

Ecole d'été Lidar – Aspet 2013

Le Lidar topographique, aspects physiques et instrumentaux

Michel KASSER, Professeur de Géodésie, HEIG-VD, Yverdon, Suisse

Le Lidar topographique, Aspects physiques et instrumentaux

- Domaines d'emploi
- Aspects géométriques et physiques de la mesure Lidar
 - Le Lidar idéal : calcul du bilan de liaison
 - Le lidar réel. Problèmes liés :
 - Au laser
 - A la détection
 - Problèmes liés aux cibles : albedo, structure 3D
 - La géolocalisation : GNSS + Inertiel
- L'obtention de MNS et MNT

Lidar topo, domaines d'emploi

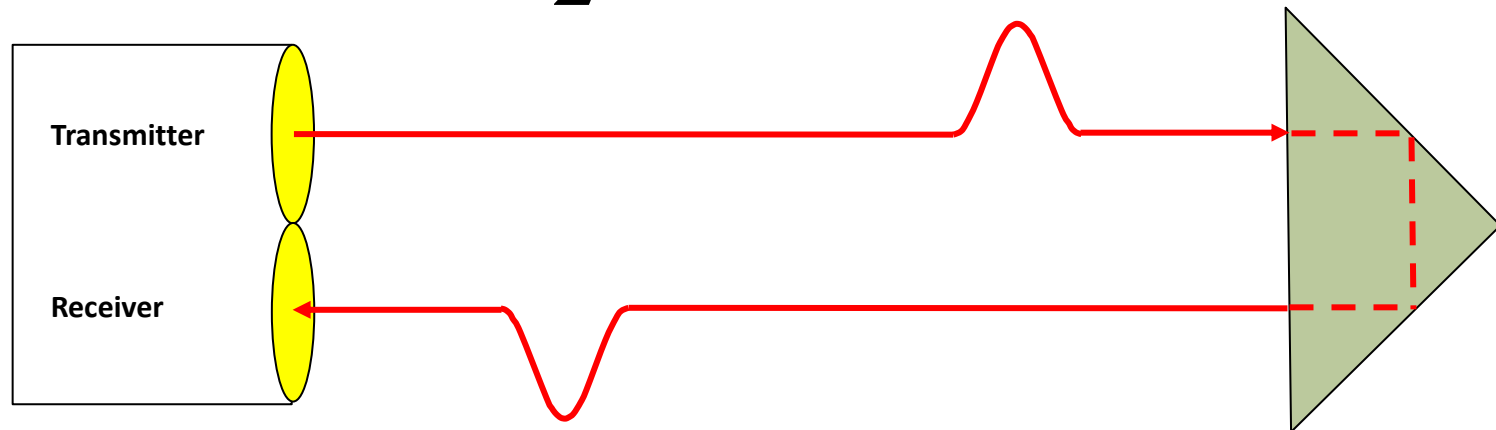
- Directement connexe du domaine, les AEMD
- Autre variante, le SLR et LLR
- Le Lidar aéroporté, levers divers et p. ex. :
 - Obtention de MNT sous couvert forestier,
 - Levers linéaires (lignes HT),
 - Levers forestiers
- Le scanner laser terrestre
 - Levers urbains, bâtiments divers
 - Monuments historiques, patrimoine.

The „Time of Flight“ Principle

- Time difference between transmitted and received pulse
- Distance proportional to the time difference

$$D = \frac{t}{2} \cdot c$$

$s_D = 1\text{mm}$
requires
 $s_t < 7 \cdot 10^{-12}\text{ s}$

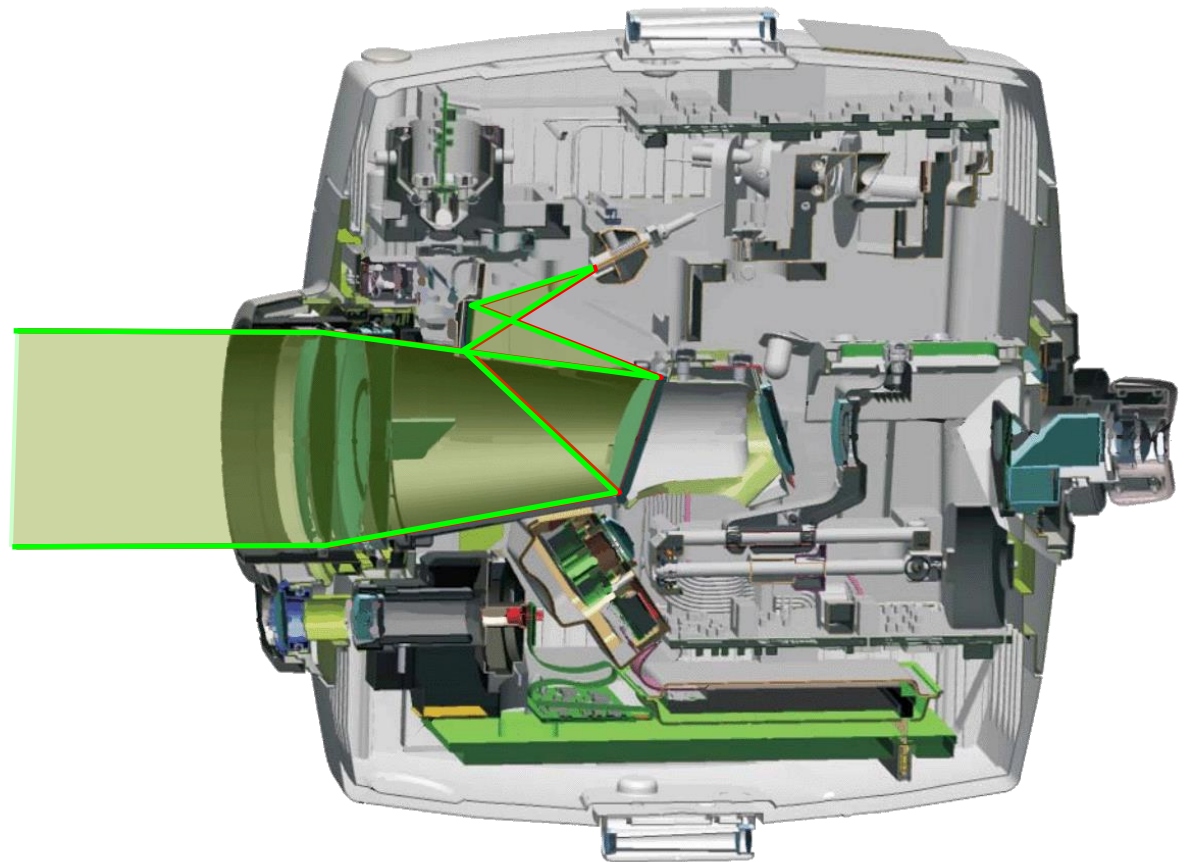


Planches de M. Koehler, Trimble

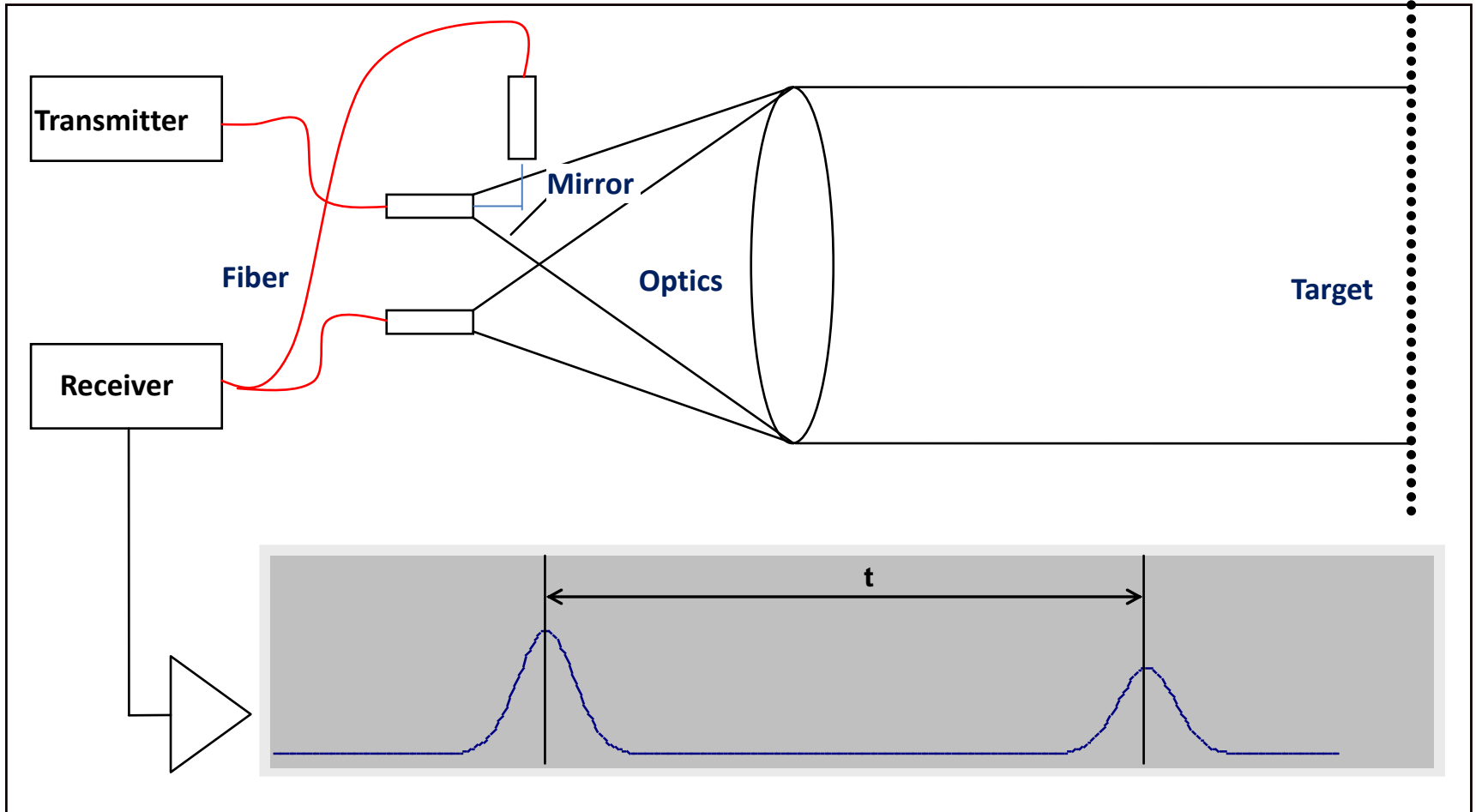
Design Pulse Distance Meter

DR Plus

- IR Transmitter
- Non visible
- Laser class 1
prism+DR

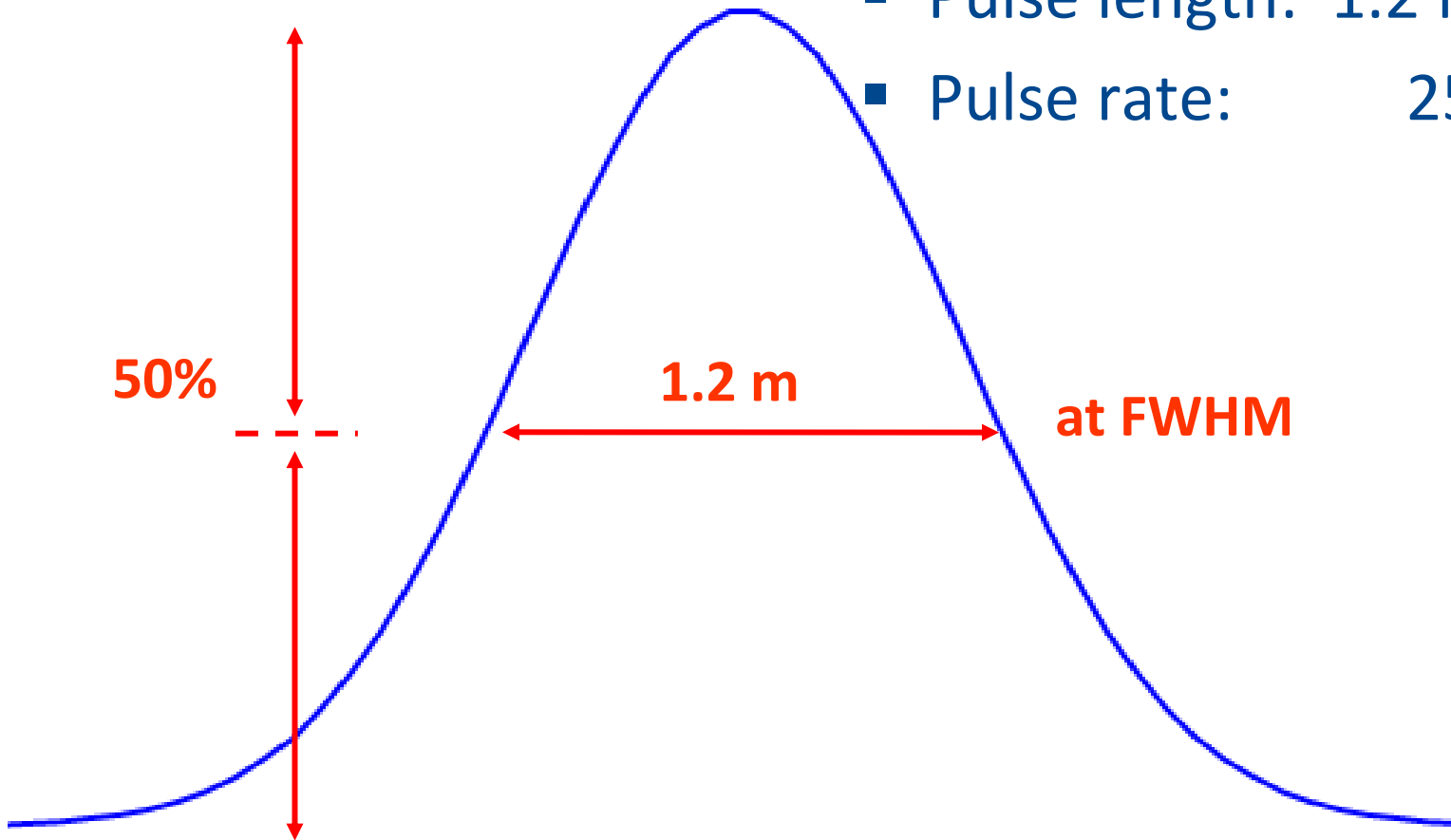


Design Pulse Distance Meter



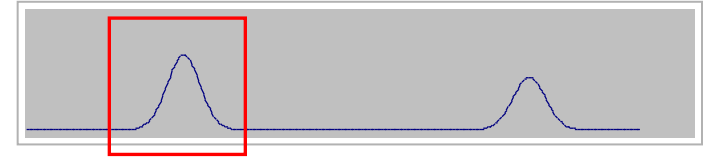
Length of a Pulse

- Pulse length: 1.2 m = 4 ns
- Pulse rate: 25 kHz

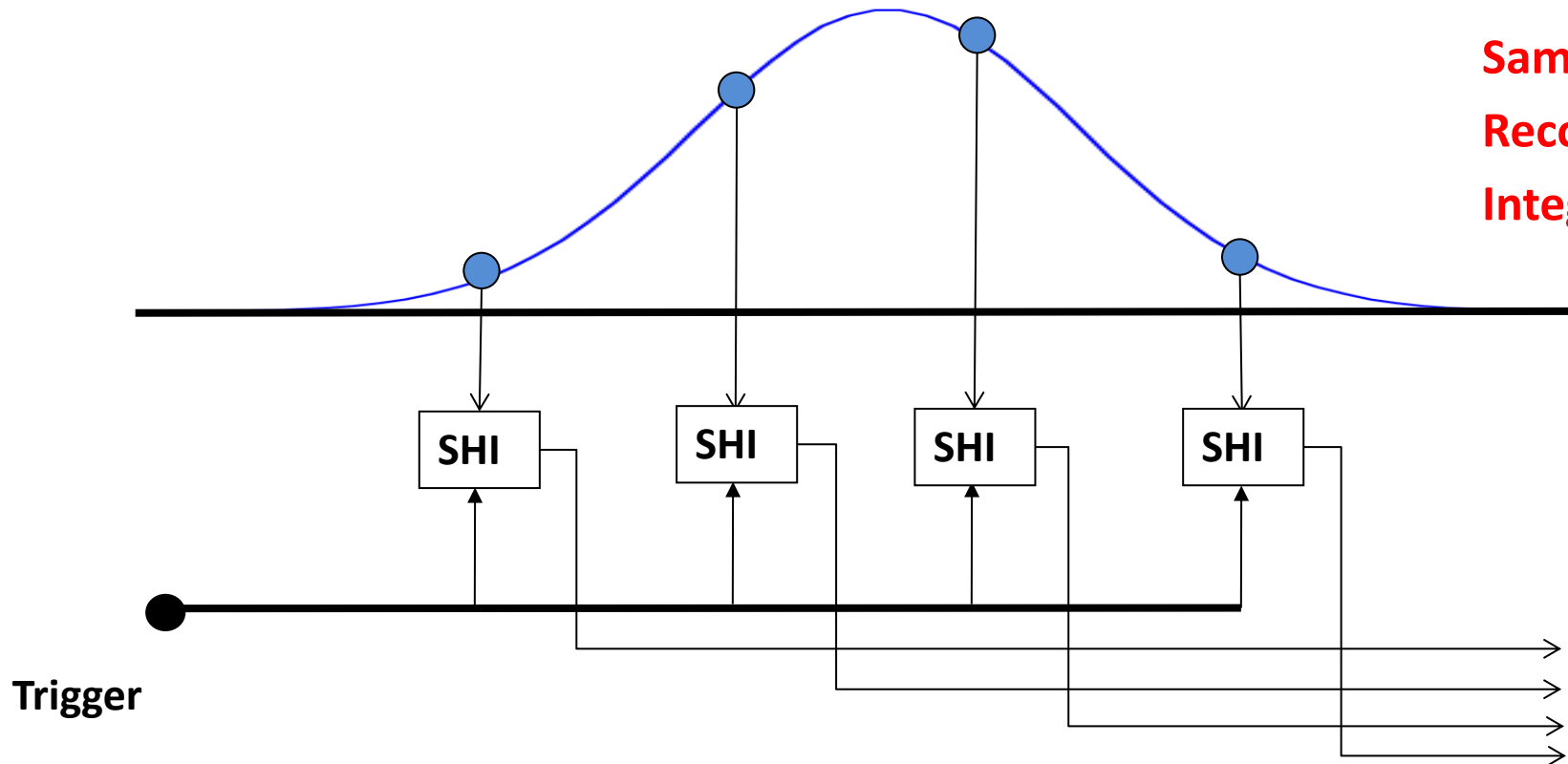


Determining a Laser Pulse

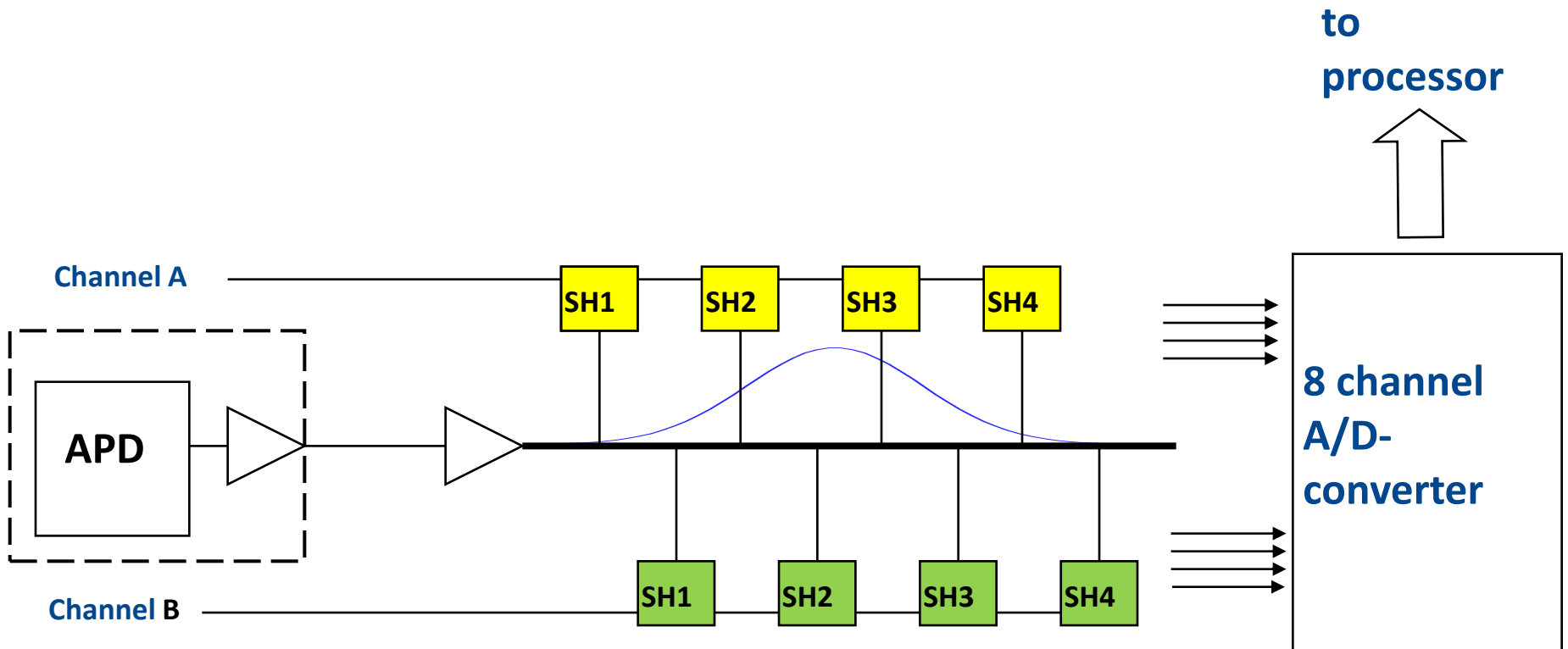
SHI = Sample & Hold Integrate



Sample
Record
Integrate

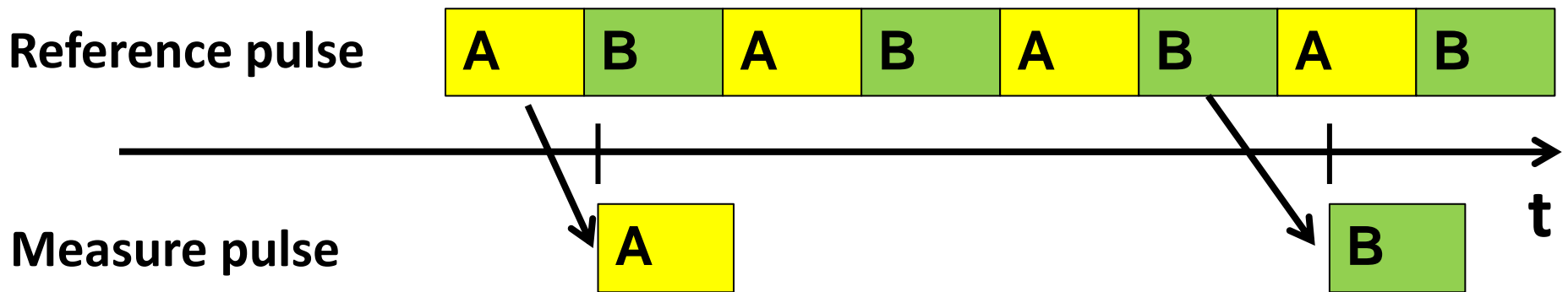


The Sample & Hold Circuit



The Sample & Hold Circuit

- Reference pulse is measured continuously alternately with circuit A and B
- Measure pulse with the circuit of last reference pulse measurement

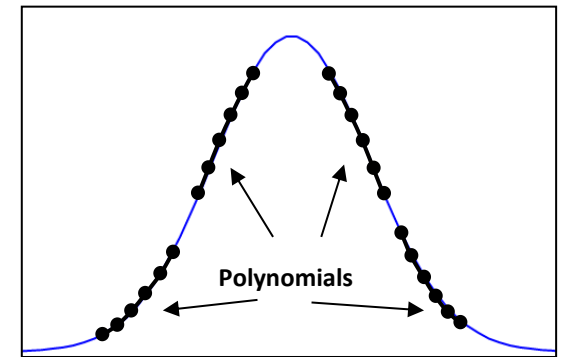
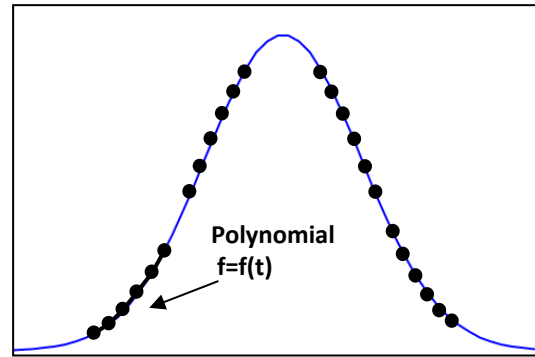
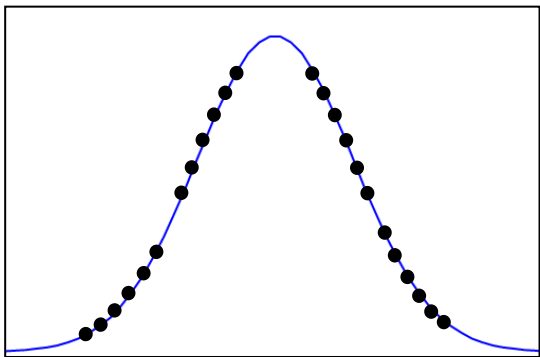
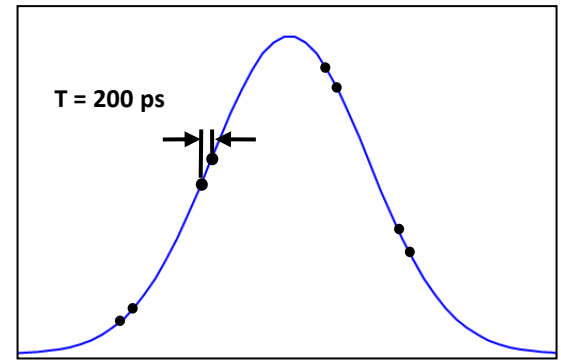
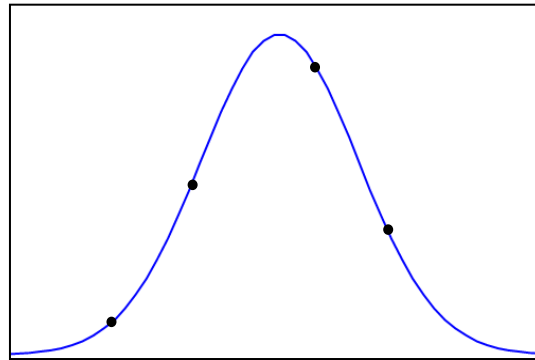
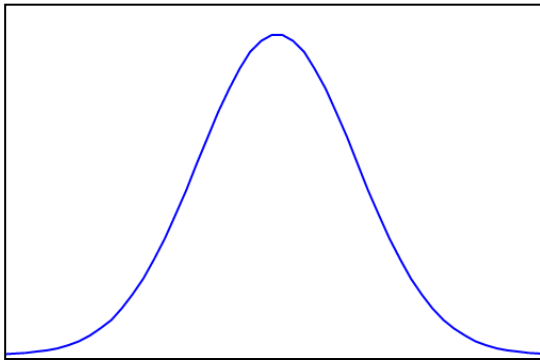


Advantages

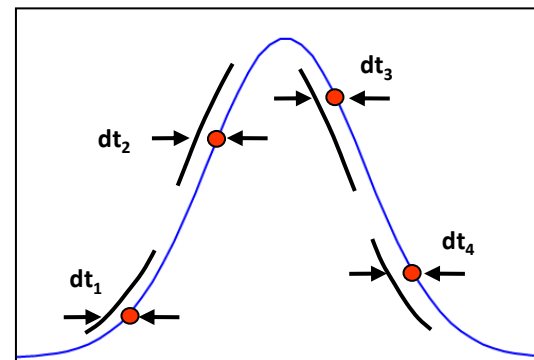
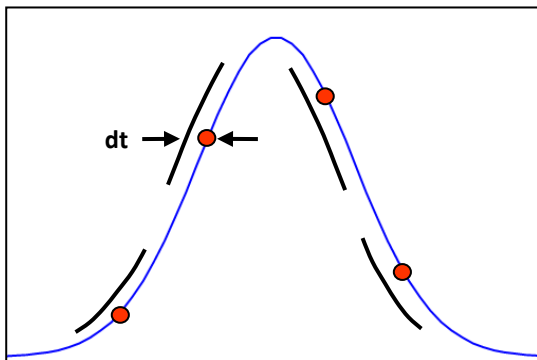
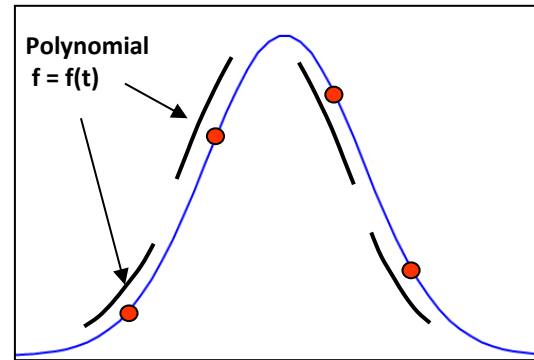
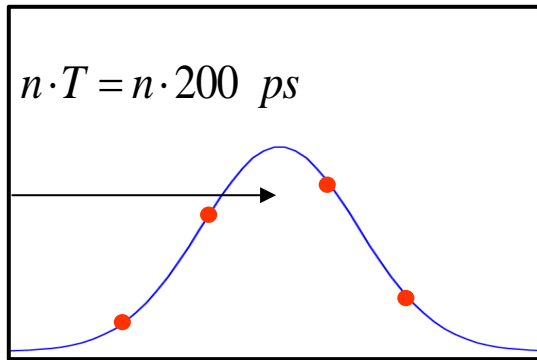
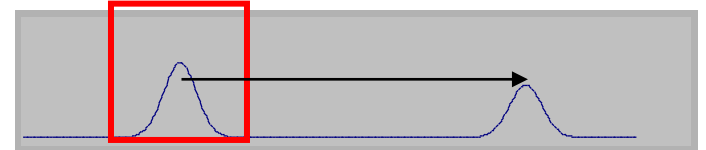
- Laser has no warming up time
- No break by internal reference measurement

Continuous measurement possible

The Reference Pulse



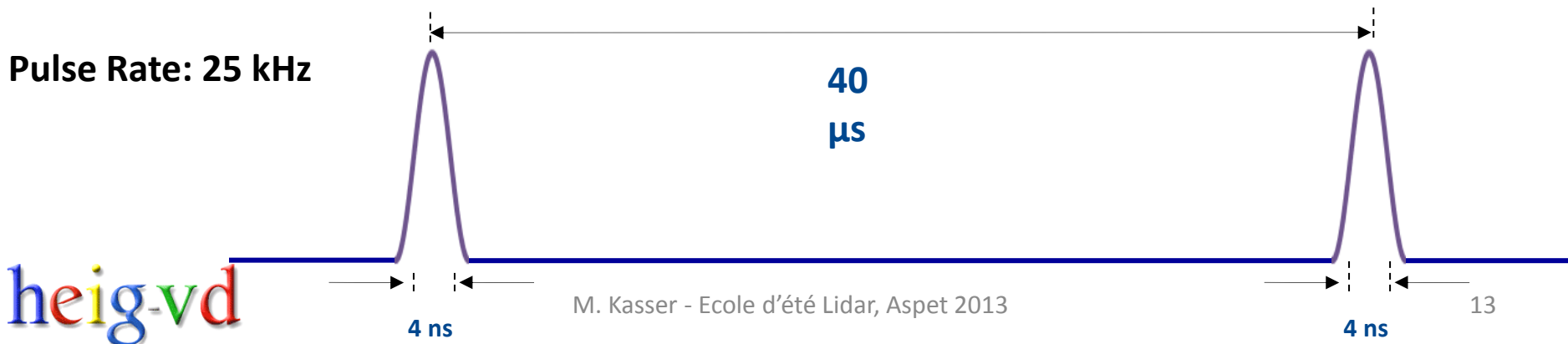
The Measure Pulse



$$D = \frac{c}{2} \cdot (n \cdot T + dt_m)$$

Laser Power in DR Plus EDM

- High laser output power
 - Intensity in peaks: Factor $1 \cdot 10^4$ in relation to phase shift
 - Pulse is significant with regard to noise
 - Large distance range
- Large time difference between pulses: 40 μs
- On/Off-ratio: 1:10000
- Less averaged laser power
- Safe Laser Class 1, even in DR Mode



Advantages of DR Plus EDM

- Large distances
- Reduced ambient light sensitivity
- Low and safe laser class 1 (even in DR mode)
- Shorter measuring time
- Continuous measurement
- Better measurement of dark objects (DR)
- Reflections of several targets can be separated (DR)

Phase Shift Distance Meter

- Design of the distance meter
- Phase shift measurement - traditional
- The Trimble concept of phase shift EDM
- Resolving the ambiguity
- Advantages of phase shift distance meters

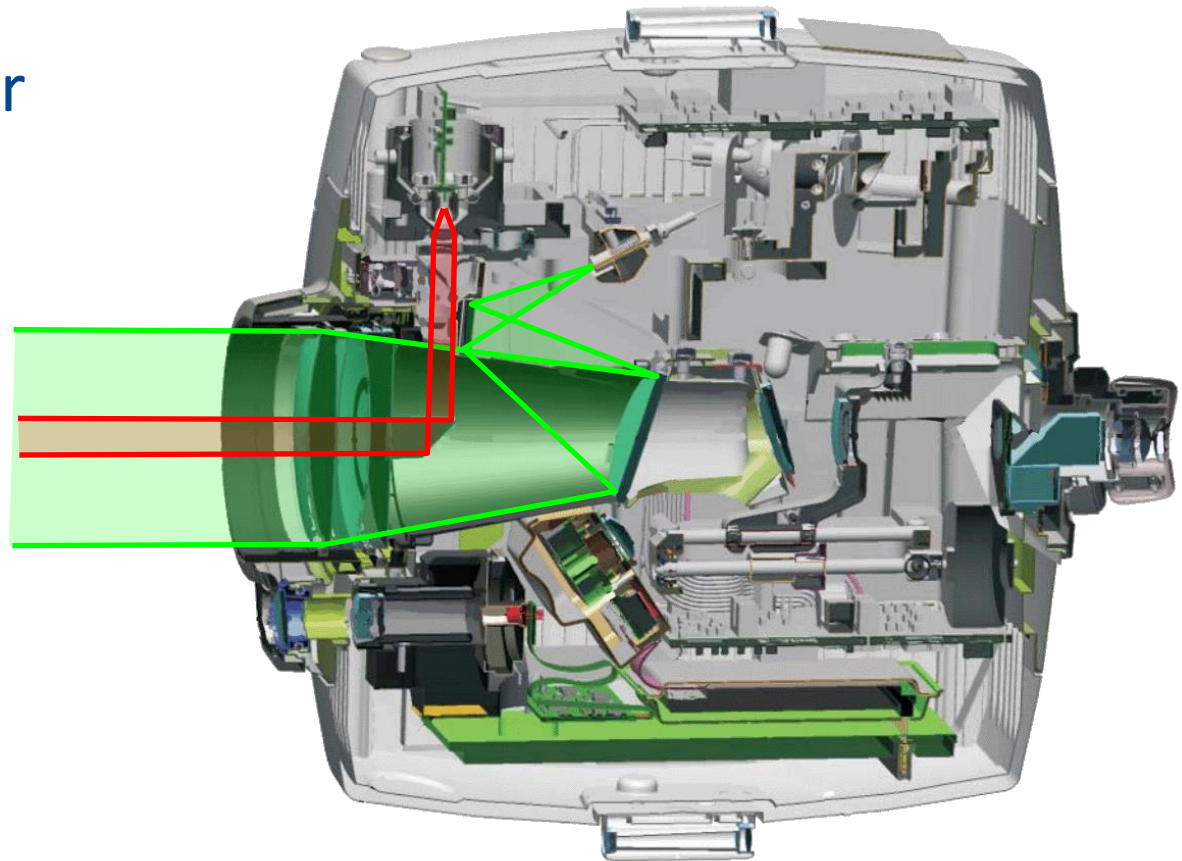
Phase Shift Distance Meter

Transmitter

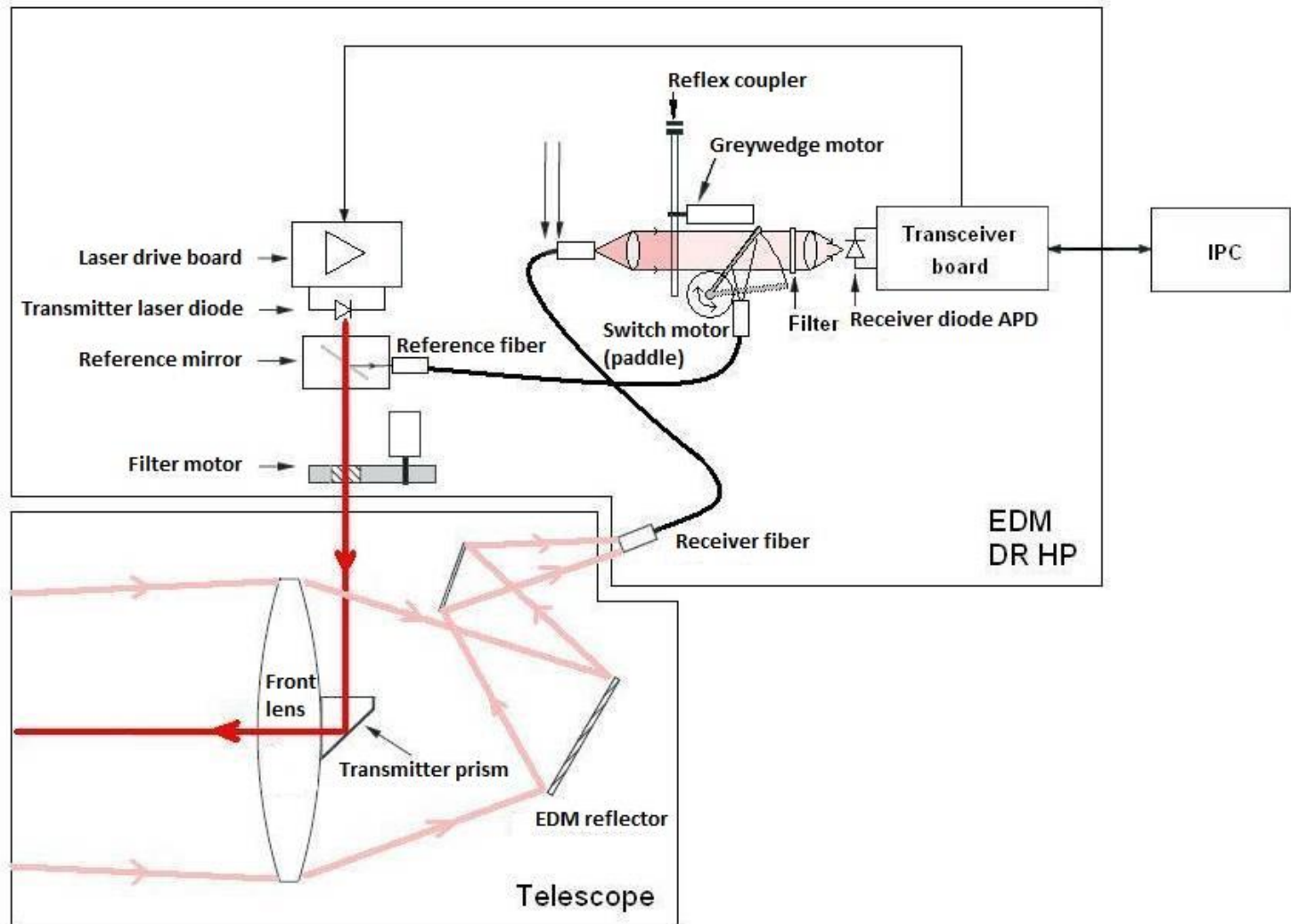
- Visible red laser
- coaxial

Receiver

- coaxial



Mechanic-optical Principle

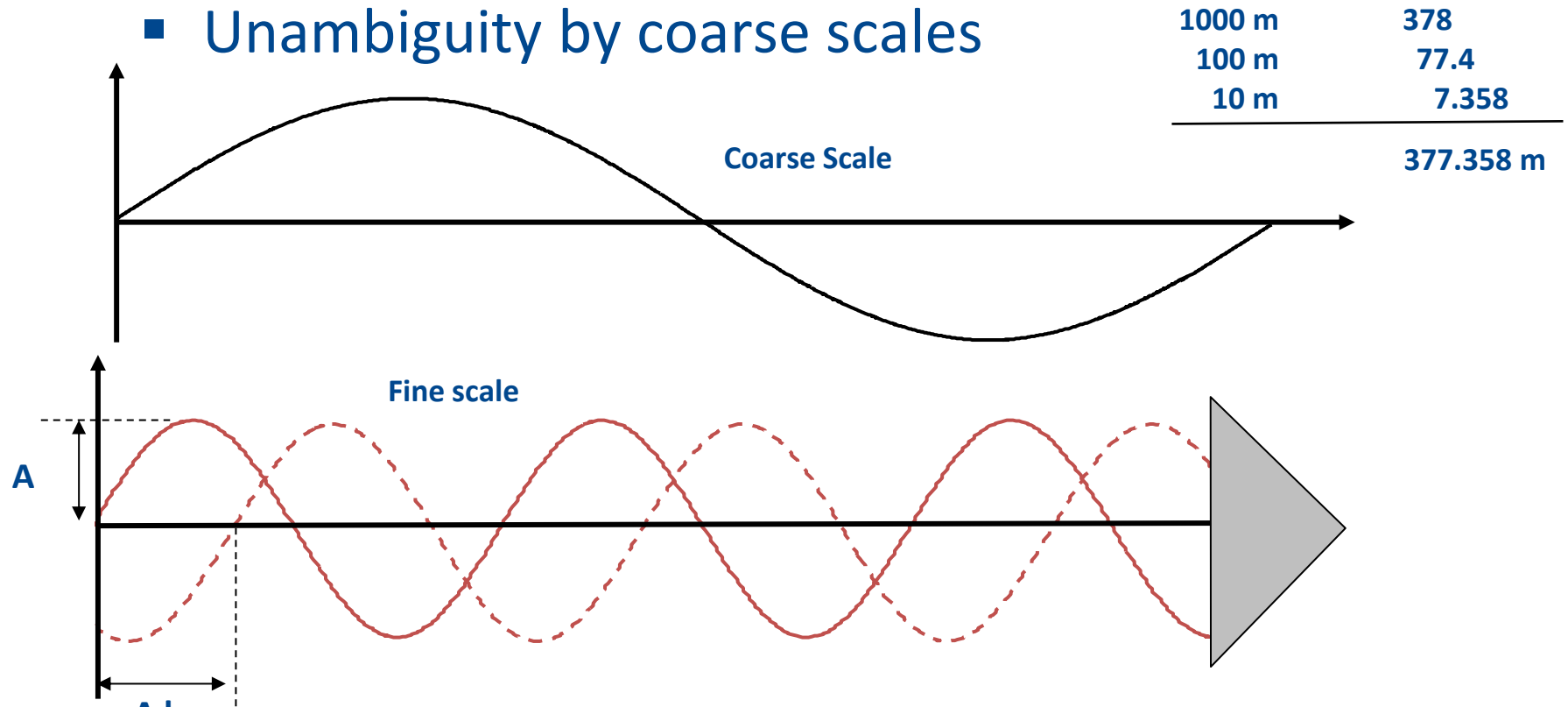


< 1 mW (LC 2)
 < 5 mW (LC 3R)
 < 0.3 mW (LC 1)
 prism mode

EDM
 DR HP

Resolving the ambiguity - traditional

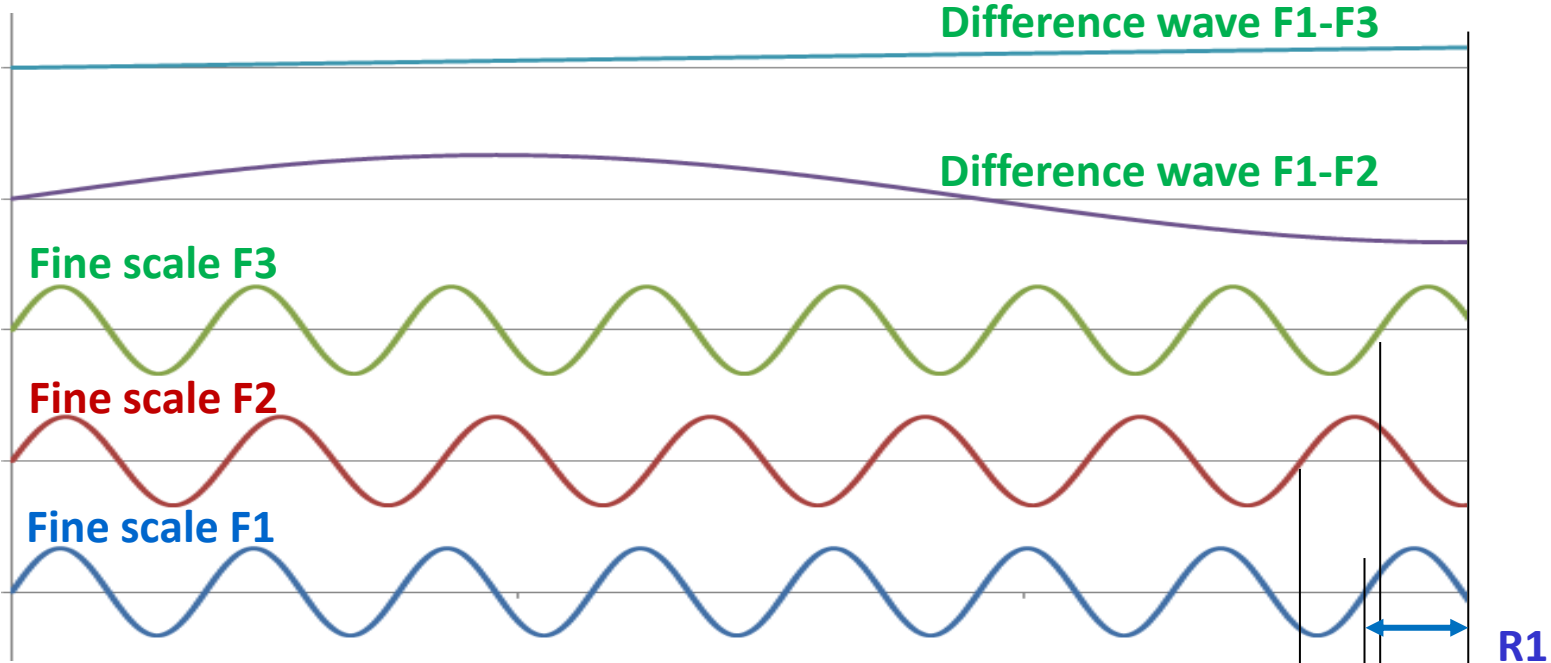
- Measuring the phase shift
- Unambiguity by coarse scales



Phase Shift Technology

- Red semiconductor laser with 660 nm
- 7 modulation frequencies around 400 MHz
 - They contribute all to the fine measurement
- All derived from one TCXO (15 MHz)
- 400 MHz corresponds to fine scale of 0.375 m
- Coarse scales neither generated nor emitted
- Unambiguity from differences of fine scales
- Unambiguity range: 7.3 km

Unambiguity by Differences



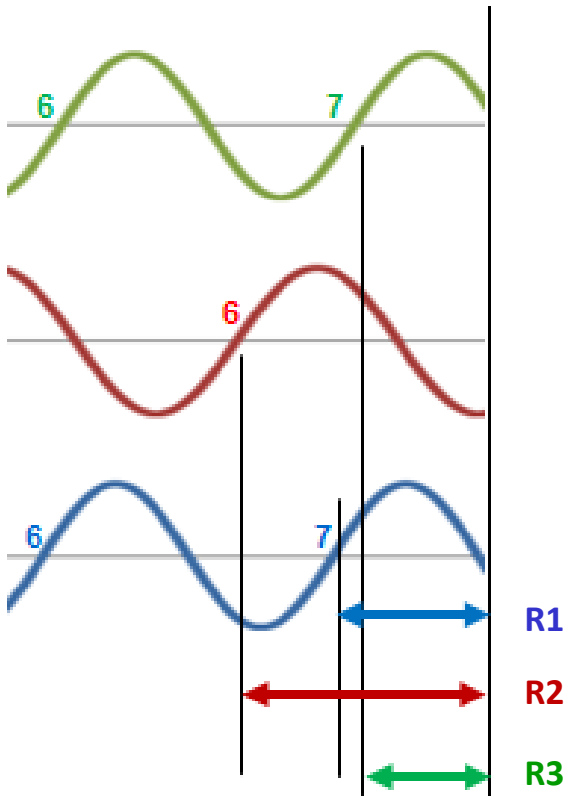
Frequencies	wave length	phase shift
F1 = 150.0 MHz	L1 = 1.00 m	R1 = 0.56 m
F2 = 135.0 MHz = 9/10*F1	L2 = 1.11 m	R2 = 0.82 m
F3 = 148.5 MHz = 99/100*F1 L3 = 1.01 m	R3 = 0.49 m	

Difference frequencies (calculation)

F4 = F1 - F2 = 15 MHz	L4 = 10 m	R4 = R1 - R2 = -0.25 + 1 = 0.75 m
F5 = F1 - F3 = 1.5 MHz	L5 = 100 m	R5 = R1 - R3 = 0.56 - 0.49 = 0.07 m

- Example**
- Only 3 frequencies
 - Simpler scales (around 1.00m)

Unambiguity by Differences



Unambiguous distance using frequency differences

$$\begin{aligned} L5 * R5 &= 100\text{m} * 0.07 = 7 \text{ m} \\ L4 * R4 &= 10\text{m} * 0.75 = 7.5 \text{ m} \\ L1 * R1 &= 1\text{m} * 0.56 = 0.56 \text{ m} \end{aligned}$$

$$D = 7.56 \text{ m}$$

Multiples of scale wave lengths

From: $D = L_i * (N_i + R_i)$
 results: $N_i = \text{ROUND}(D/L_i - R_i)$

$$\begin{aligned} N1 &= \text{ROUND}(7,56 / 1\text{m} - 0.56 \text{ m}) = 7 \\ N2 &= \text{ROUND}(7,56 / 1,11\text{m} - 0.82 \text{ m}) = 6 \\ N3 &= \text{ROUND}(7,56 / 1,01\text{m} - 0.49 \text{ m}) = 7 \end{aligned}$$

Distances (calculation)

$$\begin{aligned} D1 &= L1 * (N1 + R1) = 1 * (7+0.56) \text{ m} = 7.56 \text{ m} \\ D2 &= L2 * (N2 + R2) = 1.11 * (6+0.82) \text{ m} = 7.57 \text{ m} \\ D3 &= L3 * (N3 + R3) = 1.01 * (7+0.49) \text{ m} = 7.56 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{averaged} = 7.563 \text{ m}$$

Lidar topo, domaines divers

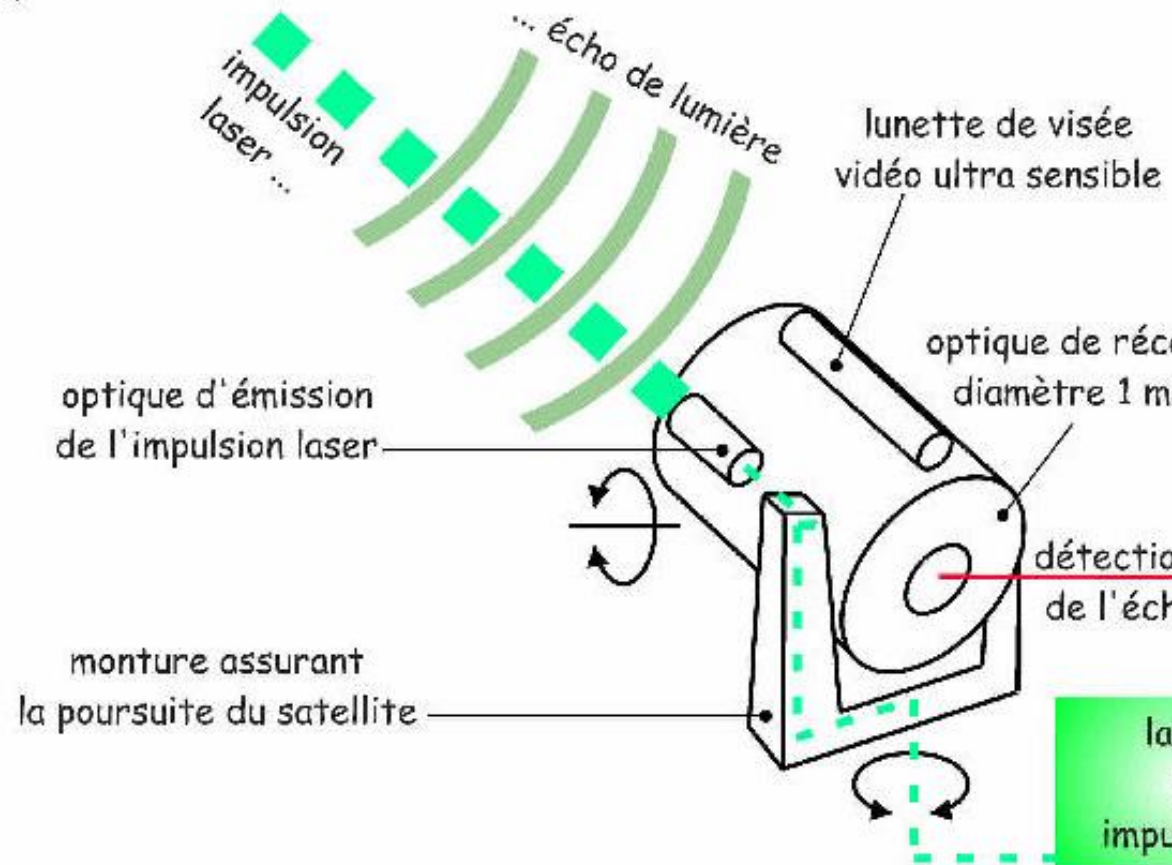
- ~~Directement connexe du domaine, les AEMD~~
- Autre variante, le SLR et LLR
- ~~Le Lidar aéroporté, levers divers et p. ex. :~~
 - Obtention de MNT sous couvert forestier,
 - Levers linéaires (lignes HT),
 - Levers forestiers
- Le scanner laser terrestre
 - Levers urbains, bâtiments divers
 - Monuments historiques, patrimoine.

Télémétrie Laser sur Satellites (SLR)



PRINCIPE GÉNÉRAL

satellite géodésique défilant

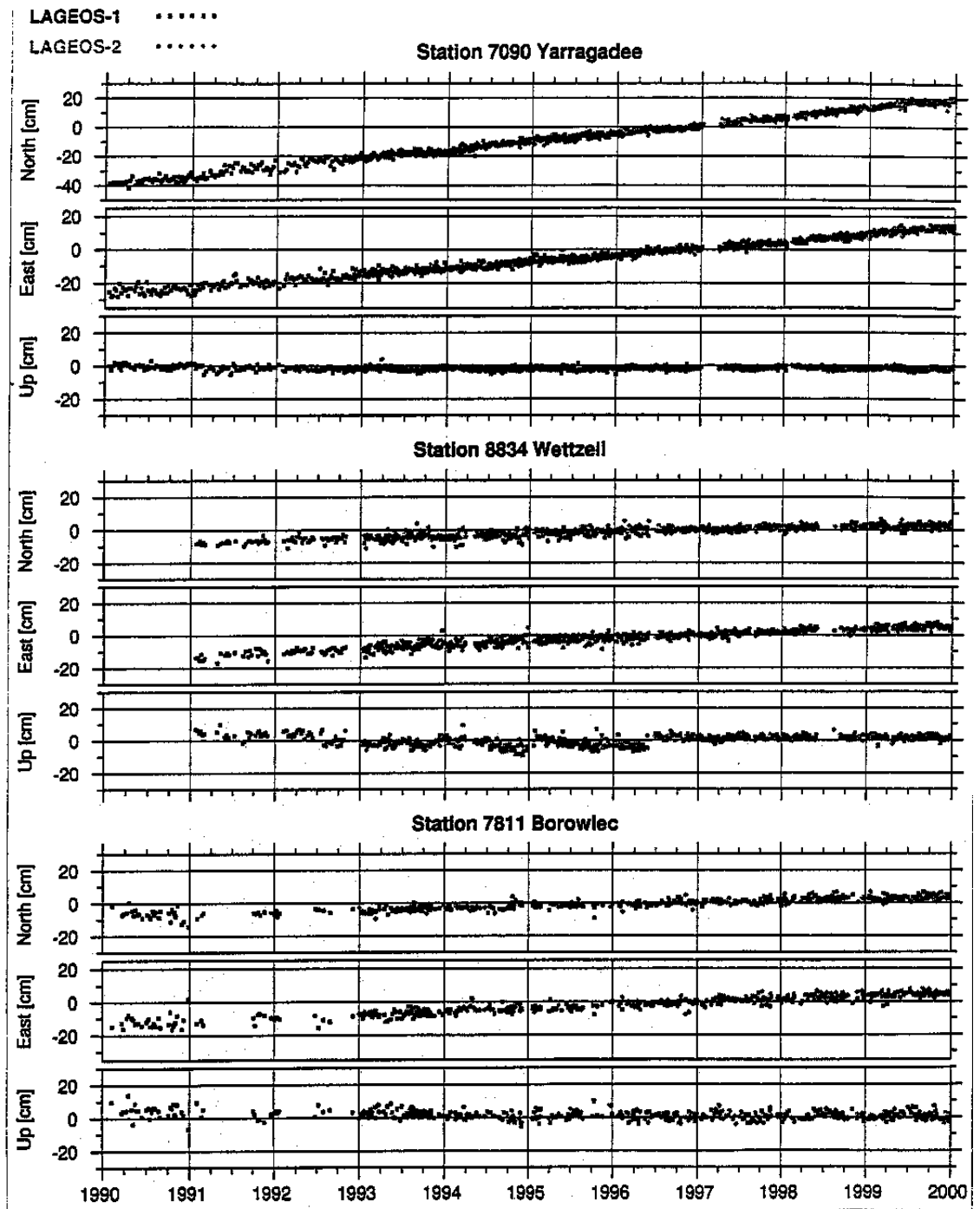


DATEUR :
datation précise de l'heure de tir

CHRONOMÈTRE :
Mesure ultra précise de l'intervalle entre les deux événements

STOP **START**

SLR



Satellites laser (sphériques)



LAGEOS

Ø=60cm, 426CCR, 410kg



Stella

Ø=24cm, 60CCR, 48kg



GFZ-1

Ø=21cm, 60CCR, 20kg



WESTPAC

Ø=24cm, 60CC, 23kg



Ajisai

Ø=215cm, 685kg

Télémétrie laser, Gr 1436CCR + 318 miroirs *t*



Etalon

Ø=1.294m, 2134CCR, 1415kg



Différents types de cibles



Stella

Ø=24cm, 60CCR,
48kg



ERS-1

Ø=20cm, 9CCR



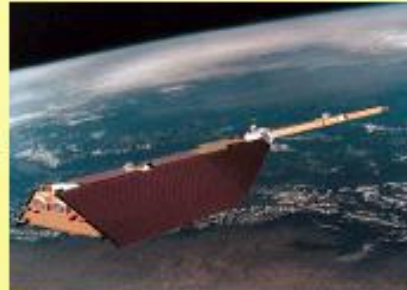
Apollo XI

46x46cm², 100CCR



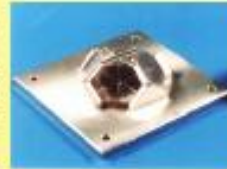
GPS

239x194x37mm³, 32CCR



CHAMP

Ø=5cm, 4CCR

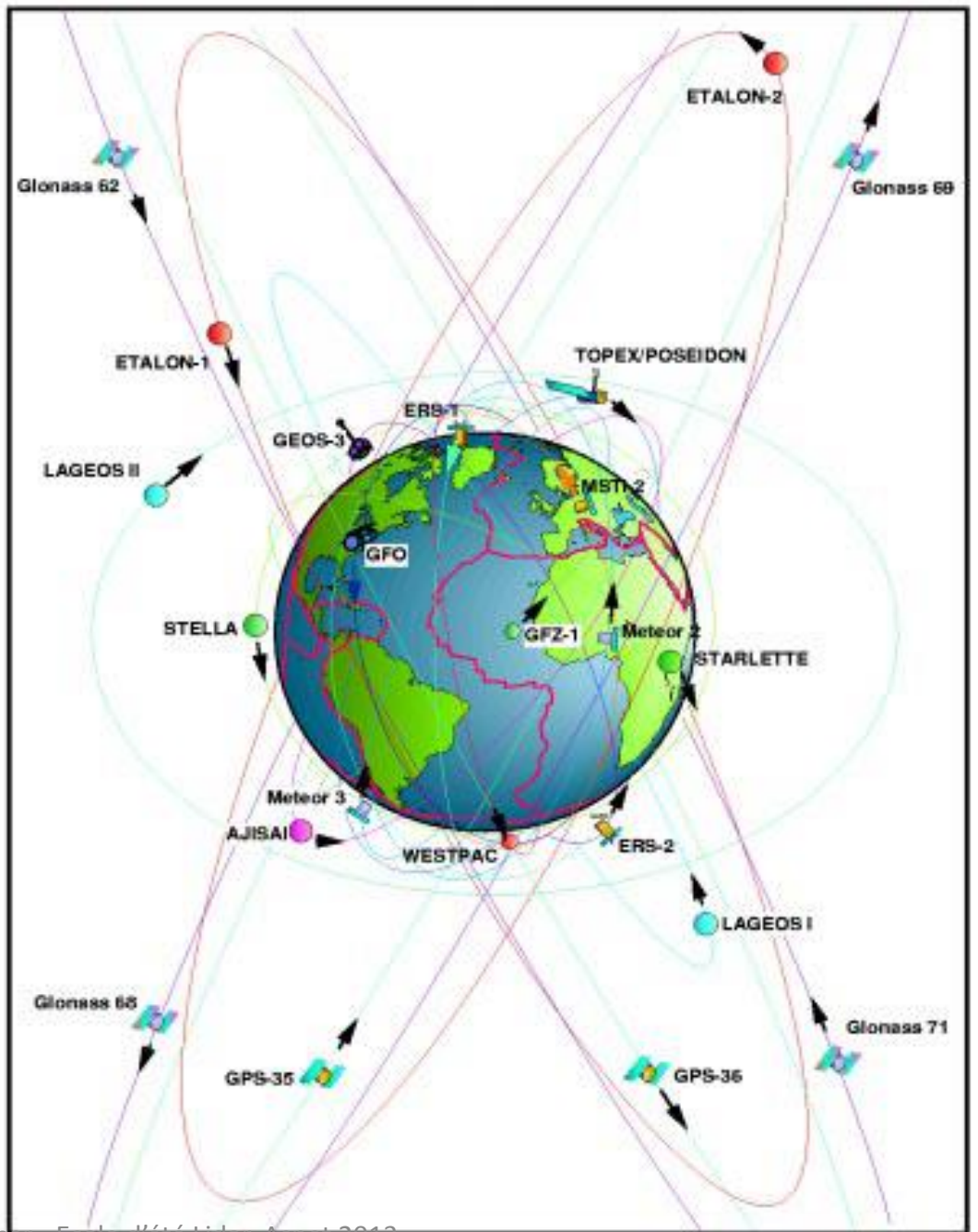


TOPEX/Poseidon

Ø=150cm, 192CCR

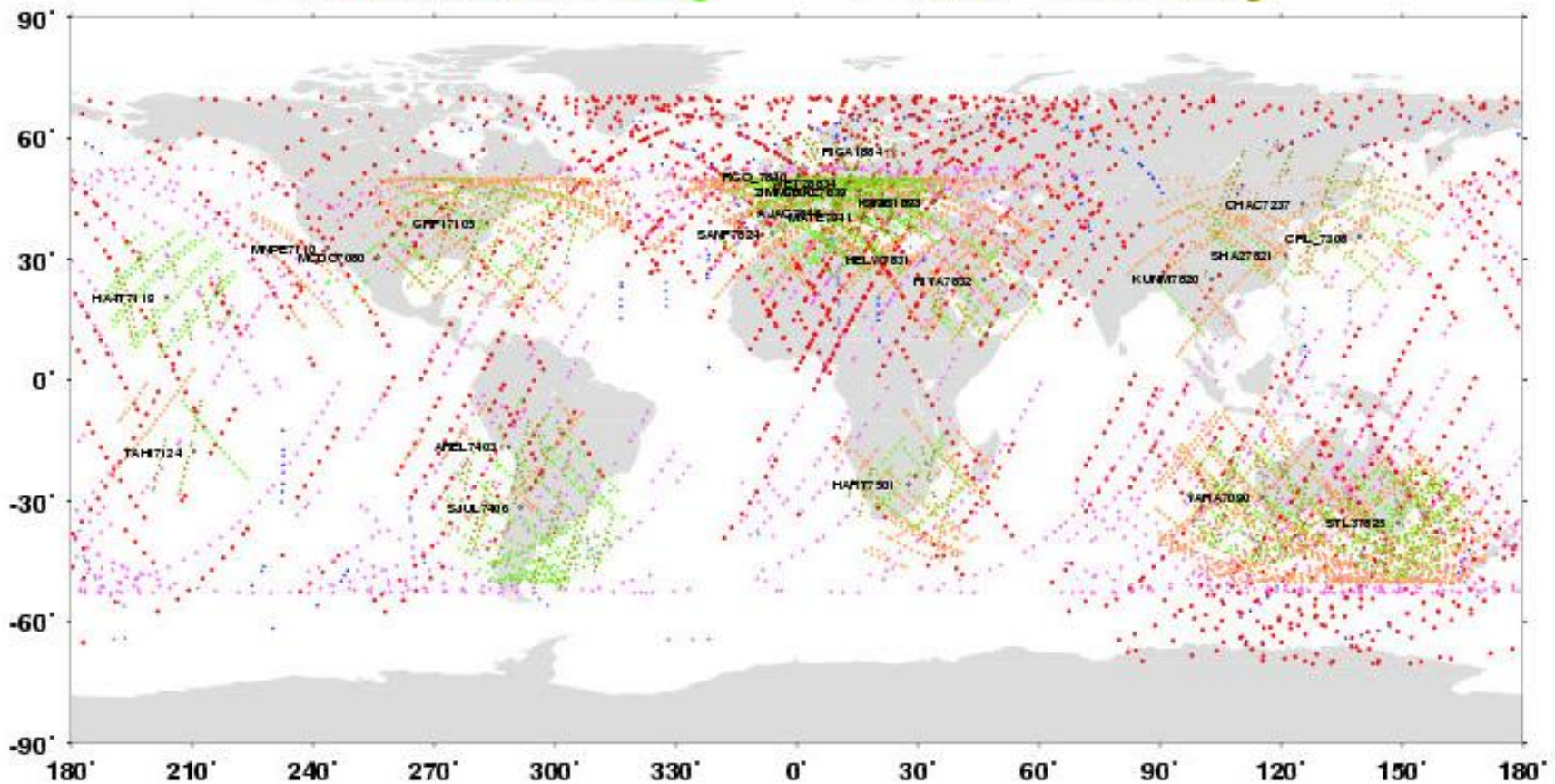


rie laser, Groupe d'Evaluation Scientifique, GRGS, 25 fév. 2008



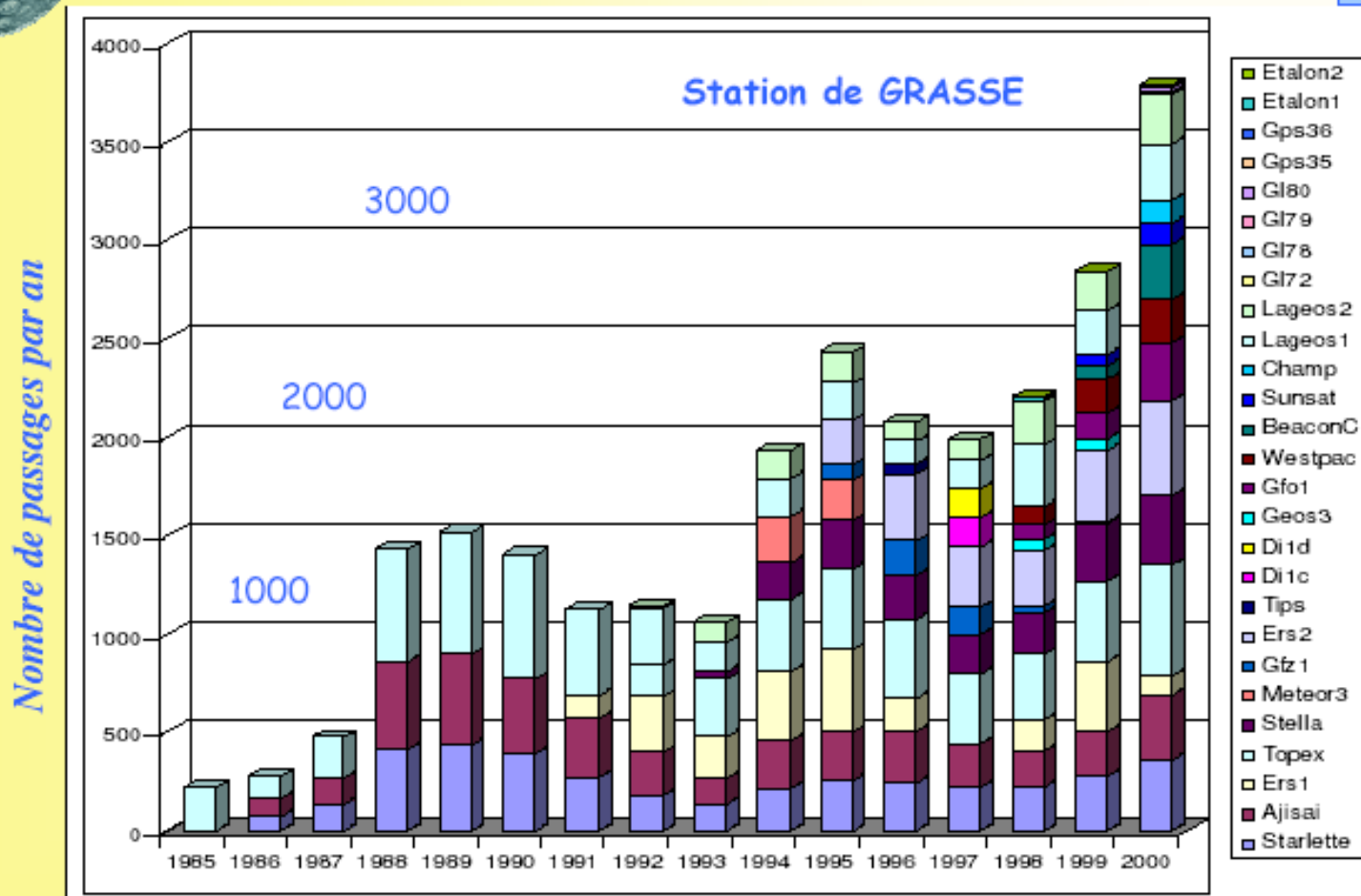
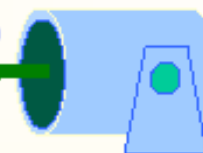
SLR data from 20080916 through 20080923 1200 UTC

- ETALON-1 19120 km 64.9 deg
- ★ ETALON-2 19120 km 65.5 deg
- LAGEOS-1 5895 km 109 deg
- ◆ LAGEOS-2 5785 km 52 deg
- AJISAI 1492 km 50 deg
- ▼ STARLETTE 953 km 50 deg
- ▲ STELLA 795 km 99 deg





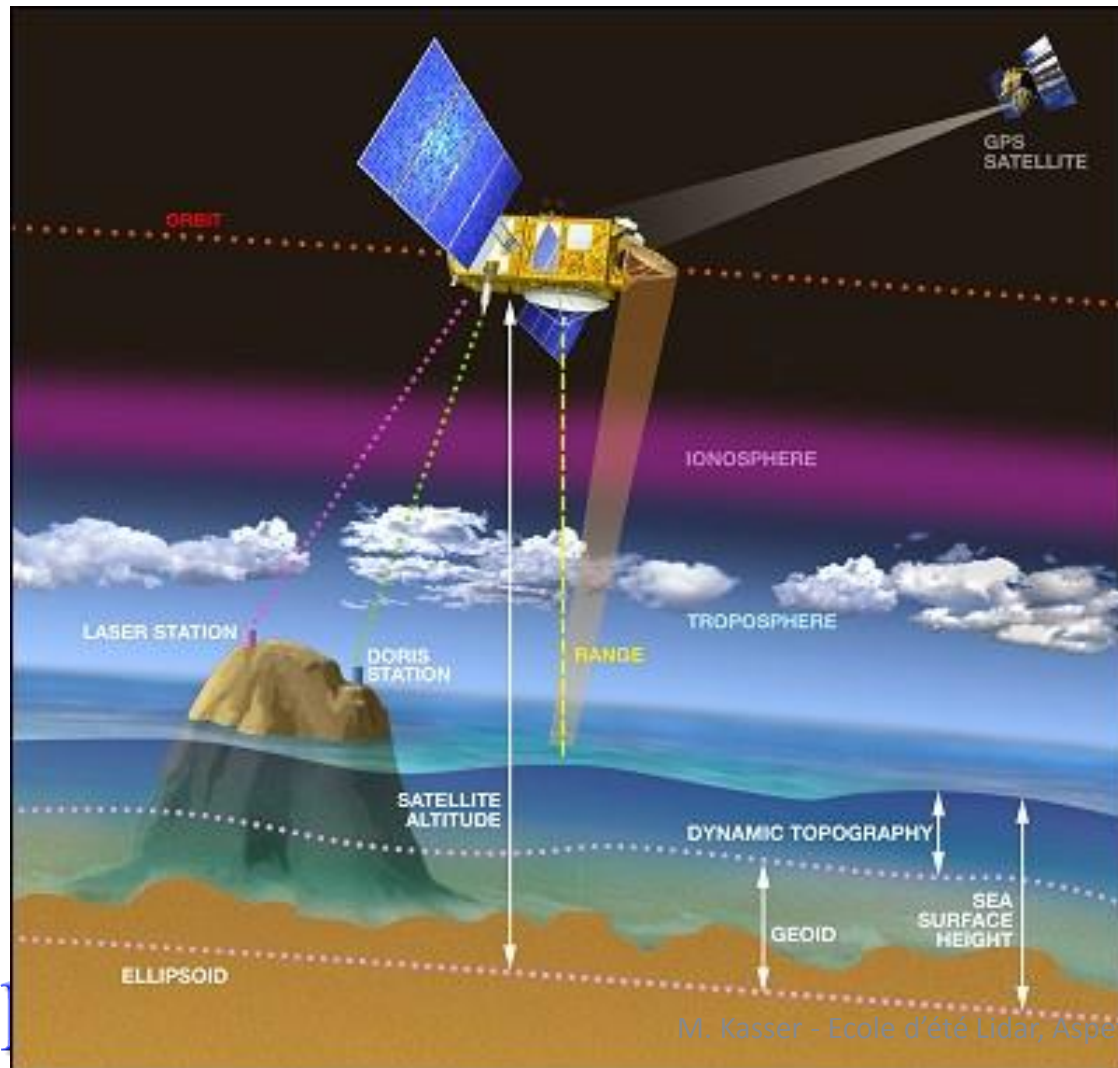
Production de données satellites 1985-2005



Télémétrie laser, Groupe d'Evaluation Scientifique, GRGS, 25 fév. 2008

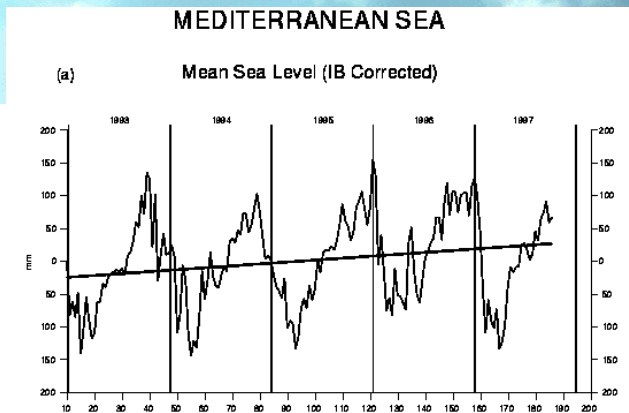
Repérage de satellites bas : l'altimétrie spatiale

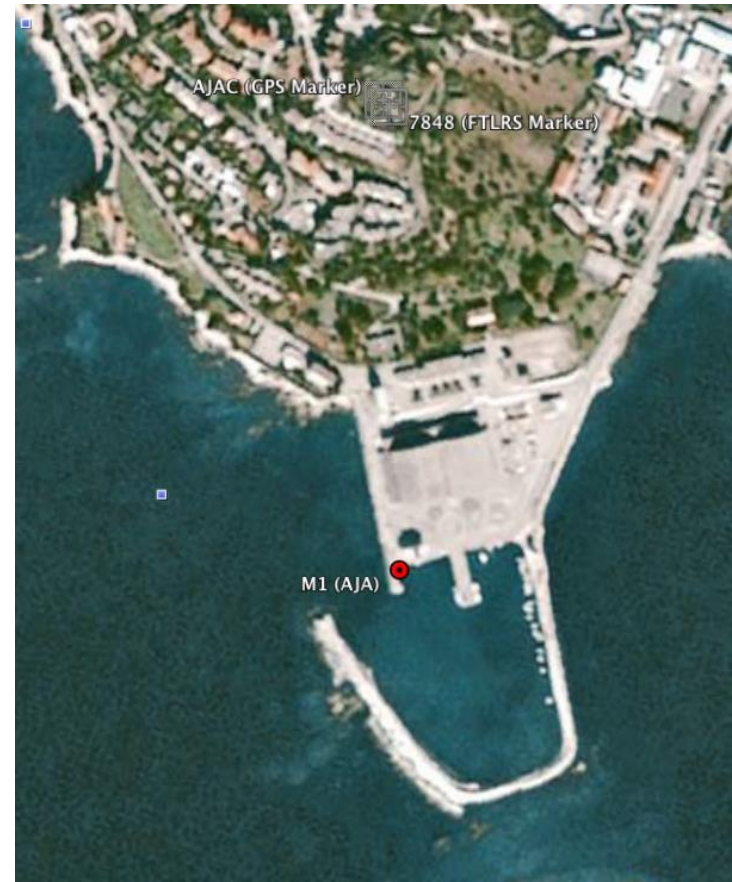
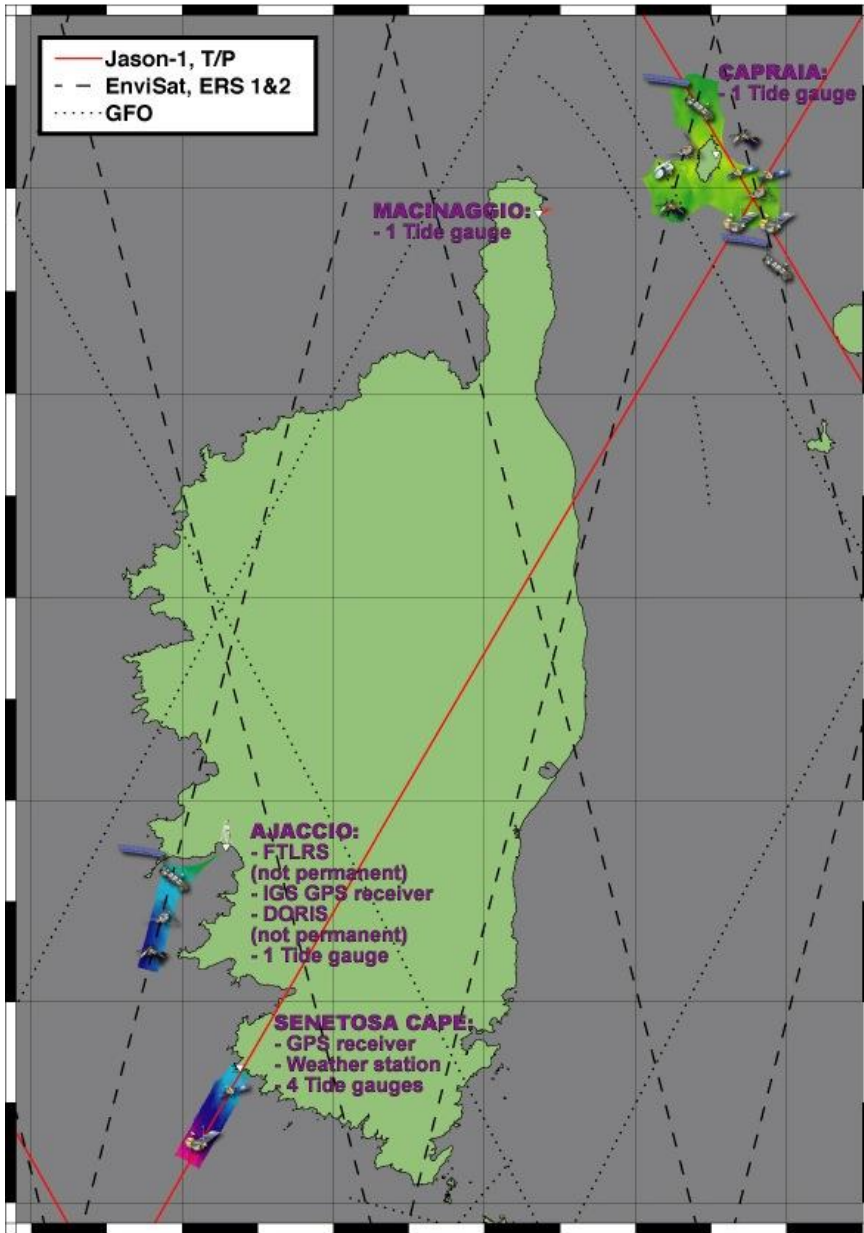
Le principe



Les satellites

Jason et TOPEX/Poséidon





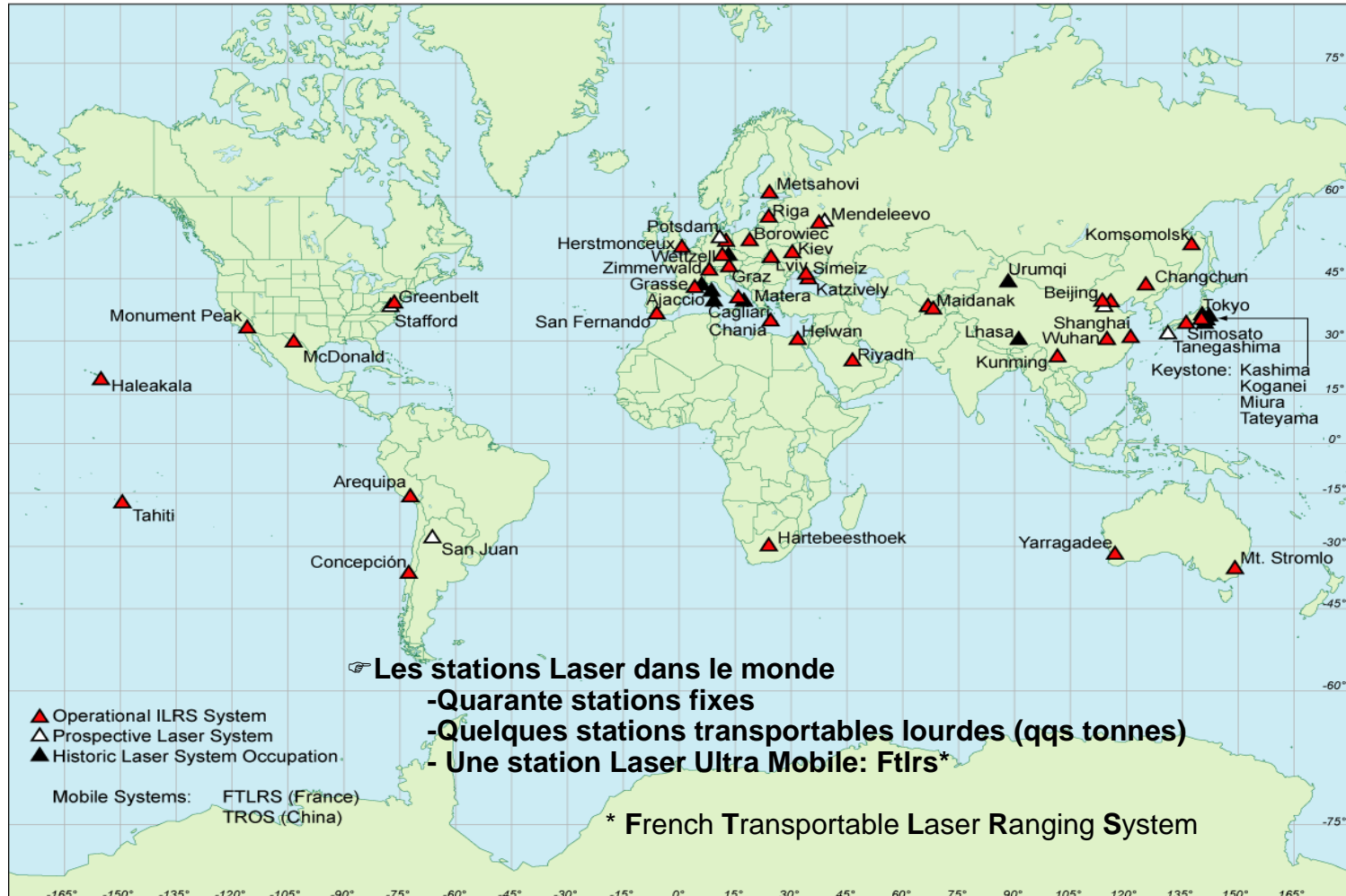
La télémétrie Laser dans le monde :

➤ Environ quarante stations réparties à la surface du globe

Programmes et opérations fédérés au niveau international par l'ILRS (International Laser Ranging Service)

Points forts : exactitude et réactivité du réseau

Points faible : répartition mondiale inhomogène



La télémétrie Laser en France (Laser satellites/Laser Lune)

Compétences fortes dans ce domaine dès les années 1970/1980

T2000 à Calern : dispositif homogène, rénové et scientifiquement pertinent

Station Meo

Télescope de 1,50 m
Satellites, Lune, sondes
R&D technologique



Laboratoire Station Mobile

Télescope de 13 cm
Satellites de 300 à 10000 km
A Calern :
Développements, Observations



La station laser ultra mobile française (CNES-OCA-IGN-INSU)



La station Laser Ultra Mobile :

Un outil de métrologie pour les projets scientifiques

- Etalonnage des altimètres embarqués sur Jason 1 & 2
- Système de référence (ITRF) par complétion des zone non instrumentées
- Métrologie du temps (projet T2L2)

• Le système de télémétrie Laser le plus compact au monde

Poids : 300 kg, Ø tél. = 13cm ,développé à l'OCA en 95/2000 et financé par le CNES/L'INSU/l'IGN

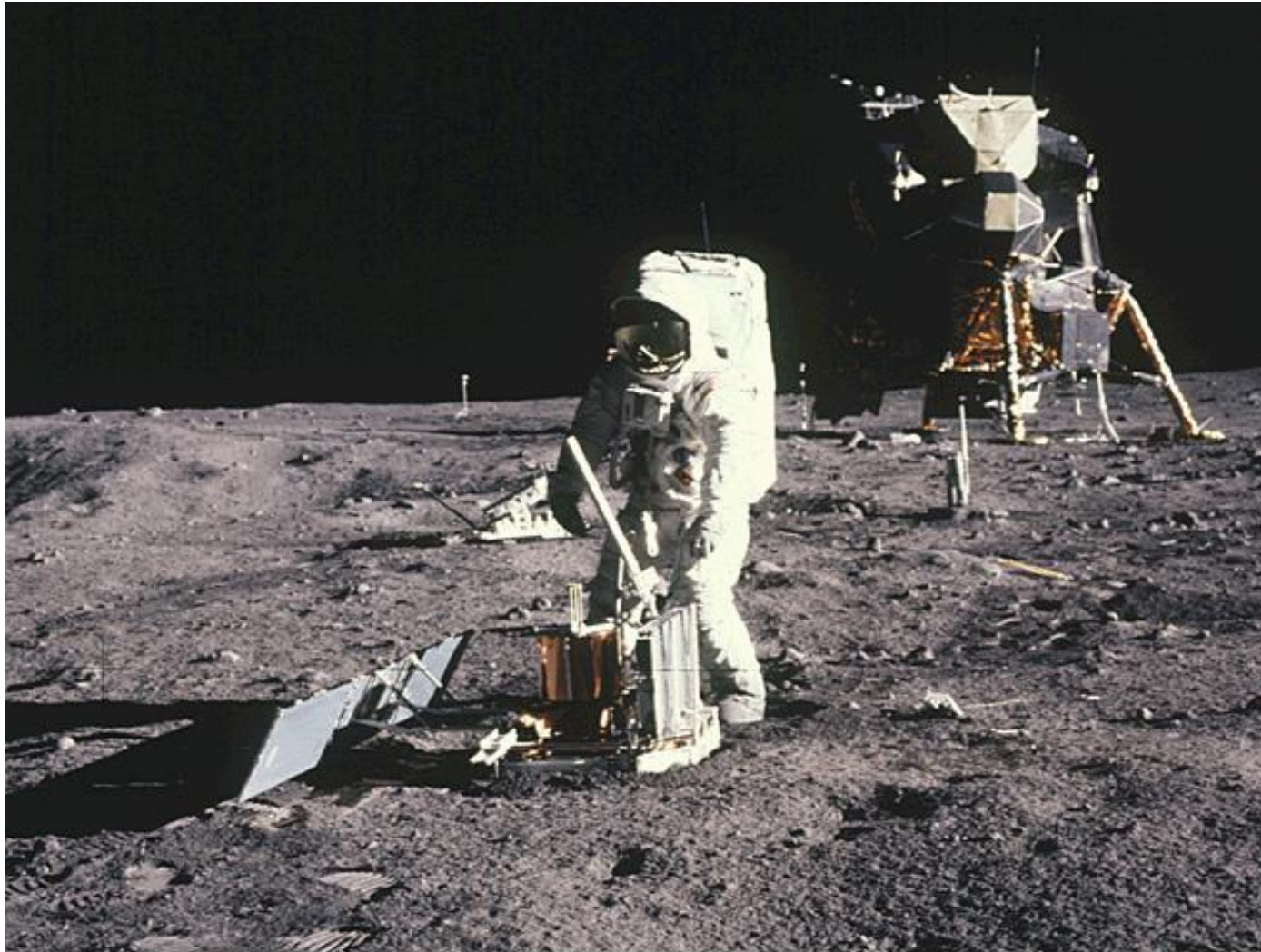
Opérationnel au meilleur niveau (exactitude, fiabilité) depuis 2002

- ↖ **Unique par la taille du télescope et sa compacité**
- ↖ **Unique par le temps de déploiement sur site (quelques jours)**
- ↖ **Réellement un défi technologique**

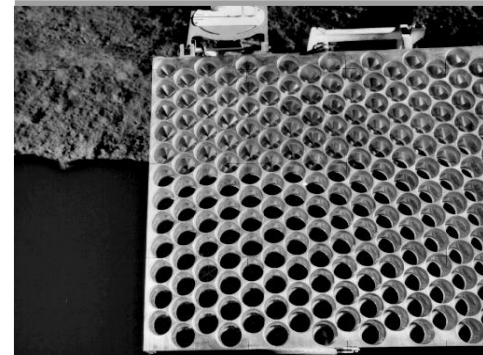
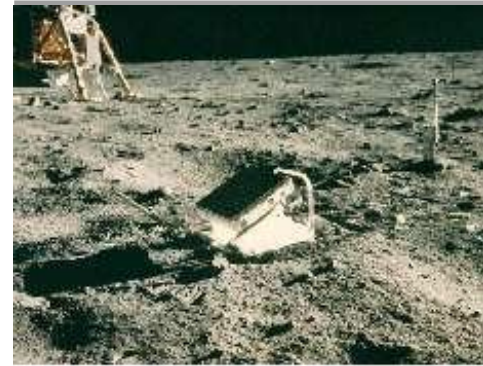
- 9 missions de 2 à 6 mois chacune depuis 1998
Ajaccio, Créte, Espagne, Tasmanie, Brest, Paris



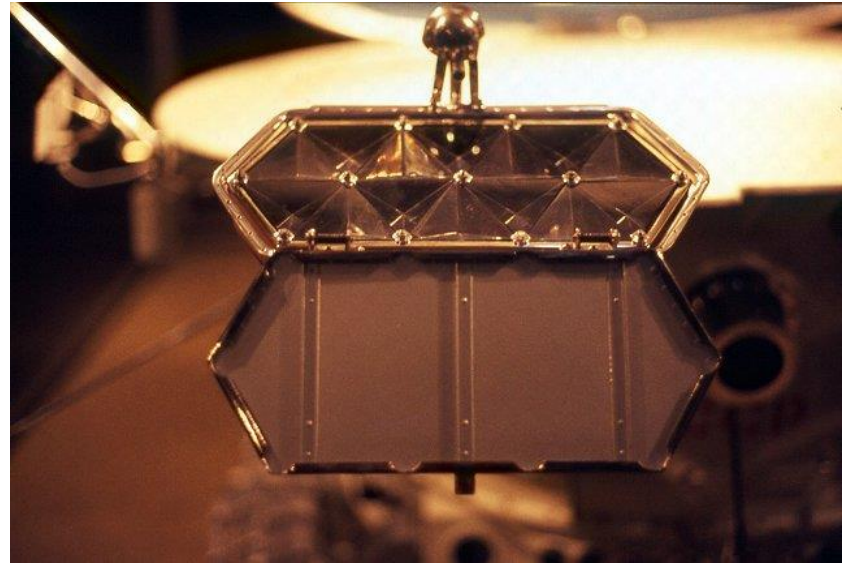
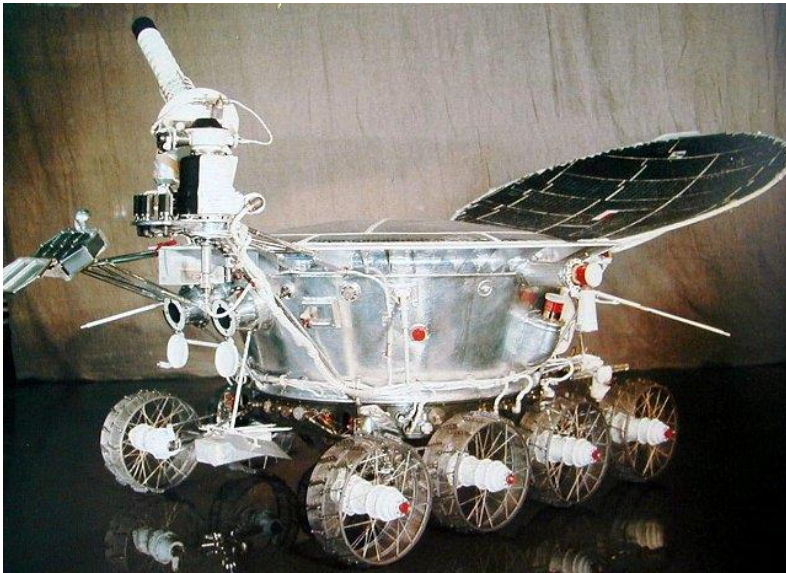
LLR : Le Laser-Lune



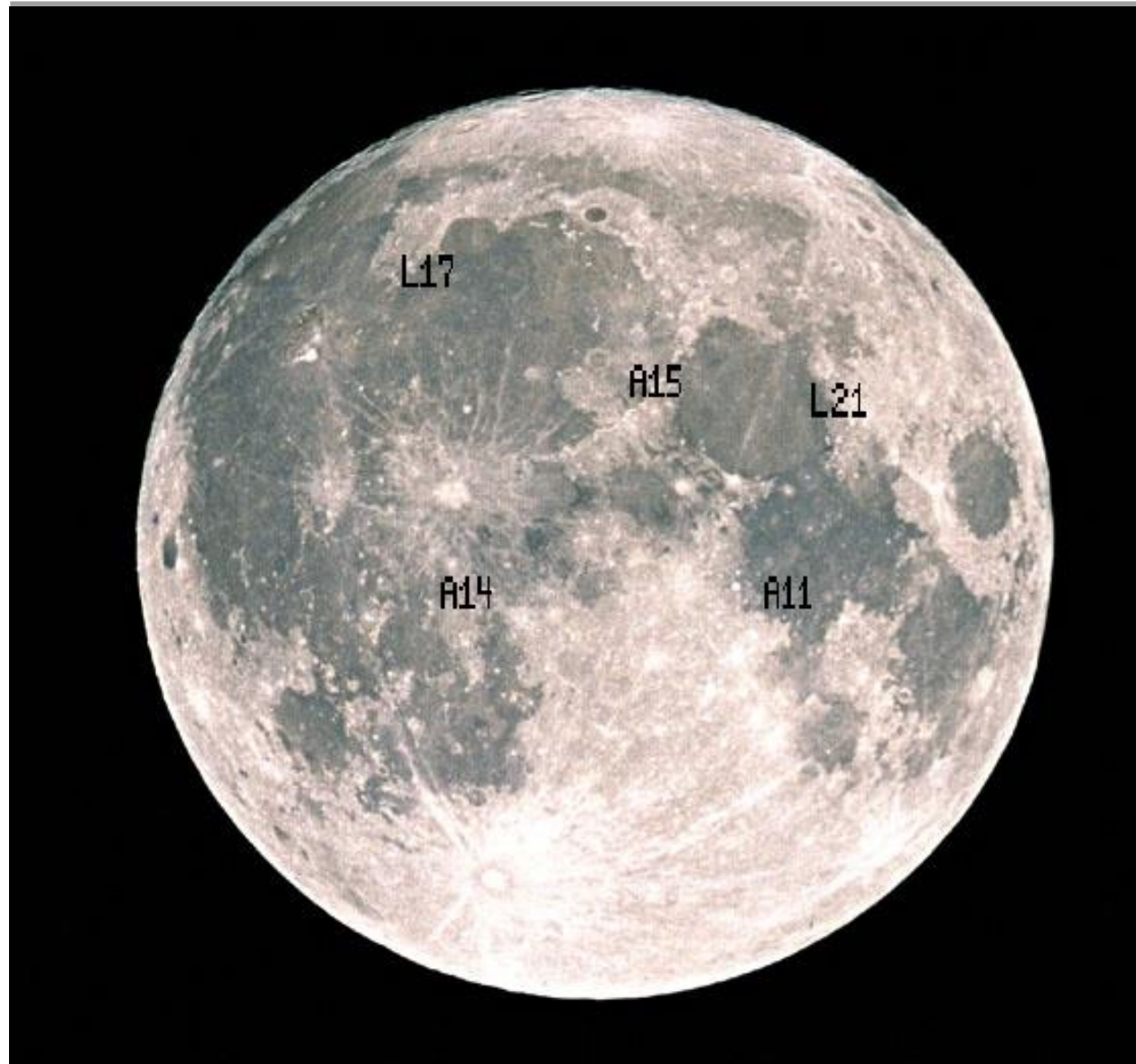
Les réflecteurs américains



Les réflecteurs français (missions Russes)

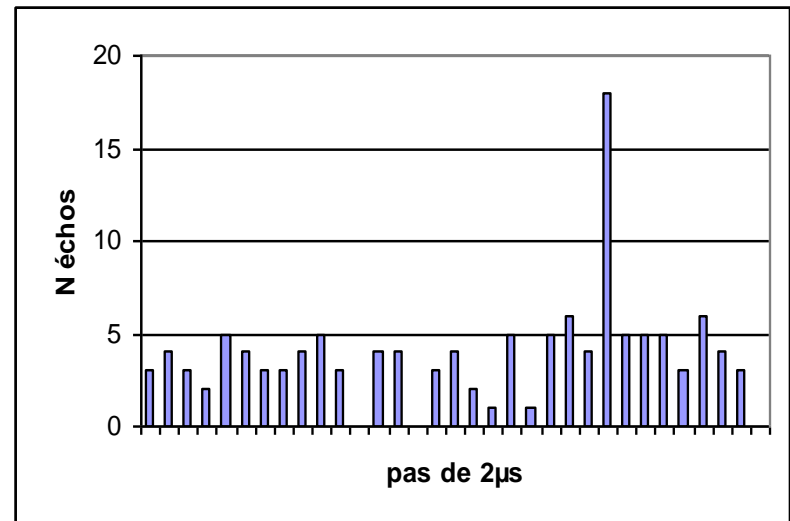


Position des réflecteurs sur la Lune



Premiers échos français au Pic du Midi

- Observations :
 - Pic du Midi : Nuit du 5 au 6 décembre 1970
 - Probabilité que ce soit du bruit : $3 * 10^{-6}$
 - Déplacement de Lunokhod1
 - Quelques échos en URSS



Télémétrie sur la lune les vingt dernières années



Figure : Station Meo, à Calern

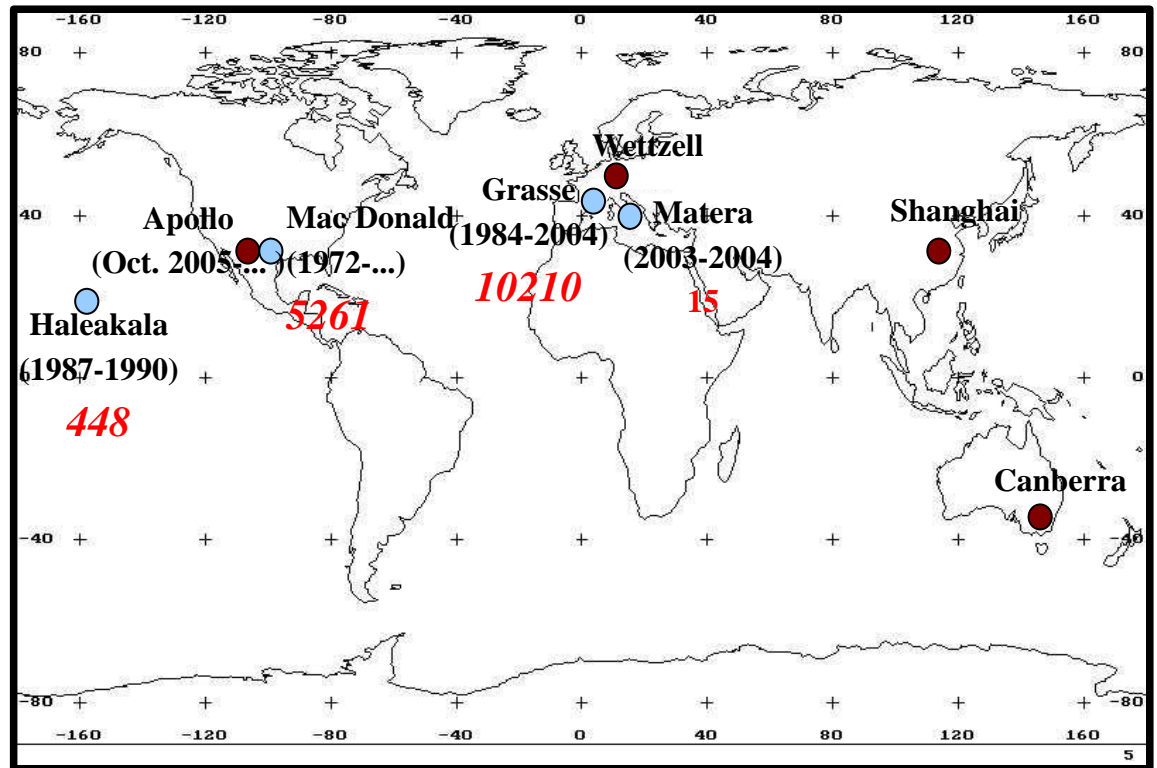
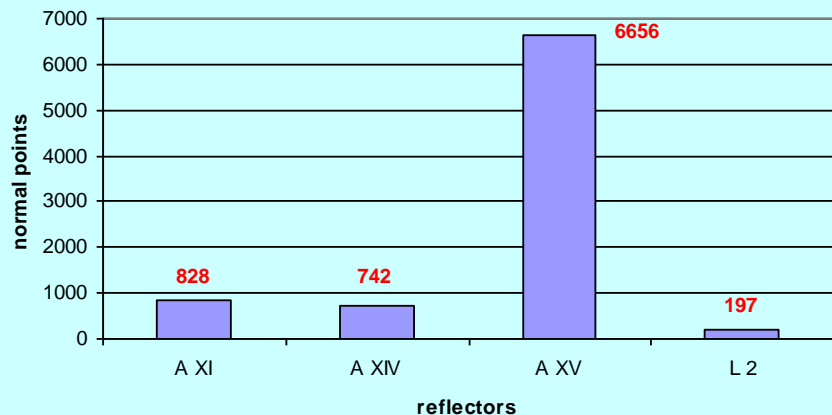


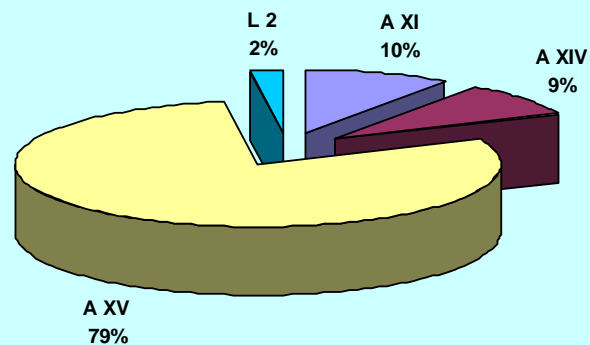
Figure : Nombre de points normaux obtenus depuis 1972

Résultats de 1987 à 2005

normal point by reflector
(total : 8423)



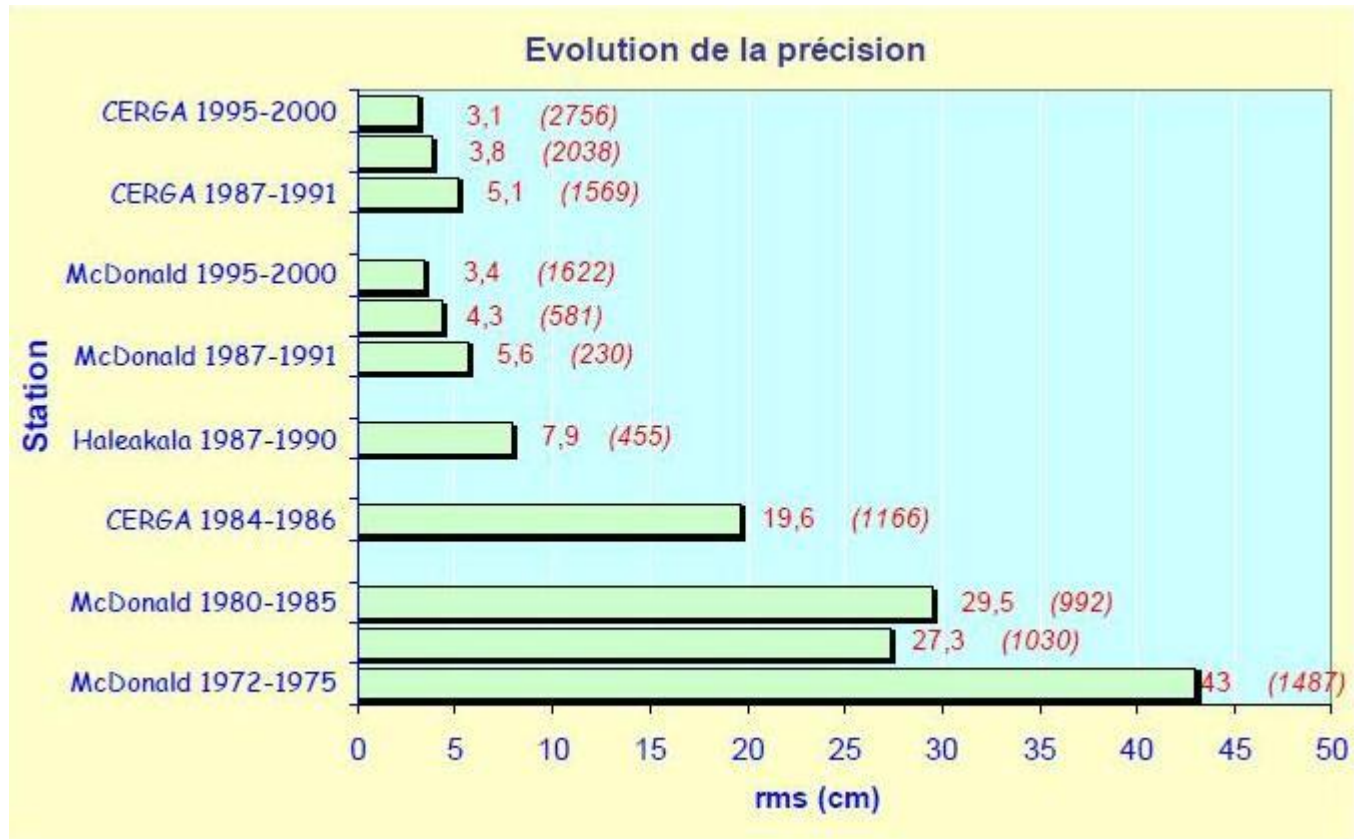
normal point percent by reflector



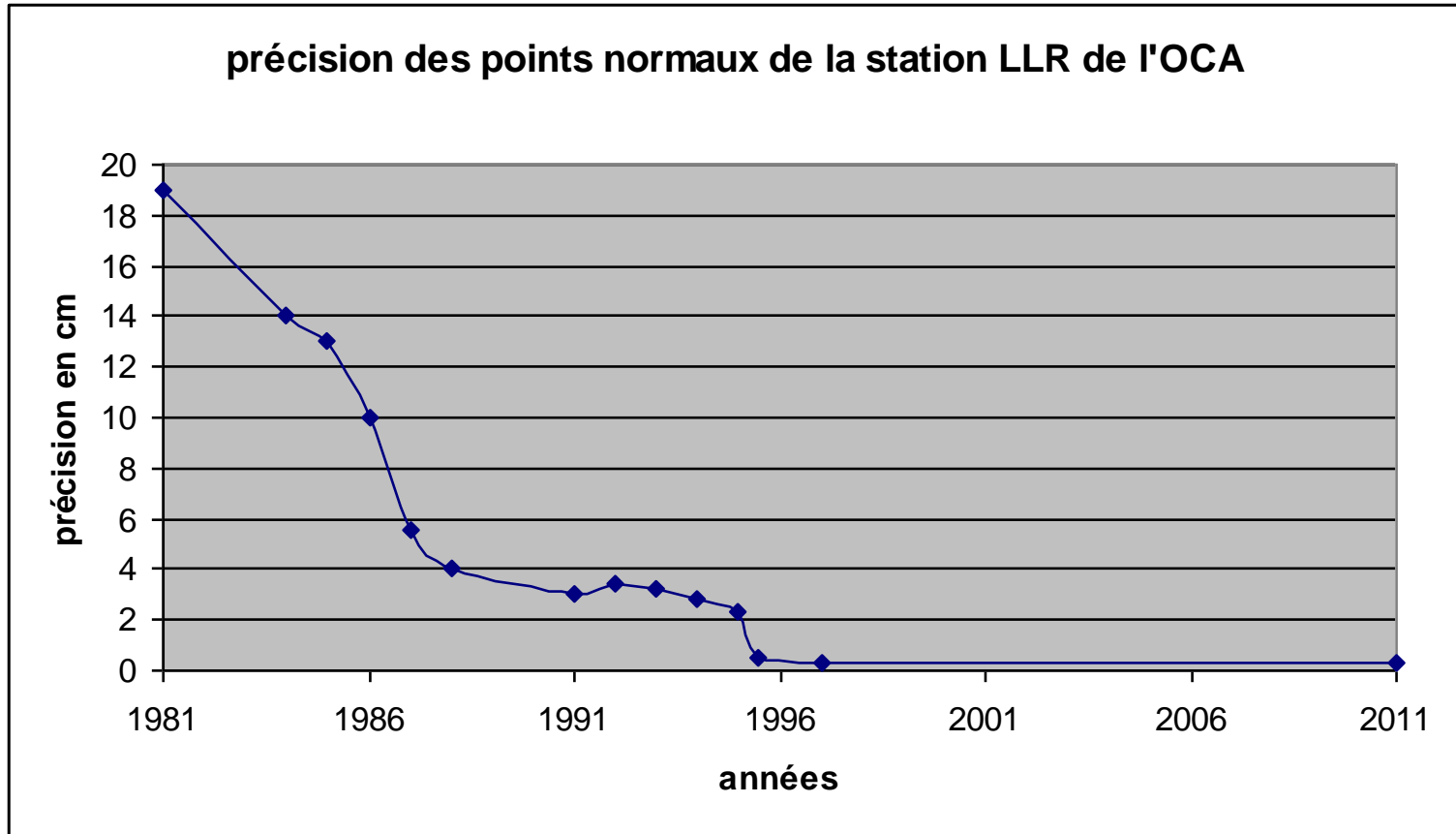
Le laser lune à l'OCA station MéO (7845)



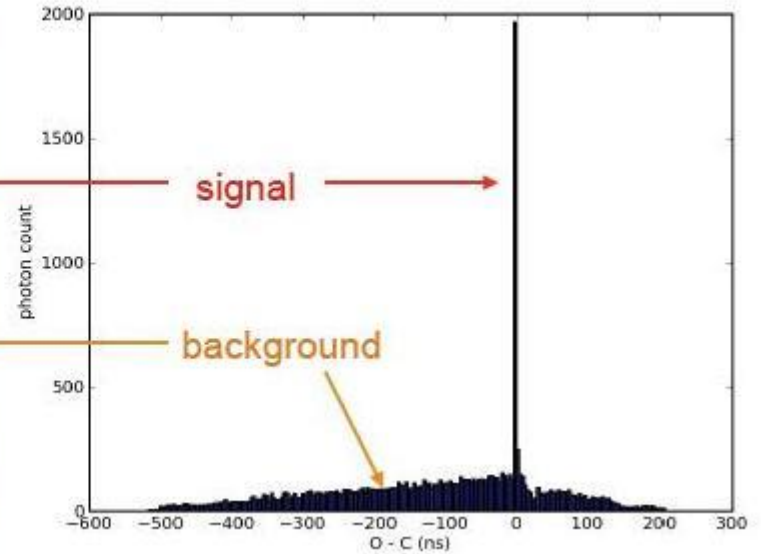
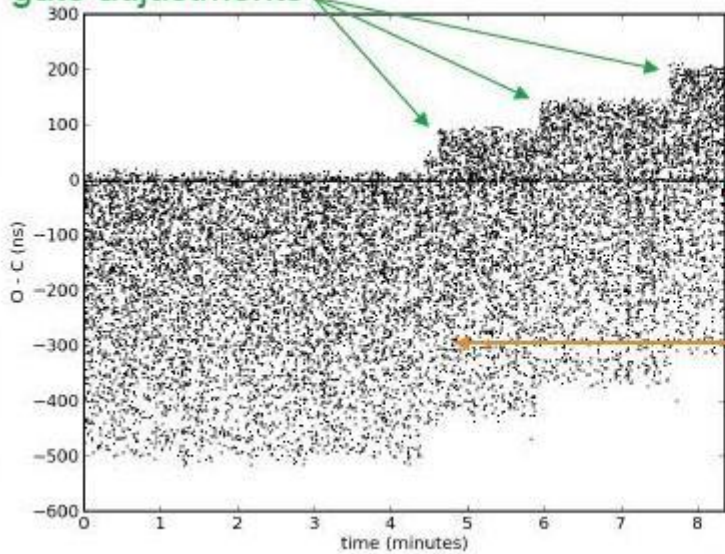
Evolution de la précision



Station LLR de Caussols



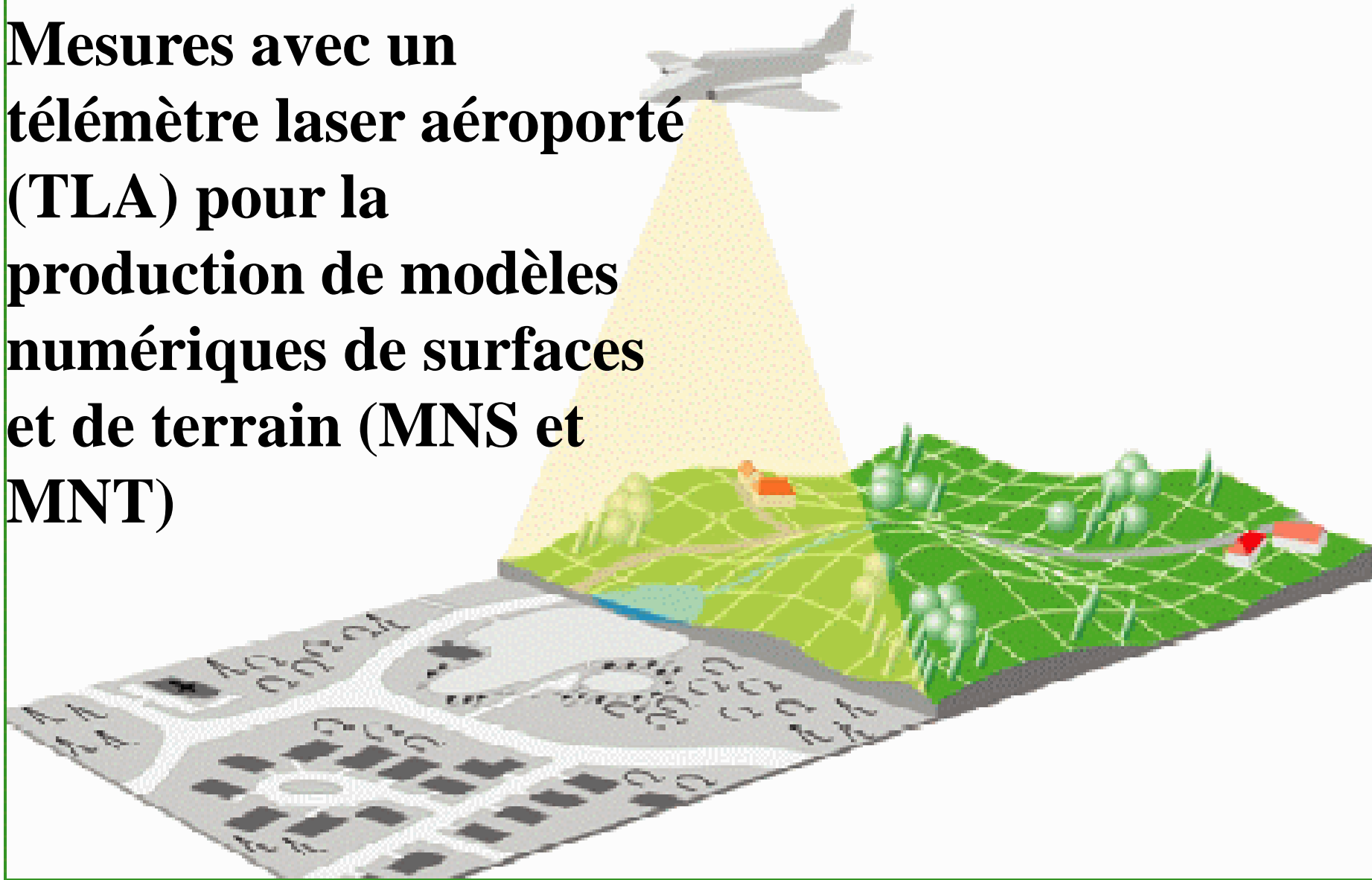
gate adjustments



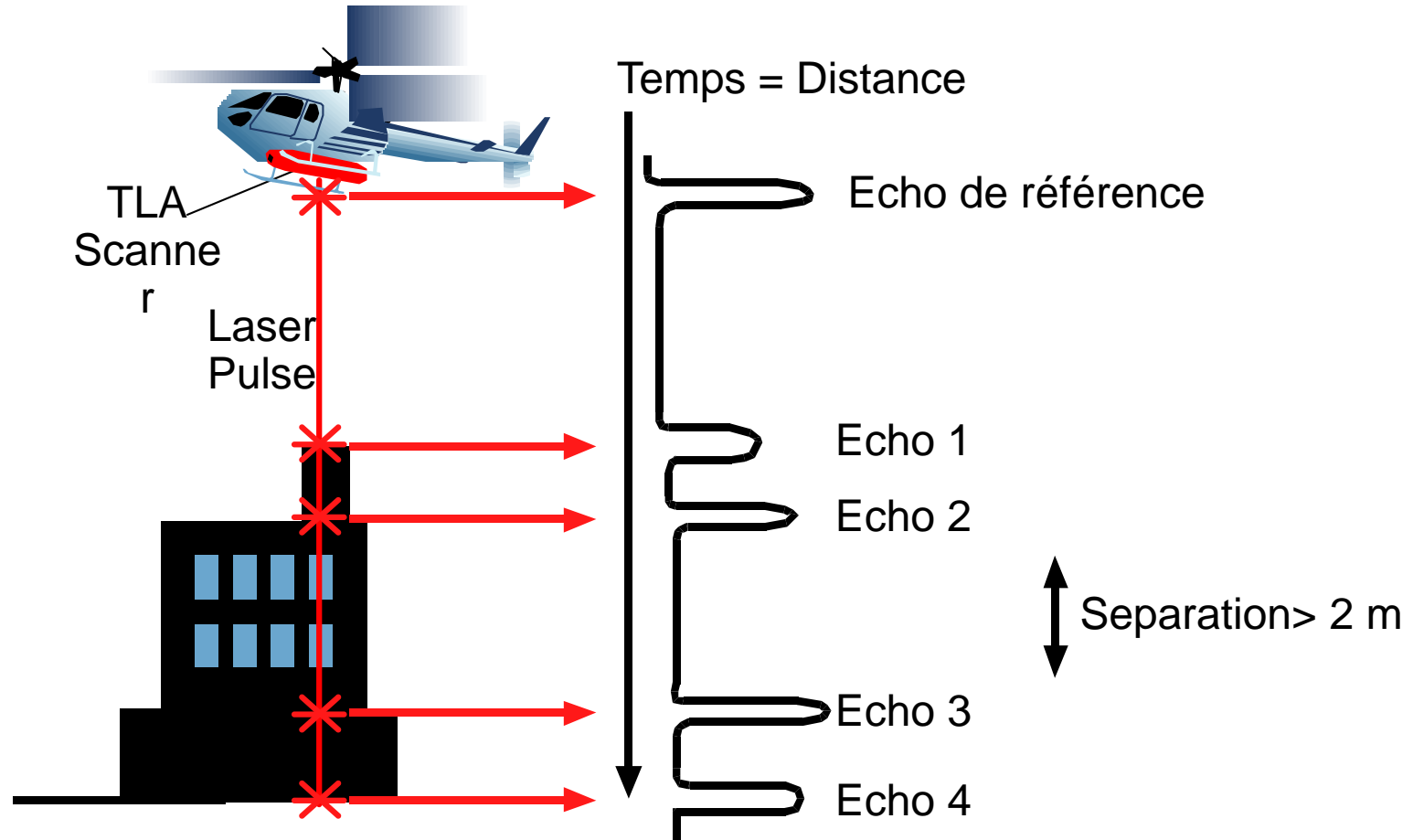
Lidar topo, domaines divers

- Directement connexe du domaine, les AEMD
- Autre variante, le SLR et LLR
- Le Lidar aéroporté, levers divers et p. ex. :
 - Obtention de MNT sous couvert forestier,
 - Levers linéaires (lignes HT),
 - Levers forestiers
- Le scanner laser terrestre
 - Levers urbains, bâtiments divers
 - Monuments historiques, patrimoine.

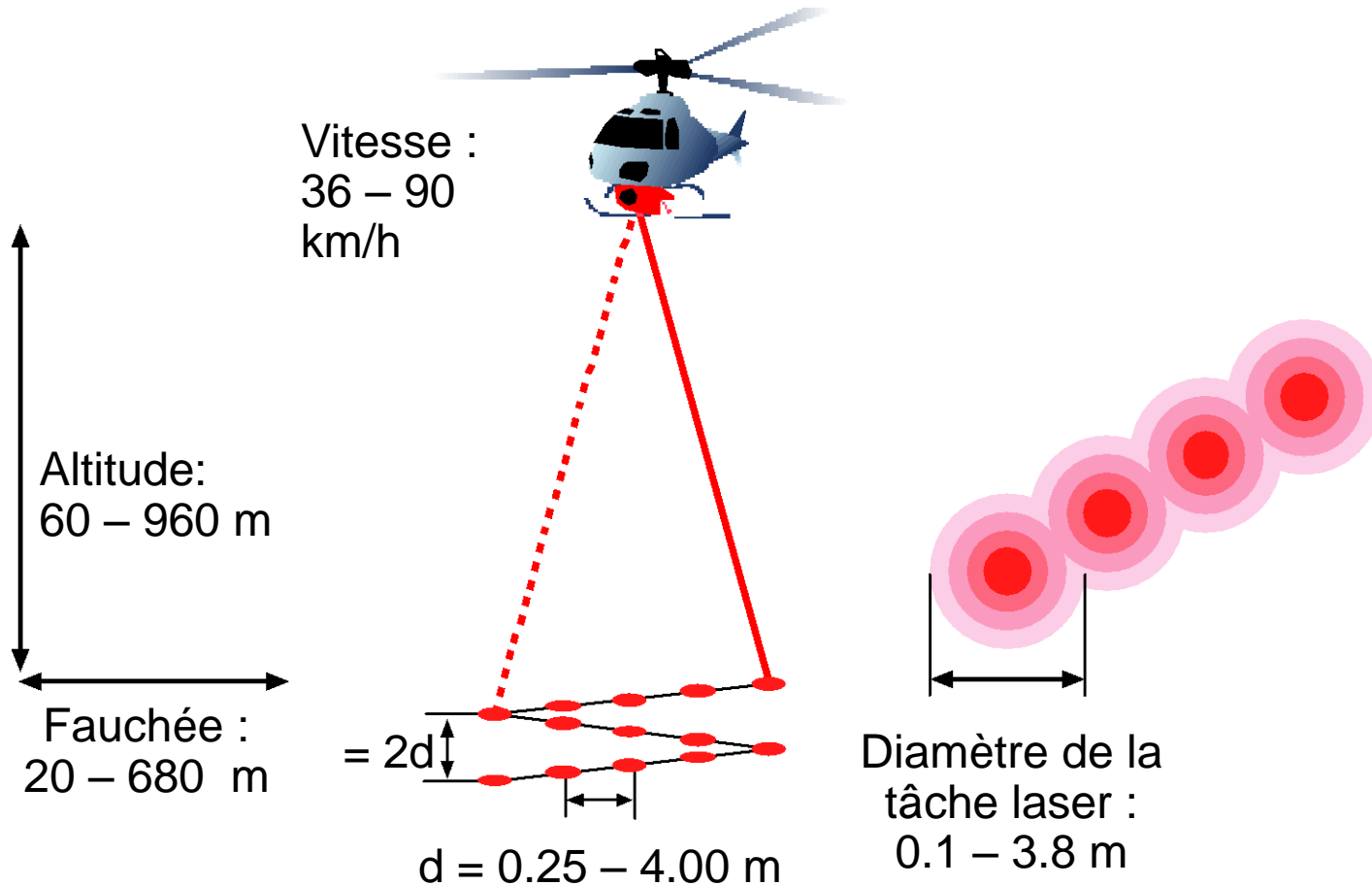
**Mesures avec un
télémètre laser aéroporté
(TLA) pour la
production de modèles
numériques de surfaces
et de terrain (MNS et
MNT)**



Principe du télémètre laser aéroporté



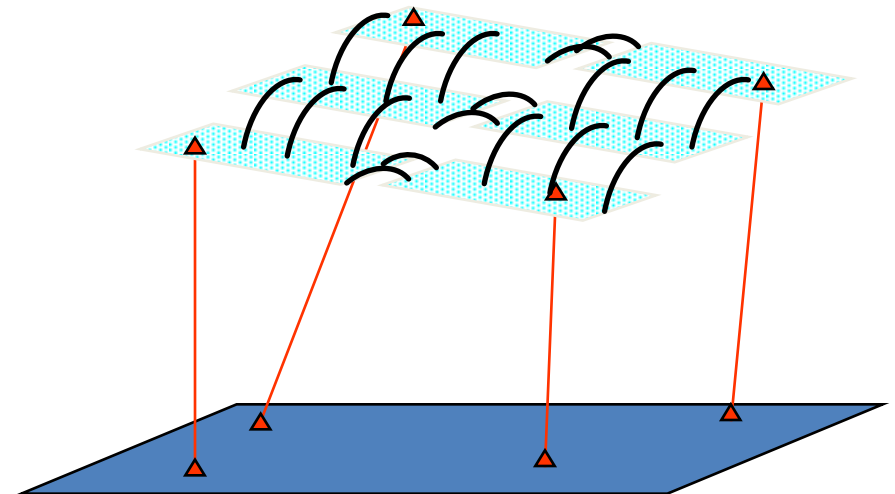
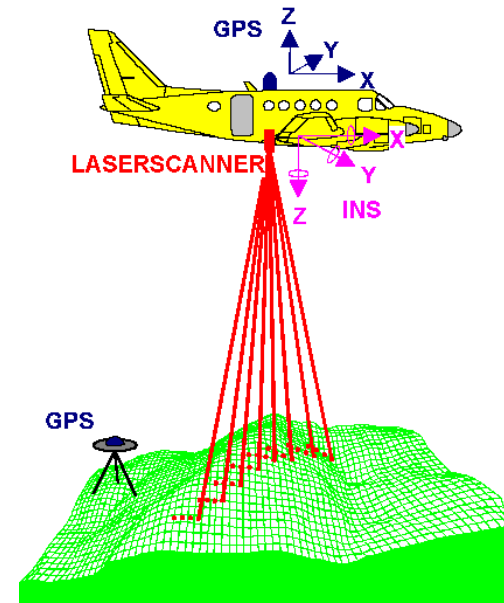
Principe du lever Laser : exemple en hélicoptère



- Orientation de la plateforme

- Interne (Plateforme inertielle, GPS multi-antennes, senseur stellaire,...)

- Externe, avec points de calage et points de liaison



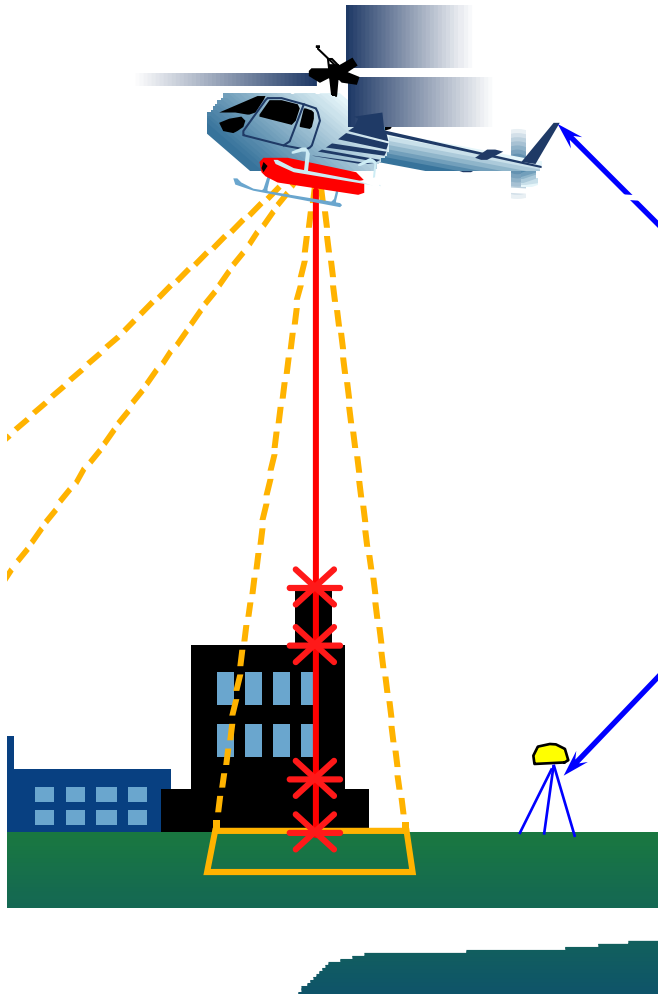
Positionnement

Systeme Inertiel

- Stabilisation
- Données d'Attitude
- GPS

Systeme GPS

Récepteur aéroporté
+
Récepteur de référence au
sol

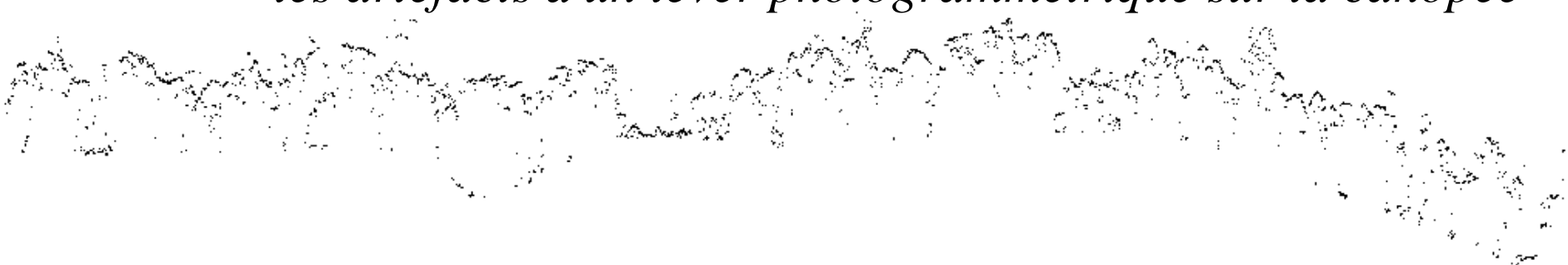




Lever en forêt tropicale (Guyane). Système ALTOA

On note :

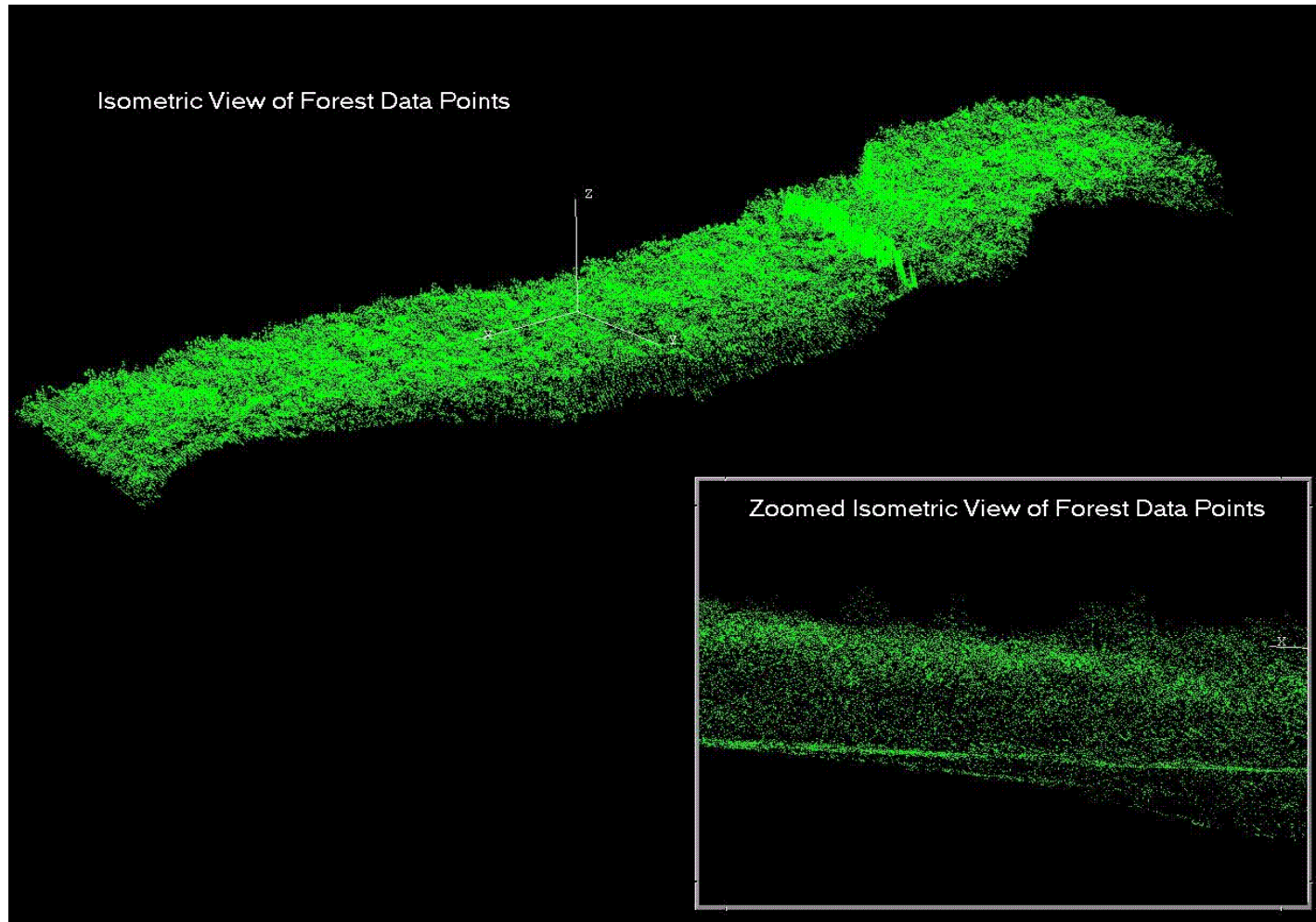
- *la difficulté qu'il y a pour identifier les points au sol*
- *les artefacts d'un lever photogrammétrique sur la canopée*





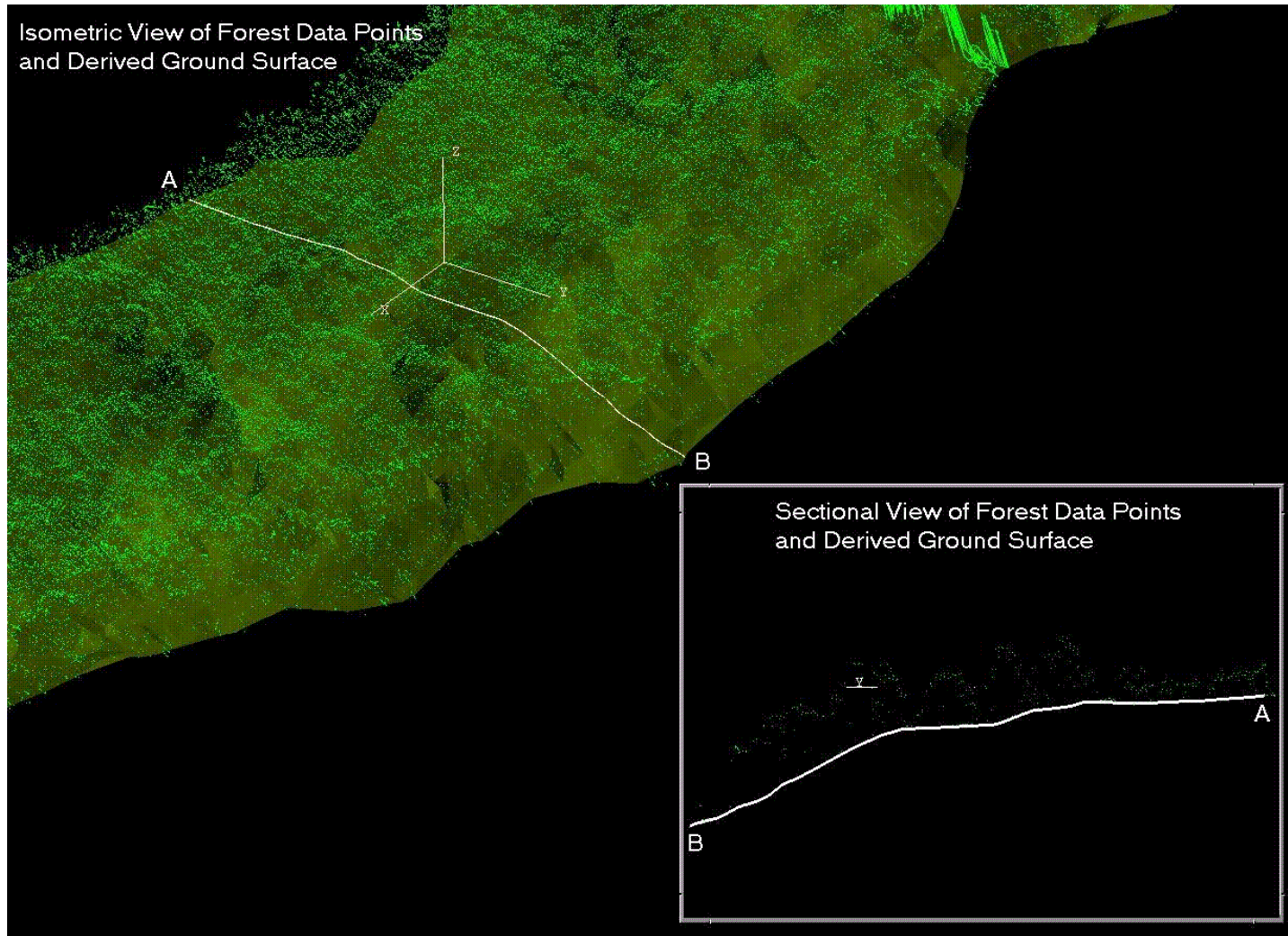


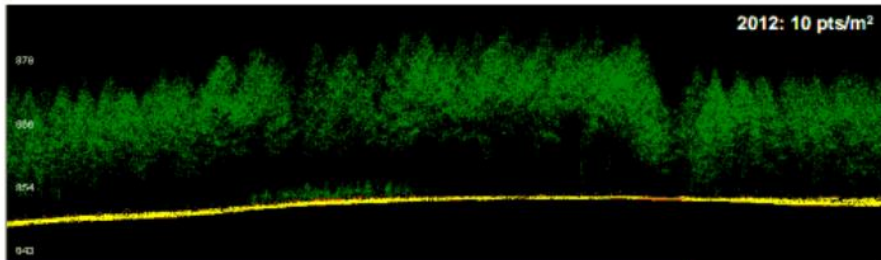
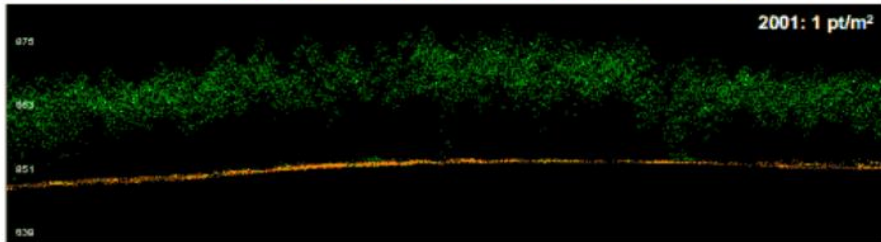
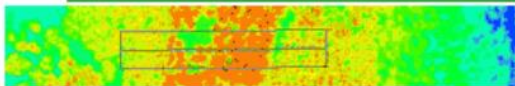
M. Kasser - Ecole d'été Lidar, Aspet 2013



MAPTEK

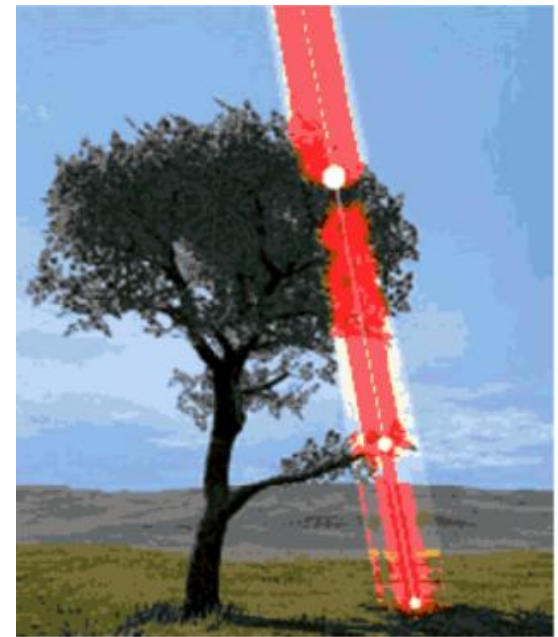
www.maptek.com



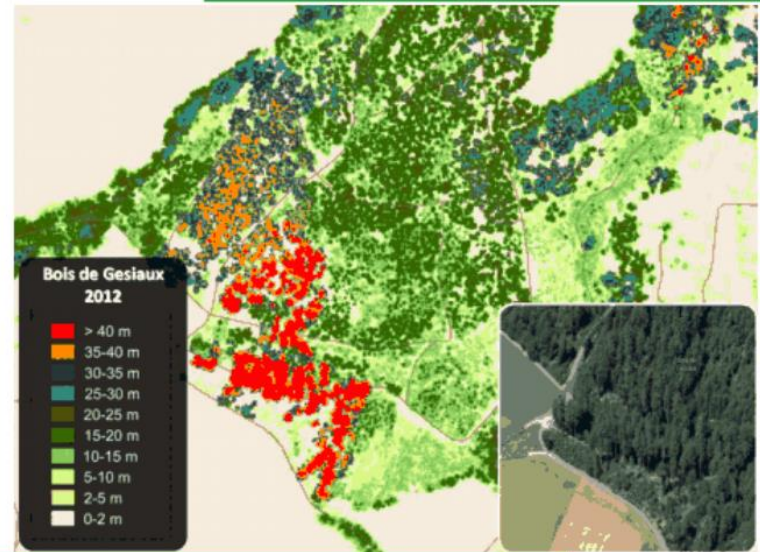


Données LIDAR et foresterie

7



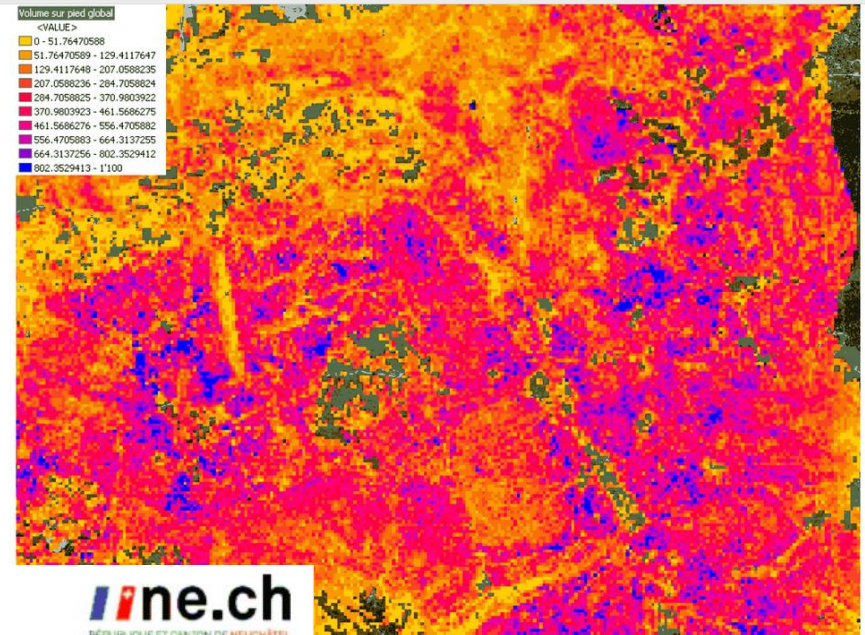
Cartographie de la hauteur de la canopée



Données LIDAR et foresterie

11

Les données LiDAR trouvent place à différents niveaux de la planification et de la gestion forestière multifonctionnelle :

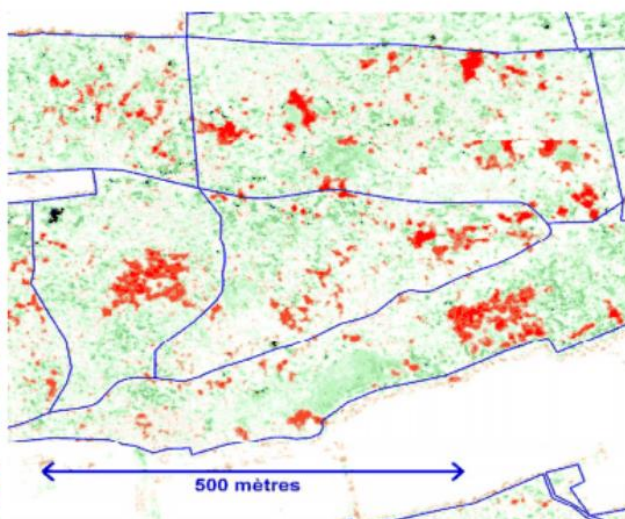
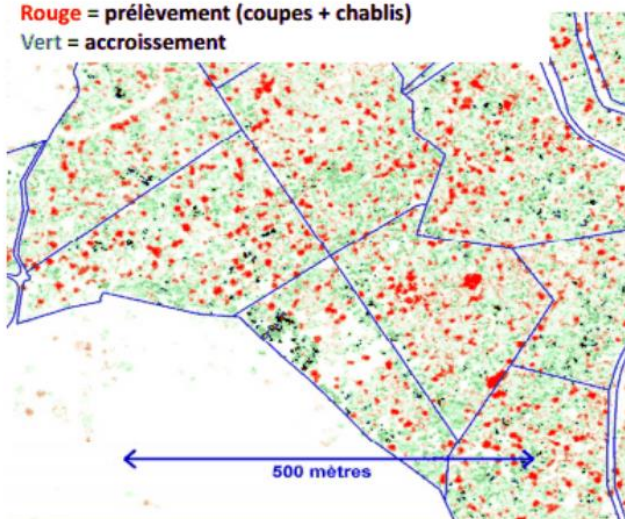


Visualisation de la stratégie de rajeunissement de la forêt



Changements dans la canopée entre 2002 et 2010

Rouge = prélèvement (coupes + chablis)
Vert = accroissement

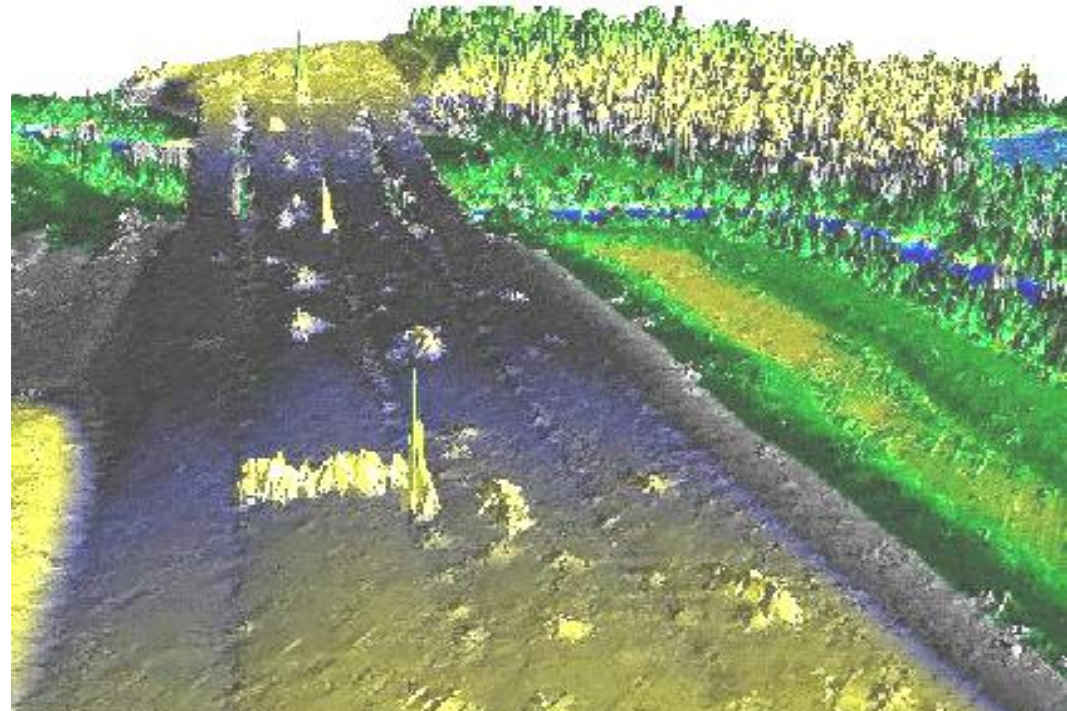


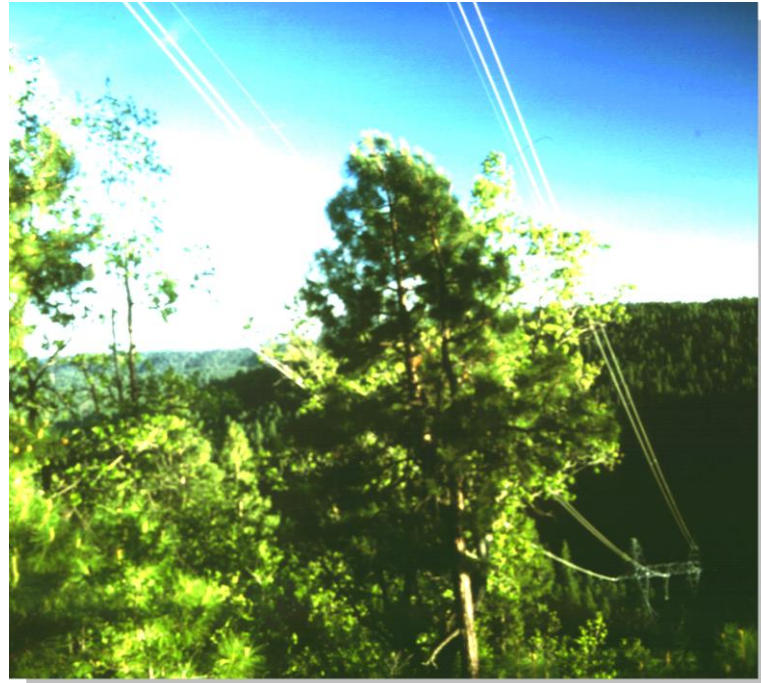
Forêt jardinée pied par pied
La Joux Pélichet / Le Locle, 1020 m, hêtraie à sapin

Forêt irrégulière en mosaïques
Bois des chênes, Corcelles, 700 m, hêtraie à luzules

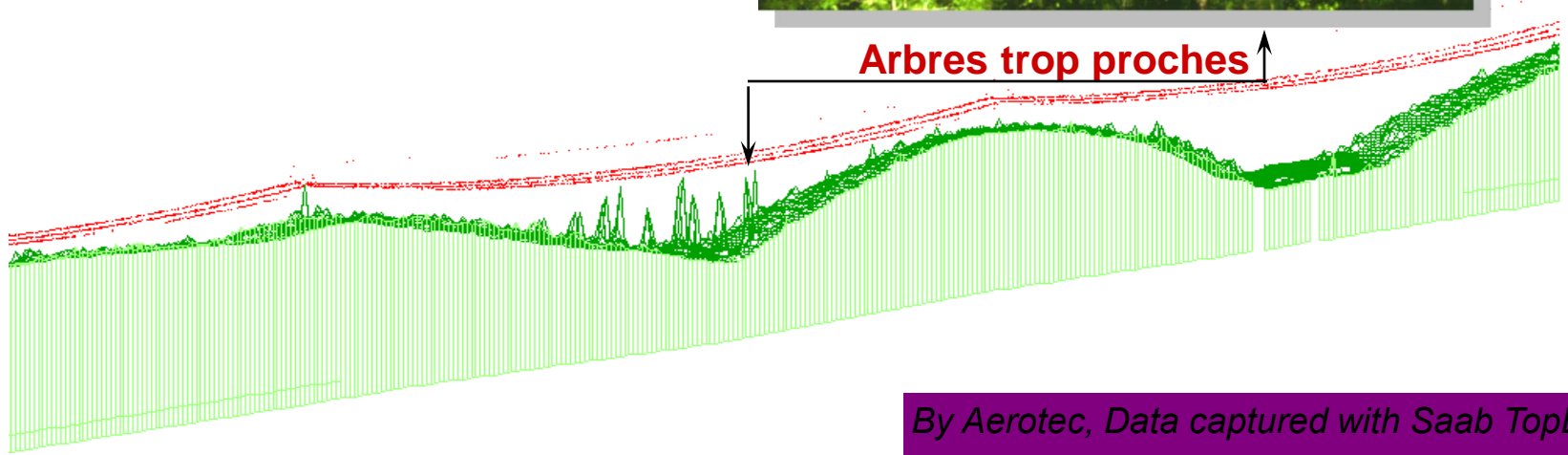
M. Kasser - Ecole d'été Lidar, Aspet 2013

Un exemple de lever de lignes à haute tension





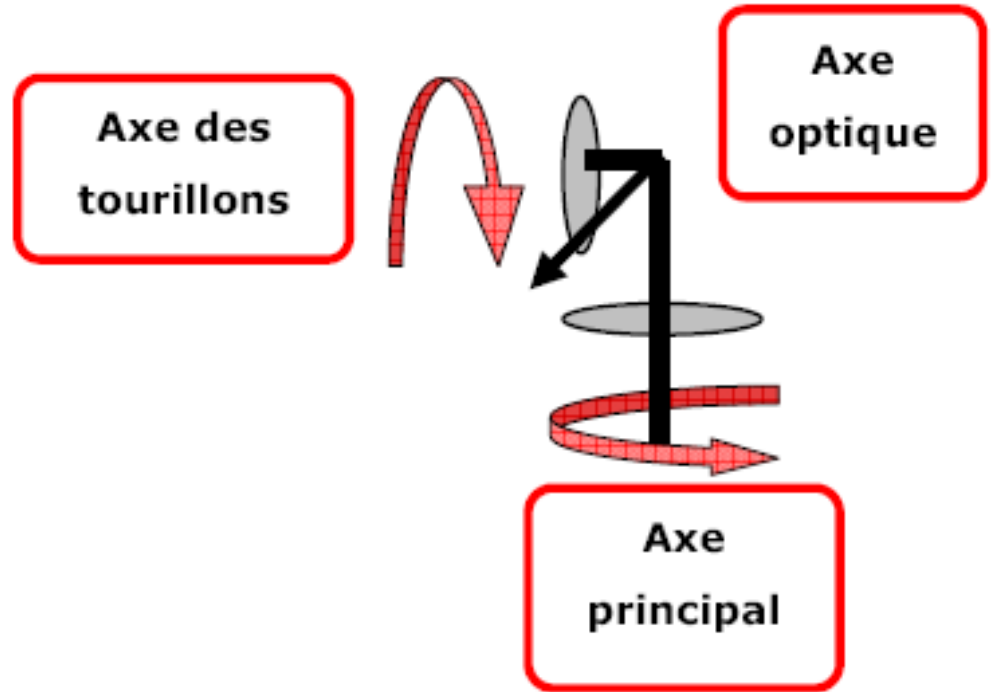
Arbres trop proches



By Aerotec, Data captured with Saab TopEye™

Lidar topo, domaines divers

- Directement connexe du domaine, les AEMD
- Autre variante, le SLR et LLR
- Le Lidar aéroporté, levers divers et p. ex. :
 - Obtention de MNT sous couvert forestier,
 - Levers linéaires (lignes HT),
 - Levers forestiers
- Le scanner laser terrestre
 - Levers urbains, bâtiments divers
 - Monuments historiques, patrimoine.



Les constructeurs



Leica-geosystems (Cyrax)



Faro



Riegl



Zoller+Frölich



Trimble (Mensi)



www.geo-matching.com / GIM International

Exemple de caractéristiques techniques:

Leica ScanStation 2

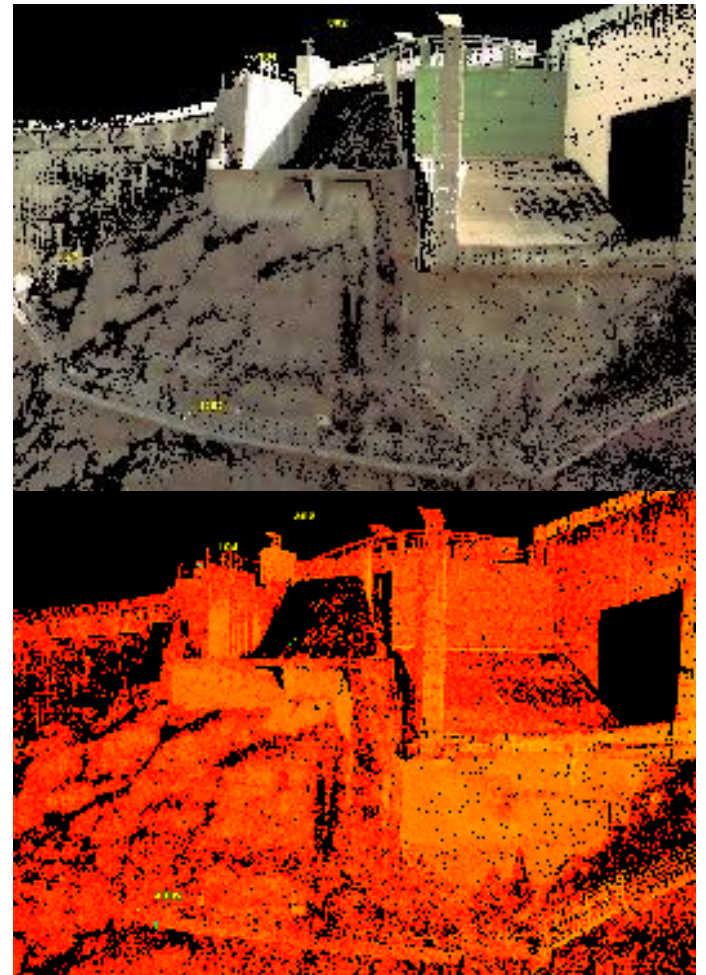
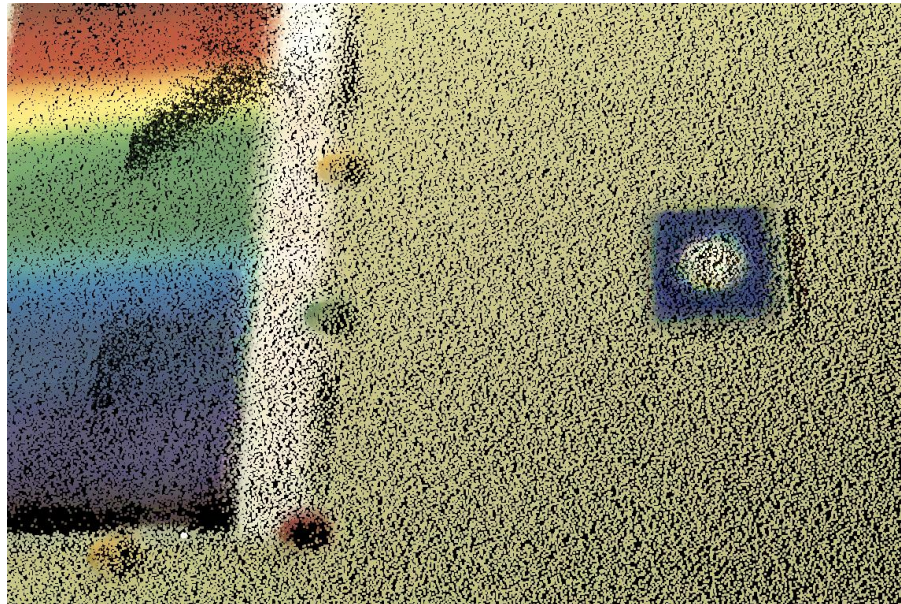
Performances		Système de scanner laser	
		Type	Pulsé ; micropuce caractéristique
Précision d'une mesure		Couleur	Vert
Position*	6 n	Classe laser	3R (IEC 60825-1)
Distance*	4 n	Portée	300 m pour une surface réfléchissante à 90 %; 134 m pour une surface réfléchissante à 18%
Angle (horizontal/vertical)	60	Vitesse de scan	jusqu'à 50,000 points/sec
Surface modélisée :			Moyenne : dépend de la densité spécifique du scan et du champ de visée
précision**/bruit	2 n	Résolution des scans	
Acquisition de cible***	2 n	Taille du point :	Entre 0 – 50 m : 4 mm (base FWHH); 6 mm (base Gauss)
Compensateur bi-axial	Sél	Configurabilité	Espacement de mesure entre points sélectionnable indépendamment en horizontal et en vertical ¹
	Ré	Espacement des points	Sélection possible sur tout le champ horizontal et vertical; < 1 mm minimum d'espacement, sur tout le champ ¹ ; capacité de position. sur un seul point
Contrôle d'intégrité des données	poi		
	Au	Echantillon maximum densité	< 1 mm ¹
	for	Champ visuel (par scan)	
		Horizontal	360° (maximum) ¹
		Vertical	270° (maximum) ¹



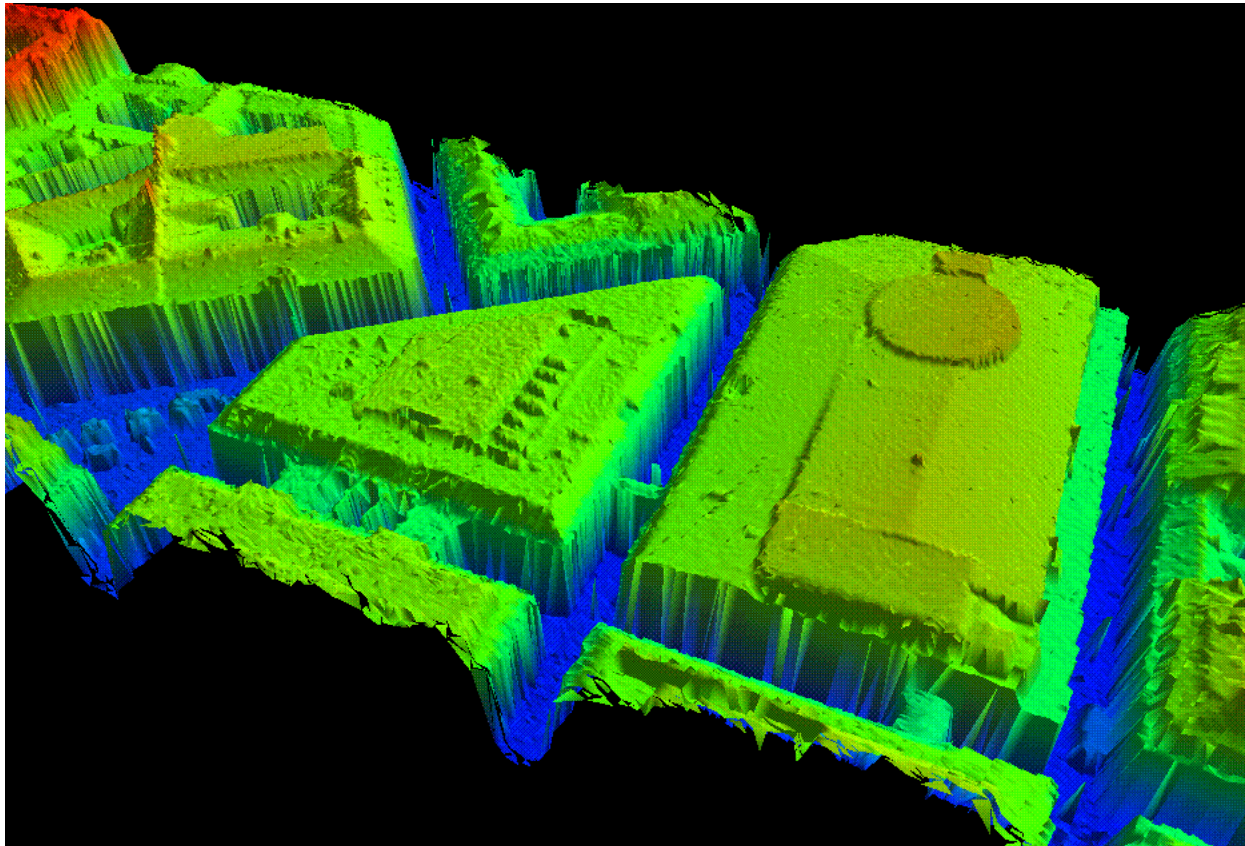
Source: www.Leica-geosystems.com

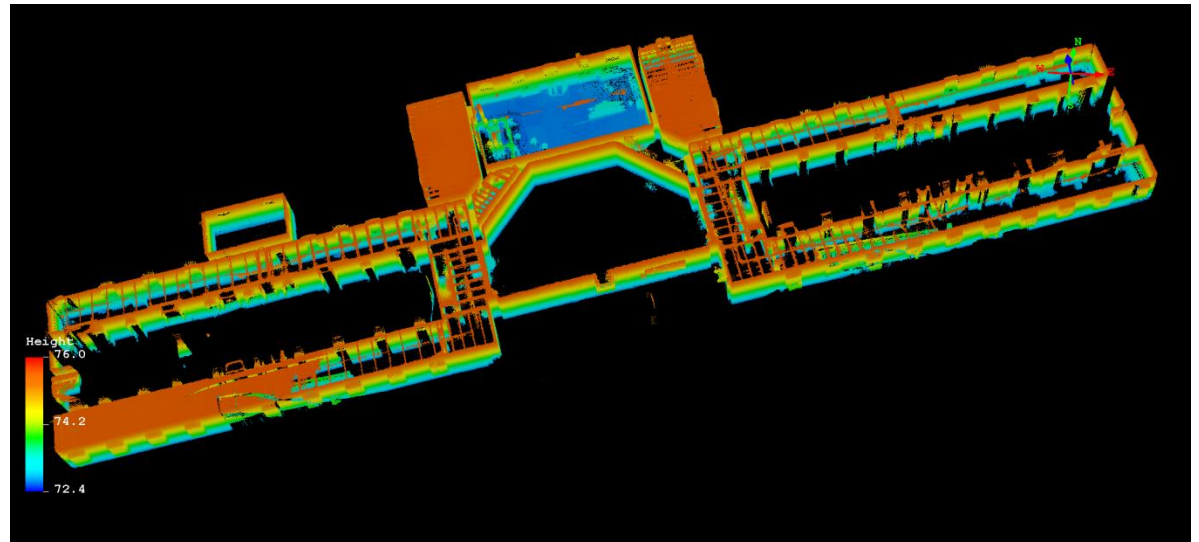
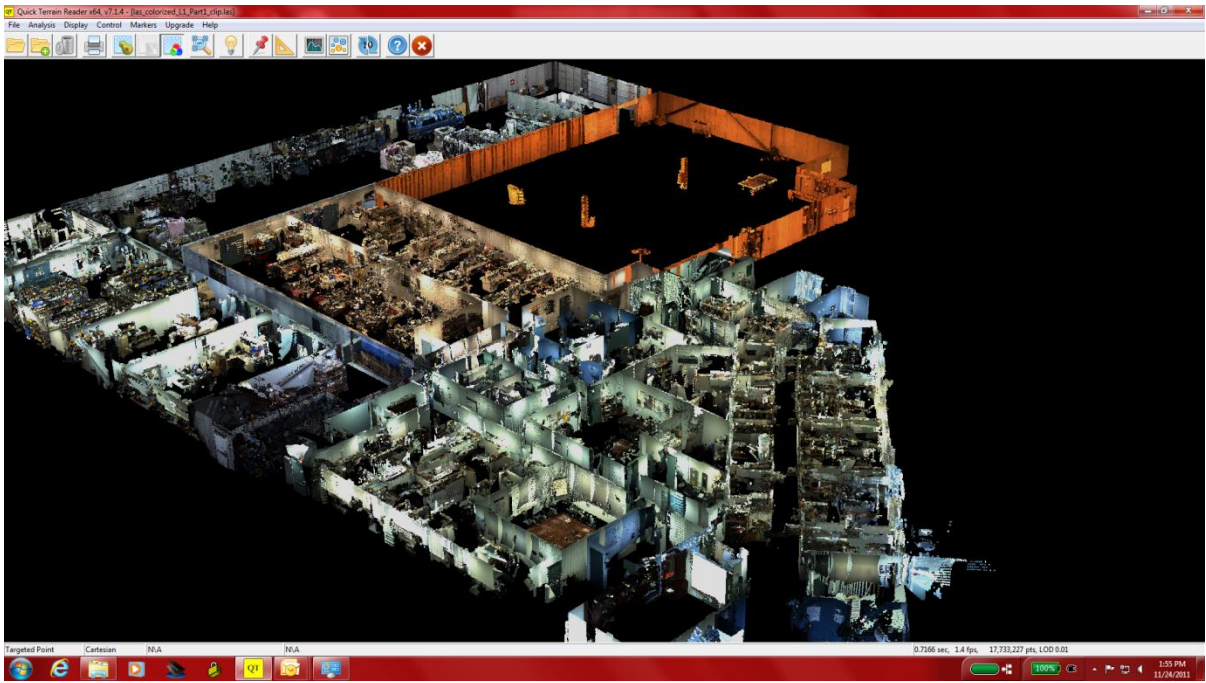
Résultats bruts

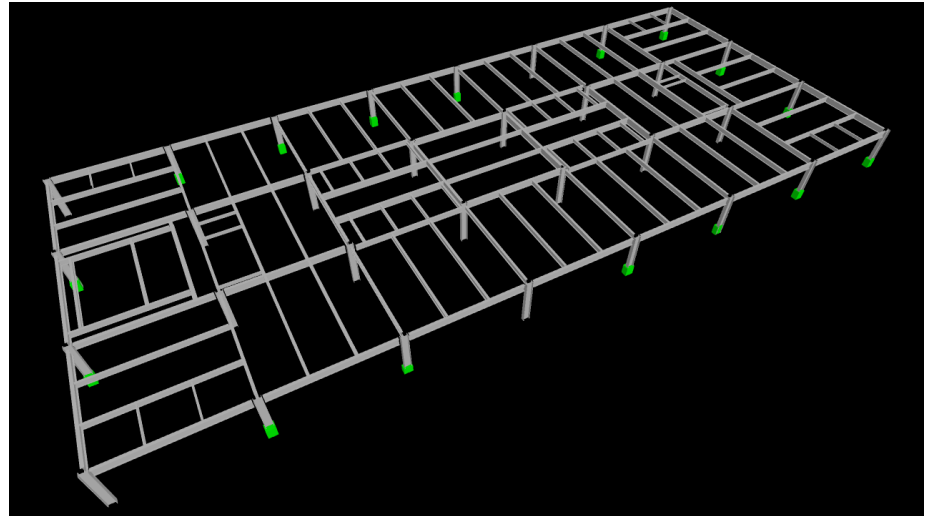
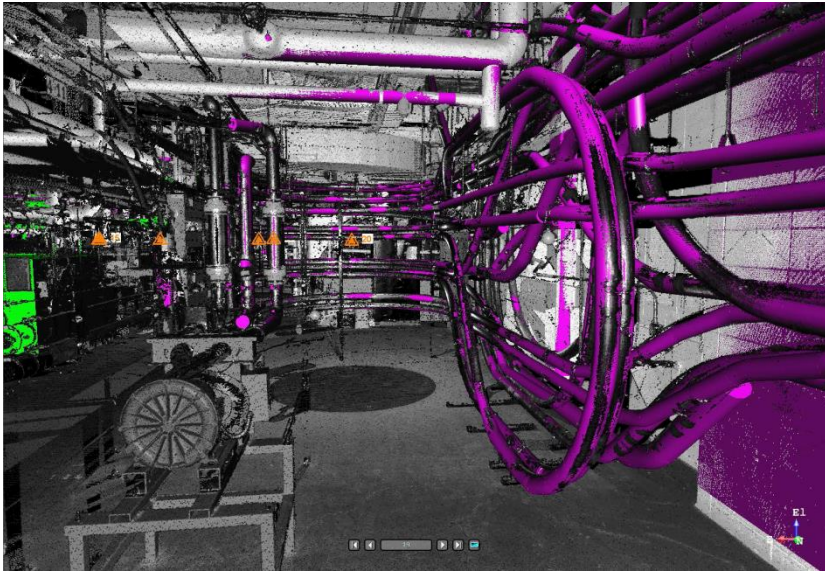
Les représentations du nuages

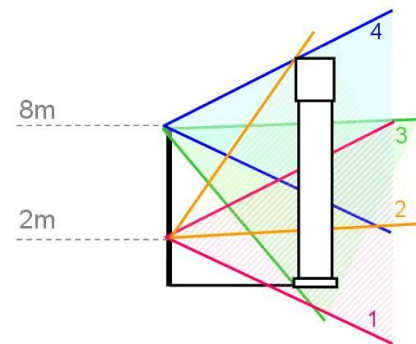
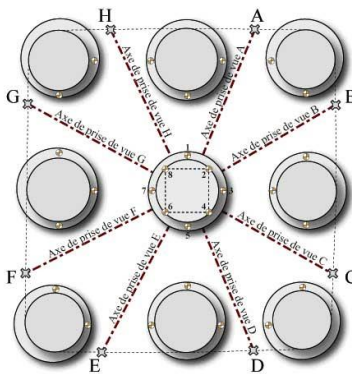
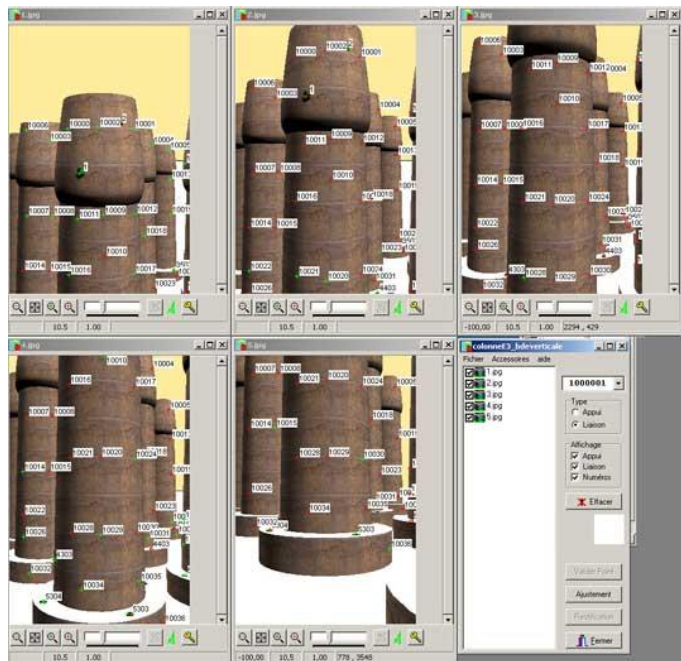
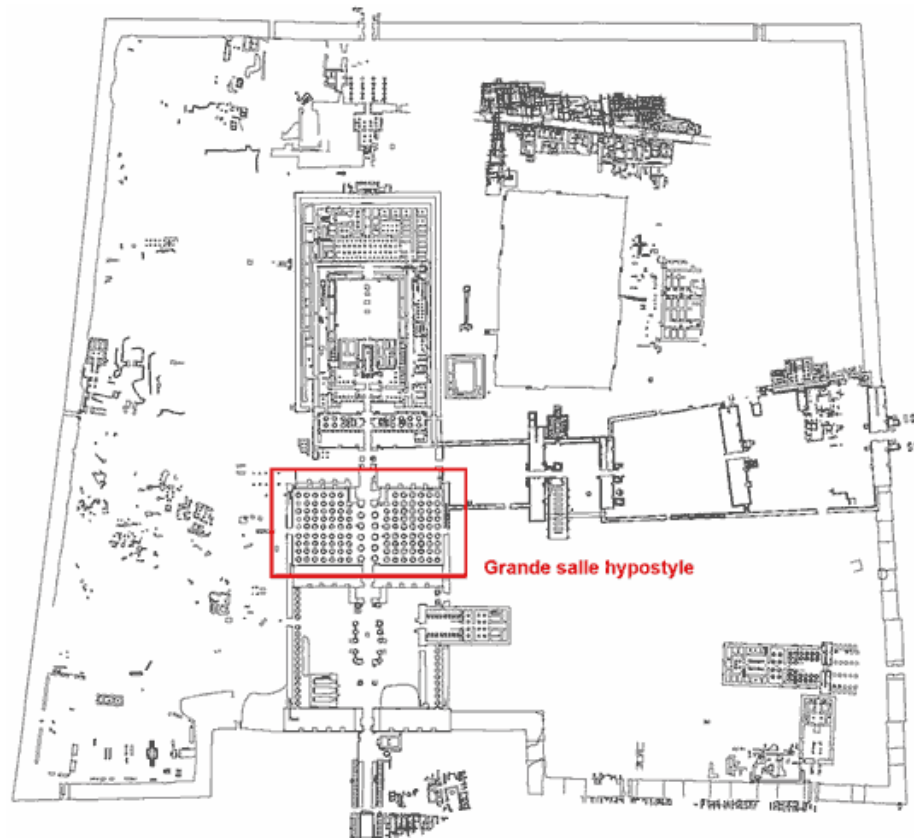


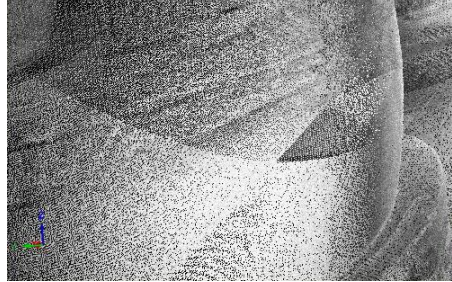
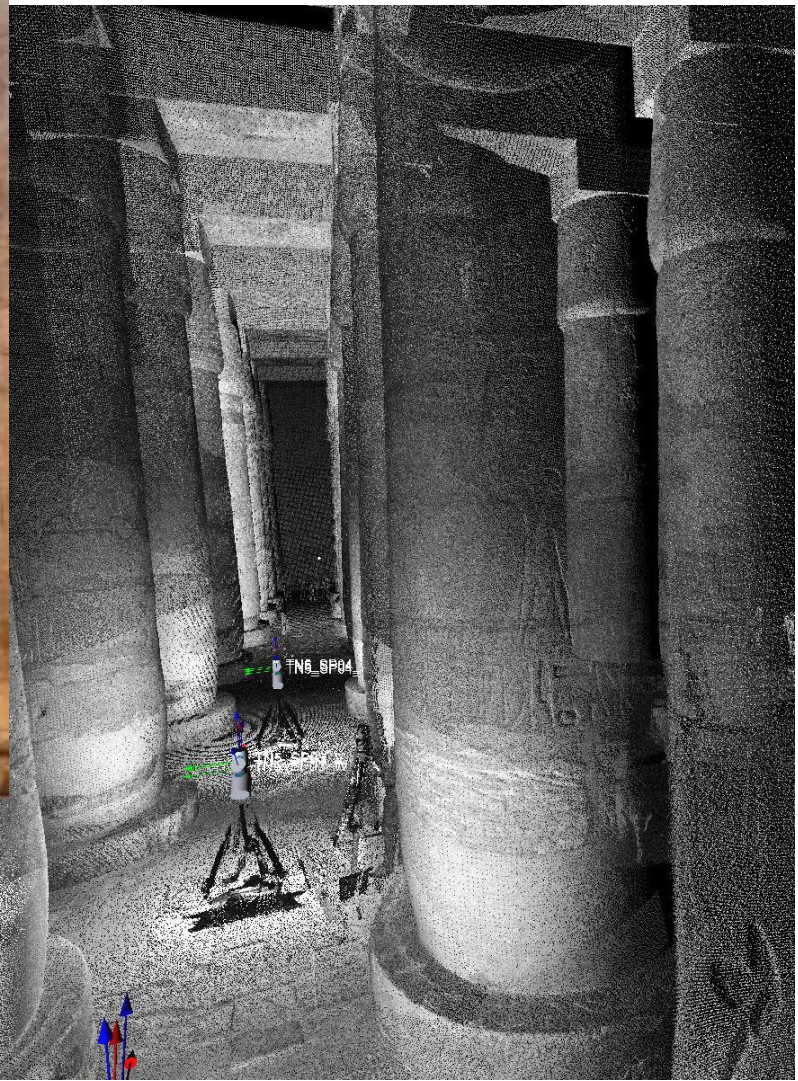
Données triangulées vues en perspective (teintes hypsométriques)





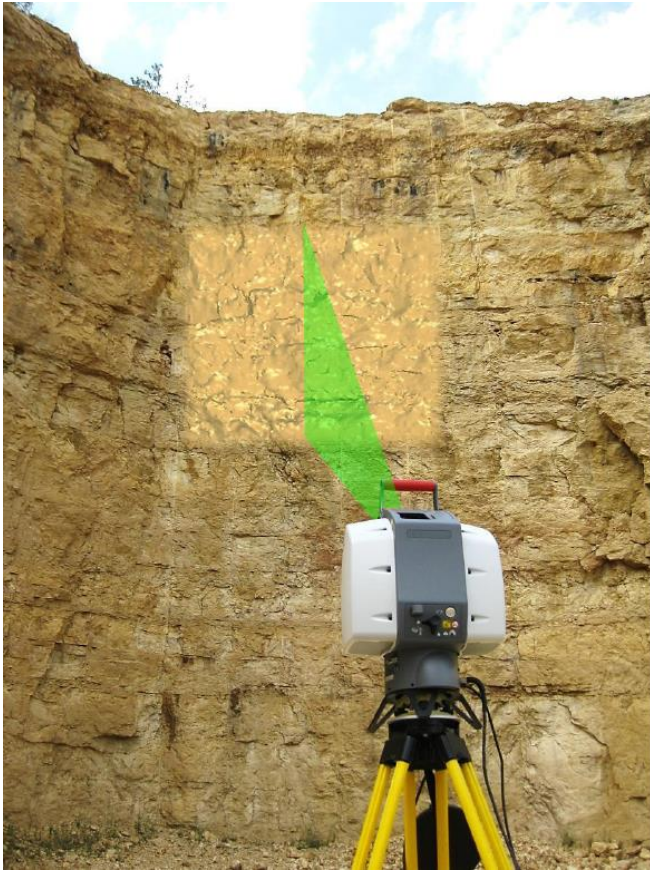




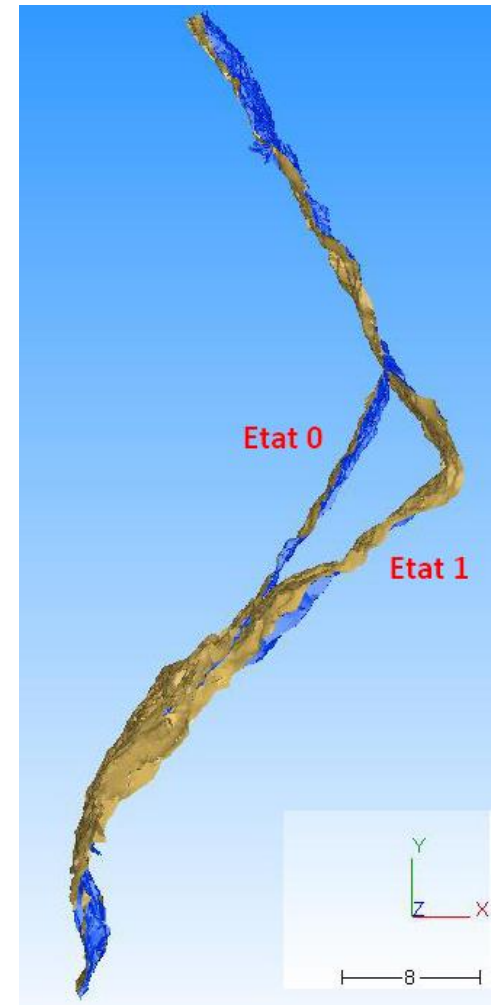
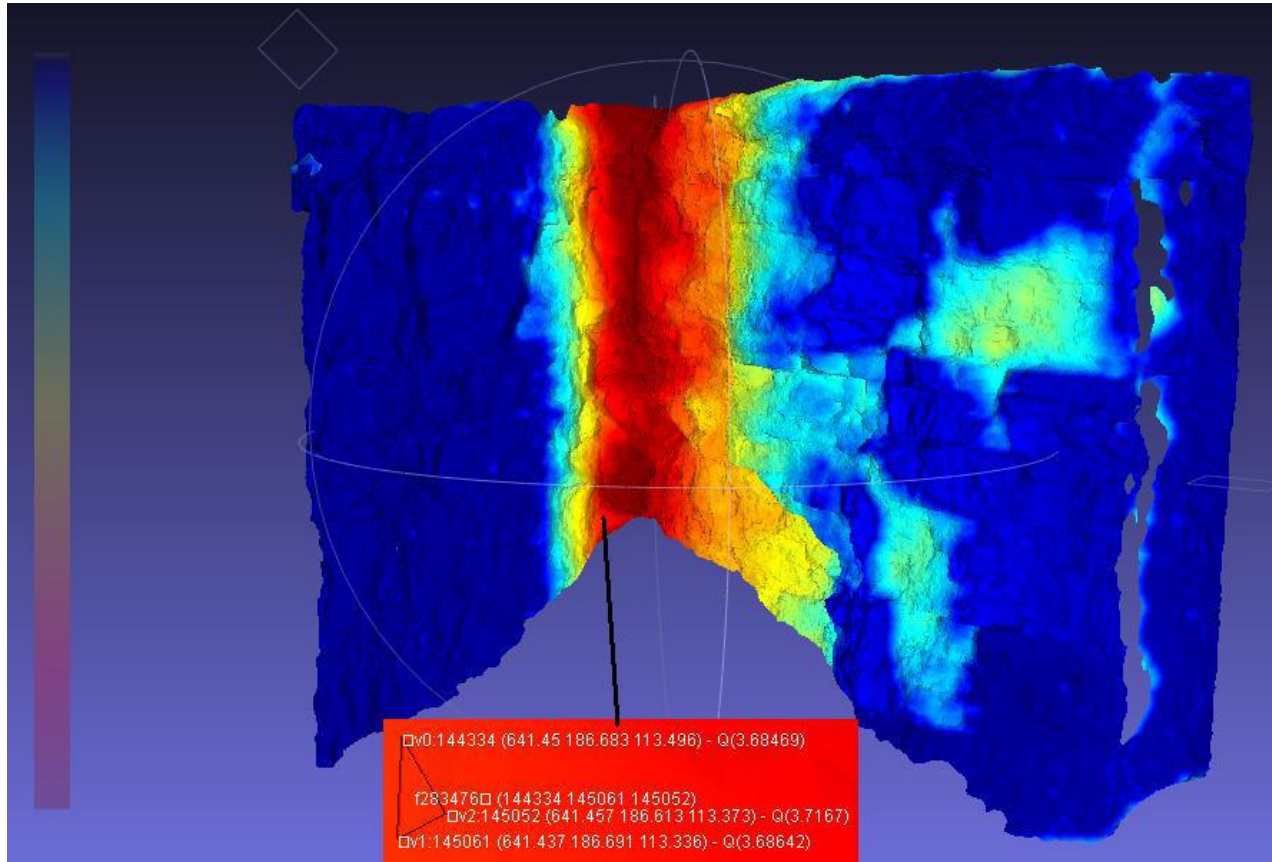


Travail de diplôme : Auscultation surface naturelle

Exemple pratique

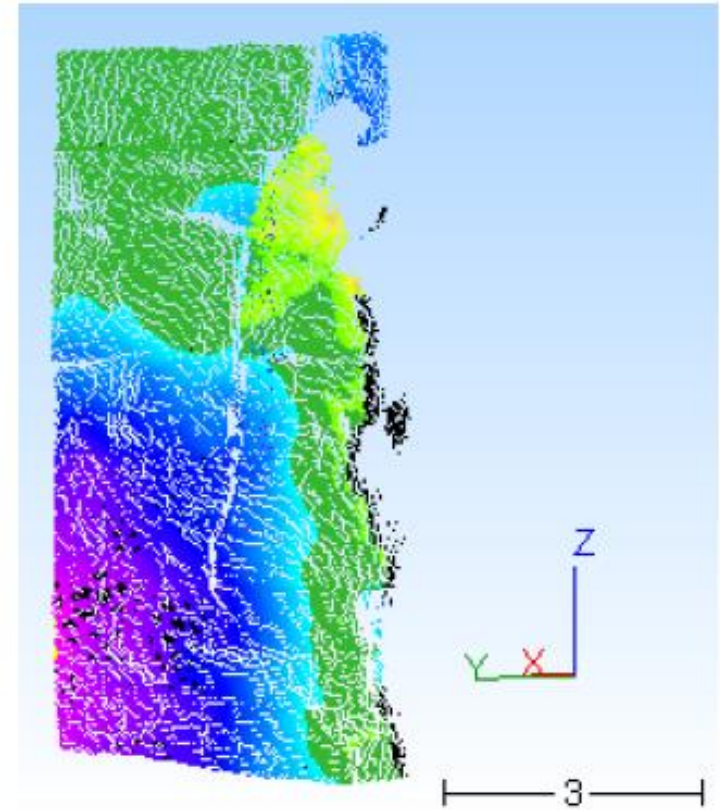


Travail de diplôme : Auscultation surface naturelle Evaluation de l'exploitation



Travail de diplôme : Auscultation surface naturelle

Impact sur les côtés de la paroi



Suivi de l'érosion d'une rampe de déversement :

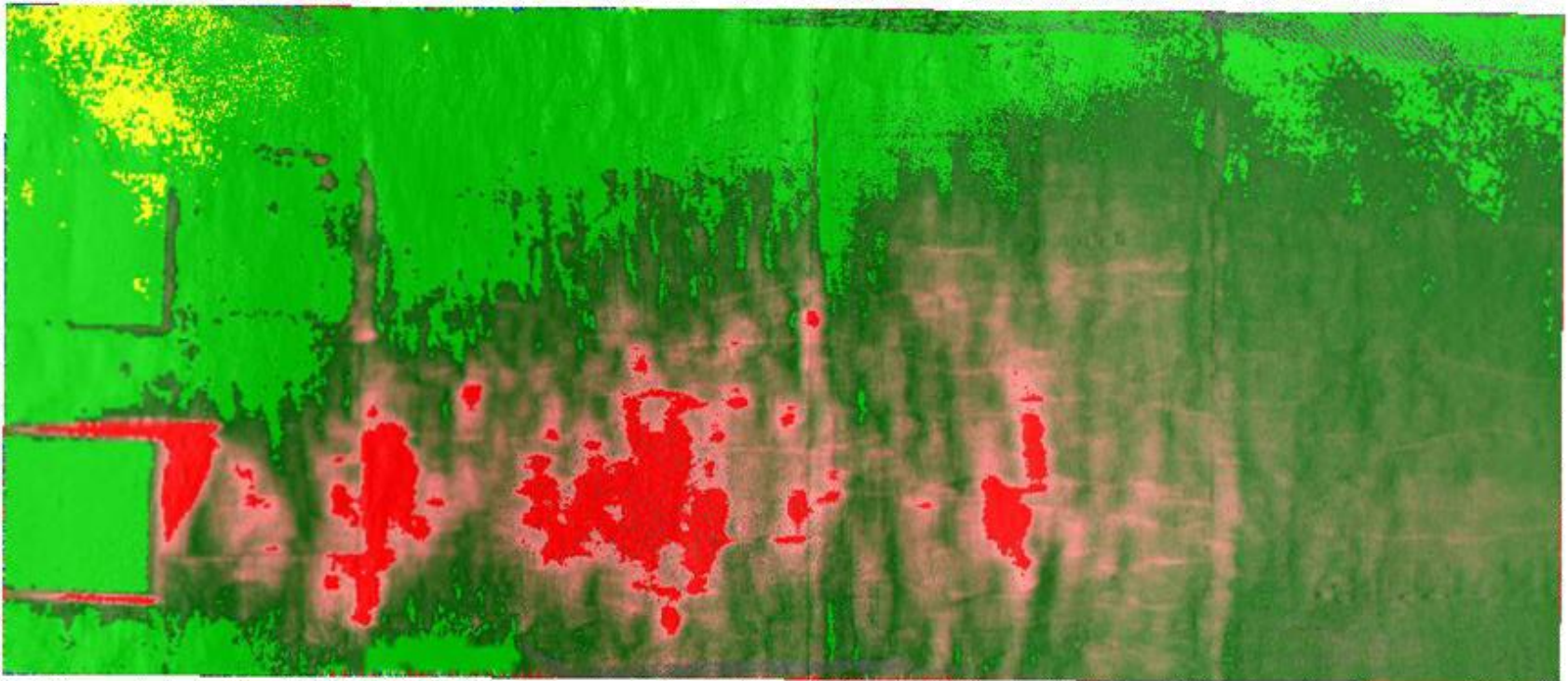
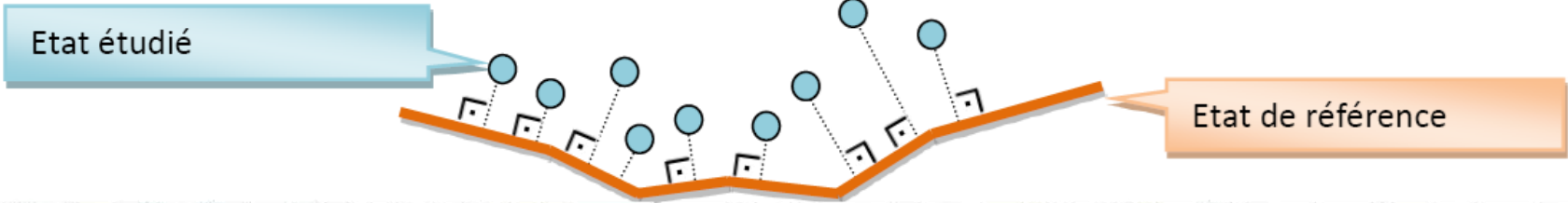
Site de mesures



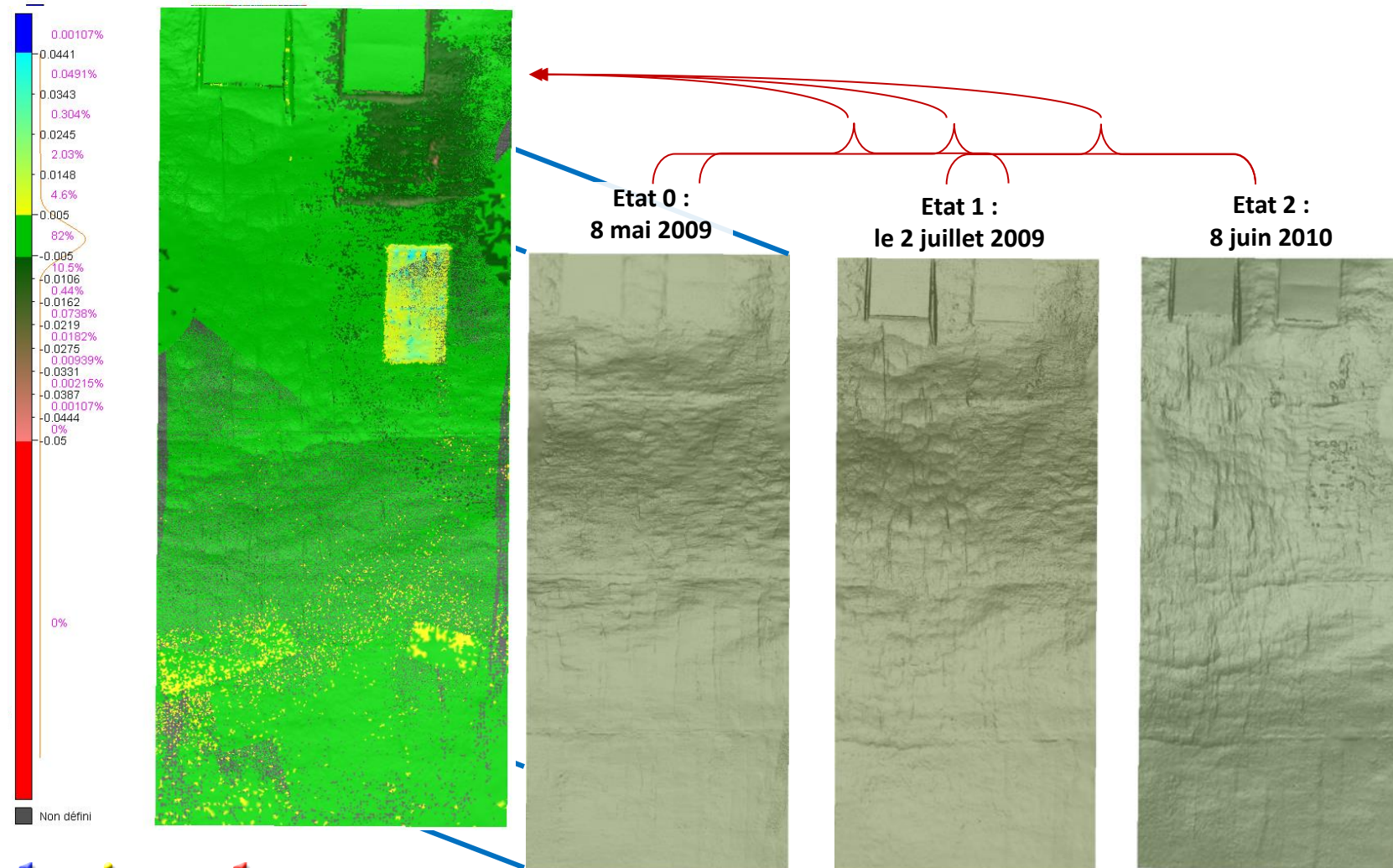


Suivi de l'érosion d'une rampe de déversement : Inspection 3D - Technique

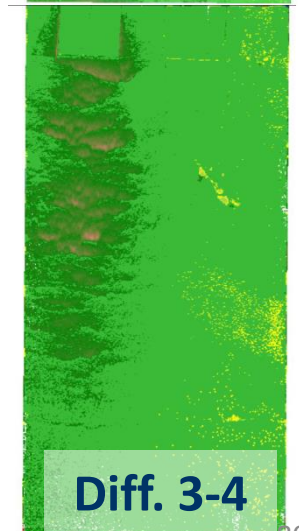
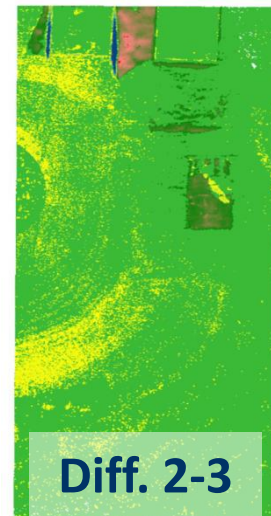
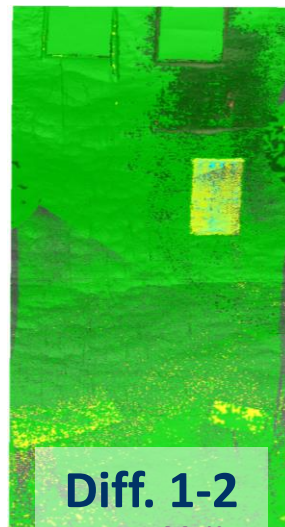
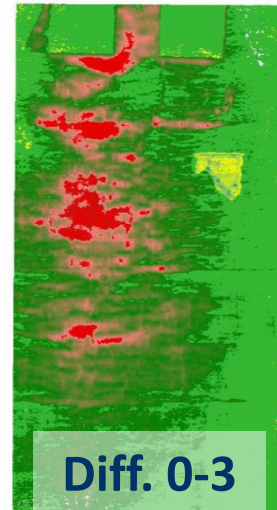
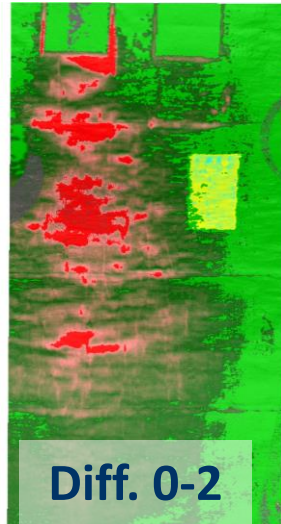
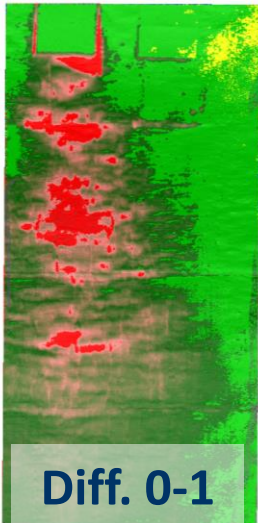
Projection 3D de l'état étudié sur la surface de référence



Suivi de l'érosion d'une rampe de déversement : Inspection 3D - Résultats



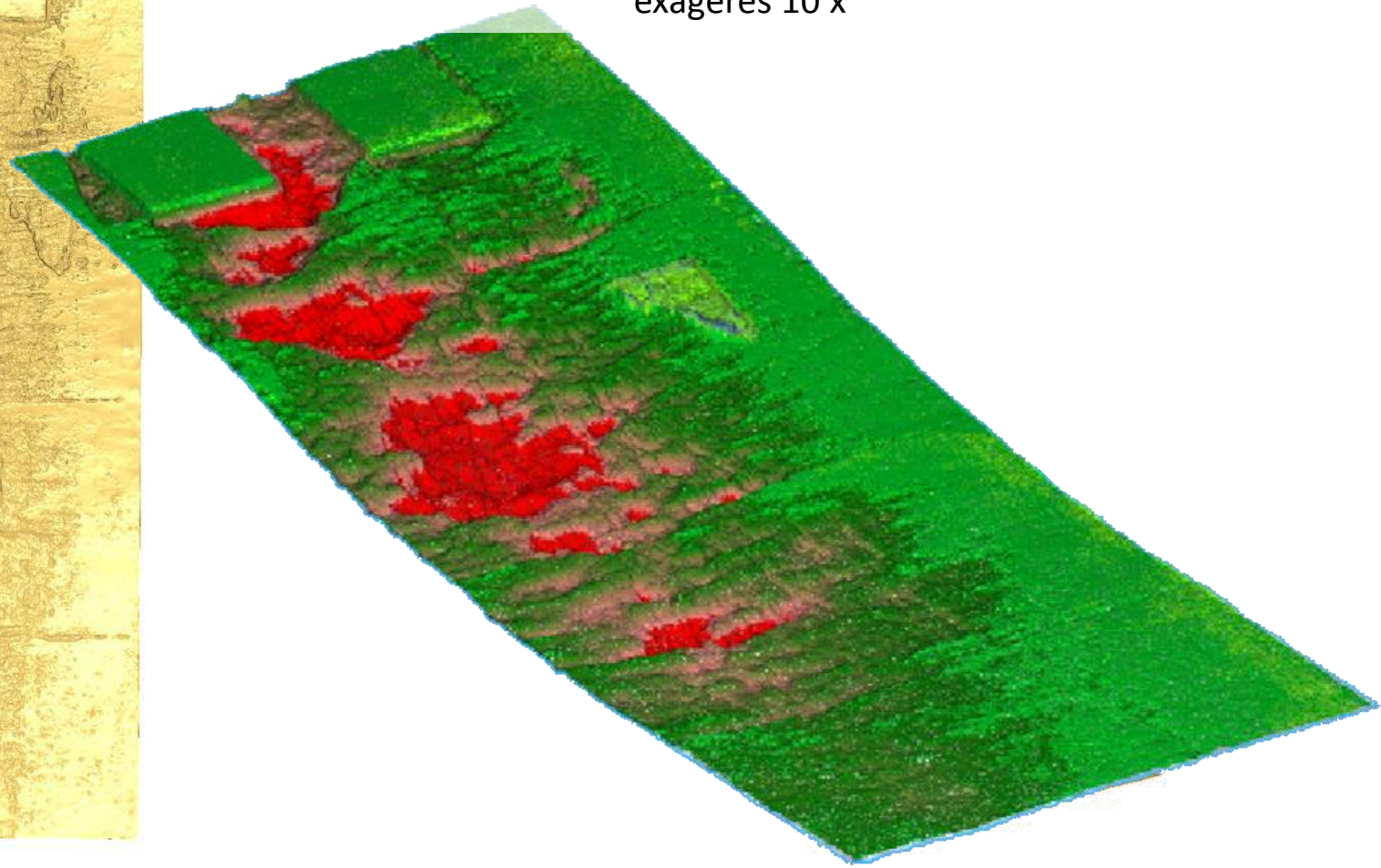
Suivi de l'érosion d'une rampe de déversement : Inspection 3D - Résultats



Suivi de l'érosion d'une rampe de déversement : Représentations : surfaces des déformations



Représentation déformée de la surface : les écarts > 5mm sont exagérés 10 x



Le Lidar idéal

- Impulsion laser = Dirac
- Bilan de liaison :
 - Aller : atténuation liée à la diffusion
 - Surface éclairée : ponctuelle, albedo connu
 - Retour : isotrope dans le $\frac{1}{2}$ espace
 - Rendement de l'optique et des filtres
 - Rendement quantique du détecteur
 - Conversion / Amplification

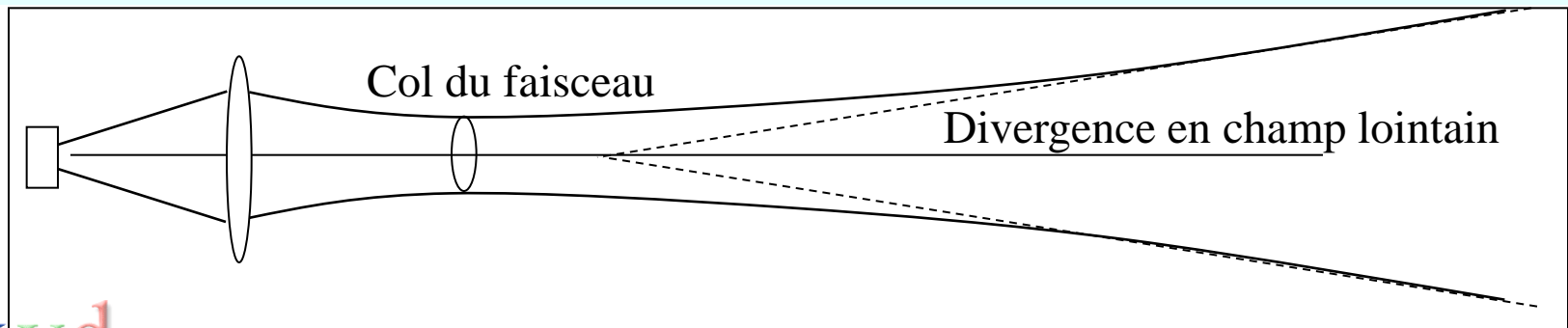
Le Lidar réel : le laser

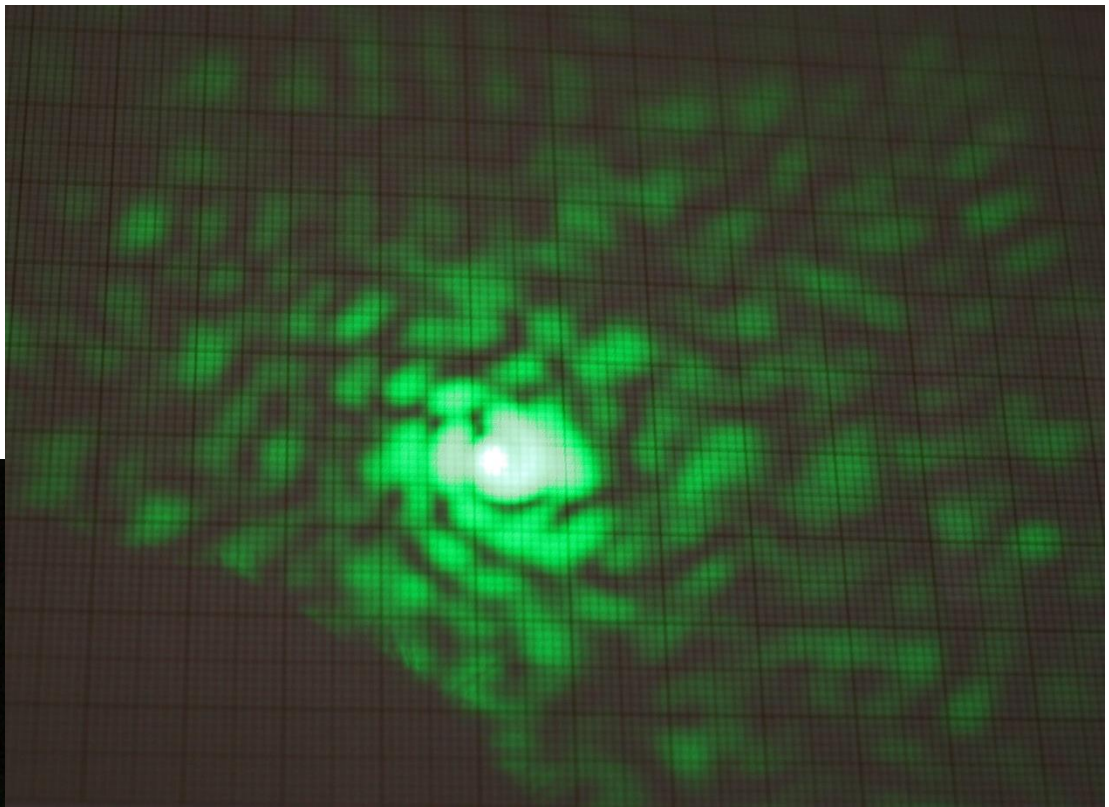
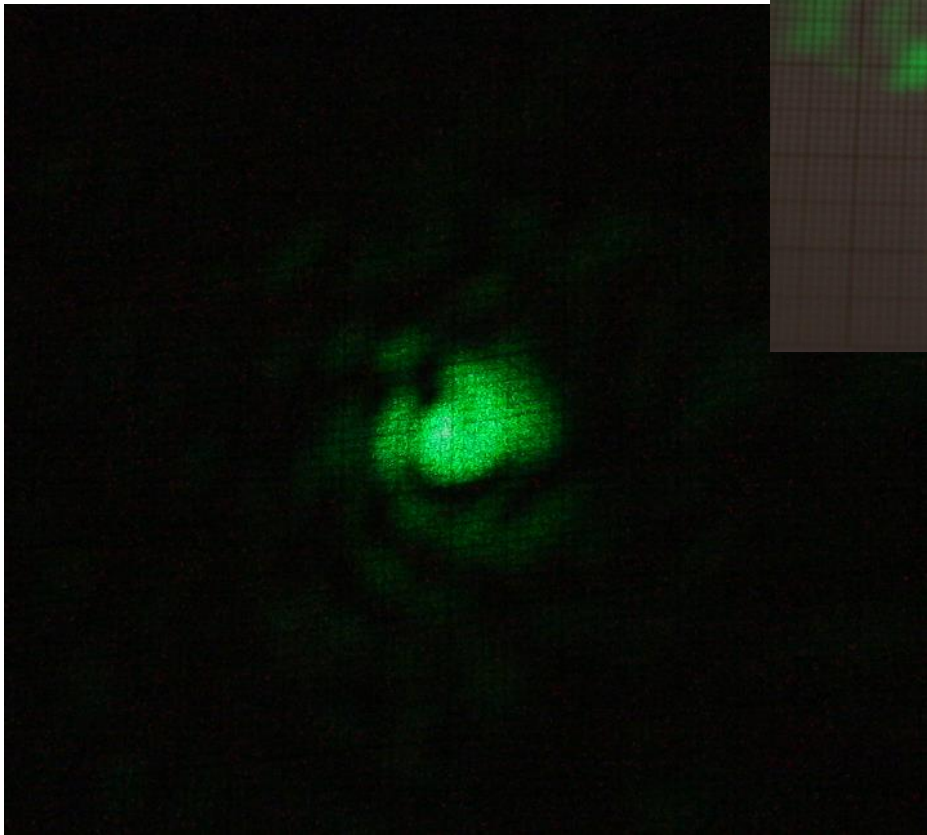
- Divergence du faisceau = modélisation très approximative !
 - Faisceaux gaussiens
 - Chatoiement - tavelures (Speckle)
- Le laser : surface d'onde plane à l'infini, oui mais...
 - Parfaitement monomode ?
 - Synchronisation parfaite entre le centre et le bord du faisceau ?

Les effets liés à la divergence du faisceau laser.

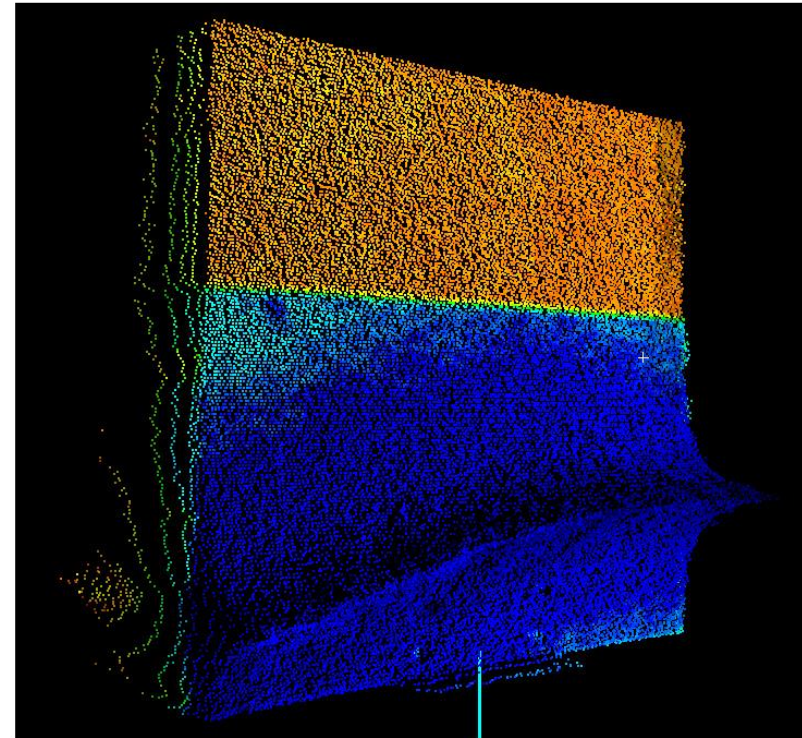
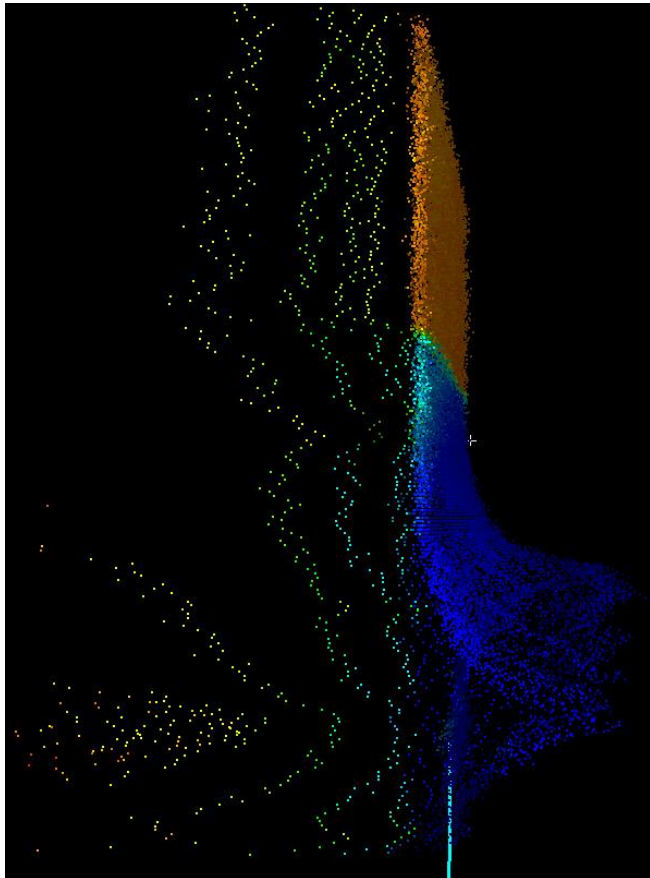
En pratique, même avec une mise au point adaptée, il est difficile d'obtenir une divergence du faisceau émis inférieure à 0,2 mrd, donc **2 cm à 100 m**.

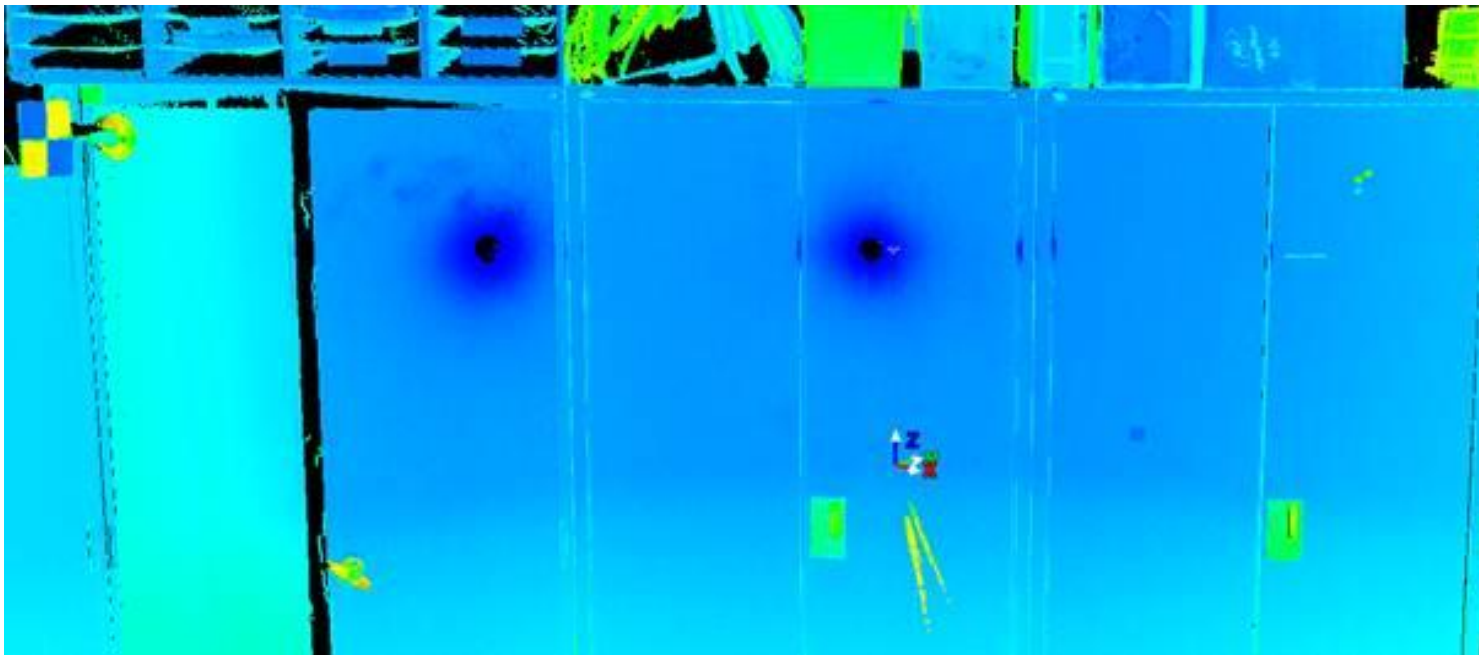
C'est une discrimination angulaire comparativement médiocre par rapport aux solutions basées sur des images (où l'on peut bénéficier d'un centrage très largement sub-pixellaire pour des objets étendus).



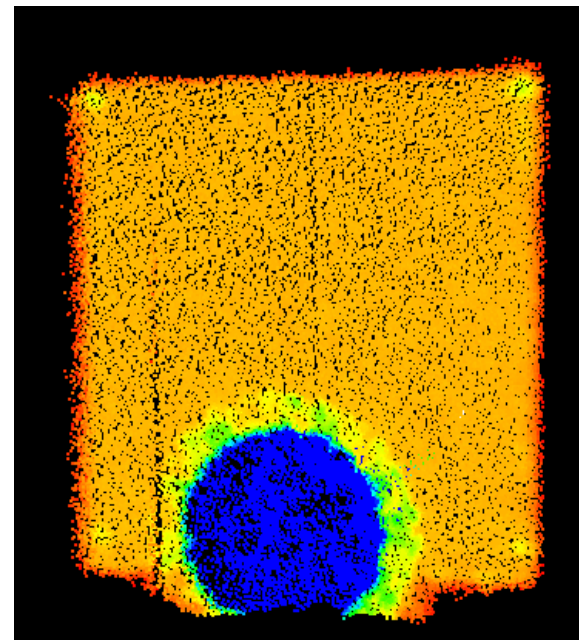
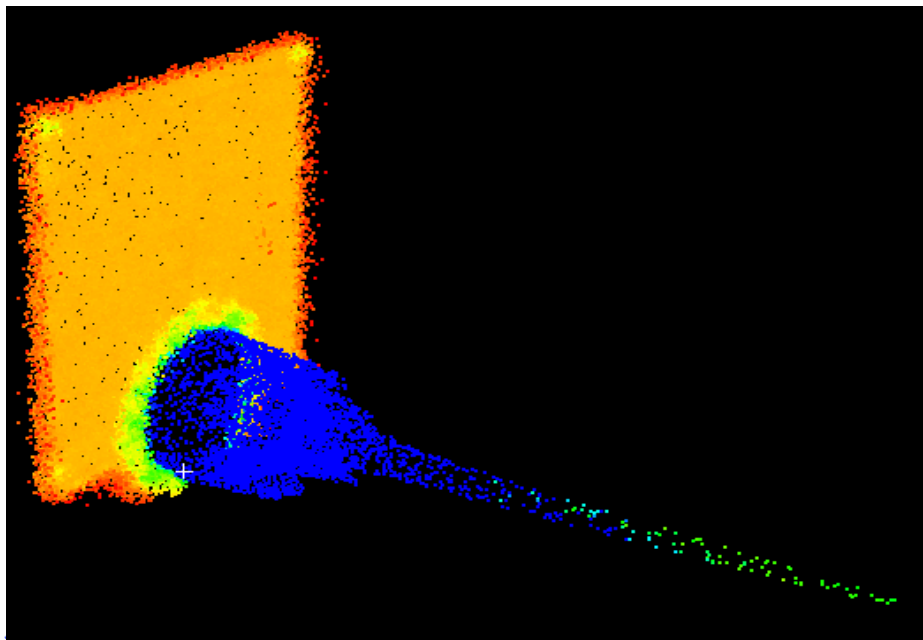


Problèmes sur la distance

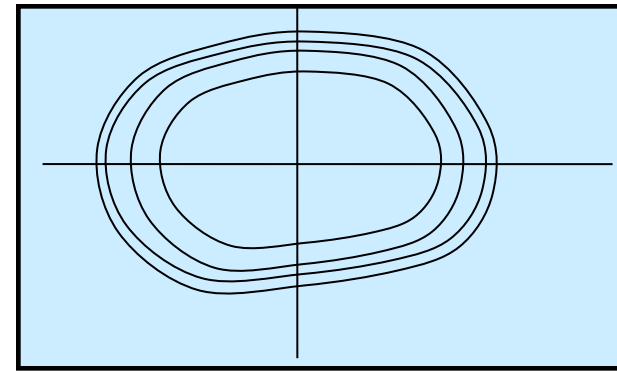




© Leica Geosystems



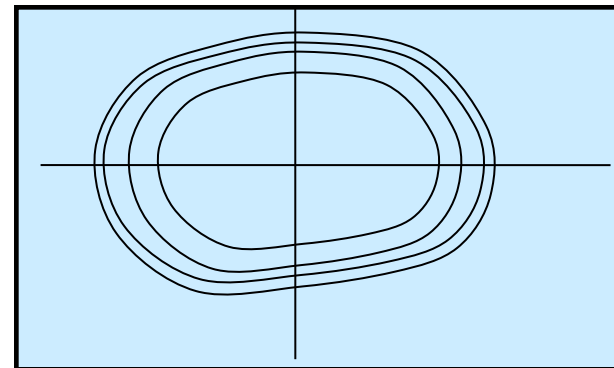
Les effets de phase



Nom donné par analogie avec les appareils électroniques de mesures de distances : lorsqu'on décentre progressivement le pointé vers le prisme à partir de la direction où le signal est maximal, on observe une erreur de plus en plus forte jusqu'à la perte du signal.

L'origine est double : la **source laser** elle-même (sauf la cas de modulation externe, non utilisée actuellement) et le **photodétecteur** (temps de transit des électrons dans la zone sensible)

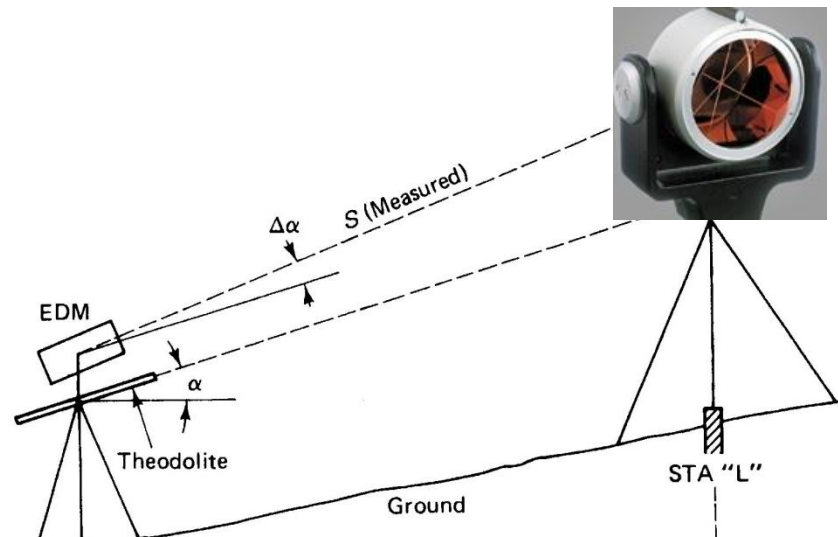
Les effets de phase



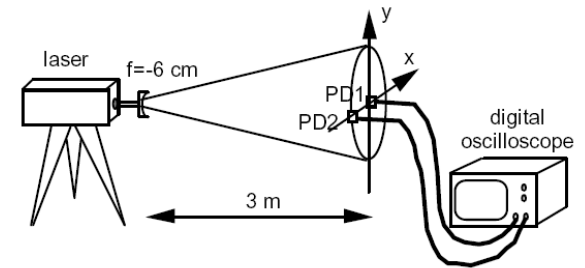
Comme conséquence, la mesure de distance ne donne pas les mêmes résultats pour des surfaces visées ayant un albedo non homogène si la surface cible n'est pas perpendiculaire au rayon, sauf si la tâche laser est très petite.

En outre, l'électronique de détection présente un biais plus ou moins fonction de **l'intensité du signal retour** et de la **position de l'écho** sur le détecteur. Même avec une correction soignée, il reste des effets perturbateurs. Donc même quand la surface est perpendiculaire, la mesure reste instable.

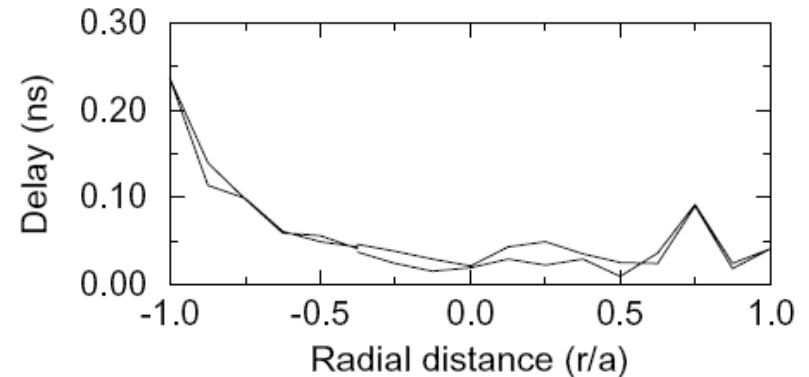
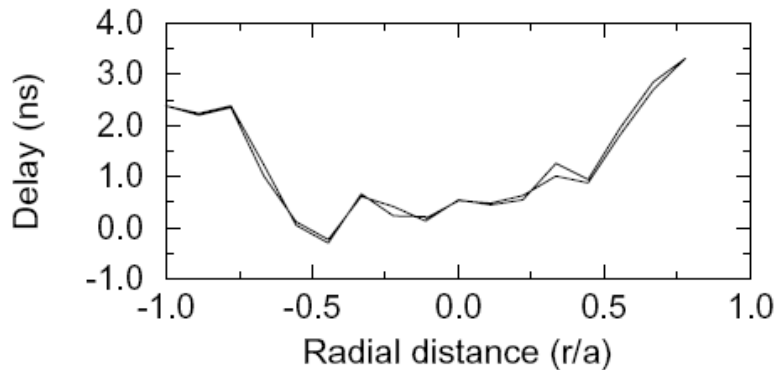
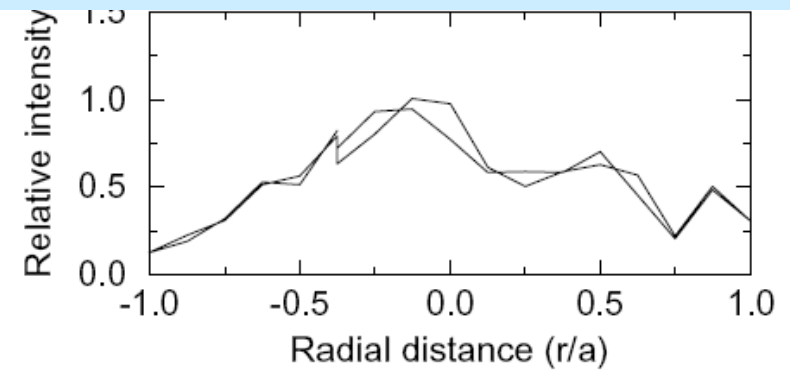
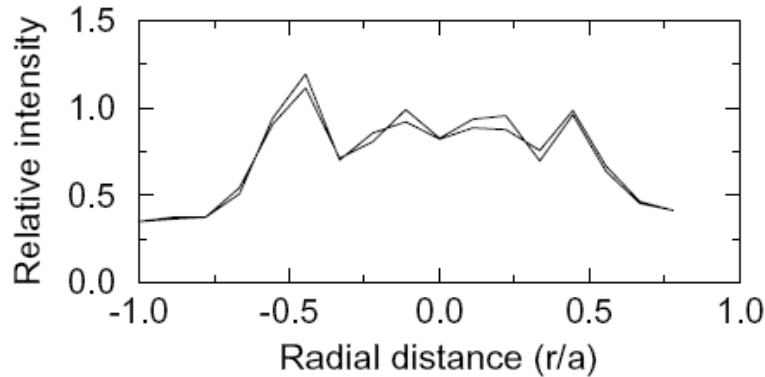
Pour quantifier cette erreur de phase, on peut employer le même type de méthode que pour les appareils électroniques de mesures de distances, avec un réflecteur très distant ou petit, en tous cas vu sous un angle bien plus réduit que la divergence du faisceau.



Les effets de phase : le laser



O. Bock, C. Thom, M. Kasser, 1995



Laser YAG 5 ns, Q-switch, cavité instable.

Laser YAG 100 ps, Q-switch, mode-lock actif.

Le Lidar réel : la détection

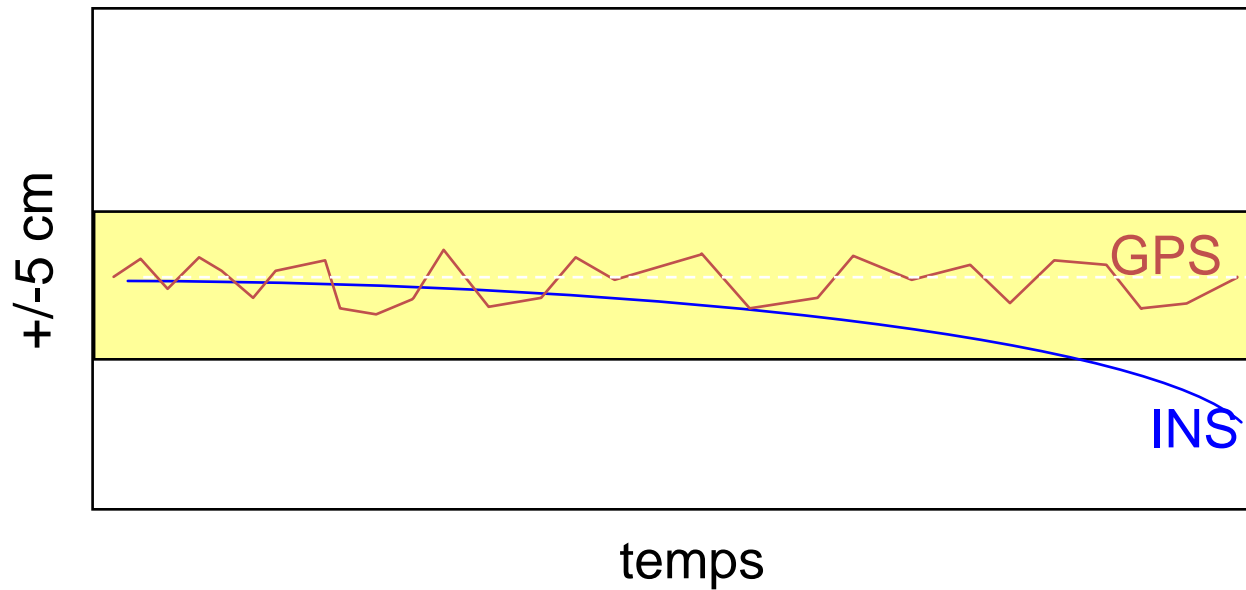
- Le détecteur (APD) :
 - synchronisation entre le centre et le bord ?
 - Gestion de l'intensité du signal retour
 - Effets divers : température, tension d'avalanche, champ magnétique, etc.
- Le traitement du signal électronique
 - Datation directe de l'impulsion : quel centrage ?
 - Échantillonnage numérique + traitements temps réel ou différé.

Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol

Positionnement.

Principe du couplage Inertiel + GPS



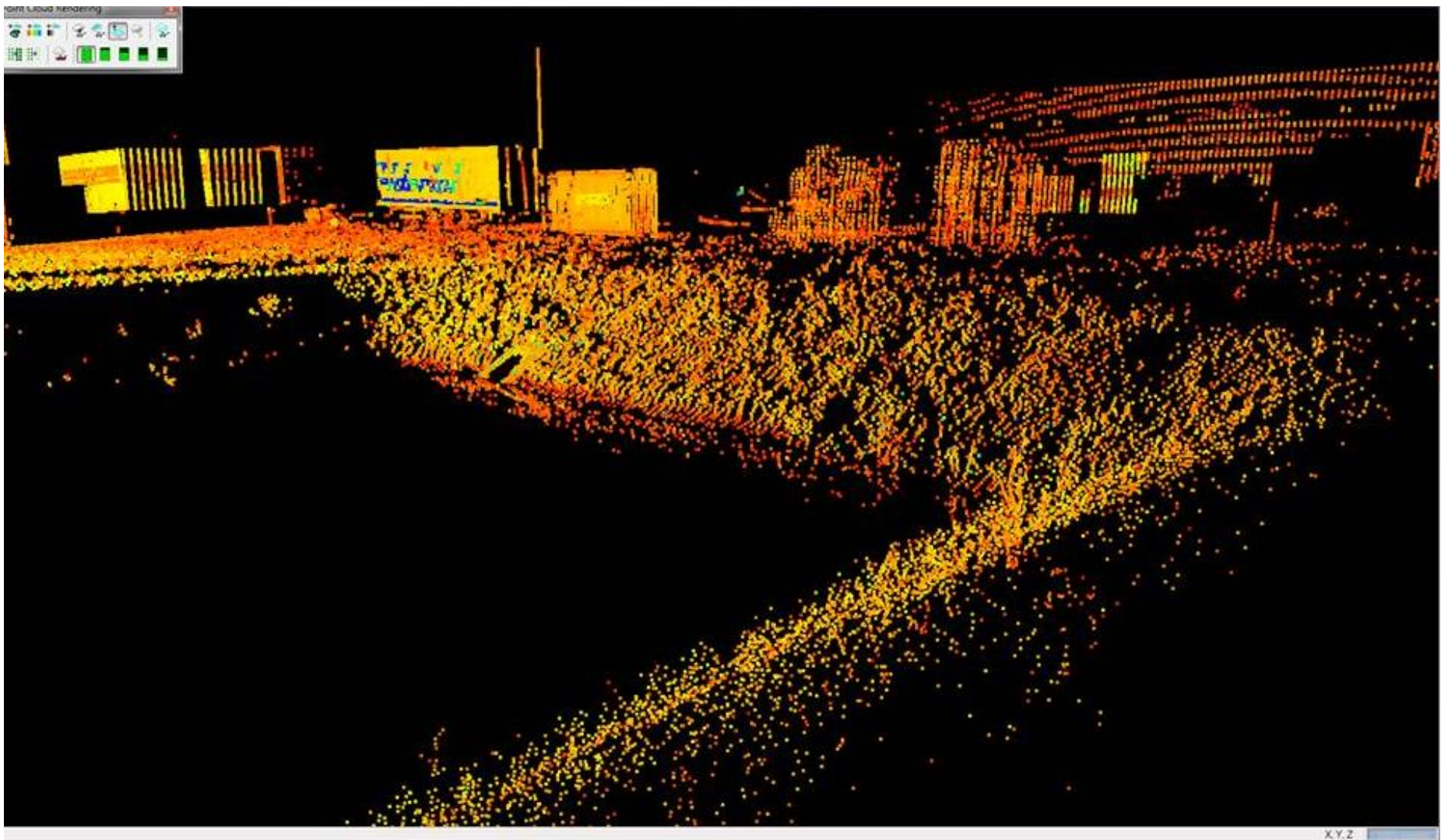
Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol

Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol





Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol

Résultats de la mesure laser sur des surfaces complexes.

- Pour une surface plane et l'albedo constant, les résultats doivent être nominaux.
- Pour des surfaces non-planes, il faut admettre de réelles difficultés pour identifier la partie de l'écho retour qui est considérée comme mesure.
- Problème sur gros chantiers, pour les croisements d'axes.



Surfaces complexes



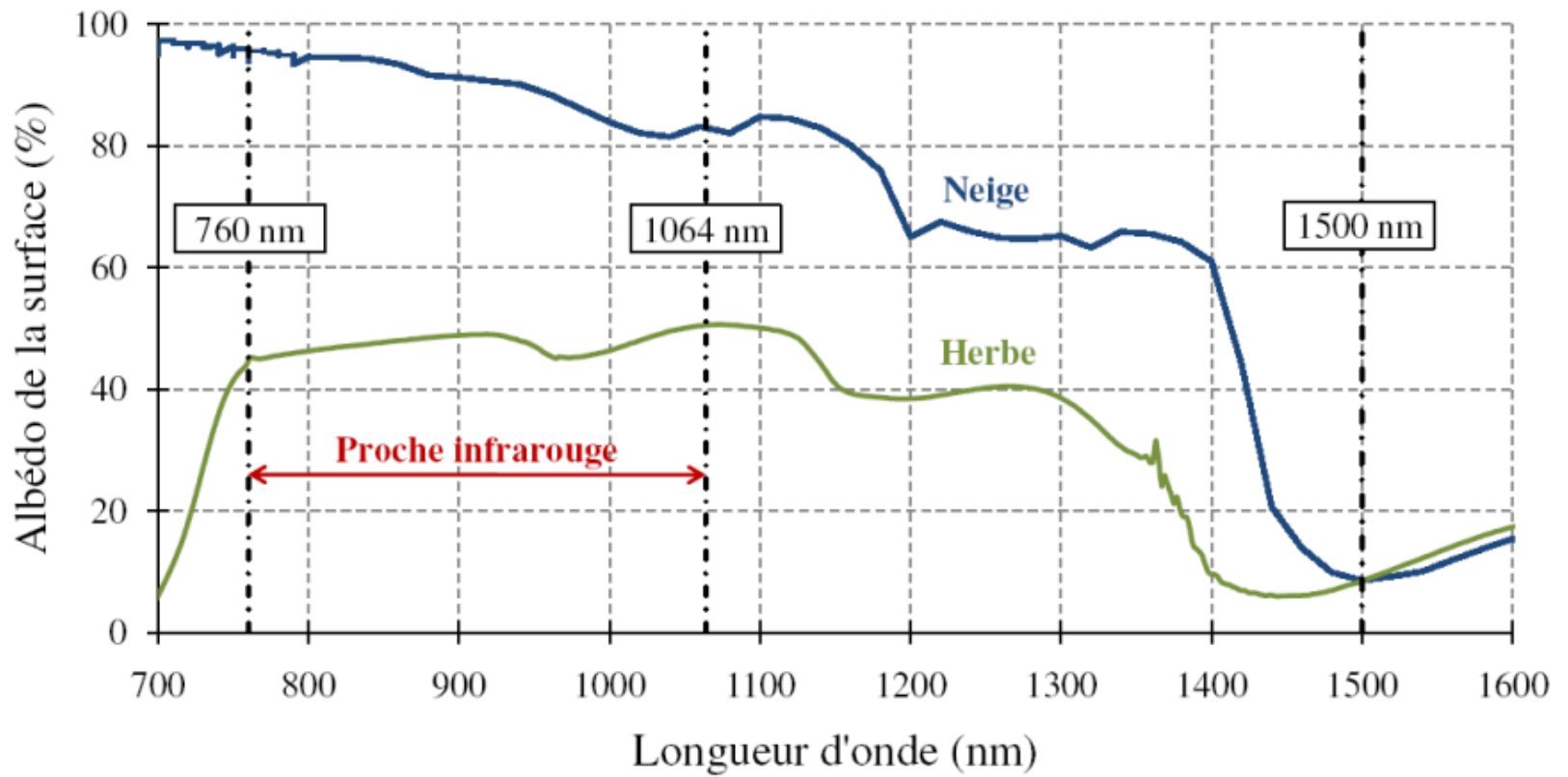
Sauf à faire un enregistrement complet de l'onde retour, et à le traiter au cas par cas de façon spécifique...

il faut comprendre la mesure obtenue comme l'interaction du terrain avec un volume dont la section est le diamètre du faisceau, et la longueur est la traduction géométrique des constantes de temps du laser et de la détection.

Pas très simple...

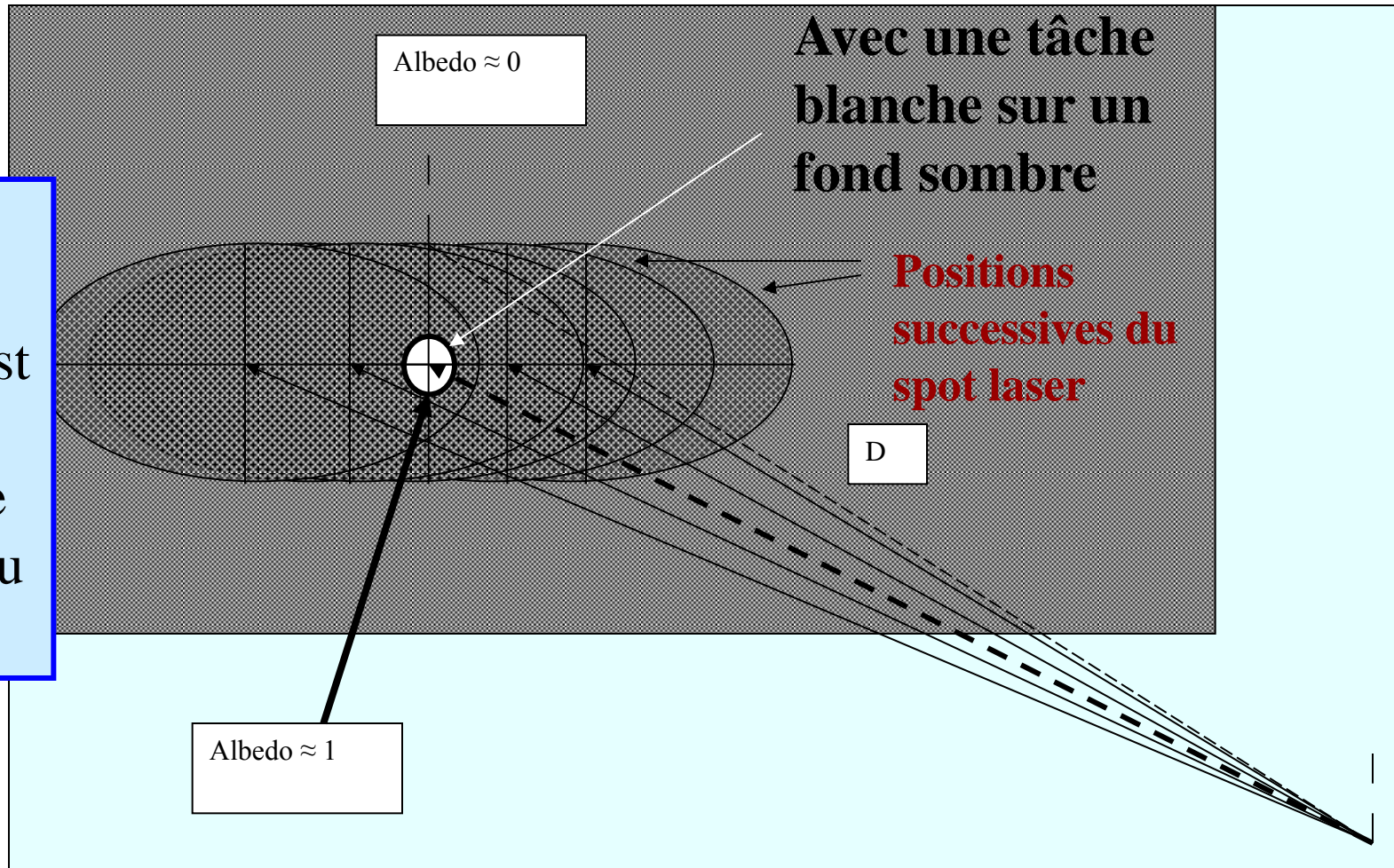
Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol



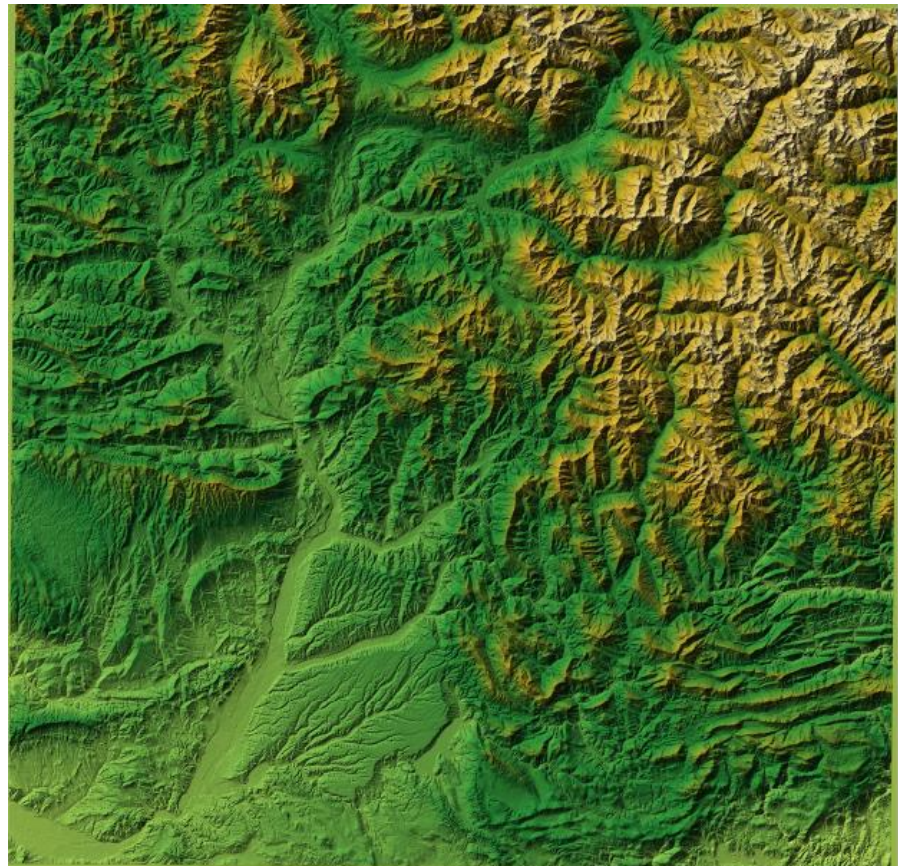
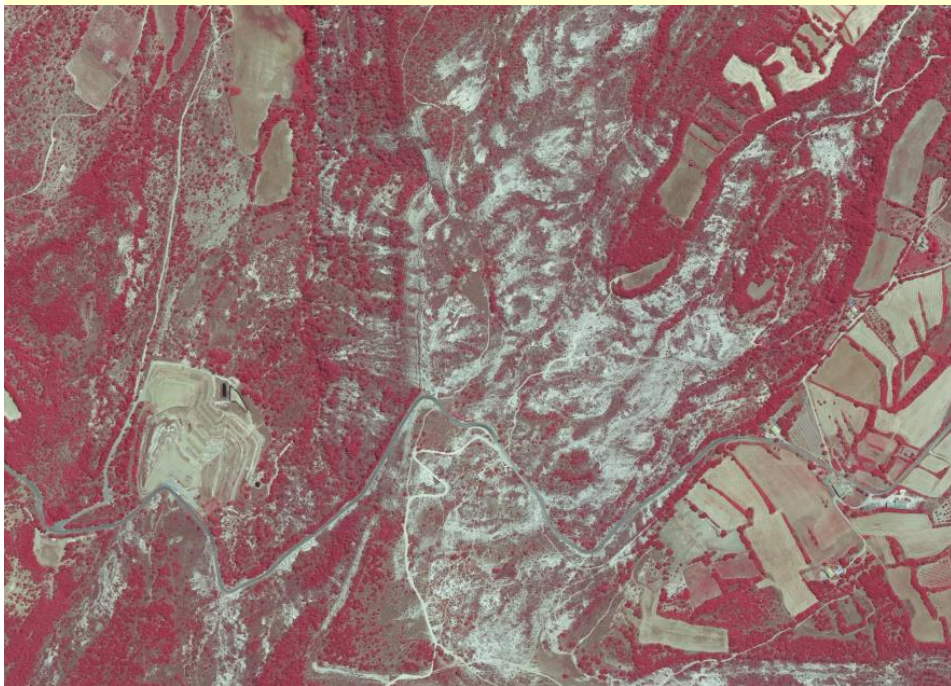
Inhomogénéité de l'albedo dans la tâche laser

Cas où le pas angulaire est plus petit que la taille angulaire du spot



Résultat, on mesure une distance qui n'est pas cohérente avec les angles.

Avec un terrain réel, MNT au pas de 25m de la BD Topo, sur le 04 entier, et avec la couche PIR de la BD Ortho



Analyse de la BD-Ortho® IRC sur Forcalquier (04)
 Probabilités de la présence, dans une empreinte au sol Z-Earth de 113 m², d'une surface dont l'albédo diffère au moins de $\Delta\rho$

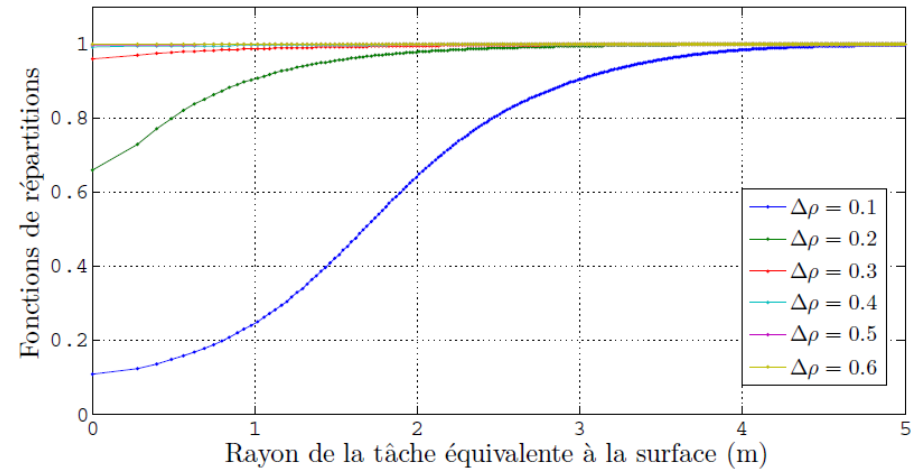


FIGURE 3.20 – Fonctions de répartition empiriques des rayons des tâches déduites de l'analyse d'une image infrarouge de la BD-Ortho® dans la région de Forcalquier.

T. Touzé, 2011

Résultats des simulations sur 15000 km² de terrain réel (04) plutôt montagneux.

Analyse de la BD-Ortho® IRC sur l'Aiguille des Glaciers.
 Probabilité de la présence, dans une empreinte au sol Z-Earth de 113 m², d'une surface dont l'albédo diffère au moins de $\Delta\rho$.

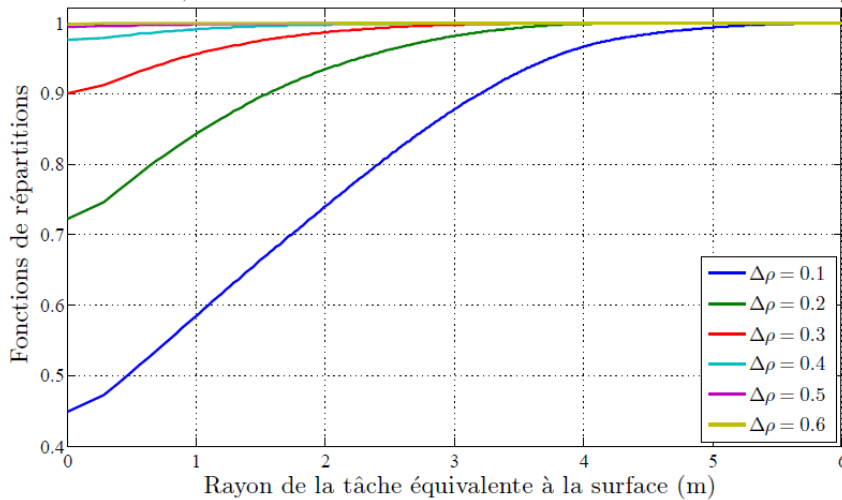


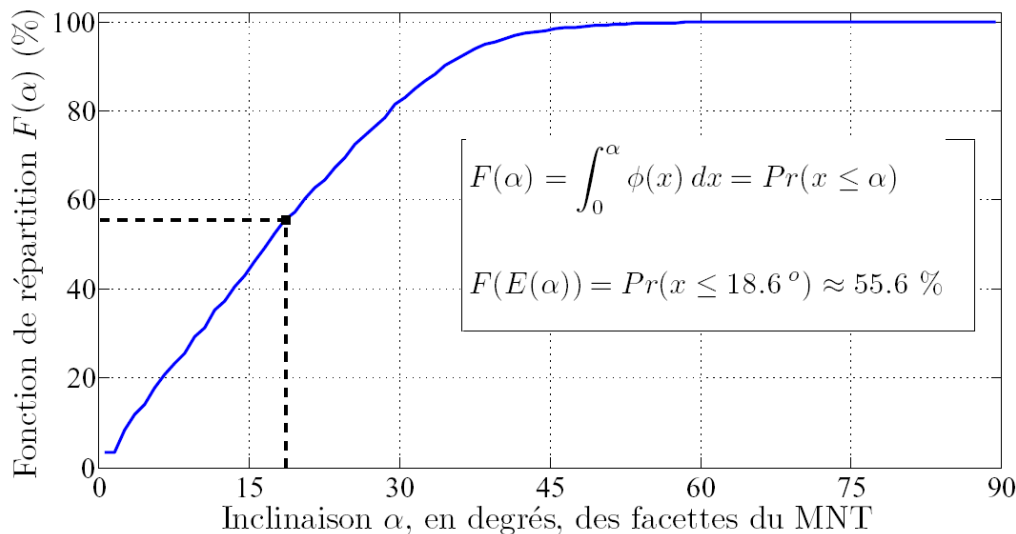
FIGURE 3.22 – Fonctions de répartition empiriques des rayons des tâches déduites de l'analyse d'une image infrarouge de la BD-Ortho® près de l'Aiguille des Glaciers.

Donc : l'effet de biais du aux variations locales de réflectance est de très faible probabilité sur ce type de paysage...

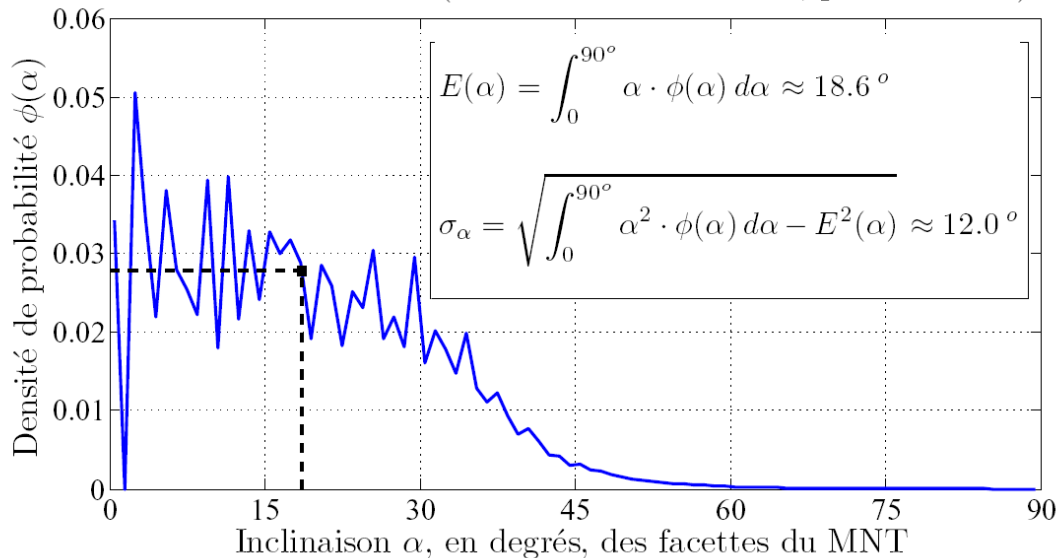
Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol

Probabilité des pentes du MNT BD-Ortho® des Alpes de Haute-Provence (123.3 km × 126.3 km, pas de 25 m)



Probabilité des pentes du MNT BD-Ortho® des Alpes de Haute-Provence (123.3 km × 126.3 km, pas de 25 m)



Avec un maillage de 25 m, et une précision de 1 m, même dans un paysage montagneux : 56 % de proba que la pente soit $< 19^\circ$

T. Touzé, 2011



Avec un terrain entièrement simulé,
avec une rugosité gaussienne et une
inclinaison variable

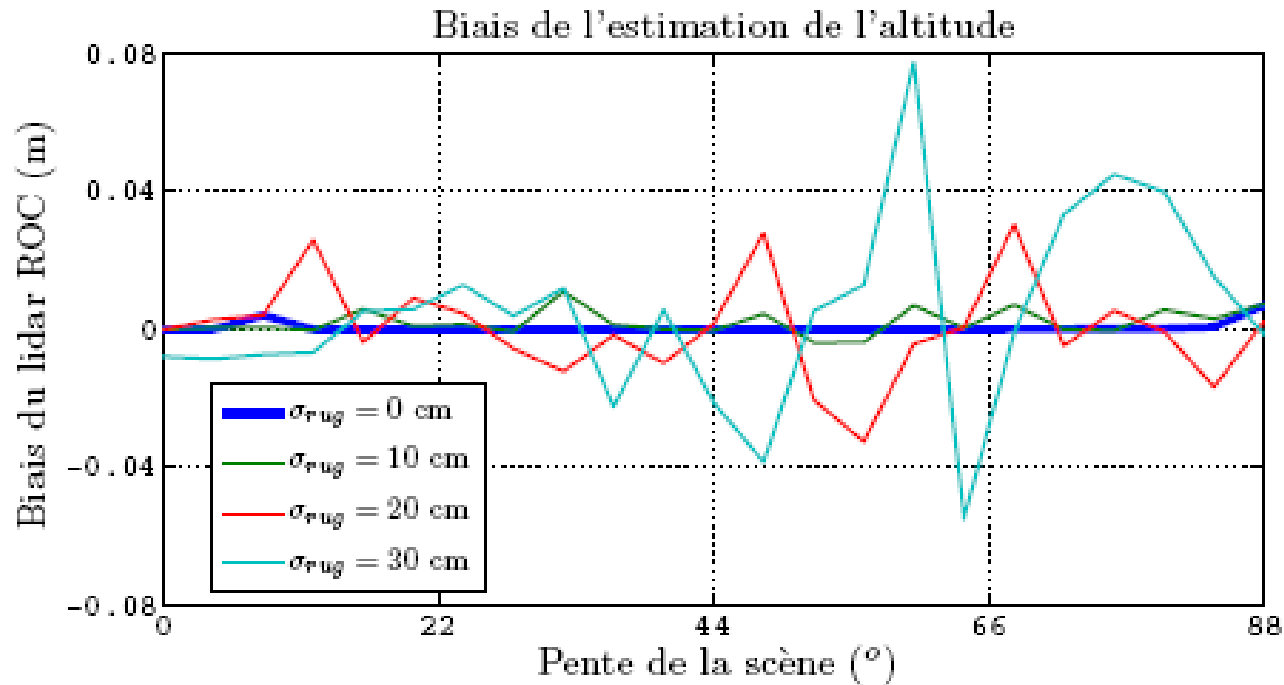
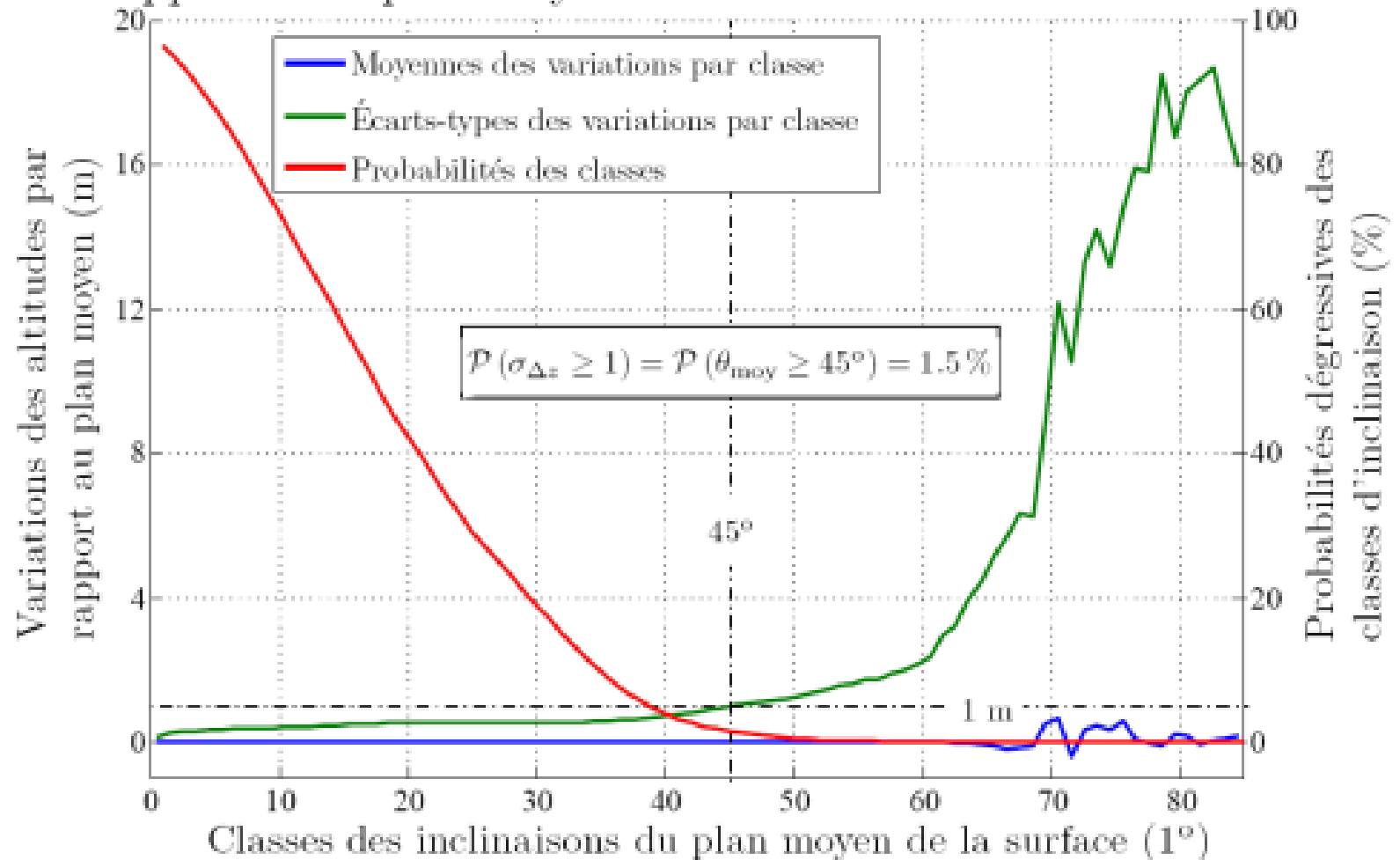
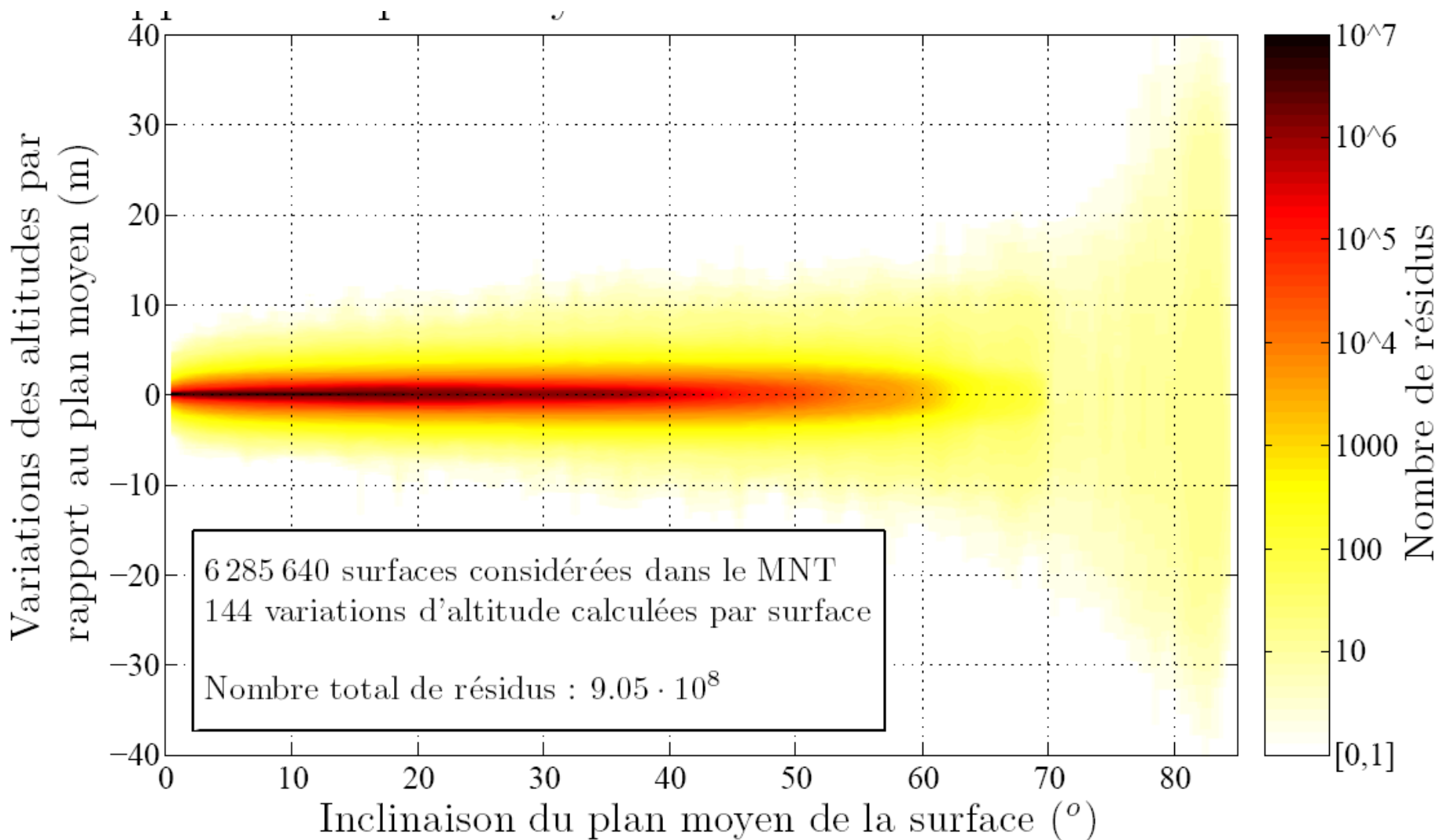


FIG. 7 – Représentation des biais en fonction de l'inclinaison. Si la rugosité est nulle, celui-ci peut être considéré comme étant nul, quelle que soit la valeur de l'inclinaison.

Étude du MNT de l'enclave de *Llivia* (Pyrénées, 6.3 km² au pas de 1 m). Distribution des variations d'altitude par rapport à un plan moyen dans une surface de 121 m².





Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol

La réfraction atmosphérique

- Composition de l'atmosphère, gaz à teneurs fixes (air sec), gaz à teneurs variables (O_3 , H_2O)
- Epaisseur optique au niveau de la mer équivalente à une traversée verticale ~ 8 km.

Les formules de base

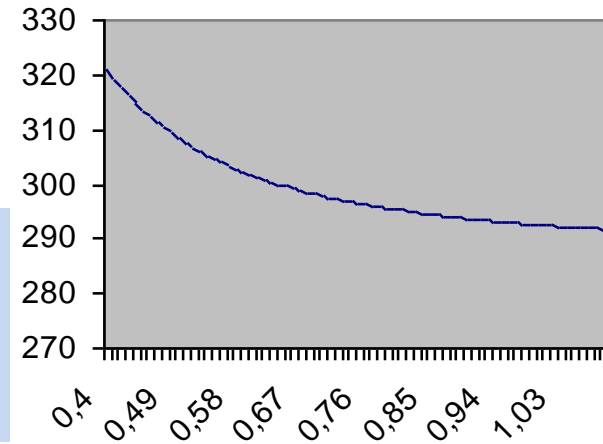
- $c_0 = 299\,792\,458$ m/s dans le vide
- $n = c_0 / c$ est l'indice
- $N = (n - 1) \cdot 10^6$ est le co-indice
- La vitesse de groupe (modulation) est différente de la vitesse de phase :

$$N_g = N_\varphi - \lambda \cdot dN_\varphi / d\lambda$$

- Attention aux raies très fines !

Formules de base :

Ondes lumineuses



$$N_{g0} = 287,6155 + \frac{4,886\ 60}{\lambda^2} + \frac{0,068\ 0}{\lambda^4}$$

pour $t = 0^\circ\text{C}$, $P_v = 0$, et une pression partielle de CO_2 de 375 ppm

$$N = \frac{273,15}{1013,25} \frac{P_a}{T} N_g - 11,27 \cdot \frac{P_v}{T}$$

Ondes lumineuses

- **$dN = -1.1 dT + 0.25 dP_a - 0.05 dP_v$**
- Une erreur de 1 sur N ou de 1 ppm sur n est donc due, de façon équivalente, à une erreur de 1° ou de 4 mb.
- La pression de vapeur d'eau est pratiquement sans aucune incidence au niveau de 1 ppm

Les formules de base

Ondes radio

$$N_{\phi} = N_g = 77,695 \frac{P_a}{T} + 71,97 \frac{P_v}{T} + 375406 \frac{P_v}{T^2}$$

$$dN = -1.4 dT + 0.25 dP_a - 6 dP_v$$

Pour mémoire : ondes radio

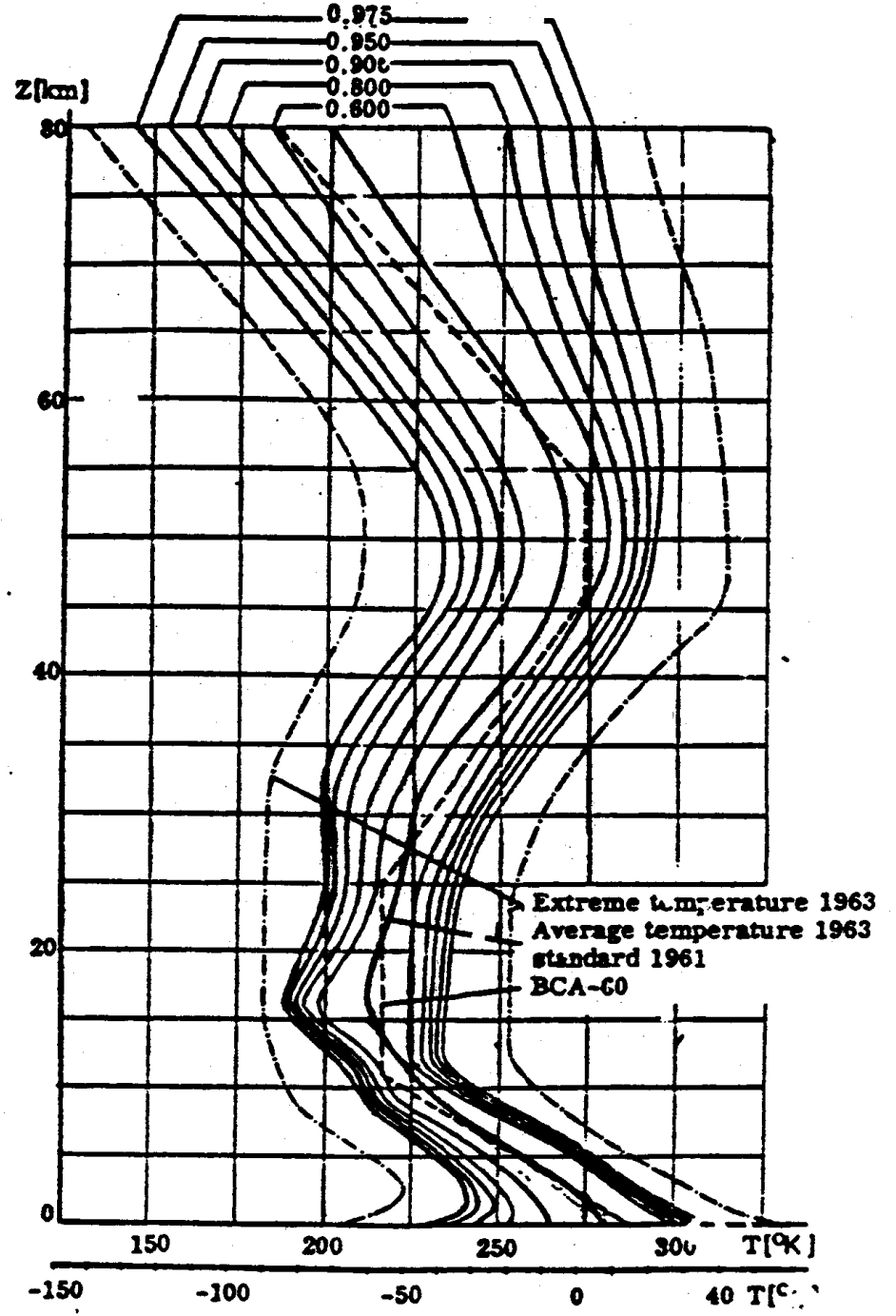
- **$dN = 1,4 dT + 0.25 dP_a + 6 dP_v$**
- Une erreur de 1 sur N ou de 1 ppm sur n est donc due, de façon équivalente, à une erreur de 0.7° ou de 4 mb.
- La pression de vapeur d'eau a ici une importance majeure

Échanges de chaleur Soleil-sol

- L'énergie venant du soleil (de l'ordre du kW par m²) provoque surtout deux phénomènes :
 - Évaporation de l'eau disponible
 - Réchauffement de l'air par convection
- Ceci explique la variabilité de T et de P_v près du sol. Situation de la couche limite.

La température

- La température se comporte comme une variable aléatoire près du sol, et plus généralement dans la couche limite.
- Au delà de la couche limite, la température est une fonction beaucoup plus régulière de l'altitude (6° par km en moyenne jusqu'à 10 km).

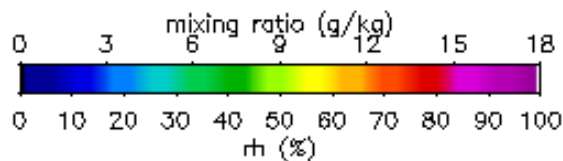
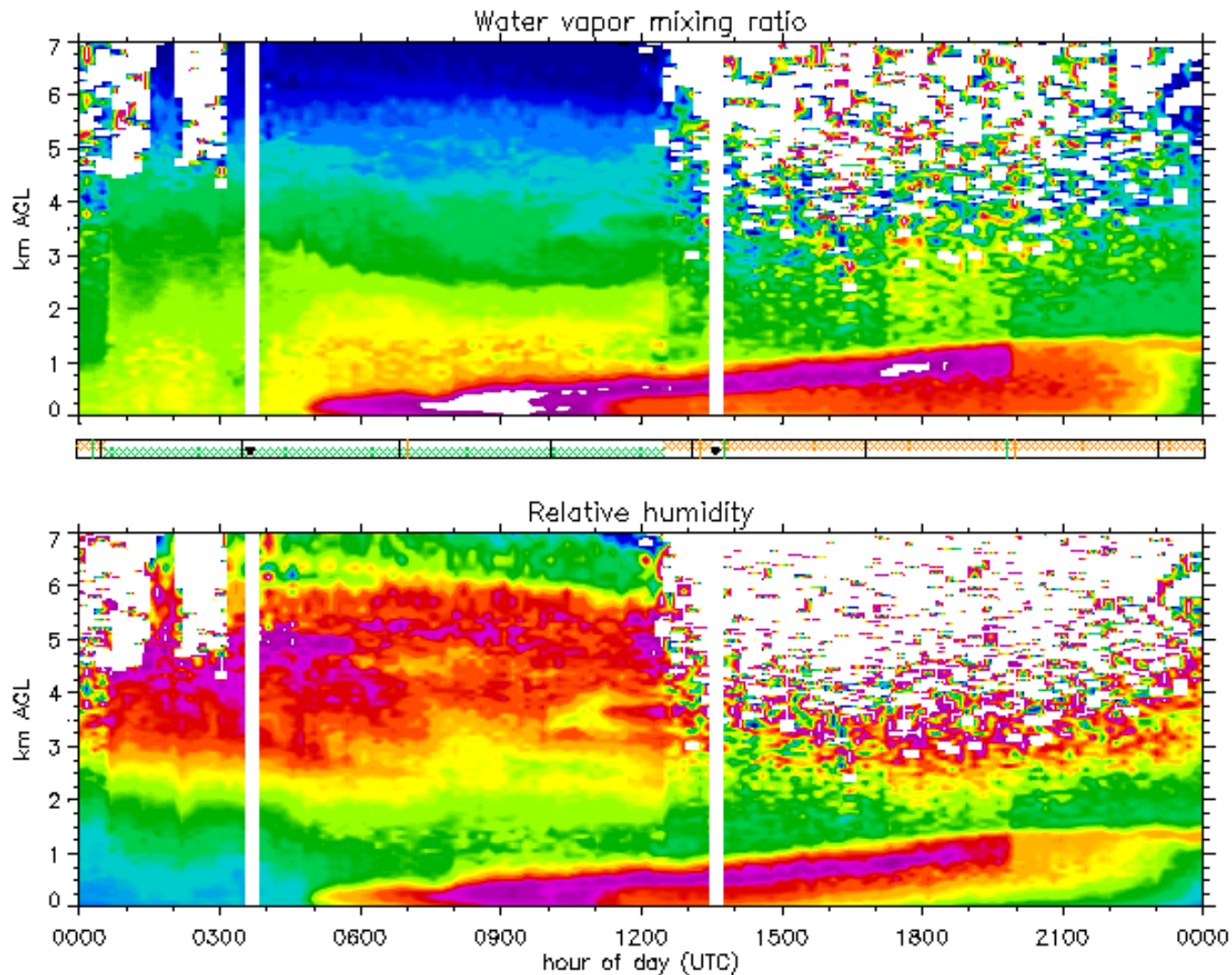


La pression

- La pression se comporte comme une fonction très régulière de l'altitude
- En nivellement barométrique (pourtant en plein dans la couche limite) on atteignait aisément des précisions de 1m sur les dénivelées, sur de grandes distances : la pression est donc « régulière » au niveau de 0.1 mb sur 100 km en conditions courantes

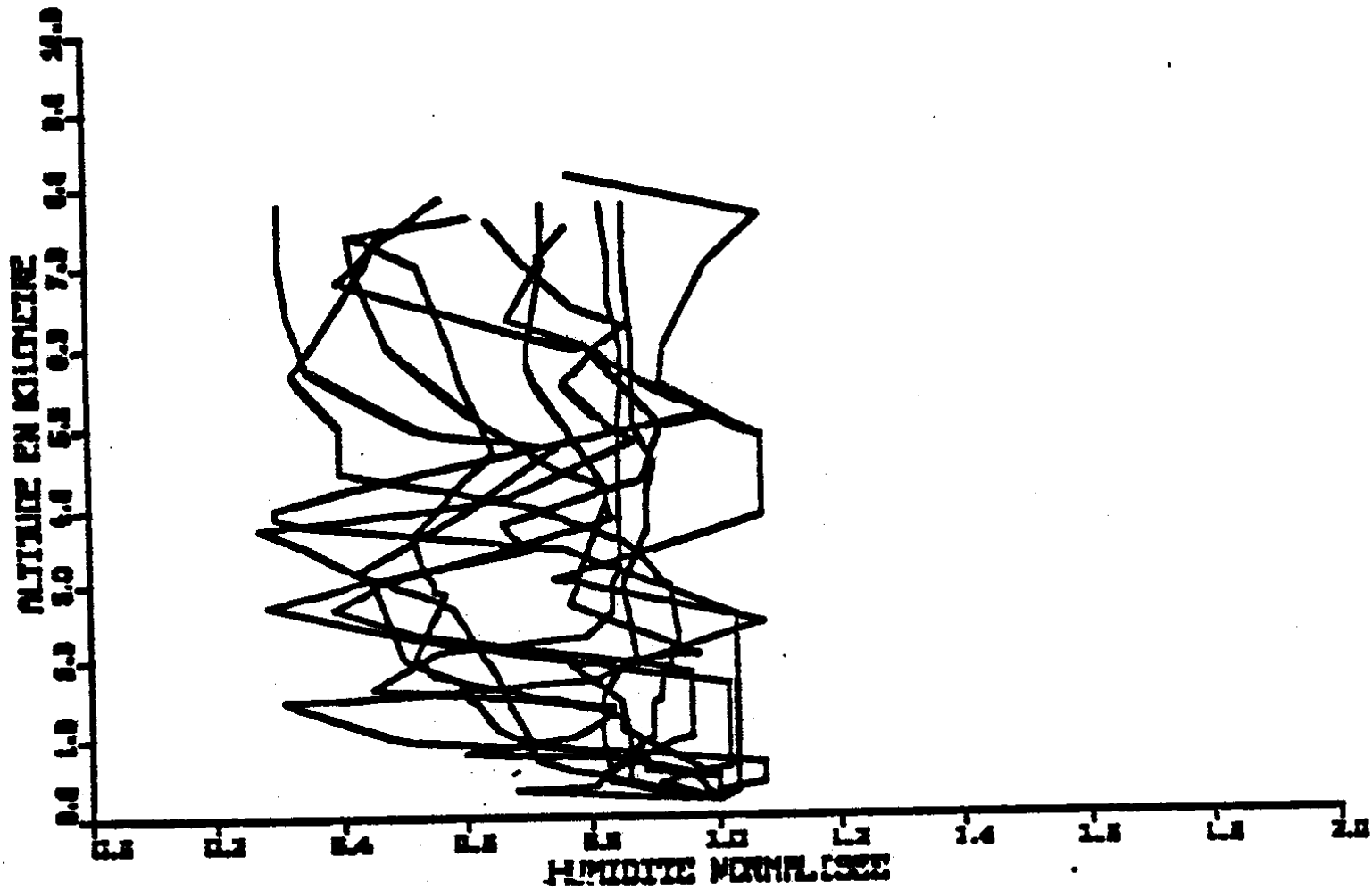
La vapeur d'eau

Raman lidar data
8 Sep 1998



BE version: 0.8
MR version: 0.5
ASR version: 0.17
EXT version: 0.2
DEP version: 0.2

Created on: 24 May 1999



Cas d'une traversée complète de l'atmosphère

- Une traversée verticale = 8 atm.km
- Pour une mesure complète de l'atmosphère (géodésie spatiale), la correction due à la partie sèche offre un résultat inattendu : **le seul paramètre important dans le résultat est la pression au sol.**
- $\Delta L = f(\alpha) \cdot \Delta L_{\text{vertical}}$

$$L_0 = \int_{s_0}^{s_1} n(s).ds$$

$$\Delta L = \int_{h_0}^{\infty} N(h).dh$$

Cas d'une traversée complète de l'atmosphère

- En régime stationnaire

(hypothèse réaliste) :

$$- P_a = \rho(\mathbf{h}) \cdot R \cdot T(\mathbf{h})$$

$$- d P(\mathbf{h}) = \rho(\mathbf{h}) \cdot g(\mathbf{h}) \cdot d\mathbf{h}$$

$$\Delta L_d = \int_{h_0}^{\infty} A \frac{P_a}{T} \cdot d h$$

$$\Delta L_d = \int_{h_0}^{\infty} \frac{dP(h)}{g(h)} \cdot A \cdot R$$

Cas d'une traversée complète de l'atmosphère

- Si $g(h) = g_0 = \text{constant}$, $\Delta L_d = A.R.P_0 / g_0$
- Si $g(h) = g_0 / (1 + 2.h/r_0)$, plus réaliste :

$$\Delta L_d = \frac{A.R.P_0}{g_0} \left(1 + \frac{2.R.\beta}{\frac{r_0}{T_0} \beta.(g_0 + R.\beta) - 2g_0} \right)$$

- (β est le gradient de T). Pour $P_0 = 1000$ mbar, $\Delta L_d = 2,3$ mètres
- Ecart entre ces deux déterminations = qq mm

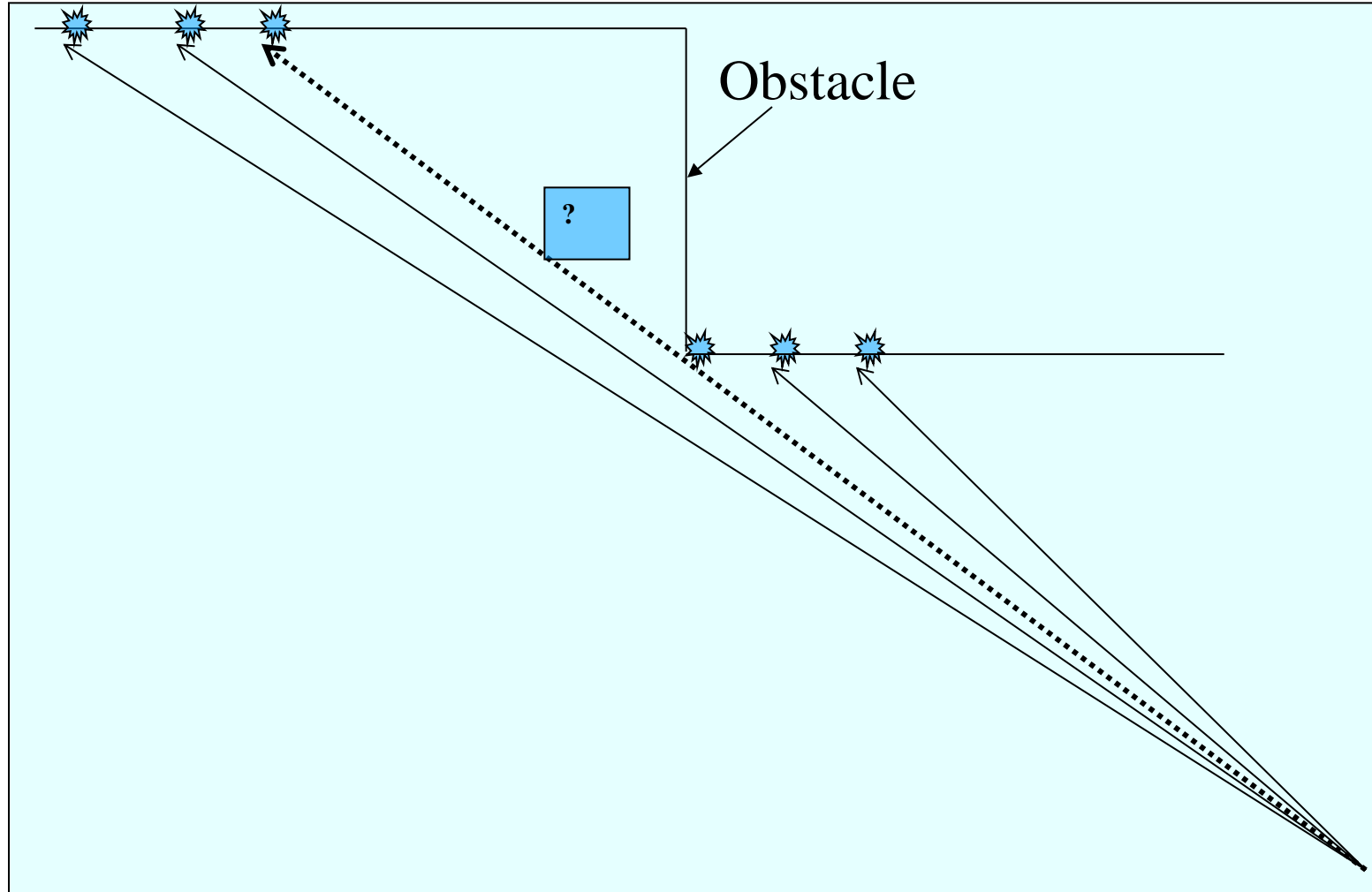
Cas d'une traversée complète de l'atmosphère

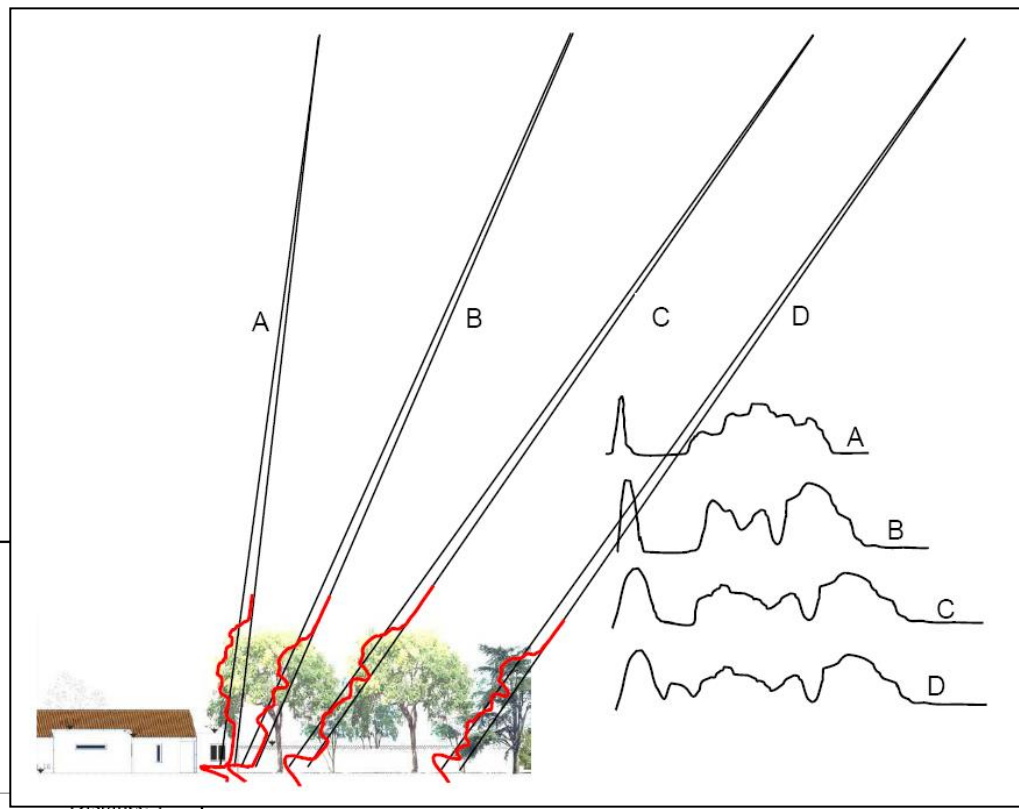
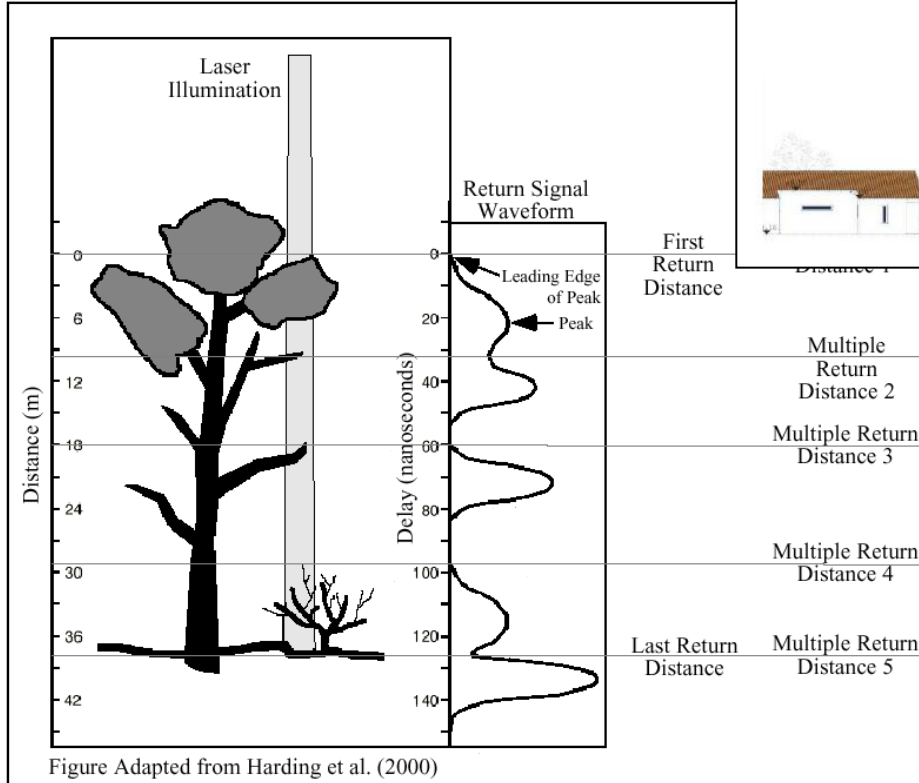
- Pour des visées basses sur l'horizon, les phénomènes de courbure, surtout pour des ondes radio, ainsi que de variations latérales de g induisent d'autres sources d'erreurs qu'on ne peut pas non plus ignorer.
- Donc, *en régime stationnaire*, on trouve que la correction de vitesse pour une traversée verticale complète de l'atmosphère sèche ne dépend presque que de la **pression au niveau du sol**.

Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol

Échos multiples : des résultats ambigus liés au traitement



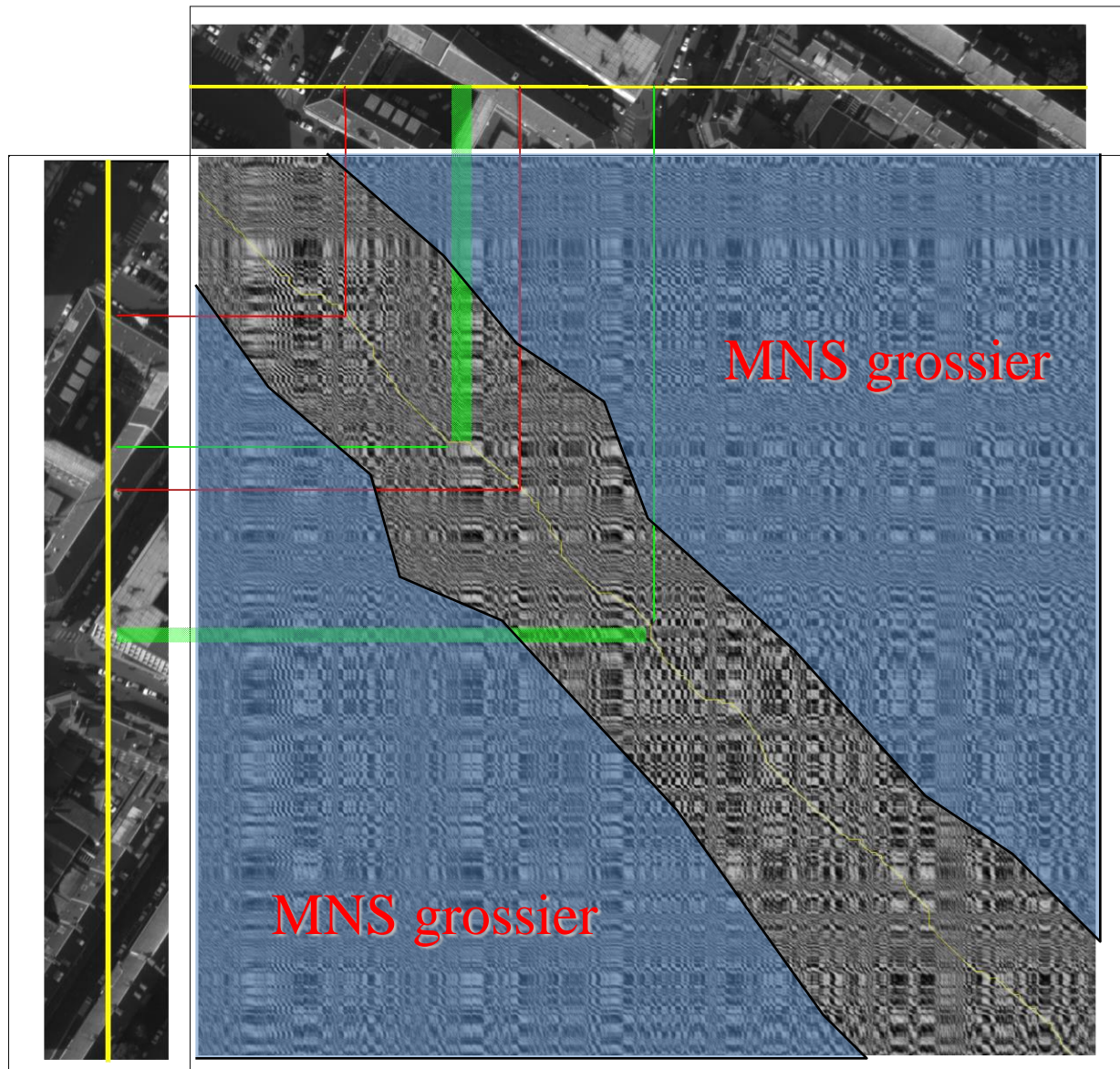


Obtention de MNS et MNT

- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol

Emploi de la corrélation en imagerie

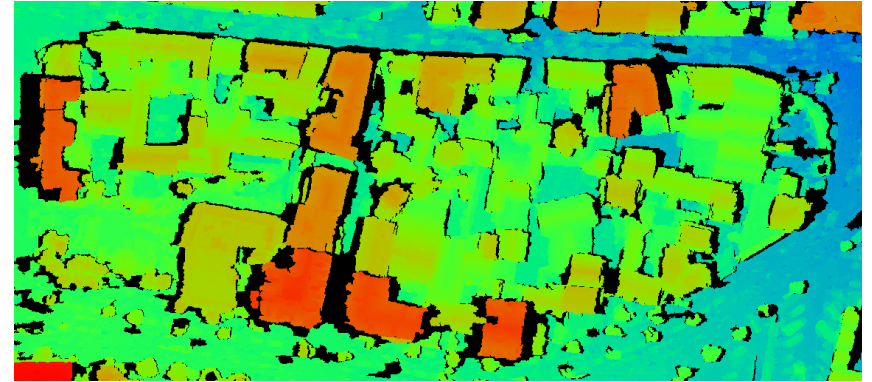
- En photogrammétrie, traditionnellement la corrélation était effectuée par l'œil humain. Elle a été relayée par une corrélation numérique, entre des imagerie de taille variable :
 - Imagerie petite (p. ex. 3 x 3) : bonne détection des petits détails, calcul rapide, mais beaucoup de fautes
 - Imagerie grande (p. ex. 25 x 25) : très précis, peu de fautes, calcul très long, mais filtre les hautes fréquences spatiales.
- La corrélation est aussi employée en mode diachronique, 2 images de la même zone à des moments différents, permettant de mesurer les déformations.



Résultats : MNS, MNE et MNT



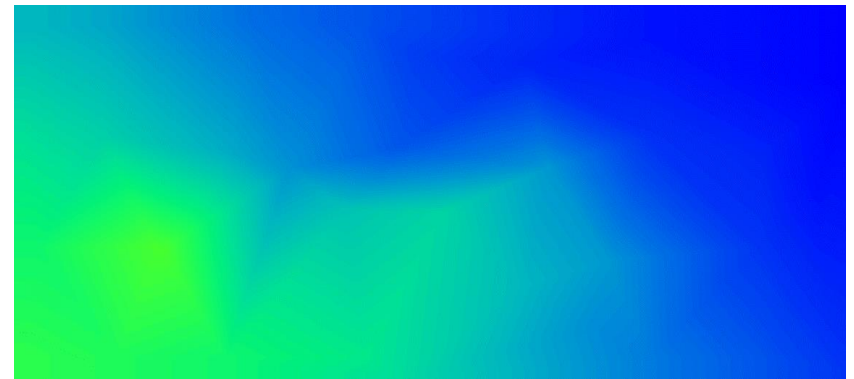
Image



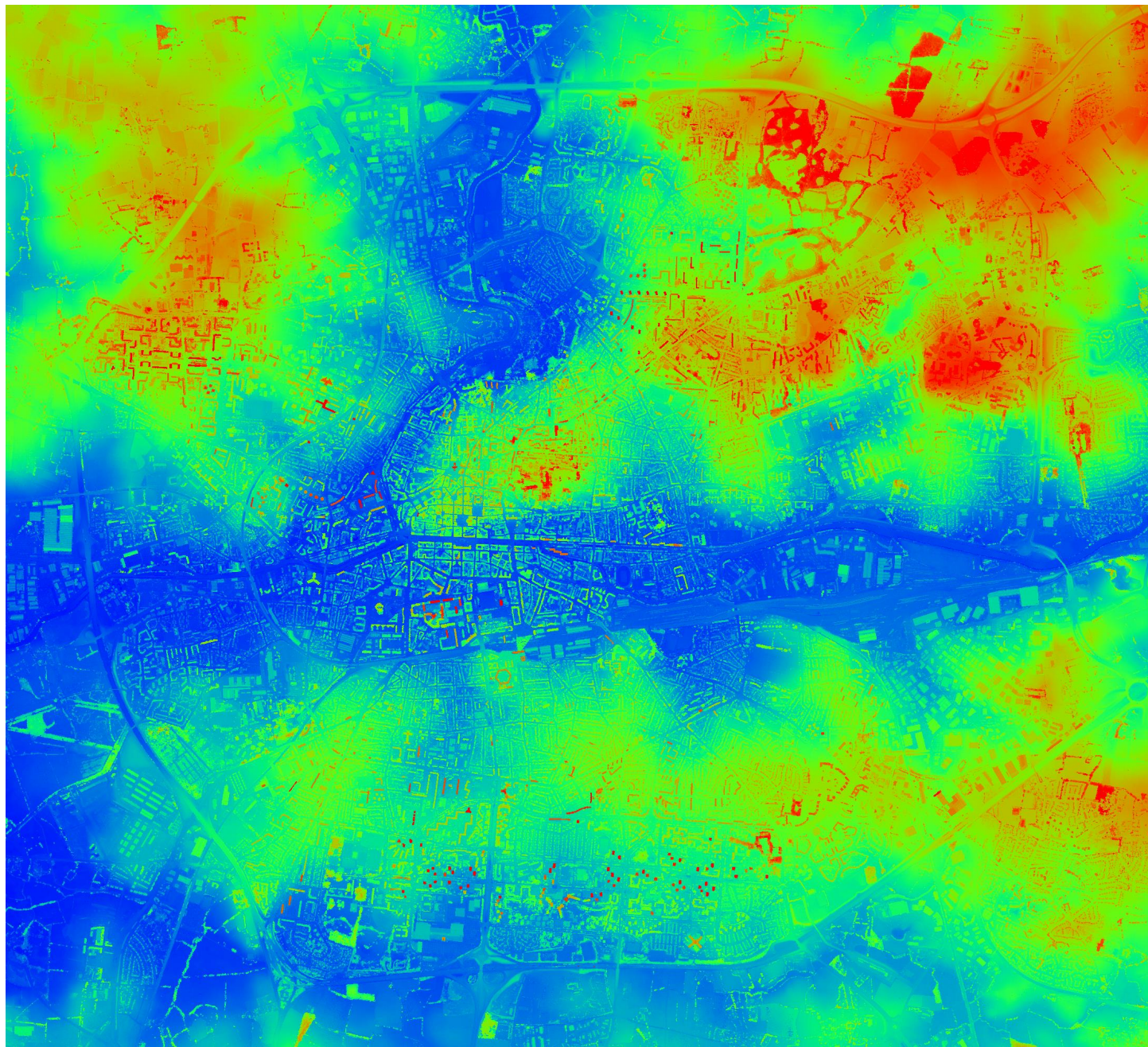
MNS

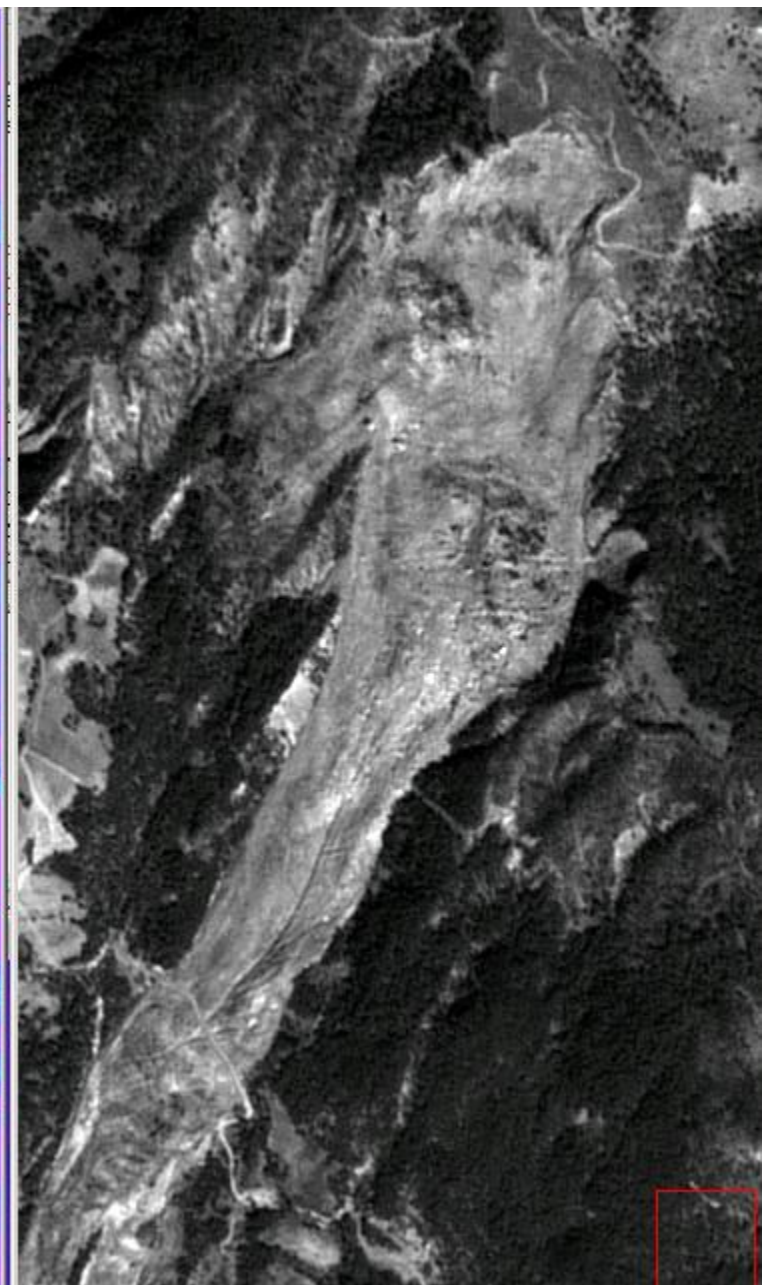
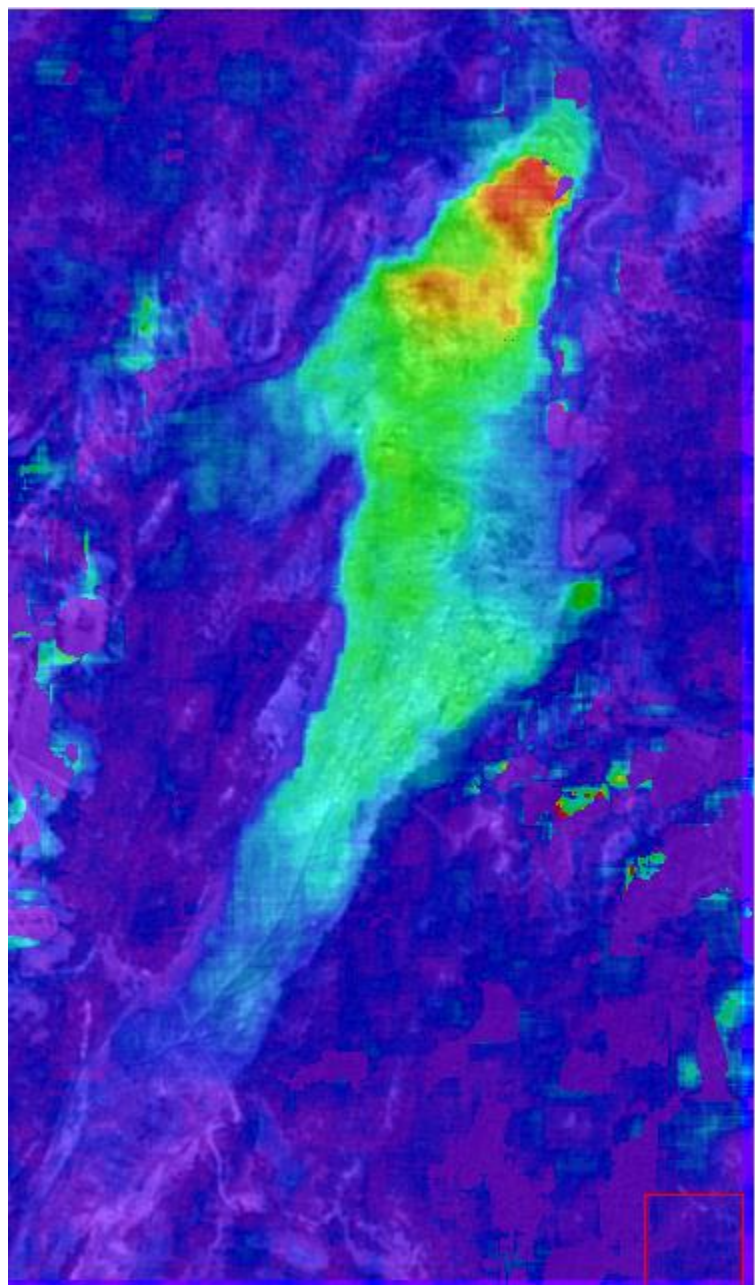
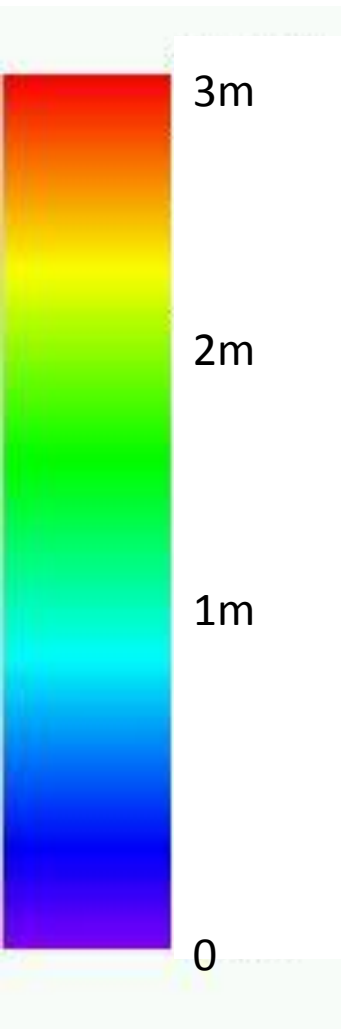


Extraction des zones de sursol

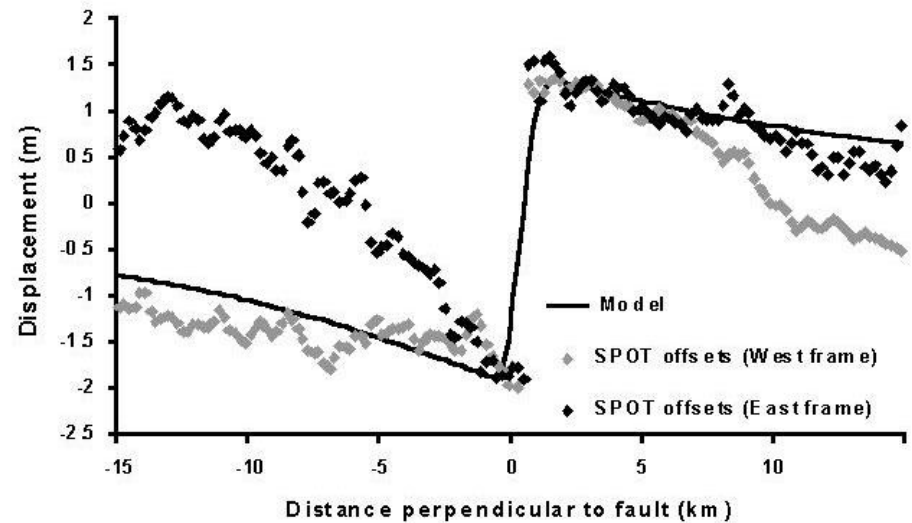
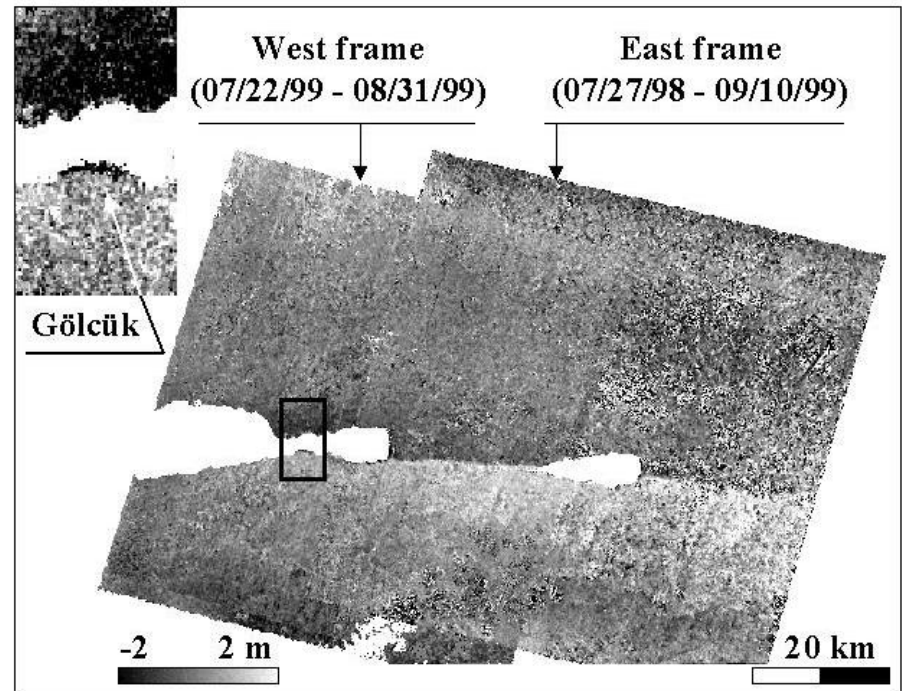


MNT



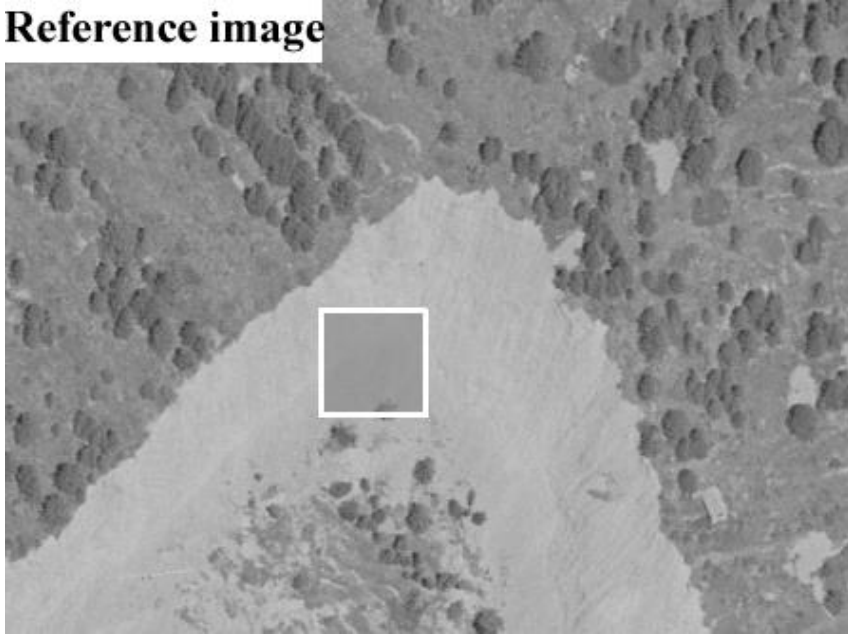


Les possibilités étonnantes offertes par l'imagerie spatiale: comment mesurer des déplacements co-sismiques à 10 cm près sur une image Spot à pixel de 10 m. A comparer avec l'interférométrie radar.

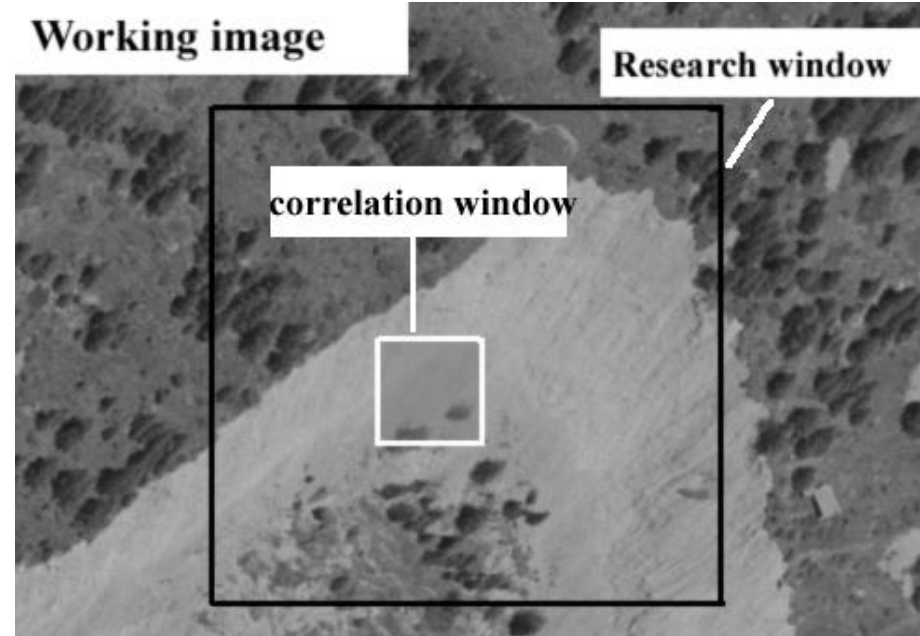


Correlation diachronique *(D. Raucoules)*

Reference image



Working image



Maximization of a correlation function
Sub pixel precision

To find homologous points on pairs of images
To derive planar ground displacement on orthorectified images

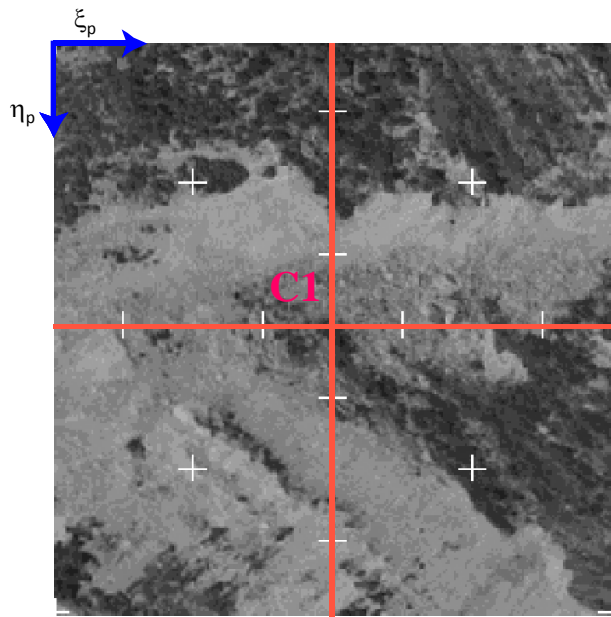


Image 1

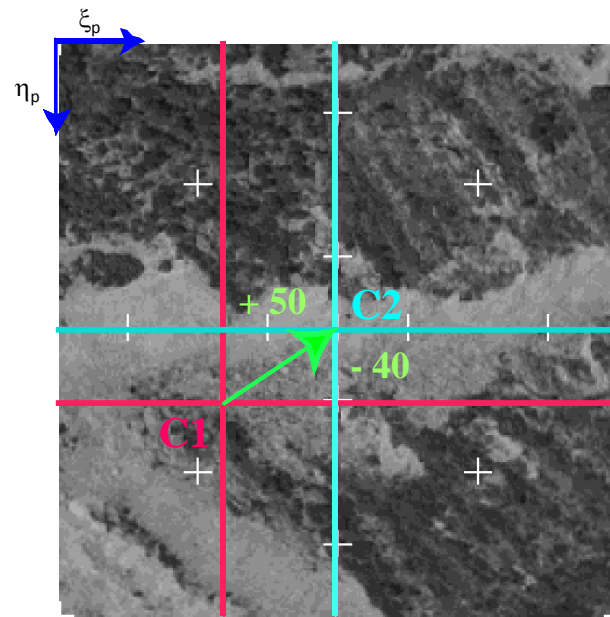
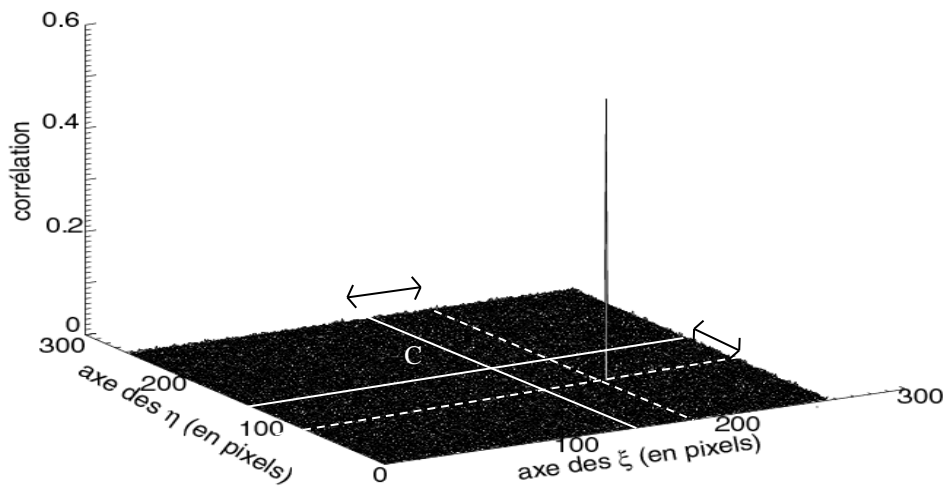
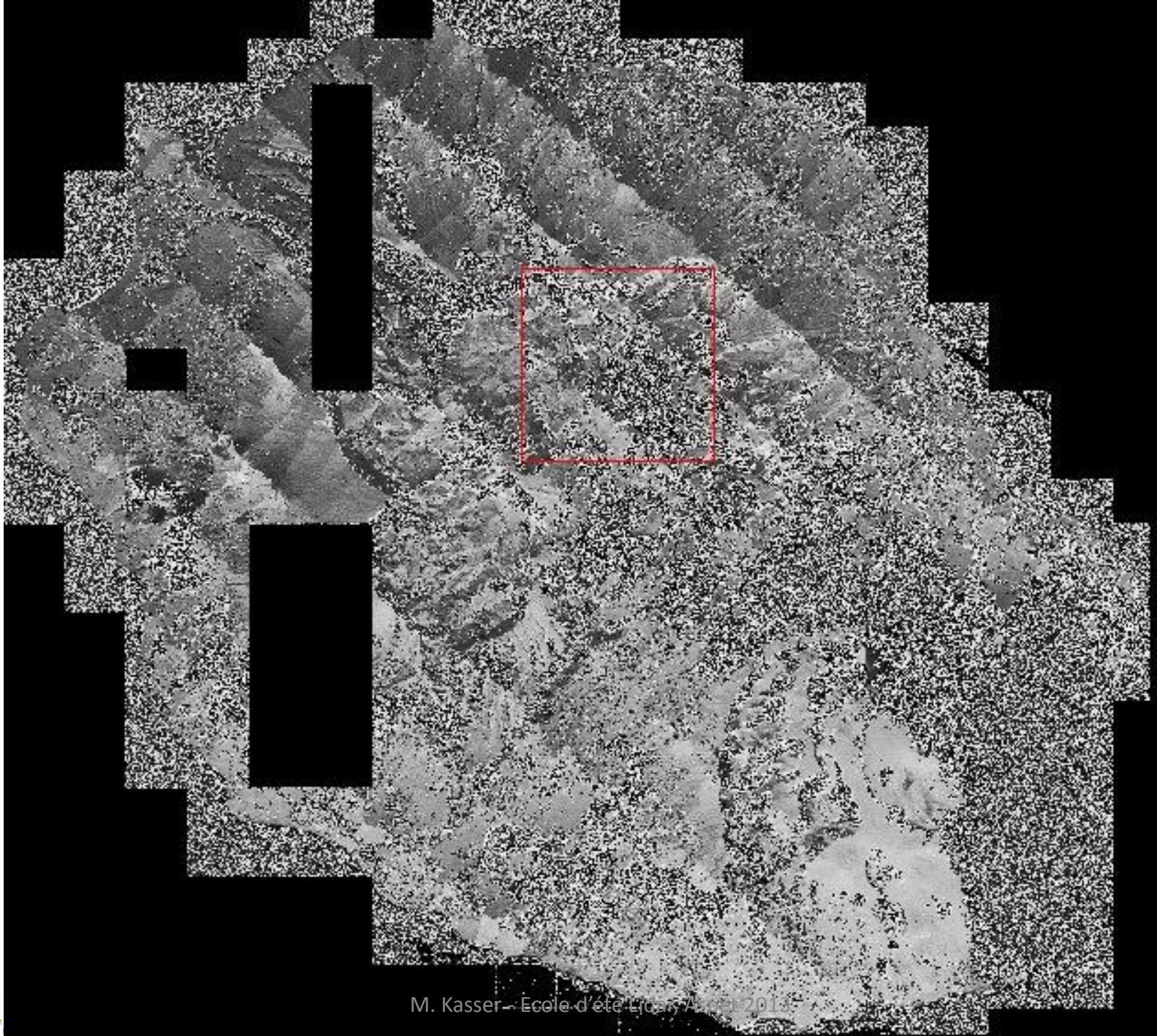


Image 2= image 1 + shift







*Les outils de
corrélation dense :
Un exemple,
MICMAC*



Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements

Sébastien Leprince, *Student Member, IEEE*, Sylvain Barbot, *Student Member, IEEE*, François Ayoub, and Jean-Philippe Avouac

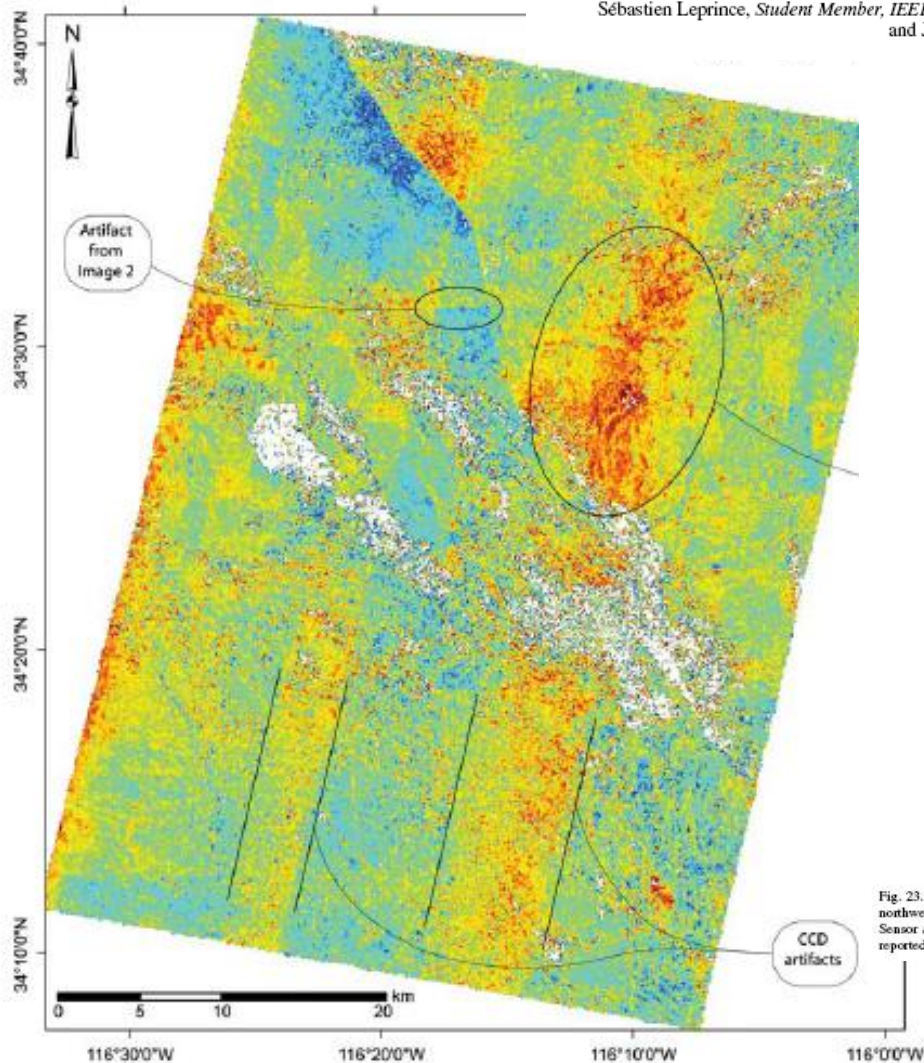


Fig. 24. East/west component of the SPOT 4/SPOT 2 correlation. Displacements are positive toward the east. The fault rupture is visible going from the northwest corner to the center of the image. The maximum east/west component of the fault slip is estimated to be 3.5 m. Sensor distortions are inducing linear artifacts and parallax effects on topographic features. Decorrelation points are discarded and appear in white.

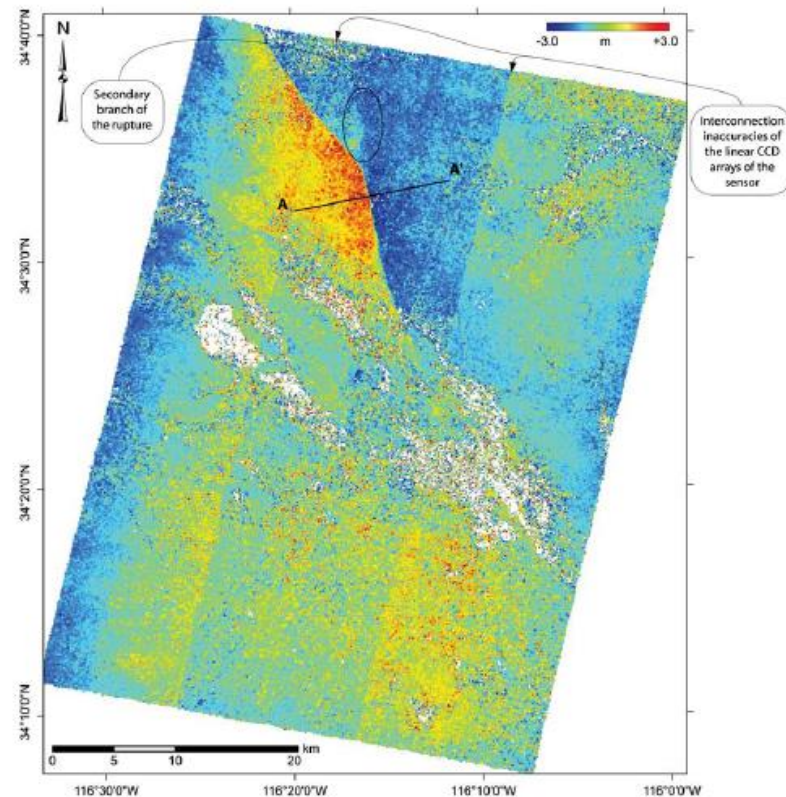


Fig. 23. North/south component of the SPOT 4/SPOT 2 correlation. Displacements are positive toward the north. The fault rupture is visible going from the northwest corner to the center of the image. The maximum displacement on the fault along the north-south direction is 6 m. A secondary branch is also noticed. Sensor artifacts lead to linear distortions in the satellite along the track direction. Decorrelation points are discarded and appear in white. The profile AA' is reported in Fig. 26.

Influence of camera distortions on satellite image registration and change detection applications

François Ayoub*, Sébastien Leprince*, Renaud Binet†, Kevin W. Lewis*, Oded Aharonson*,
and Jean-Philippe Avouac*

*Division of Geological and Planetary Sciences
California Institute of Technology

MC100-23, 1200 E. California Blvd, Pasadena, CA 91125, USA

Phone: (626) 395-3726, Email: fayoub@gps.caltech.edu

†Laboratoire de Détection et Géophysique
Commissariat à l'Énergie Atomique
91297 Arpajon, France

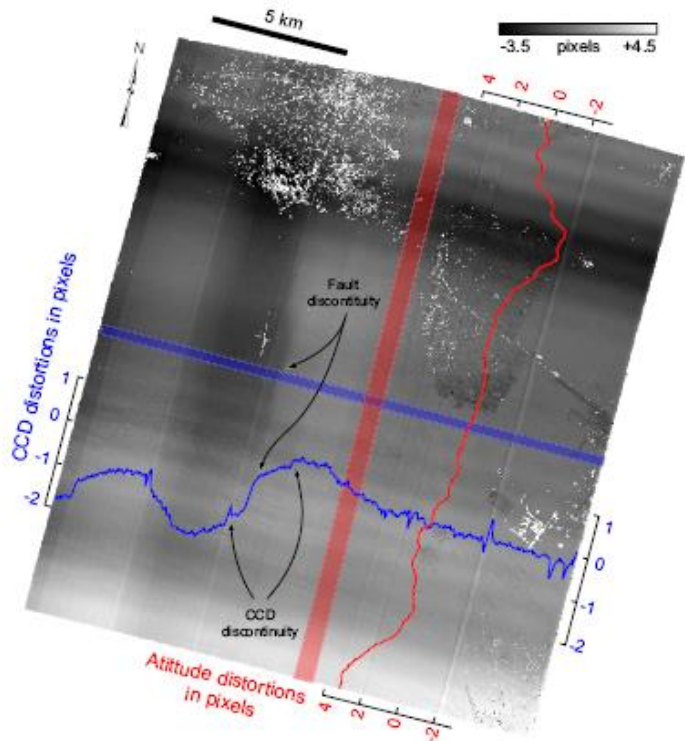


Fig. 3: Disparity map in the direction orthogonal to the epipolar direction between two Quicbird images (03SEP30063637-P1BS-000000170456_01_P001 and 04JAN03064311-P1BS-000000170455_01_P001), acquired above the city of Bam, Iran, on September 30, 2003, and on January 03, 2004. Images were resampled at a 50 cm resolution and subpixel correlation was performed on 128×128 pixels windows, sliding with a step of 64 pixels. This disparity map should not show any particular pattern, and indeed, no topography signal is detected. The goal of this study was to detect and

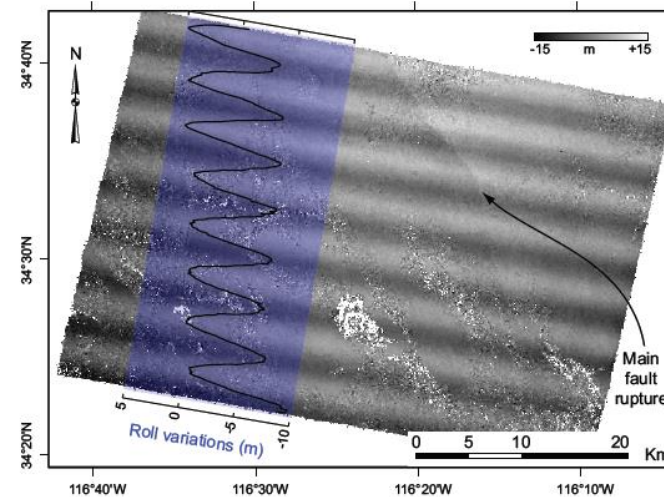
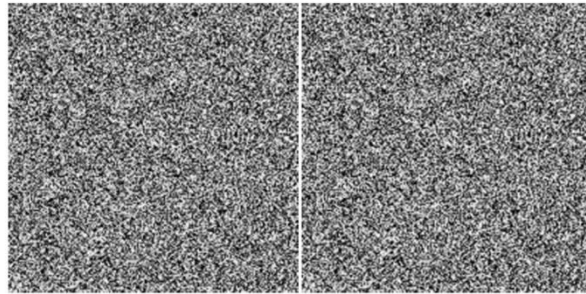


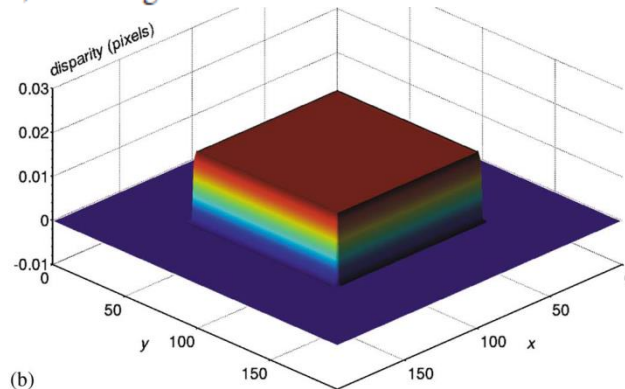
Fig. 2: Disparity map in the East/West direction between a SPOT 4 and an ASTER images, acquired on May 10, 2000, and on August 17, 1998 over the Hector Mine area, California. Images were orthorectified on a 10 m resolution UTM projection, and subpixel correlation was performed on 32×32 pixels windows, sliding with a step of 8 pixels. The SPOT 4 image was corrected for CCD arrays misalignments as explained in II. The goal of this study was to detect and measure the ground rupture produced during the 1999, Mw 7.1, Hector Mine earthquake. The fault rupture is identifiable but accurate measurements are difficult due to the oscillating bias induced by the unmodeled jitter of the ASTER spacecraft during the image acquisition.

Precise Subpixel Disparity Measurement From Very Narrow Baseline Stereo

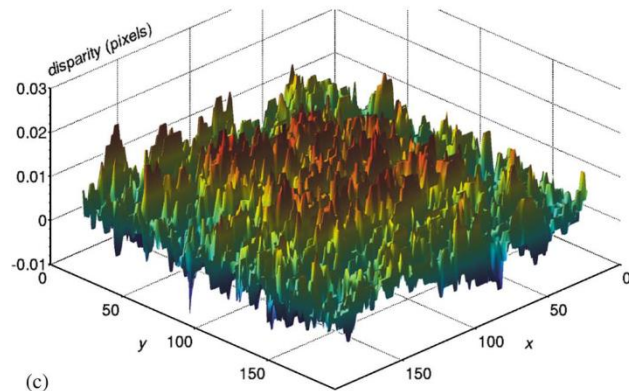
Gareth Llewellyn Keith Morgan, *Student Member, IEEE*, Jian Guo Liu, and Hongshi Yan



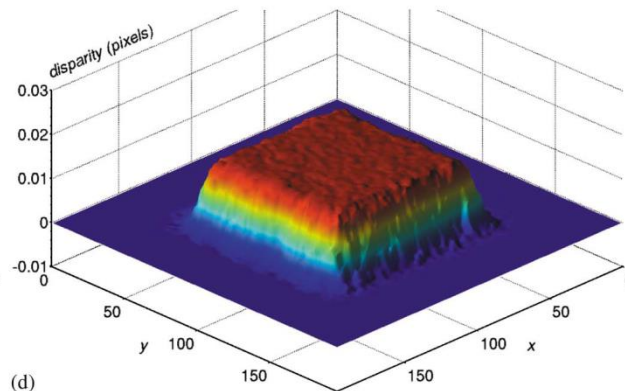
(a)



(b)

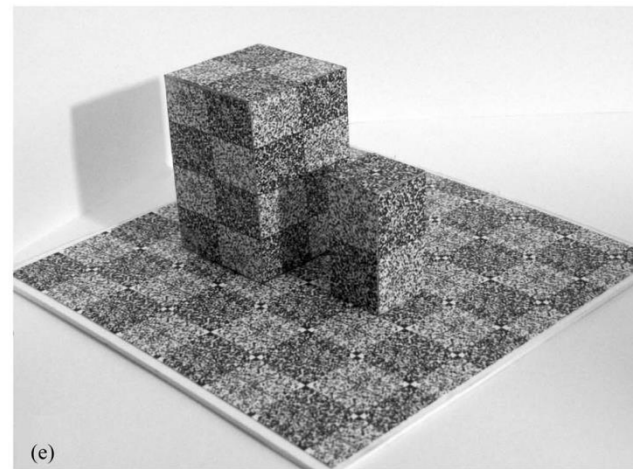
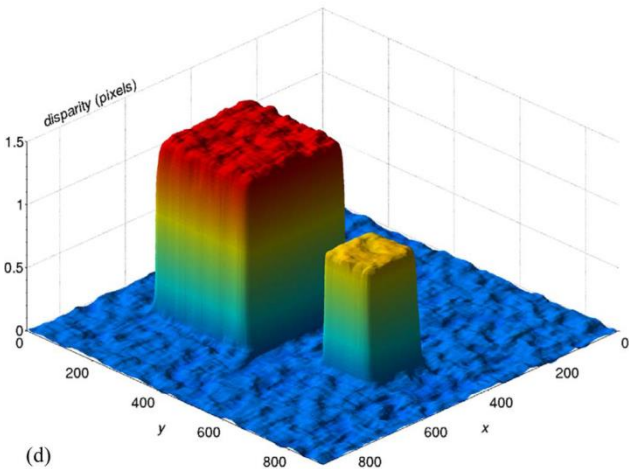
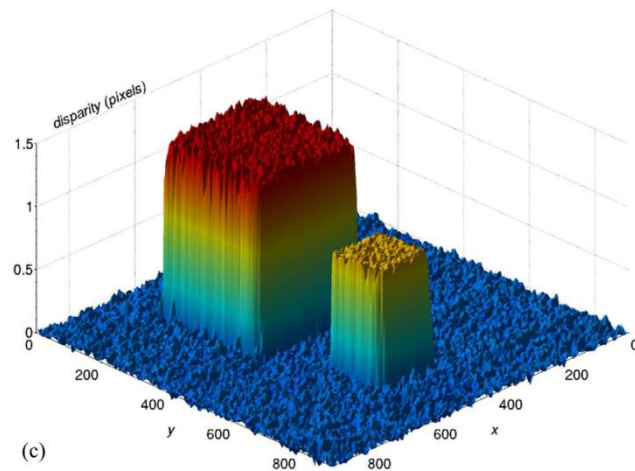
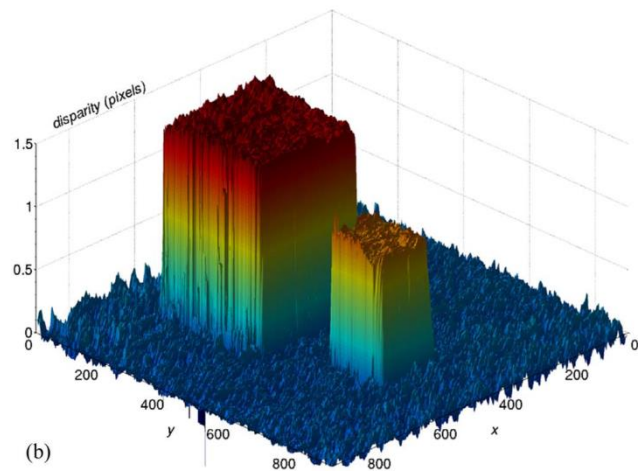
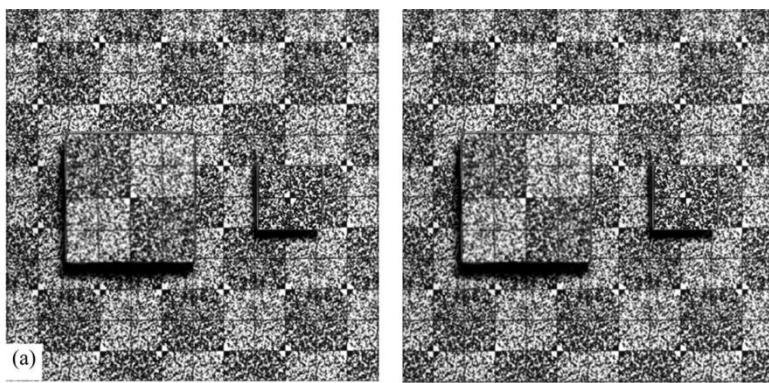


(c)



(d)

(a) Random-dot stereo pair (196×196 pixels). A central square patch in the right image is shifted by 0.0156 pixels relative to the background. (b) “Ground-truth” disparity map in 3-D sun-shaded view. (c) Computed raw disparity map from the subpixel-enabled NCC algorithm. (d) Computed raw disparity map from the PC algorithm. The PC algorithm retrieves a mean estimate for the shifted square patch of 0.0153 pixels with an rms error of just 0.001.



(a) Stereo pair of the model buildings with B/H ratio = 0.003. (b) Raw disparity maps computed by the subpixel NCC algorithm using a 17×17 window, (c) by PC using a 32×32 window, and (d) the PC disparity map after median filtering (21×21), all presented in 3-D sun-shaded views.

(e) Photograph of the scale model building scene for comparison.

Passerelle sur la Thielle à Suscévaz



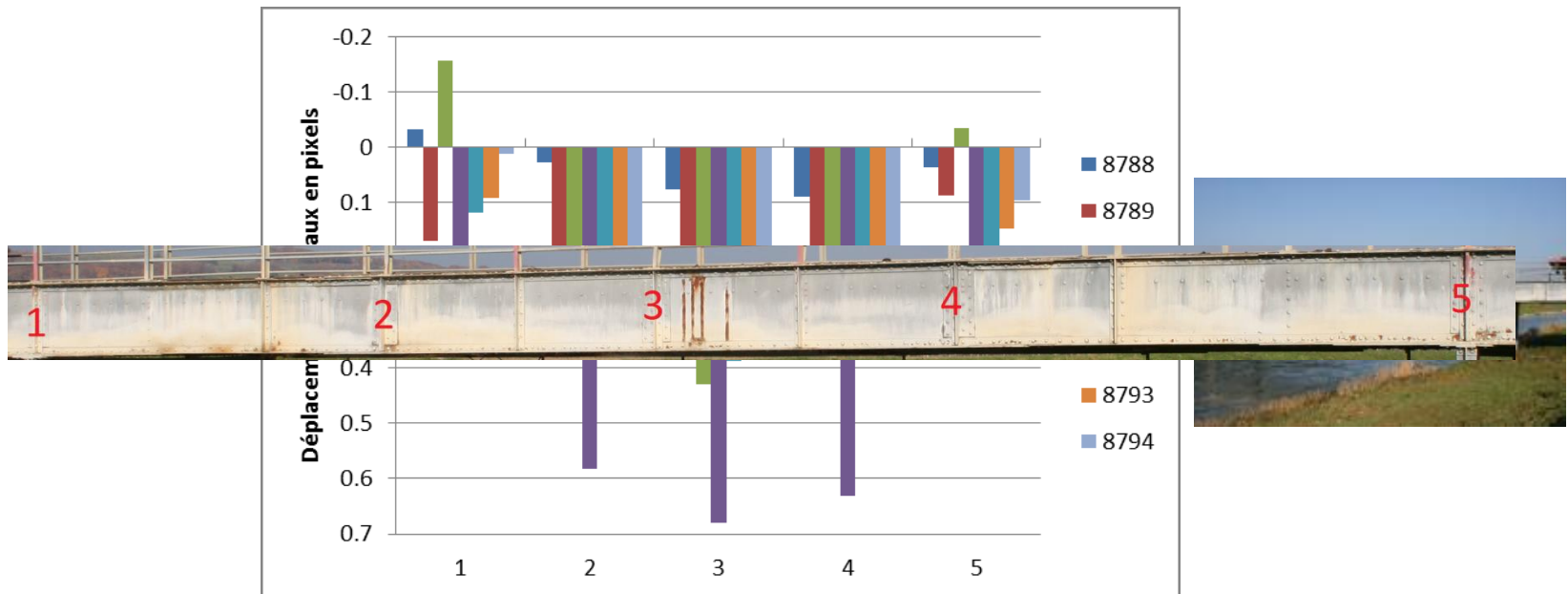
map.geo.admin.ch

Exemple de prise de vue

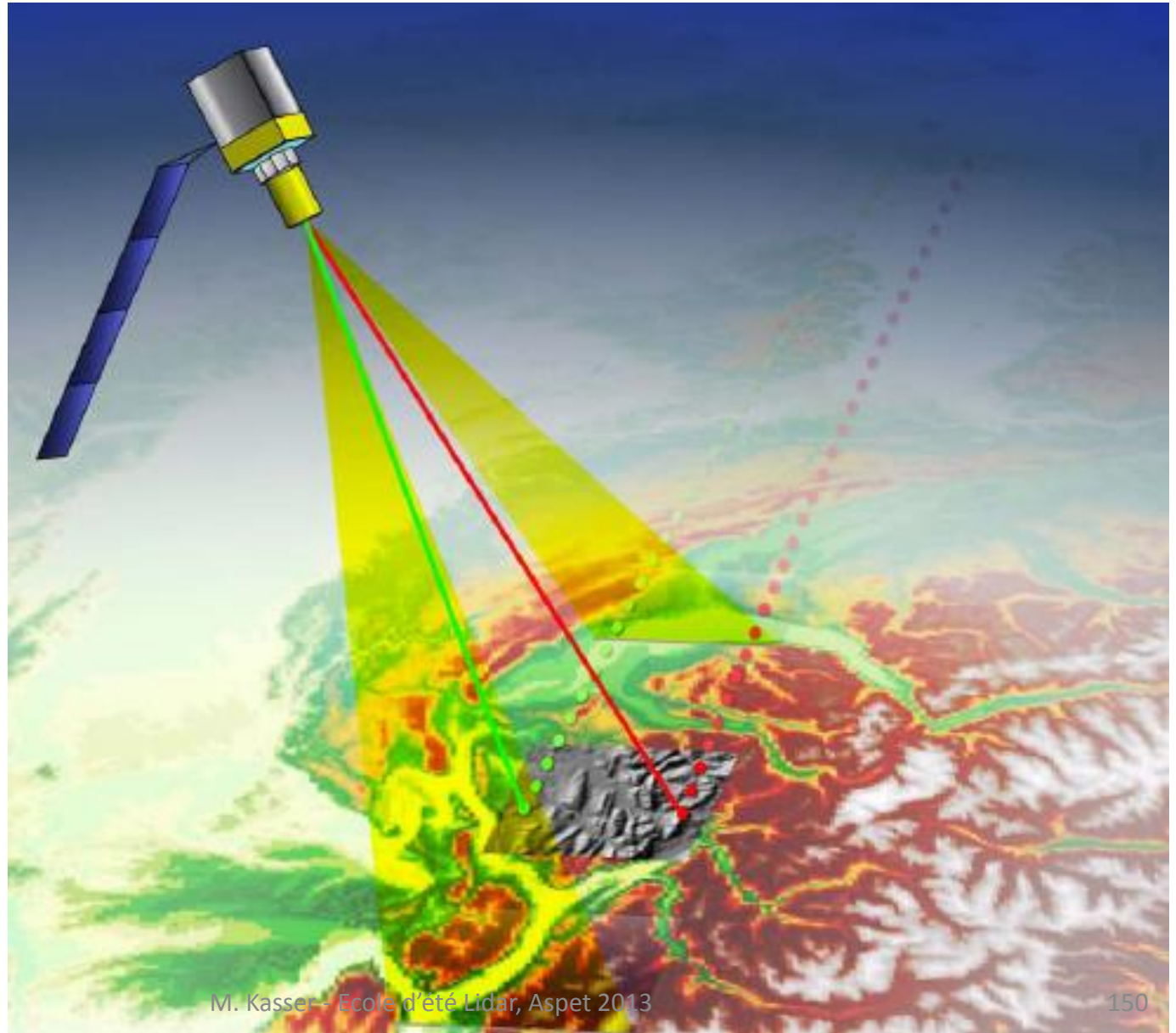


Mars 2013, Maxime PROT, Master MIT

Analyse au passage de véhicules

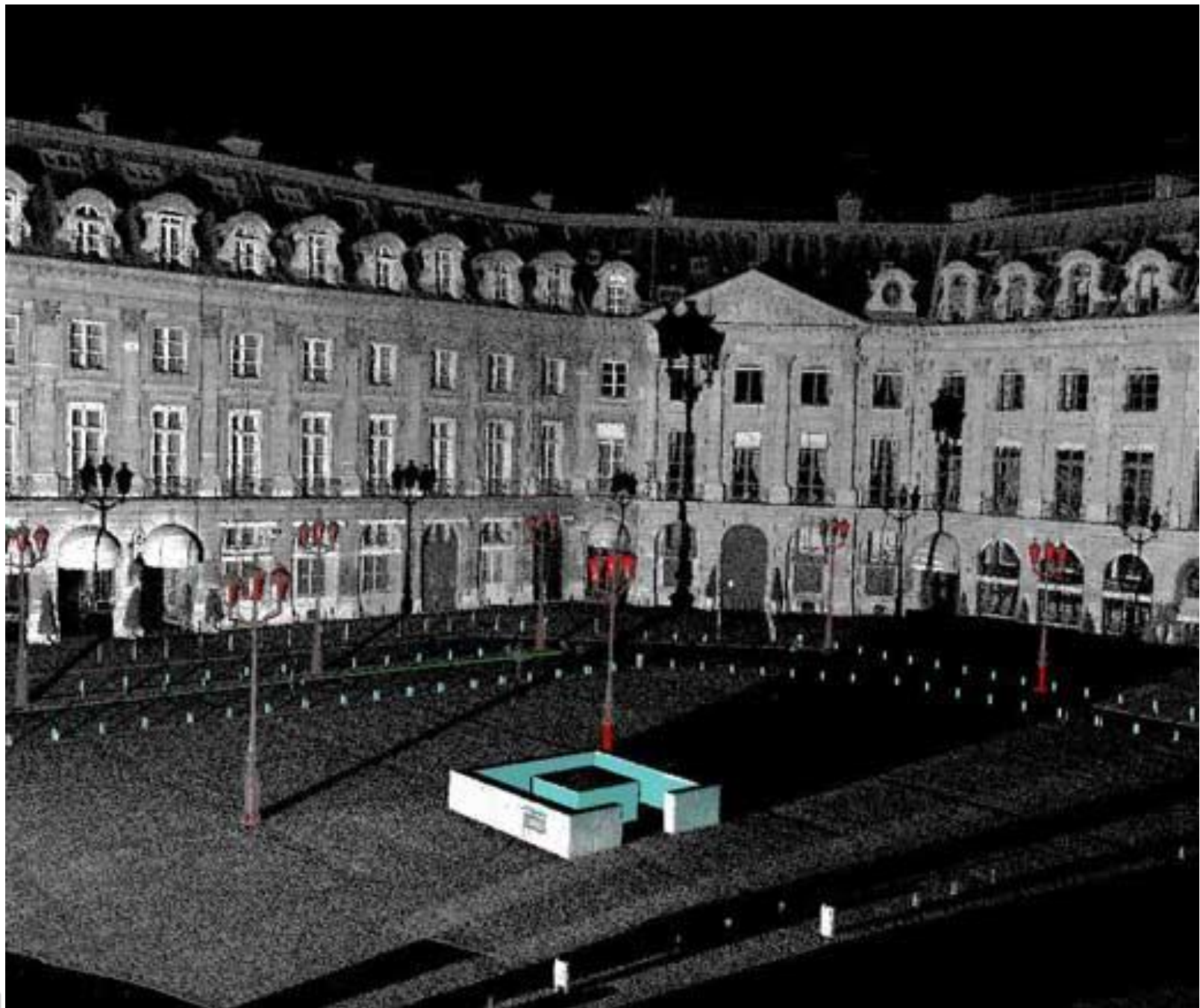


Mixage Lidar + Image : le projet spatial Z-Earth



Obtention de MNS et MNT

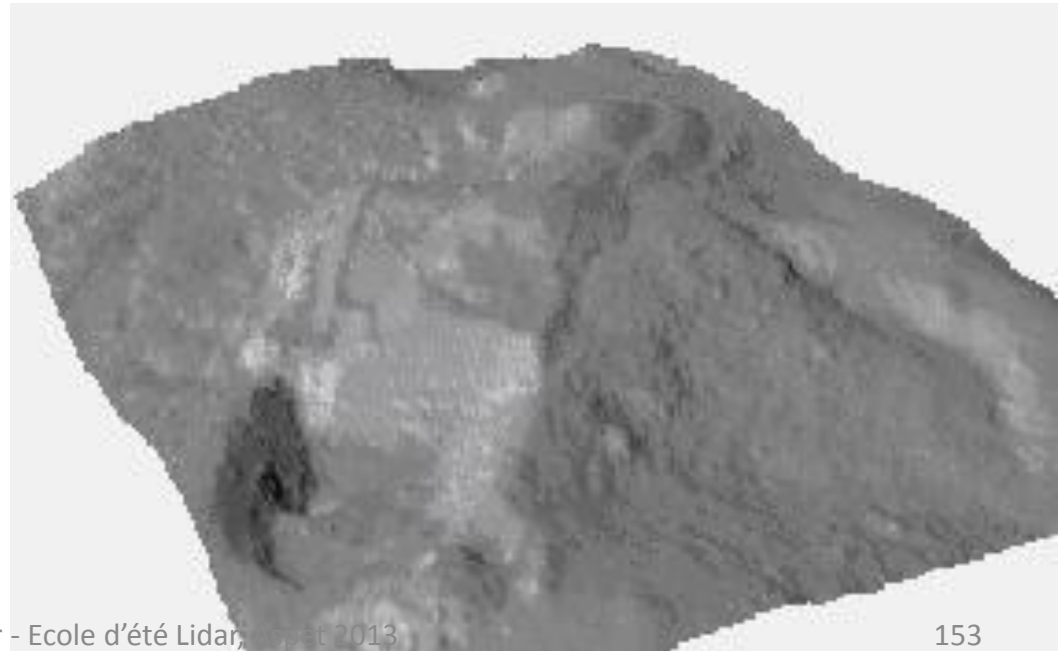
- Couplages GNSS-Inertiel
- Diffusions multiples ?
- Artefacts (surfaces d'eau), vitrages
- Hauteurs de végétation : projection-convolution
- Inhomogénéité de l'albedo
- Pente du sol / taille de la tâche
- Effets atmosphériques
- ROC
- Utilisation de l'imagerie stéréoscopique.
- MNT à partir de MNS : nettoyage du sur-sol



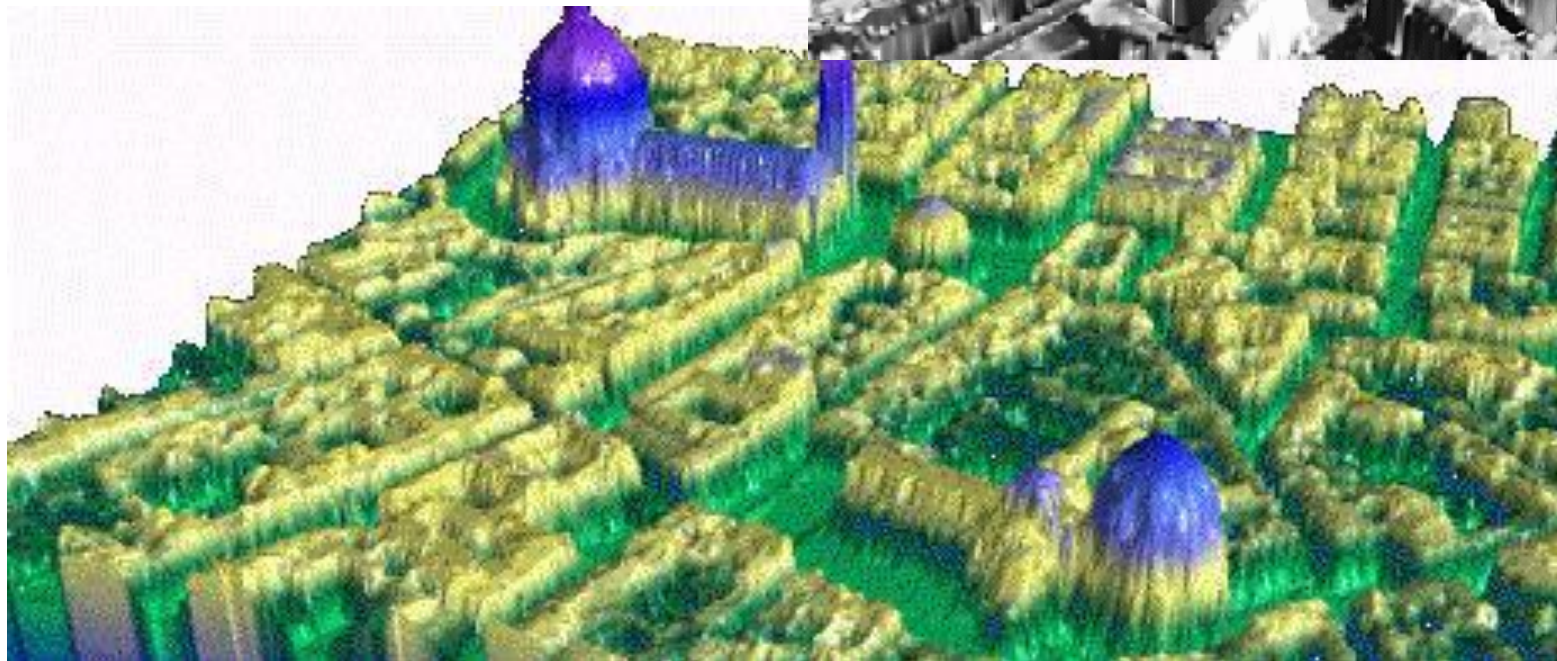


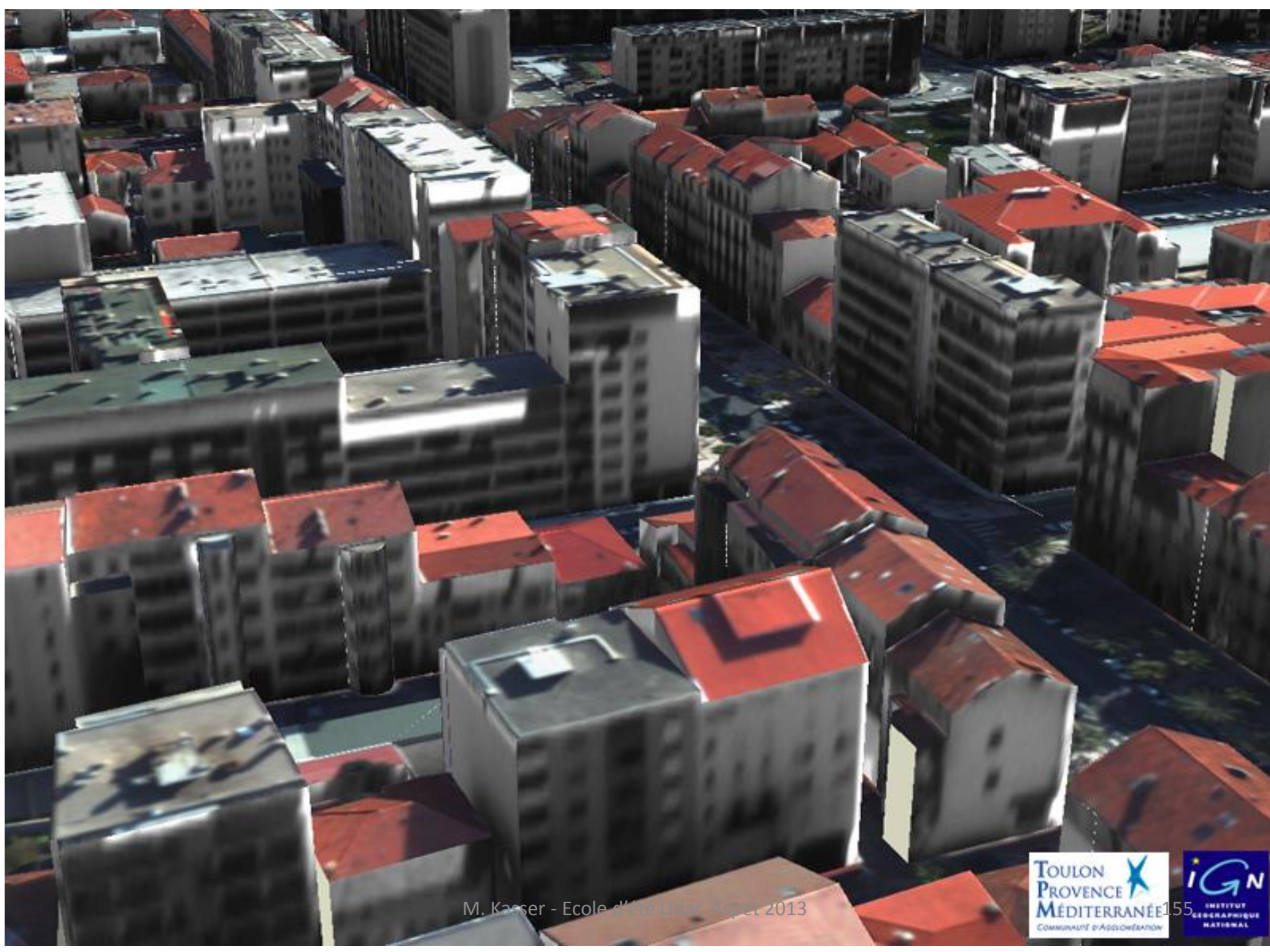
Lever de zone forestière.
Données = premiers échos

Le même lever, en
exploitant les derniers échos



Surfaces complexes : scènes urbaines





M. Kasser - Ecole d'été Lidar, Aspet 2013