

Quelques problèmes pratiques du stéréo satellitaire

Carlo de Franchis
Gabriele Facciolo
Enric Meinhardt-Llopis

CMLA, ENS Cachan

18 – 2 – 2013

Résumé

1. Les images du satellite Pléiades
2. La chaîne stéréo du CMLA¹ appliquée sur ces images

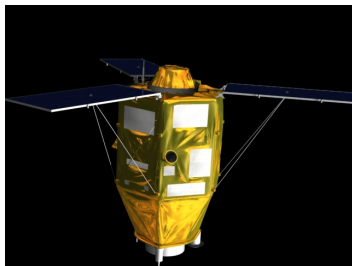
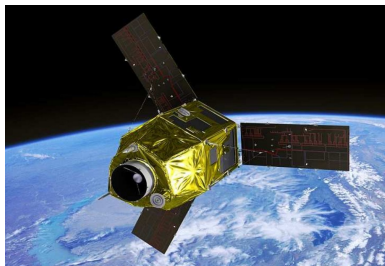
1. CMLA : Centre de Mathématiques et Leurs Applications, ENS Cachan

Le satellite Pléiades en prenant une photo de Melbourne



Le satellite Pléiades

- ▶ Lancement : 17 décembre 2011
- ▶ Orbite héliosynchrone (il est toujours 10h du matin)
- ▶ Hauteur : **694** km
- ▶ Optique : Ouverture **0.65** m, Focale **13** m
- ▶ Capteur : 5 barrettes de **6000** pixels chaque une (total **30000**)
- ▶ Résolution au sol : **0.7** m



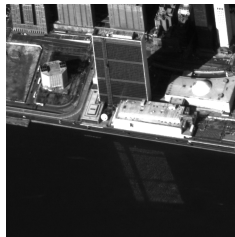
images : web du CNES

Les images Pléiades

- ▶ Les images sont appelées “**produits**”
- ▶ 1 pixel = **50** cm au sol
- ▶ Niveaux de gris (**12** bits)
- ▶ Taille typique : **40000** × **40000** (20x20 km)
- ▶ Compression : JPEG 2000 à 4 bits par pixel
- ▶ Un passage du satellite peut générer jusqu'à **17** images du même endroit (typiquement 2 out 3 images)



Produit panchromatique à 50cm



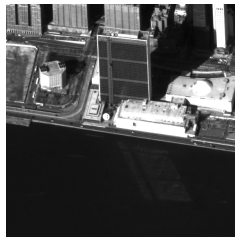
détail

Les images Pléiades

- ▶ Les images sont appelées “**produits**”
- ▶ 1 pixel = **50** cm au sol
- ▶ Niveaux de gris (**12** bits)
- ▶ Taille typique : **40000** × **40000** (20x20 km)
- ▶ Compression : JPEG 2000 à 4 bits par pixel
- ▶ Un passage du satellite peut générer jusqu'à **17** images du même endroit (typiquement 2 out 3 images)



Produit panchromatique à 50cm



détail

Les métadonnées des images Pléiades

Chaque image est accompagnée des données de localisation, appelées "RPC"

La fonction de projection :

$$(\text{long}, \text{lat}, h) \mapsto (i, j)$$

et sa inverse, la fonction de localisation :

$$(i, j, h) \mapsto (\text{long}, \text{lat}, h)$$

sont approximées par des quotients de polynômes de degré 3

$$\begin{aligned} p(X, Y, Z) = & a_1 + a_2X + a_3Y + a_4Z + a_5XY + a_6XZ + a_7YZ + a_8X^2 \\ & + a_9Y^2 + a_{10}Z^2 + a_{11}XYZ + a_{12}X^3 + a_{13}XY^2 + a_{14}XZ^2 \\ & + a_{15}X^2Y + a_{16}Y^3 + a_{17}YZ^2 + a_{18}X^2Z + a_{19}Y^2Z + a_{20}Z^3 \end{aligned}$$

Au total : **160** coefficients "RPC" accompagnent chaque image.

Chaîne stéréo : résumé de la méthode

1. Recadrage d'une région d'intérêt
2. Stéréo-rectification
3. Calcul de disparités
4. Filtrage des disparités
5. Reconstruction des points 3D (via les fonctions RPC)

Chaîne stéréo : exemple de block-matching

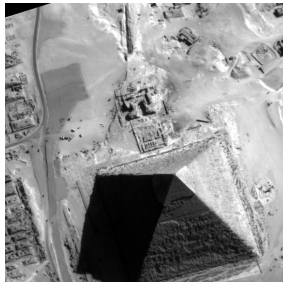
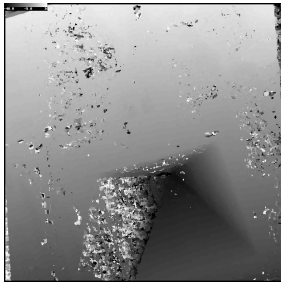
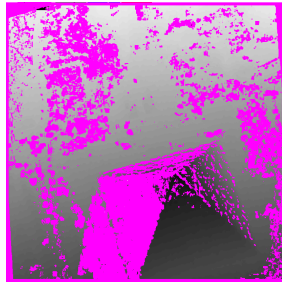


image u



block matching



masque de rejet

Chaîne stéréo : exemple de block-matching

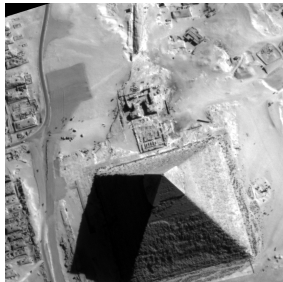
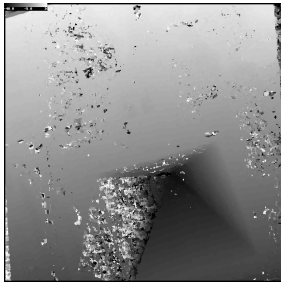
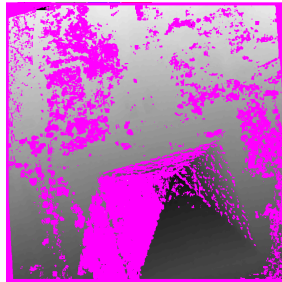


image v



block matching



masque de rejet

Chaîne stéréo : choix de la mesure de similarité

Mesures de similarité entre voisinages (patches) de deux images :

- ✗ Somme des différences absolues

$$SAD(p, q) = \sum_{x \in \Omega} |u(p+x) - v(q+x)|$$

- ✗ Somme des différences carrées

$$SSD(p, q) = \sum_{x \in \Omega} |u(p+x) - v(q+x)|^2$$

- ✓ Somme des différences normalisées carrées

$$"SSD - mean"(p, q) = \sum_{x \in \Omega} |u(p+x) - \mu_p - v(q+x) + \mu_q|^2$$

- ✗ Corrélacion croisée normalisée :

$$NCC(p, q) = 1 - \frac{\sum_{x \in \Omega} (u(p+x) - \mu_p)(v(q+x) - \mu_q)}{\sqrt{\sigma_p^2 \sigma_q^2}}$$

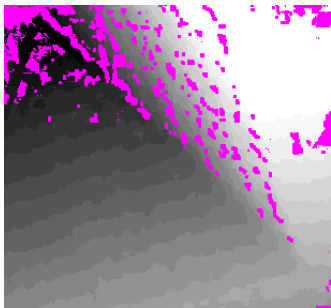
Chaîne stéréo : choix du critère de rejet

- ✓ LRRL : Consistance entre les disparités droite et gauche
- ✓ FLAT : Rejet des régions plates
- ✓ MIN-DIFF : Consistance des disparités dans la fenêtre
- ✗ HALFPIX : Consistance sous-pixellique
- ✗ STROBE : Rejet des régions périodiques
- ✗ SELFSIM : Rejet des régions auto-similaires
- ✗ ACONTRARIO : MARC-2

L'objectif de cet choix est d'approcher un 0% de disparités mauvaises, avec le minimum possible de faux rejets. Autres critères seraient possibles selon l'application.

Chaîne stéréo : densification et lissage

Les résultats de l'étape antérieure sont incomplets et quantifiés :



Pour obtenir une surface lisse et continue, il est nécessaire :

- ▶ Interpoler les données dans les trous (AMLE, OF)
- ▶ Lisser les données dans les régions où elles sont déjà denses (lissage de taille sous-pixellienne : RAFA, RAFA2, OF)

Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



image A

Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

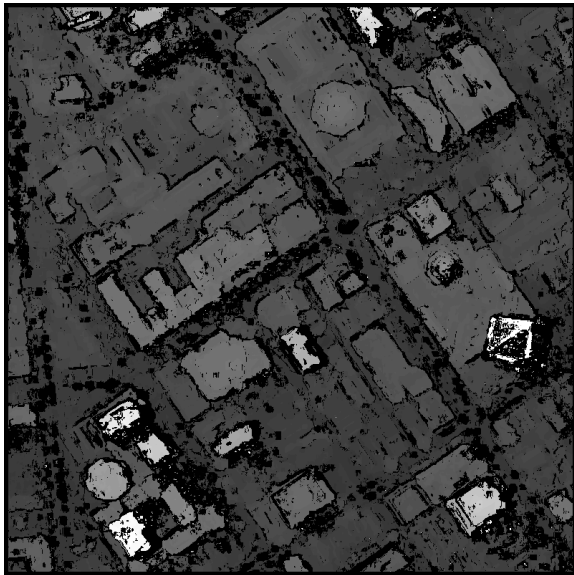
Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



image B

Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

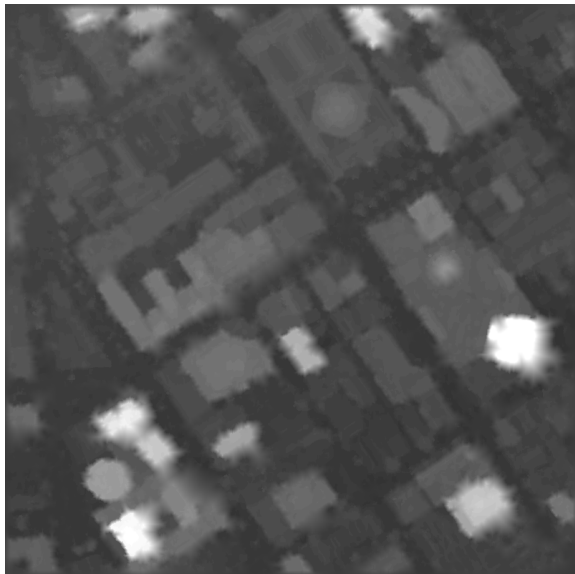
Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



résultat BM

Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

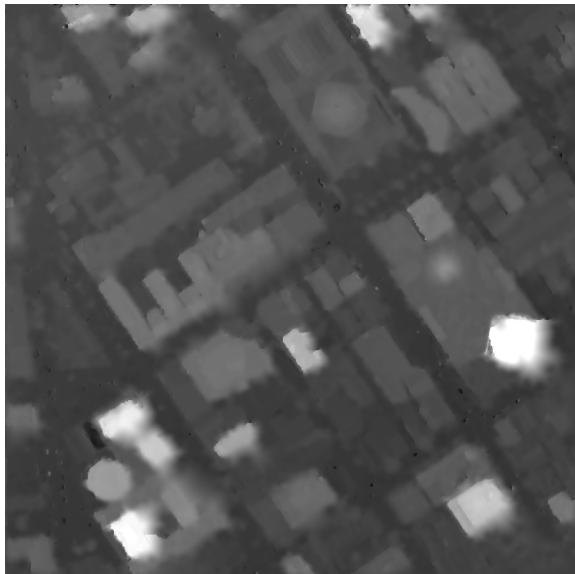
Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



interpolation AMLE

Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

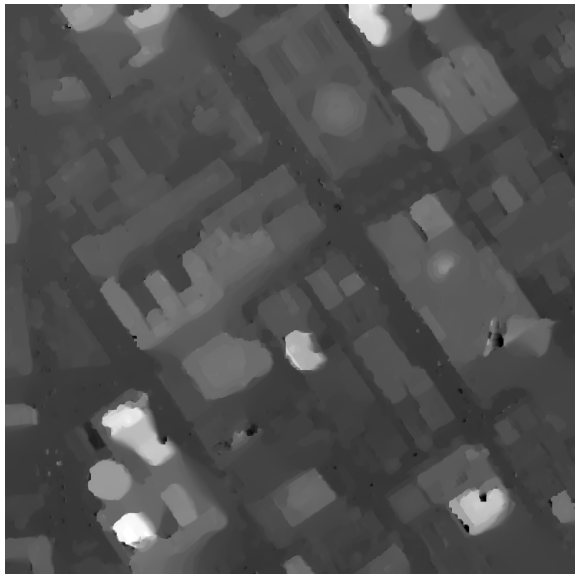
Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



raffinement par flot optique

Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



flot optique tout seul

Chaîne stéréo : calcul des nuages de points 3D

Comment passer des disparités aux coordonnées 3D ?

Entrée : point p dans l'image A , point p dans l'image B

Sortie : un point x en 3D

Algorithme :

1. Définir la courbe épipolaire de p :

$$epi_{AB}^p(t) := RPC_B^{-1}(RPC_A(p, t), t)$$

2. Trouver h tel que $q' = epi_{AB}^p(h)$ est la projection de q sur la courbe épipolaire
3. Retourner le point $x = RPC_A(p, h)$.

Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



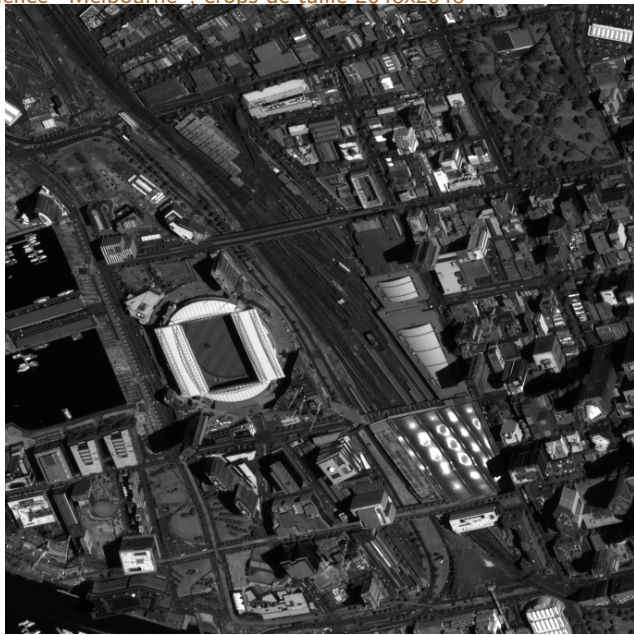
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



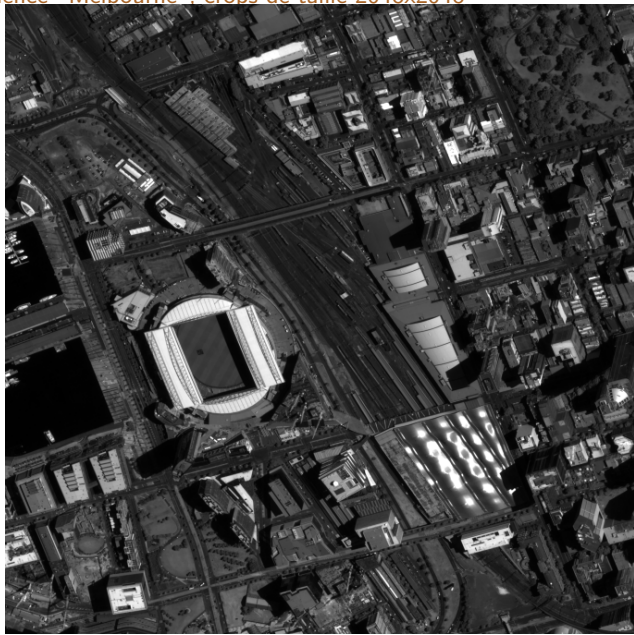
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



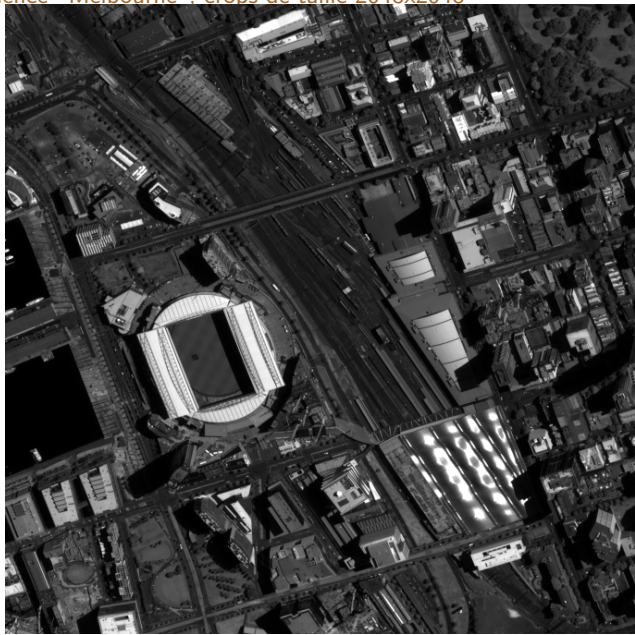
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



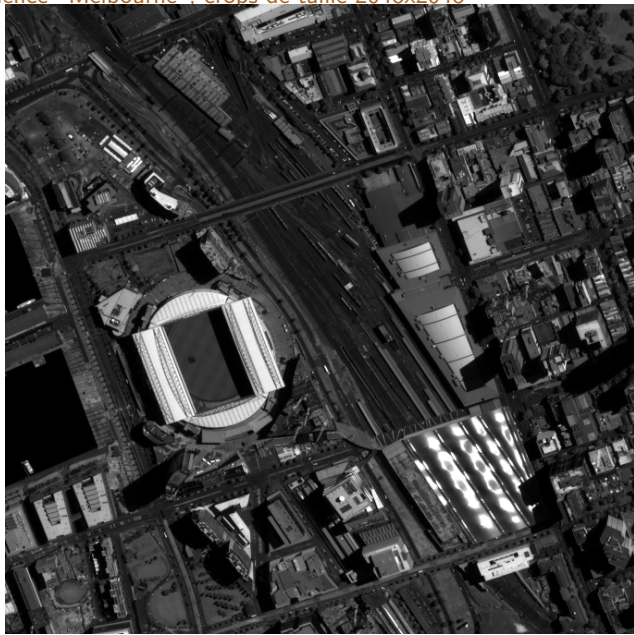
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



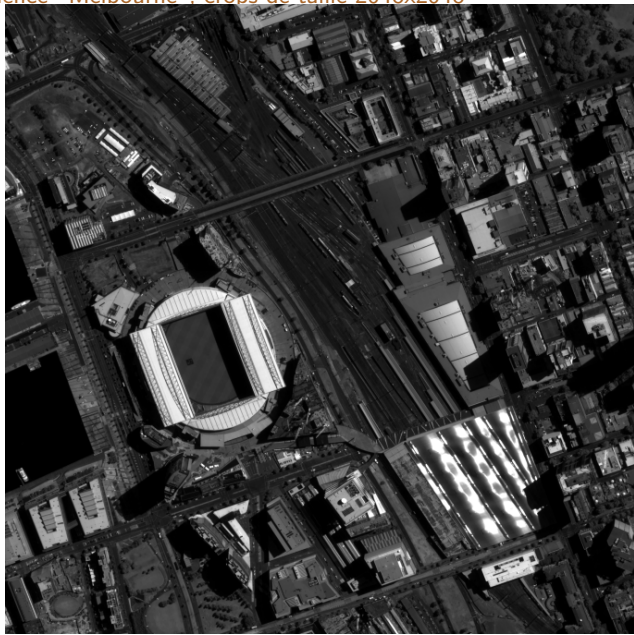
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



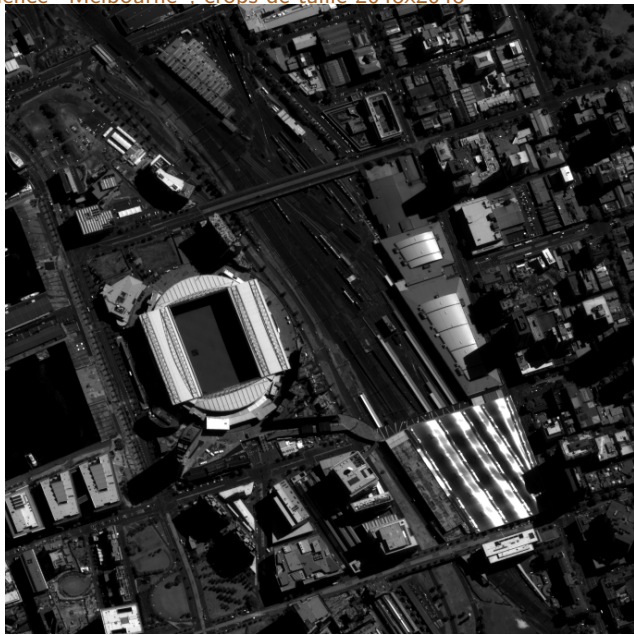
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne". crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



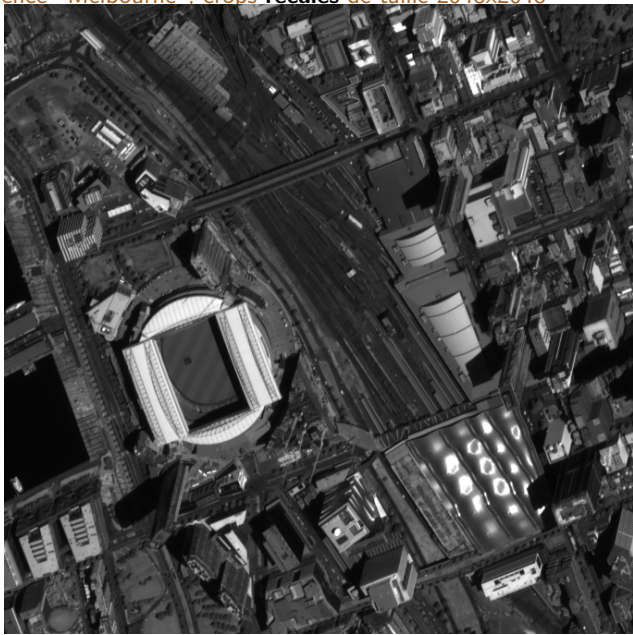
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops de taille 2048x2048



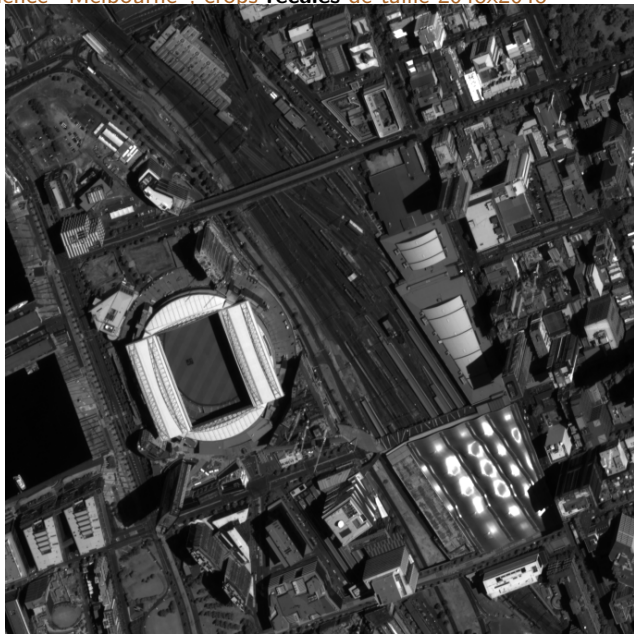
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



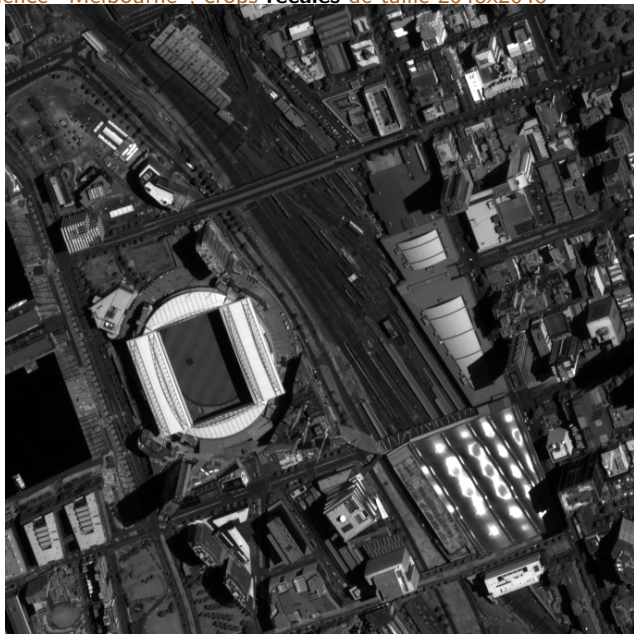
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



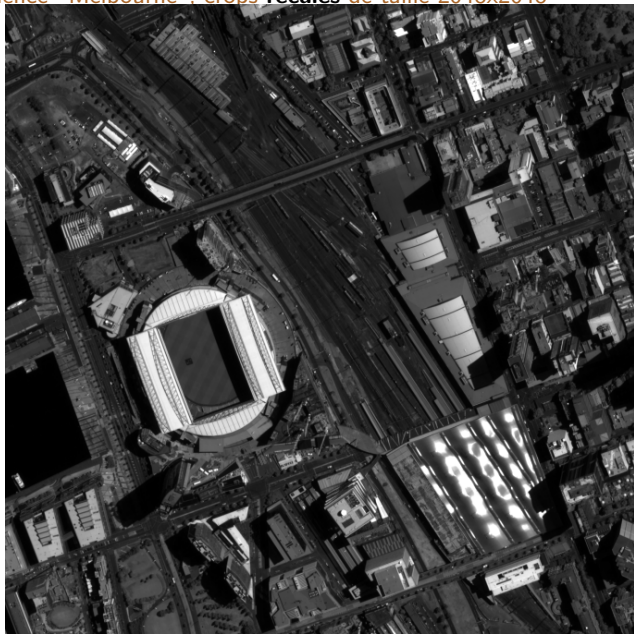
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



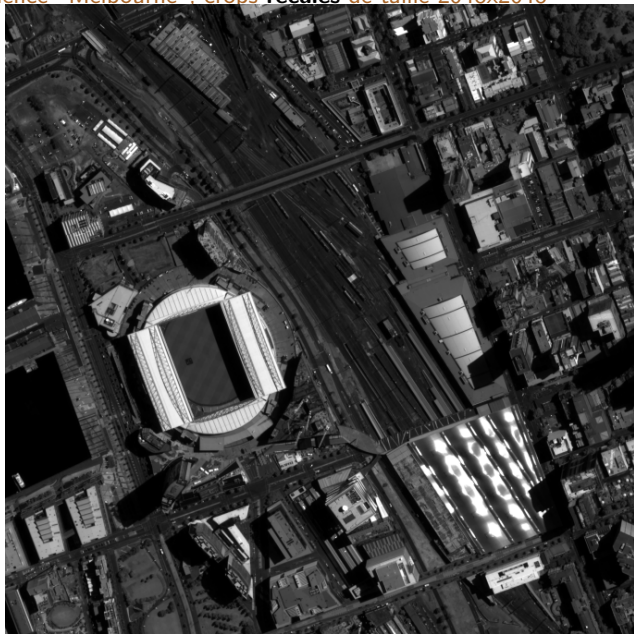
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops **recalés** de taille 2048x2048



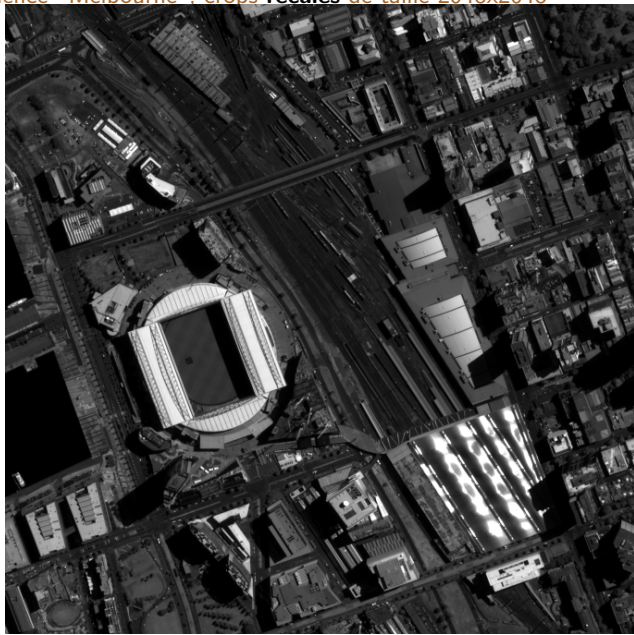
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne". crops **recalés** de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", cros recalés de taille 2048x2048



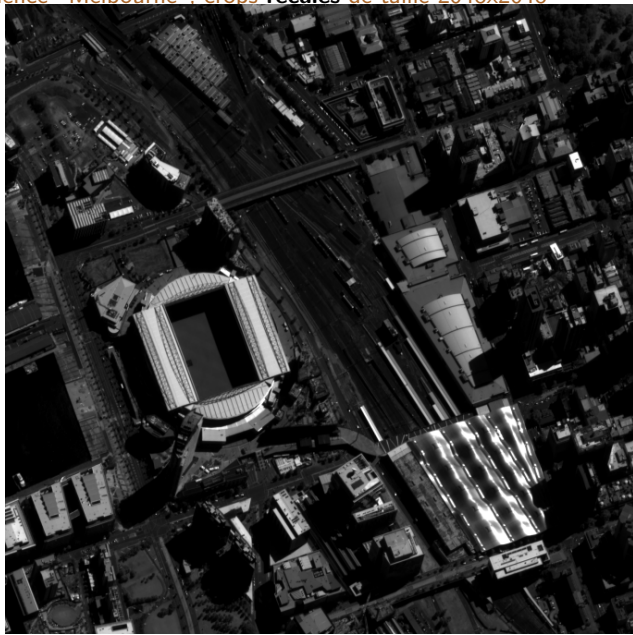
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne". cros **recalés** de taille 2048x2048



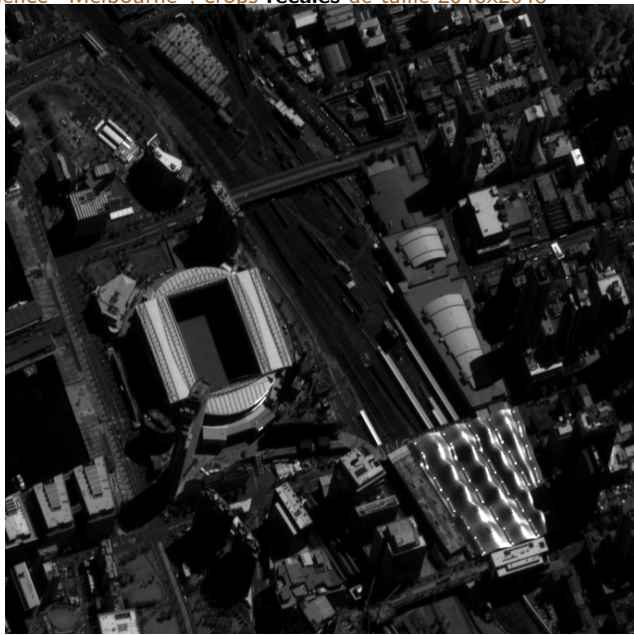
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



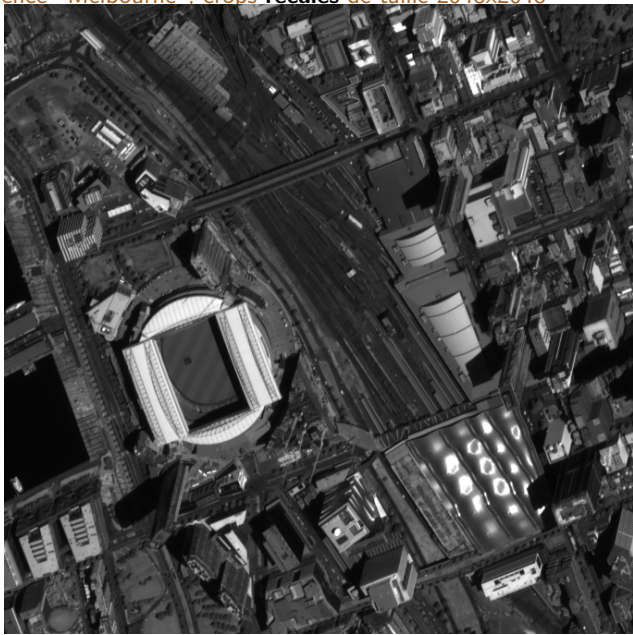
Chaîne stéréo : images d'entrée

Séquence "Melbourne", crops **recalés** de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : images d'entrée

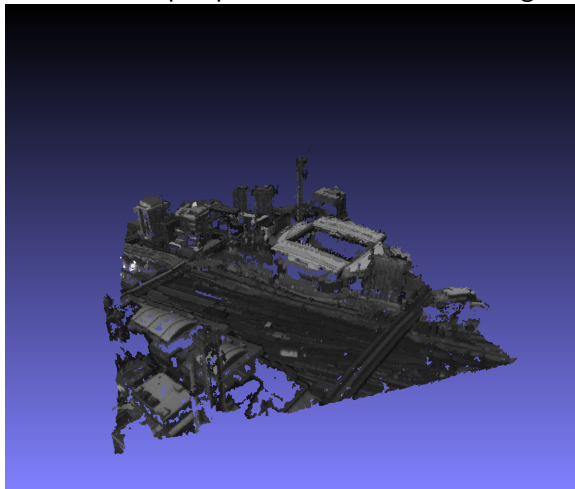
Séquence "Melbourne", crops recalés de taille 2048x2048



Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

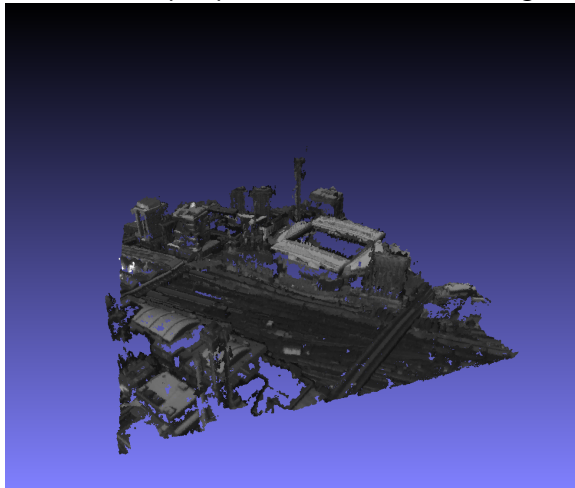
Visualisation par points colorés selon l'image



Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

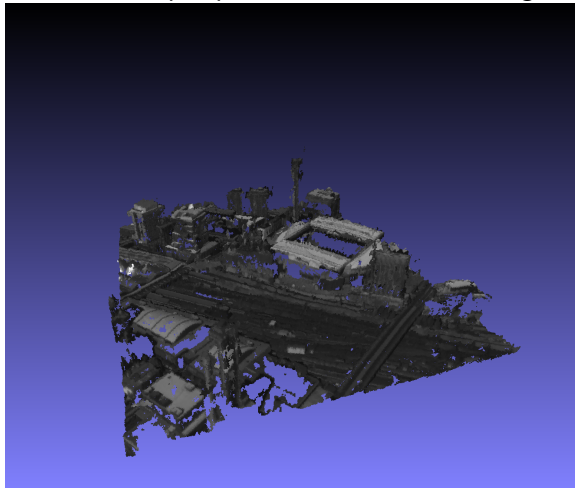
Visualisation par points colorés selon l'image



Chaîne stéréo : visualisation des résultats

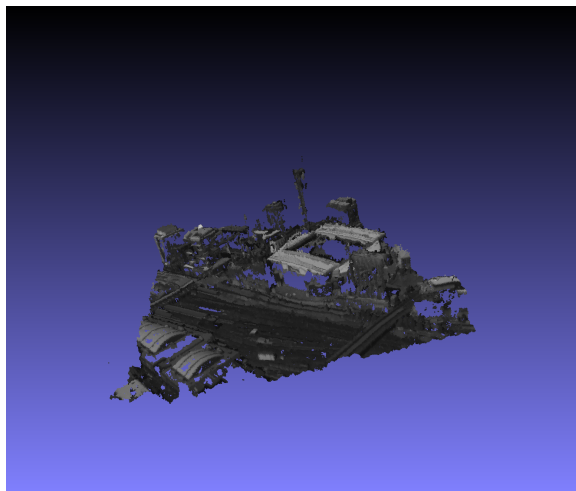
Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

Visualisation par points colorés selon l'image



Chaîne multi-vue : exemple pour la séquence Melbourne

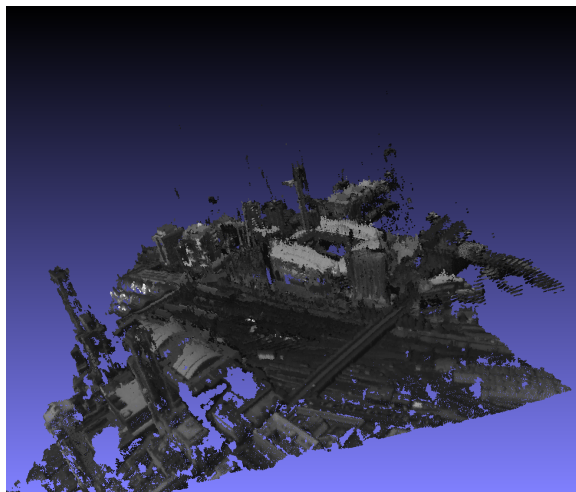
Union des nuages de points correspondants à 16 paires d'images



un seul paire d'images

Chaîne multi-vue : exemple pour la séquence Melbourne

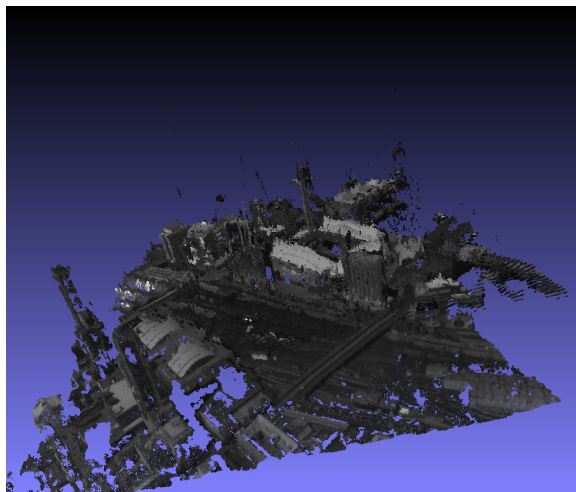
Union des nuages de points correspondants à 16 paires d'images



16 paires d'images

Chaîne multi-vue : exemple pour la séquence Melbourne

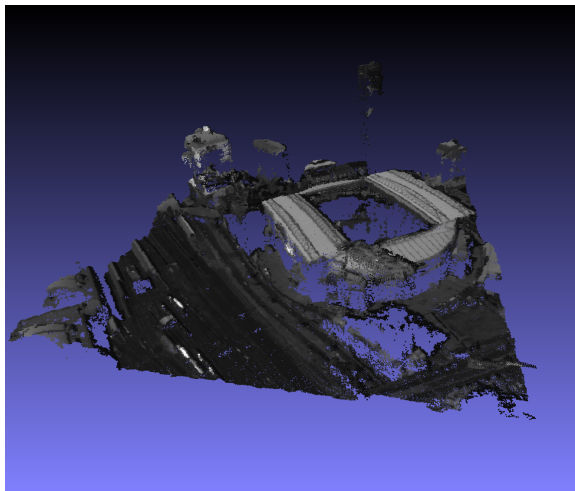
Union des nuages de points correspondants à 16 paires d'images



16 paires d'images

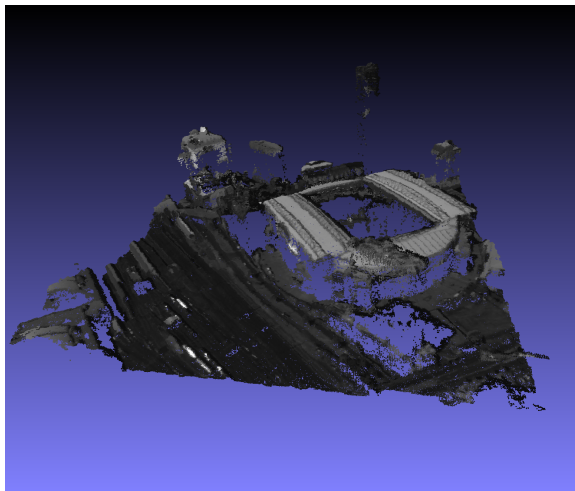
Chaîne multi-vue : exemple de fusion de points

Union des 16 nuages de points, puis médiane dans la direction verticale.



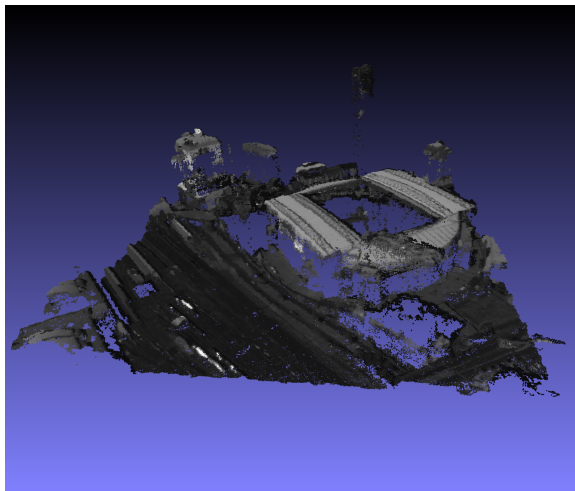
Chaîne multi-vue : exemple de fusion de points

Union des 16 nuages de points, puis médiane dans la direction verticale.



Chaîne multi-vue : exemple de fusion de points

Union des 16 nuages de points, puis médiane dans la direction verticale.



Sources d'erreur : résumé

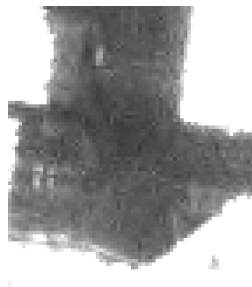
- ▶ Bruit du capteur
- ▶ Bruit de compression
- ▶ Changements d'illumination (non-lambertianité)
- ▶ Quantification des points d'intérêt
- ▶ Précision de la rectification
- ▶ Echantillonnage irrégulier du à la rectification
- ▶ Résolution de la mise en correspondance (e.g. pixellique pour le BM)
- ▶ Représentation des RPC
- ▶ Pointage des RPC

Sources d'erreur : débruitage

On peut réduire le bruit en utilisant plusieurs images recalées.



original / débruitée



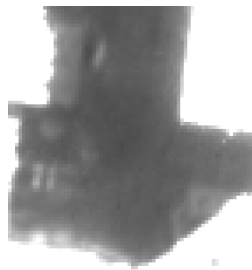
(detail)

Sources d'erreur : débruitage

On peut réduire le bruit en utilisant plusieurs images recalées.

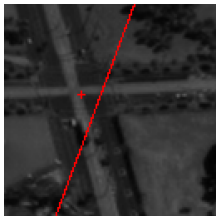


original / débruitée

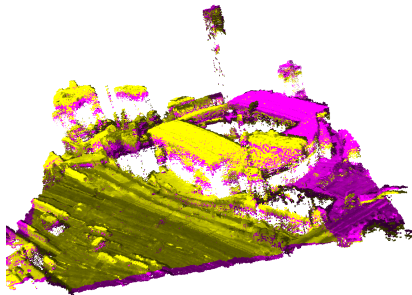


(detail)

Sources d'erreur : erreur de pointage des RPC



petite erreur épipolaire



nuages de points légèrement décalés

Sources d'erreur : affinage des RPC

Deux solutions essayés :

- ▶ Correction indépendante pour chaque pair d'images, dans la direction orthogonale aux épipolaires (il reste un degré de liberté)
- ▶ Correction globale pour un ensemble d'images, en simulant des rotations et translations de chaque image.

