

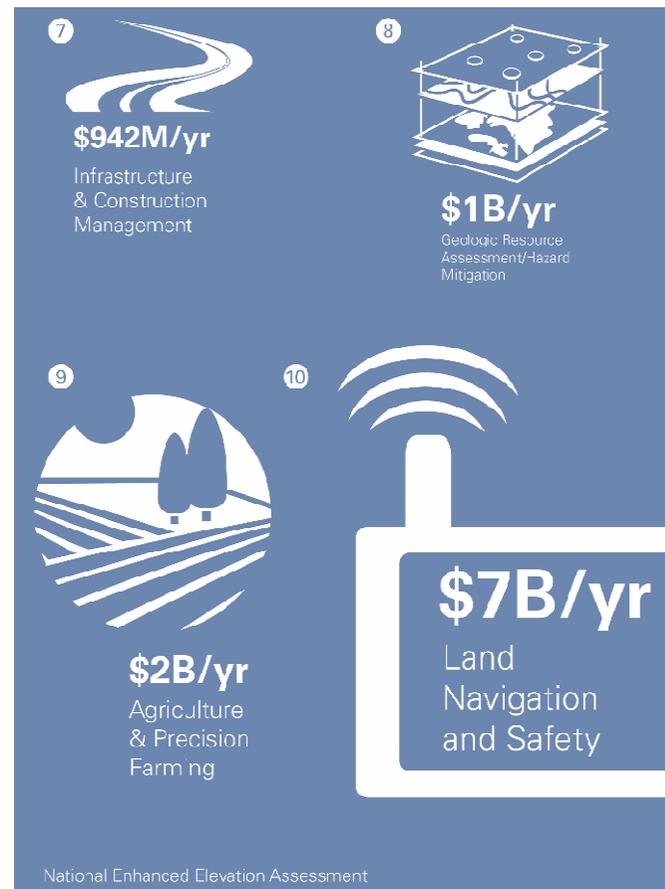
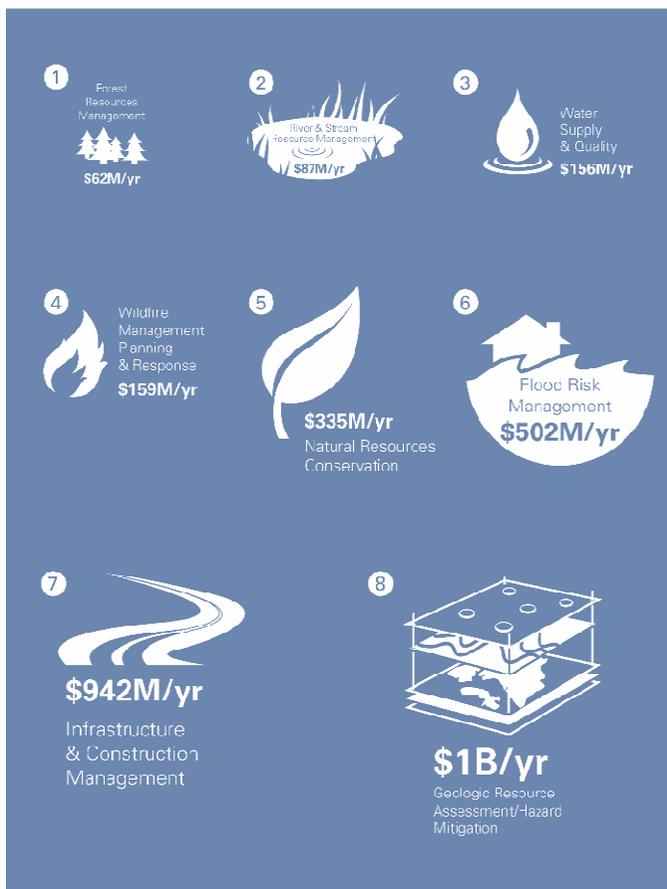
Tout sur le LiDAR : de la technologie aux applications

1^{ères} Rencontres ASIT VD - Lausanne, le 20 février 2014

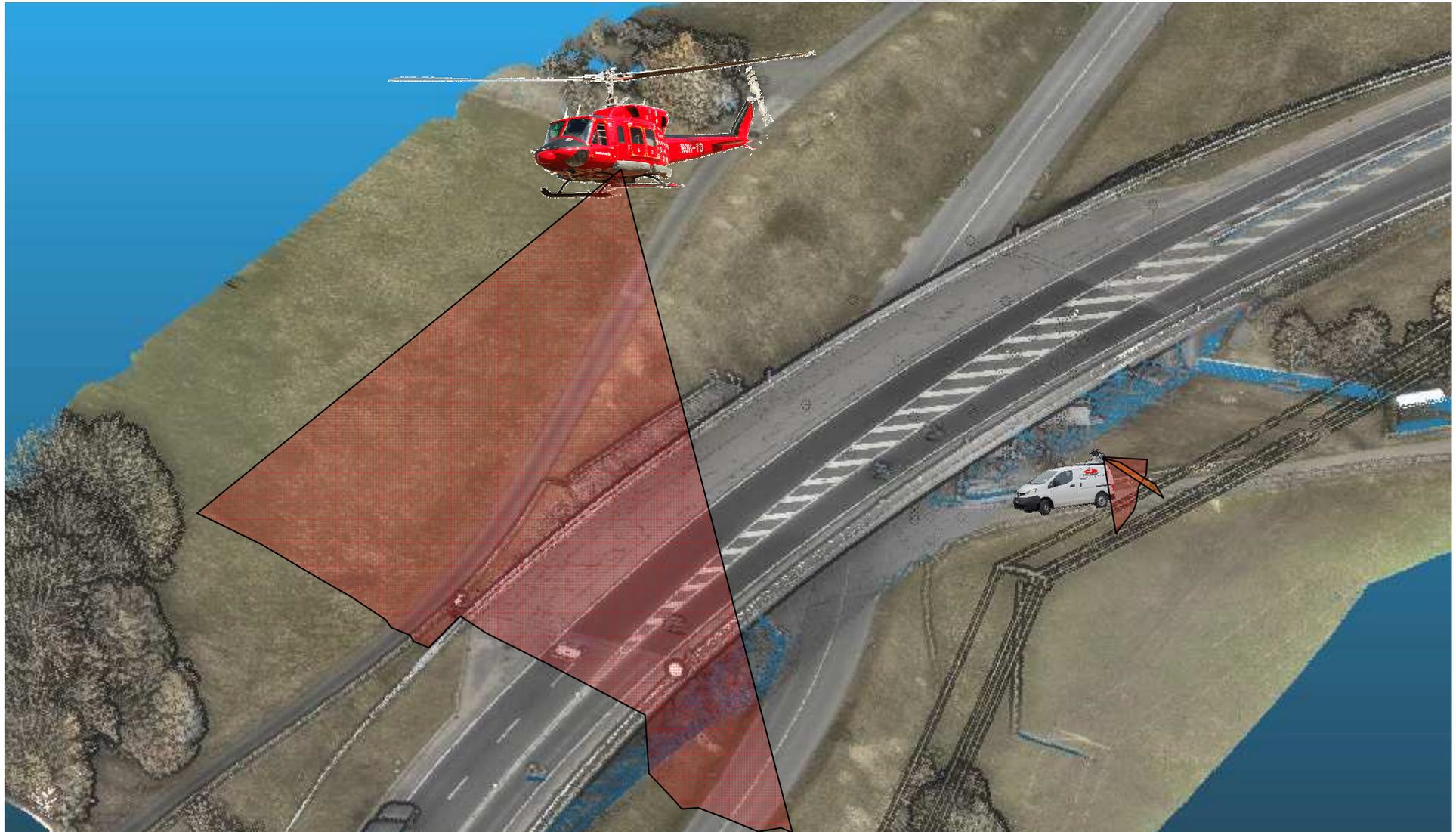
Selon une étude de l'USGS (US Geological Survey)

1 modèle altimétrique LiDAR disponible sur l'entier du territoire américain = économie de l'ordre de 13 milliards de \$/an

TOP 10 BUSINESS USE SAVINGS FROM A NATIONWIDE LIDAR MAP



LiDAR aéroporté et dynamique: approches théoriques et applications



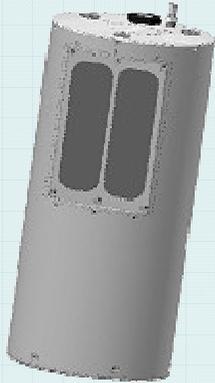
Sommaire

1. Historique
2. Principe de fonctionnement
 - + LiDAR
 - + Georéférencement direct
 - + Sources d'erreur
 - + Etalonnage
3. Technologie et performance
 - + Les capteurs
 - + Performances
4. Acquisition et traitement des données
 - + Fixer les objectifs
5. Exemples d'applications
 - + Zones inaccessibles (risques naturel, falaises, geologie...)
 - + Corridors (route, rail)
 - + Urbanisme (thermographie, potentiel solaire)
 - + Archéologie et patrimoine

1. Historique

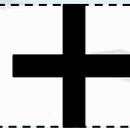
- ⊕ Georeferencement direct > 1990
- ⊕ LiDAR > 1995
- ⊕ Systèmes commerciaux ~1997
- ⊕ Camera Numérique HR ~2000
- ⊕ Généralisation depuis ~2005 en Europe
 - ⊕ établissement de MNT haute densité
 - ⊕ plage d'applications très vaste

2. Principes de fonctionnement



LiDAR (*Light Detection And Ranging*)

- + Basé sur la mesure électronique de distance (MED) entre l'appareil et la surface de l'objet. Emetteur/Récepteur
- + Dispositif de balayage



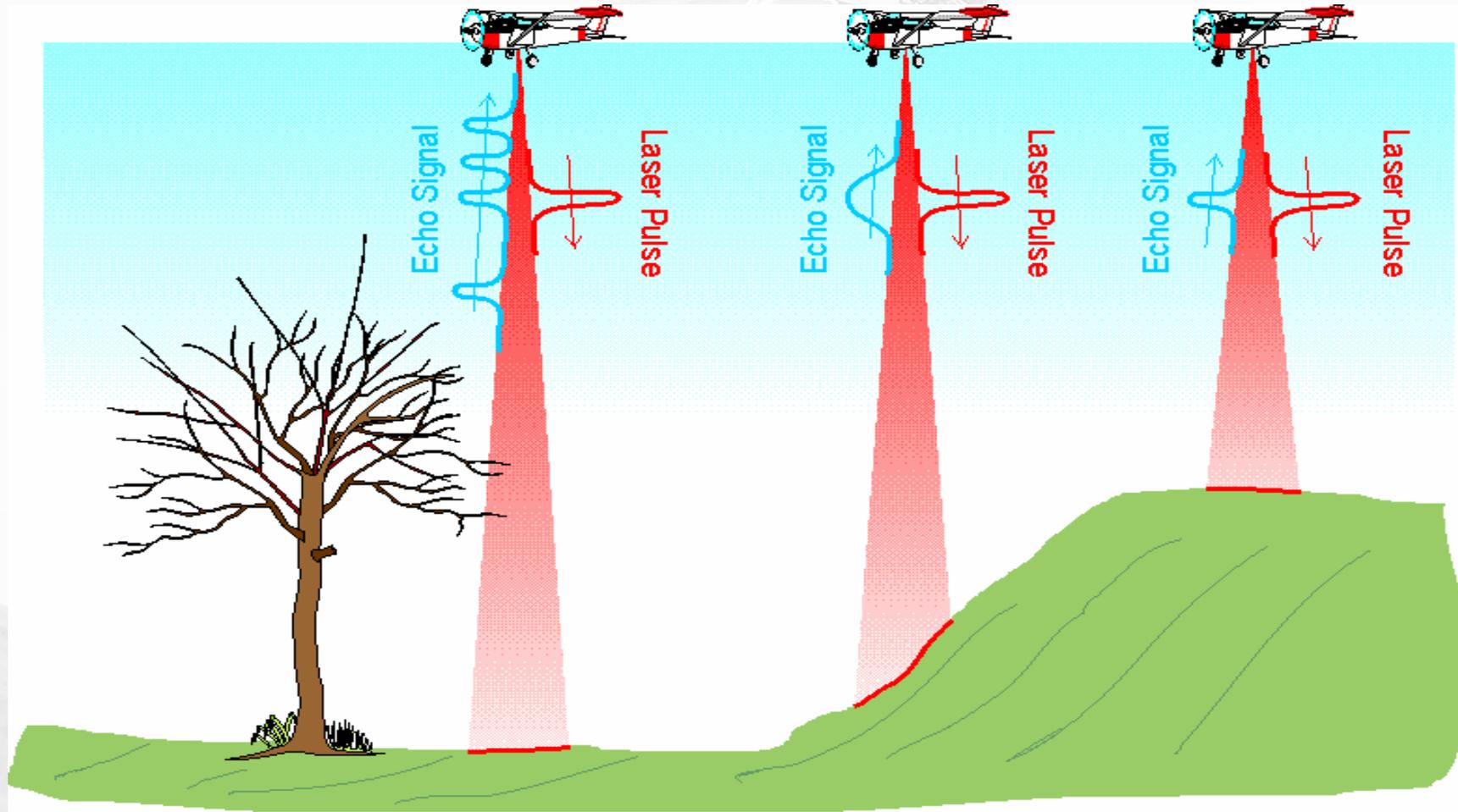
Dispositif de géoreferencement direct

- + Récepteur GPS
- + Centrale Inertielle

2. Caractéristiques d'un LiDAR

- ⊕ Système de balayage: type et fréquence
- ⊕ Fréquence d'émission: Pulse et mesure
- ⊕ Plage de mesure
- ⊕ Longueur d'onde λ
- ⊕ Divergence du faisceau laser
- ⊕ Multi-echo

2. Mesure multiples



2. Géoreferencement du Laser

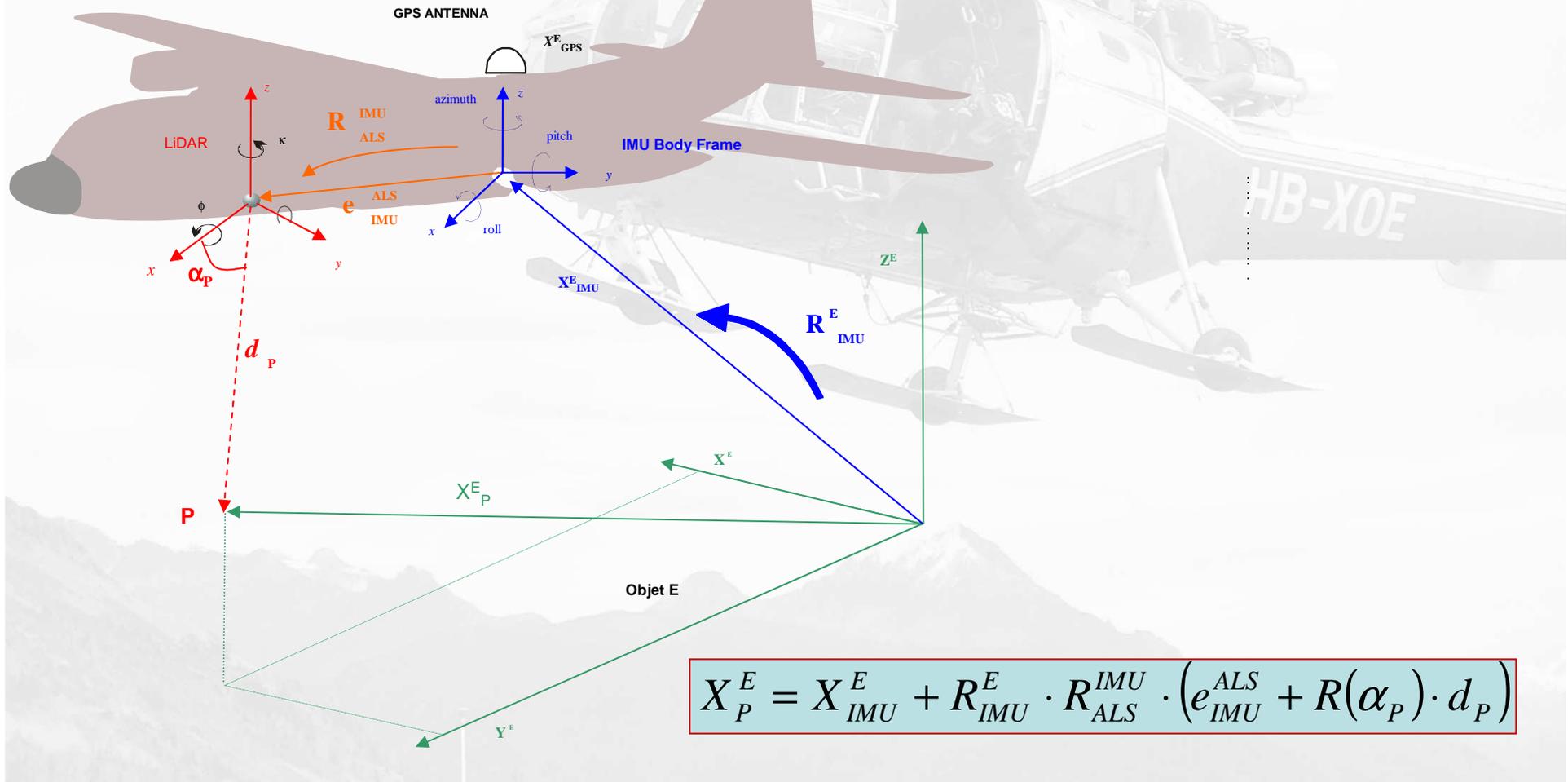
- ⊕ Utilisation de capteur de positionnement et orientation: Intégration GPS-Inertielle
 - ⊕ GPS-GNSS: bi-fréquence
 - ➔ Position \mathbf{x} et vitesse $\dot{\mathbf{x}}$ @ 1Hz
 - Unité de mesure Inertielle IMU
 - ➔ accélération $\ddot{\mathbf{x}}$ et vitesse angulaire $\dot{\theta}$ @ 100-500Hz

$$\iint \ddot{\mathbf{x}} dt \quad \int \dot{\theta} dt$$

➔ Position \mathbf{x} et orientation θ @ 100-500 Hz

2. Georeferencement du Laser

⊕ Mesures: d_P , α_P + X, Y, Z , roll, pitch, yaw



$$X_P^E = X_{IMU}^E + R_{IMU}^E \cdot R_{ALS}^{IMU} \cdot \left(e_{IMU}^{ALS} + R(\alpha_P) \cdot d_P \right)$$

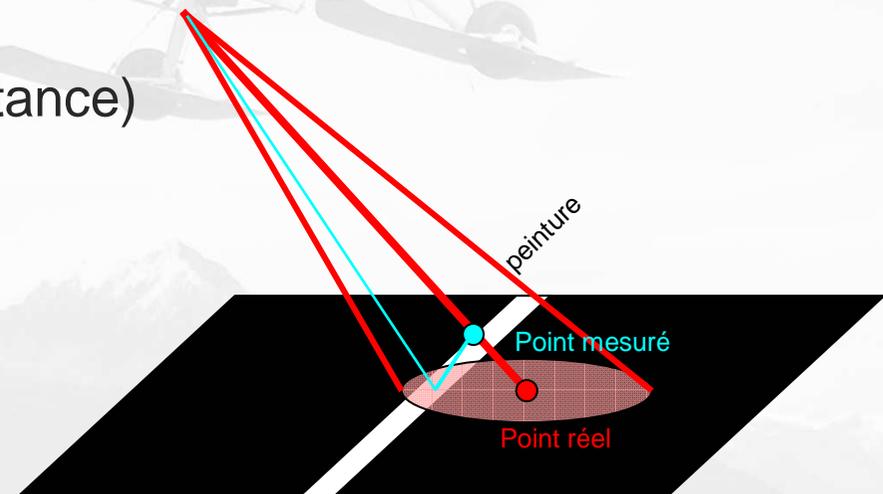
2. Sources d'erreurs

+ Directes

- + Erreur de position → translation (~3-10 cm)
- + Erreur d'orientation → f (hauteur de vol), $\sigma_{\text{angle}} \sim 0.01^\circ$
- + Erreur de mesure de distance → (~1-2cm)

+ Indirectes

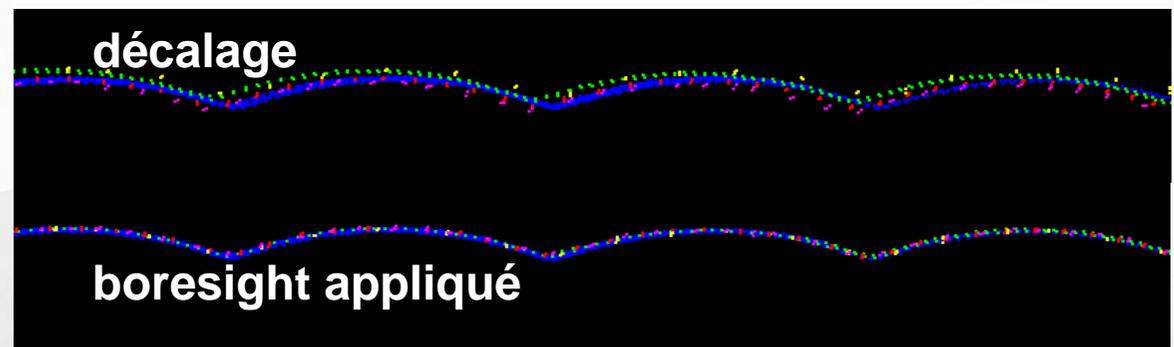
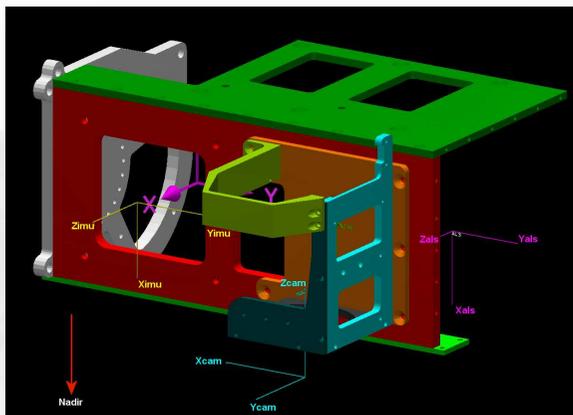
- + Divergence du faisceau
- + Angle d'incidence sur le sol
- + Nature du sol (rugosité, réflectance)



2. Etalonnage

La phase d'étalonnage consiste à:

- ⊕ Déterminer les bras de levier entre les capteur (GPS-Laser et IMU-Laser)
- ⊕ Déterminer la matrice de montage (rotations) entre le système de coord. IMU et celui du Laser: BORESIGHT



3. Technologie

- ⊕ Capteurs LiDAR
 - ⊕ Aériens (hautes altitude, moyenne altitude)
 - ⊕ mobile terrestre (voiture, train, bateau)
- ⊕ Système géoréférencement direct
 - ⊕ GPS-GNSS
 - ⊕ IMU (Tactique, Navigation)

3. Capteurs LiDAR aéroporté



| LiDAR | Max. PRR [kHz] | λ [nm] | FOV [°] | Distance [m] | Divergence [mrad] | Applications |
|----------------|----------------|----------------|---------|--------------|-------------------|---------------------------------------|
| Leica ALS60 | 200 MTA | 1064 | 75° | 200-5000 | 0.22 | Haute altitude, grand surface |
| Optech Pegasus | 400 MTA | 1064 | 65° | 300-2500 | 0.20 | Haute altitude, grande surface |
| Riegl LMS1560 | 2x800 MTA | 1064 | 60° | 500-3500 | 0.20 | Haute altitude, grande surface |
| Riegl VQ580 | 390 | 1064 | 60° | 50-1000 | 0.20 | Moyenne altitude et surface, corridor |

3. Capteur terrestre mobile

- + Embarqué sur voiture, train, bateau
- + Qualité IMU importante vs. Application
- + Couverture réduite (30-50m), haute densité (2'000 pt/m²)



3. Georéférencement direct

- + Récepteur GPS-GNSS L1/L2
- + Unité de mesure inertielle IMU
 - + MEM's
 - + Classe tactique
 - + Classe navigation

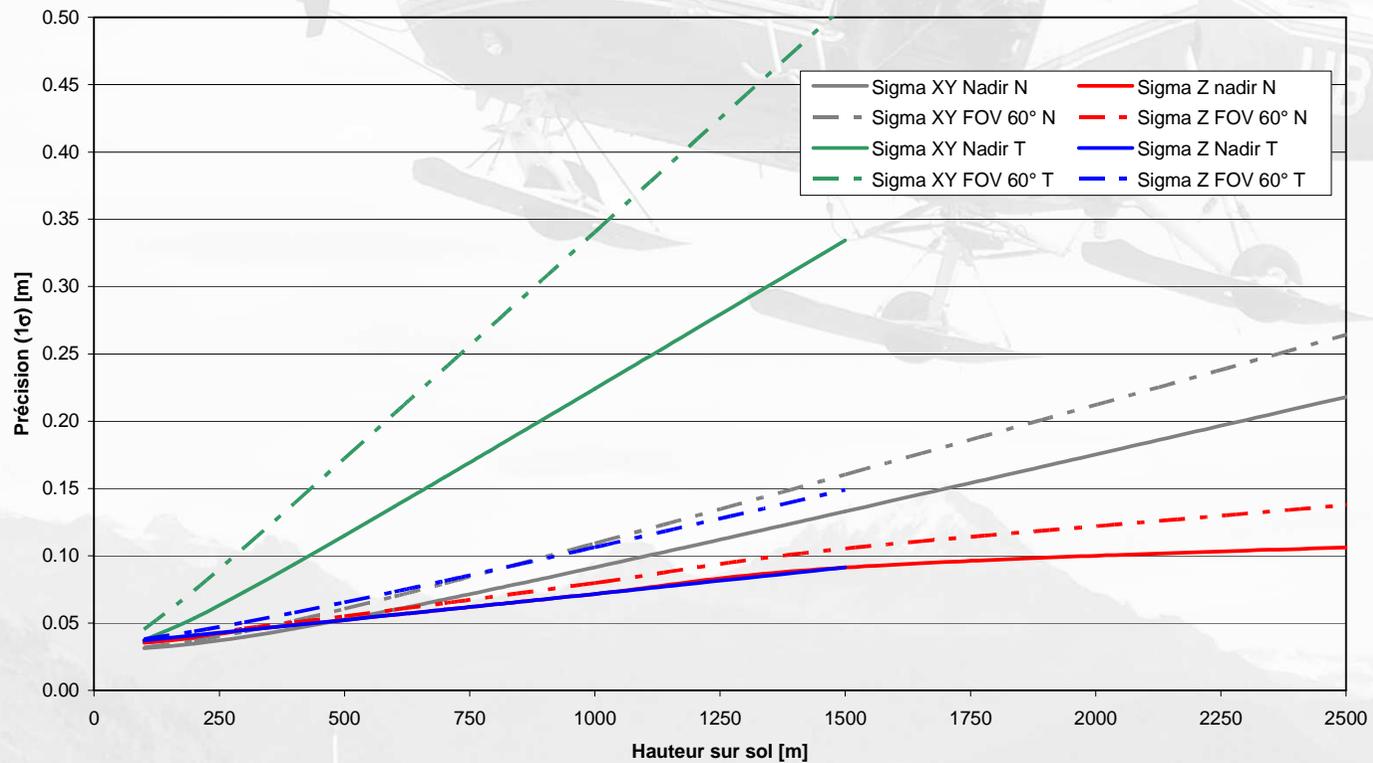


| IMU | Biais gyroscope | Biais accéléromètre | Type | Précision d'orientation* Roll-pitch / Heading |
|--------------|-----------------|---------------------|------|--------------------------------------------------|
| HG1930 | 2°/h | 3 mg | M | 0.05° / 0.1° |
| iMAR FSAS | 0.75 °/h | 1 mg | T | 0.01° / 0.03° |
| Litton LN200 | 0.5 °/h | 0.3 mg | T | 0.008° / 0.025° |
| iXSEA Airins | 0.005 °/h | 20 µg | N | 0.0015° / 0.005° |

3. Performance

- + Précision des points au sol est fonction
 - + Altitude de vol sur sol
 - + Type d'IMU / Précision de la trajectoire

Précision d'un point au sol vs. type d'IMU (N=Navigation T=Tactique) sur sol plat



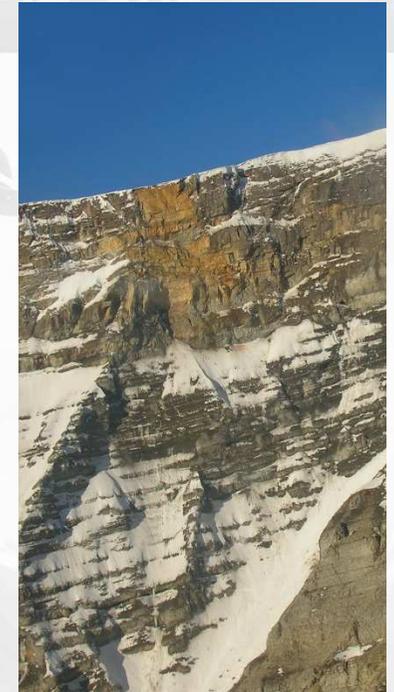
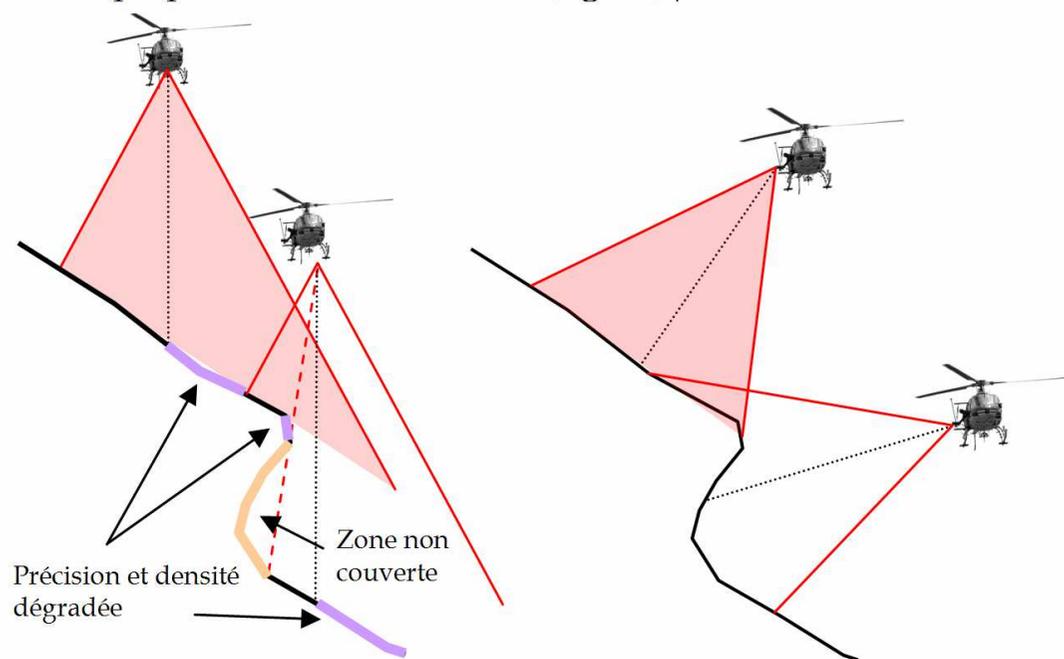
4. Methodologie d'acquisition

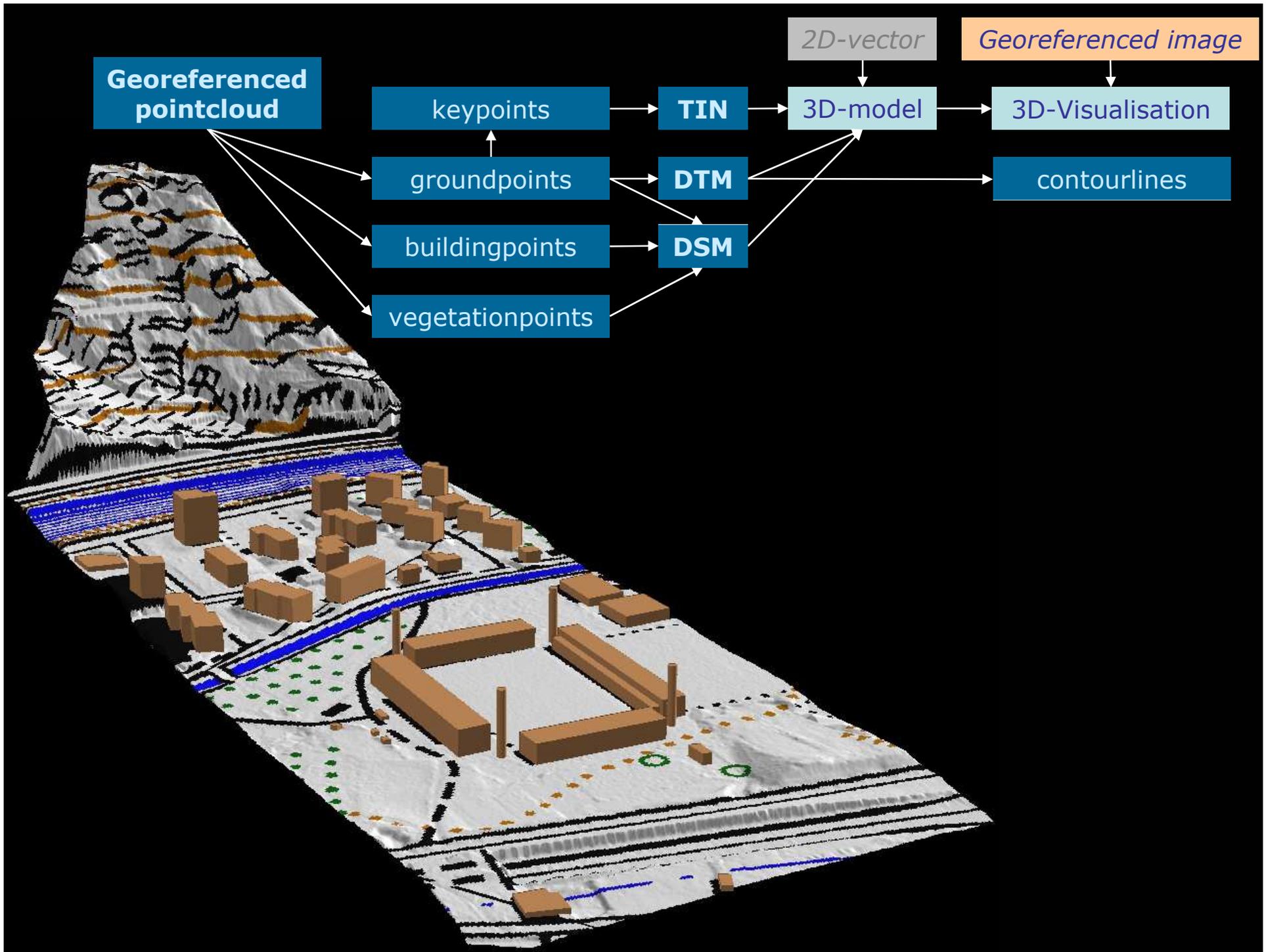
Fixer les exigences

- ⊕ Précision requise: planimétrique et altimétrique, relative, absolue → f(type de terrain, épisodique)
- ⊕ Densité de points: rester dans le raisonnable (1-10 pt/m²). Possibilité de faire jusqu'à 200 pt/m².
- ⊕ Niveau de détail: quels détails veut on avoir au niveau du rendu? → fixe la densité et la qualité du filtrage/dé-densification
- ⊕ Complexité du relief: détermine partiellement le mode d'acquisition (avion, hélico, vertical, oblique)

4. Les reliefs complexes

- ⊕ Acquisition classique pose plusieurs problèmes:
 - ⊕ Densité hétérogène
 - ⊕ Précision hétérogène
 - ⊕ Zone de masque dans les falaises et parties surplombantes
- ➔ Saisie Oblique



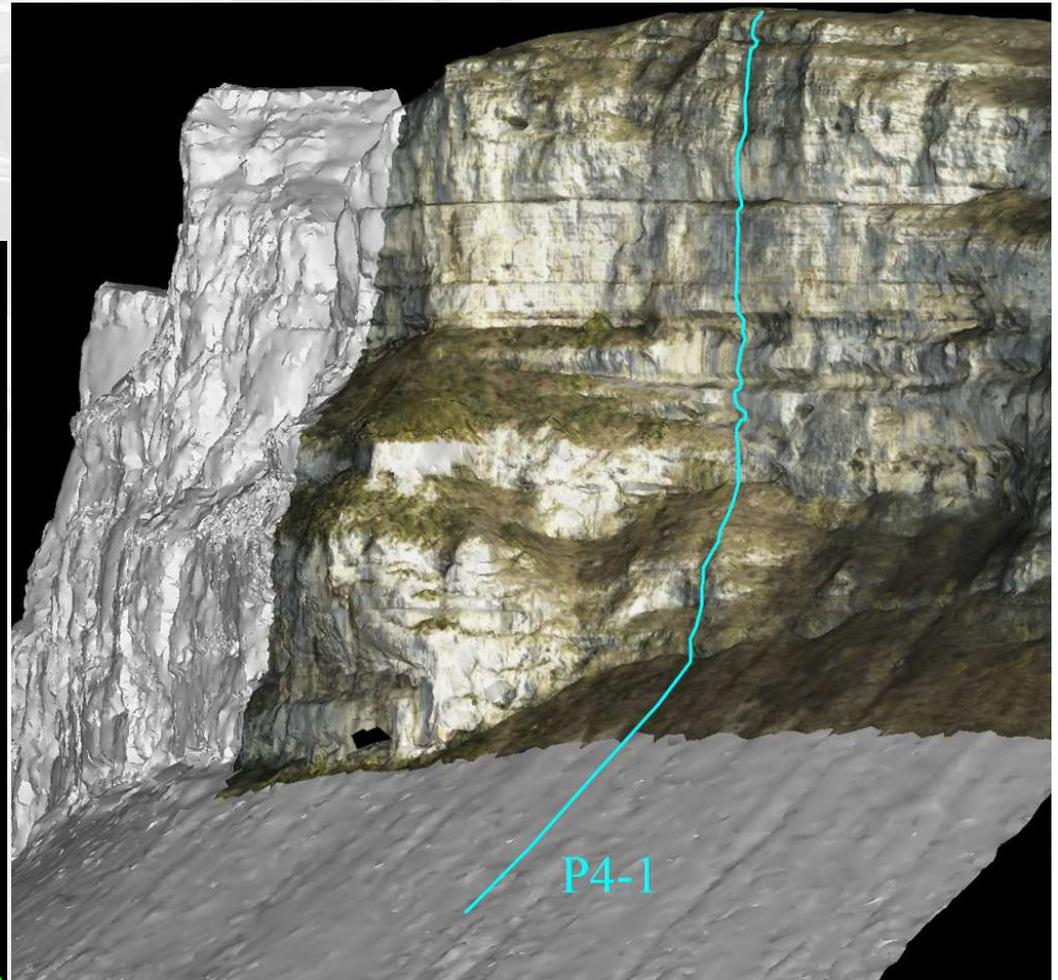
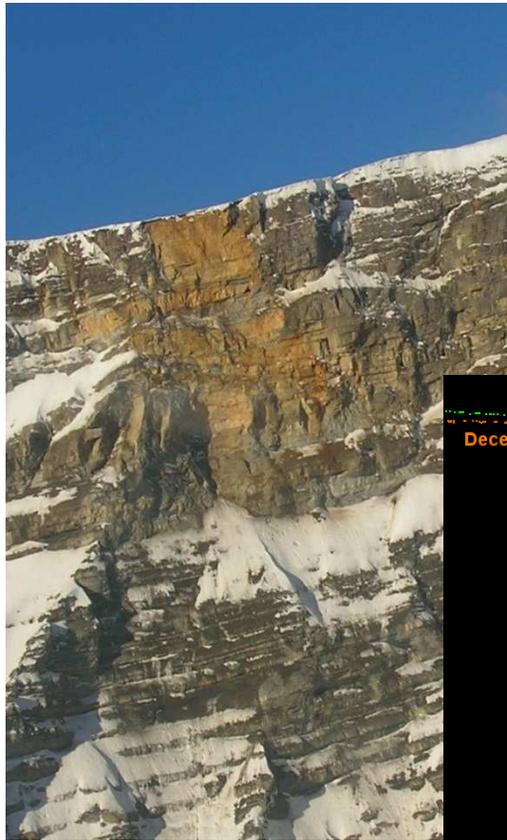


5. Exemple d'applications

- ⊕ Systeme héliporté portable à la main
- ⊕ Système mobile terrestre

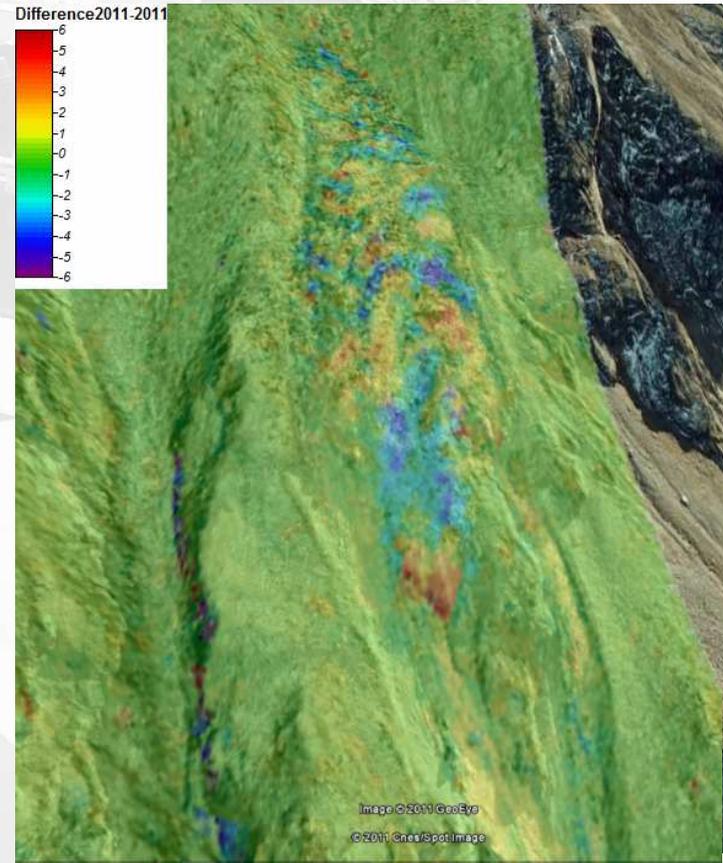
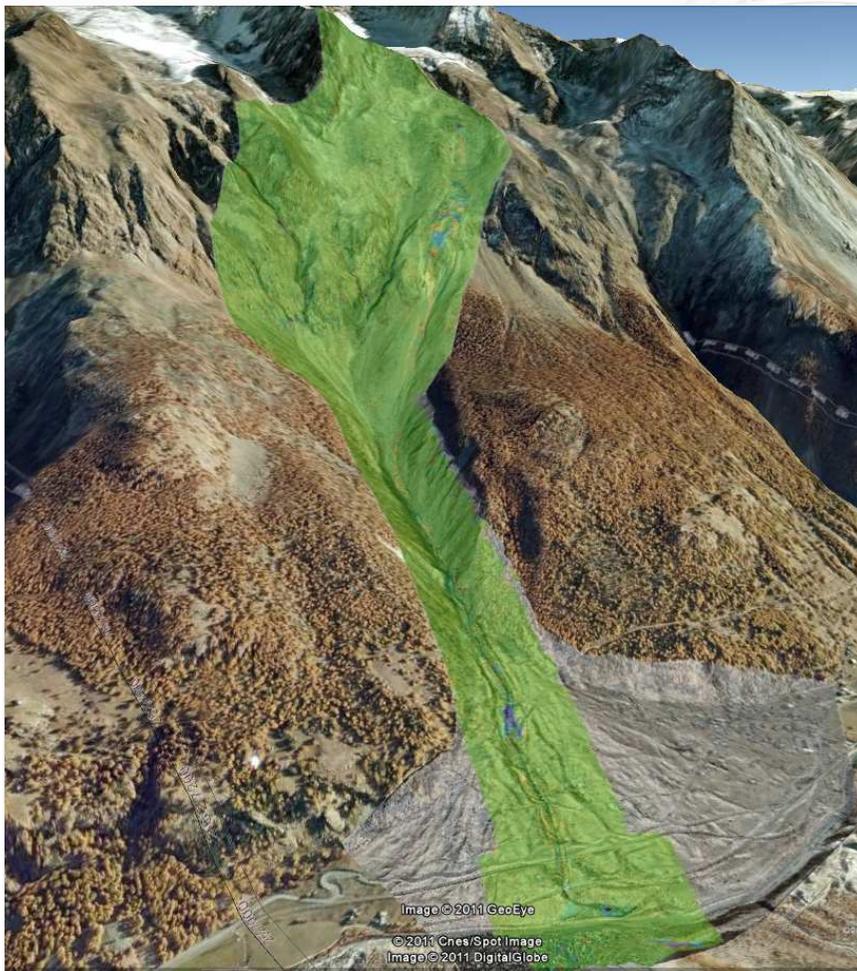


5. Falaise, pentes raides



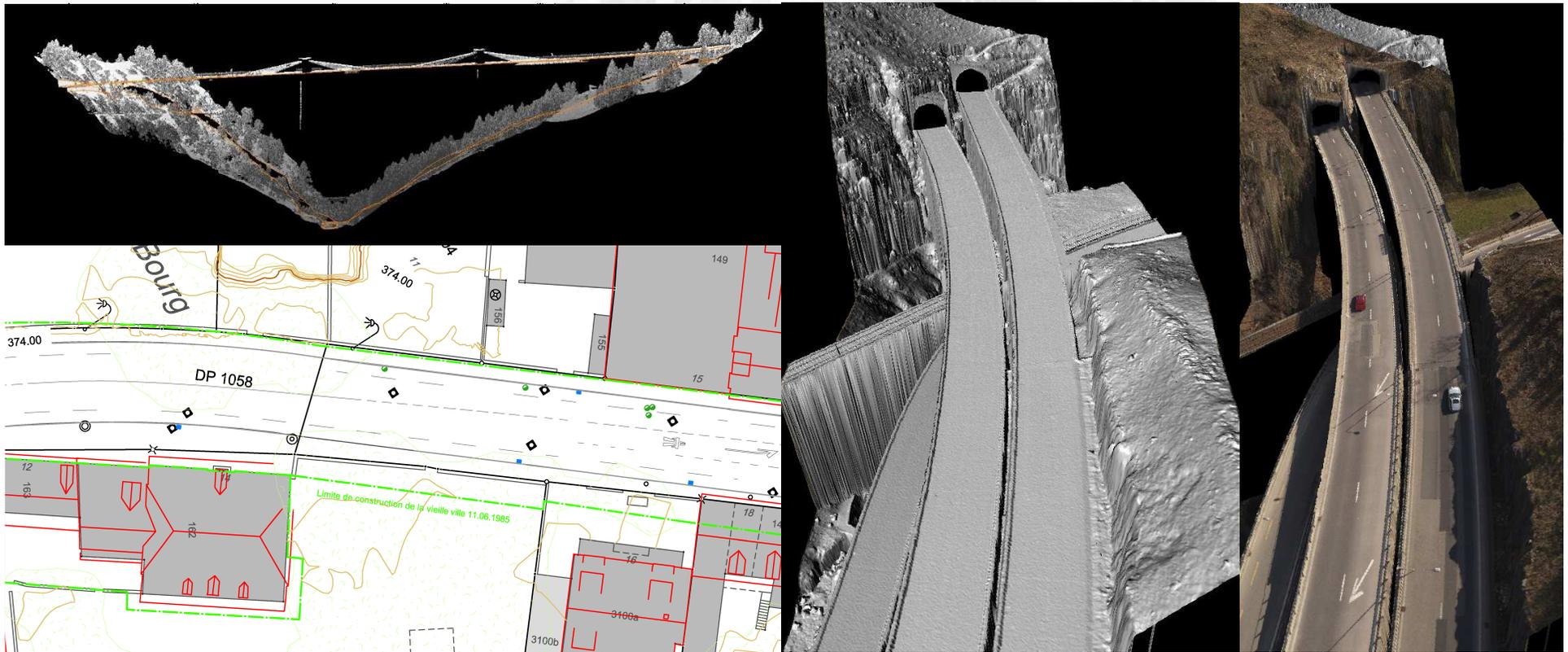
Monitoring de glissement

+ Dorfbach (Mattertal)



5. Infrastructures: route, rail...

- ⊕ Relevé haute précision du réseau (2cm)



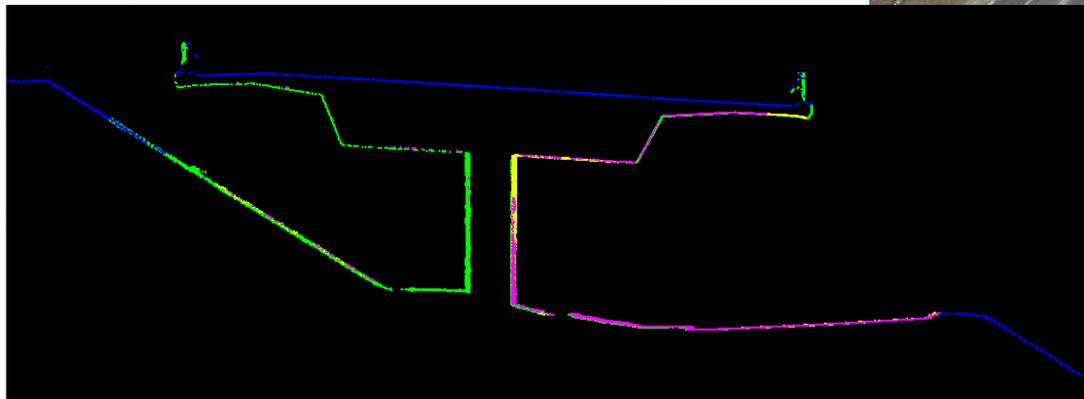
5. Infrastructure: route, rail

+ Combinaison des heliporté, terrestre mobile et statique

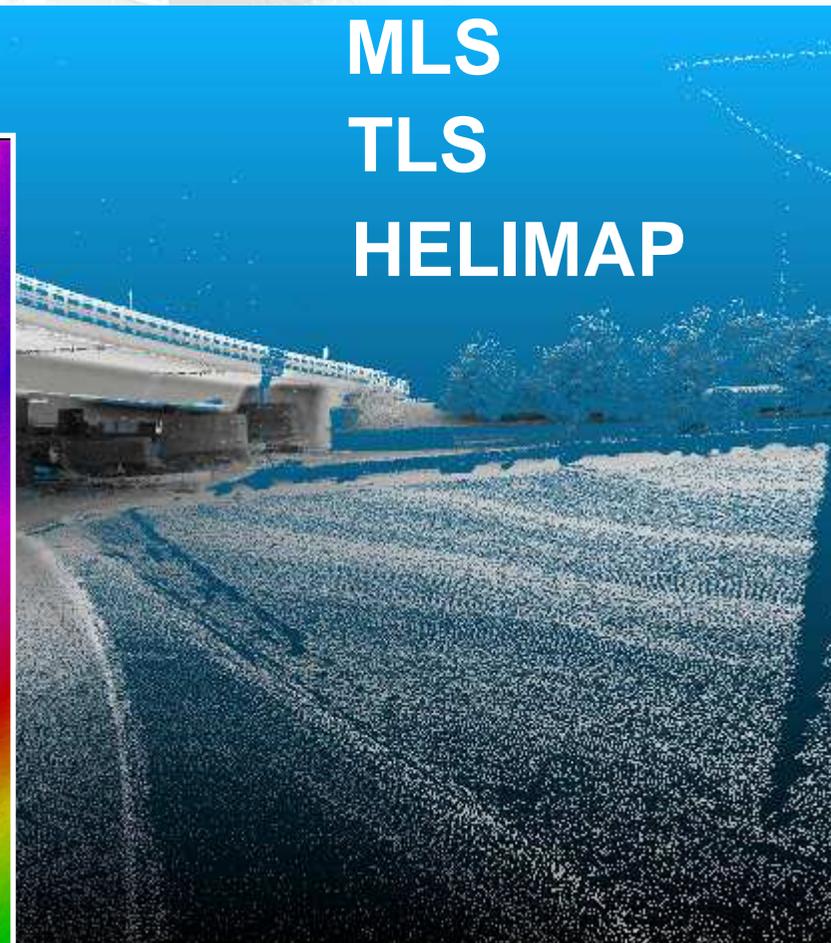
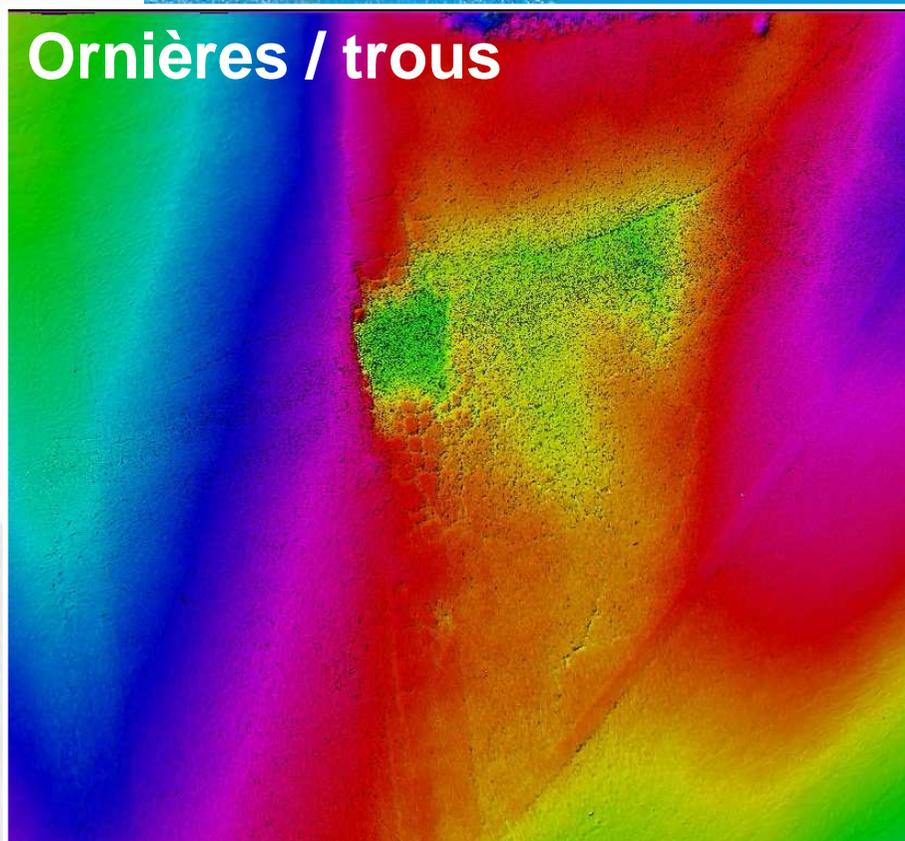
Survol héliporté basse altitude 100m
150 pt/m², largeur 100m

Couverture mobile, 2'000 pt/m²
Largeur 40m

Compléments terrestre statique sur
zones cachées. 10000 pt/m²



5. Infrastructure: route, rail

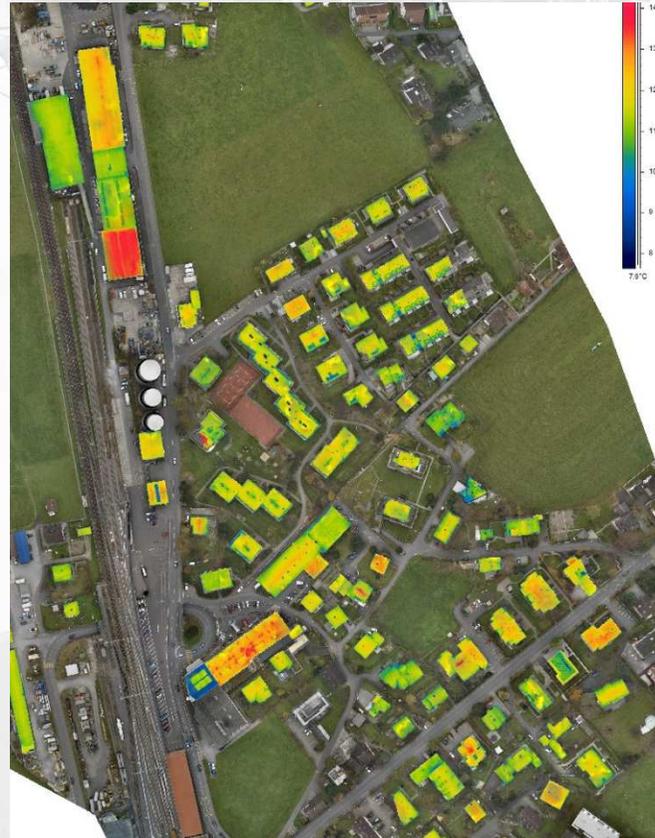


5. Mobile terrestre urbain



5. Urbanisme

- + LiDAR + Thermographie
 - + MNS/MNT (20 pt/m²)
 - + Image thermiques des toits de bâtiments
 - + Potentiel solaire des toits (ombrage des petits éléments)
 - + <http://map.cartovision.ch/demo-solaire/>

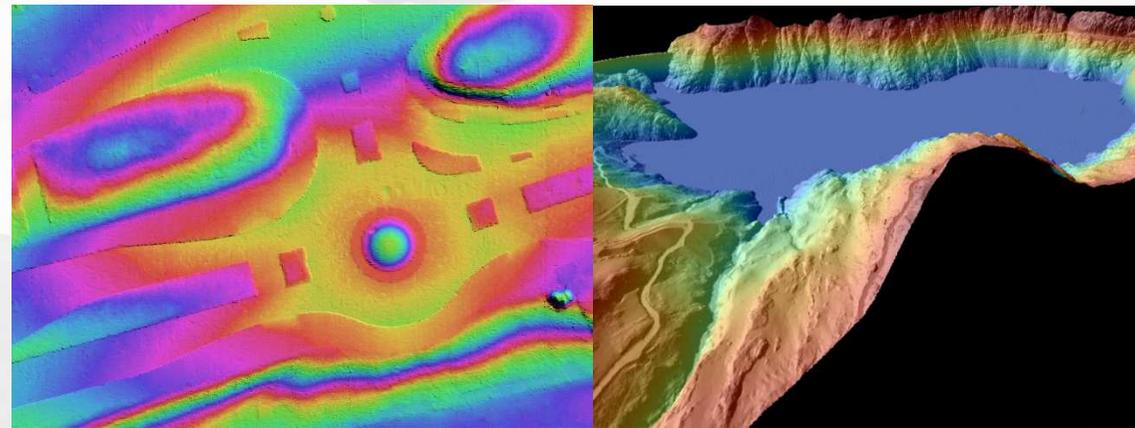
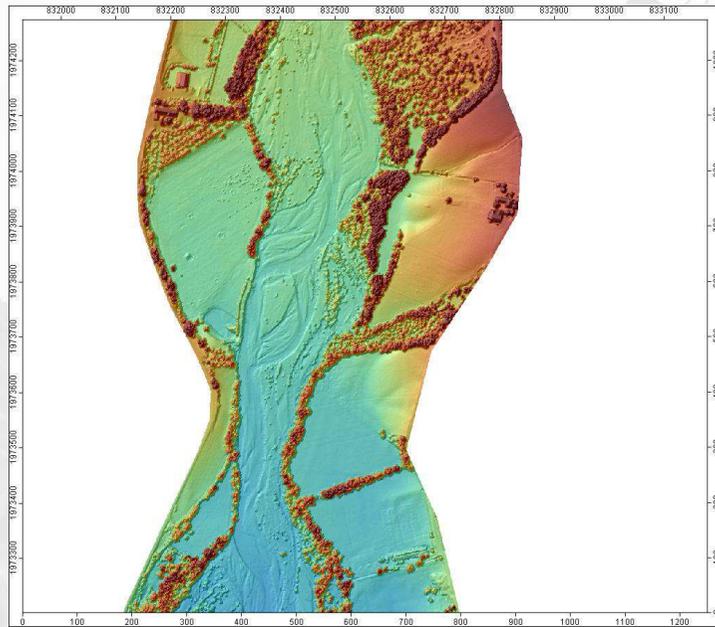
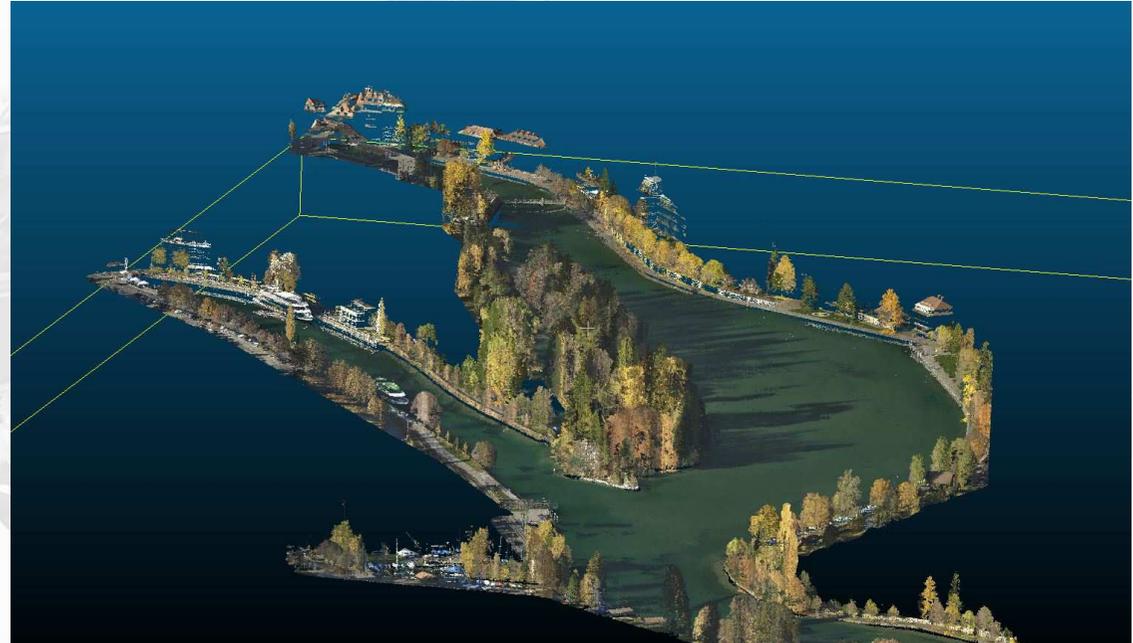


5. Urbanisme



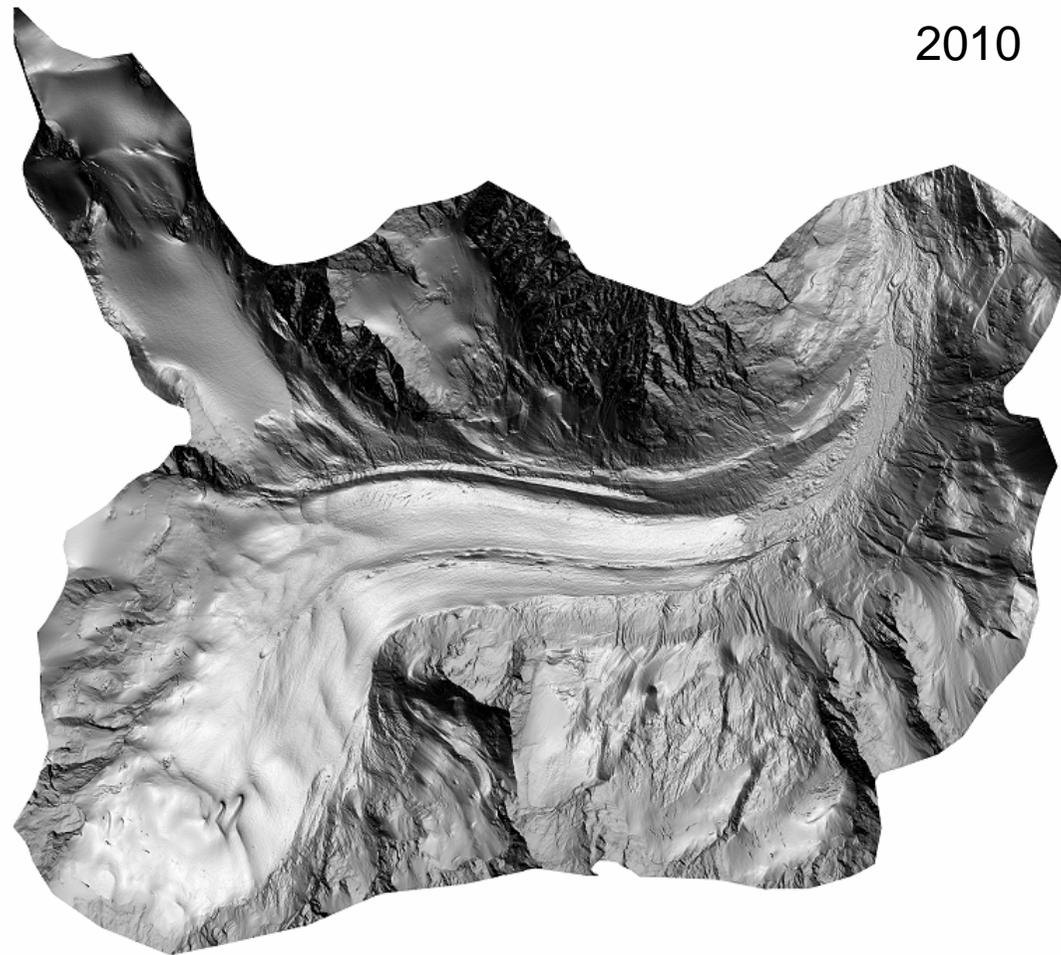
5. Hydrologie

- ⊕ LiDAR + Bathymétrie
 - ⊕ Erosion
 - ⊕ Zone d'écoulement
 - ⊕ Risque d'inondations
 - ⊕ Simulation



5. Suivi des glaciers

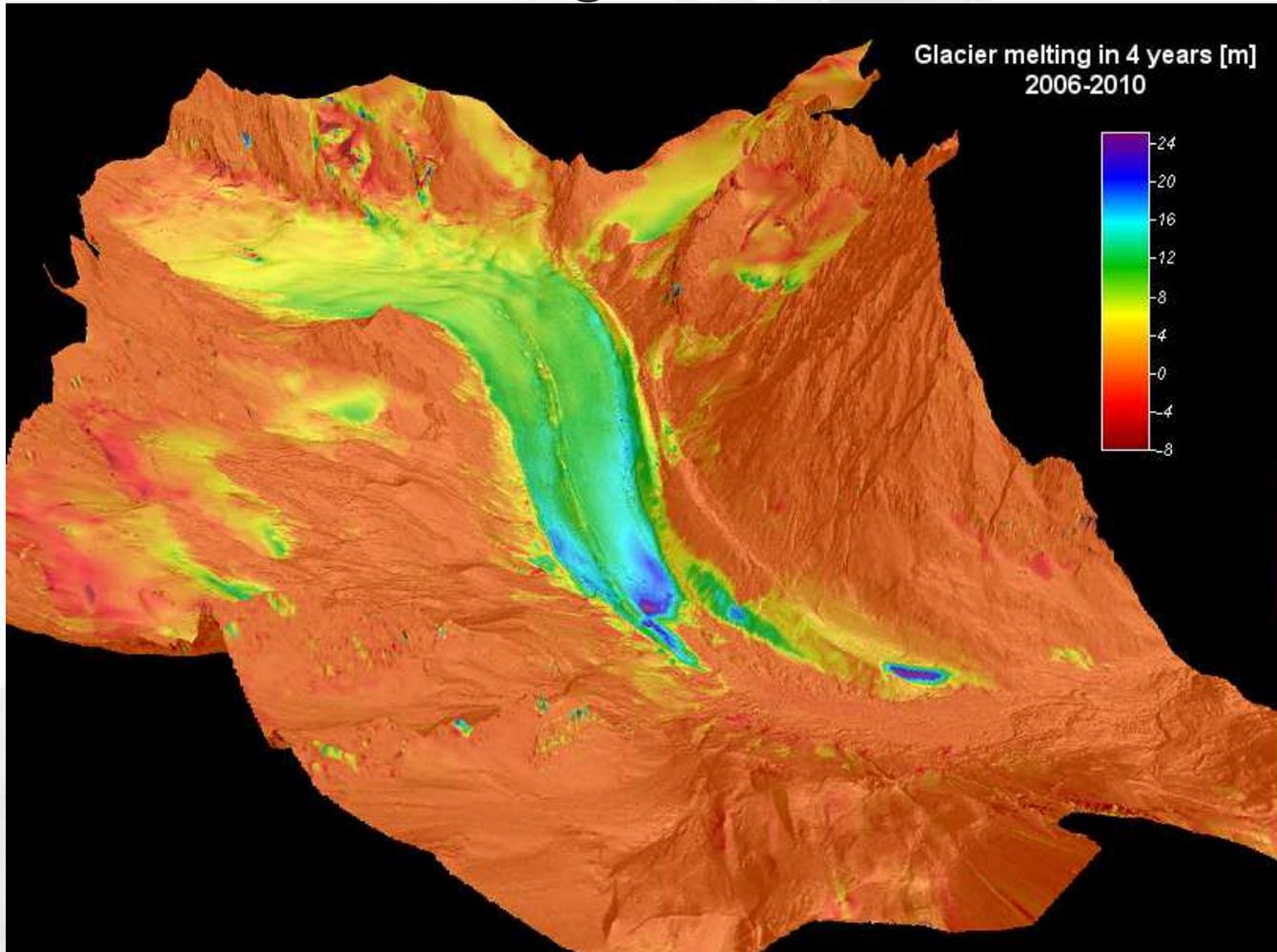
+ Suivi du bassin glaciaire d'Arolla



2010

5. Suivi de Glacier

⊕ Suivi du bassin glaciaire d'Arolla



5. Patrimoine - archéologie

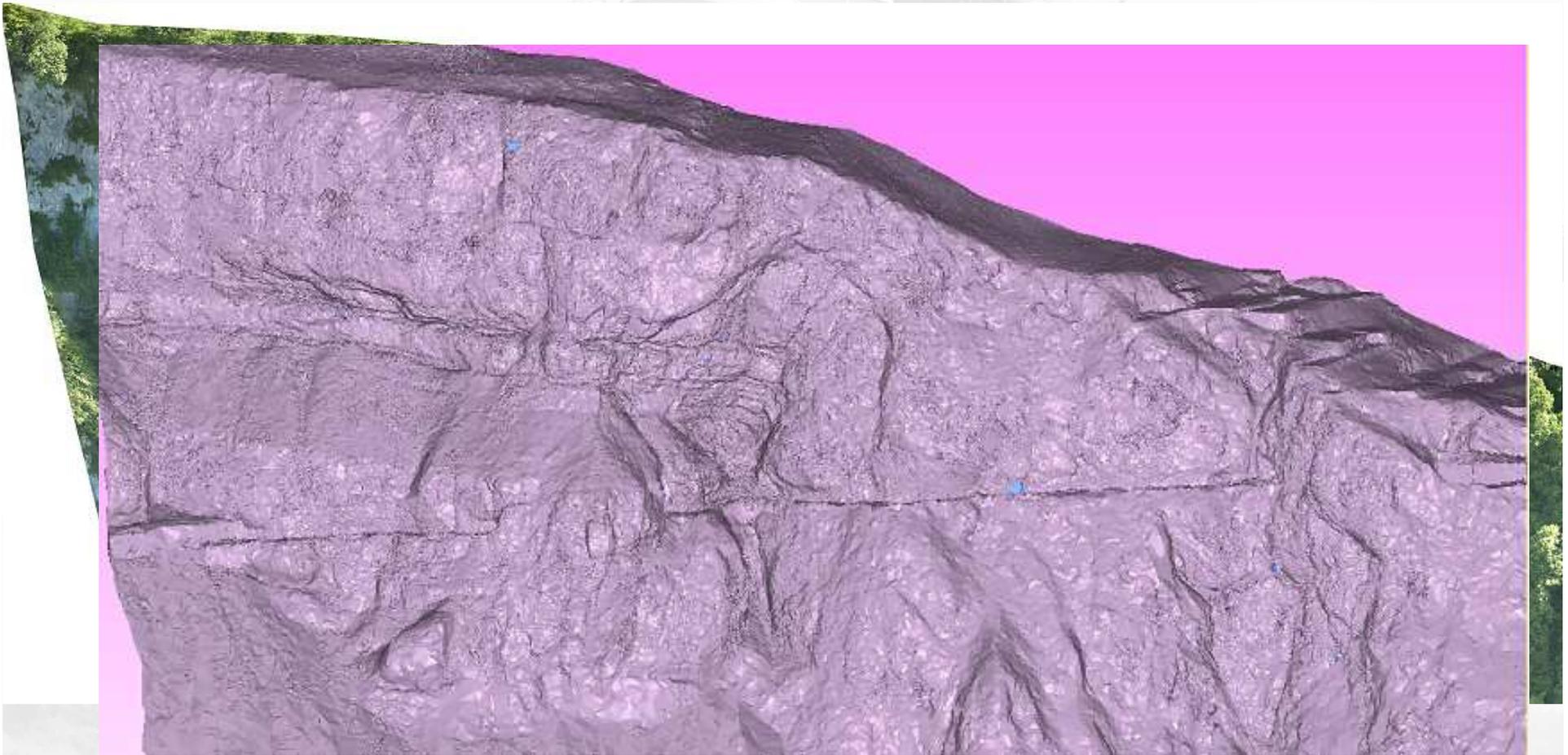
+ Burgruine (Bâle)

- + données héliportée oblique haute densité (200pt/m²)
- + Compléments terrestre statique



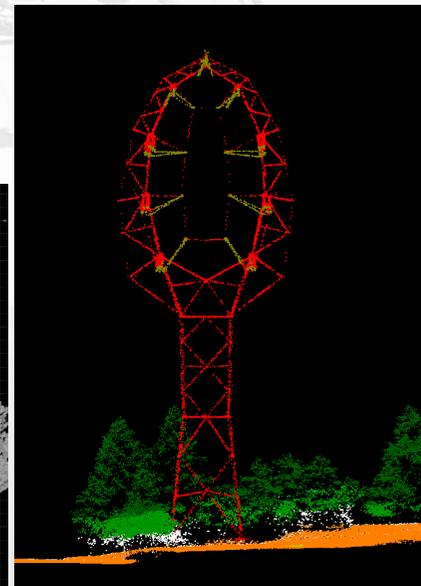
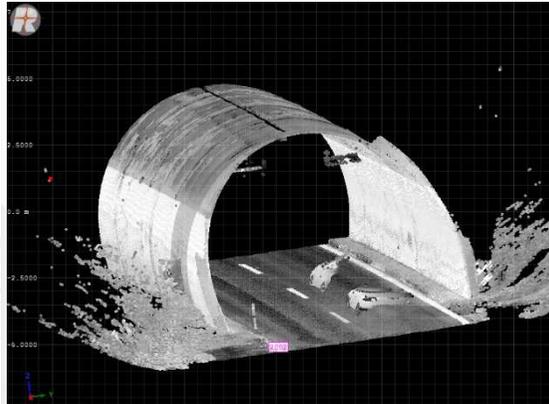
5. Patrimoine

⊕ Réhabilitation de chemin historique



Conclusions

- + LiDAR aéroportée/terrestre technique très performante pour l'acquisition de modèle 3D de haute densité (1-2'000 pt/m²) et de haute précision (2-10cm)
- + Très performant sous couvert végétal
- + Imagerie reste un complément **indispensable**
 - Orthophoto, classement thématique, couverture du sol
 - Thermique, Hyperspectrale



Recommandations

- ⊕ Indispensable de bien définir ses besoins
 - ⊕ Précision
 - ⊕ Niveau de détail
 - ⊕ Complexité du terrain: nadir, oblique
 - ⊕ Ne pas se laisser entrainer dans la course aux millions de points!

Merci de votre attention





Exemples d'applications LIDAR

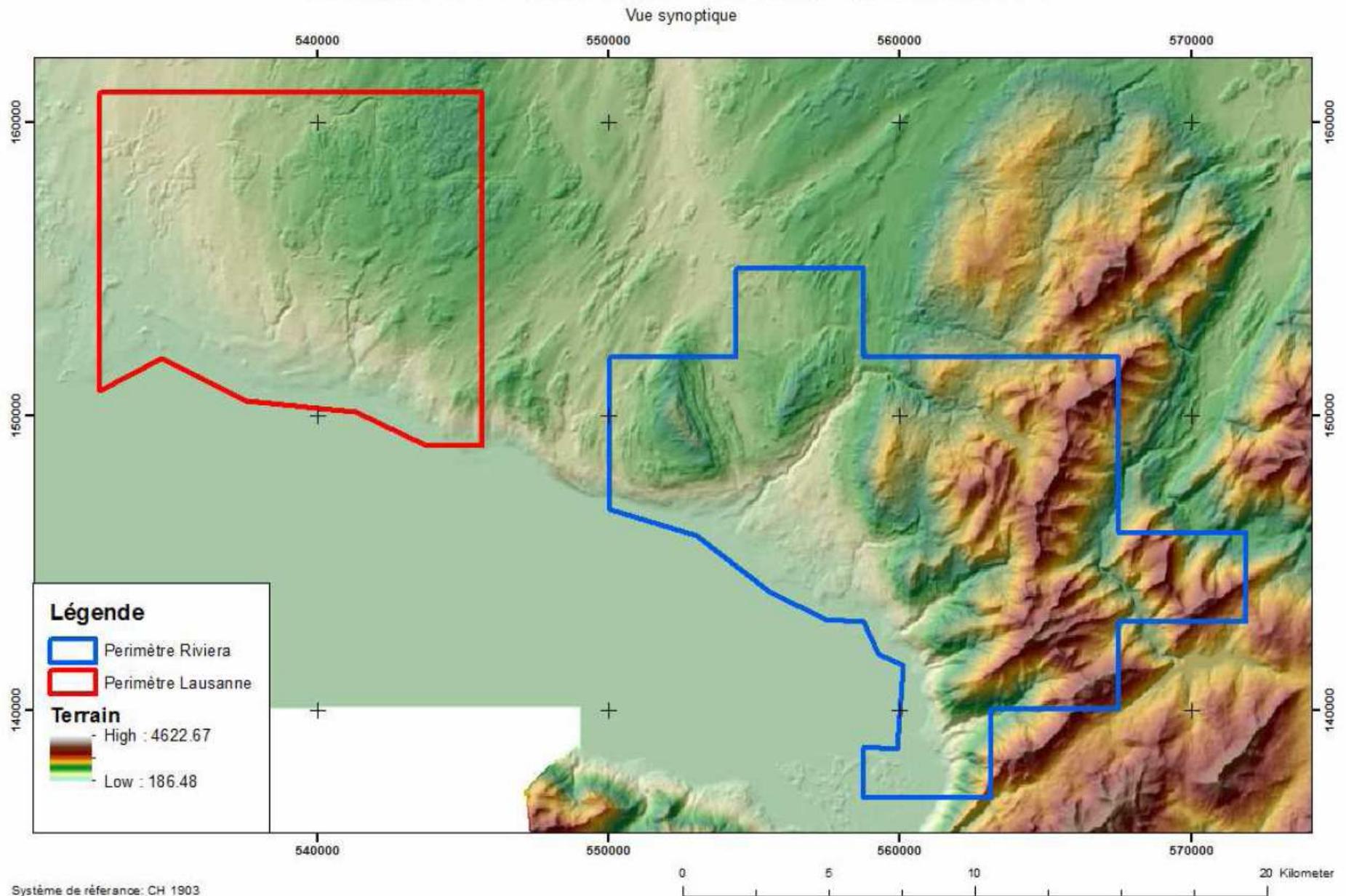
Riviera et agglomération lausannoise



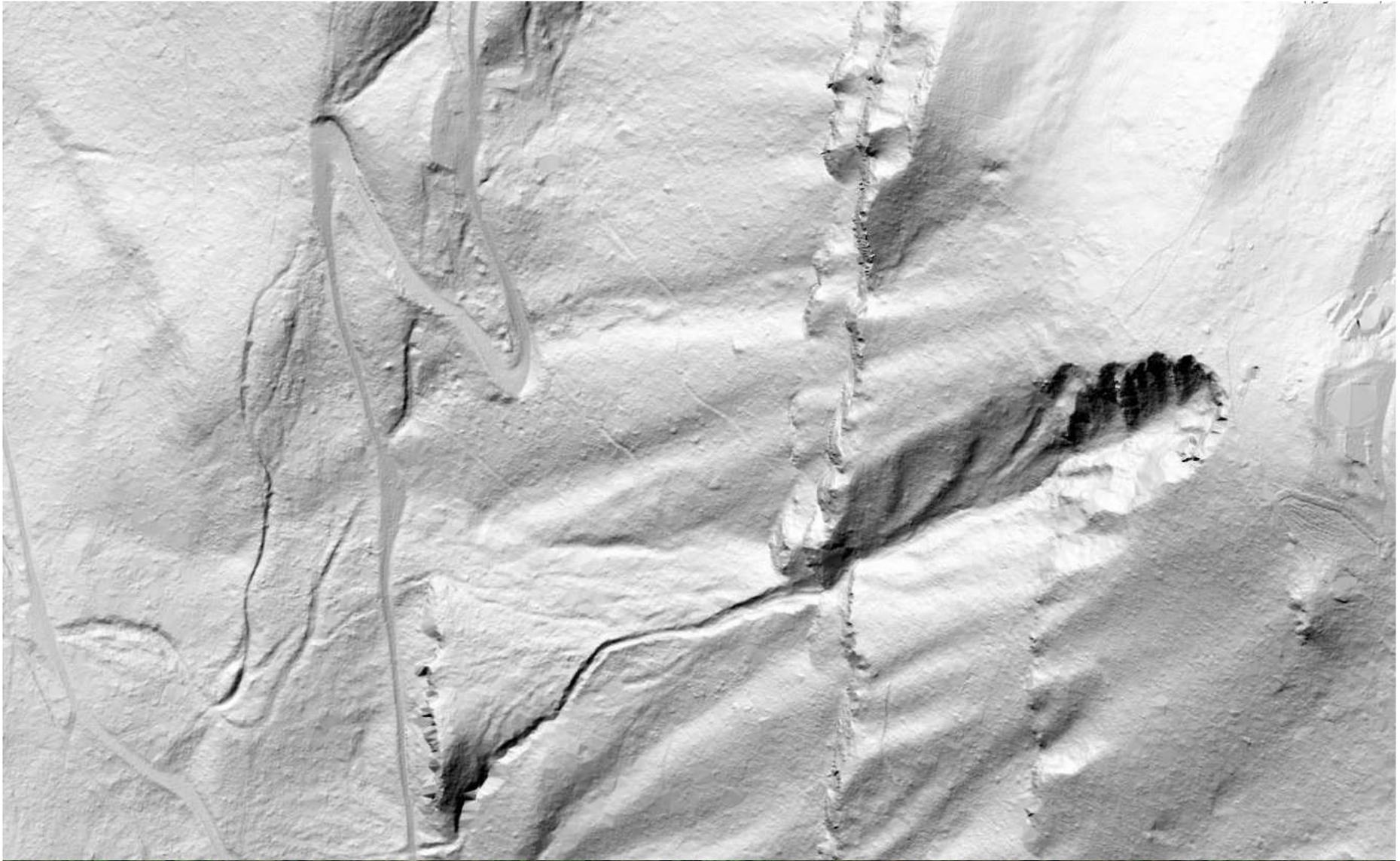
Infos techniques LIDAR

| | Lausanne | Vevey/Riviera |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Périmètre du vol | Agglomération de Lausanne ~140 km ² | Riviera Vaudoise ~200 km ² |
| Topographie | Préalpin (370 - 950 m) | Préalpin/Alpin (370 - 2040 m) |
| Densité moyenne de points | > 10 pts/m ² | Zone de montagne : 5 pts/m ² Zone bâtie : 10 pts/m ² |
| Précision (points bien déterminés) | | Altimétrie : 0.15 m (1σ) Planimétrie : 0.2m (1σ) |
| Classification | 11 classes : sol perméable et imperméable, végétation basse et haute, bâtiments, objets mobiles, lignes aériennes, etc. | |
| Type de vol | Vol croisé et recouvrement + important en milieu urbain | |
| Images aériennes | Orthophotos en vol séparé | Orthophotos en vol simultané |
| Période d'acquisition | Mars 2012 | Mars et avril 2012 |
| Coût total HT | env. 120'000 CHF | env. 110'000 CHF |

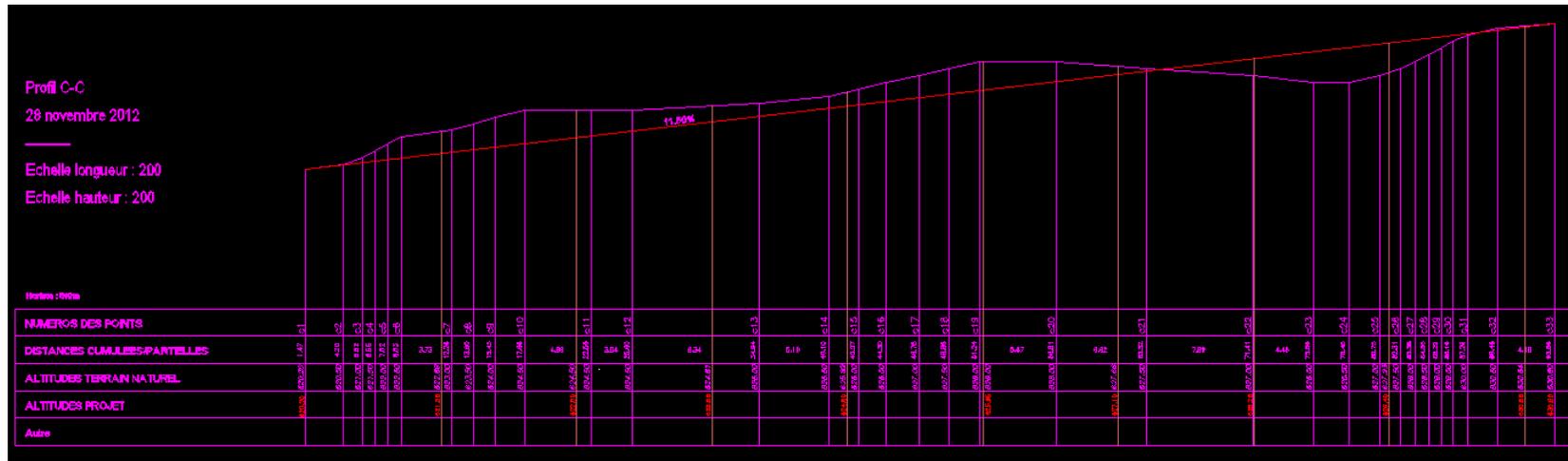
Infos techniques LIDAR



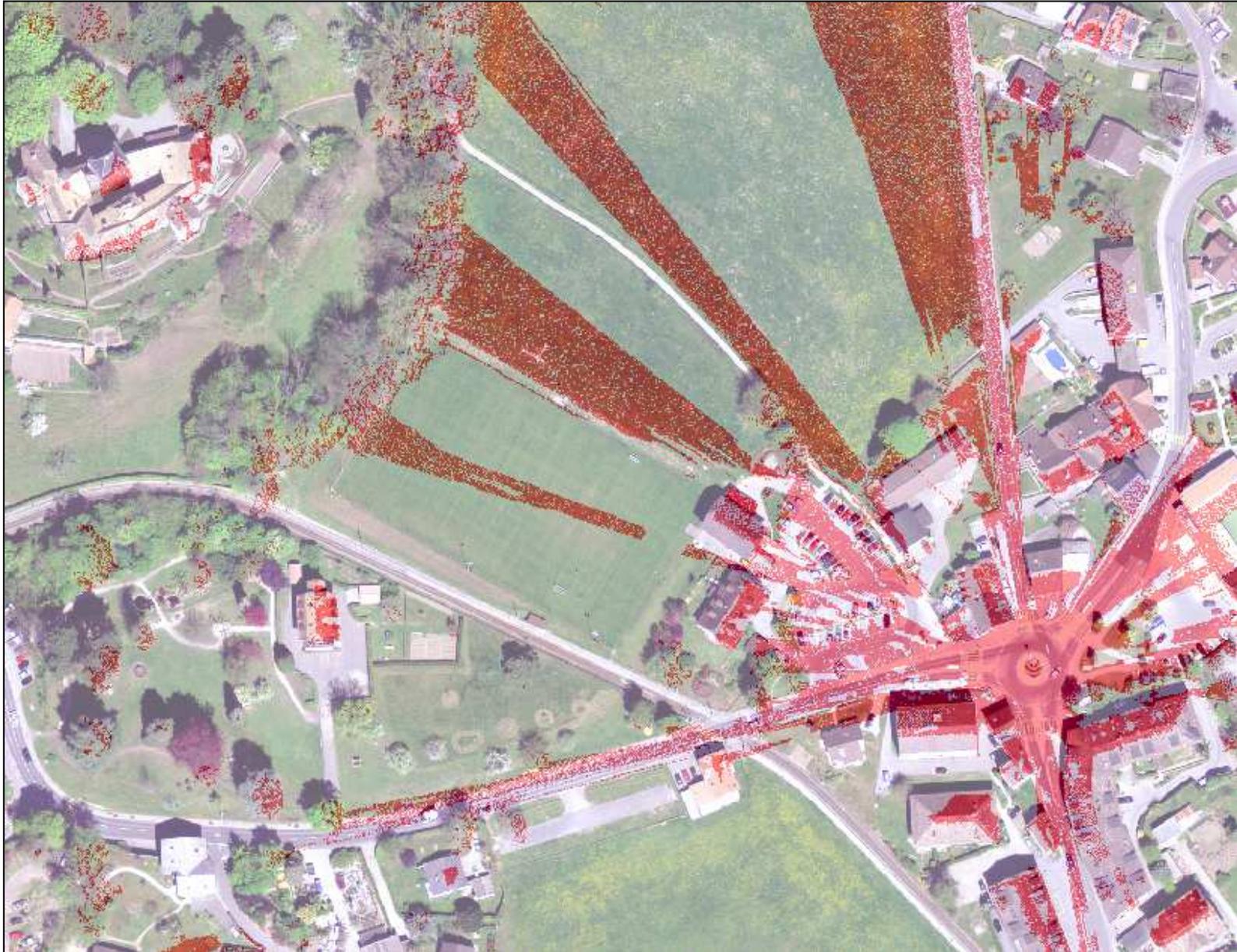
Détection de structures sous la canopée



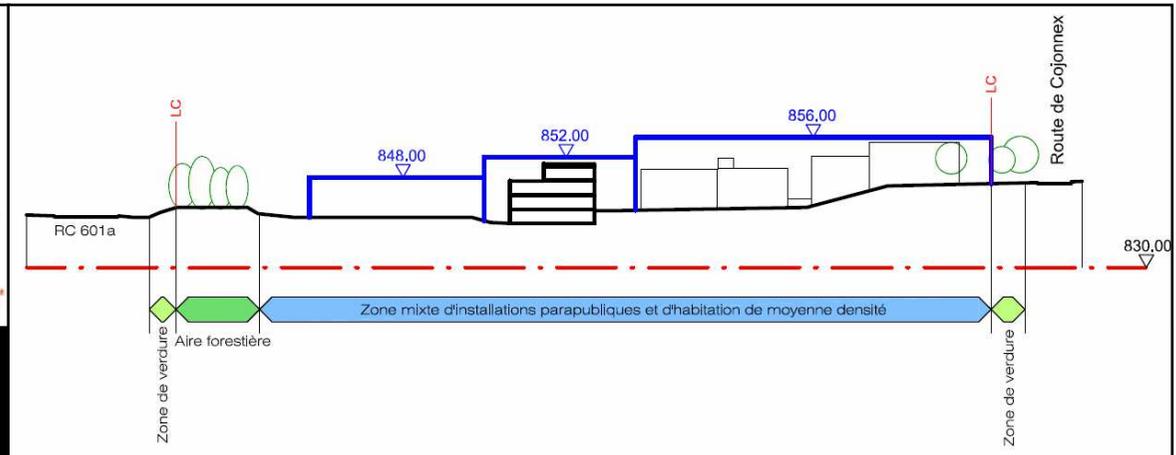
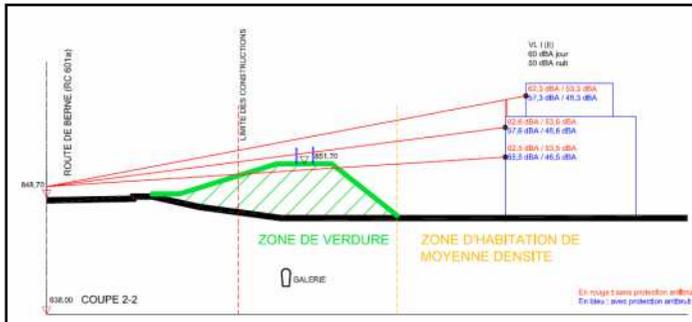
MNT et courbes de niveau



Analyse de visibilité



Profils d'élevation



Profil D-D'
 11 février 2014

Echelle longueur : 1000

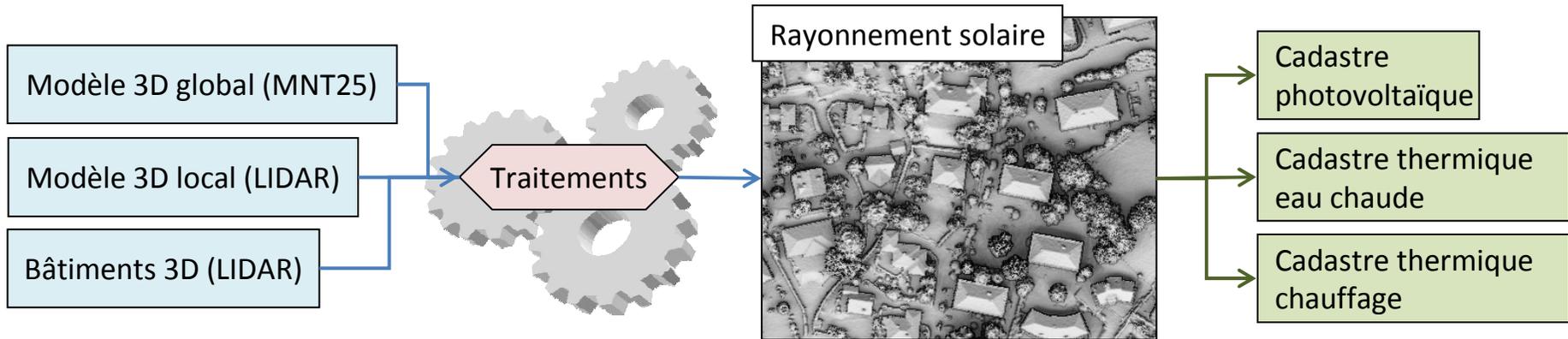
Echelle hauteur : 1000

— Ligne de profil MNT
 — Ligne de profil MNS

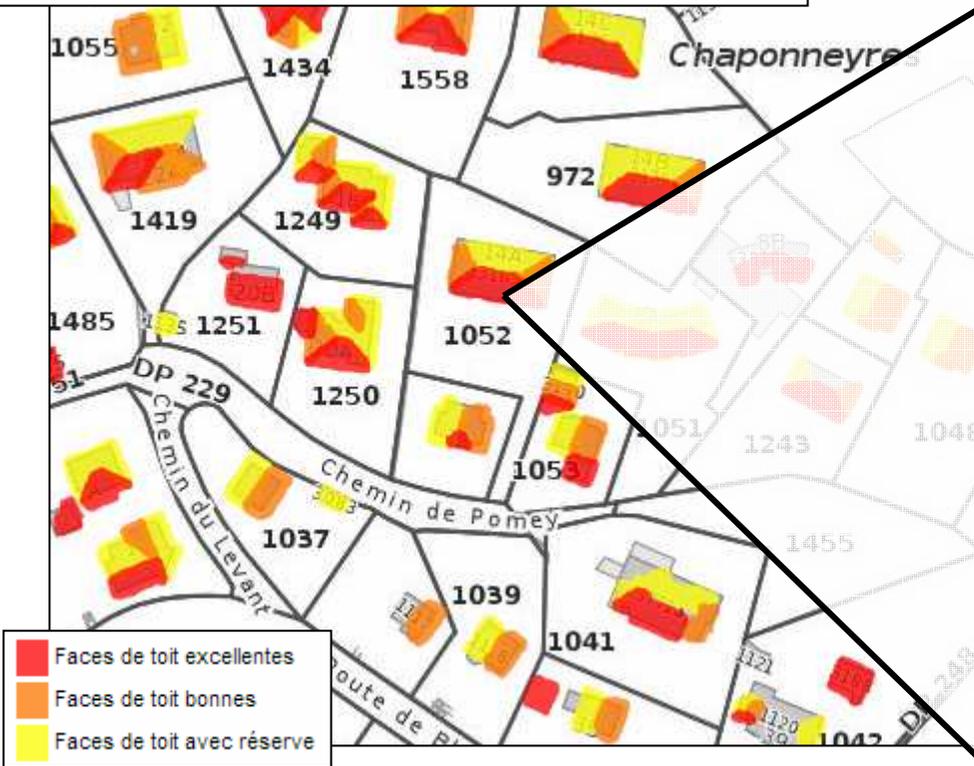
Horizon : 830 m

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| DISTANCES CUMULEES | 0,00 | 9,00 | 19,00 | 28,90 | 38,90 | 48,90 | 58,90 | 68,90 | 78,90 | 88,90 | 98,90 | 108,90 | 118,90 | 128,70 | 138,70 | 148,70 | 158,70 | 168,70 | 178,60 | 188,60 | 197,60 |
| ALTITUDES TERRAIN (MNT) | 840,030 | 840,510 | 841,590 | 842,500 | 840,710 | 838,920 | 838,930 | 838,940 | 838,790 | 838,600 | 838,510 | 840,590 | 840,590 | 840,430 | 840,430 | 840,430 | 840,430 | 844,510 | 846,170 | 847,940 | 847,950 |
| ALTITUDES SURFACE (MNS) | 840,150 | 840,610 | 852,800 | 854,620 | 840,690 | 838,890 | 838,900 | 838,940 | 838,870 | 838,720 | 850,280 | 840,690 | 840,700 | 849,490 | 849,500 | 852,210 | 857,770 | 855,210 | 846,230 | 847,730 | 847,890 |

Cadastre solaire



http://map.cartoriviera.ch/theme/cadastre_solaire



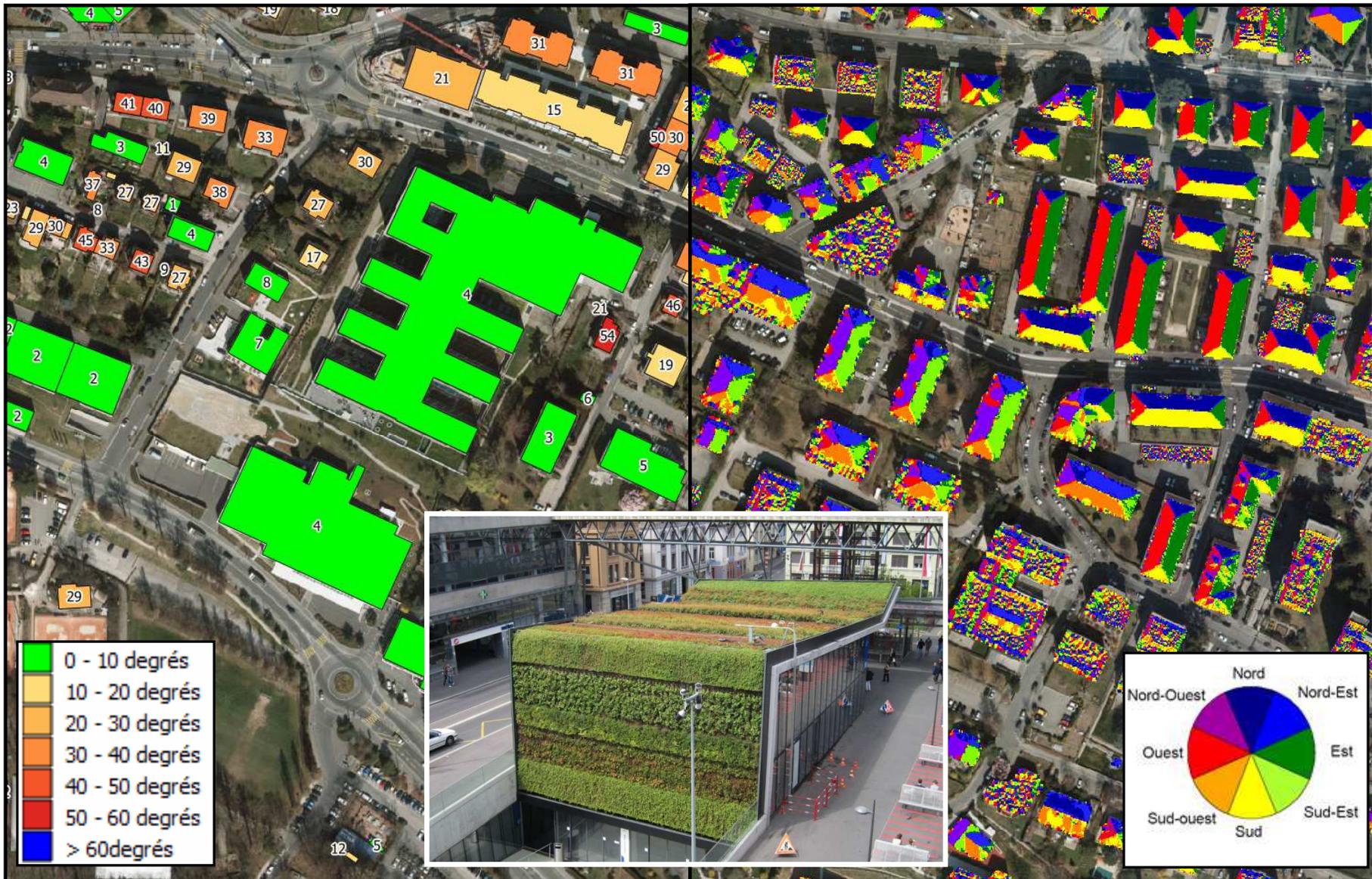
- Faces de toit excellentes
- Faces de toit bonnes
- Faces de toit avec réserve

Faces de toit excellentes (PV 1)

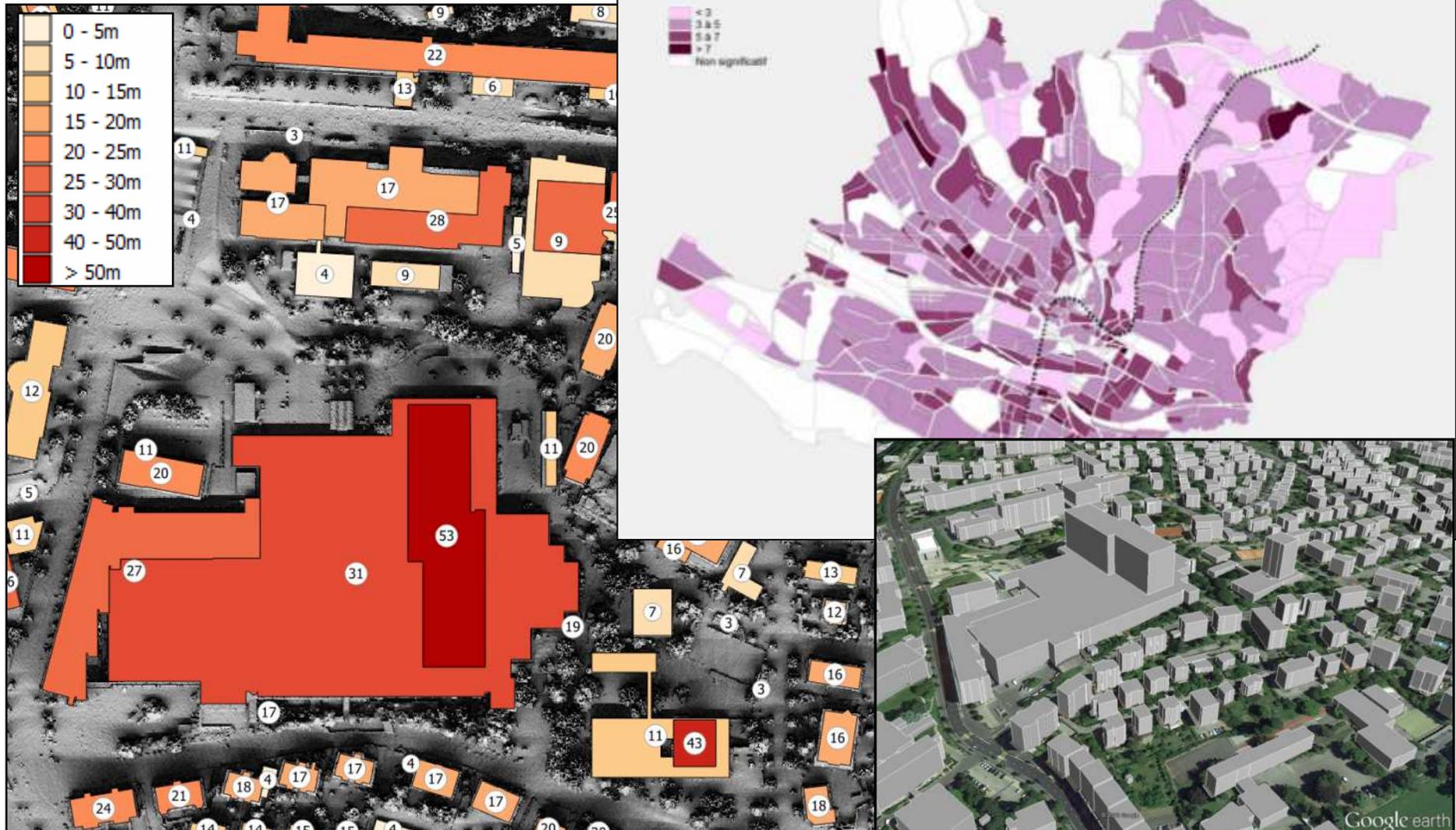
| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Inclinaison [°] | 20 |
| Type de toit | incliné |
| Surface des modules [m ²] | 114 |
| Aptitude | excellent |
| Production d'électricité (module de rendement de 9%) [kWh/an] | 11410 |
| Economie de CO ₂ (module de rendement de 9%) [kg/an] | 5840 |
| Production d'électricité (module de rendement de 12%) [kWh/an] | 15220 |
| Economie de CO ₂ (module de rendement de 12%) [kg/an] | 6970 |
| Estimation de l'investissement (module de rendement de 12%), selon données Swissolar fin 2012 | |
| Surface [m ²] | Prix pour mod. de 12% [CHF/m ²] |
| <80 | 490 |
| 80-250 | 420 |
| 250-800 | 365 |
| 800-8000 | 335 |
| >8000 | 320 |
| Production d'électricité (module de rendement de 15%) [kWh/an] | 19030 |
| Economie de CO ₂ (module de rendement de 15%) [kg/an] | 8140 |
| Estimation de l'investissement (module de rendement de 15%), selon données Swissolar fin 2012 | |
| Surface [m ²] | Prix pour mod. de 15% [CHF/m ²] |
| <80 | 600 |
| 80-250 | 510 |
| 250-800 | 450 |
| 800-8000 | 410 |
| >8000 | 390 |

Données Swissolar de référence utilisées pour l'estimation des investissements [Cliquer ici](#)

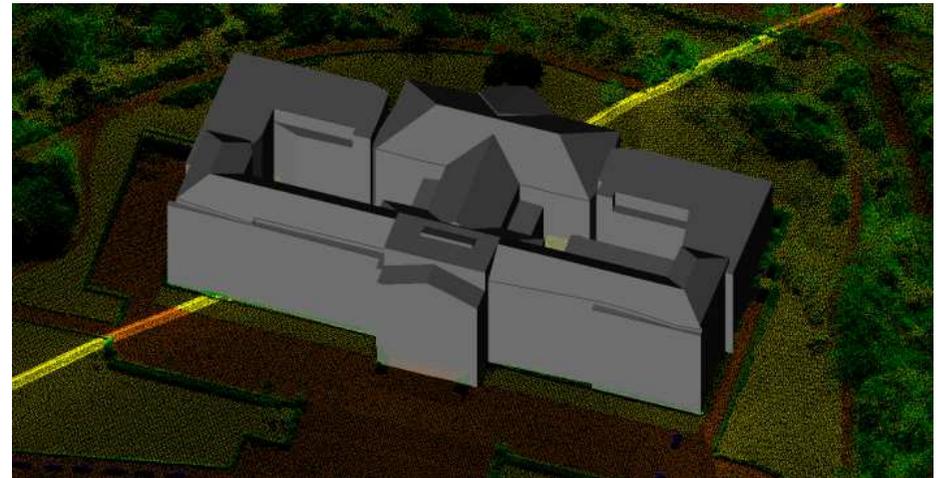
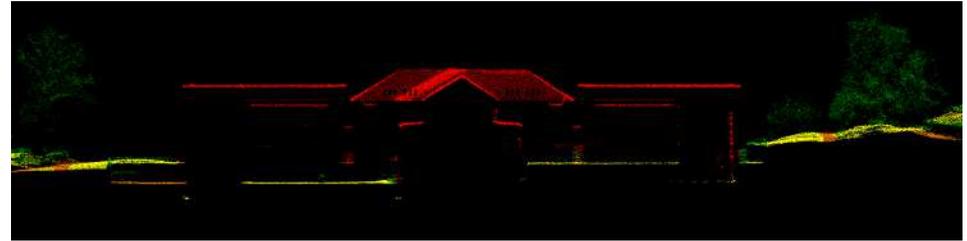
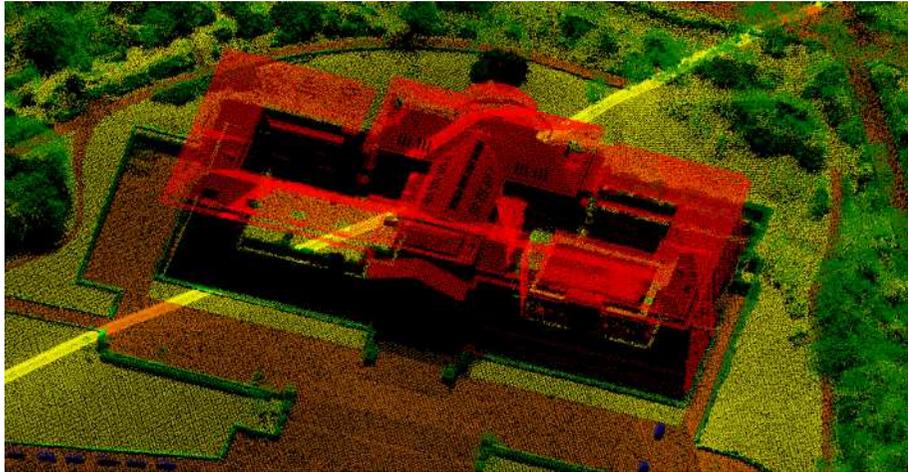
Pente et orientation des toits



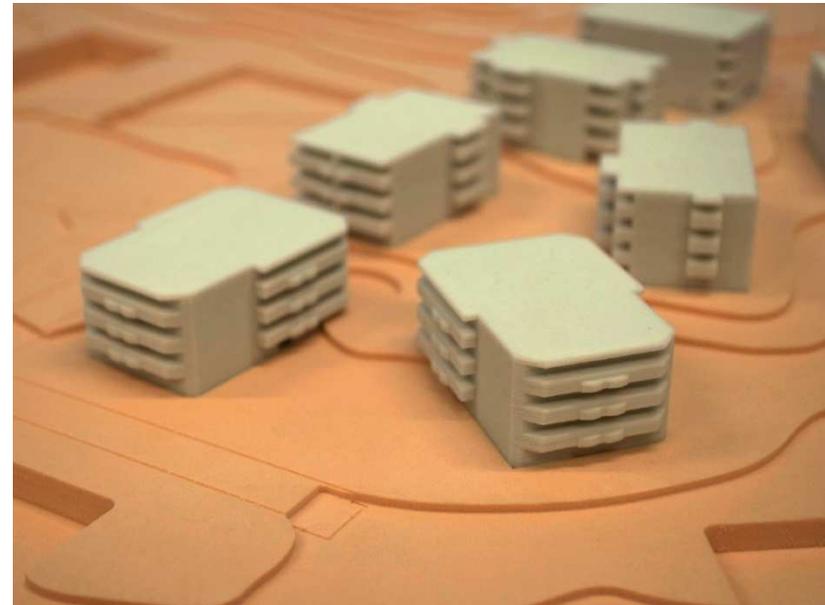
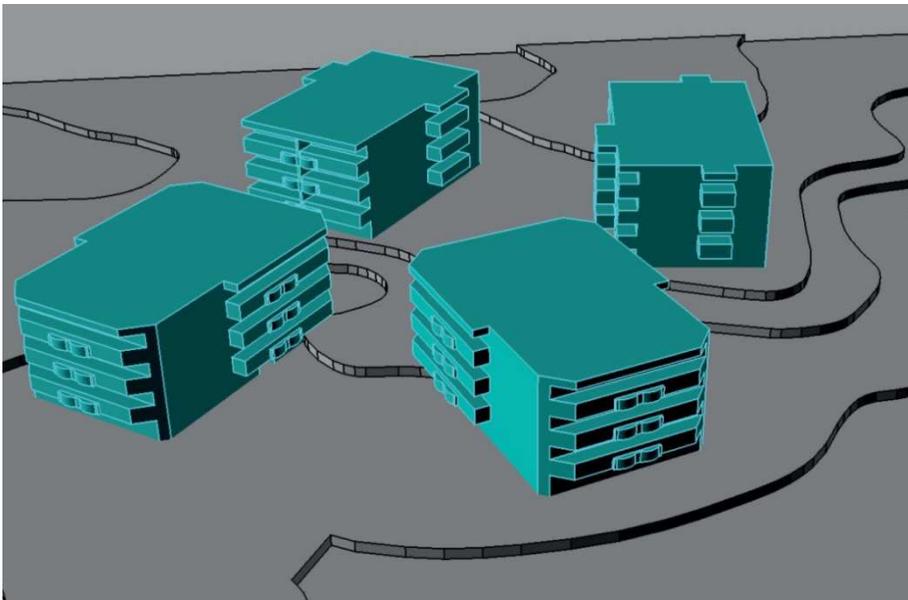
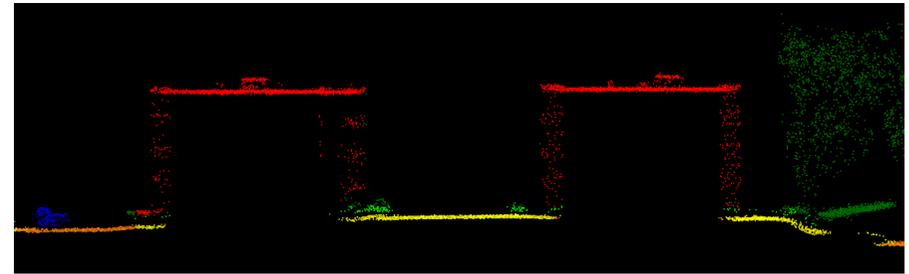
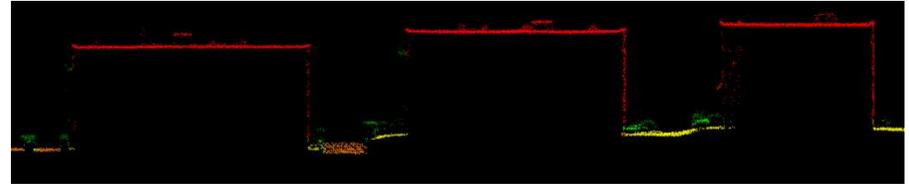
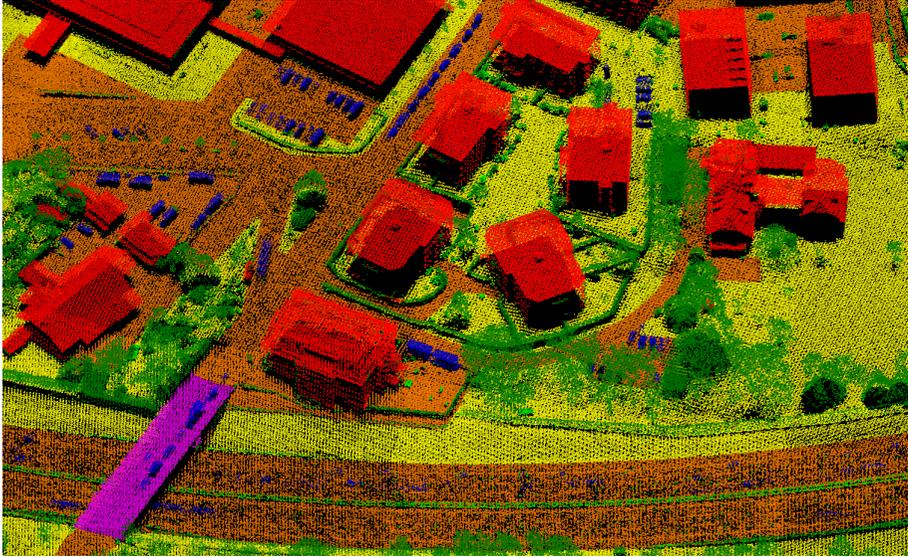
Hauteurs de bâtiments



Modélisation 3D des bâtiments



Modélisation 3D des bâtiments

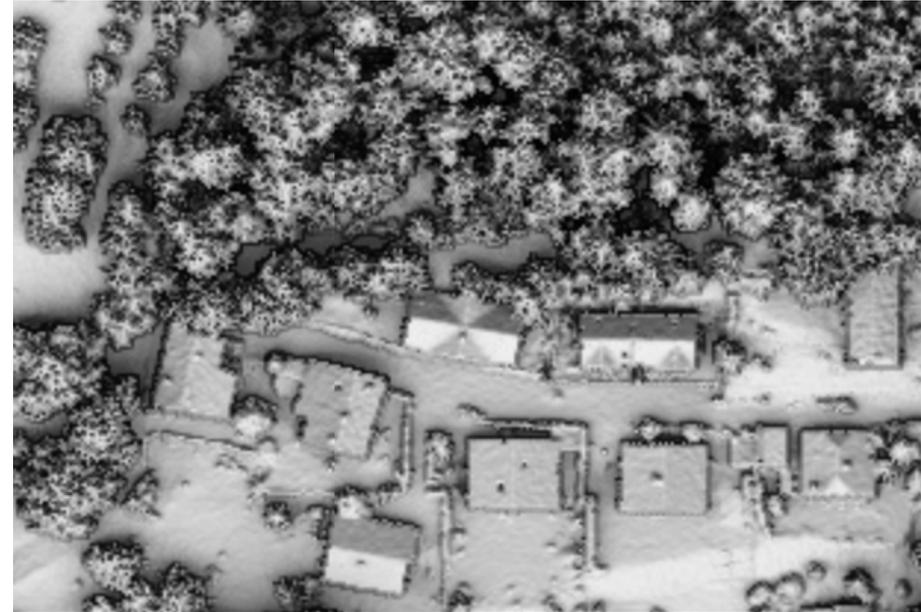




Cartoriviera – Données et fonctionnalités LIDAR

Données

- Courbes de niveau 1 mètre
- Densité des points LIDAR
- Différences 2012 – 2001
- Modèle de canopée (cime des arbres)
- Ombres portées (12.2012 et 06.2012)
- Rayonnement solaire



Fonctionnalités

- Interrogation altitude MNT et MNS
- Interrogation rayonnement solaire
- Profil rapide (basé sur grilles 0.5m)
- Profil détaillé (points LIDAR) – SITN
- Ajout données KML 3D



ANNEXES :

LIDAR-Riviera 2012 - Coûts principaux

Acquisition des données (LIDAR 10 classes + grilles MNT et MNS à 0.5 mètre)

- **env. 110'000 CHF TTC** -> env. 560 CHF / km²

Acquisition des photographies aériennes orientées + orthophoto technique (sans aérotriangulation ni correction radiométrique)

- **env. 6'200 CHF TTC**

Génération d'un cadastre solaire thermique et photovoltaïque des toits des bâtiments (env. 20'000 bâtiments)

- **env. 27'000 CHF TTC**

Acquisition du logiciel Terrascan / Terramodeler (traitement et analyse des données brutes LIDAR)

- **env. 11'500 CHF TTC** (sans Microstation, logiciel de base nécessaire)

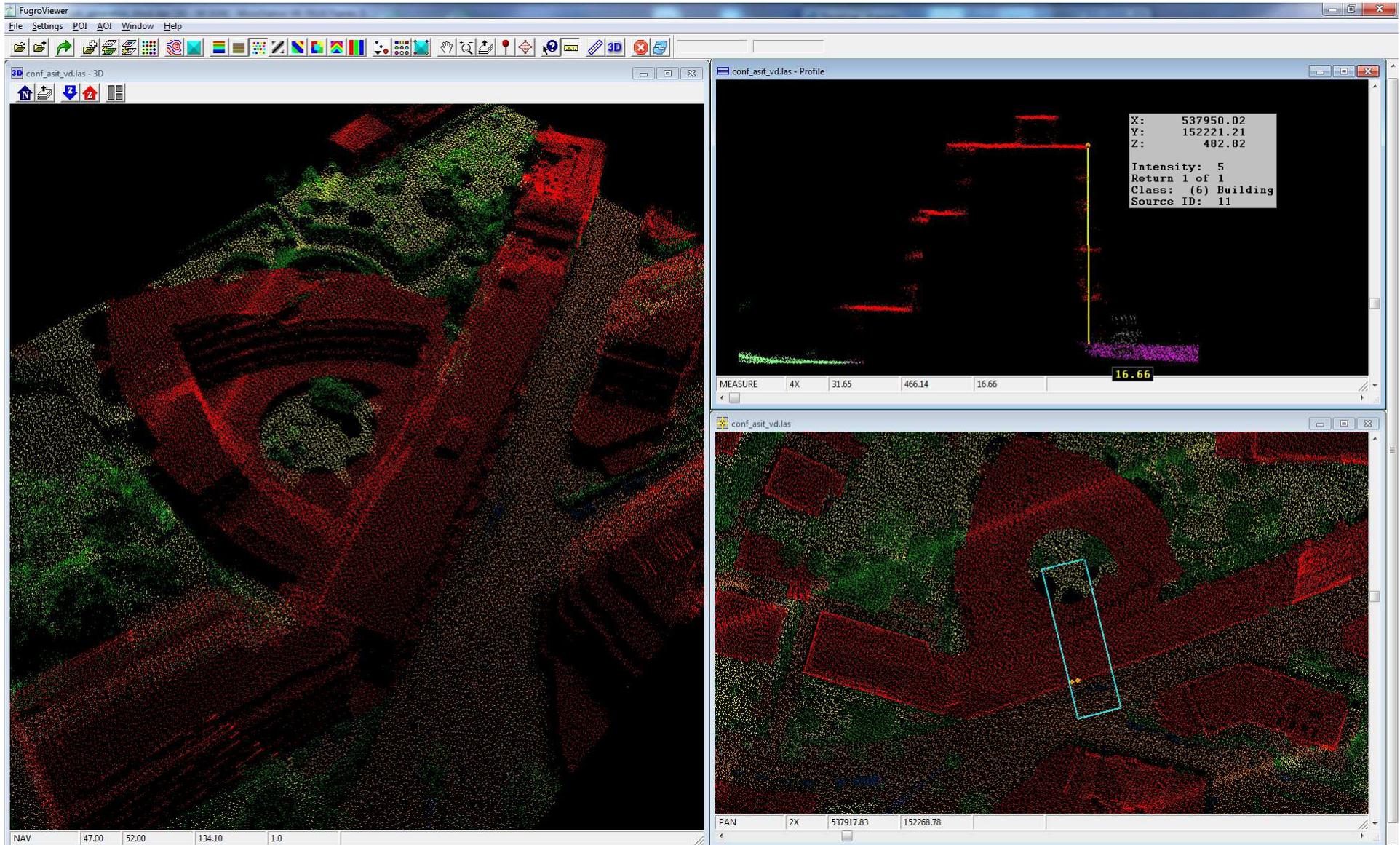
Quelques solutions logicielles

| Données LIDAR et produits dérivés | Formats | Logiciels Open Source | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------|------|----------|---------|
| | | Fugroviewer | Cloudcompare | QGIS | SAGA GIS | Meshlab |
| Nuages de points LIDAR | LAS / XYZ | X | X | | X | X |
| MNT et MNS | ASC Grid | | | X | X | |
| Ombrage MNT / MNS | ASC Grid / Geotiff | | | X | X | |
| Courbes de niveau | SHP / DWG | | | X | X | |
| Pente et orientation du terrain | ASC Grid / Geotiff | | | X | X | |
| Pente et orientation des toits | ASC Grid / Geotiff / SHP | | | X | X | |
| Hauteurs des bâtiments | SHP / DWG | | | X | X | |
| Modèles 3D | KMZ / DXF / Collada / OBJ | | X | | | X |

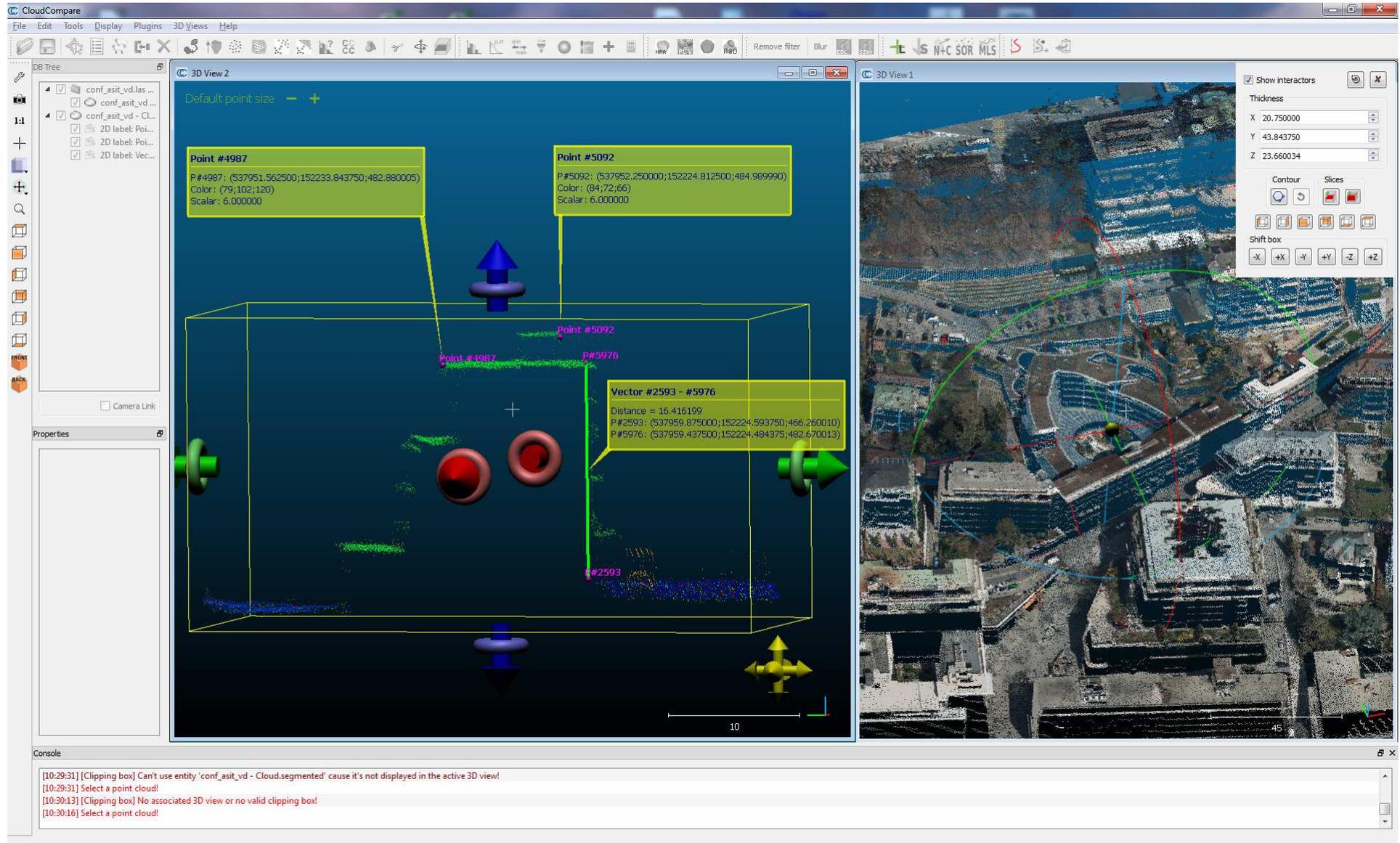


MeshLab

FugroViewer



CloudCompare



Quantum GIS



The screenshot displays the Quantum GIS 2.0.1 interface. The main window shows a 3D perspective view of a city model with buildings and terrain. A red line is drawn across the terrain, representing a profile. The 'Couches' (Layers) panel on the left lists various data layers, including '1243-14-g_color_def_mns' and '1243-14-g_mnt'. The 'Profile Tool' window is open in the foreground, showing a graph of elevation (y-axis, 465 to 485) versus distance (x-axis, 0 to 45). The graph contains two lines: a blue line representing the '1243-14-g_mnt' layer and a red line representing the '1243-14-g_color_def_mns' layer. The red line shows a significant elevation change, peaking at approximately 485 units between x=20 and x=25. The blue line remains relatively flat at around 465 units. The 'Profile Tool' window also includes a table of layers and bands, and buttons for 'Add Layer' and 'Remove Layer'. The status bar at the bottom shows the coordinates '537956.2, 152207.3', a scale of '1:1932', and the projection 'EPSG:21781'.

| Layer | Band |
|-------------------------|------|
| 1243-14-g_mnt | 1 |
| 1243-14-g_color_def_mns | 1 |

Click for polyline and double click to end (right click to cancel then quit)

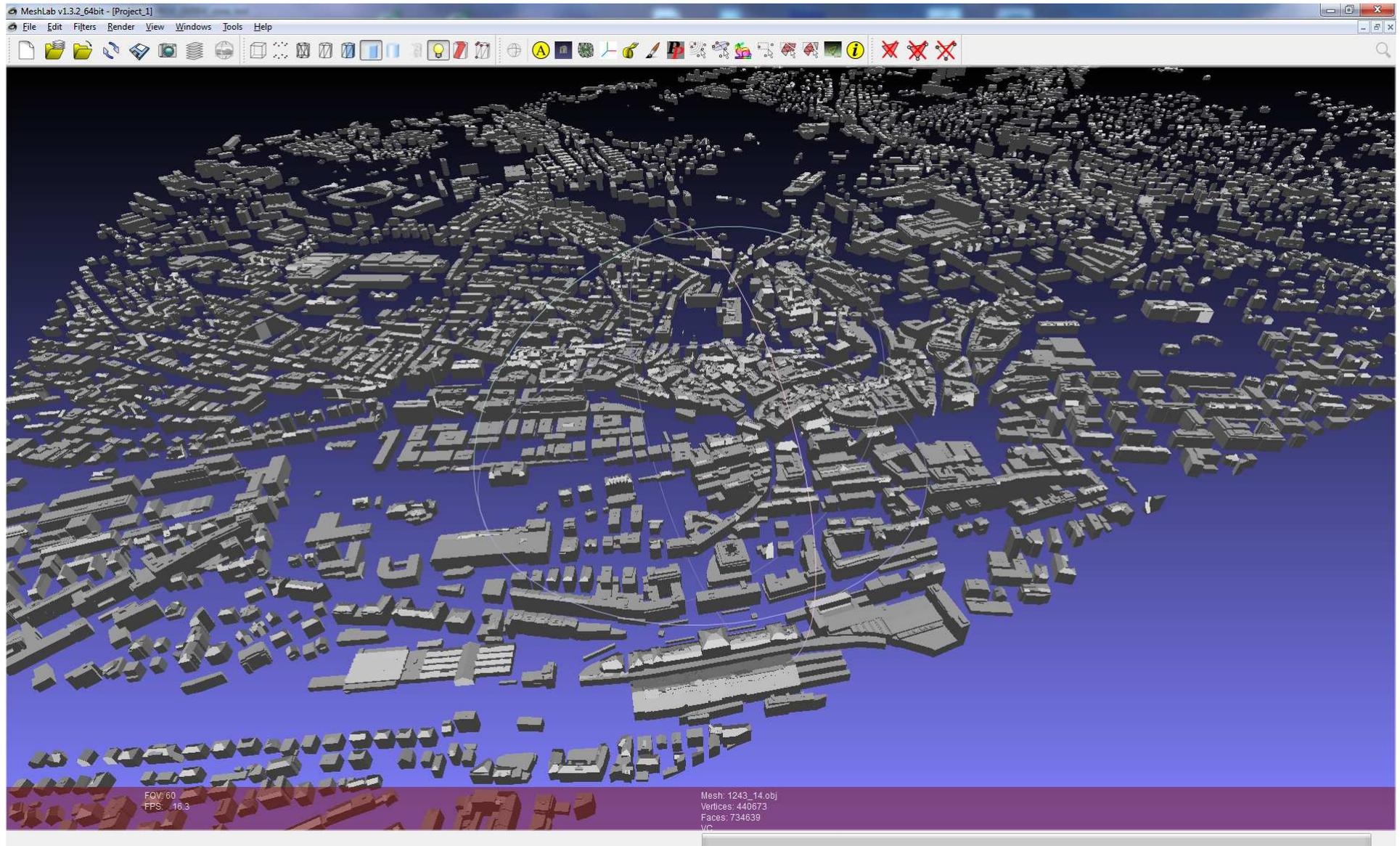
SAGA GIS



The screenshot displays the SAGA GIS interface with the following components:

- Workspace:** Contains three map windows:
 - 01. Lausanne_GridsLidar2012:** A topographic map showing elevation data in a color gradient from blue (low) to red (high).
 - 09. merge_grid_pente_toit_class_maj2:** A map showing a grid with colored triangles (red, blue, green) overlaid on a terrain map.
 - 05. merge_total_mnhv_resample_fit:** A map showing a green and white textured surface, likely representing vegetation or land cover.
- Data Source:** A list of modules and data files, including `grid_filter.dll`, `grid_gridding.dll`, `imagery_classification.dll`, and `imagery_rgs.dll`.
- Majority Filter Panel:** A configuration window for the Majority Filter tool, showing options for Grid system, Search Mode (Circle), Radius (1), and Threshold [Percent] (0).
- Messages:** A log window at the bottom showing system messages such as `[2014-02-17/10:50:49] Load grid: C:\tmp\SAGA_DIR_TEMP\MERGED_GRIDS\merge_grid_orientation_toit_class.sgrd...okay`.
- Bottom Bar:** Displays the current tool as 'Majority Filter' and the coordinate system as 'XS37909.786556 Y152135.849796 Z'.

MeshLab



Prochains RDV ASIT VD

- 1^{er} avril :
20^{ème} Assemble Générale
au Musée Olympique à Lausanne

- Courant juin :
2^{èmes} Rencontres autour du logiciel open source QGIS

- 28 octobre :
Journée spéciale 20 ans de l'ASIT VD
au SwissTech Convention Center à l'EPFL