

# Expériences sur les images Pléiades chaînes stéréo et multi-vue

CMLA—UIB

3 – 10 – 2012

# Résumé

1. Chaîne stéréo
2. Chaîne multi-vue
3. Sources d'erreur et sa correction
4. Mise en ligne des images et méthodes

# 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 : block-matching

Algorithme de *block-matching* :

1. Pour chaque point de l'image  $u$ , chercher le point de l'image  $v$  avec un voisinage le plus similaire possible.
2. Rejeter les mauvaises correspondances

Cet algorithme dépend de :

1. Une mesure de similarité entre voisinages
2. Un critère de rejet de disparités

## Chaîne stéréo : exemple de block-matching

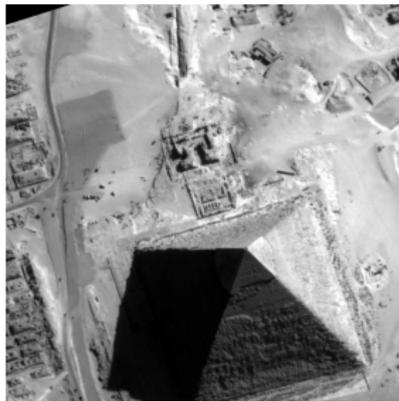
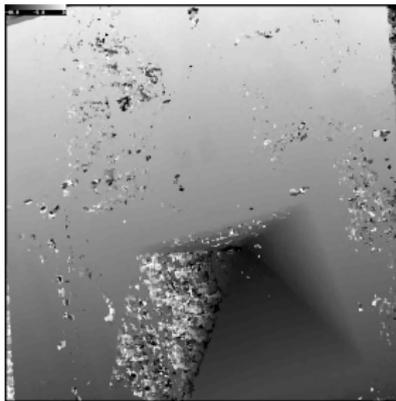
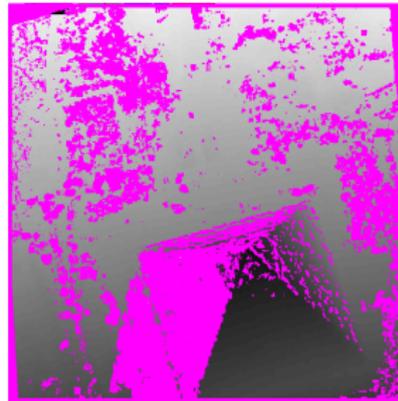


image  $u$



block matching



masque de rejet

## Chaîne stéréo : exemple de block-matching

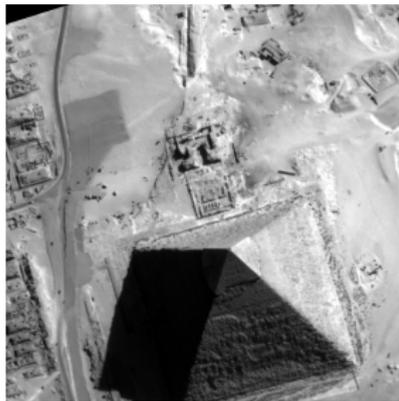
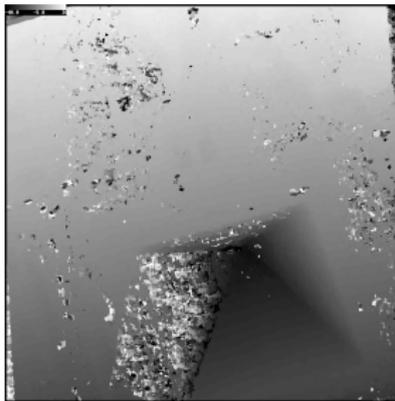
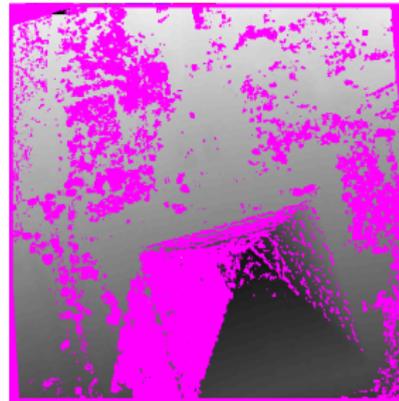


image  $v$



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

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

- ✗ 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.

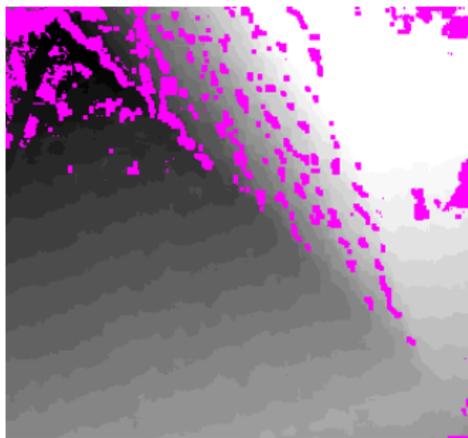
# Chaîne stéréo : choix du critère de rejet

Tableau comparatif de résultats FPR/FNR

Bal. Accuracy	FPR	FNR	Test Identifier
<b>Individual tests</b>			
0.521123	0.956738	0.001016	FLAT
0.521220	0.956521	0.001039	FLATH
0.523078	0.942827	0.011018	FLATHDIL
0.724190	0.540035	0.011585	LRRL
0.733980	0.487799	0.044241	LRRL2
0.791673	0.394839	0.021814	MINDIFF
0.863776	<b>0.206907</b>	0.065542	MINDIFFDIL
<b>Baseline combined test</b>			
0.850242	<b>0.268553</b>	<b>0.030962</b>	MERGE :LRRL+MINDIFF+FLATH
<b>Change 1 test wrt baseline</b>			
0.849053	0.267104	0.034789	MERGE :LRRL+MINDIFF+FLATHDIL
0.848980	0.240469	0.061571	MERGE :LRRL2+MINDIFF+FLATH
<b>0.885997</b>	0.157754	0.070253	MERGE :LRRL+MINDIFFDIL+FLATH
<b>Change 2 tests wrt baseline</b>			
0.847594	0.239443	0.065369	MERGE :LRRL2+MINDIFF+FLATHDIL
0.884796	0.157219	0.073190	MERGE :LRRL+MINDIFFDIL+FLATHDIL
0.879748	0.144990	0.095514	MERGE :LRRL2+MINDIFFDIL+FLATH
<b>Lowest FPR</b>			
0.878498	<b>0.144575</b>	0.098429	MERGE :LRRL2+MINDIFFDIL+FLATHDIL

## 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 : techniques par flot optique

- ▶ Fonctionnel de flot optique, entre les images  $I$  et  $J$  :

$$E(u) = \int |J(x + u(x)) - I(x)|^p + \lambda \int |\nabla u|^p$$

- ▶ Flot optique en général :

$$\min_u E(u)$$

- ▶ Flot optique pour interpoler (BM fournit la condition de bord)

$$\min_u E(u) \quad \text{s.t.} \quad u(x) = d(x), \quad x \in BM$$

- ▶ Flot optique pour lisser (BM fournit la condition initiale)  
descente de gradient de  $E(u)$  à partir de  $BM$

# Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



image A

# Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

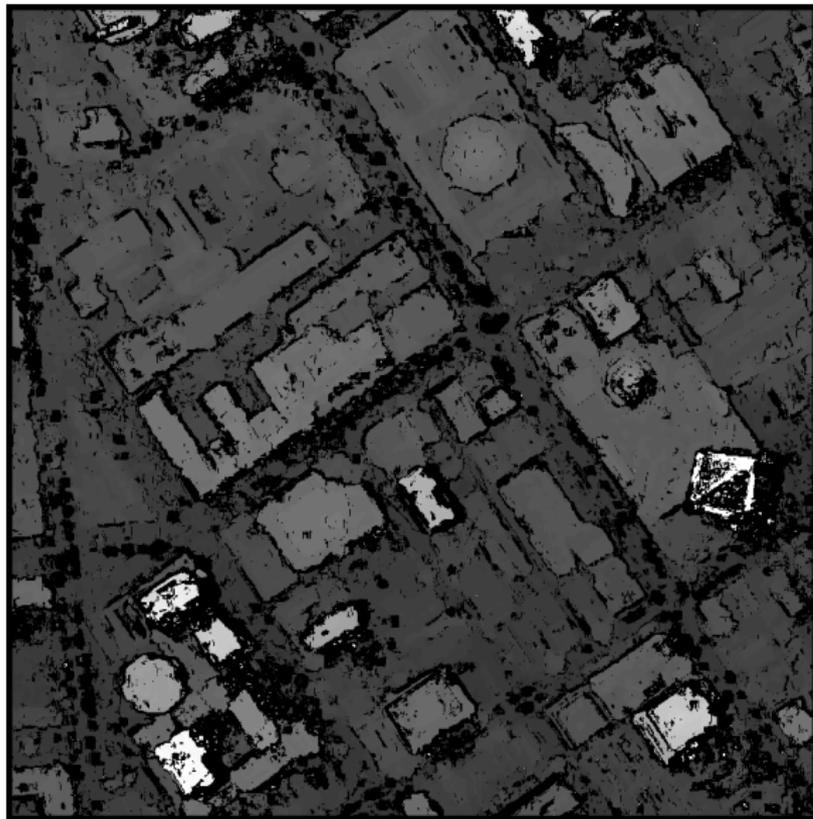
Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



image B

# Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

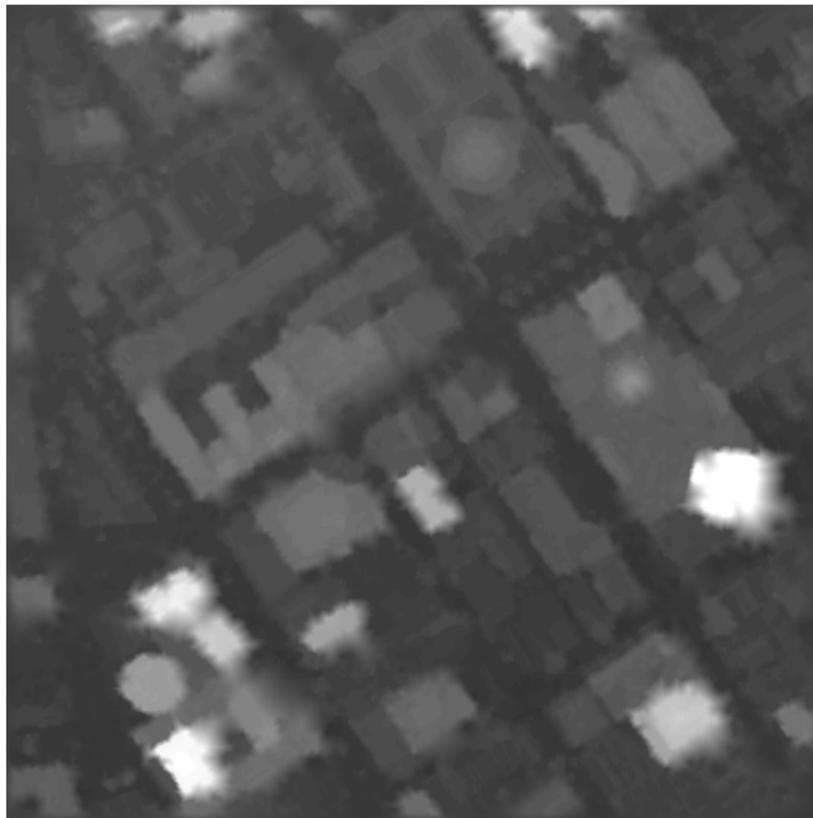
Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



résultat BM

# Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

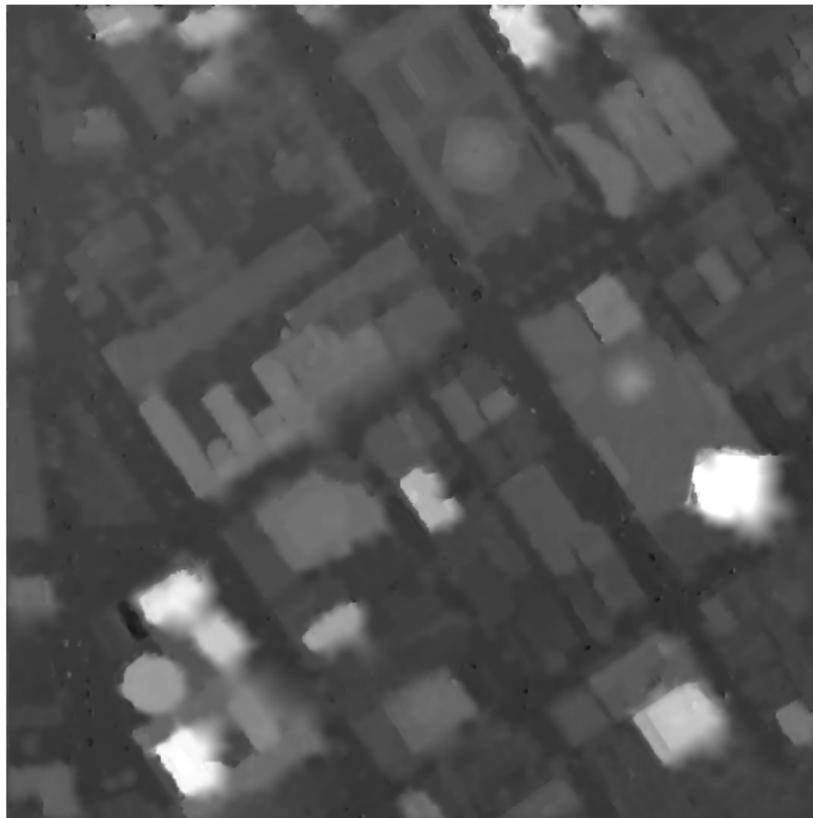
Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



interpolation AMLE

# Chaîne stéréo : interpolation par flot optique

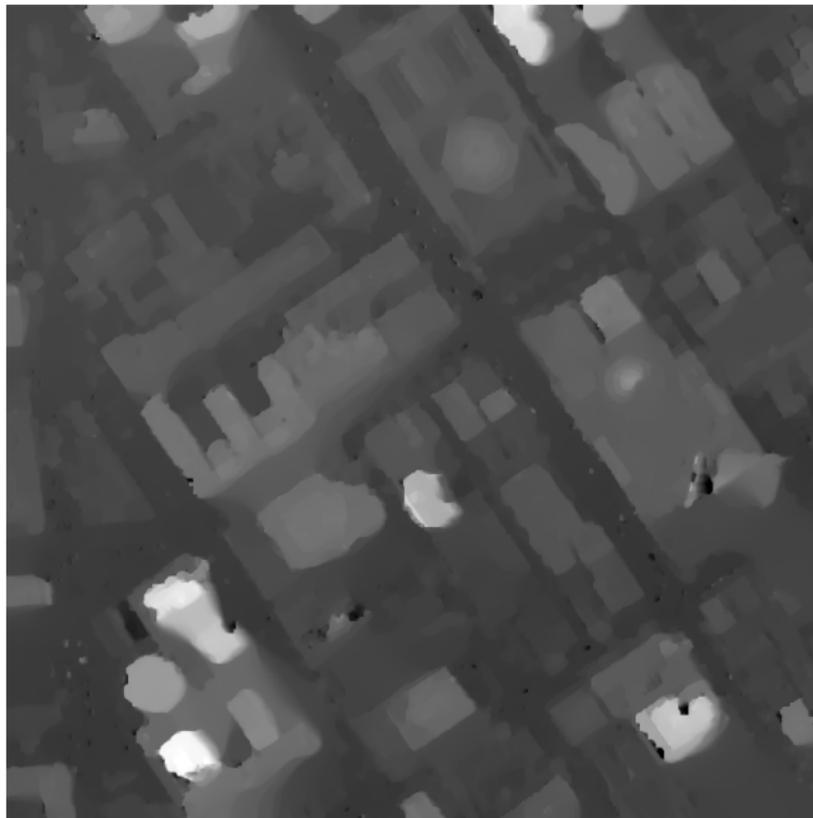
Pair Melbourne/Victoria, crop rectifié 800x800



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 ?

**Méthode** : *corr-to-height*

**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 : visualisation des résultats

Techniques de visualisation :

- ▶ Image 2D avec les vecteurs de disparité
- ▶ Dérivées de cette image (divergence, gradient)
- ▶ Image 2D avec les hauteurs
- ▶ Rendering “lambertien”
- ▶ Nuage de points 3D en couleur uniforme
- ▶ Nuage de points 3D coloré avec l’image originale

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "grande muraille", crop 1024x1024

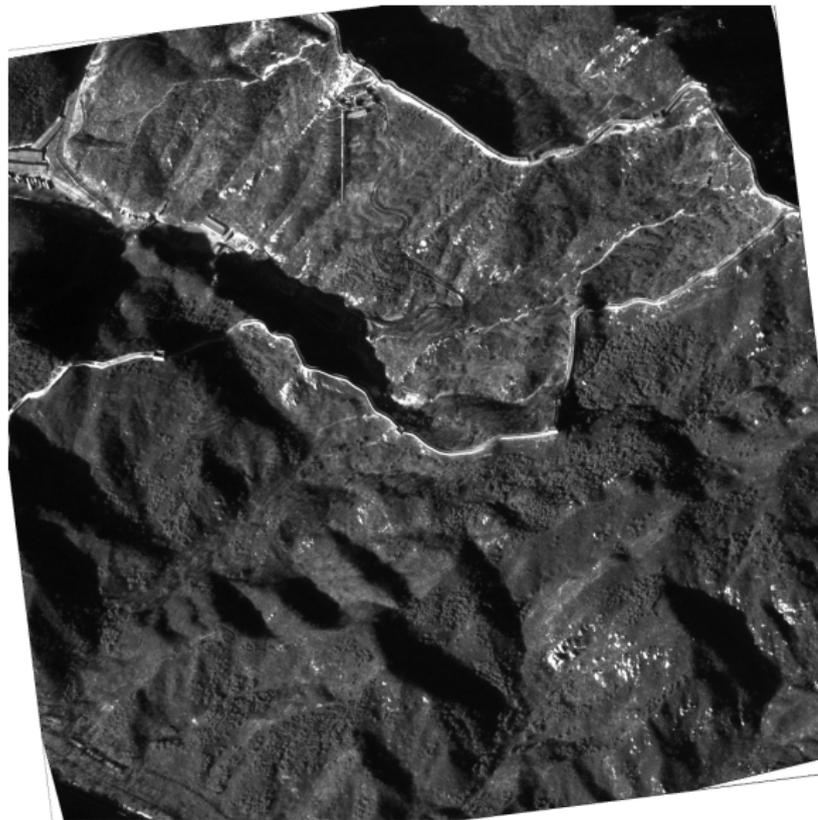


image A

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "grande muraille", crop 1024x1024

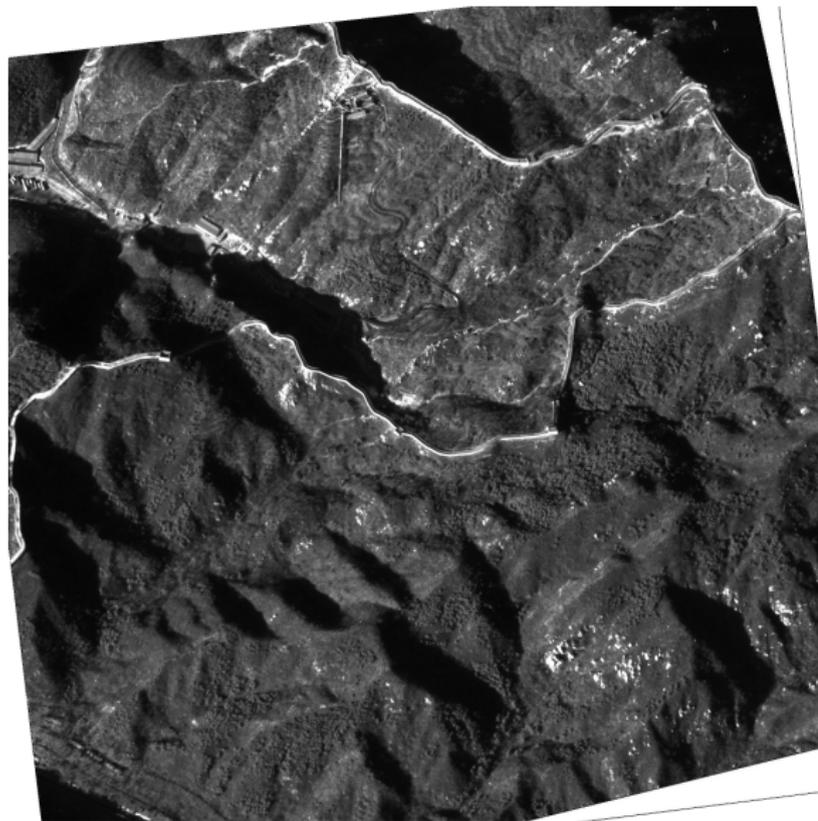
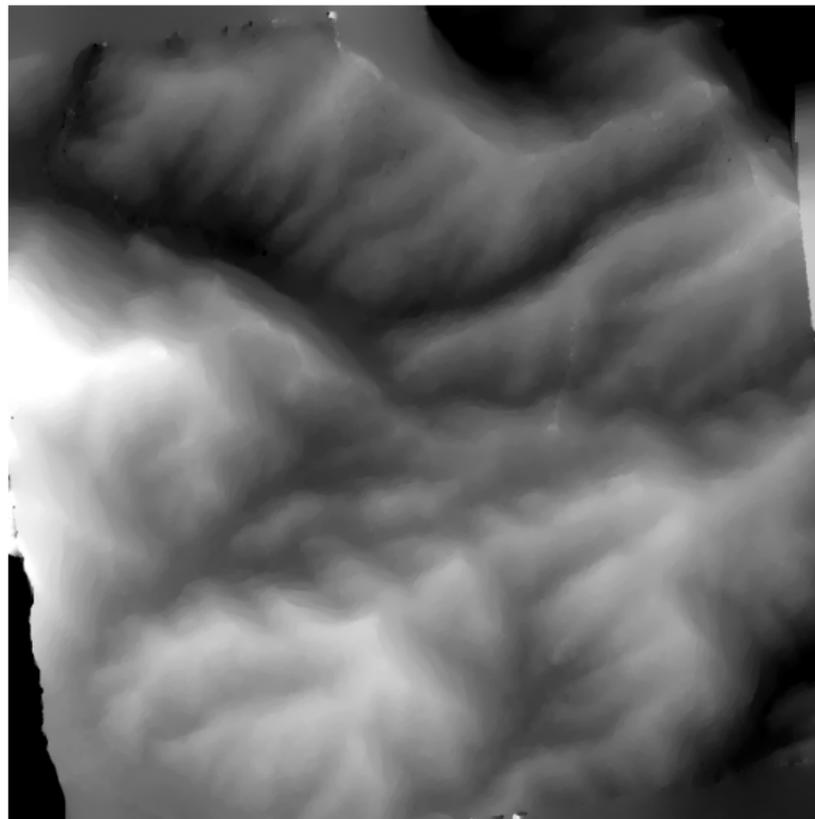


image B

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

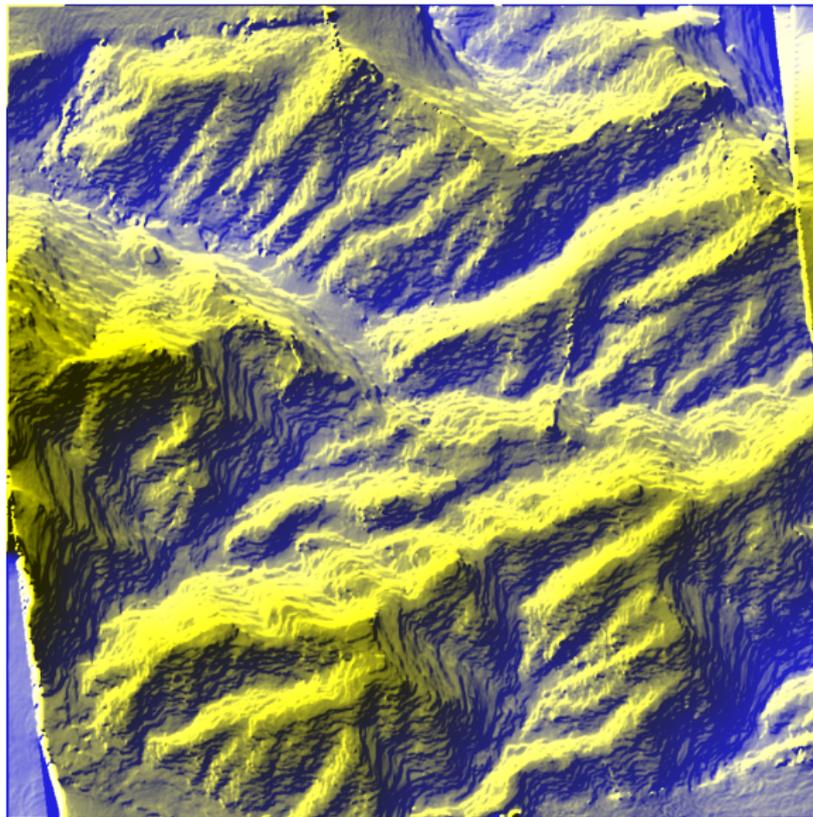
Pair rectifié "grande muraille", crop 1024x1024



disparités

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "grande muraille", crop 1024x1024



landscape

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair enregistré "Melbourne/Victoria", crop 2048x2048



image B

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

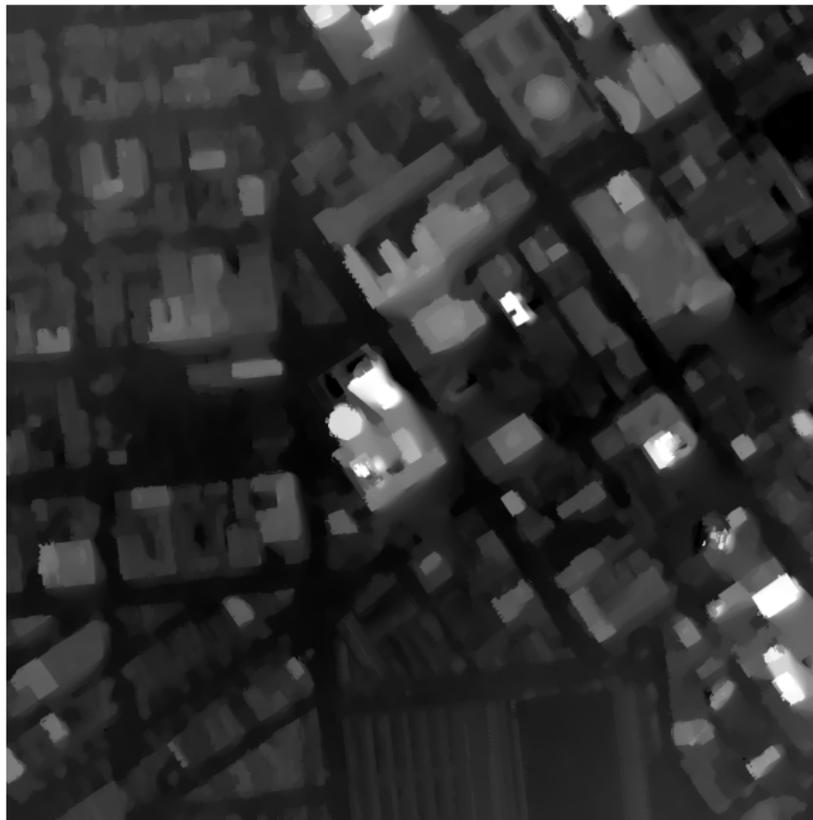
Pair enregistré "Melbourne/Victoria", crop 2048x2048



image A

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

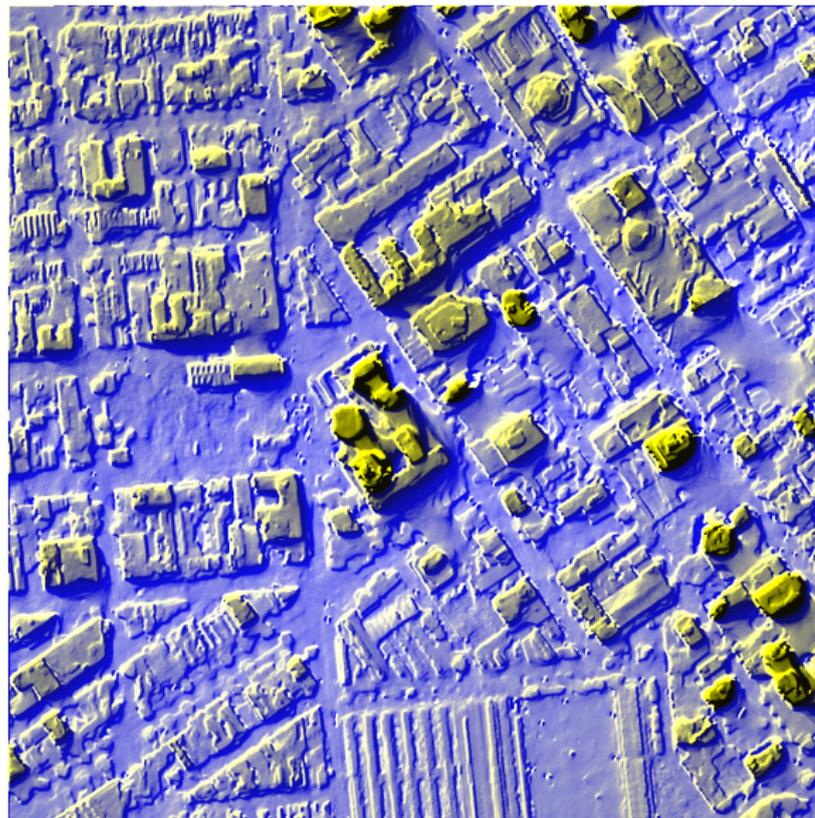
Pair enregistré "Melbourne/Victoria", crop 2048x2048



$|u|$

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

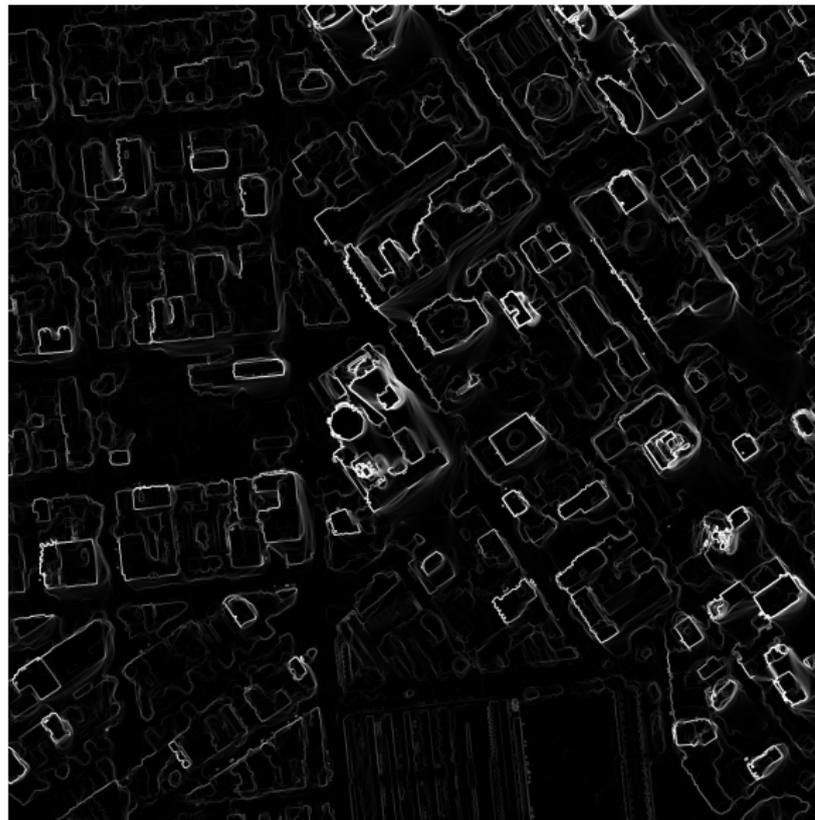
Pair enregistré "Melbourne/Victoria", crop 2048x2048



landscape

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

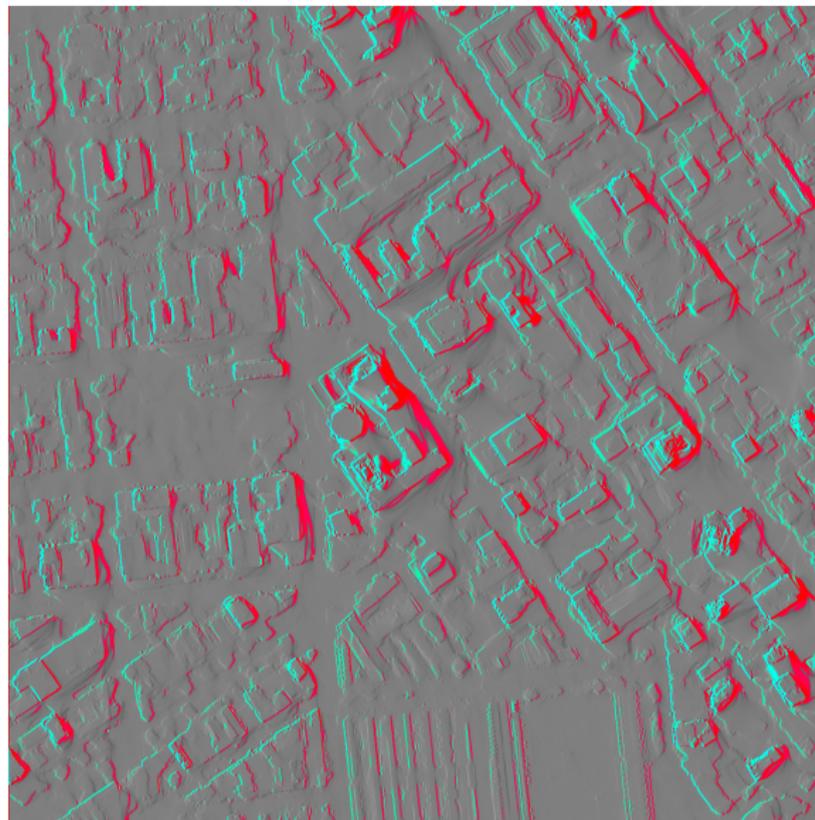
Pair enregistré "Melbourne/Victoria", crop 2048x2048



$|\nabla u|$

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair enregistré "Melbourne/Victoria", crop 2048x2048



$\text{div}(u)$

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024



image A

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

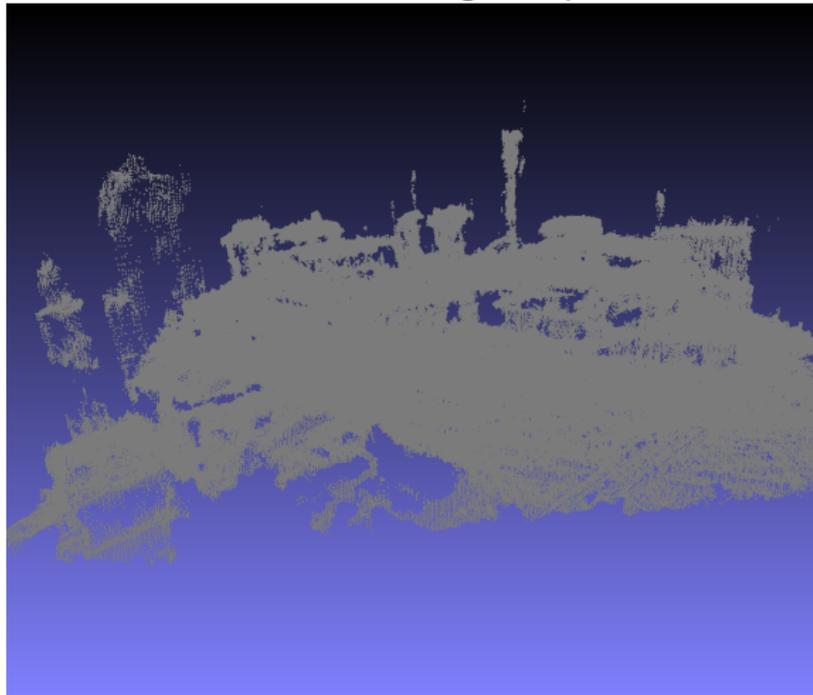


image B

# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

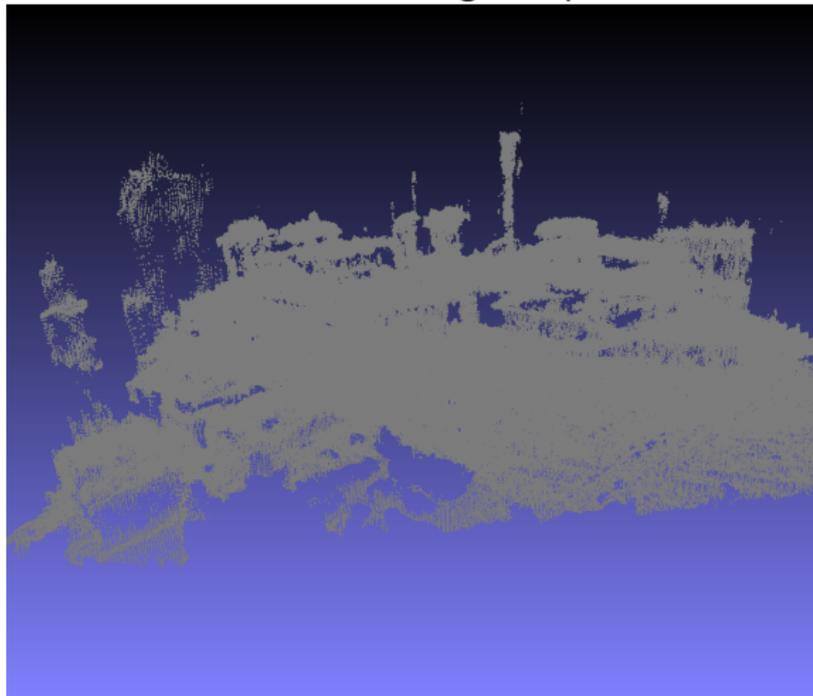
Visualisation naïve du nuage de points



# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

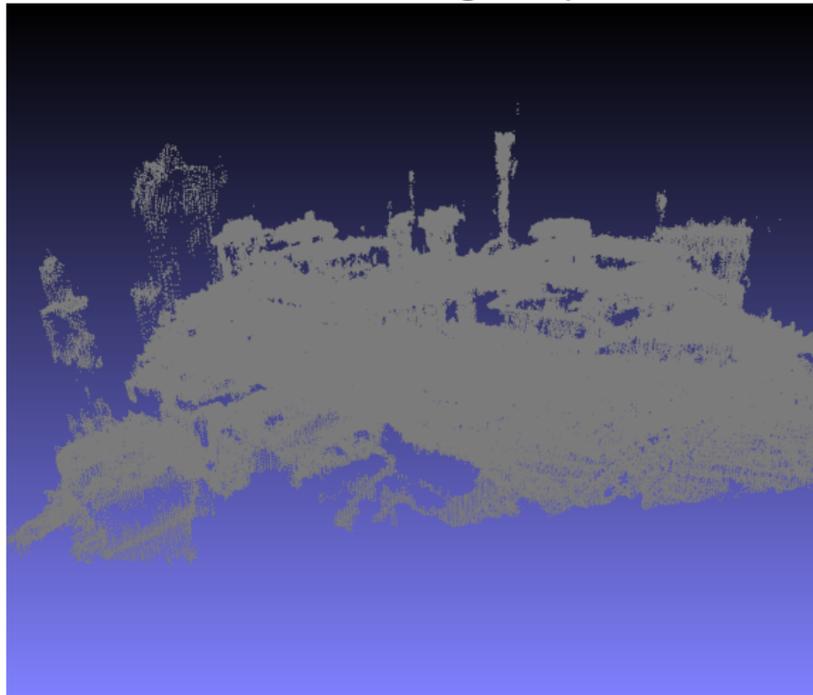
Visualisation naïve du nuage de points



# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

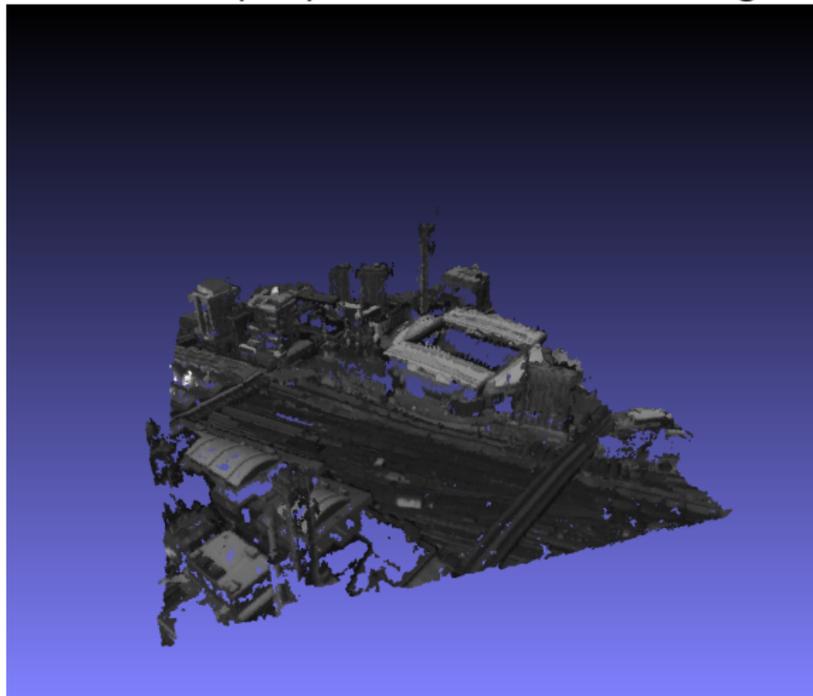
Visualisation naïve du nuage de points



# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

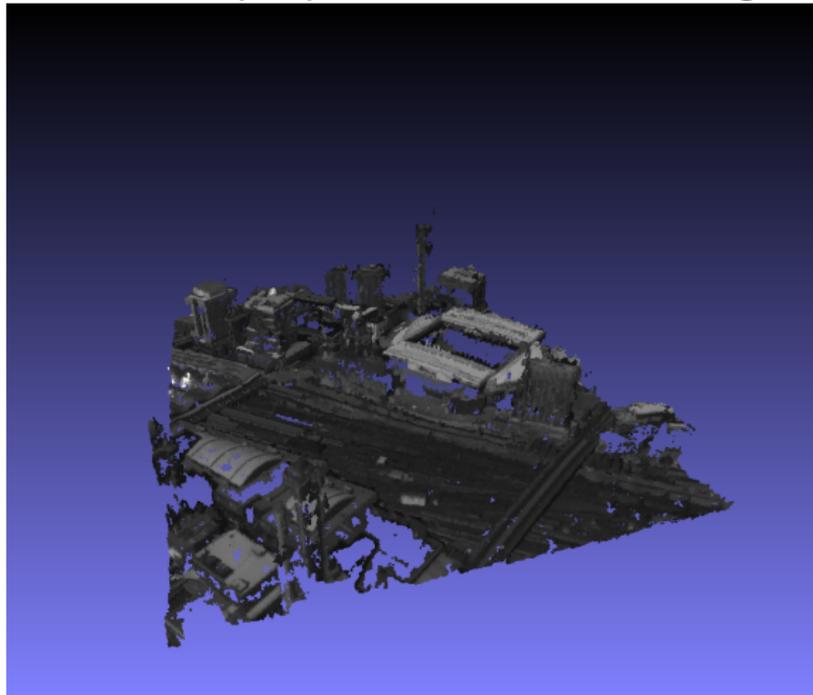
Visualisation par points colorés selon l'image



# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

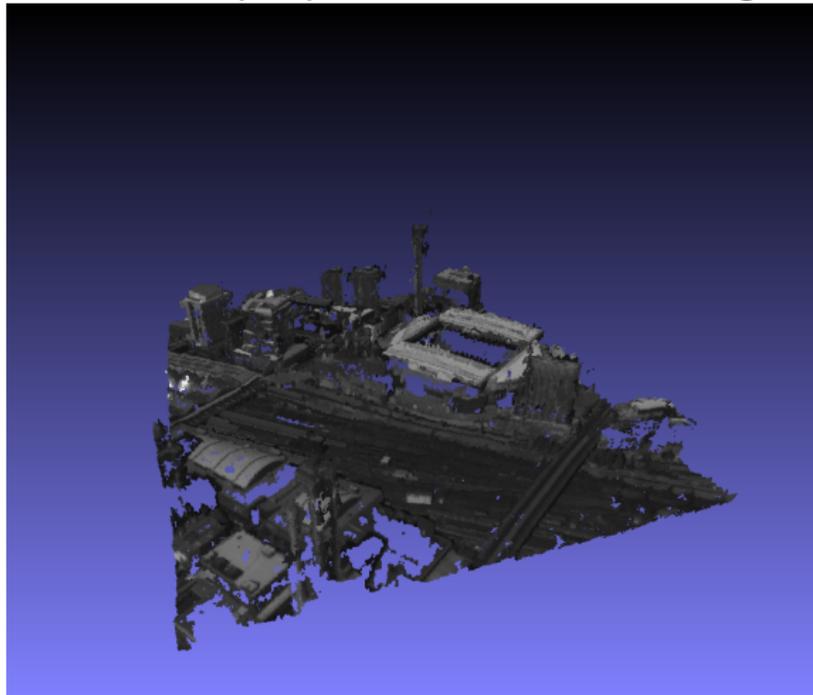
Visualisation par points colorés selon l'image



# Chaîne stéréo : visualisation des résultats

Pair rectifié "Melbourne/Stadium", crop 1024x1024

Visualisation par points colorés selon l'image



# Chaîne stéréo : techniques de flot optique

Le flot optique permet de bypasser l'étape de rectification.

Algorithme :

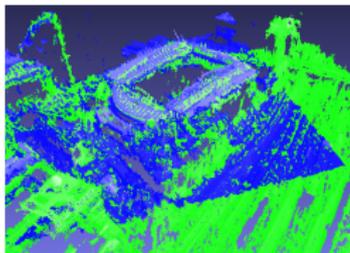
1. Pre-recalage par une affinité, trouvée par SIFT
2. Calcul d'un flot optique global sur les images recalées
3. Conversion des vecteurs de flot optique en hauteurs via la RPC

Bilan :

- ▶ Précision sous-pixellienne par défaut
- ▶ Seulement petites disparités
- ▶ Pas besoin de stéréo-rectification
- ▶ Très sensible aux changements d'illumination
- ▶ Dense par défaut
- ▶ Dense par défaut

## Chaîne multi-vue : motivation

- ▶ Besoin de plusieurs points de vue : **pour reconstruire les 4 murs d'un bâtiment il faut un *minimum* de 4 images.**
- ▶ Résultat plus précis (moyenne des nuages de points)
- ▶ Débruitage des images originaux (moyenne des couleurs)
- ▶ Dans une séquence d'images, on peut trouver de correspondances entre points de vue très distants.



deux cotés d'un batiment



ombre avant débruitage



ombre après débruitage

# Chaîne multi-vue : notre technique

Technique “naïve” de reconstruction multi-vue :

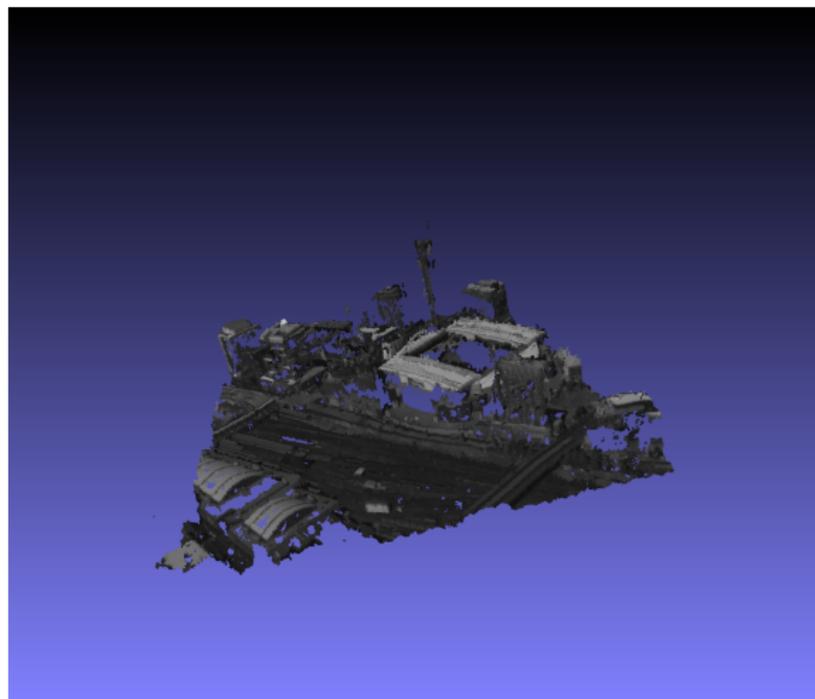
1. Appliquer la chaîne stéréo à plusieurs paires d'images
2. Fusion des nuages de points résultants

Plusieurs topologies possibles :

- ▶ Paires consécutifs :  $(1, 2), (2, 3), (3, 4), \dots, (16, 17)$   
(*low-baseline*, correspondance facile, précision limitée)
- ▶ Image de référence :  $(1, 9), (2, 9), (3, 9), \dots, (17, 9)$   
(*wide-baseline*, correspondance difficile, haute précision)
- ▶ Autres combinaisons ...

# Chaîne multi-vue : exemple pour la séquence Melbourne

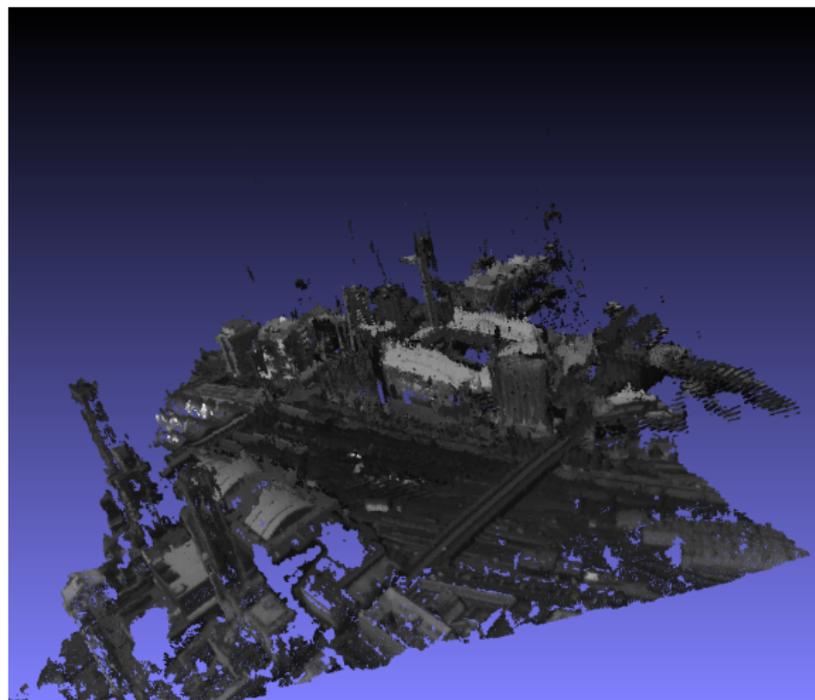
Union des nuages de points correspondants à 16 paires d'images



un seul paire d'images

# Chaîne multi-vue : exemple pour la séquence Melbourne

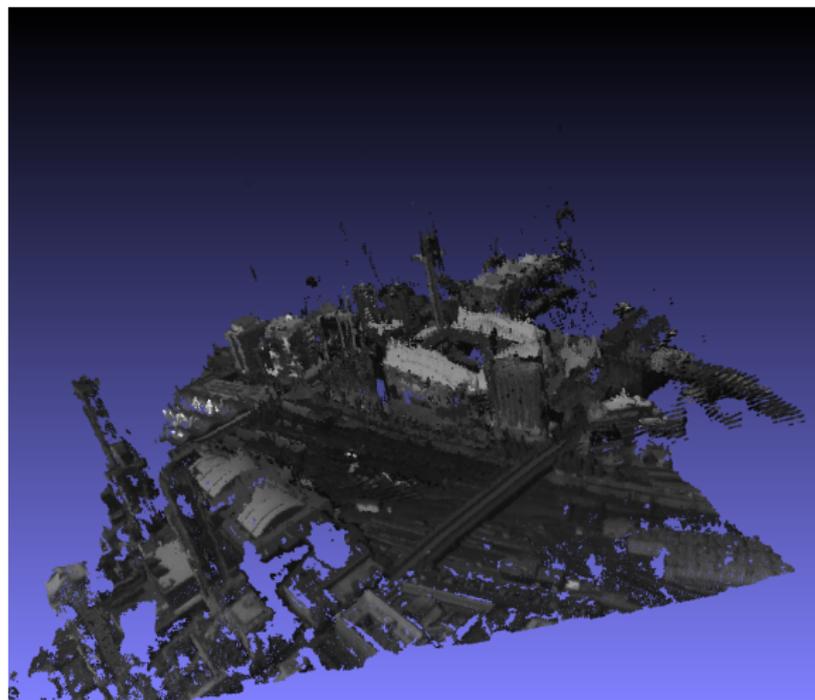
Union des nuages de points correspondants à 16 paires d'images



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 : fusion des nuages de points

## Images presque simultanées

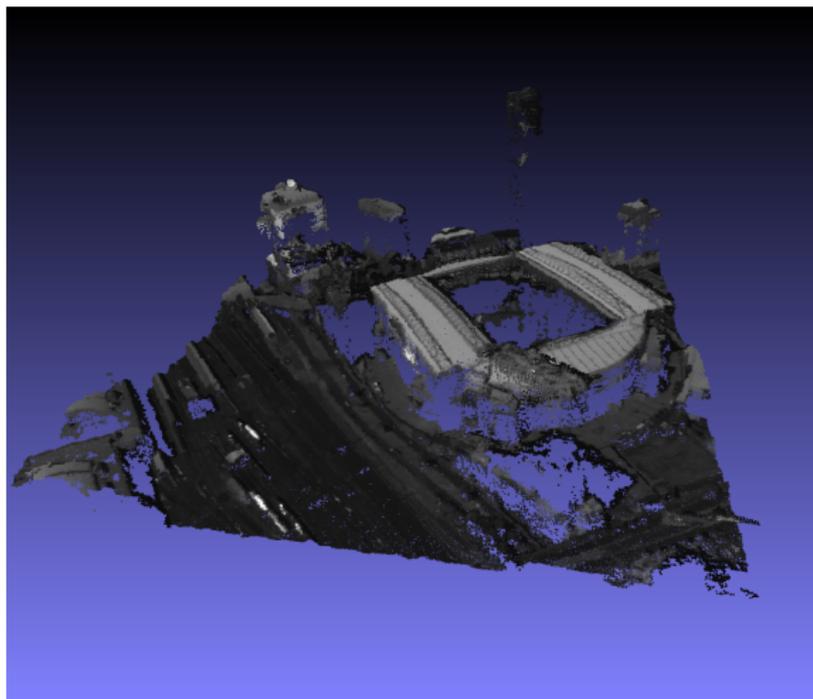
- ▶ Les points 3D sont déjà mis en correspondance
- ▶ Recalage des nuages de points par une transformation globale

## Images prises à temps différents

- ▶ Mise en correspondance des points très difficile
- ▶ Fusion aveugle des nuages de points  
(pas encore mise en oeuvre)
- ▶ Nous n'avons pas encore aucun ensemble d'images diachroniques

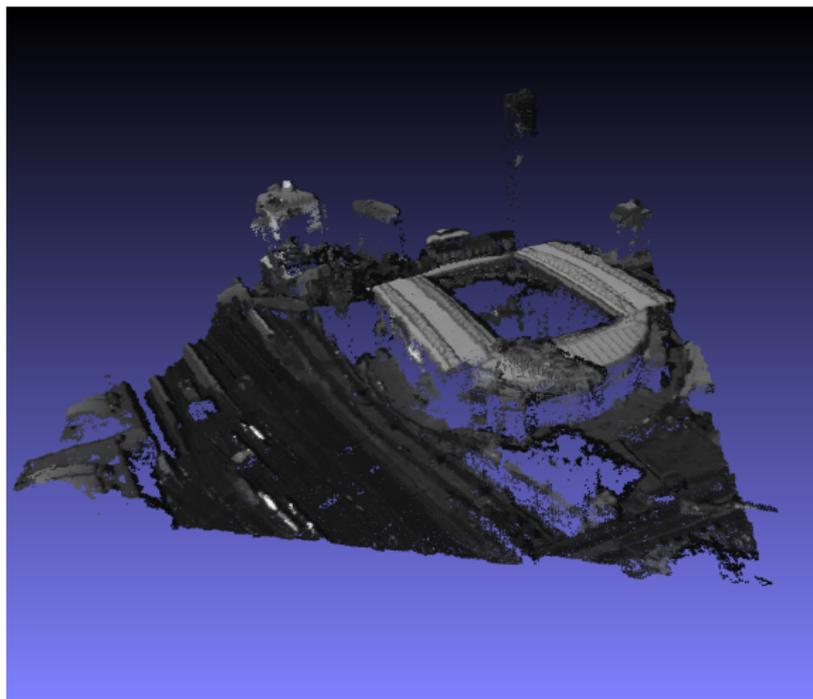
# Chaîne multi-vue : exemple de fusion de points

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



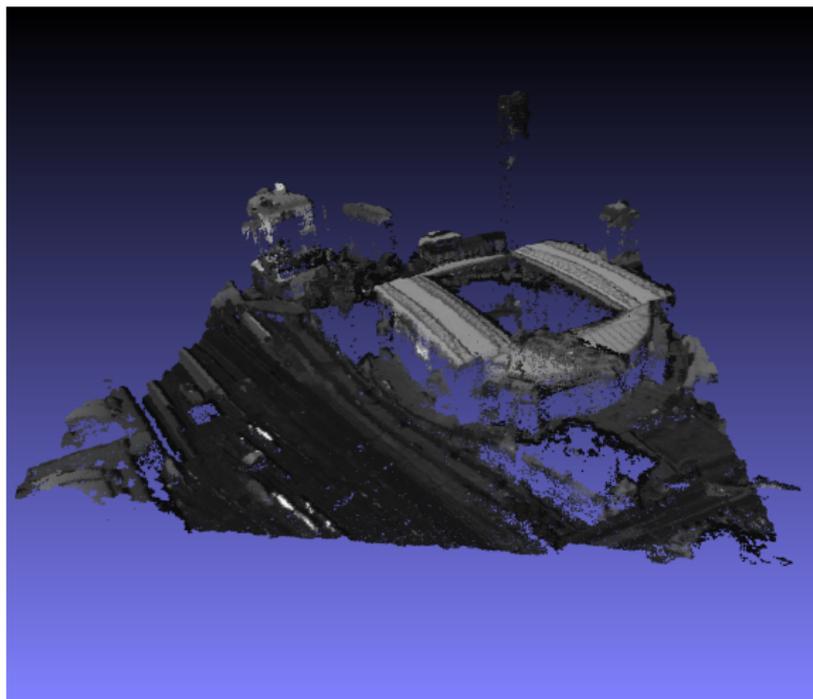
# Chaîne multi-vue : exemple de fusion de points

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 : bruit du capteur/compression

Le bruit des images Pléiades est bien visible dans les régions ombres



# Sources d'erreur : bruit du capteur/compression

Le bruit des images Pléiades est bien visible dans les régions ombres

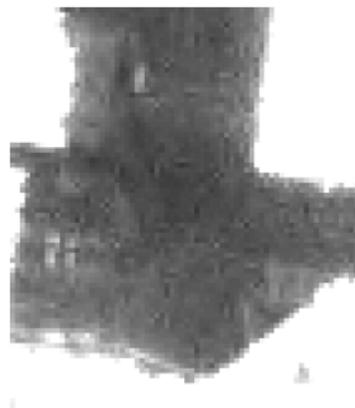


# Sources d'erreur : débruitage

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 : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 01/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 02/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales

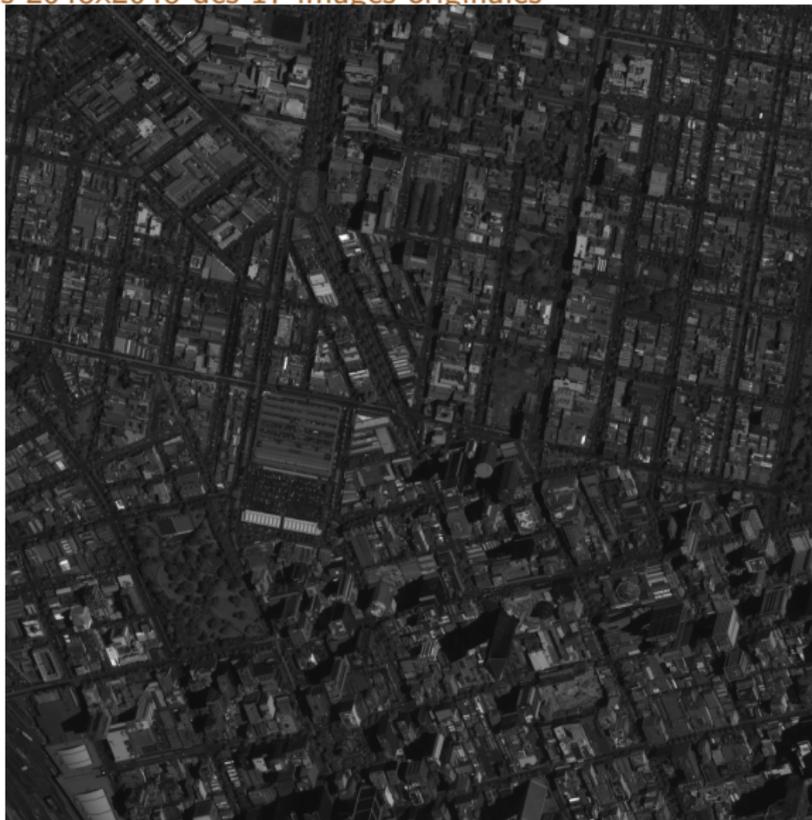


image 03/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 04/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 05/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 06/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 07/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 08/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales

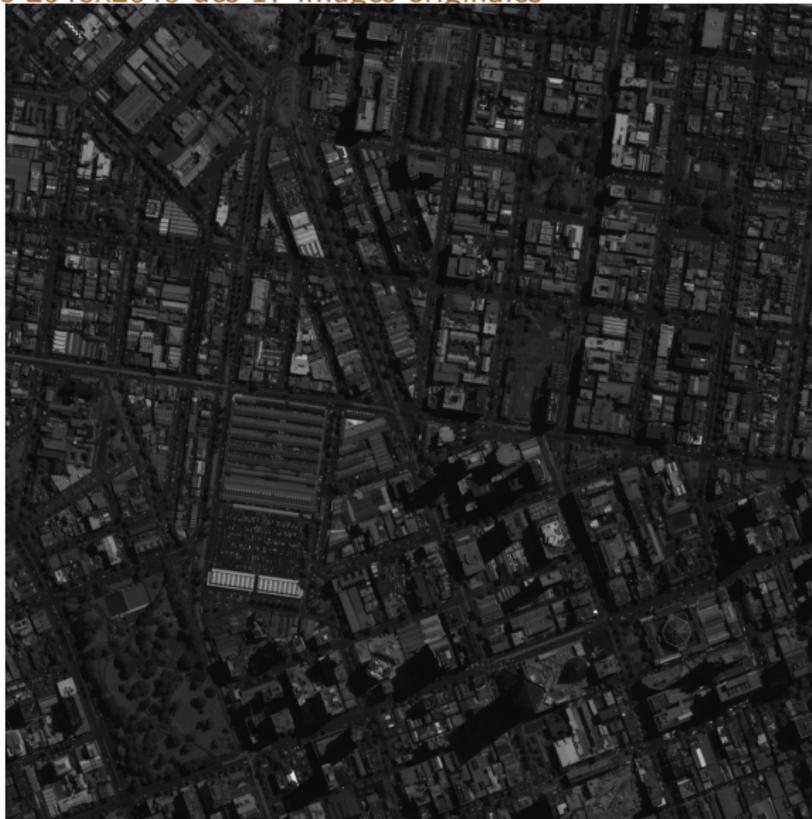


image 09/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales

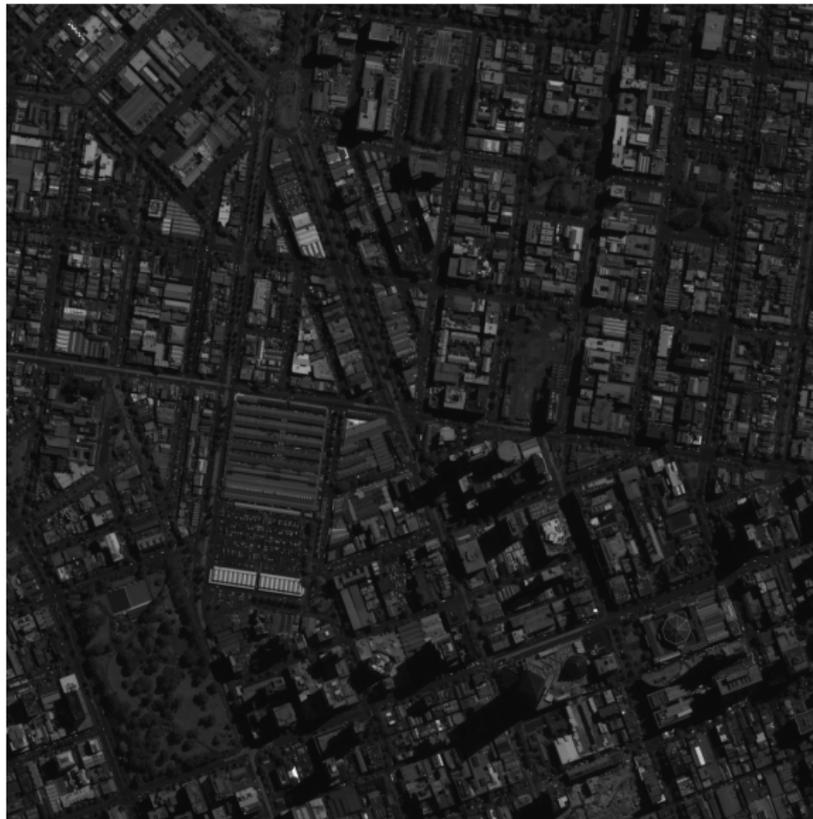


image 10/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales

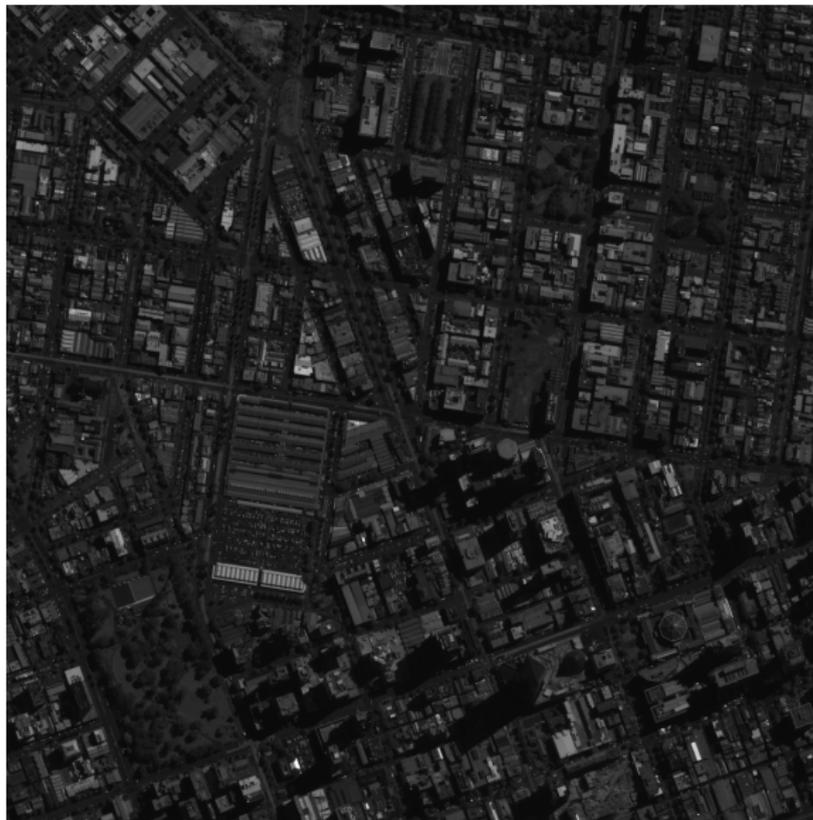


image 11/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales

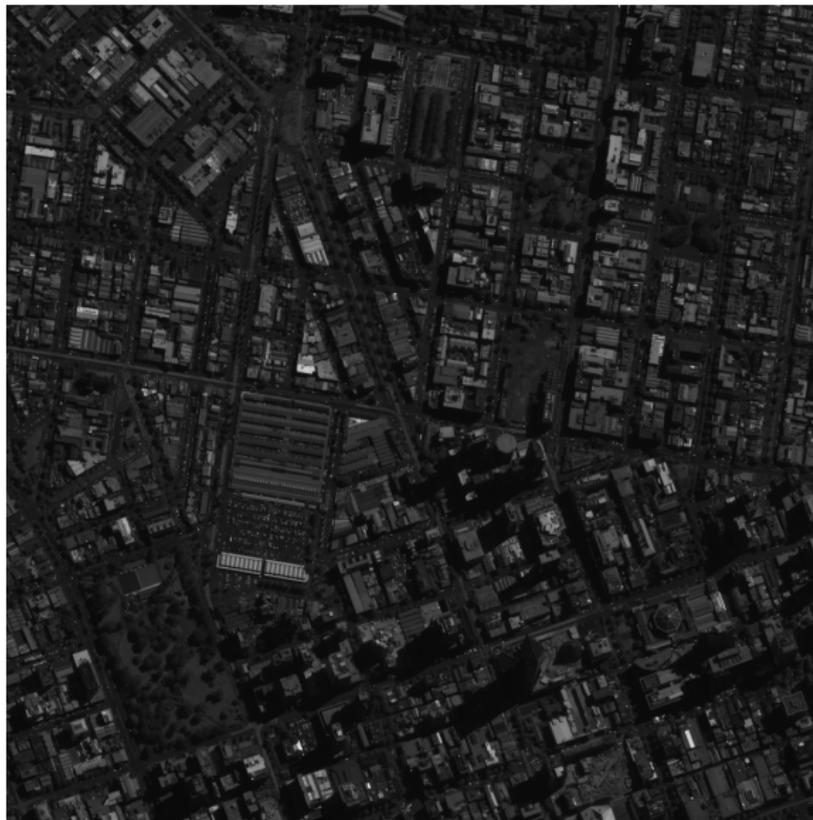


image 12/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 13/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 14/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 15/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 16/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

Crops 2048x2048 des 17 images originales

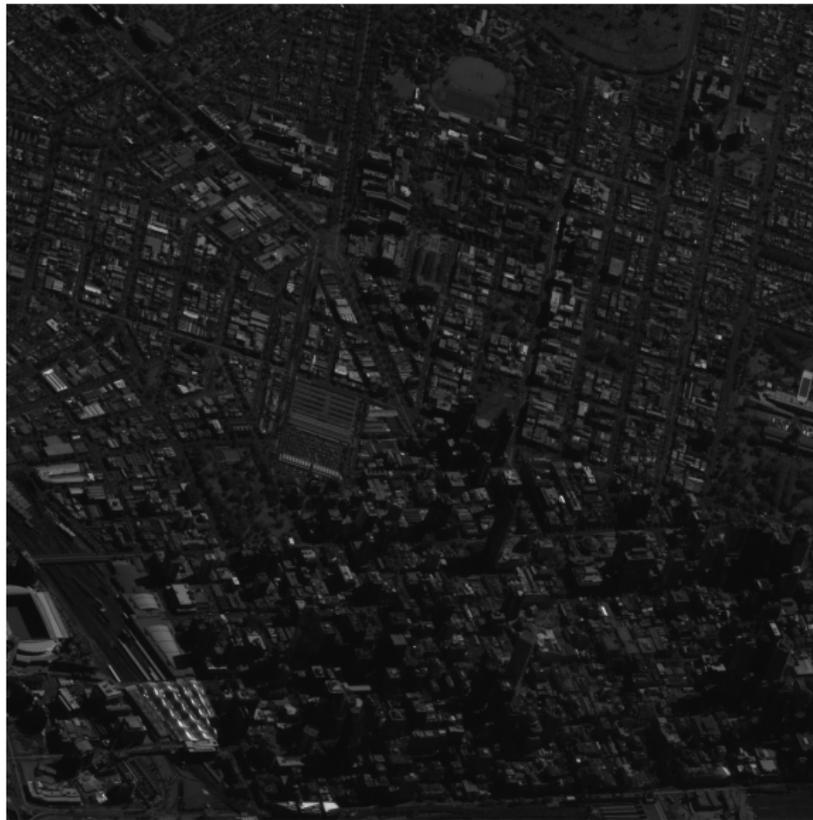


image 17/17

# Sources d'erreur : changement d'illumination

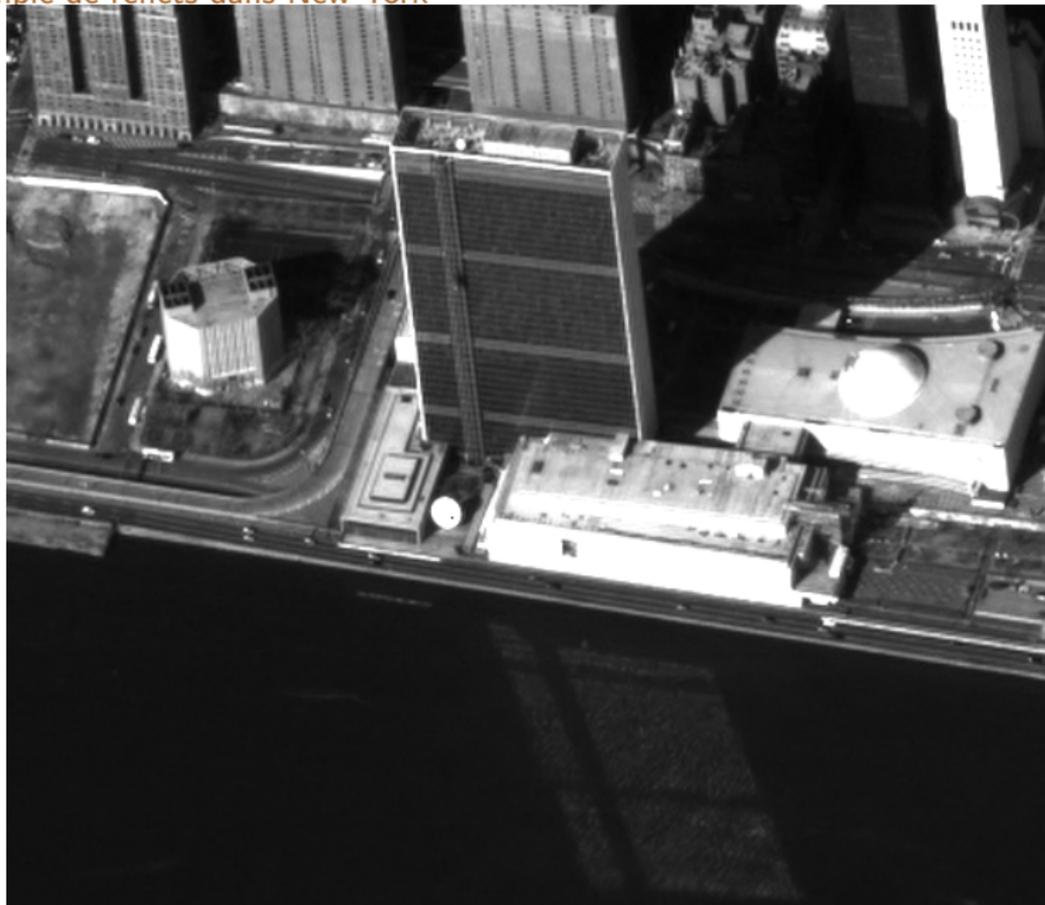
Crops 2048x2048 des 17 images originales



image 01/17

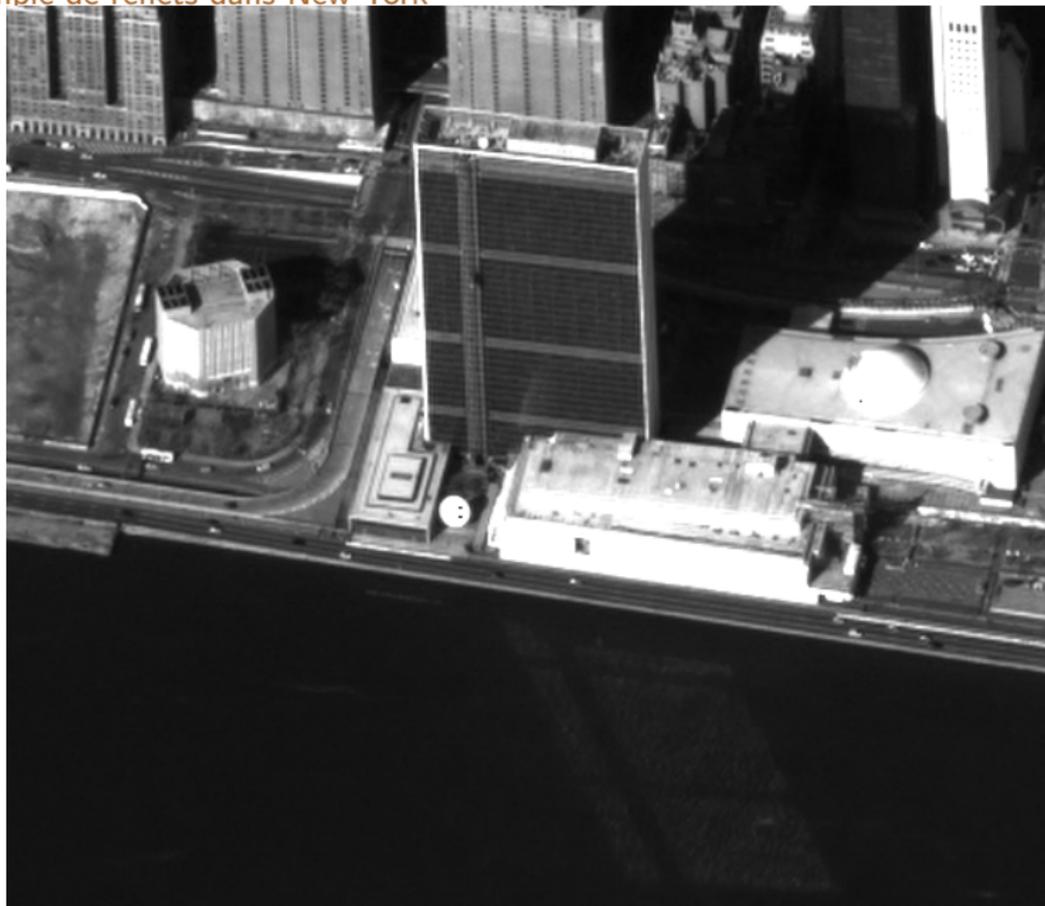
# Sources d'erreur : changement d'illumination

Exemple de reflets dans New York



# Sources d'erreur : changement d'illumination

Exemple de reflets dans New York



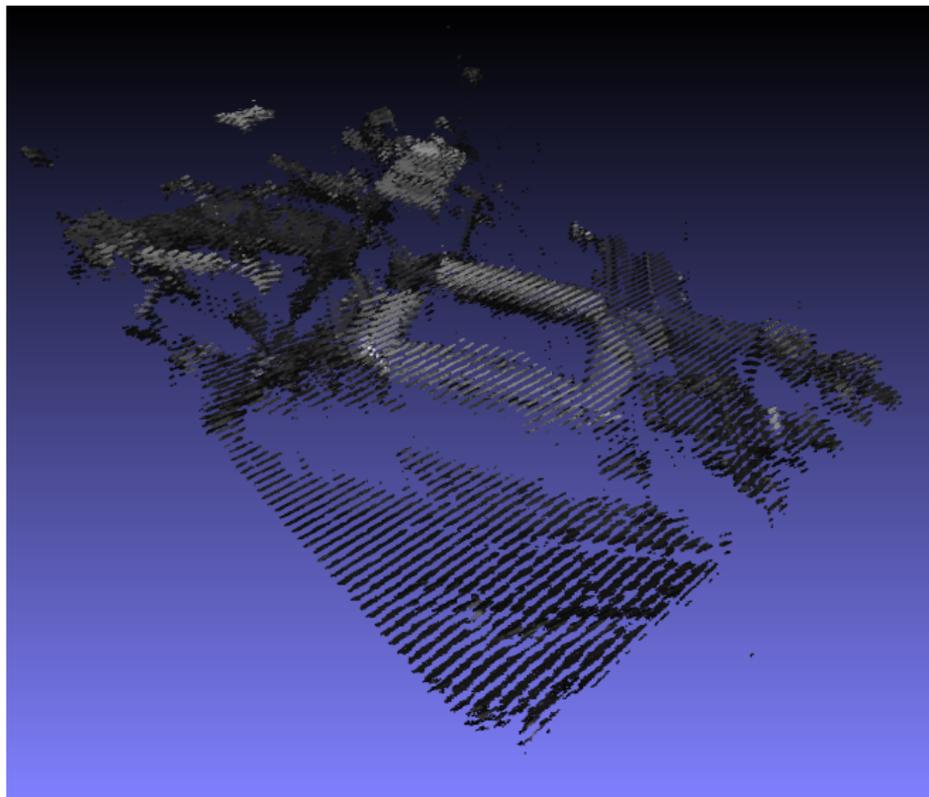
# Sources d'erreur : changement d'illumination

Traitement robuste face aux changements d'illumination :

- ▶ Ne comparer jamais couleurs absolus
- ▶ Utilisation de métriques de voisinages normalisées
- ▶ Flot optique entre images de gradients

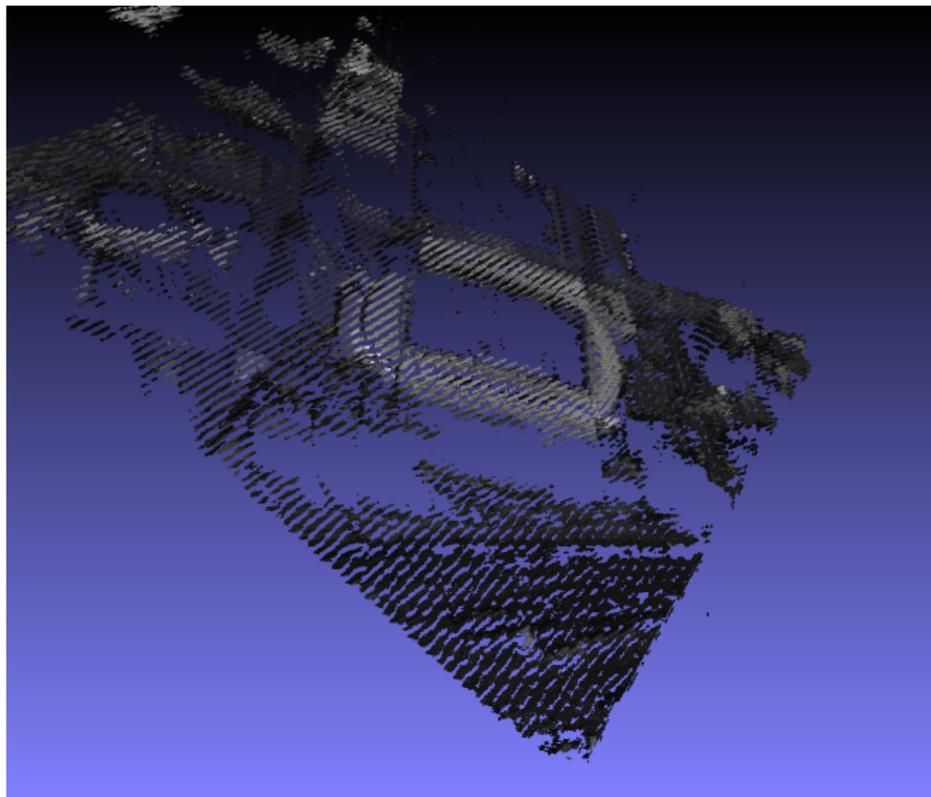
# Sources d'erreur : quantification des disparités

La quantification des disparités limite les hauteurs possibles à un ensemble fini.



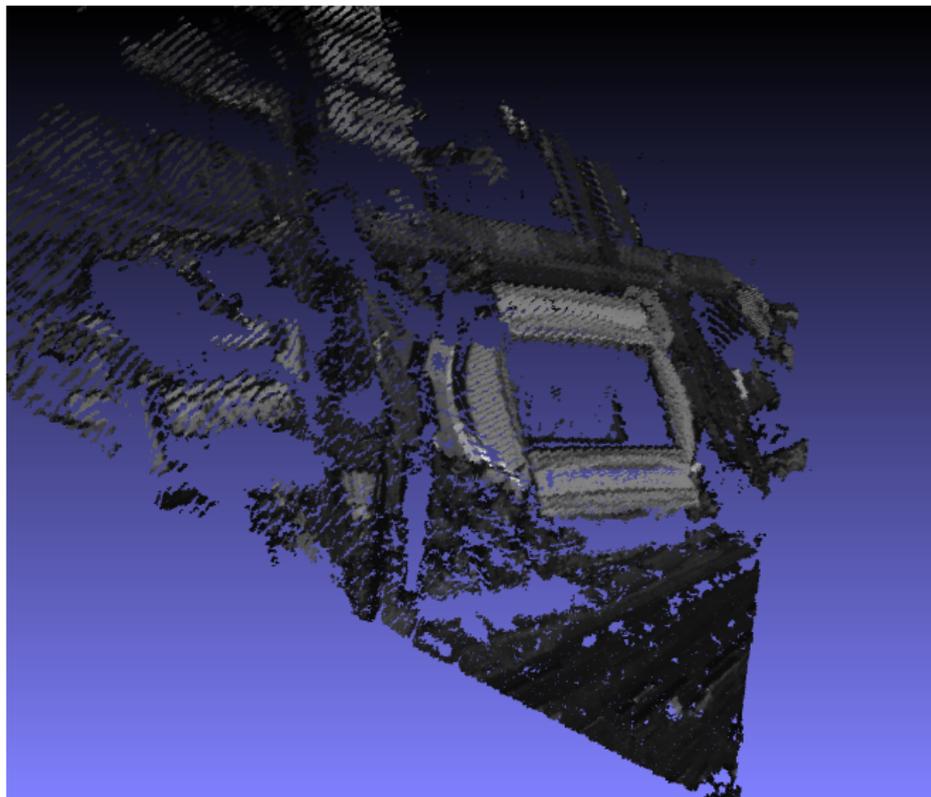
## Sources d'erreur : quantification des disparités

La quantification des disparités limite les hauteurs possibles à un ensemble fini.



## Sources d'erreur : quantification des disparités

La quantification des disparités limite les hauteurs possibles à un ensemble fini.



# Sources d'erreur : traitement de l'erreur de quantification

Trois possibilités :

- ▶ Lissage de la carte de disparités (OF, RAFA, RAFA2)
- ▶ Lissage direct du nuage de points
- ▶ Moyenne de plusieurs nuages de points  
(Besoin de plusieurs images !)

# Sources d'erreur : représentation des RPC

Les RPC sont une approximation. Comment elle est bonne ?

Conclusions :

- ▶ L'erreur entre  $x$  et  $RPC(RPC^{-1}(x))$  est négligeable (moins de 1cm sur le terrain).
- ▶ L'erreur qu'on obtient en supposant que les épipolaires sont parallèles n'est pas du tout négligeable (angle de 0.5 degrés au pire cas).
- ▶ L'erreur qu'on obtient en supposant que les épipolaires sont des droites est négligeable (écart de moins de 1 pixel par rapport à une droite d'un côté à l'autre des images)

# Sources d'erreur : représentation des RPC

Visualisation de l'erreur  $x - rpc(rpc^{-1}(x))$  pour les images New York et Giza



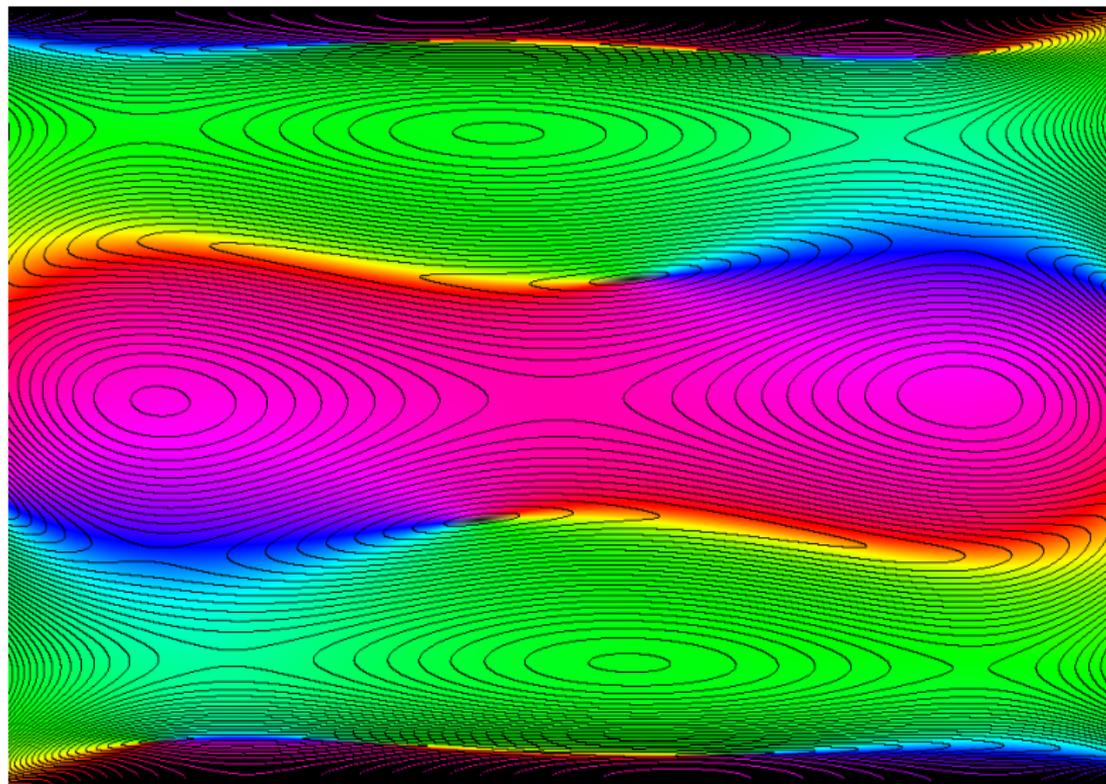
# Sources d'erreur : représentation des RPC

Visualisation de l'erreur  $x - rpc(rpc^{-1}(x))$  pour les images New York et Giza



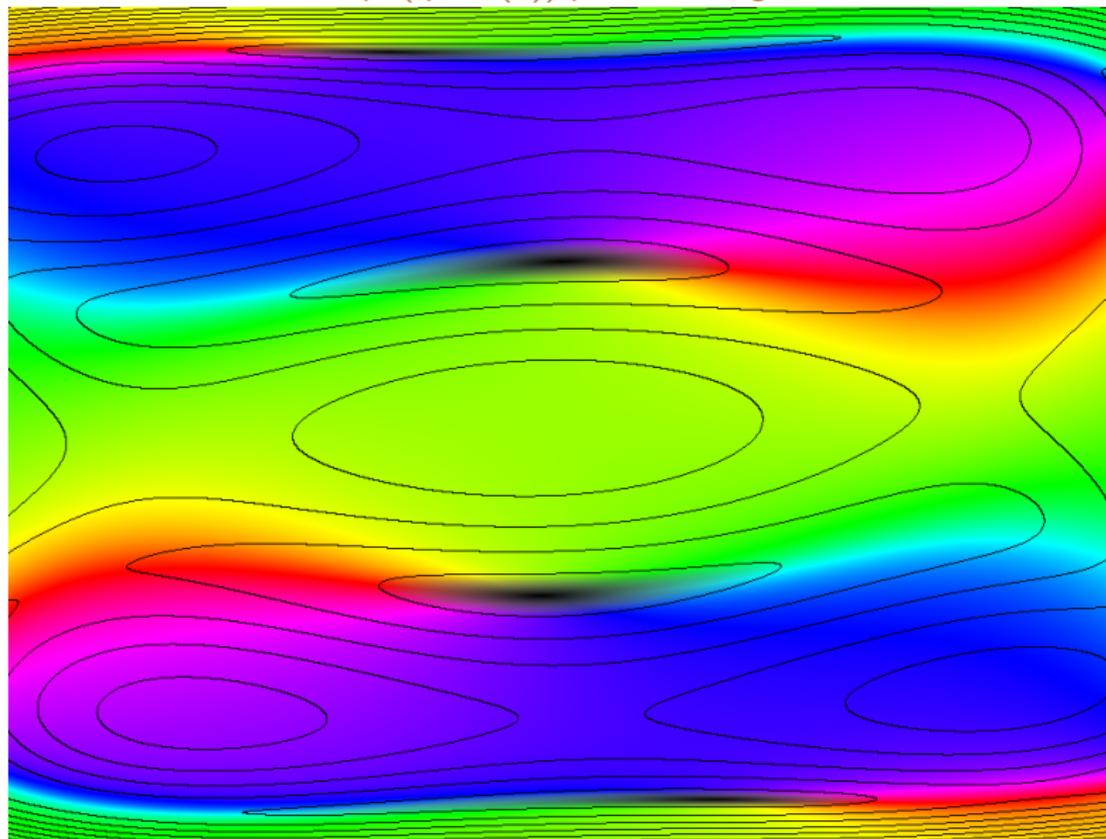
# Sources d'erreur : représentation des RPC

Visualisation de l'erreur  $x - rpc(rpc^{-1}(x))$  pour les images New York et Giza



# Sources d'erreur : représentation des RPC

Visualisation de l'erreur  $x - rpc(rpc^{-1}(x))$  pour les images New York et Giza



# Sources d'erreur : représentation des RPC

Visualisation de l'erreur  $x - rpc(rpc^{-1}(x))$  pour les images New York et Giza



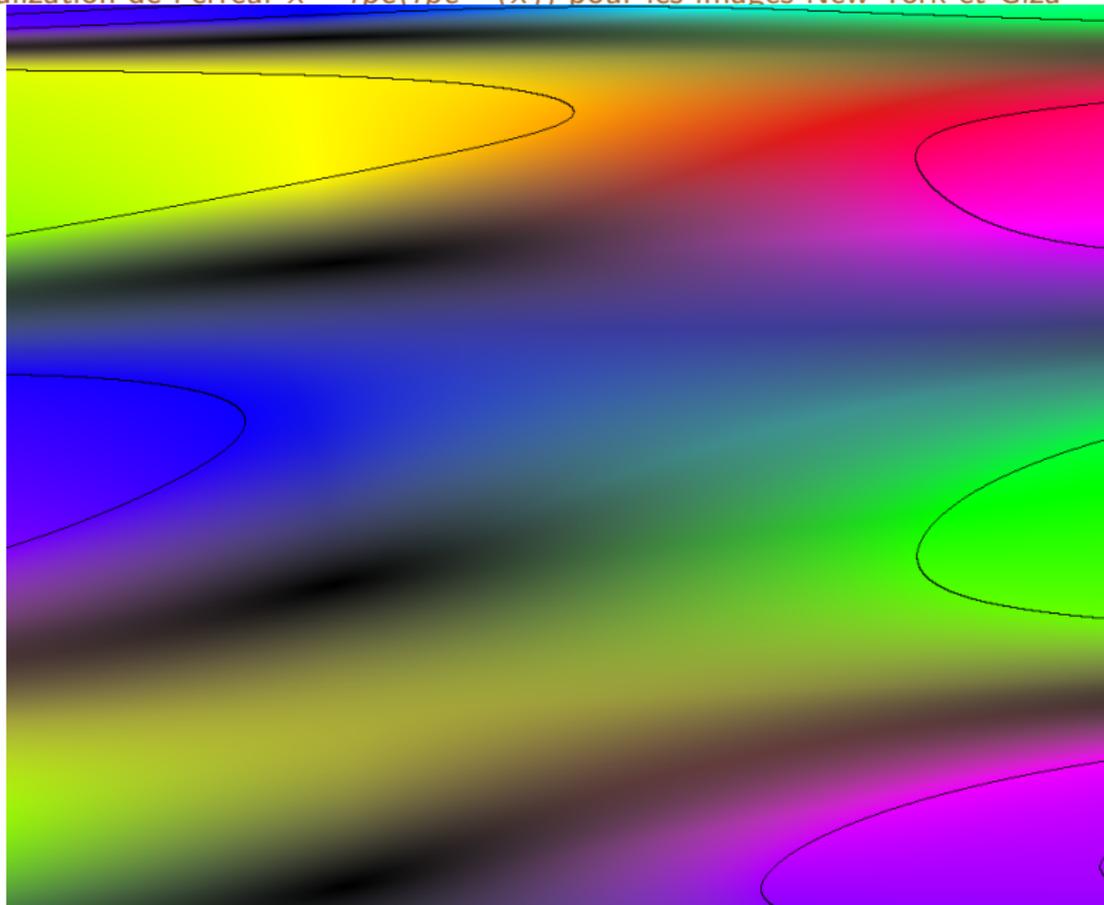
# Sources d'erreur : représentation des RPC

Visualisation de l'erreur  $x - rpc(rpc^{-1}(x))$  pour les images New York et Giza



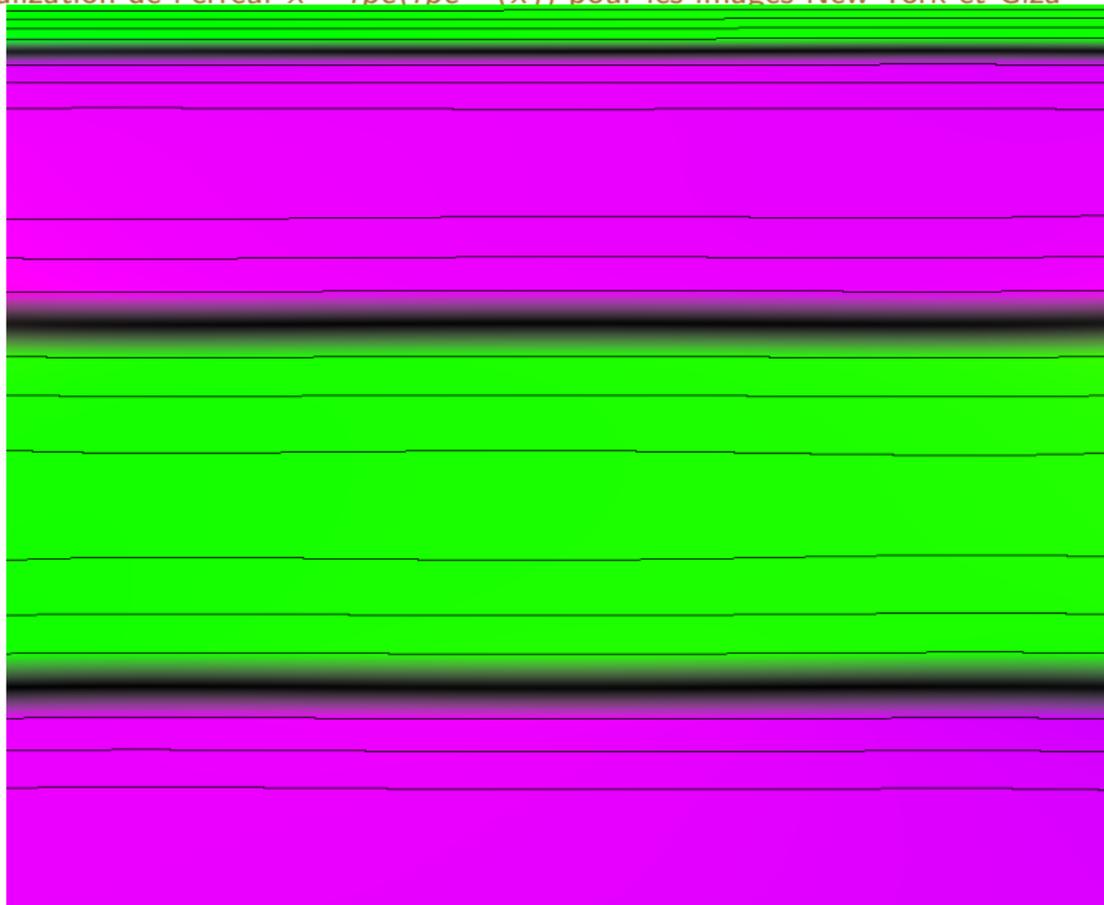
# Sources d'erreur : représentation des RPC

Visualisation de l'erreur  $x - rpc(rpc^{-1}(x))$  pour les images New York et Giza



# Sources d'erreur : représentation des RPC

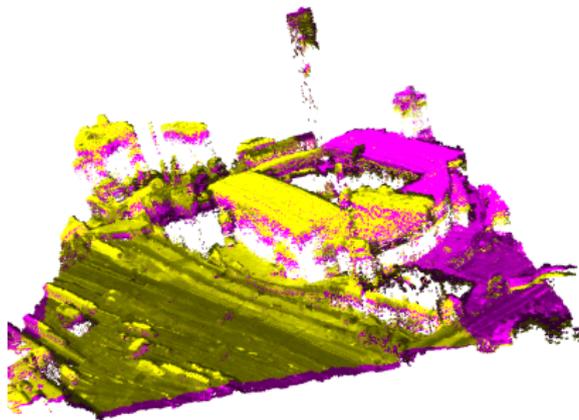
Visualisation de l'erreur  $x - rpc(rpc^{-1}(x))$  pour les images New York et Giza



## Sources d'erreur : erreur de pointage des RPC



petite erreur épipolaire

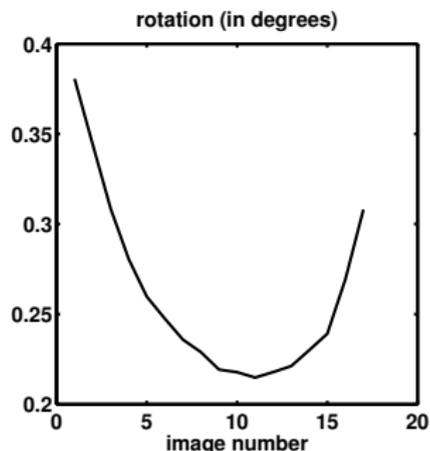
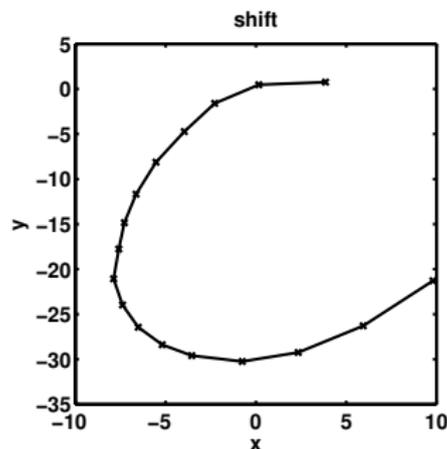


nuages de points légèrement décalés

# 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.



# Mise en ligne des images et méthodes

## Parties de la chaîne déjà en ligne

- ▶ Rectification Loop-Zhang
- ▶ *Block-matching* et ses filtres de rejet
- ▶ Plusieurs méthodes de flot optique (y comprenant l'interpolation)

## Parties de la chaîne pas encore en ligne

- ▶ Vraies données Pléiades
- ▶ Méthodes qui agissent sur les RPC  
(e.g. toute conversion à nuages de points)
- ▶ Fusion et filtrage des nuages de points
- ▶ Critères publics d'évaluation des résultats sur les images Pléiades

...s'il vous plaît :

1. Envoyez-nous plusieurs séquences, notamment multi-temporelles
2. Laissez-nous mettre ces données en ligne