Numérisation Conjointe Image-Laser pour la Modélisation 3D des Environnements Complexes

Daniela Craciun

Soutenance de thèse

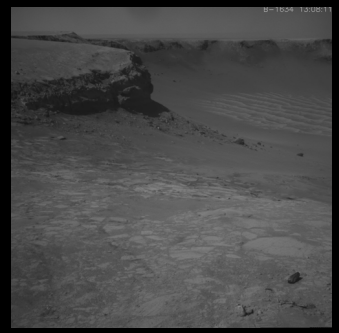
Environnements Complexes

- Difficile d'accéder

Grotte ornée Mayenne Sciences [IGN-ESGT 05]

- Parties cachées

[N. Garcia et al. 00]

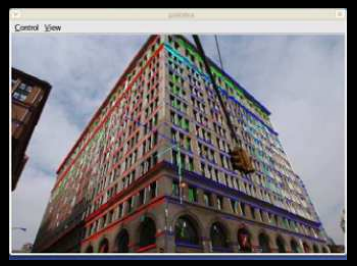


NASA© - JPL

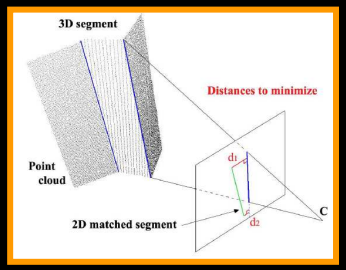
- Texture homogène

- Non-structurés

en opposition



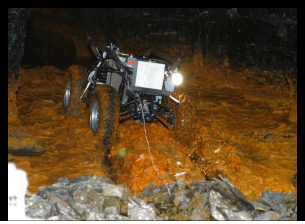
[I. Stamos et al.08]



[M. Deveau et al. 06]

- Capteurs navigation non-exploitable

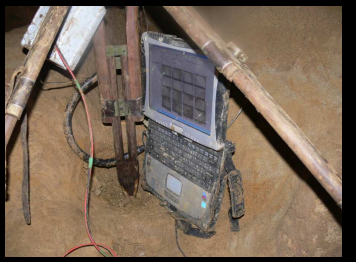
(GPS, odomètre)



[Backer et al. 06]

Contexte IGN: Traitement *in-situ* & Complétude

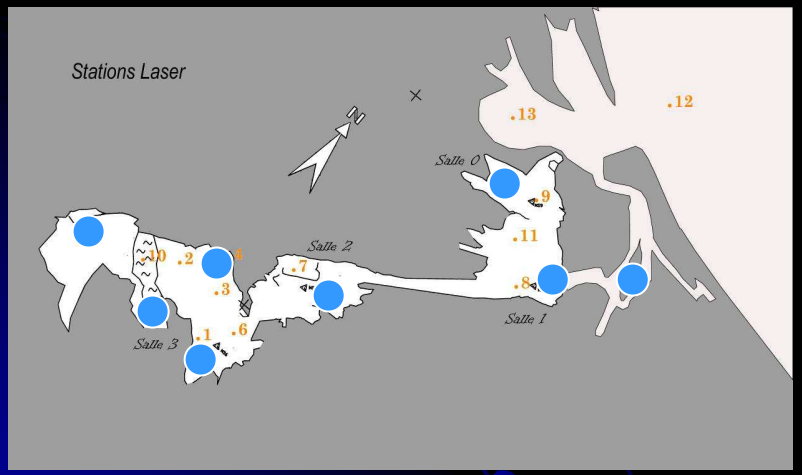
Numérisation des édifices remarquables: grotte ornée Mayenne-Sciences [IGN-MATIS 09]



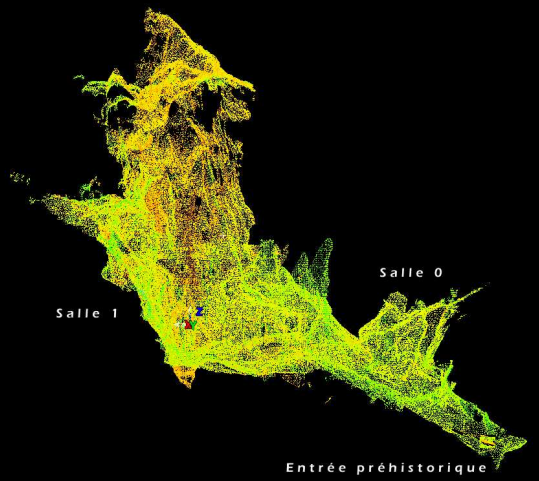
➔ mise en géométrie automatique des données image-laser *in-situ*

➔ guidage de l'acquisition ➔numérisation active [E. Dunn 09] (Next Best View – NBV)

➔ modèle numérique complet du site



Plan de la grotte Mayenne Sciences



Nuage des points [J. P. Papelard IGN-MATIS 09]

Fournir une aide in-situ pour la numérisation 3D photo-réaliste

- Patrimoine, études archéologiques & biologiques

[IGN-ESGT 05]

[Banno et al. 08]

- Maintenance des tunnels, mines

Groundhog [Backer et al. 04]

- Inspection sites sous-marins

[R. Garcia et al. ICRA01]

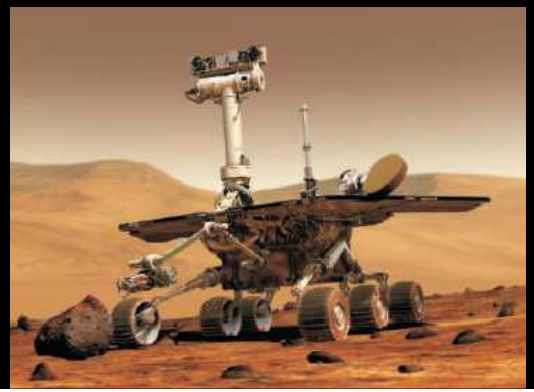
- Cartographie et études géophysiques

Spirit

Geologist

Robot

[Johnson et al. 07]



Problématique

Comment un système hybride image-laser peut aider à générer *in-situ* des modèles 3D précis, photoréalistes et exhaustifs dans les environnements complexes?

Plan

- La modélisation 3D *in-situ*
- Technologies de numérisation & choix des capteurs
- Etat de l'art: recalage des données image-laser
- Solution proposée
- Conclusions & Perspectives

Modélisation 3D Photoréaliste *in-situ*

- Digital Michelangelo Project [M. Levoy et al. 02]: modélisation 3D *in-situ*

•3D précise
•Photoréalisme
• Haute résolution

Problème ouvert:
• automatique (I)
• temps réel (II)

Recalage des données

[Surmann et al. JRAS03]

[M. Levoy et al. 02]

Acquisition

Visualiser

• télé-opéré
• autonome

Scène complète?

Planification de vue

Technologies de Numérisation & Reconstruction

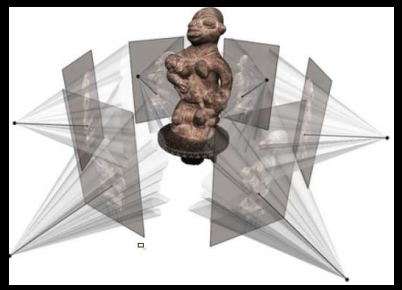
Rendu - Image

RGB
haute résolution

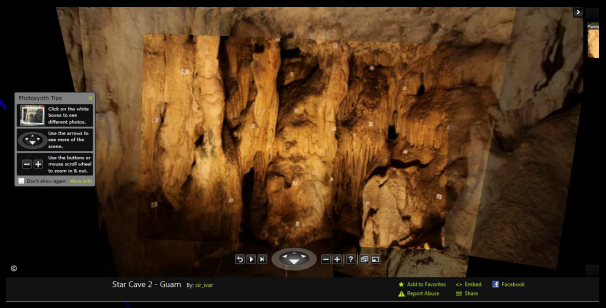
CGI: Computer Generated Imaging: Jurassic Park '90

3D Précise

Passive



[C. Hernàndez et al. PAMI07]



Photosynth® - Star Cave

Active

GX 3D scanner
Trimble®

MESA
SwissRanger®

ScanStation C1

Leica

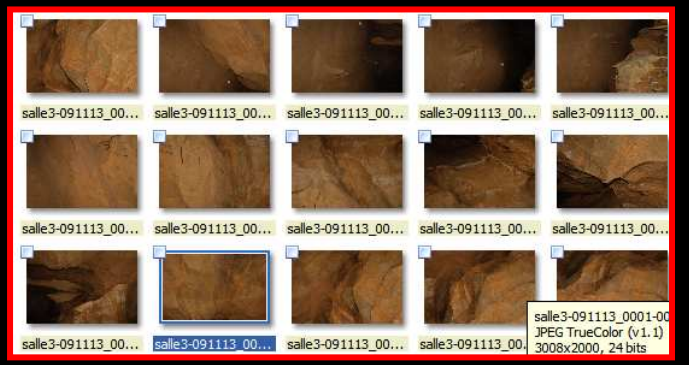
•longue portée
•3D haute résolution

Complémentarité Image-Laser

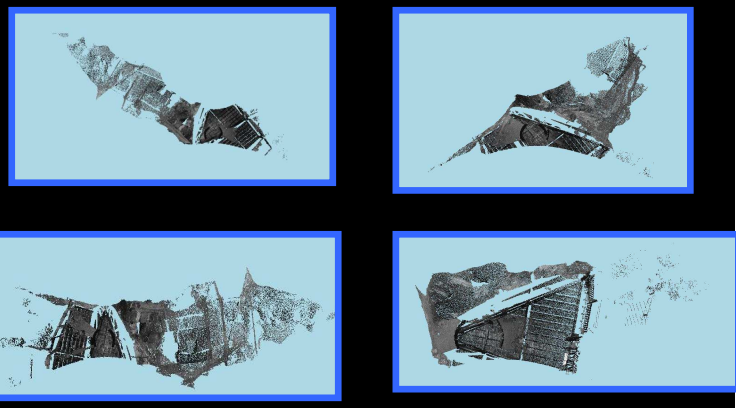
	Laser 3D	Image Couleur
acquisition	longue	instantanée
couleur haute résolution	intensité noir & blanc	Couleur HR
3D haute résolution	Pas besoin de texture & direct	Zones texturées + indirecte
éclairage	indépendant	dépendant

[P. Dias et al. 3DIM03]

Images RGB très haute résolution (photoréalisme)

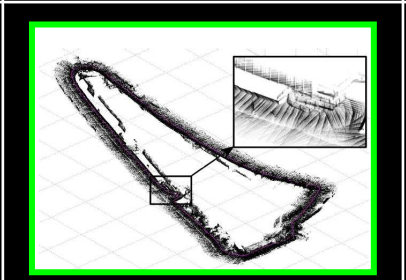
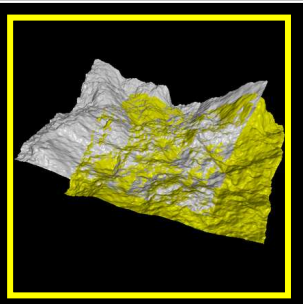
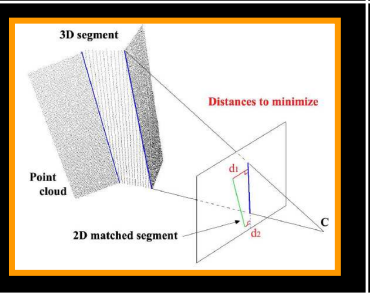
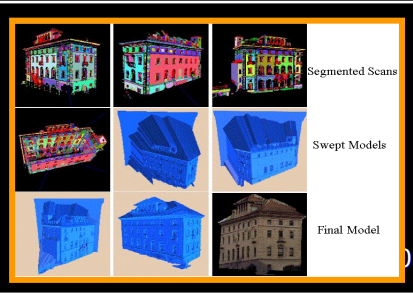


Nuage de points 3D basse résolution



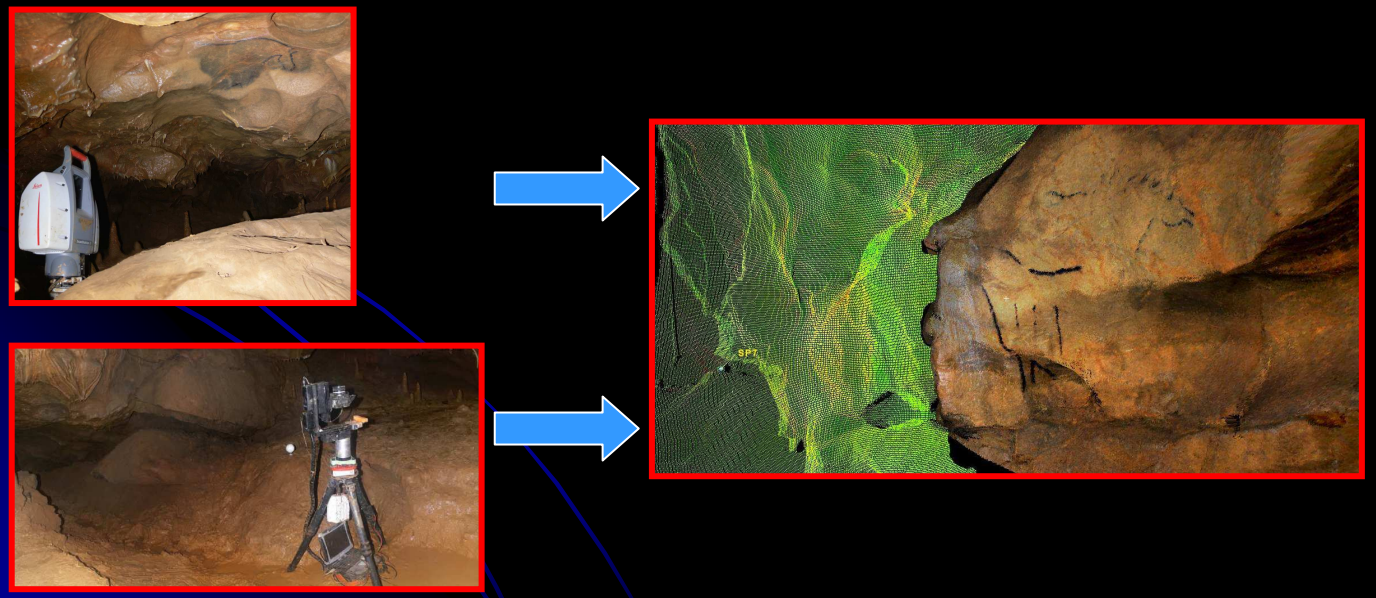
Réduire le stationnement in-situ

Méthodes de Recalage Image - 3D

Recalage Image - 3D	3D passif - laser	Intensité – reflectance laser	3D-3D
GROSSIER	GPS/INS [Zhao et Nister 05] odometrie [D. Cole et al. 06] Calibrage [Ikeuchi et al. 07]		Descripteur de forme [A. Johnson 97] [D. Huber 02]
FIN	Iteratively Closest Point [Besl & McKay 92] Normal Distribution Transform [Magnusson & Ducket 07] Levenberg-Marquardt	Entropie, primitives saillantes [D. Cole et al. 06] Contours [Banno et al. 08]	
Automatique (grossier + fin)	Primitives géométriques, radiométriques [Stamos IJCV 08] [Deveau ISPRS06]		

Positionnement Capteurs

Sommets camera/laser	Différents	Attachés
Recalage & texturation Image-laser	Sensible aux occultations [Stamos et al. IJCV08] [Devaux et al. ISPRS06]	Eliminer les données manquantes entre les données image et/ou laser. [Miro & Dissanayake 2008]



Nuage des points partialement texturé [J. P. Papelard IGN-MATIS 09]

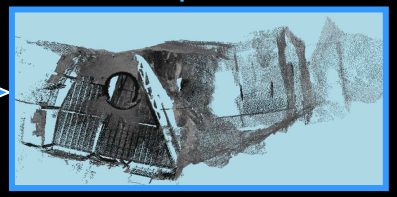
[Miro & Dissanayake, 2008]

Mosaiquage 4D & Complétude

N scans

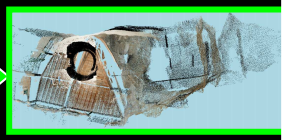
Recalage Automatique Scans Laser [R, dt]

Mosaique 3D



Recalage Image-Laser (2D-3D)

Mosaique 4D



(R,G,B, profondeur)

[R, dt] non-calibrées

M HR RGB Images

Recalage Automatique Images (2D-2D) [R, dt]

Mosaique 2D-RGB

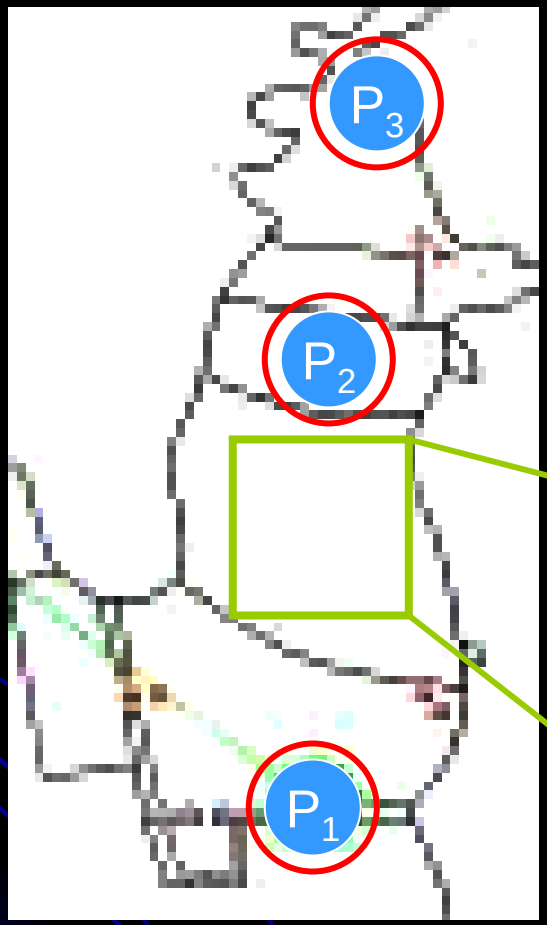
Traitement pour chaque pose 3D du système

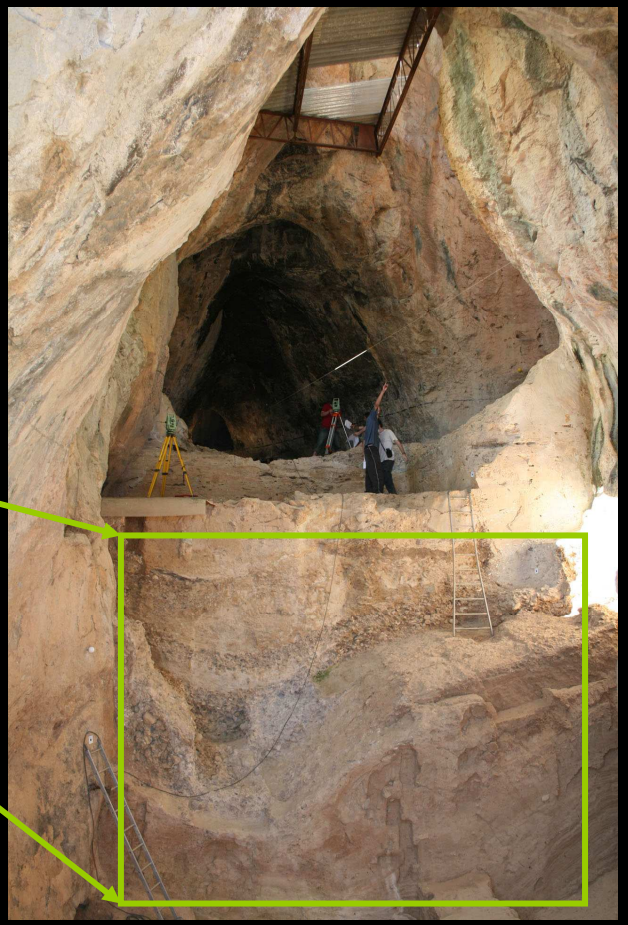
Complétude du site

Modèle final

Acquisition données Tautavel

[IGN/MATIS – ENSG 07]

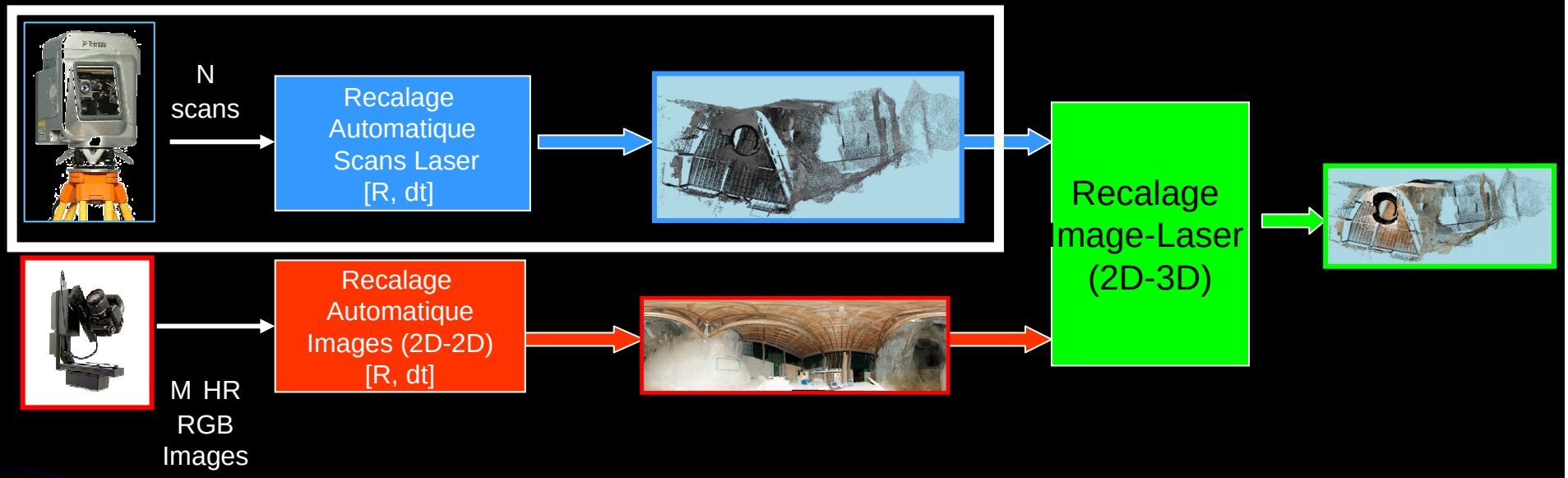




Carte grotte Tautavel

Coupe horizontale

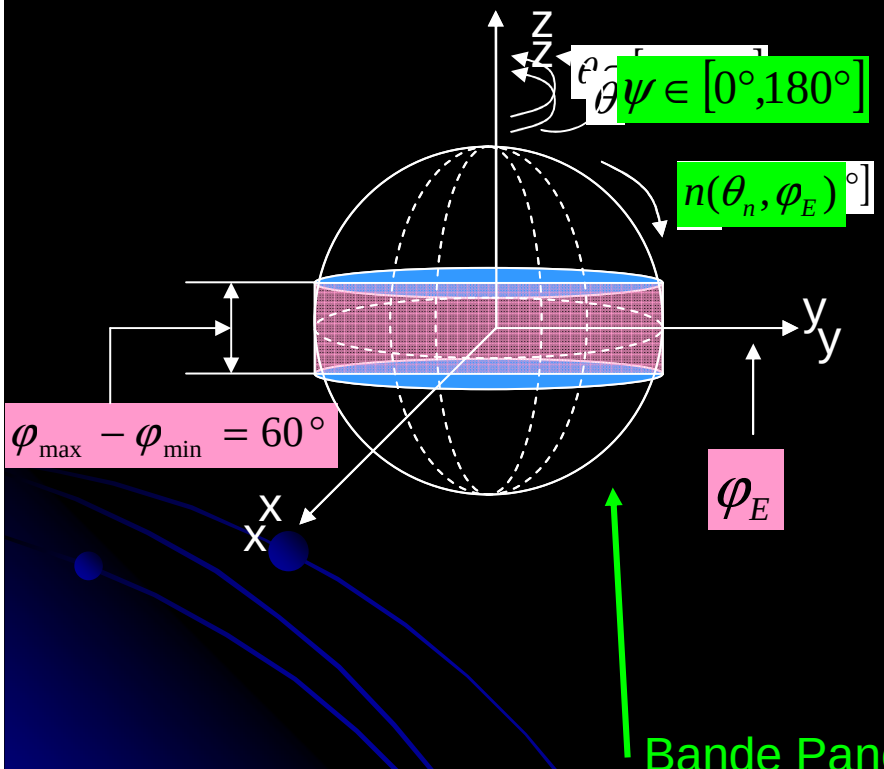
Architecture du Système



Scénario d'acquisition

Géométrie acquisition standard

Géométrie acquisition sur équerre

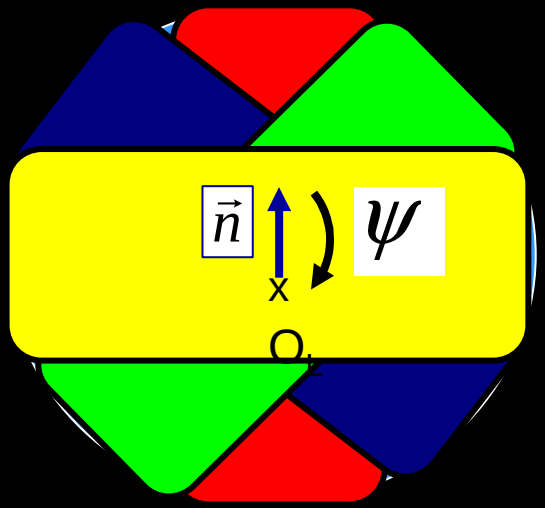


Montage sur équerre

Bande Panoramique Verticale (BPV)

3D-3D

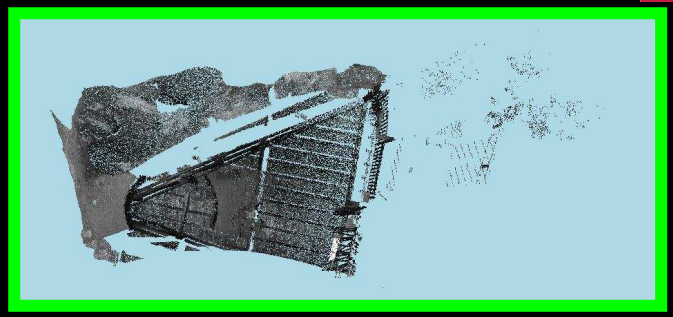
Grotte Préhistorique Tautavel



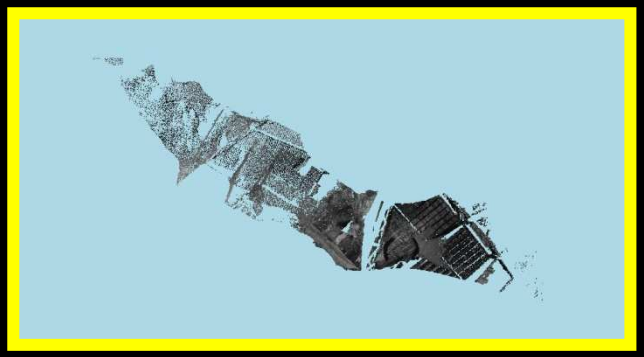
[R, dt]

Vue de dessus

BPV 2

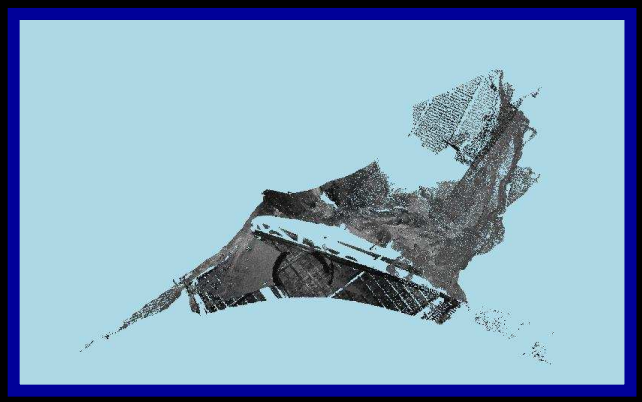


BPV 3



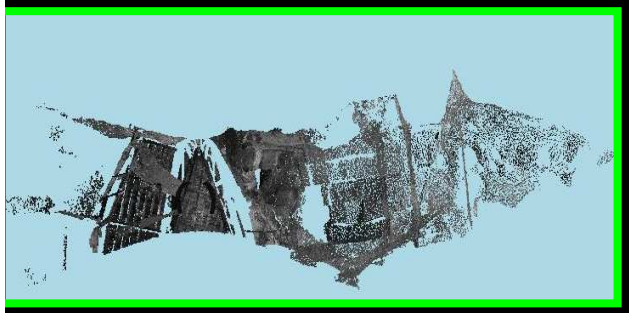
BPV 1

BPV 4



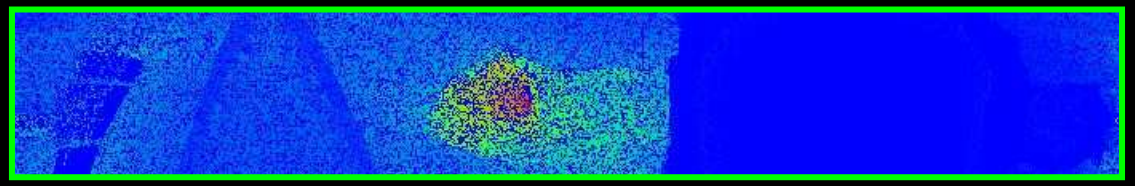
+ recouvrement constant et minimal (12%) à l'équateur et maximal aux pôles (33%).

Passage Nuage de Points ➔ Panoramiques 2D

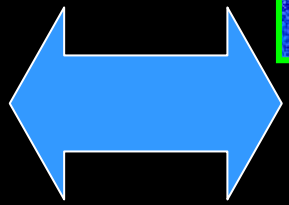


Scan de référence: S_1

BPV Réflectance

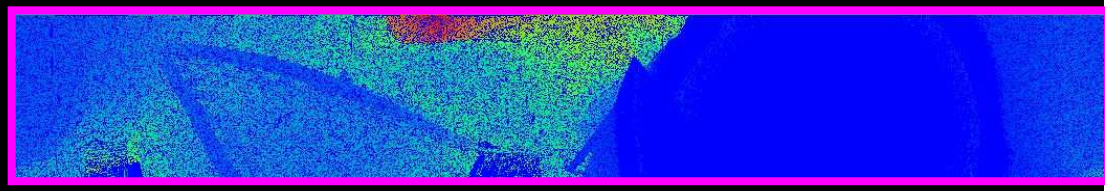


BPV Profondeur



Scan à recaler: S_2

BPV Réflectance



BPV Profondeur

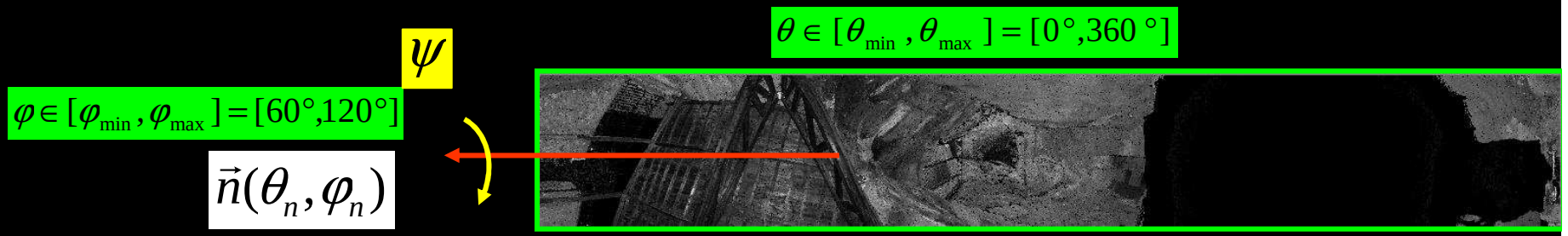
points: 645630

Résolution: 2083 x 310

Estimation hybride & multi-résolution

Multi-résolution ➔ parallaxe négligeable

- Rotation $(\psi, \vec{n})$ ➔ géométrie sphérique capteur (2D)



BPV Intensité

Par construction: $\varphi_n = \varphi_E = 90°$

Espace de solutions 2D

$\theta_n \in [0°, 180°]$

$\psi \in [0°, 180°]$

- $dt_{3x1:}$ approche barycentrique (3D)

Calcul Rotation: 2D – Mode Intensité

Modèle I_1

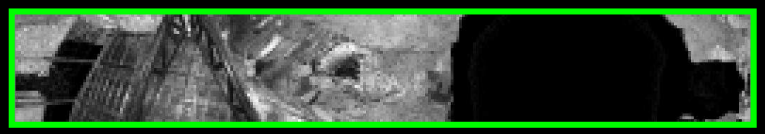
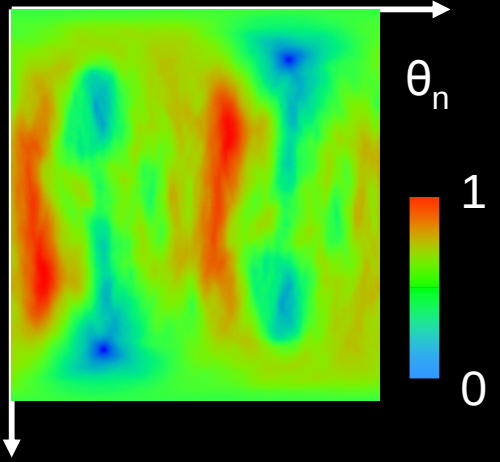


Image I_2

R( )

La moyenne des différences absolues

(MAD)



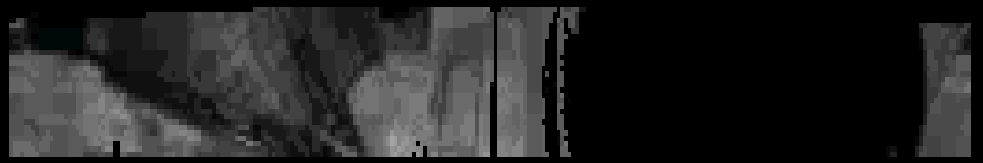


Image I_2 interpolée dans la géométrie de l'image I_1

$$\operatorname{argmin} E(q) = \frac{1}{255 N_{12}} \sum_{i=0}^{N_2-1} \Phi_i \left| I_1(u_i) - \hat{I}_1[u_2; q] \right|$$

Pénaliser les pixels nuls / sortant de l'image

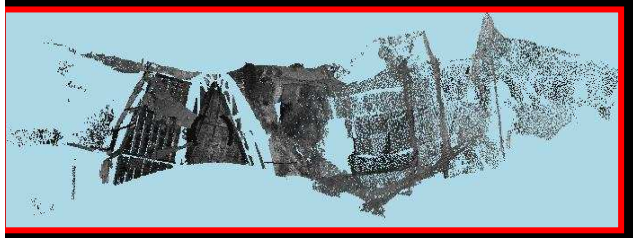
$$\hat{\dot{q}} = \arg\min_{(\psi,n)\in P_{SA}} E(\dot{q})$$

I_2 interpolée dans la géométrie de I_1

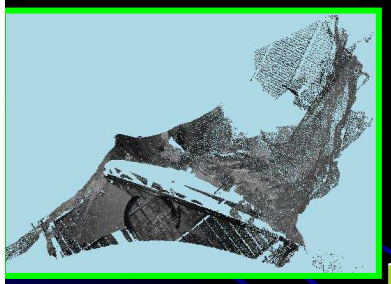
3D-3D

Estimation Rotation Multi-résolution
Mode Intensité

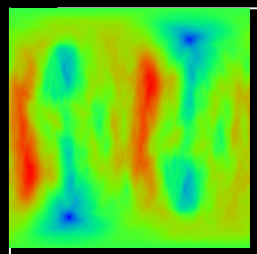
$1 pixel = 1°$

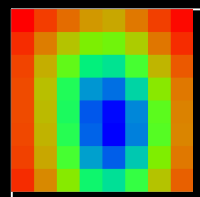


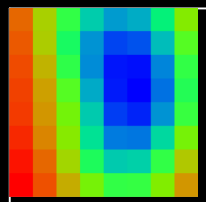
Scan S_1 – canal rouge

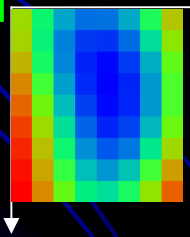


Scan S_2 - canal vert







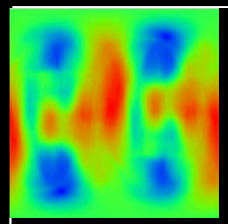


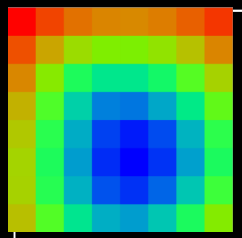
$l = 0 \rightarrow 0.0625° = \frac{1}{4} pixel$

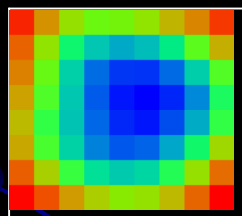
Calcul de translation

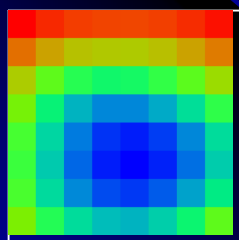
Estimation Rotation Multi-résolution
Mode Distance

1 pixel = 1°







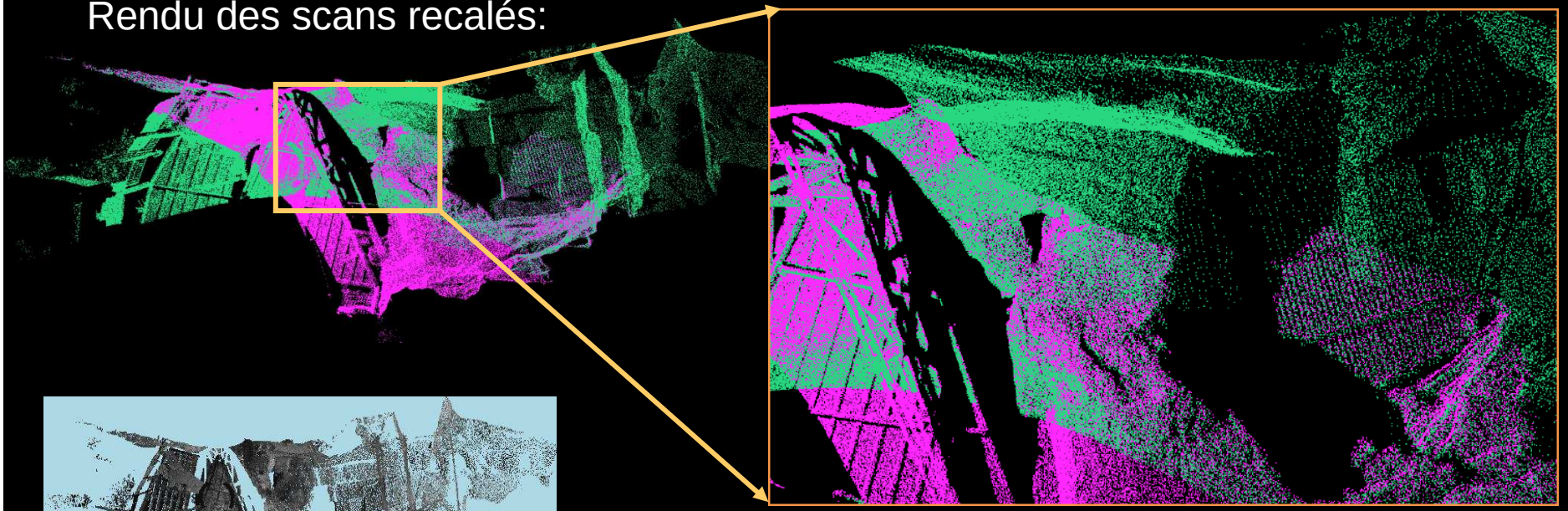


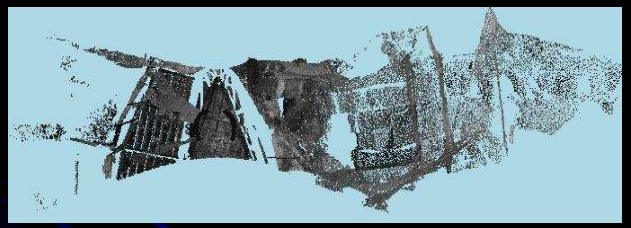
Résolution: 2083 x 310

3D-3D

Résultats d'un couple des scans recalés
Grotte préhistorique de Tautavel

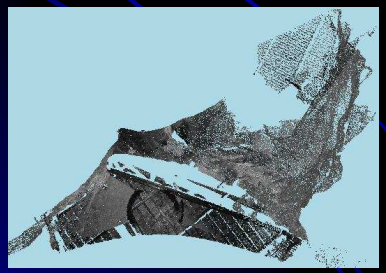
Rendu des scans recalés:



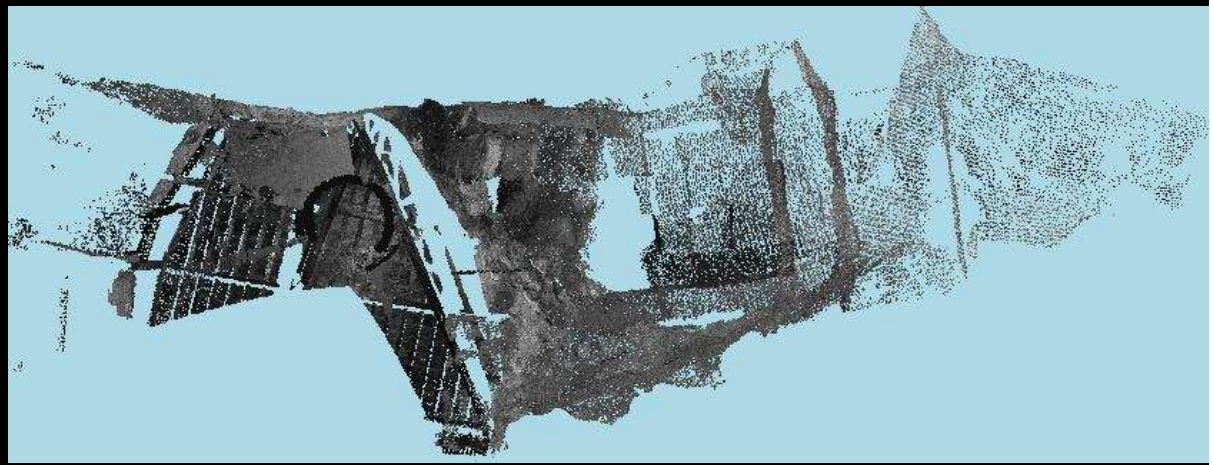


Rendu des scans recalés en utilisant l'intensité du laser

S_1 – scan de référence



S_2 – scan à recaler



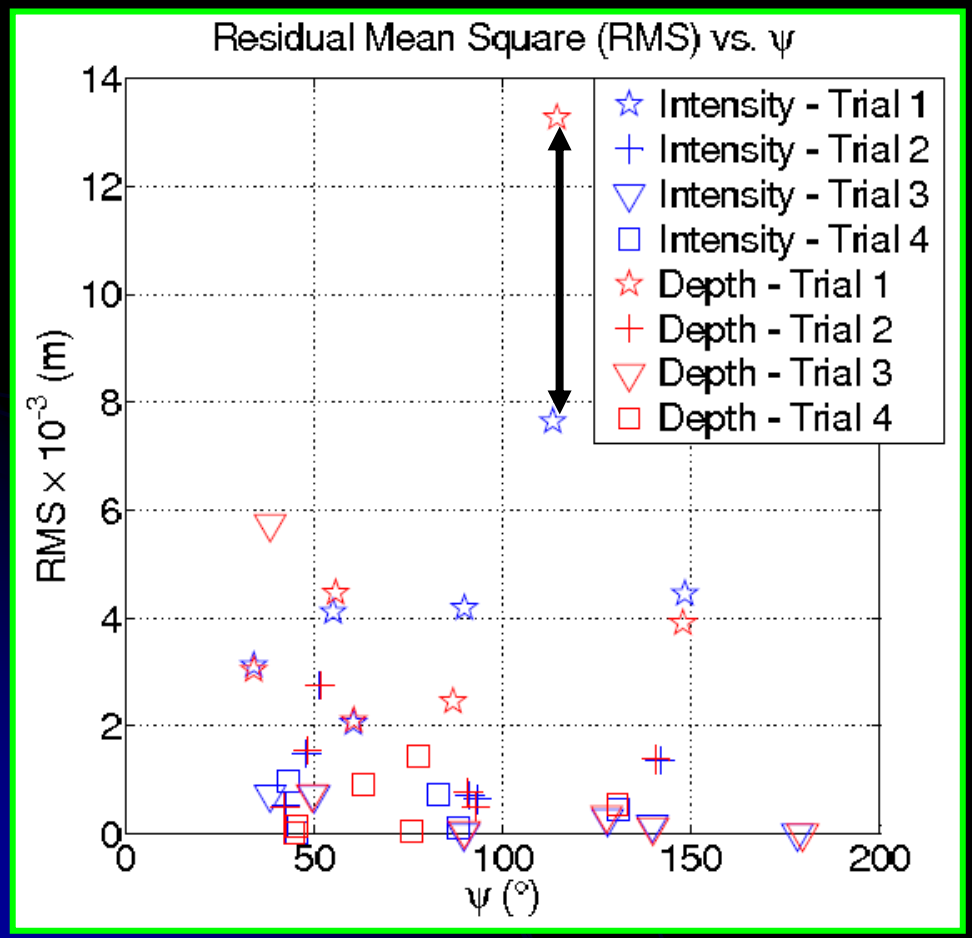
#points: $1.312 * 10^6$

Mode Intensité vs. Distance

Test 1: Moulin de Languenay, GS100 Trimble® (std 6mm @ 50m).

Test 2, 3, 4: Tautavel, GS200 Trimble® (std 1.5 mm @ 50 m).

- Chaque test: 4 scans ➔ 6 couples / test ➔ 24 couples



- **robustesse: intensité + profondeur**

$$E(I,D) = \alpha E_I + (1-\alpha) E_D$$

Environnement:
- texturé: intensité
- non-texturé: profondeur

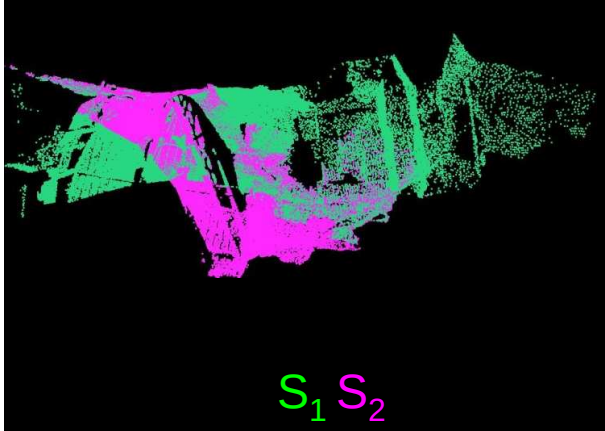
Application: intensité utilisée pour la suite du processus

- Problème ouvert: non-texturé + surfaces géométriques régulières

Recalage de plusieurs couple des scans

Test 2 – mode intensité: 4 scans ➔ 6 couples

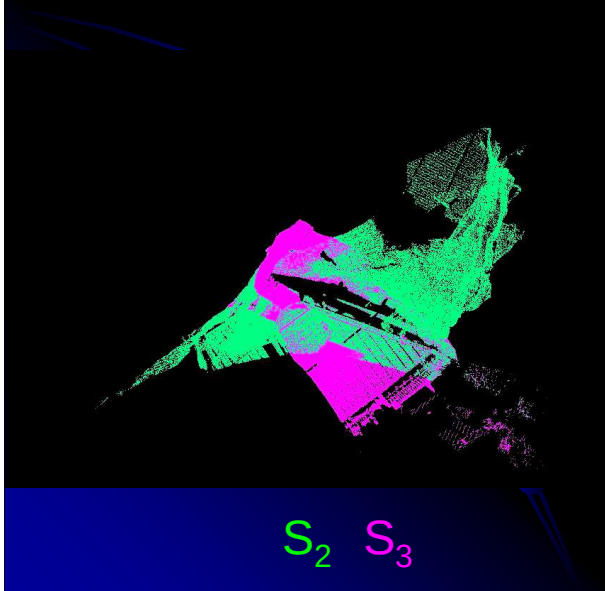
Recalage multi-vues dans une scène globale



S_1 S_2

S_1 S_3

S_1 S_4



S_2 S_3

S_2 S_4

S_3 S_4

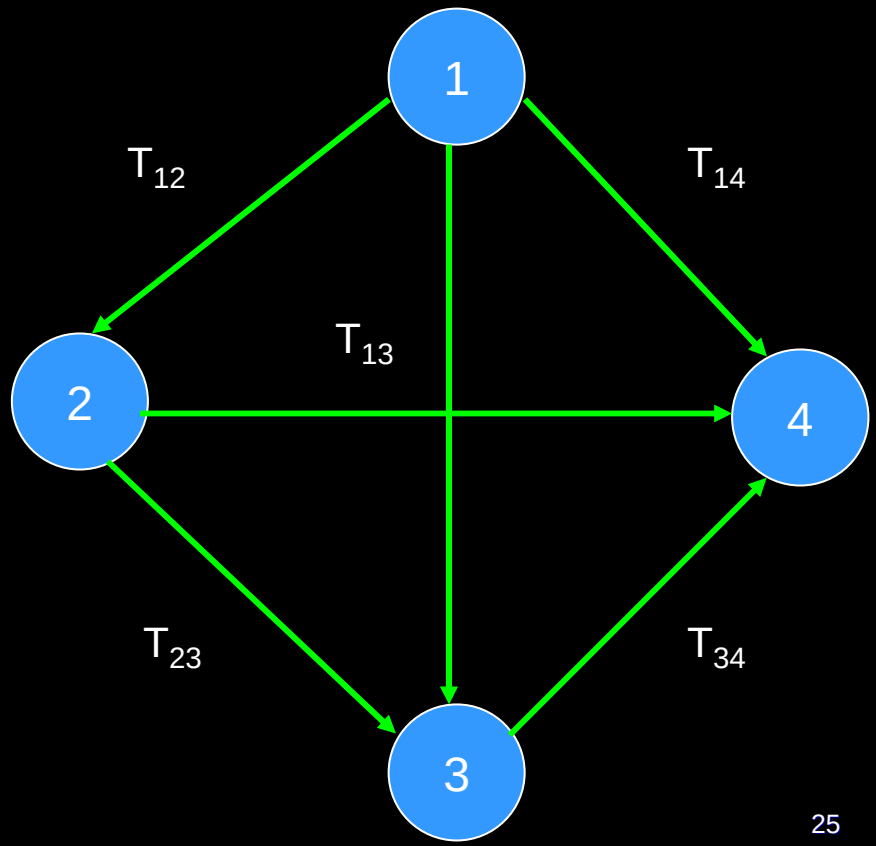
Recalage Multi-vues des Scans via l'Inférence Topologique

• graphe [D. Huber Ph. D. CMU02] $G = \{N, T_i, T_{ij}, \varepsilon\}$

•Inférence topologique (IT) [H. Sawhney et al. ECCV 98]: un graphe est consistant ssi la pose est indépendante du chemin utilisé pour son calcul.

$$T_{ik}^{TI} = T_{i,i+1} \circ \ldots T_{j-1,j} \circ T_{j,j+1} \circ \ldots \circ T_{k-1,k}$$

•Vérifier la consistance globale & corriger les poses en minimisant le coût de chemin.



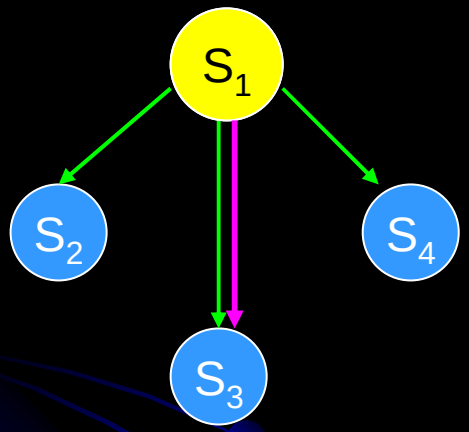
• arête e_{ij}: mesure qualité pose [D. Craciun et al. CRV08], binaire [D. Craciun et al. CVIU10].

$$E > E_{ik}^{IT} \Rightarrow \begin{cases} T_{ik} \leftarrow T_{ik}^{IT} \\ e_{ik} \leftarrow e_{ik}^{IT} \end{cases}$$

Recalage Multivues des Scans Laser

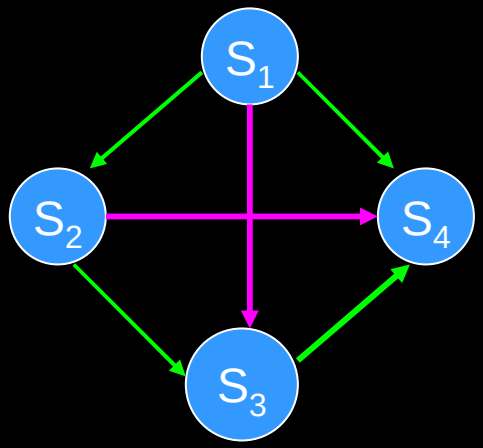
- Calcul des poses absolues

N scans ordonnés + S_{ref}



Corriger poses non-successives (#1) via IT.

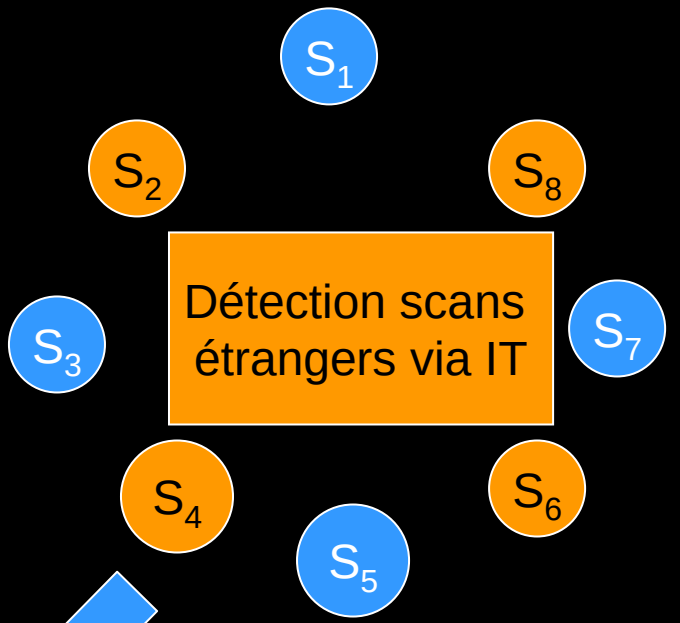
N scans non-ordonnés



•Corriger les poses via IT

•Détecter le scan optimal de référence S_{ref} en maximisant le recouvrement global / sphère

M stations de N scans non-ordonnés

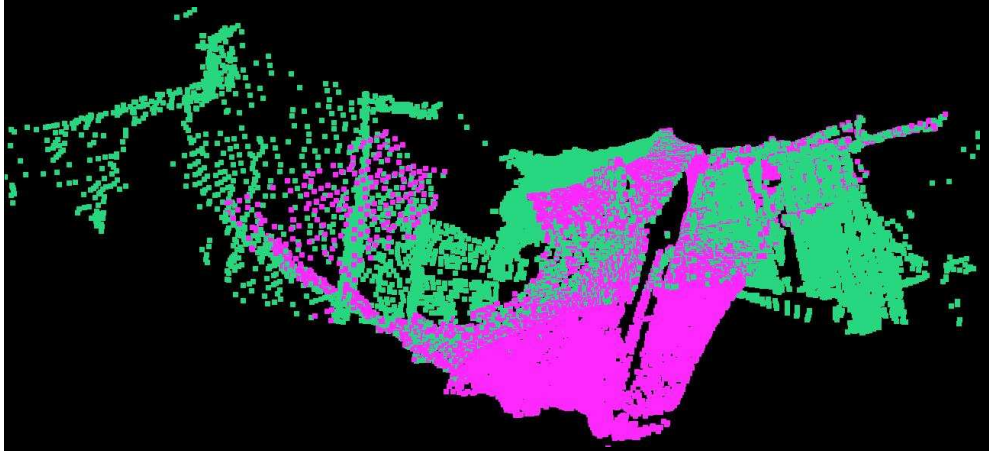


Station 1

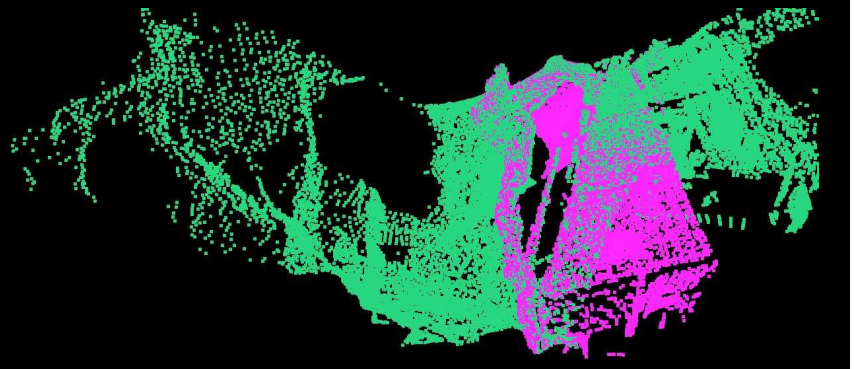
Station 2

3D-3D

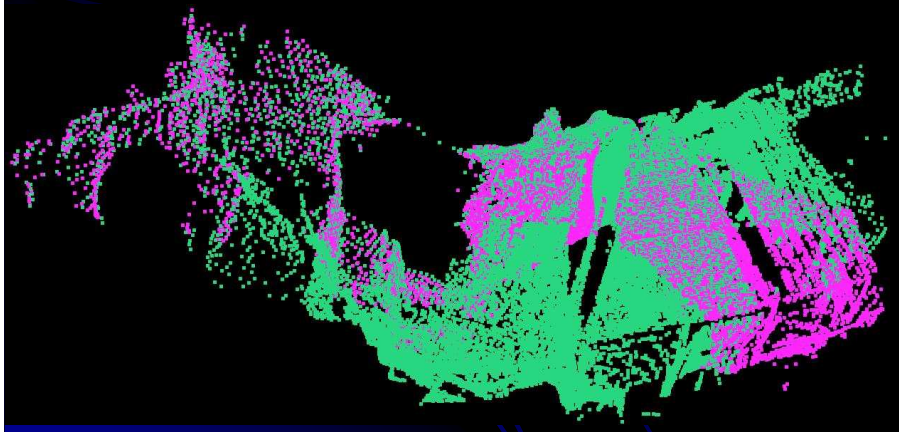
Recalage Multivues des Scan Laser
Grotte Préhistorique Tautavel



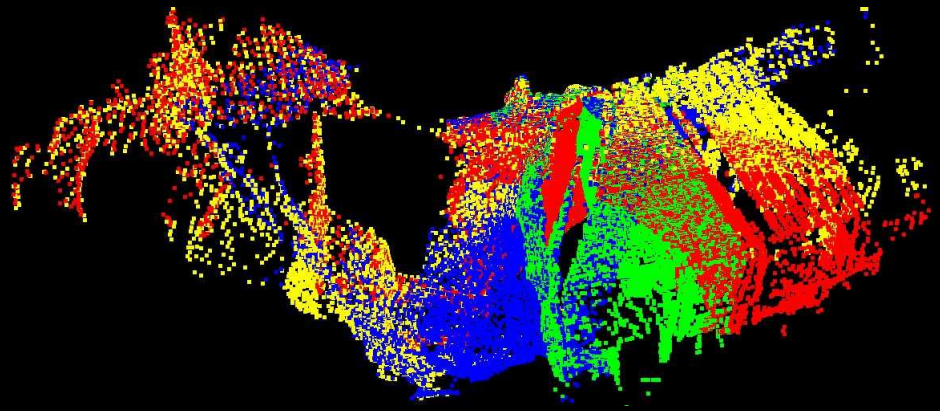
S_1- vert, S_2- magenta



S_{12}-vert, S_3- magenta



S_{123}- vert, S_4- magenta



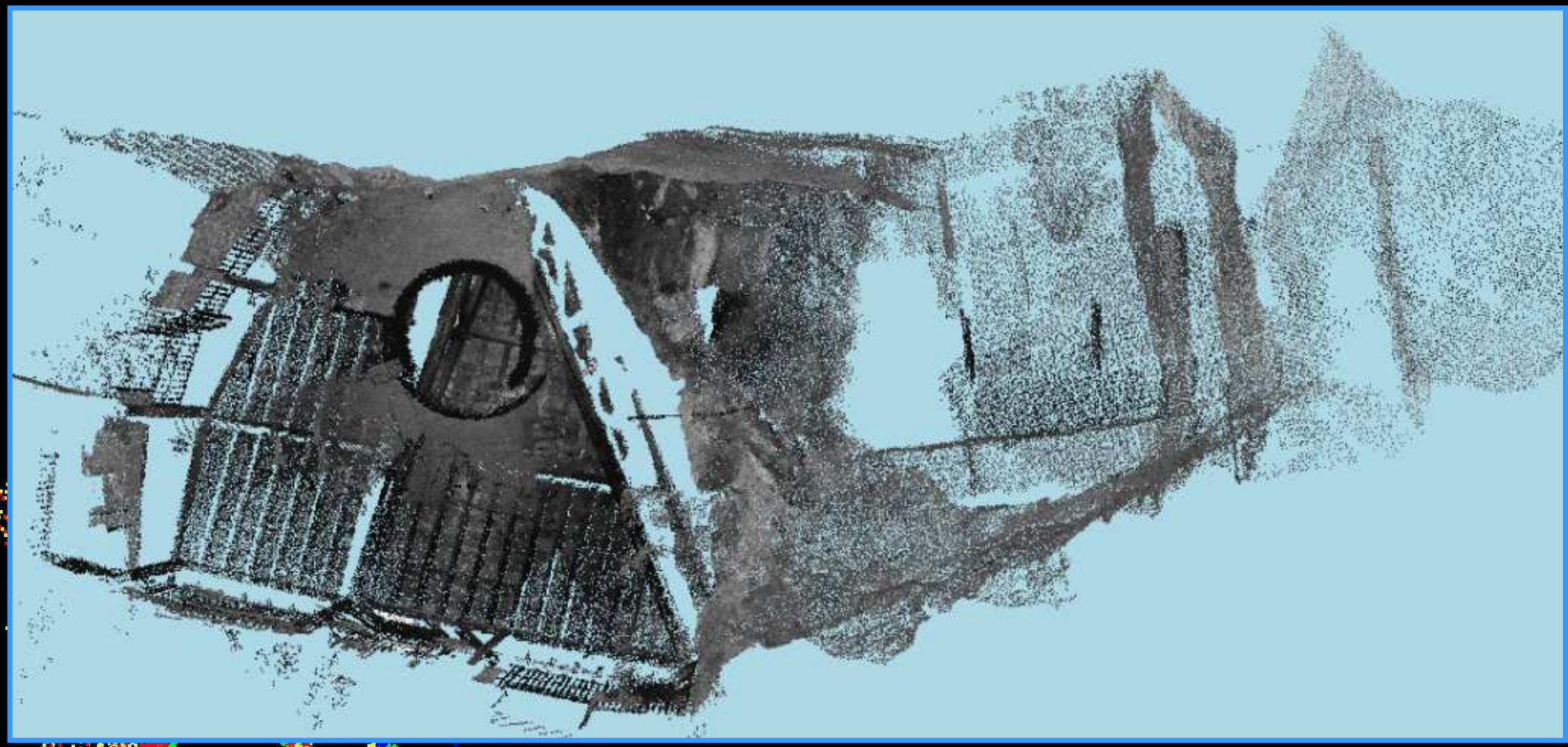
Recalage multi-vues des scans

S_1- jaune S_2-bleu

S_3- vert, S_4- rouge

3D-3D

Recalage Multivues des Scan Laser
Grotte Préhistorique Tautavel



Vue de dessous

points: 2.5829 x 10^6

Evaluation des Performances

Résultats de recalage multi-vues: laptop CPU @ 1.66 GHz, 2Gb RAM, Linux

Trial	Mode	$(\bar{r} \pm \sigma_{\bar{r}}) \times 10^{-3}$	$(\Delta\bar{r} \pm \Delta\sigma_{\bar{r}}) \times 10^{-3}$	♯points, CPU time (min)
Trial 1	Intensity	3.913 ± 15.86	0.782 ± 2.22	1.508×10^6
GS100	Depth	3.12 ± 13.64		16.44
Trial 2	Intensity	1.18 ± 16.14	0.051 ± 0.84	2.5829×10^6
GS200	Depth	3.12 ± 16.98		27.39
Trial 3	Intensity	0.332 ± 4.15	0.021 ± 0.154	2.6079×10^6
GS200	Depth	0.353 ± 4.304		27.66
Trial 4	Intensity	0.184 ± 1.249	0.007 ± 0.884	2.5321×10^6
GS200	Depth	0.191 ± 0.365		26.28

- Précision / capteur: 10^{-2}m
- Précision / mode de fonctionnement (intensité vs. distance): 10^{-2} m (précision capteur)

➔Acquisition (15 min / scan)

➔ Processus parallèle: acquisition + traitement / 3 cores [Craciun et al. CVIU10]

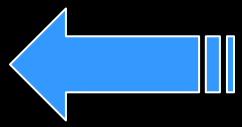
➔ Acquisition + rapide: camera pan-tilt de distance + algorithme de recalage proposé dans la section suivante.

Mosaiquage 3D in-situ

- Mouvement rigide (intensité et/ou la distance)
- recalage multi-vues via l'inférence topologique + graphe [D. Huber PhD02]

Améliorations possibles:

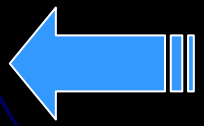
- Multi-vues non-rigide ➔ liste points homologues



Ajustement par faisceaux (profondeur + intensité laser)

Calcul des quaternions optimaux [R. Benjemàa & F. Schmitt ECCV98]

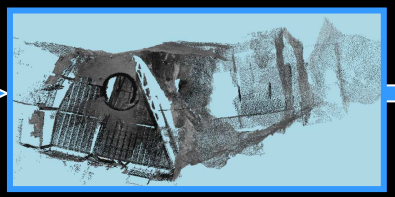
- Modèle 3D: photoréalisme



Architecture du Système

N scans

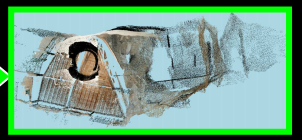
Recalage Automatique Scans Laser [R, dt]



M HR RGB Images

Recalage Automatique Images (2D-2D) [R, dt]

Recalage Image-Laser (2D-3D)



Panoramique Couleur: le système d'acquisition

Plateforme pan-tilt motorisée

Calibration hors-ligne

NIKON D70:

-FOV(H: 26.34°, V:17.73°)

- focale 50mm

- distorsions radiales corrigées R^7

- Images RGB HR 3000 x 2000

Paramétrage plateforme:

-champ de la mosaique: 360° x 180°

-nombre d'images

2D-2D

Panoramique couleur: données

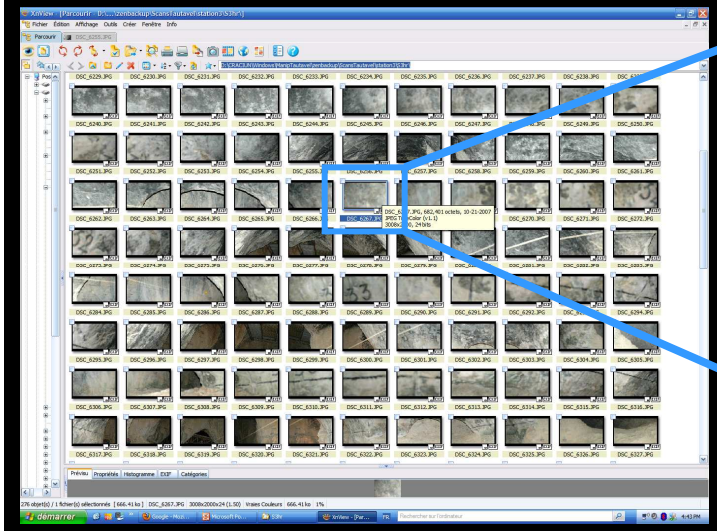


Image size: 3008 x 2000 (690 Ko)

273 images HR ordonnées

- 180° x 360° ➔ 1.2 Gpixels
- HR: longue focale ➔ flou près des parois
- flash, éclairage

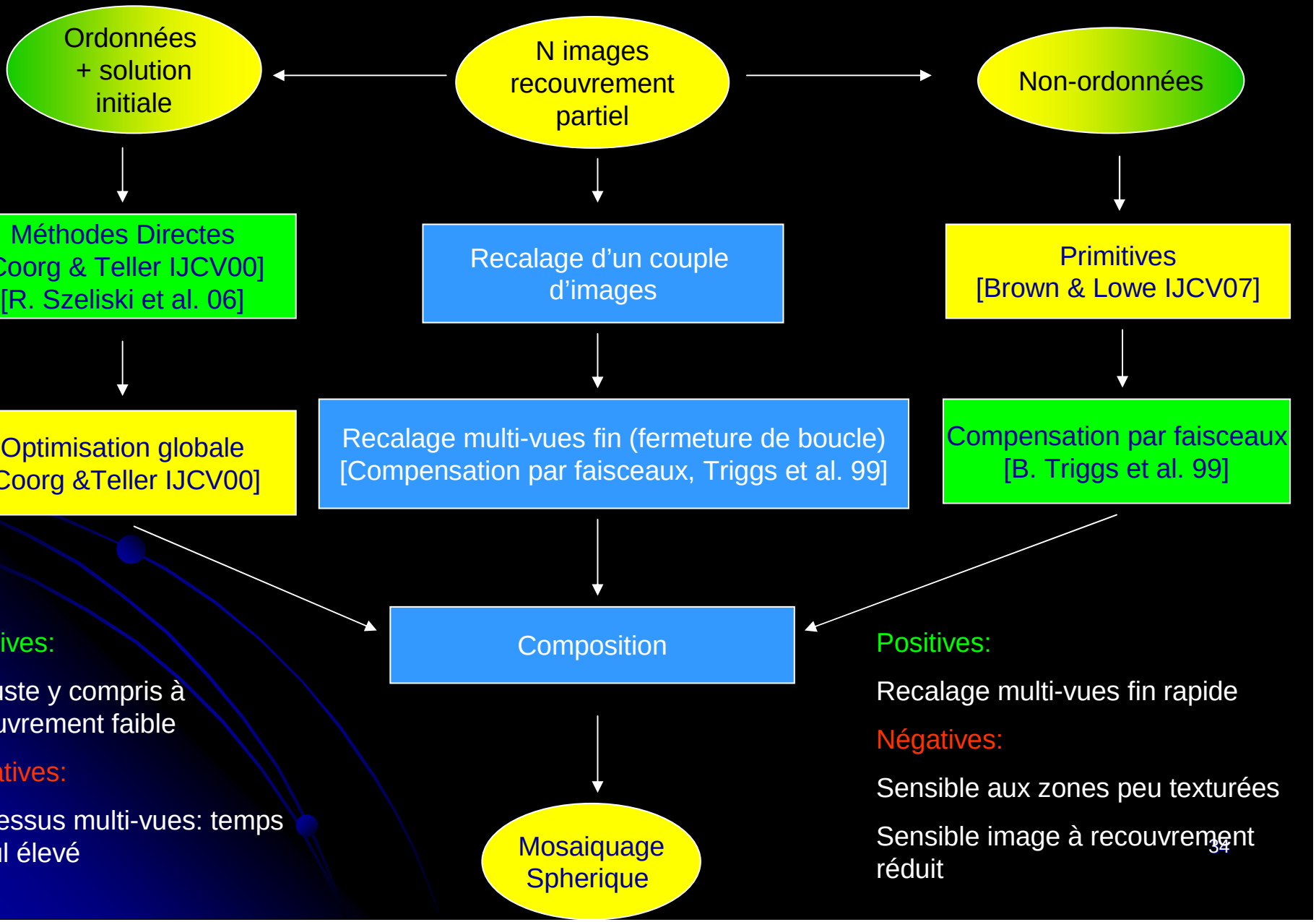
Recalage des données 2D

- parallaxe (point nodal != centre optique)

Grotte ornée Mayenne Sciences

2D-2D

Techniques de Mosaiquages Existantes



Positives:

Robuste y compris à recouvrement faible

Négatives:

Processus multi-vues: temps calcul élevé

Positives:

Recalage multi-vues fin rapide

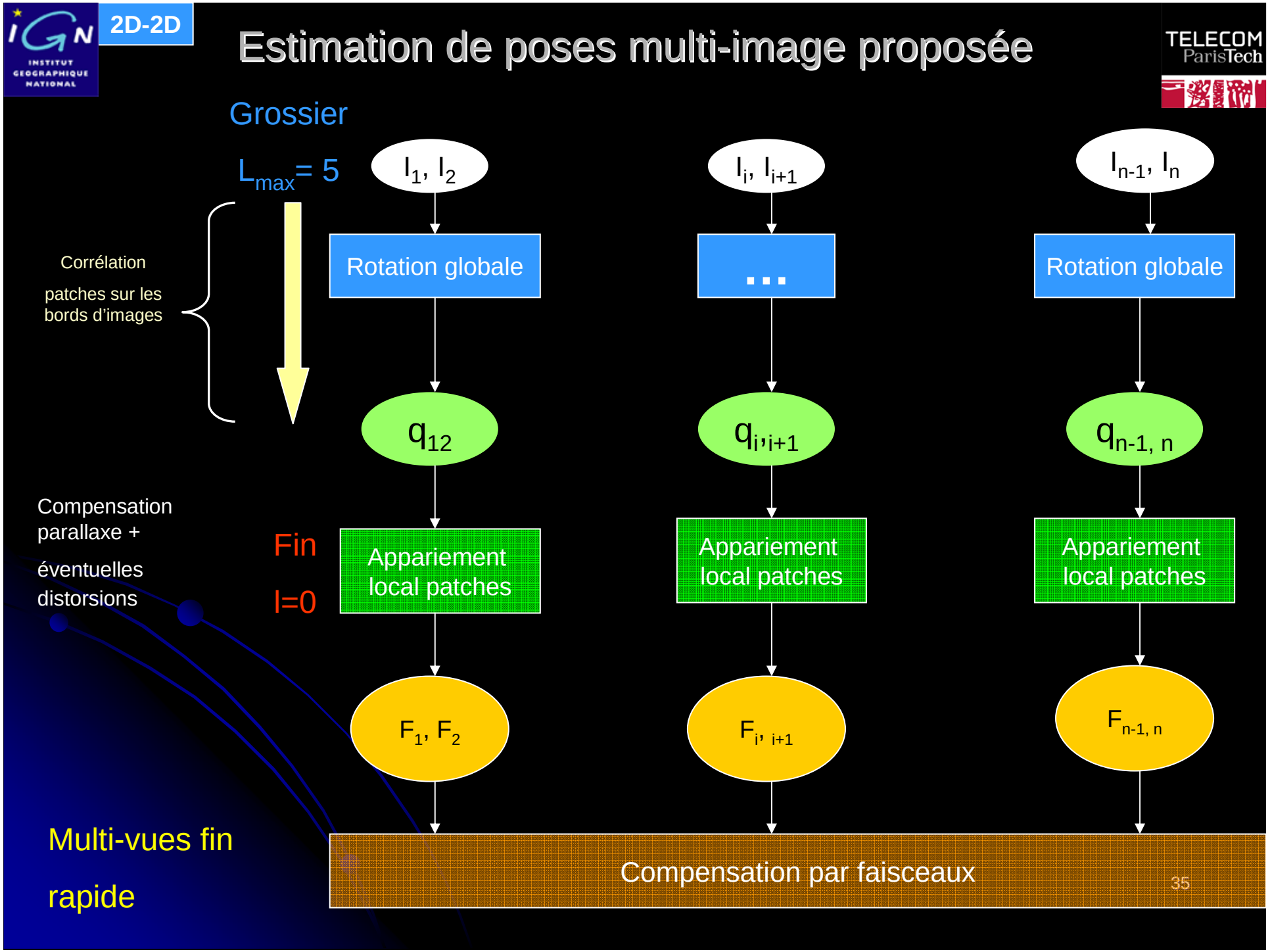
Négatives:

Sensible aux zones peu texturées

Sensible image à recouvrement réduit

2D-2D

Estimation de poses multi-image proposée



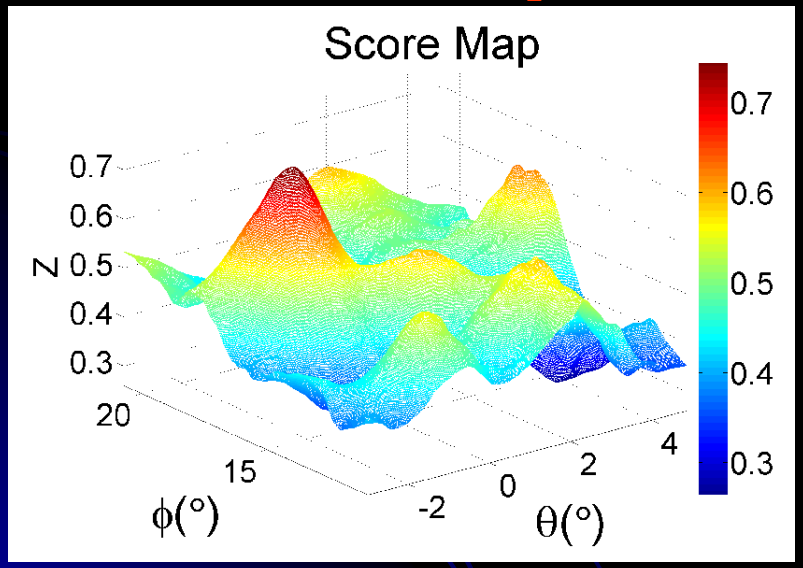
2D-2D

Mosaiquage couleur: recalage d'un couple d'images Rotation Globale

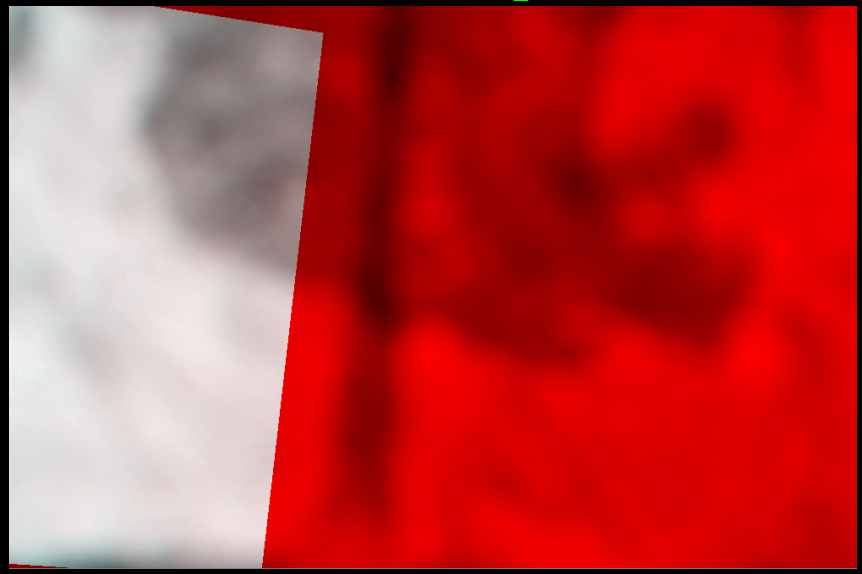
Origine: I_1

Image à recaler: I_2

- Autopano Pro: SIFT non-détectés



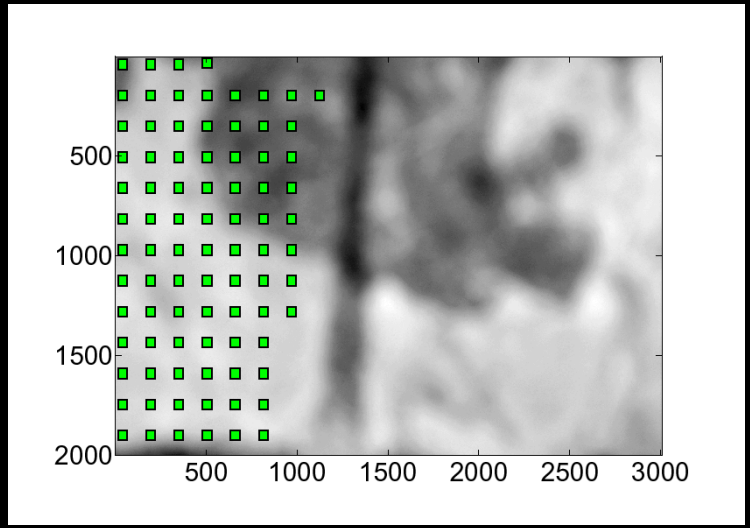
Localisation du ZNCC max (I_{max}=5)



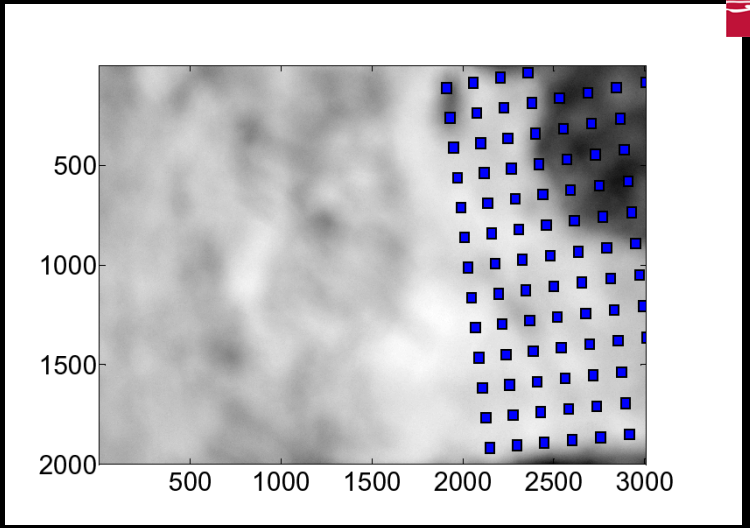
Superposition des images recalées I=0: I_2- rouge, I_{1est} –vert

2D-2D

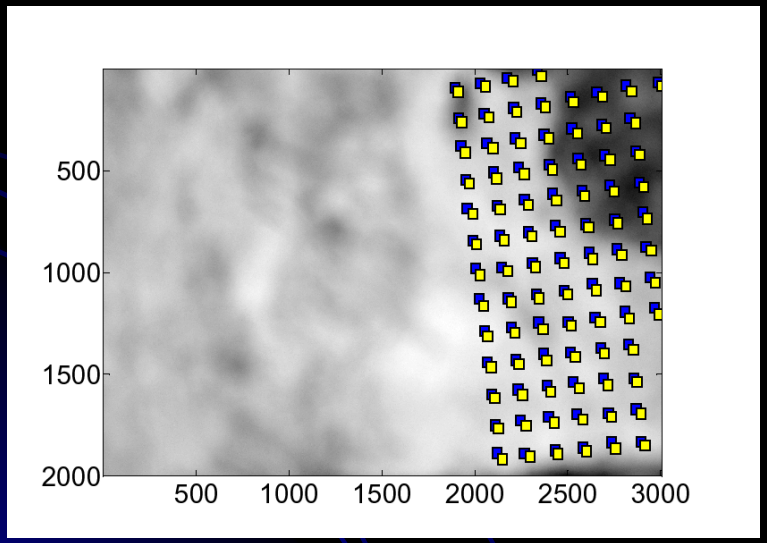
L⁰: Appariement local de patches



Extraction patches I_1

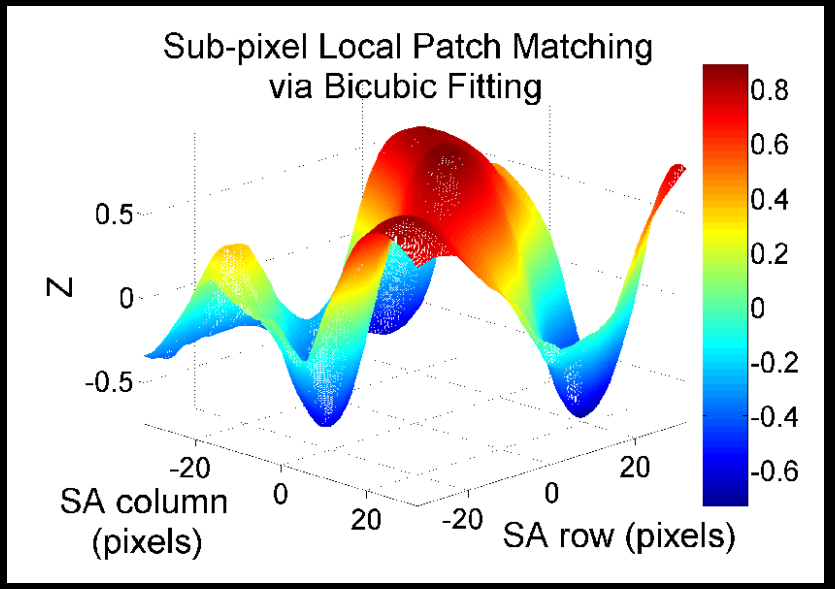


Hypothèses des patches I_2 [p_1;R]



85 appariements trouvés autour des hypothèses interpolées.

$$P(u_2^k) - bleu, P(\hat{u}_2^k) - jaune$$



Rayon de la zone de recherche = 32 pix

Précision: 0.05 pix

Recalage multi-vues fin

Patches homologues:

$$P(i,j) = \left\{ u_i^k \leftrightarrow \hat{u}_j^k \,\middle|\, u_i^k \in I_i, \hat{u}_j^k \in I_j, i \neq j \right\}$$

80 patches / image

↓

Compensation par faisceaux

Autopano Pro [Brown & Lowe IJCV07]

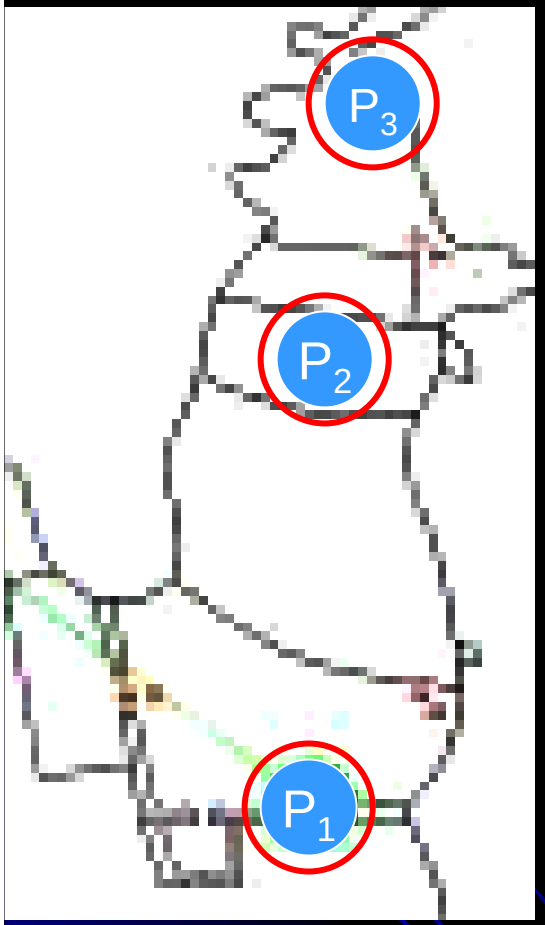
Erreur de reprojection 2D

$$e = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \in I(i)} \sum_{k \in P(i,j)} h(u_i^k - K \hat{R}_{ij}^T K^{-1} \hat{u}_j^k)$$

2D-2D

Recalage multi-vues fin
AutoPanoPro + patches homologues

Mosaique RGB 2D

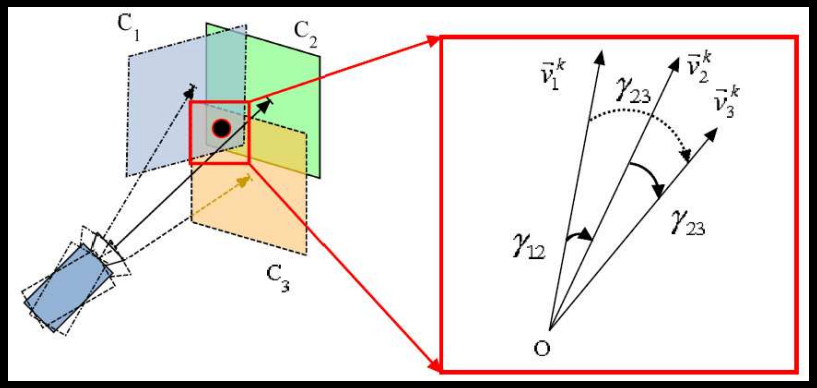


P_3: 42205 x 9915 (419 Mpix) (121 images)
FOV:360°x 84.58°
RMS: 3.10 pix
points homologues: 9680

P_2: 43206 x 12646 (546 Mpix) (168 images)
FOV: 360°x 105 .37°
RMS: 1.76 pix
points homologues: 13440

P_1: 43365 x 13057 (567 Mpix) – 273 images
FOV: 360°x 108.4°
RMS: 1.93
points homologues: 21840

Solution proposée non-expérimentée: Calcul des quaternions absolus et relatifs



- **solution pour un couple d'images**

$$Q_{ij-\times} = \min_q \sum_{k=0}^{N-1} \left\| v_i^k \times R(q) v_j^k \right\|^2$$

- Minimisation sous contrainte [R. Horaud & O. Monga 95]: solution directe quaternion optimal relatif

- Multi-vues: calcul des quaternions optimaux absolus et relatifs

$$Q_{mosaic-\times} = \sum_i^n \sum_{j,i<j}^n w_{ij} \sum_k \delta_{ij}^k \| \mathbf{v}_i^k \times \mathbf{R}\mathbf{v}_j^k \|^2$$

Adjacence I_i, I_j

visibilité points homologues

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{V}_{1n} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{V}_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{V}_{2n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{V}_{(n-1)n} \end{bmatrix}$$

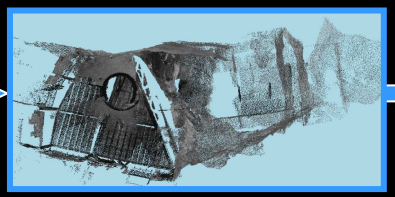
$$\begin{bmatrix} \mathbf{q}_{12} \\ \cdot \\ \mathbf{q}_{1n} \\ \mathbf{q}_{23} \\ \cdot \\ \mathbf{q}_{2n} \\ \cdot \\ \mathbf{q}_{(n-1)n} \end{bmatrix}$$

Itératif [R. Benjemàa & F. Schmitt ECCV98]: distance entre les points 3D correspondants

Architecture du Système

N scans

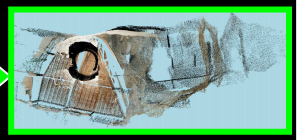
Recalage Automatique Scans Laser [R, dt]



M HR RGB Images

Recalage Automatique Images (2D-2D) [R, dt]

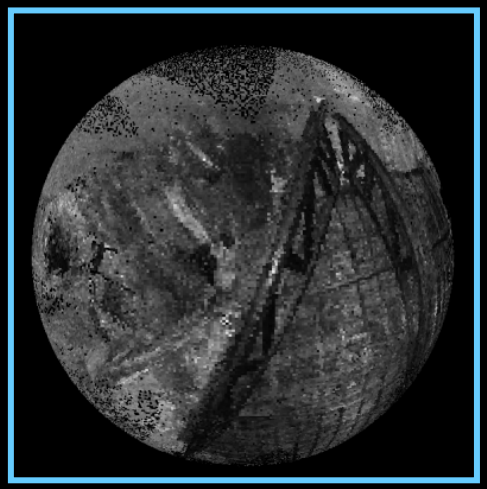
Recalage Image-Laser (2D-3D)



Recalage Image-Laser

Mosaique 3D: I_{BR}

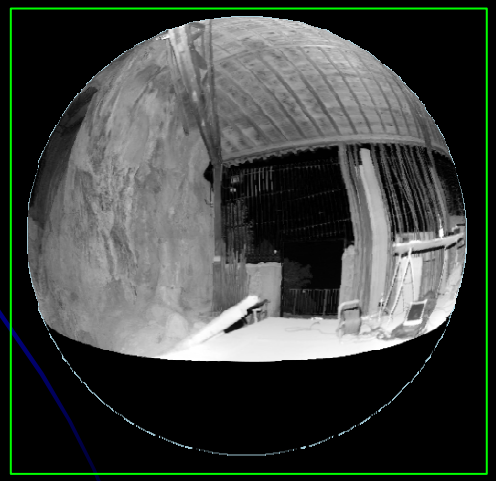
Mosaique réflectance : 2161 x 1276
FOV=[360°,180°]
Angular step =0.00299°x 0.00246°



3D

$$\begin{bmatrix} R_{3\times3} & dt_{3\times1} \\ 0_{1\times3} & 1 \end{bmatrix}$$

2D



Sur –échantillonnage

mosaique HR

I_{BR}, I_{HR}

Pyramidal

R(q) corrélation (laser) (patches)

Laser

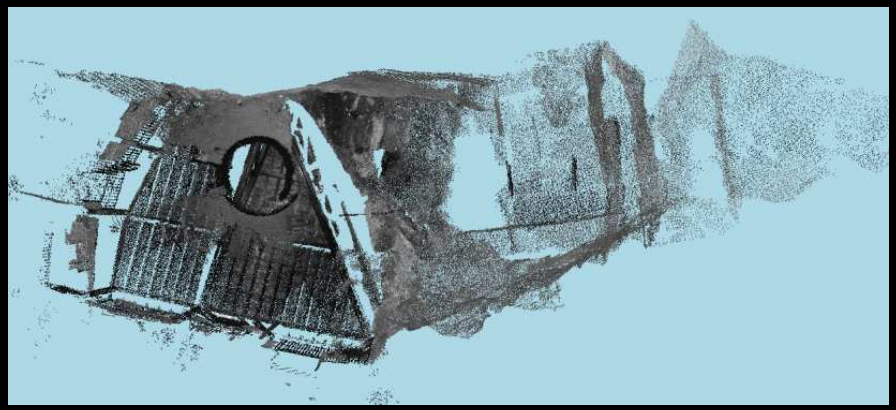
I=0: Appariement local des patches (parallaxe inter-capteurs)

Image

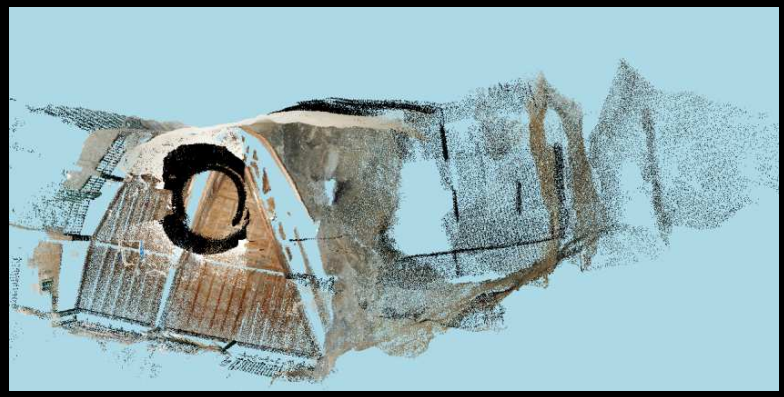
Mosaique 4D

Mosaique 4D: Texturation

Mosaiquage 3D + intensité laser



Mosaiquage 4D: 3D + RGB



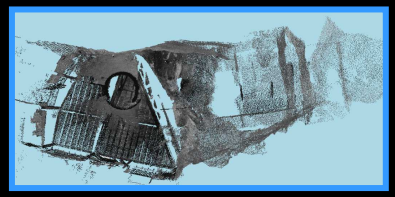
- Saisir la 3D

- dans l'image: topologie

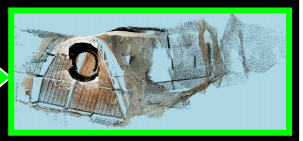
Mosaiquage 4D & Complétude

N scans

Recalage Automatique Scans Laser [R, dt]



Recalage Image-Laser (2D-3D)



M HR RGB Images

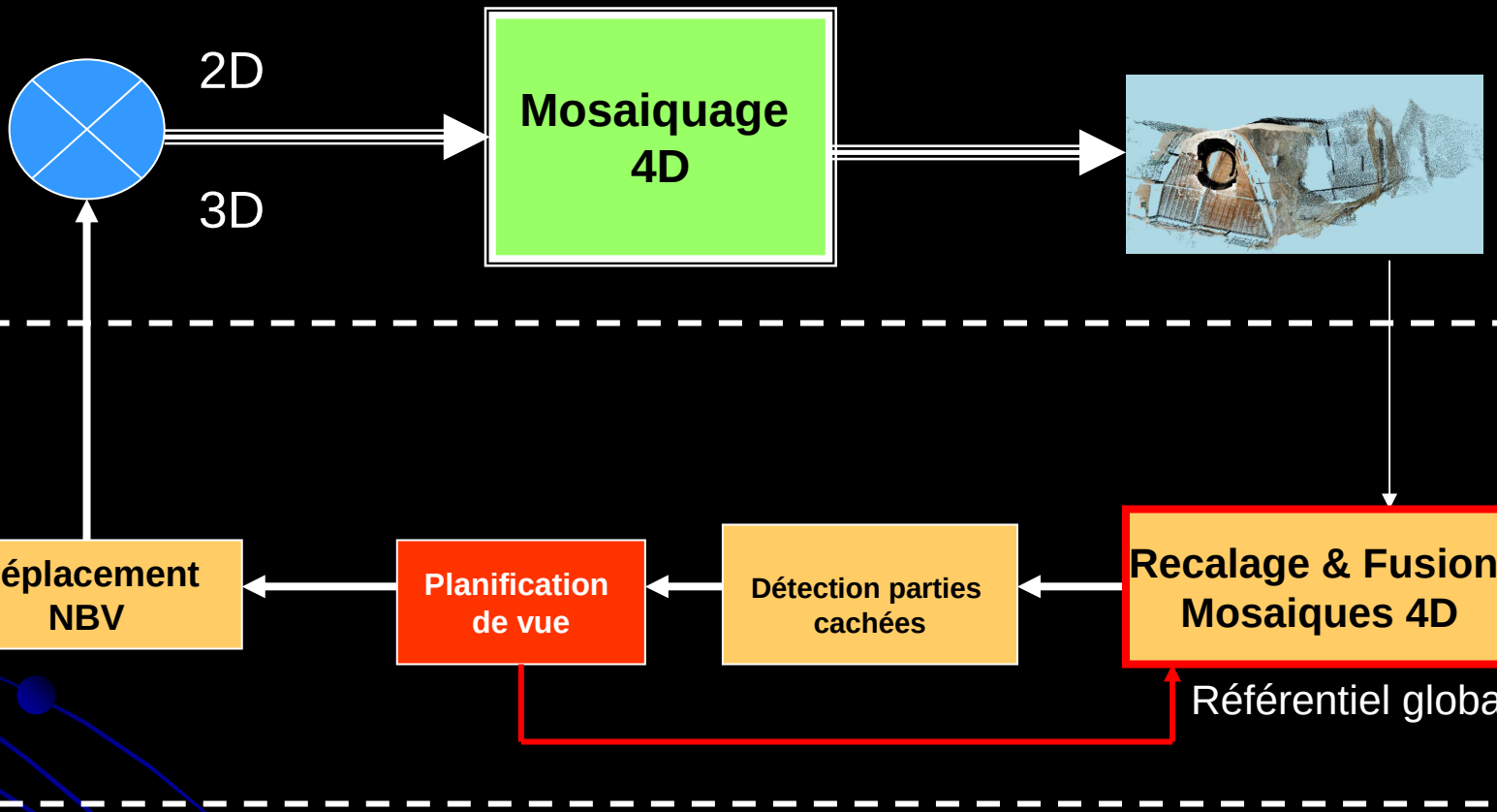
Recalage Automatique Images (2D-2D) [R, dt]

Traitement pour chaque pose 3D du système

Complétude du site

Modèle final

Vision Active pour la Numérisation et l'Exploration des Environnements Complexes



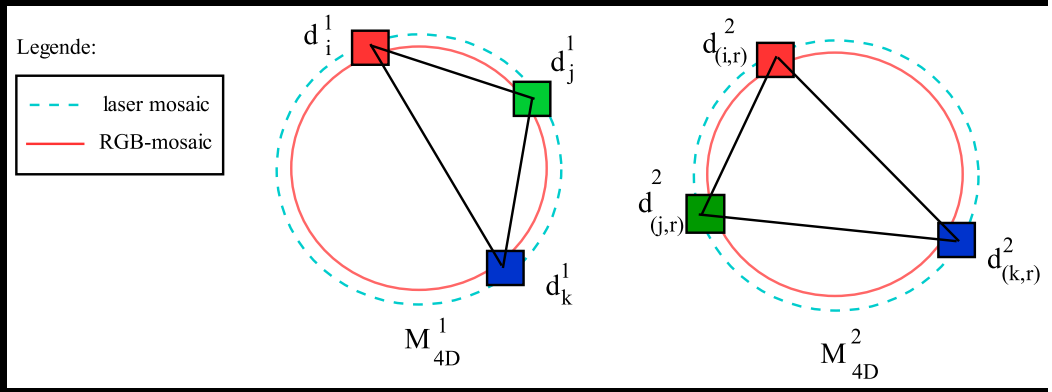
- Télé-opéré
- autonome

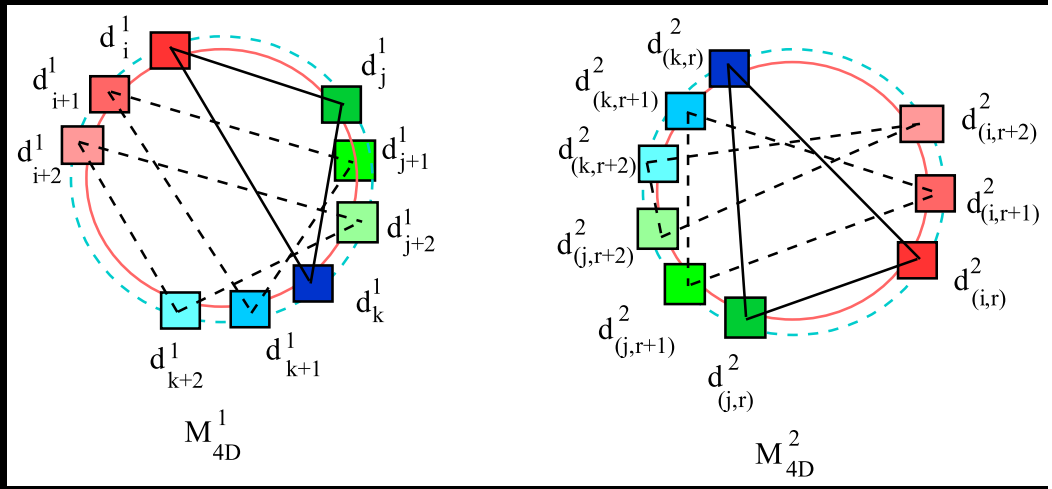
Solution théorique non-expérimentée
Appariement des mosaiques 4D

Solution sans estimation initiale:

-Descripteurs hybrides 2D-3D (Viewpoint Invariant Hybrid Descriptors - VIHD)
- appariement contraint critère 2D-3D

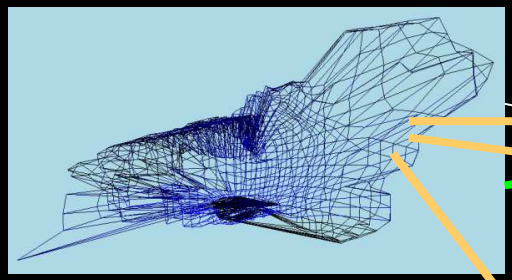
- directe [Horn 87]: 3 points
- itérative

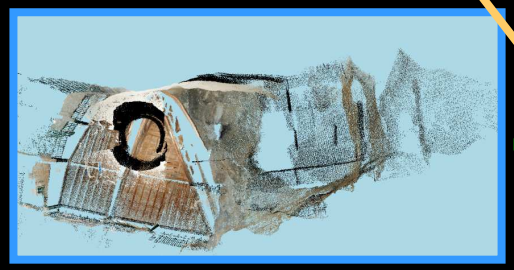




Complétude & Recalage Multi-vues via Mosaiquage 4D

Solution avec estimation initiale:





Position$_1$ [x, y, z]

Recalage 4D-4D

t_{3x1}

R_{3X3}

•Translation

• Rotation algorithme 2D-3D

• initialiser la mise en correspondance des descripteurs 2D-3D

• Calcul de pose via NBV+ICP

[K-L. Low Ph. D. 06]

Calcul prochaine position NBV dans la mosaique 4D ➔ Position1

-détecter les discontinuités en profondeur

-minimiser les parties cachées

-éviter les données redondantes

-positionnement possible du système

-DOF système

Conclusions & Perspectives

Conclusions

Dans quelle mesure un système hybride image-laser peut aider à générer *in-situ* des modèles 3D précis, photoréalistes et exhaustifs dans les environnements complexes?

Mise en géométrie automatique des données image-laser

Automatisation de recalage de données en deux temps:

- solution pour le recalage [R, dt]: utilisation de l'intensité (2D) ➔ mosaique 4D
- mosaique 4D: entité de base pour le recalage [R, t] ➔ éliminer les ambiguïtés via un critère 2D+3D

Guidage de l'acquisition ➔ numérisation complète du site

Exploitation de la mosaique 4D:

- opérateur
- plateforme mobile: télé-opéré, autonome

Contributions

Recalage automatique des données image-laser:

•Mosaiquage 3D BR: recalage multi-vues rigide des scans laser (intensité vs. distance)

[Craciun et al. CRV08, Craciun et al. CVIU10]

•Mosaiquage RGB HR: combinaison des méthodes directes vs. primitives (précision + rapidité)

[Craciun et al. MVA09], [B. Cannelle et al. O3D09]

•Mosaiquage 4D (R, G, B, profondeur): recalage grossier 2D-3D

Sans:

- opérateur
- capteurs de navigation
- primitives géométriques / radiométriques

Mosaique 4D: 3D-RGB:

- visualiser in-situ les données acquises
- saisir la 3D dans l'image
- structure de données compacte
- la seule information permettant de guider l'acquisition des données in-situ

Perspectives

Mosaiquage 2D:

-mise en œuvre de la solution théorique d'ajustement par faisceaux basée sur la minimisation de l'angle entre les rayons 3D pour le calcul direct des quaternions absolus

Mosaique 4D:

-densification la résolution des points 3D à partir de l'image HR ➔ recalage fin

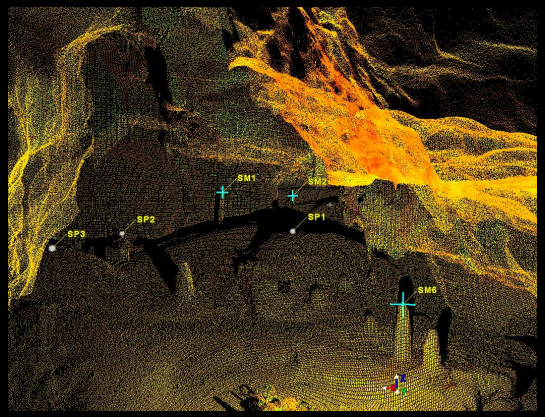
Recalage multi-panoramiques 4D:

-primitives 2D+3D (VIHD) + ajustement par faisceaux local pour les caméras panoramiques [E. Mouragnon 06]

-intégration de plusieurs mosaiques 4D: fusion des cartes de profondeur, maillages

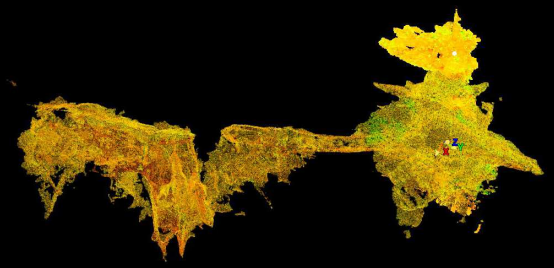
Perspectives IGN

Nouvelles données Grotte Mayenne Sciences [IGN-MATIS 09]



• image + laser mêmes centres optiques

Panoramique obtenue en corrigeant manuellement AutopanoPro [J. P. Papelard IGN-MATIS 09]



11 stations acquises et recalées manuellement

Scénario d'acquisition très riche en problématiques

- évaluer et optimiser les méthodes développées
- mise en œuvre de la méthode de planification de vue proposée

Utilisation des Mosaïques 4D

Détecter les parties cachées ➔ guidage de l'acquisition des données

- Opérateur: saisir la 3D dans l'image – topologie

hors-site

[Levoy et al. 02]

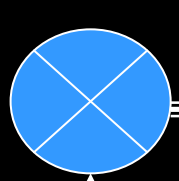
in-situ

Problème ouvert:
bande passante

- Plateformes télé-opérées

- Autonome: vision active

Vision Active pour la Numérisation et l'Exploration des Environnements Complexes

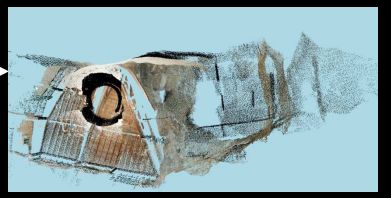


2D

3D

autonome

Mosaiquage 4D



Extraction de sémantiques

- 3D précis
- Couleur
- Haute résolution

Complétude du site

$W(t)+=M_{4D}$

Référentiel global

Asservissement visuel:

- Planification de vue
- Navigation autonome (détection d'obstacles, détection de surfaces traversable, planification de trajectoire)

Missions in-situ dans les environnements complexes:

- Numérisation & exploration
- Inspection, maintenance in-situ
- Intervention dans les environnements à risque (recherche et sauvetage, catastrophes naturels)

Questions

Publications

•D. Craciun, N. Paparoditis, F. Schmitt. Multi-view Scans Alignment for 3D Spherical Mosaicing in Large-Scale Unstructured Environments. *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, Accepted March 2010.

•D. Craciun, N. Paparoditis, F. Schmitt. Automatic Gigapixel Mosaicing in Large Scale Unstructured Underground Environments . *In IAPR Machine Vision Applications* , Yokohama, Japan, March 2009.

•B. Cannelle, D. Craciun, N. Paparoditis, D. Boldo. Bundle adjustment and pose estimation of images of a multiframe panoramic camera . *In 9th Conference on Optical 3-D* , Vienna, Austria, July 2009 .

• D. Craciun, N. Paparoditis, F. Schmitt. Automatic Pyramidal Intensity-based Laser Scan Matcher for 3D Modeling of Large Scale Unstructured Environments. *CRV 08 - Fifth Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, Windsor, Canada, May 2008.

Références

[K. Ikeuchi et al. IJCV 08]

[Stamos et al. IJCV08]

[Nister PAMI 06]

[Wu et al. CVPR08]

[1] *Terrestrial Caser Scaning for paleontologists : The Tautavel Cave, Laure Chandelier et Floryne Roche, 22 CIPA Symposium, octobre 2009 - Kyoto Japon*

R. Horaud and O. Monga. *Vision par Ordinateur - Outils Fundamentaux*. Hermes, II edition, 1995.