, de même que les tests avec une image sans FTM. Cependant, les courbes s'inversent lorsque l'on transpose la « matrice » image rectangulaire.

Ces tests étant très longs, de l'ordre de sept heures, j'ai réduit le nombre de tirages par texture à 20 et le nombre d'échantillons par perturbation HF à 7 (la valeur pour l'écart type égal à 0.17 pixel SLSTR étant incluse). Ceci donne un écart de  $2.10^{-3}$  entre les deux estimations soit 1.7% en relatif ce qui est négligeable au regard de la performance spécifiée de 0.3 pixel OLCI.

## 8.4 SELECTION DES POINTS D'INTERET

La qualité de l'appariement obtenu dépend entre autres du contenu radiométrique de l'image (texture) autour des points de liaisons. On va donc chercher quelles textures donnent les meilleurs résultats de corrélation.

## **8.4.1 Sélection de textures caractéristiques**

Il existe de nombreuses méthodes d'extraction de points caractéristiques en fonction des problématiques d'appariement rencontrées (rotation des images, changement d'échelle, images médicales...). Ainsi, il n'existe pas, à ma connaissance, d'étude qui définit la méthode à prendre en compte pour sélectionner les textures offrant la meilleure corrélation dans notre cas.

L'ATBD définit un point de liaison comme un point localisant un objet « saillant » ce qui veut dire que la vignette extraite autour ce point a de bonnes propriétés de corrélation. Généralement, l'objet doit :

- être contrasté ;
- être spatialement limité au sein de la vignette de corrélation ;
- contenir des composantes hautes fréquences dans au moins 2 directions;
- ne pas être périodique ;
- être stable sous différentes luminosités et aux changements saisonniers.

J'ai retenu trois approches dont les avantages et inconvénients vont être décrits.

### **8.4.1.1 Approche gradient**

La corrélation étant meilleure sur les zones contrastées, il est intéressant de considérer le gradient de l'image. Cependant, la dérivée est mal conditionnée (Ziou *et al.*, 1998) et se trouve grandement affectée par le bruit qu'il conviendra de supprimer par un lissage. Il faudra néanmoins faire en sorte que ce lissage n'induisse pas une perte trop importante de l'information sur les contours.

Dans cette optique, les filtres de Sobel et de Prewitt (cours « Reconstruction » par Bruno Vallet) peuvent être intéressants car ils intègrent un lissage respectivement par une gaussienne et une moyenne :

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -a & 0 & a \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ 1 \end{bmatrix} \times [-1 \ 0 \ 1] \quad [21]$$

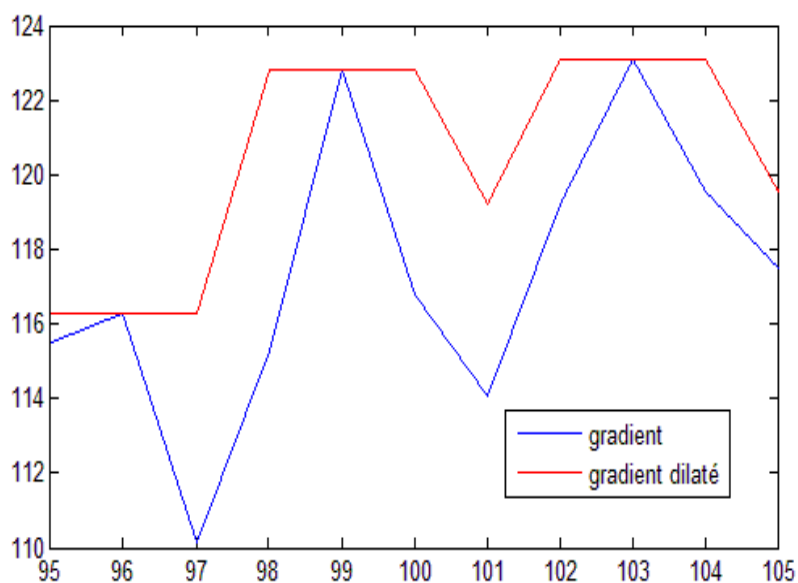
Avec  $a = 2$  pour le filtre de Sobel (Gaussienne) et  $a = 1$  (Moyenne) pour le filtre de Prewitt.

Remarques : Le détecteur de Sobel est par exemple utilisé pour apparier les images des satellites météorologiques de la série GOES-IM lancés entre 1994 et 2001 avec des résolutions de 1km, 4km et 8km (Eastman *et al.*, 2007).

Certaines méthodes utilisent le passage par zéro du Laplacien en appliquant un filtre LoG (cours « Filtrage » par Nicolas David) qui a l'avantage de réaliser un lissage par une Gaussienne pour réduire le bruit.

Nous avons choisi d'utiliser un filtre gradient simple avec un lissage de l'image pour réduire le bruit. On moyenne les gradients  $x$  et  $y$  sur une fenêtre glissante de la taille de la fenêtre de contexte pour sélectionner des zones caractéristiques du même ordre de grandeur et on retient les gradients supérieurs à un certain seuil que l'on choisira en fonction du nombre de points voulus. J'ai choisi de rechercher les maxima locaux, pour obtenir des points de liaison suffisamment espacés, en effectuant une dilatation morphologique, sur l'image de la norme du gradient, avec un élément structurant de la taille de la vignette de contexte et en prenant l'intersection de l'image ainsi obtenue avec l'image originelle du gradient:

Figure 28: Coupe de la dilatation morphologique sur l'image de la norme du gradient



### 8.4.1.2 Détecteurs d'angles et de contours

Les coins et les contours constituent des zones très caractéristiques où l'intensité varie localement dans une ou plusieurs directions. Les coins, en particulier, sont intéressants à cause de leur invariance à la géométrie et sont aussi moins sensibles au bruit que ceux déterminés par le gradient (Zitova et al., 2003). On pourra citer comme détecteurs celui très populaire de Harris mais aussi de Förstner.

Ces deux détecteurs utilisent les valeurs propres d'une matrice d'auto-corrélation locale  $A$  pondérée par une fenêtre gaussienne  $w(x,y)$  ( $\sigma = 2$ ; Schmid et al., 2000) pour détecter les variations de l'image. J'ai choisie de prendre une fenêtre gaussienne de même taille que la vignette de contexte pour considérer des coins de cette grandeur.

$$A(x, y) = w(x, y) \otimes \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad [22]$$

Avec  $I_x$  et  $I_y$  les dérivées de l'image suivant  $x$  et  $y$ .

Le détecteur de Förstner réalise en plus un filtrage de l'image par une gaussienne ( $\sigma = 0.7$  ; Schmid et al., 2000) pour lisser le bruit avant de déterminer la matrice d'auto-corrélation.



Je propose d'utiliser une version améliorée du détecteur de Harris, avec un pré-filtrage de l'image par une gaussienne ( $\sigma = 1$  ; Schmid et al., 2000), car il donne les meilleurs résultats en terme d'information et de répétabilité (Schmid et al., 2000) ; c'est surtout la qualité « information » qui m'intéresse ici car une vignette avec un maximum d'information devrait mieux corrélérer.

Remarque : l'algorithme de Förstner a, par exemple, été utilisé par la NASA pour la mission Mars Lander.

### 8.4.1.3 Transformée en ondelettes

Au cours de ma bibliographie, j'ai rencontré des méthodes basées sur les ondelettes, pour extraire un point caractéristique, qui m'ont paru très intéressantes car elles permettent de discriminer les fréquences dans l'espace ce qui peut être utile pour ne sélectionner que des points de liaison peu touchés par le repliement de spectre qui se situe par essence dans les hautes fréquences.

Mon idée sous-jacente est donc de déterminer les zones où le module de la transformée en ondelettes (Fonseca et al., 1996) est maximum sur l'ensemble des niveaux de décomposition en ondelettes et prioritairement pour les fréquences non affectées par le repliement du spectre, donc basses.

Je propose d'utiliser un algorithme à trous (Djamji et al., 1995) qui est assez simple d'implémentation, rapide et qui permet d'obtenir une transformée en ondelettes discrète invariante par translation et ainsi de gagner en précision.

On peut écrire la transformée de Fourier d'une ondelette à l'échelle  $s$  et à la translation  $t$  :

$$TF[\psi_{s,t}(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x-t}{s}\right) e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad [23]$$

Soit, par le changement de variable  $t = x - s * X$  :

$$\boxed{TF[\psi_{s,t}(x)] = \sqrt{s} * \psi(s \cdot f)} \quad [24]$$

Il faut donc réduire le spectre de l'ondelette de  $s$  fois à chaque changement d'échelle.

Pour cela, j'applique itérativement un noyau de convolution  $h^i$  séparable issu d'un même noyau  $h$  sur lequel on intercale des zéros à chaque changement d'échelle, ce qui correspond à une contraction du spectre en puissance de deux. J'ai utilisé comme noyau générateur le plus simple proposé par Djamji (Djamji et al., 1995) :

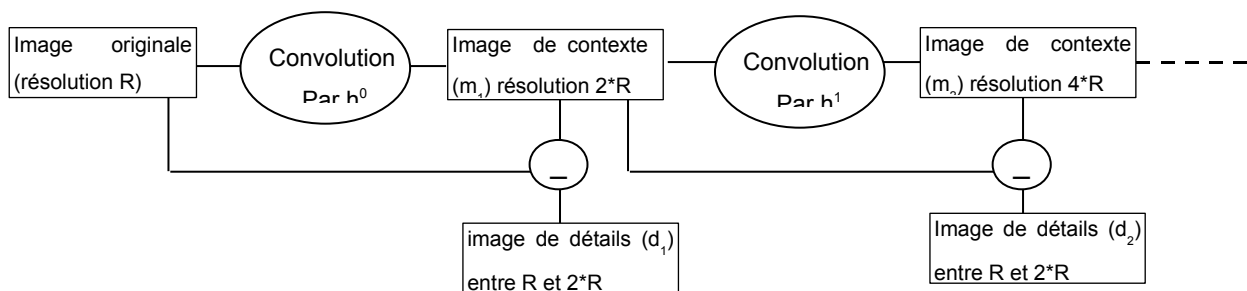
$$h^1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \end{bmatrix}, \text{ soit } TFD(h^0) = \frac{1 + \cos(2.\pi.f)}{2}$$

$$h^2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & 0 & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{4} \end{bmatrix}, \text{ donc } TFD(h^1) = \frac{1 + \cos(4.\pi.f)}{2}$$

$$h^3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{bmatrix} \quad [25]$$

L'application de  $P$  itérations de ces filtres passe-bas permet d'obtenir des images de plus en plus floues appelées *images de contexte*  $\{m_i\}_{i \in [1..P]}$  et la soustraction, à chaque itération, entre l'image de contexte précédente et la suivante permet d'obtenir *des images de détails*  $\{d_i\}_{i \in [1..P]}$  correspondantes aux transformées en ondelettes (Blanc, 99). Le processus est schématisé ci-dessous :

Figure 29: Décomposition dyadique d'une image par l'algorithme « à trous ».



Dans notre cas, je me suis contenté de décomposer l'image sur trois niveaux pour obtenir les images de détails  $d_1$ ,  $d_2$  et  $d_3$ , dans l'ordre fréquentiel décroissant.

Etant donné que l'on recherche les points dont les coefficients des transformées en ondelettes sont maximaux, il faut effectuer un seuillage sur les images de détails.

J'ai utilisé les résultats de la thèse de Philippe Blanc qui effectue un seuillage local ; pour chaque pixel  $(k,j)$  de l'image de détail, je calcule l'écart-type de l'imagette de rayon égal au rayon de la vignette de contexte centrée en  $(k,j)$  et je récupère la valeur du pixel si elle est supérieure à deux fois l'écart-type. J'obtiens ainsi un masque de seuillage local.

J'effectue également un seuillage globale en utilisant la technique de Djamji décrite dans la thèse de Philippe Blanc pour éviter de sélectionner des points sur des zones très peu contrastées ; je ne retiens que les pixels dont la valeur est supérieure à deux fois l'écart-type de l'image de détail.

Remarque : La moyenne des images de détail est nulle du fait de la soustraction des images de contexte ; c'est pourquoi on ne considère que l'écart type lors du seuillage local.

Je vais ensuite déterminer les maxima locaux et pour cela j'applique le principe de la méthode de Ziou (Ziou et al., 1998) qui multiplie les images de détails, en partant des hautes fréquences, pour lisser le bruit et préciser la localisation des points mais, dans mon cas, je multiplie les images « basses fréquences »  $d_2$  et  $d_3$  moins touchées par le repliement du spectre. L'image résultante  $R$  peut donc s'écrire :

$$R = \prod_i^P d_i \quad \text{Avec } P=3 \text{ et } i=2. \quad [26]$$

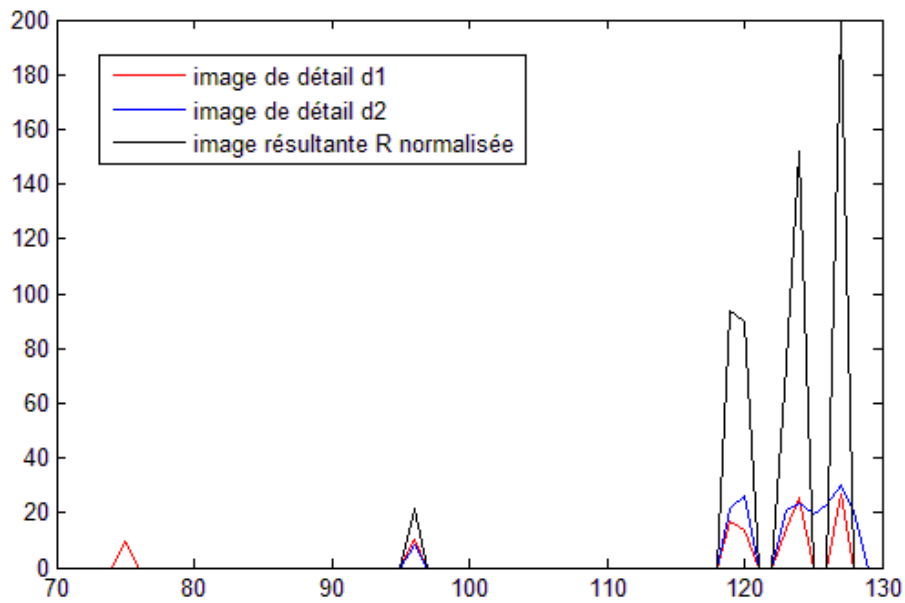
Je normalise aussi l'image résultante pour conserver le niveau d'énergie et pouvoir la comparer avec les images de détails (Ziou et al., 1998) :

$$\bar{R} = R \cdot \sqrt{\frac{DN}{RN}} \quad [27]$$

□ avec  $DN = \sum_{x,y} (d_2(x,y))^2$  et  $RN = \sum_{x,y} (R(x,y))^2$ , les normes  $L_2$ .

Je sélectionne finalement les points correspondants aux valeurs maximales de l'image résultante et ne retiens que les maxima locaux grâce à la méthode décrite précédemment pour le détecteur de Harris.

Figure 30: Exemple de profil d'images de détails seuillées et points caractéristiques.



Remarque :

J'utilise l'image SLSTR plutôt que OLCI pour déterminer les points caractéristiques autrement certains points d'intérêt détectés pourraient ne pas être visibles dans l'image SLSTR, moins résolue. Le calcul est aussi plus rapide car la taille de l'image SLSTR est plus petite.

J'ai effectué trois tests différents pour valider mon intuition de départ :

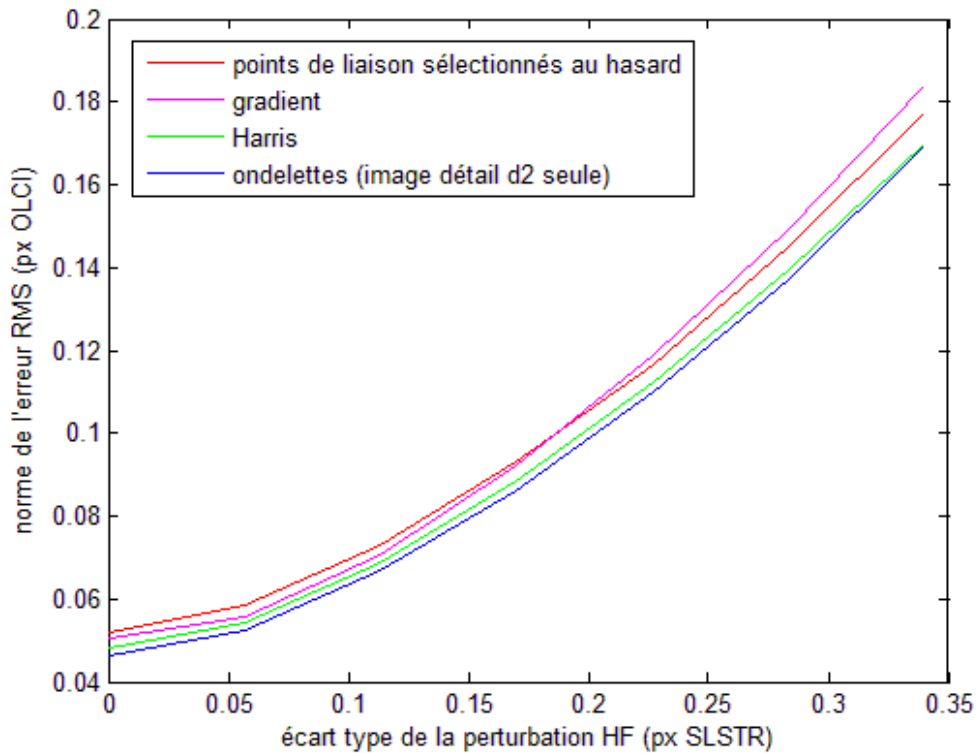
- multiplication des images de détails  $d_2$  et  $d_3$  ;
- multiplication des images de détails  $d_1$  et  $d_2$  qui devraient contenir du repliement de spectre et donc aboutir à une corrélation moins performante ;
- Image  $d_2$  seule, compromis entre les deux tests précédents quant à la de gamme de fréquence considérée.

J'obtiens les meilleurs résultats avec l'image  $d_2$  seule (Annexe 2) dont les points doivent être moins affectés par le repliement de spectre et avec un gradient tout de même assez fort.

## 8.4.2 Comparaison des résultats en fonction des méthodes

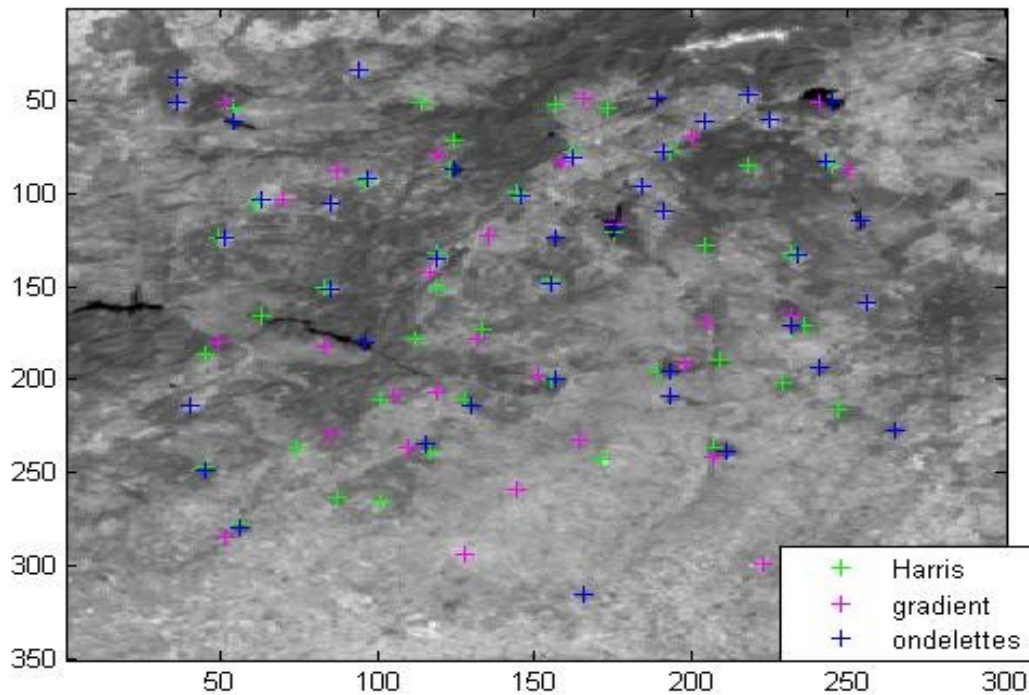
J'ai testé la corrélation sur les bases de données de points de liaison obtenus avec les méthodes présentées précédemment. L'exemple suivant montre un extrait des courbes représentées dans l'annexe 3, pour une perturbation BF fixée à 0.2 pixel OLCI :

Figure 31: Comparaison des méthodes de sélection des points de liaison.



Ces courbes (Annexe 3) montrent une meilleure performance des ondelettes au regard des perturbations HF spécifiées dans le budget (0,17 pixel SLSTR).

Figure 32 : Localisation des points de liaison



## **8.5 REGLAGE DES PARAMETRES DU CORRELATEUR**

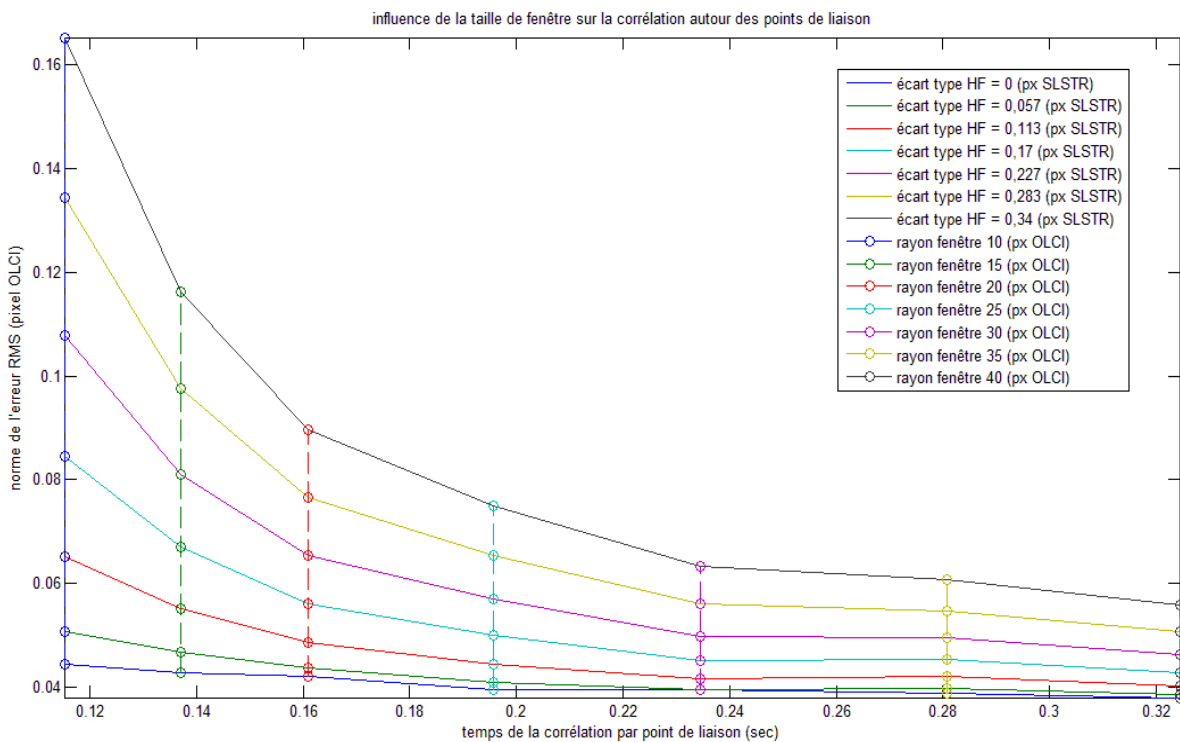
### **8.5.1 Choix de la taille de la fenêtre de contexte**

La taille de la fenêtre de contexte est bien évidemment déterminante dans la qualité de l'appariement. Ainsi, si la quantité d'information y est trop faible, comme dans le cas d'un paysage uniforme, la corrélation sera moins bonne. Cependant, augmenter la taille de la fenêtre peut-être sous productif en terme de temps de calcul et en qualité d'appariement car il y aura peu de chance que le décalage soit constant. Il y a donc un compromis à trouver.

Pour optimiser la taille de fenêtre, on pourrait utiliser une fenêtre de contexte adaptative déterminée en fonction de la borne de Cramer-Rao (Blouin, 99) mais cette méthode est relativement difficile à implémenter et augmente la durée du calcul.

Nous avons décidé, en accord avec mes tuteurs, de fixer la taille de la fenêtre de contexte mais je dois auparavant analyser son influence sur la corrélation vis-à-vis de l'erreur RMS et du temps de calcul :

Figure 33: Influence de la taille de fenêtre de contexte



Pour obtenir la courbe précédente, j'ai testé l'algorithme de corrélation pour plusieurs tailles de fenêtre de contexte sur des points de liaison sélectionnés par ondelettes et j'ai mesuré le temps de calcul moyen par point pour différentes perturbations HF.

Il est nécessaire, bien entendu, de mentionner à ce niveau les caractéristiques de l'ordinateur :

- Processeur : intel Core 2 Duo, 2x2 GHz ;
- Mémoire vive : 3,00 Go (mémoire virtuelle : 4,68 Go).

L'erreur RMS est obtenue autour des points de liaison sans prendre en compte le modèle de déformation. La perturbation BF a été fixée à 0,2 pixel OLCI correspondant au biais maximal

Le temps de calcul est évidemment indépendant de la perturbation HF. On voit que l'augmentation de la taille de fenêtre est efficace jusqu'à un certain point où l'amélioration est moindre au regard du temps de calcul. Le tableau suivant récapitule le gain relatif en précision en fonction de la taille de fenêtre :



Allongement relatif durée appariement	17,00%	17,00%	21,00%	20,00%	18,00%	15,00%	

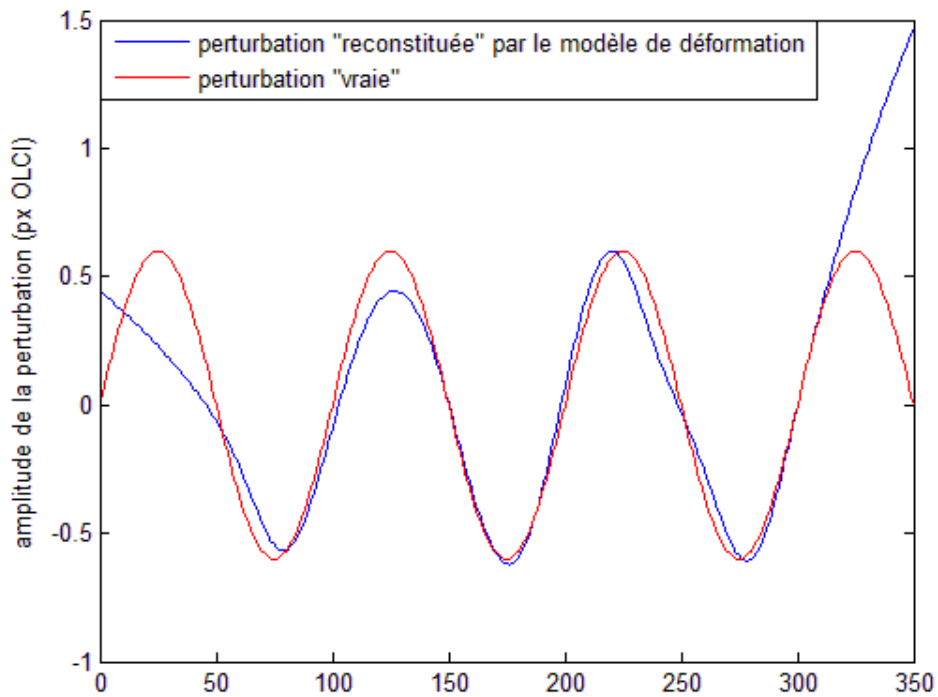
J'ai également réalisé ce test sur la chaîne entière en fixant la perturbation BF avec la période spécifiée dans le budget, soit 120000 pixels et une amplitude de 0,6 pixel OLCI. Le résultat présenté en annexe 4 montre un coude davantage marqué pour un rayon de 20 pixels, valeur que j'ai retenue pour les analyses de sensibilités suivantes.

### **8.5.2 Modèle de déformation splines plaques minces**

La courbure du modèle splines plaques minces qui conditionne l'attache aux données est paramétrée par  $\lambda$ . Plus ce dernier tend vers zéro et plus la surface s'approche des données aux dépends de la régularité de la courbure. Intuitivement, dans le cas d'une perturbation BF de période très grande au regard de l'échantillonnage des points de liaison, le réglage  $\lambda = 1$  est le meilleur car il permet d'éliminer le bruit de mesure du corrélateur.

La performance du modèle de déformation est aussi liée à l'échantillonnage des points de liaison : la période d'échantillonnage des points de liaison doit être inférieure à la moitié de la période de la perturbation BF. Ainsi, on peut remarquer sur la figure suivante que la perturbation est mieux « reconstituée » au centre où sont localisés les points de liaison correctement échantillonnés :

Figure 34: Performance du modèle de déformation et échantillonnage des points de liaison



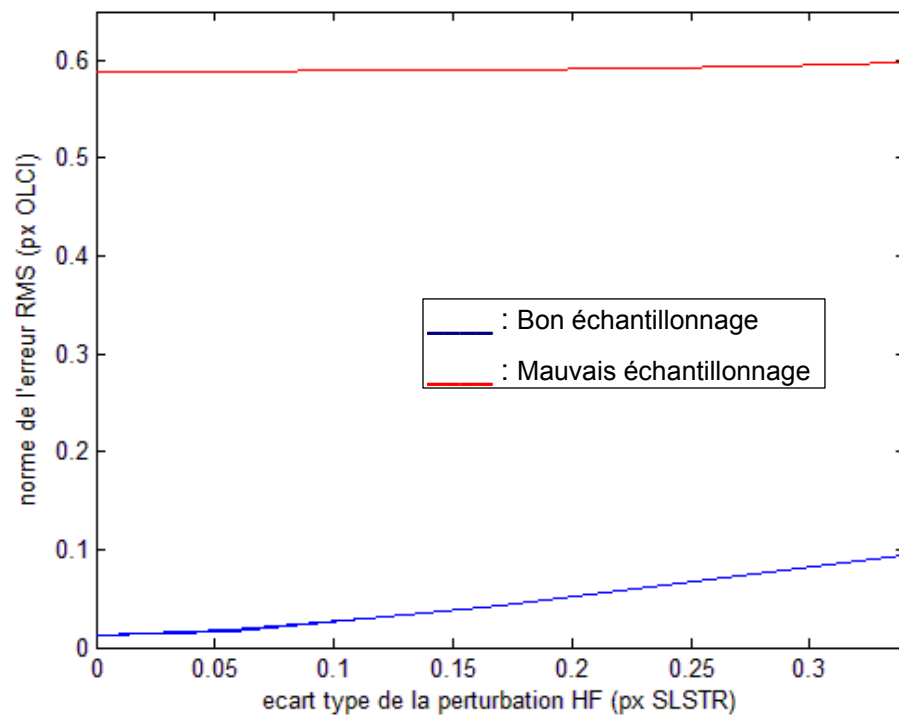
Ainsi j'ai testé la sensibilité de l'appariement au paramètre  $\lambda$  en fonction de la perturbation HF et du bon échantillonnage ou non des points de liaison au regard de la période de la perturbation BF, notée  $T_{BF}$ , qui doit être supérieure à 2 fois la période d'échantillonnage des points de liaison, notée  $T_{PT}$  :

TESTS	$T_{PT}$ (pixel OLCI)	$T_{BF}$ (pixel OLCI)
Bon échantillonnage des points de liaison	30	120000
	30	55

On remarque sur les courbes présentées dans l'annexe 5 que le paramètre lambda influe très peu sur la performance de corrélation et on pourra fixer arbitrairement sa valeur à 1 pour éliminer le bruit de mesure le cas échéant.

Par ailleurs, la courbe suivante montre que l'échantillonnage des points de liaison, par rapport à la perturbation BF, a une grande influence sur la performance de l'appariement et sur sa sensibilité aux perturbations HF. En effet, un mauvais échantillonnage dégrade les performances mais semble moins sensible aux perturbations HF :

Figure 35: Influence de l'échantillonnage des points de liaison sur la performance d'appariement



## 9 RÉSULTATS DE L'APPARIEMENT SUR DES BANDES REPRÉSENTATIVES DES IMAGES SENTINEL-3

---

En fin de stage, j'ai pu obtenir des images représentatives de celles du futur satellite Sentinel-3 grâce à un simulateur qui fournit des images dont les bandes spectrales sont conformes aux spécifications, mais de résolution égale à 100 mètres. J'ai donc dû adapter ma chaîne de simulation image pour obtenir les résultats présentés en annexe 6. Les points de liaison ont été sélectionnés par ondelettes (image de détails  $d_2$ ). Les tests ont été effectués seulement autour des points de liaison, sans prise en compte du modèle de déformation et il sera nécessaire dans l'avenir de les réitérer sur la chaîne entière.

On peut remarquer que le paysage offrant la meilleure corrélation est de type « Europe centrale en été » et celui offrant la plus mauvaise de type « forêt de Scandinavie », le paysage « Désert » ayant une performance moyenne mais on pourra remarquer que le fleuve au centre est un élément qui peut biaiser les résultats comparé à un véritable paysage désertique.

Ces tests devront, bien entendu, être consolidés en particulier pour ce qui concerne les points de liaison. On pourra donc évaluer la qualité de l'appariement avec des points sélectionnés par le détecteur de Harris modifié.

# CONCLUSION

---

## 9.1 Bilan

Le bilan de ces tests montre que, globalement, la performance demandée par le client peut être atteinte. Nous avons, de plus, ouvert des pistes d'amélioration des performances si le besoin se fait sentir, en utilisant un rapport de FTM ou mieux, en effectuant un filtrage passe-bas sur la vignette de recherche. L'amélioration passe aussi par une optimisation du choix des points de liaison qui peut se faire automatiquement grâce à une nouvelle méthode qui s'inspire des ondelettes et fournit des résultats encourageants. Enfin, les réglages des paramètres du corrélateur ont été précisés, notamment en ce qui concerne la taille de la fenêtre de contexte, pour laquelle un rayon de 20 pixels OLCI semble le meilleur compromis entre performance et temps de calcul. Le paramètre de rigidité n'a, en revanche, quasiment aucun impact sur les performances de l'appariement, même dans le cas d'un mauvais échantillonnage des points de liaison. L'ensemble de ces tests a été mené sur un seul paysage issu d'une image LANDSAT et partiellement sur des images représentatives de Sentinel-3. Il sera nécessaire de poursuivre l'expérimentation sur ces dernières.

## 9.2 Intérêt pédagogique

La mise en place de la chaîne de traitement des images et l'analyse de performance du corrélateur a été grandement bénéfique pour conclure ma formation. En effet, j'ai pu appréhender toutes les étapes du traitement d'images satellites en vue de leur appariement, allant de leur simulation, en passant par l'algorithme d'appariement du corrélateur pour produire finalement un modèle de déformation qui permet de superposer les deux images après ré-échantillonnage.

## 9.3 Perspectives

Ce paragraphe présente une liste non-exhaustive de tests et d'analyses pouvant être menées afin de poursuivre le travail commencé.

✓ Critères de rejet :

La connaissance du score de corrélation seule, ne permet pas d'évaluer efficacement la qualité de l'appariement. En effet, d'autres critères tels que la forme de la surface ou la présence de pics secondaires doivent être pris en compte. Ainsi, l'ATBD prévoit un critère de forme de la surface en la convoluant avec un laplacien. On pourra aussi rejeter les points dont le score de corrélation est plus bas qu'un seuil déterminé à l'avance. L'objectif étant de ne pas utiliser les points susceptibles d'avoir donné une mauvaise estimation du décalage.

L'ordre des priorités ne m'a pas permis de bénéficier d'assez de temps pour implémenter et tester les critères de rejet mais on pourra aussi retenir, pour un prochain stage, les critères suivants parmi ceux proposés par Philippe Blanc (P. Blanc, 1999) en raison de leur pertinence et de la relative facilité de leur implémentation au sein de la maquette :

- Le rapport entre le maximum du pic et la moyenne de la surface de corrélation ; une faible valeur indique un appariement faiblement discriminant pouvant être influencé par le bruit de mesure ;
- L'indice de présence de structures proposé par Moravec (1977) qui consiste à calculer, sur la vignette de contexte de l'image de référence, la somme de la différence au carré de la radiométrie d'un pixel avec son voisin, suivant quatre directions (horizontale, verticale, et les deux diagonales). L'indice de Moravec correspond à la plus petite des quatre valeurs. La qualité de l'appariement est d'autant meilleure que l'indice est important.

✓ Appariement de bandes spectrales différentes :

Il sera aussi intéressant de tester la corrélation entre bandes spectrales différentes au cas où une des bandes communes OLCI ou SLSTR viendrait à être indisponible.

✓ Autres voies d'explorations :

Il sera également nécessaire de modéliser la géométrie des instruments, et notamment celle particulière du capteur SLSTR, afin d'évaluer leur impact sur la performance de l'appariement. Finalement, on peut envisager pour un futur stage, de comparer l'algorithme de notre étude avec une méthode par flot optique.

# BIBLIOGRAPHIE

---

## Ouvrage imprimé

Lier Philippe, Valorge Christophe, Briottet Xavier, 2008, Imagerie spatiale : Des principes d'acquisition au traitement des images optiques pour l'observation de la Terre. Editions Cépaduès, ISBN : 2-85428-844-0

## Rapports de stage

Israël Jonathan, 2004, rapport de stage : Précision subpixelique dans le recalage d'images stéréoscopiques à faible parallaxe et faible effet stéréoscopique

Blouin Delphine, 1999, rapport de stage : automatisation de la sélection des tailles de fenêtre par minimisation de la borne de Cramer-Rao.

## Thèse

Blanc Philippe, 1999 : développement de méthodes pour la détection de changements.

## Articles de périodiques électroniques (IEEE)

Zitova Barbara, Flusser Jan, 2003, Image registration methods: a survey, Image and Vision Computing 21 977–1000.

Gottesfeld Brown Lisa, 1992, A survey of image registration techniques.

Fonseca Leila M. G., Costa Max H. M., 1996, Automatic Registration of Satellite Images

Eastman Roger D., Le Moigne Jacqueline, Netanyahu Nathan, 2007, Research issues in image registration for remote sensing, 1-4244-1180-7/07/

Ziou Djemel, Tabbone Salvator, 1998, edge detection techniques – an overview. International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis.

Djamji Jean-Pierre, 1995, Bijaoui Albert, disparity analysis: a wavelet approach, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 33, No. 1, appendix.



Schmid Cordelia, Mohr Roger, Bauckhage Christian, 2000, Evaluation of interest point detectors. International Journal of Computer Vision, 37(2), 151–172.

Richard Szeliski, Image Alignment and Stitching: A Tutorial, 2005, Technical Report MSR-TR-2004-92.

## **Sites web consultés**

A Really Friendly Guide to Wavelets:

<http://pagesperso-orange.fr/polyvalens/clemens/wavelets/wavelets.html#note6>

THE ENGINEER'S ULTIMATE GUIDE TO WAVELET ANALYSIS: The Wavelet Tutorial:

<http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>

IEEE explore : Digital library:

<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp>

## **Présentations**

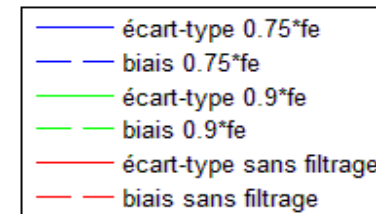
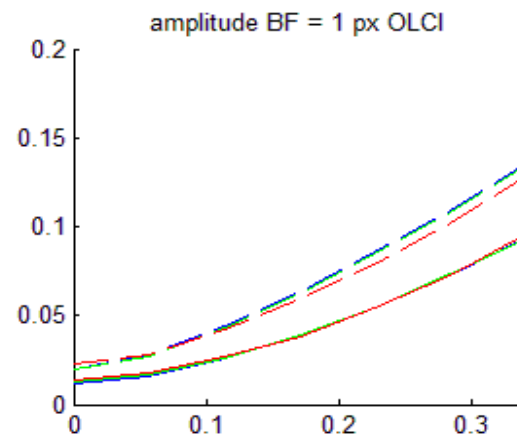
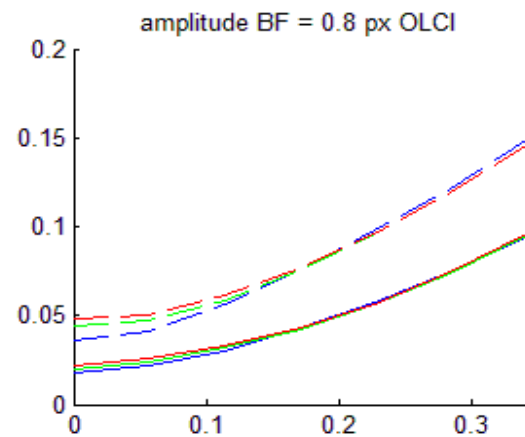
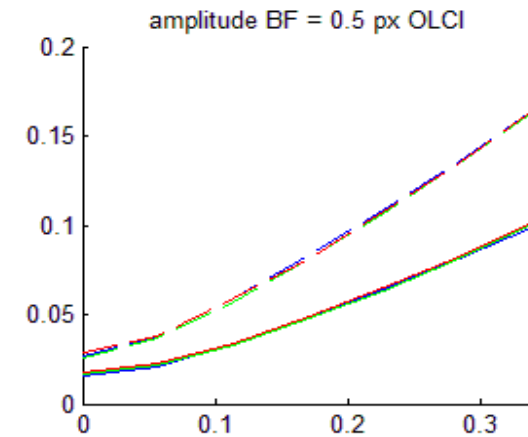
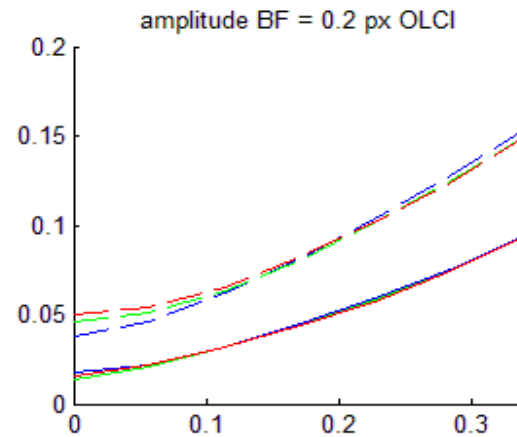
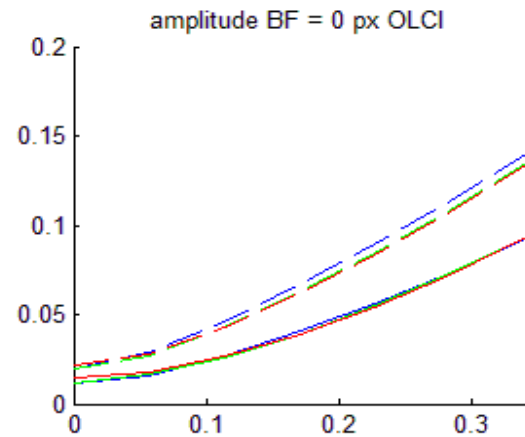
Berruti B., Drinkwater M., ESA-ESRIN, 7 mars 2007, présentation du programme sentinel-3.

Présentation BUOS, 31/07/2008: Clarifications on L1c Processing: What it can do and what it cannot do.

# ANNEXES

---

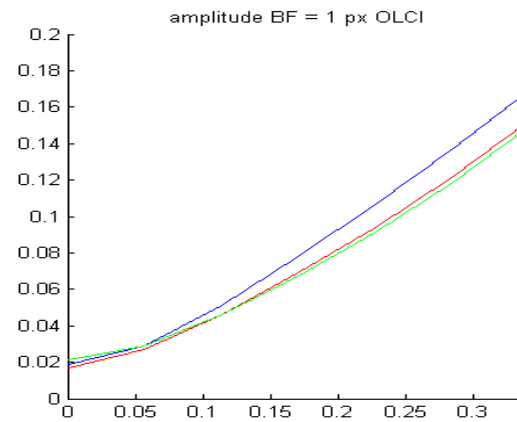
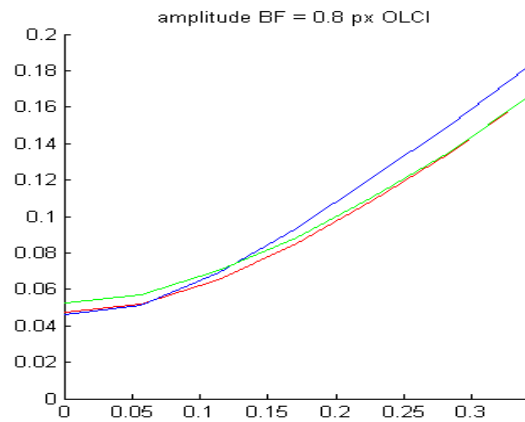
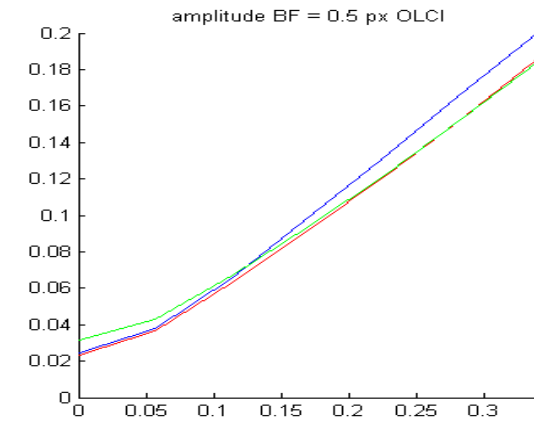
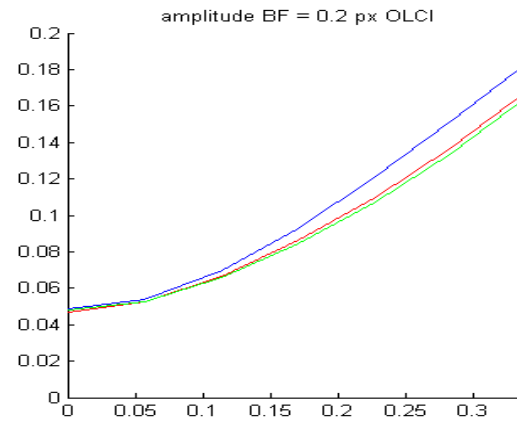
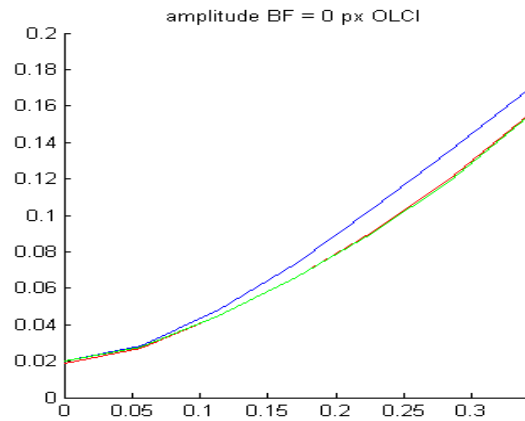
## Annexe 1 Résultats du filtrage passe-bas de la fenêtre de recherche



*Ordonnées : RMS de la norme (pixels OLCI)*

*Abscisses : écart type de la perturbation HF (px SLSTR)*

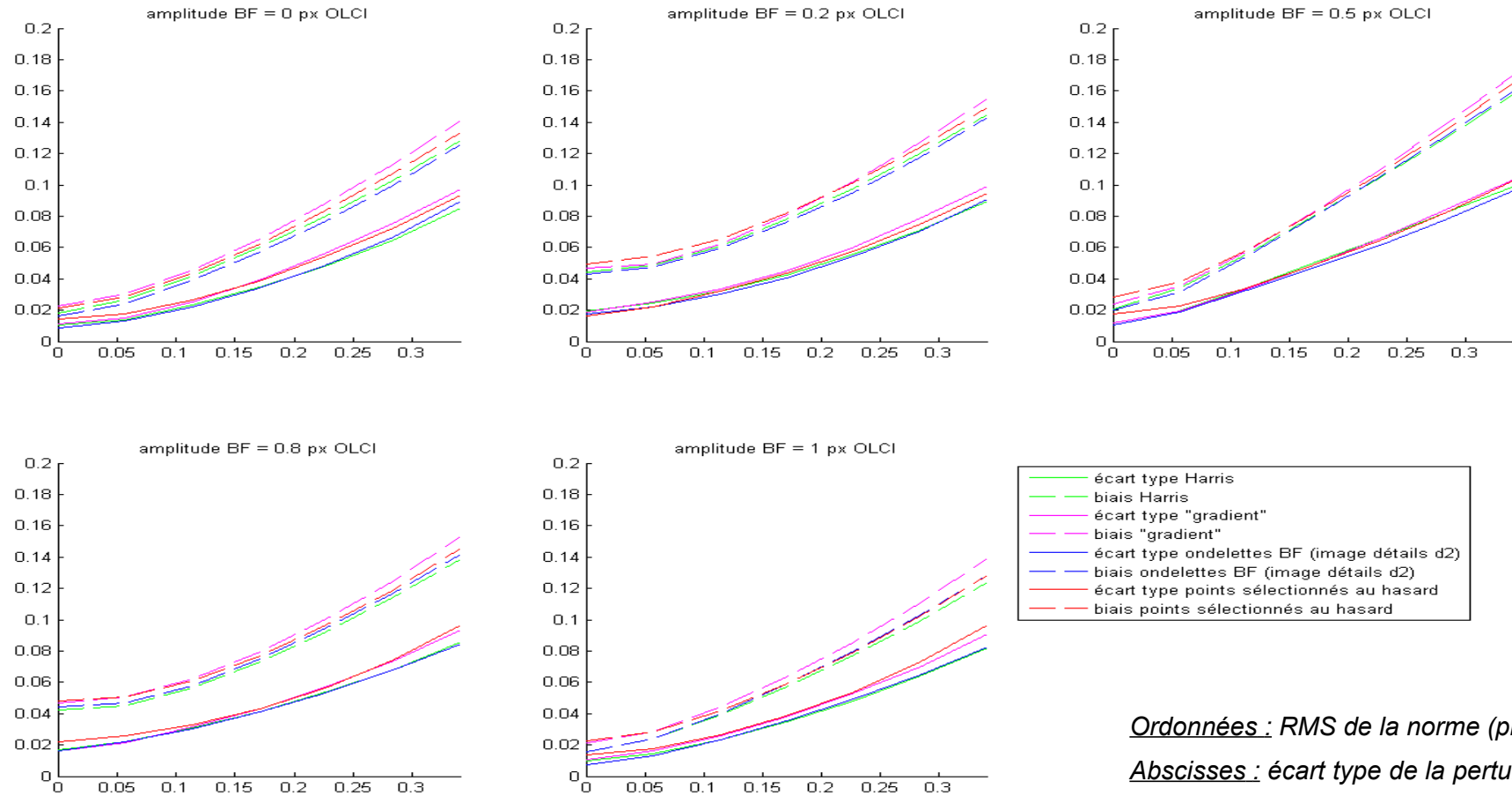
## Annexe 2 Points de liaison sélectionnés par ondelettes



*Ordonnées : RMS de la norme (pixels OLCI)*

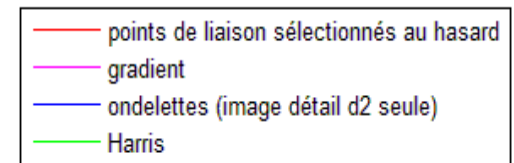
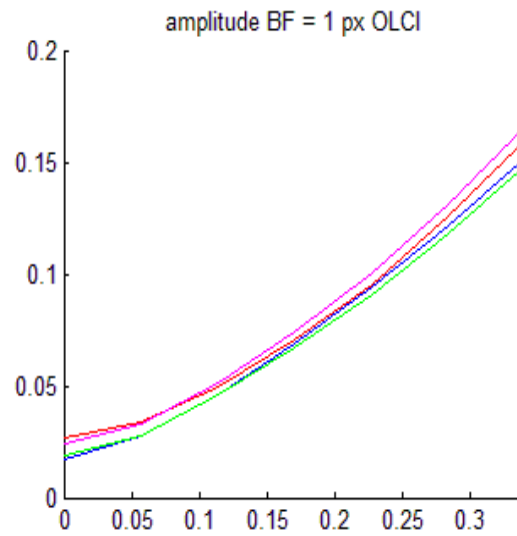
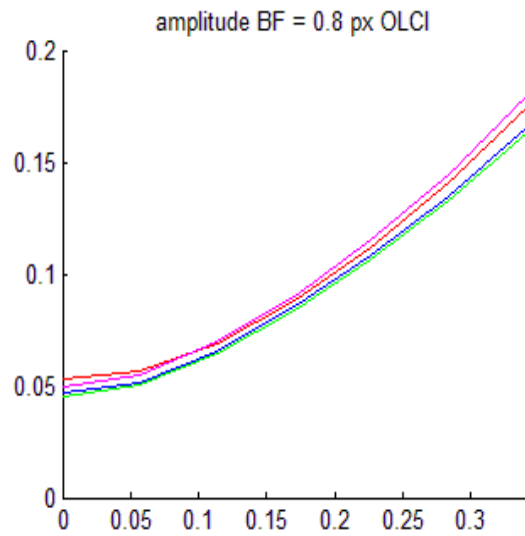
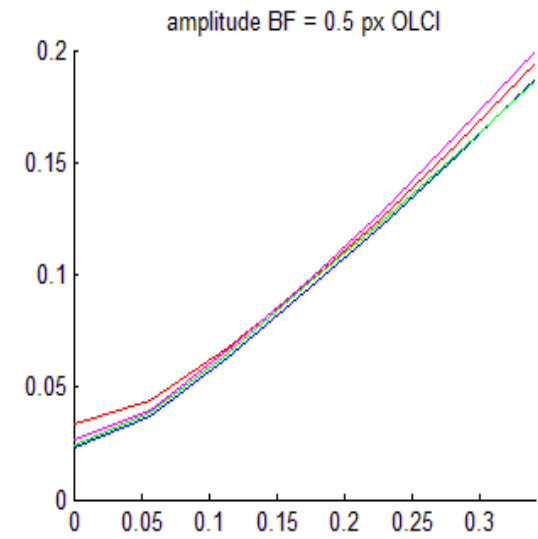
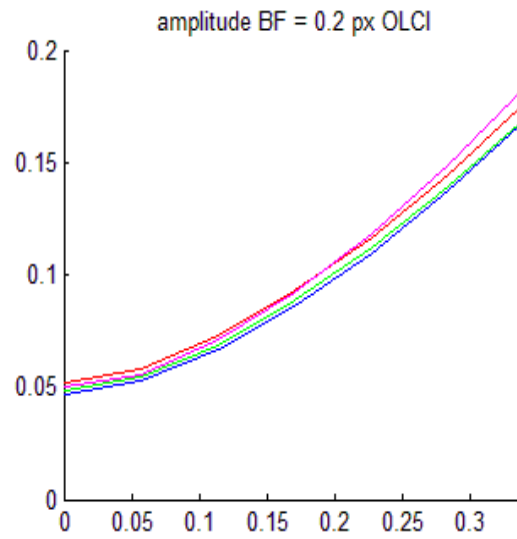
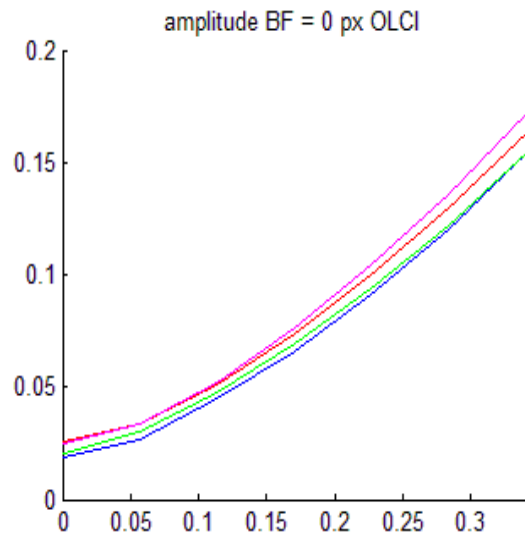
*Abscisses : écart type de la perturbation HF (px SLSTR)*

## Annexe 3 Comparaison des méthodes de sélection des points de liaison



*Ordonnées : RMS de la norme (pixels OLCI)*

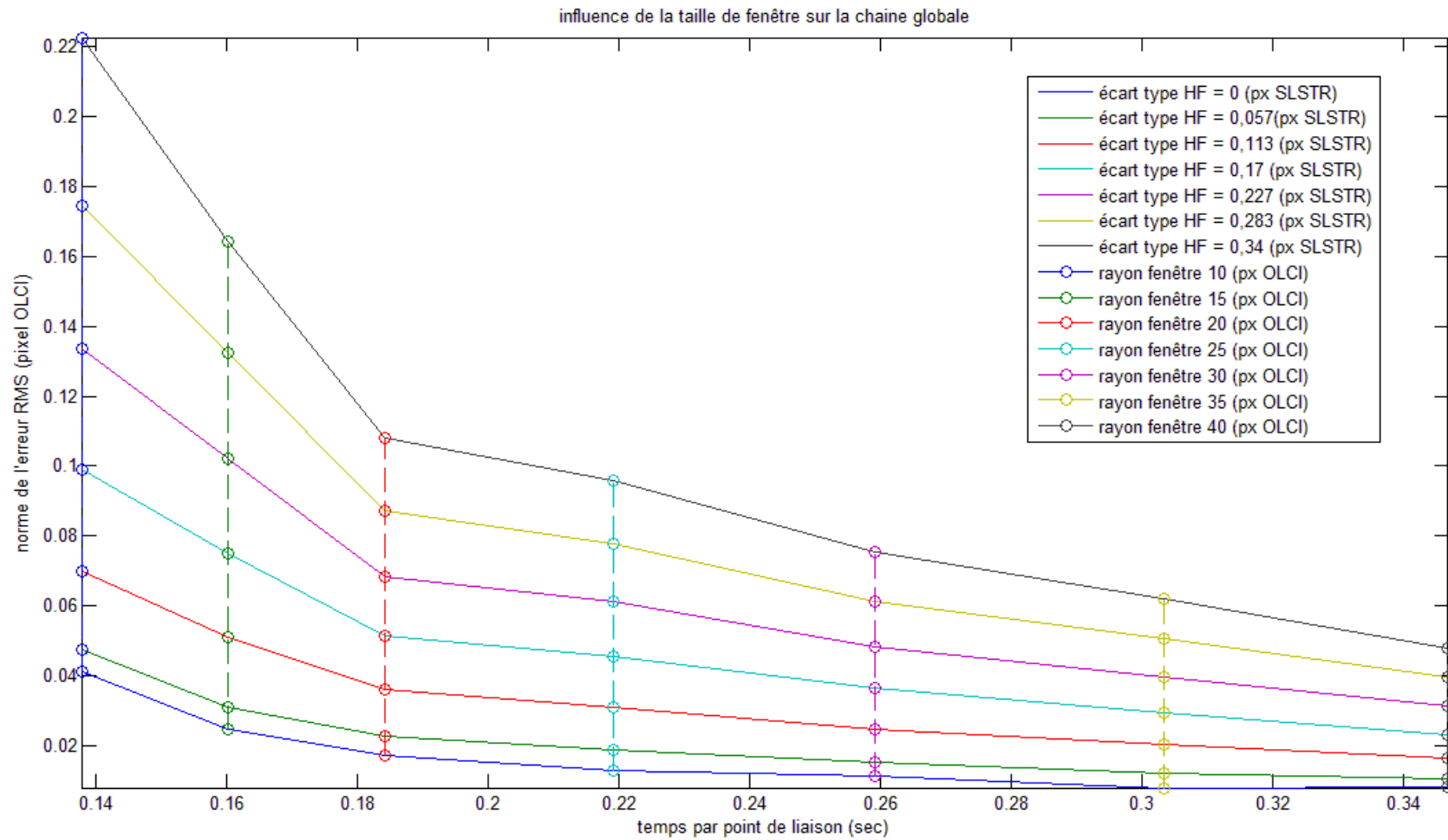
*Abscisses : écart type de la perturbation HF (px SLSTR)*



*Ordonnées : RMS de la norme (pixels OLCI)*

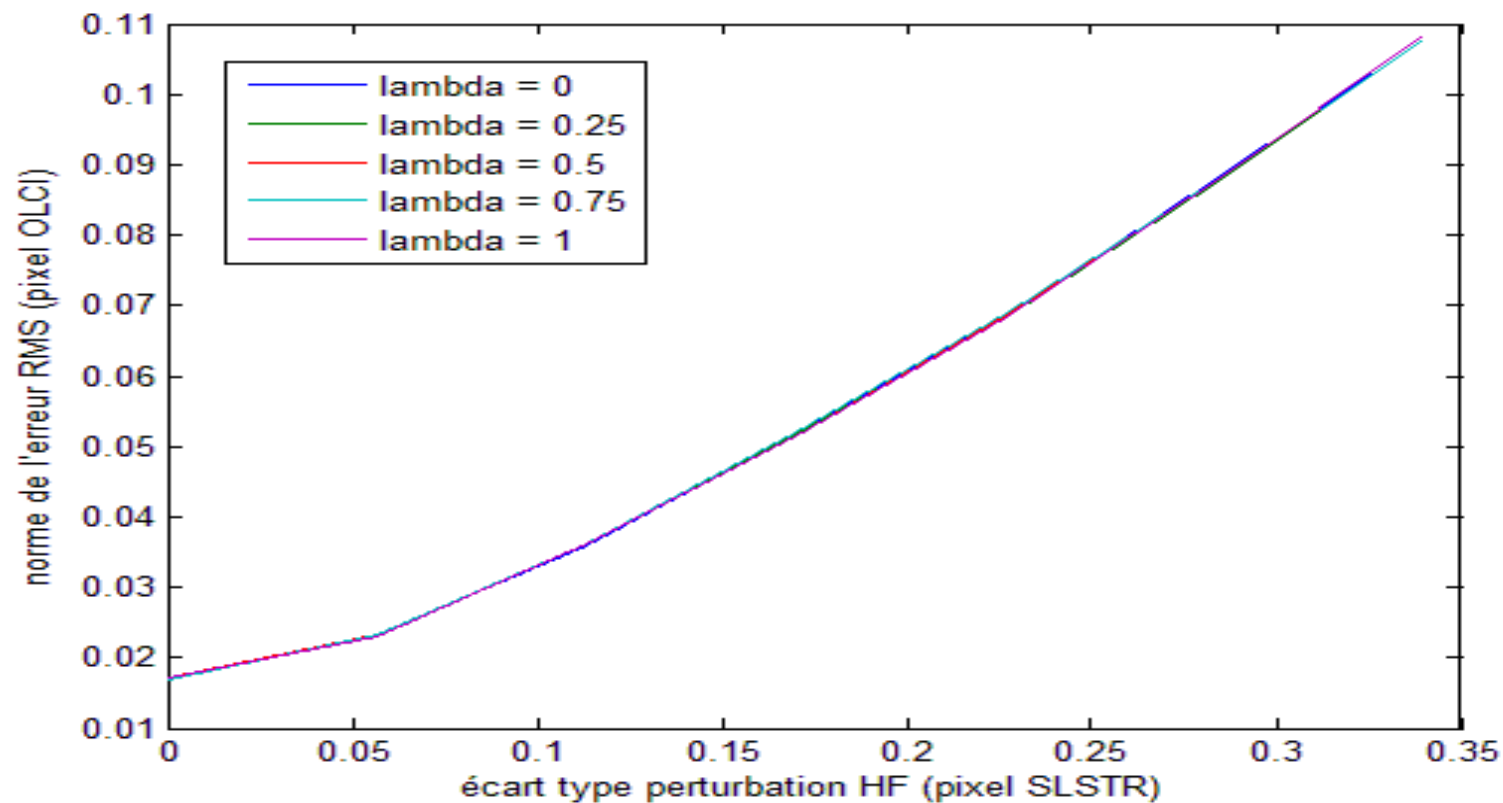
*Abscisses : écart type de la perturbation HF (px SLSTR)*

# Annexe 4 Influence de la taille de fenêtre sur la performance de la chaîne d'appariement



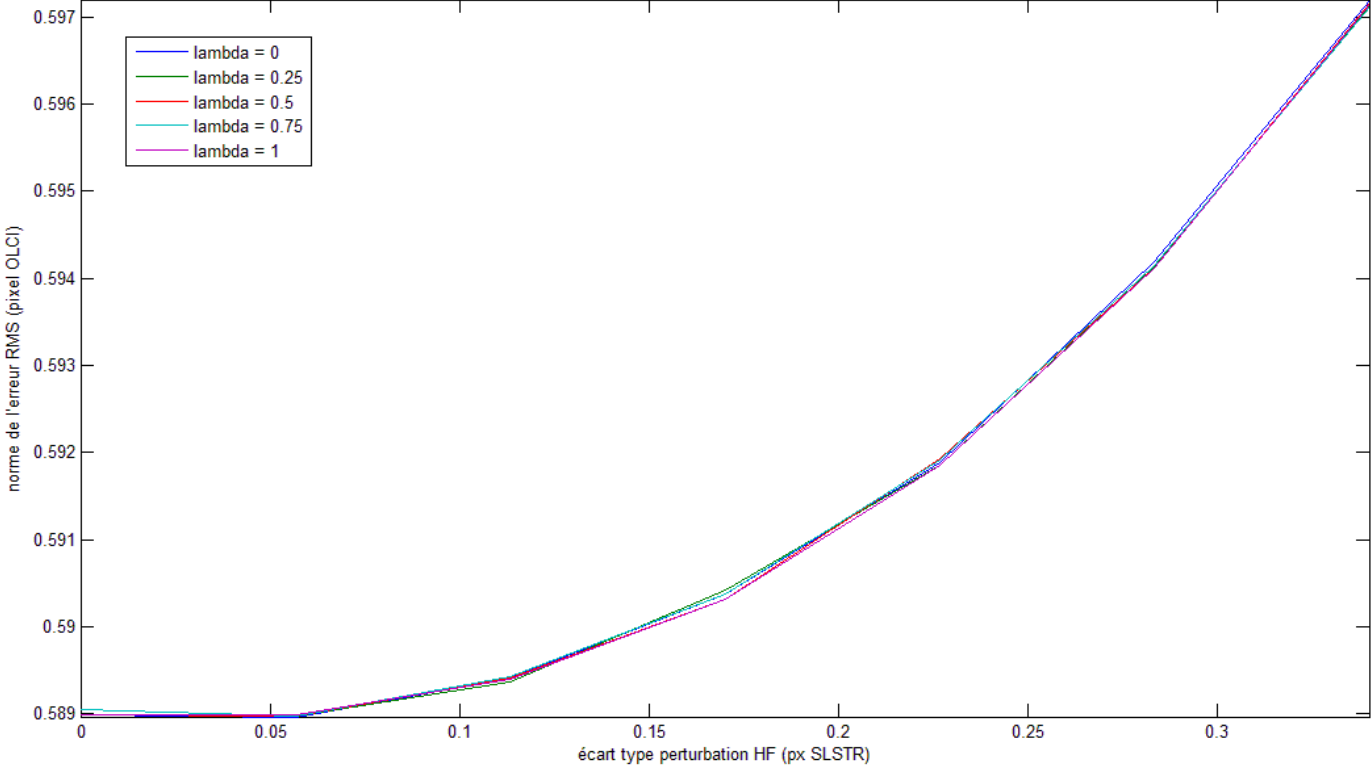
## Annexe 5 Influence du paramètre de rigidité $\lambda$ du modèle de déformation sur la performance de la chaîne d'appariement

### Echantillonnage des points de liaison favorable





# Echantillonnage des points de liaison défavorable





## Annexe 6 Comparaison de la performance de l'appariement sur trois paysages simulés S3

