

Traitement photogrammétrique de données acquises par drones

Mehdi Daakir^{1,2}

¹ Vinci-Construction-Terrassement

² Laboratoire LOEMI-IGN

Colloque Photogrammétrie Numérique et Perception 3D :
les Nouvelles Conquêtes
mardi 15 mars 2016

Plan

- 1 Systèmes de positionnement par satellites
- 2 Une brève histoire de la photogrammétrie
- 3 L'avènement des drones civils ?
- 4 Le géo-référencement
- 5 Problématiques
- 6 Conclusions

Plan

1 Systèmes de positionnement par satellites

- Présentation
- Positionnement différentiel

2 Une brève histoire de la photogrammétrie

3 L'avènement des drones civils ?

4 Le géo-référencement

5 Problématiques

6 Conclusions

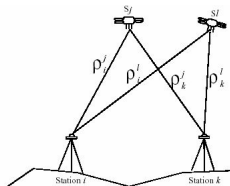
- GNSS¹ = constellations de satellites en orbite autour de la Terre qui permettent de déterminer une position et fournissent une mesure de temps
- Les constellations existantes : GPS, Glonass, Galileo, Beidou
- Principe de fonctionnement = Principe de multilatération : connaissant la position et la distance d'au moins 4 satellites à mon récepteur $\Rightarrow$ l'estimation de la position du récepteur à un instant donné est possible

1. Global Navigation Satellite System

- Quelques caractéristiques du système GPS en particulier :
 - constellation de 30 satellites
 - émission sur deux bandes L1+L2
 - échelle de temps associée : GPS-Time
 - ...

- Les signaux sont émis sur 2 bandes L1 et L2
 - **Code** de synchronisation pour le positionnement standard (**précision $\sim 1-5$ m**)
 - Les porteuses L1 & L2 ont des longueurs d'ondes respectives : $\lambda_1 = 19.0$ cm et $\lambda_2 = 24.4$ cm
 - **La phase** des porteuses permet un positionnement de **précision optimale $\sim 1-3$ cm**
 - Contrairement au positionnement sur le **code $\sim$ métrique mais non ambiguë**, le positionnement sur la **phase est $\sim$ centimétrique mais ambiguë**
 - Possibilité de travailler sur une ou sur les deux fréquences en même temps
 - **Le bi-fréquence** présente l'avantage de pouvoir combiner les deux longueurs d'ondes pour **s'affranchir d'une erreur systématique** (effet de la ionosphère)

- Permet d'éliminer un certain nombre d'erreurs systématiques par différentiation des observations :



→ La relation entre le récepteur i et le satellite j s'écrit :

$$\phi_i^j = \rho_i^j + c(\delta t_i - \delta t^j) + \tau_i^j - \lambda N_i^j$$

→ La simple différence (Δ) entre les deux récepteurs i et k :

$$\Delta \phi_{i,k}^j = \Delta \rho_{i,k}^j + c(\Delta t_{i,k}) + \Delta \tau_{i,k}^j - \lambda \Delta N_{i,k}^j$$

→ La double différence ($\nabla \Delta$) par rapport au satellite l :

$$\nabla \Delta(\phi_{i,k}^{l,j}) = \nabla \Delta(\rho_{i,k}^{l,j}) - \nabla \Delta(\tau_{i,k,iono}^{l,j}) - \lambda \nabla \Delta(N_{i,k}^{l,j})$$

→ La précision sur l'estimation de la position de la station inconnue k est centimétrique sur la mesure de phase

Plan

1 Systèmes de positionnement par satellites

2 Une brève histoire de la photogrammétrie

- Présentation générale
- Un chantier classique
- La chaîne APERO-MicMac
- Photogrammétrie, solution miracle ?

3 L'avènement des drones civils ?

4 Le géo-référencement

5 Problématiques

6 Conclusions

- Aimé Laussedat² a l'idée d'utiliser les perspectives dessinées comme des documents métriques : **invention de la photogrammétrie (1849)**

- Aimé Laussedat² a l'idée d'utiliser les perspectives dessinées comme des documents métriques : [invention de la photogrammétrie \(1849\)](#)
- Intérêt pour de la photogrammétrie aérienne

- Aimé Laussedat² a l'idée d'utiliser les perspectives dessinées comme des documents métriques : **invention de la photogrammétrie (1849)**
- Intérêt pour de la photogrammétrie aérienne
- Évolution au fil du temps :

Mécanique



Analytique



Numérique



- Aimé Laussedat² a l'idée d'utiliser les perspectives dessinées comme des documents métriques : **invention de la photogrammétrie (1849)**
- Intérêt pour de la photogrammétrie aérienne
- Évolution au fil du temps :

Mécanique



Analytique



Numérique



- **Domaines d'application très vastes :**
 - topométrie, métrologie industrielle, ...
 - architecture, archéologie, numérisation du patrimoine, ...
 - géologie, sismologie, hydrographie, ...
 - cartographie satellitaire
 - ...

- Un vocabulaire qui porte parfois à confusion !

- Un vocabulaire qui porte parfois à confusion !
- Les 3 phases d'un traitement photogrammétrique :
 - Étape 1 : étalonnage, calibration, **calibration interne**, calibration intrinsèque, orientation interne, ...

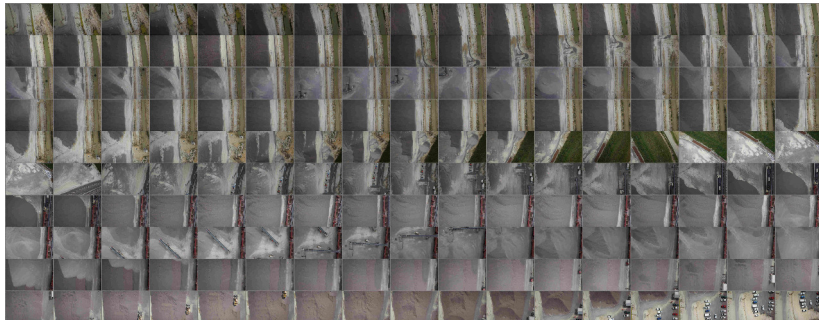
- Un vocabulaire qui porte parfois à confusion !
- Les 3 phases d'un traitement photogrammétrique :
 - Étape 1 : étalonnage, calibration, **calibration interne**, calibration intrinsèque, orientation interne, ...
 - Étape 2 : calibration externe, calibration extrinsèque, **orientation externe**, estimation des poses, mise en place, aéro-triangulation, ...

- Un vocabulaire qui porte parfois à confusion !
- Les 3 phases d'un traitement photogrammétrique :
 - Étape 1 : étalonnage, calibration, **calibration interne**, calibration intrinsèque, orientation interne, ...
 - Étape 2 : calibration externe, calibration extrinsèque, **orientation externe**, estimation des poses, mise en place, aéro-triangulation, ...
 - Étape 3 : corrélation dense, reconstruction 3D, **mise en correspondance**, calcul du nuage, modèle 3D, carte de profondeur, ...
- *L'étape 3 ne sera pas évoquée dans ce qui suit.*

1- Prendre des images de bonne qualité !!

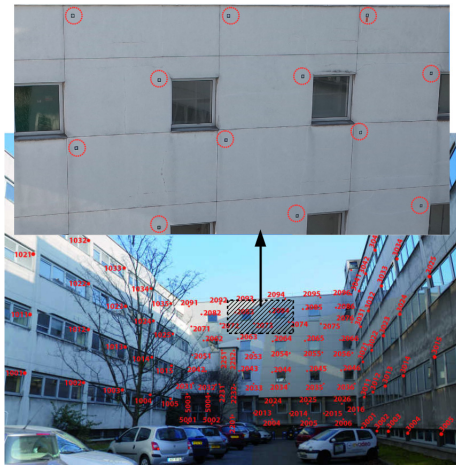


2- Jamais assez d'images !!



3- Estimation des paramètres internes de la caméra :

→ Méthode classique sur polygone d'étalonnage



3- Estimation des paramètres internes de la caméra :

→ Méthode classique sur polygone d'étalonnage

- établir la **relation** entre les **points dans le repère image** et les **points dans le repère monde**

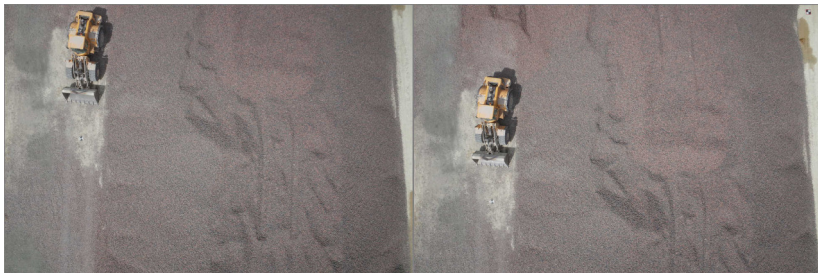
$$\begin{pmatrix} i \\ j \end{pmatrix} = \zeta \left(\pi \left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \right) \right) \quad (1)$$

- π projection conique de $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$
- ζ application de $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ intrinsèque à la caméra

3- Estimation des paramètres internes de la caméra :

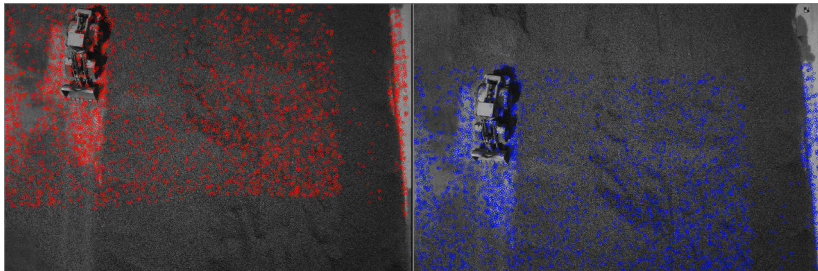
- Il s'agit d'abord de trouver une **bonne modélisation** intrinsèque de la caméra. Quel modèle choisir pour ζ ?
- En général **modèle physique** :
 - distance principale
 - point principal
 - centre de distorsion
 - fonction de distorsion radiale
 - paramètres de décentrement (axes optiques des différentes lentilles non alignés)
 - défaut d'orthogonalité du plan du capteur par rapport à l'axe optique
- En pratique :
 - des **modèles plus complexes** ...

3- Estimation des paramètres internes/externes de la caméra : → Détection de points homologues :



3- Estimation des paramètres internes/externes de la caméra :

→ Détection de points homologues :



3- Estimation des paramètres internes/externes de la caméra :

→ La compensation par faisceaux :

- Soit P un point de liaison 3D dans le repère monde/objet vu sur n images et p_i sa projection dans la $i^{\text{ème}}$ image ;

$$f(x, l) : \begin{cases} \dots\dots\dots \\ \vec{p}_i - \zeta(\pi(\mathcal{R}_i(\vec{P} - \vec{C}_i))) = \vec{0} \\ \dots\dots\dots \end{cases} \quad (1)$$

avec :

- x : vecteur des paramètres à estimer
- l : vecteur des observations
- $(\vec{C}_i, \mathcal{R}_i)$: position et orientation de la caméra i
- Minimiser la fonction coût $f \Leftrightarrow$ minimiser l'erreur de re-projection
- Si ζ (modélise intrinsèquement la caméra) inconnue $\Leftrightarrow$ auto-calibration

- La chaîne **APERO-MicMac**³ de l'IGN :
→ Logiciel **gratuit** et **open-source**

3. Pierrot-Deseilligny M. 2015. Free open source photogrammetry with MICMAC [en ligne]. Les Rencontres Mondiales du Logiciel Libre. Disponible sur : <<https://2015.rml1.info/micmac-une-solution-libre-de-photogrammetrie?lang=fr>> (consulté le 15 septembre 2015)

- La chaîne **APERO-MicMac**³ de l'IGN :
 - Logiciel **gratuit** et **open-source**
 - Logiciel destiné aux chercheurs/experts

3. Pierrot-Deseilligny M. 2015. Free open source photogrammetry with MICMAC [en ligne]. Les Rencontres Mondiales du Logiciel Libre. Disponible sur : <https://2015.rml1.info/micmac-une-solution-libre-de-photogrammetrie?lang=fr> (consulté le 15 septembre 2015)

- La chaîne **APERO-MicMac**³ de l'IGN :
 - Logiciel **gratuit** et **open-source**
 - Logiciel destiné aux chercheurs/experts
 - Avantages :
 - gestion de données de très très **très grande taille** !

3. Pierrot-Deseilligny M. 2015. Free open source photogrammetry with MICMAC [en ligne]. Les Rencontres Mondiales du Logiciel Libre. Disponible sur : <<https://2015.rml1.info/micmac-une-solution-libre-de-photogrammetrie?lang=fr>> (consulté le 15 septembre 2015)

- La chaîne **APERO-MicMac**³ de l'IGN :
 - Logiciel **gratuit** et **open-source**
 - Logiciel destiné aux chercheurs/experts
 - Avantages :
 - gestion de données de très très **très grande taille** !
 - chaque étape du calcul peut être contrôlée de façon **très fine** (différents degrés de complexité)

3. Pierrot-Deseilligny M. 2015. Free open source photogrammetry with MICMAC [en ligne]. Les Rencontres Mondiales du Logiciel Libre. Disponible sur : <<https://2015.rml1.info/micmac-une-solution-libre-de-photogrammetrie?lang=fr>> (consulté le 15 septembre 2015)

- La chaîne **APERO-MicMac**³ de l'IGN :
 - Logiciel **gratuit** et **open-source**
 - Logiciel destiné aux chercheurs/experts
 - Avantages :
 - gestion de données de très très **très grande taille** !
 - chaque étape du calcul peut être contrôlée de façon **très fine** (différents degrés de complexité)
 - produit les **résultats intermédiaires et finaux** dans des **formats ouverts**

3. Pierrot-Deseilligny M. 2015. Free open source photogrammetry with MICMAC [en ligne]. Les Rencontres Mondiales du Logiciel Libre. Disponible sur : <<https://2015.rml1.info/micmac-une-solution-libre-de-photogrammetrie?lang=fr>> (consulté le 15 septembre 2015)

- La chaîne **APERO-MicMac**³ de l'IGN :
 - Logiciel **gratuit** et **open-source**
 - Logiciel destiné aux chercheurs/experts
 - Avantages :
 - gestion de données de très très **très grande taille** !
 - chaque étape du calcul peut être contrôlée de façon **très fine** (différents degrés de complexité)
 - produit les **résultats intermédiaires et finaux** dans des **formats ouverts**
 - **multi-plateformes** : Linux/Win32-64/MaxOsX

3. Pierrot-Deseilligny M. 2015. Free open source photogrammetry with MICMAC [en ligne]. Les Rencontres Mondiales du Logiciel Libre. Disponible sur : <https://2015.rml1.info/micmac-une-solution-libre-de-photogrammetrie?lang=fr> (consulté le 15 septembre 2015)

- La chaîne **APERO-MicMac**³ de l'IGN :
 - Logiciel **gratuit** et **open-source**
 - Logiciel destiné aux chercheurs/experts
 - Avantages :
 - gestion de données de très très **très grande taille** !
 - chaque étape du calcul peut être contrôlée de façon **très fine** (différents degrés de complexité)
 - produit les **résultats intermédiaires et finaux** dans des **formats ouverts**
 - **multi-plateformes** : Linux/Win32-64/MaxOsX
 - une **documentation** est mise-à-jour régulièrement (365 pages au 18/08/2015)

3. Pierrot-Deseilligny M. 2015. Free open source photogrammetry with MICMAC [en ligne]. Les Rencontres Mondiales du Logiciel Libre. Disponible sur : <https://2015.rml1.info/micmac-une-solution-libre-de-photogrammetrie?lang=fr> (consulté le 15 septembre 2015)

Pourquoi faire de la photogrammétrie ?

- la partie acquisition des données est **simple & pratique**

Pourquoi faire de la photogrammétrie ?

- la partie acquisition des données est **simple & pratique**
- l'acquisition est **rentable**, prendre des images ~ **gratuit**

Pourquoi faire de la photogrammétrie ?

- la partie acquisition des données est **simple & pratique**
- l'acquisition est **rentable**, prendre des images $\sim$ **gratuit**
- la géométrie de la scène est modélisée dans son **ensemble**

Pourquoi faire de la photogrammétrie ?

- la partie acquisition des données est **simple & pratique**
- l'acquisition est **rentable**, prendre des images $\sim$ **gratuit**
- la géométrie de la scène est modélisée dans son **ensemble**
- la **précision est arbitraire** $\sim$ $\frac{1}{2}$ pixel

Pourquoi faire de la photogrammétrie ?

- la partie acquisition des données est **simple & pratique**
- l'acquisition est **rentable**, prendre des images $\sim$ **gratuit**
- la géométrie de la scène est modélisée dans son **ensemble**
- la **précision est arbitraire** $\sim \frac{1}{2}$ pixel
- le traitement est $\sim$ **automatique**
- ...

Plan

1 Systèmes de positionnement par satellites

2 Une brève histoire de la photogrammétrie

3 L'avènement des drones civils ?

- Contexte d'évolution
- Secteur des Travaux Publics

4 Le géo-référencement

5 Problématiques

6 Conclusions

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne-agera.fr/>

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**
 - le marché américain va peser **80 milliards € 2025**

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne-agera.fr/>

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**
 - le marché américain va peser **80 milliards € 2025**
 - en France, **300 millions € et 7000 emplois en 2015**
(une législation assez innovante)

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne- agora.fr/>

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**
 - le marché américain va peser **80 milliards € 2025**
 - en France, **300 millions € et 7000 emplois en 2015**
(une législation assez innovante)
 - Les **applications** civiles sont **diverses et variées** $\Longleftrightarrow$
potentiel de croissance considérable !

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne-agma.fr/>

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**
 - le marché américain va peser **80 milliards € 2025**
 - en France, **300 millions € et 7000 emplois en 2015**
(une législation assez innovante)
 - Les **applications** civiles sont **diverses et variées** $\Longleftrightarrow$
potentiel de croissance considérable !
 - Exemples :
 - la construction et l'inspection d'ouvrages

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne-agera.fr/>

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments ^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**
 - le marché américain va peser **80 milliards € 2025**
 - en France, **300 millions € et 7000 emplois en 2015**
(une législation assez innovante)
 - Les **applications** civiles sont **diverses et variées** $\Longleftrightarrow$
potentiel de croissance considérable !
 - Exemples :
 - la construction et l'inspection d'ouvrages
 - le secteur pétrolier et l'énergie

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne-agera.fr/>

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments ^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**
 - le marché américain va peser **80 milliards € 2025**
 - en France, **300 millions € et 7000 emplois en 2015**
(une législation assez innovante)
 - Les **applications** civiles sont **diverses et variées** $\Longleftrightarrow$
potentiel de croissance considérable !
 - Exemples :
 - la construction et l'inspection d'ouvrages
 - le secteur pétrolier et l'énergie
 - l'agriculture 2.0

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne-adora.fr/>

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments ^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**
 - le marché américain va peser **80 milliards € 2025**
 - en France, **300 millions € et 7000 emplois en 2015**
(une législation assez innovante)
 - Les **applications** civiles sont **diverses et variées** $\Longleftrightarrow$
potentiel de croissance considérable !
 - Exemples :
 - la construction et l'inspection d'ouvrages
 - le secteur pétrolier et l'énergie
 - l'agriculture 2.0
 - le transport (surtout ferroviaire)

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne-agera.fr/>

- Pourquoi un tel engouement pour les drones civils ? Quelques éléments^a de réponse :
 - 3% de part de marché aujourd'hui, **20% d'ici 2020**
 - le marché américain va peser **80 milliards € 2025**
 - en France, **300 millions € et 7000 emplois en 2015**
(une législation assez innovante)
 - Les **applications** civiles sont **diverses et variées** $\Longleftrightarrow$
potentiel de croissance considérable !
 - Exemples :
 - la construction et l'inspection d'ouvrages
 - le secteur pétrolier et l'énergie
 - l'agriculture 2.0
 - le transport (surtout ferroviaire)
 - la photographie professionnelle et audiovisuel
 - ...

a. Cécilé Chevré : 2015, l'année des drones, 24 novembre 2014, <http://quotidienne-agera.fr/>

- Avantages apportés au secteur des Travaux Publics :
 - pratique pour le calcul de volume de stocks en terrassement

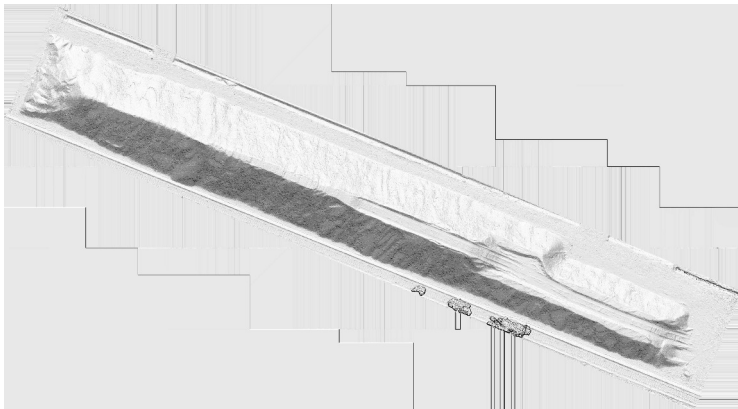
- Avantages apportés au secteur des Travaux Publics :
 - pratique pour le calcul de volume de stocks en terrassement
 - adapté au suivi des carrières, relevé des lignes à hautes tensions, ...

- Avantages apportés au secteur des Travaux Publics :
 - pratique pour le calcul de volume de stocks en terrassement
 - adapté au suivi des carrières, relevé des lignes à hautes tensions, ...
 - apport d'un gain de temps considérable

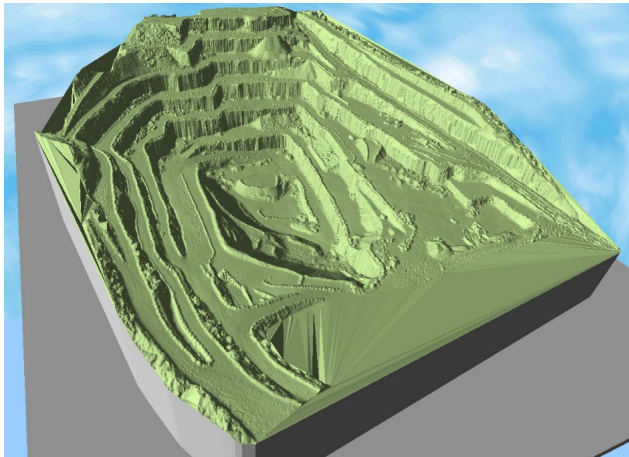
- Avantages apportés au secteur des Travaux Publics :
 - pratique pour le calcul de volume de stocks en terrassement
 - adapté au suivi des carrières, relevé des lignes à hautes tensions, ...
 - apport d'un gain de temps considérable
 - avec une caméra embarquée + traitement photogrammétrique = outil de mesure en adéquation avec les tolérances typiques du secteur

- Avantages apportés au secteur des Travaux Publics :
 - pratique pour le calcul de volume de stocks en terrassement
 - adapté au suivi des carrières, relevé des lignes à hautes tensions, ...
 - apport d'un gain de temps considérable
 - avec une caméra embarquée + traitement photogrammétrique = outil de mesure en adéquation avec les tolérances typiques du secteur
 - contribution à la sécurité des employés sur un chantier
 - ... etc

- Quelques exemples de réalisations chez *Vinci-Construction-Terrassement* :



- Quelques exemples de réalisations chez *Vinci-Construction-Terrassement* :



- Quelques exemples de réalisations chez *Vinci-Construction-Terrassement* :



Plan

- 1 Systèmes de positionnement par satellites
- 2 Une brève histoire de la photogrammétrie
- 3 L'avènement des drones civils ?
- 4 **Le géo-référencement**
 - Géo-référencement indirect par points d'appui
 - Géo-référencement direct par GPS
 - Quelques solutions commerciales
 - Les solutions Low-Cost / DIY⁴
- 5 Problématiques
- 6 Conclusions

4. Do It Yourself !

- Le géo-référencement :

- Problème de la conversion des poses caméras du **système modèle (arbitraire)** → **un système absolu (en général, le système légal)**
- Il s'agit d'estimer les paramètres d'une similitude dans $\mathbb{R}^3$
- La transformation à 7 paramètres de Helmert est souvent utilisée en géodésie

$$g(x, l) : \begin{cases} \vec{\mathcal{P}}_i|_{\textcolor{red}{a}} - \mu \cdot \mathcal{R} \cdot \vec{\mathcal{P}}_i|_{\textcolor{blue}{m}} - \vec{\mathcal{T}} = \vec{0} \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \end{cases} \quad (2)$$

avec :

- $(\mu, \mathcal{R}, \vec{\mathcal{T}})$: paramètres de la similitude
- $(\vec{\mathcal{P}}_i|_{\textcolor{red}{a}}, \vec{\mathcal{P}}_i|_{\textcolor{blue}{m}})$: positions dans les repère respectifs

- Pourquoi la méthode indirecte est la plus utilisée ?

✓ Avantage, son **principe est simple** :

- **mesures** dans les images de cibles connues dans le système absolu
- **calcul** par intersection de faisceaux des positions 3D dans le repère monde
- **minimisation** de la transformation de Helmert
- **expression** des poses caméras dans le nouveau système

✗ Inconvénients :

- effectuer des mesures terrain, cela **coûte cher** !
- parfois il n'est pas possible de disposer des cibles sur la scène
- combien de mesures terrain pour une tolérance données ? (**sur-qualité ?**)
- effectuer des mesure images, en général de façon **manuelle**
- ...

Caractéristiques	eBee ⁵	MAVinci ⁶	BRAMOR ⁷
Précision absolue (cm)	3.0	5.0	1.5
Masse (g)	0.73	2.7	4.5
Autonomie (h)	0.6	0.75	2.5
Récepteur GNSS	RTK	RTK 100 Hz	RTK 20 Hz
GSD ⁸ maximale (cm)	1.5	1.6	0.9
Prix (k€)	25	30	58

5. eBee RTK SenseFly : <http://www.sensefly.com>

6. MAVinci SIRIUS Pro Topcon : <http://www.mavinci.de/>

7. BRAMOR rTK : <http://www.c-astral.com/>

8. Ground Spatial Resolution : fonction de la hauteur minimale de vol et du modèle caméra imposés par le constructeur

eBee



MAVinci



BRAMOR



Caractéristiques	Piksi ⁵	Reach ⁶
crowdfunding	Kickstarter	indiegogo
financement souhaité (k\$)	14	27
soutien reçu (k\$)	166	82
prix d'un kit (\$)	1 000,00	545,00
logiciel de traitement	open-source	RTKlib⁷
masse (g)	32	13

5. Pixsi Swift Navigation

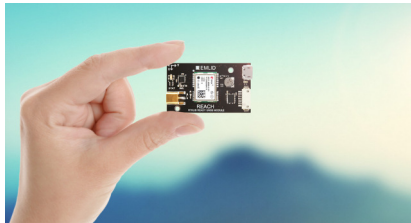
6. Reach Emlid

7. RTKlib est un logiciel open source d'analyse de données GNSS; <http://www.rtklib.com/>

Piksi



Reach



Plan

1 Systèmes de positionnement par satellites

2 Une brève histoire de la photogrammétrie

3 L'avènement des drones civils ?

4 Le géo-référencement

5 **Problématiques**

- Objectifs
- Démarche suivie
- Prototype réalisé
- Calibration du bras de levier
- Synchronisation des capteurs
- Résultats obtenus

6 Conclusions

- Objectifs fixés :
 - Géo-référencer les modèles 3D issus des images
uniquement en embarquant un récepteur GPS sur le drone

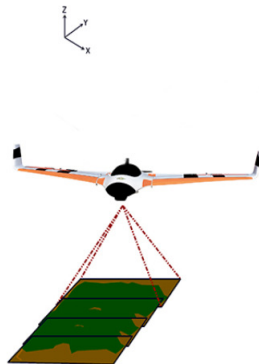
- Objectifs fixés :
 - Géo-référencer les modèles 3D issus des images **uniquement en embarquant un récepteur GPS** sur le drone
 - Atteindre une **précision absolue centimétrique** au sol (ou au plus un point terrain)

- Objectifs fixés :
 - Géo-référencer les modèles 3D issus des images
uniquement en embarquant un récepteur GPS sur le drone
 - Atteindre une **précision absolue centimétrique** au sol
 (ou au plus un point terrain)
 - Arriver à cette précision avec un **système $\pm$ « low cost »**

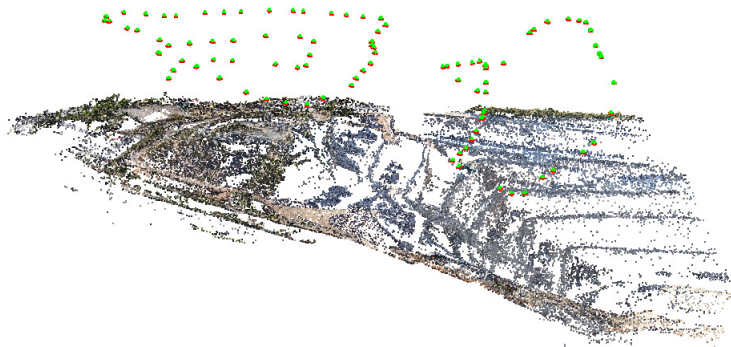
- Objectifs fixés :
 - Géo-référencer les modèles 3D issus des images **uniquement en embarquant un récepteur GPS** sur le drone
 - Atteindre une **précision absolue centimétrique** au sol (ou au plus un point terrain)
 - Arriver à cette précision avec un **système $\pm$ « low cost »**
 - **Gain de temps lors de l'acquisition** des données : une/pas de mesures terrain destinées au géo-référencement

- Objectifs fixés :
 - Géo-référencer les modèles 3D issus des images **uniquement en embarquant un récepteur GPS** sur le drone
 - Atteindre une **précision absolue centimétrique** au sol (**ou au plus un point terrain**)
 - Arriver à cette précision avec un **système $\pm$ « low cost »**
 - **Gain de temps lors de l'acquisition** des données : une/pas de mesures terrain destinées au géo-référencement
 - **Gain de temps au niveau du traitement** des données : une/pas de mesures image n'est réalisée lors du traitement

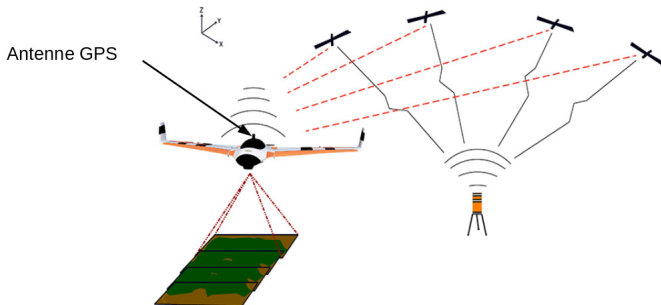
- Le géo-référencement des sommets caméras par GPS implique :
 - acquisition des images



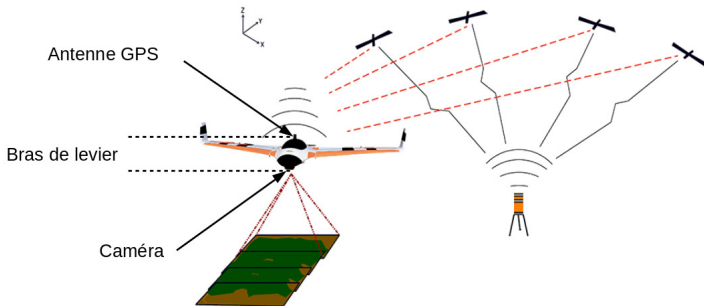
- Le géo-référencement des sommets caméras par GPS implique :
 - acquisition des images
 - mise en place relative des images



- Le géo-référencement des sommets caméras par GPS implique :
 - acquisition des images
 - mise en place relative des images
 - calcul d'une trajectographie GPS précise

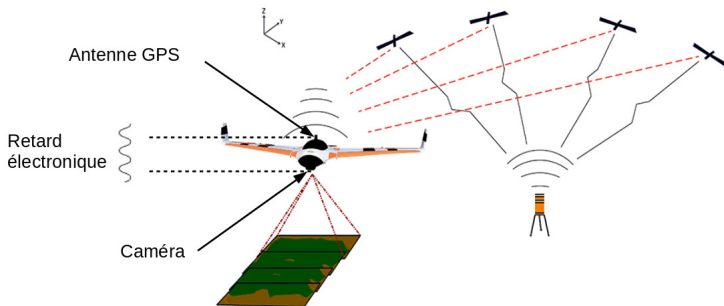


- Le géo-référencement des sommets caméras par GPS implique :
 - acquisition des images
 - mise en place relative des images
 - calcul d'une trajectographie GPS précise
 - calibration du bras de levier

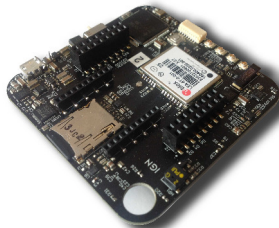


- Le géo-référencement des sommets caméras par GPS implique :

- acquisition des images
- mise en place relative des images
- calcul d'une trajectographie GPS précise
- calibration du bras de levier
- synchronisation temporelle des capteurs



- GeoCube de l'IGN (Module GPS Ublox LEA-6T-0-001) :
 - ✓ Mesures brutes : Temps, Phase (L1), C/A code, Doppler
 - ✓ Possibilité de datation par TimeMark et synchronisation par TimePulse (précis et stable)
 - ✓ Prix : 65,00 \$ + 10,00 \$ antenne patch
 - ✗ Longueur des lignes de bases limitée par le mono-fréquence (< 5 km)



- Sony Cyber-shot DSC-RX1⁵ :
 - ✓ Compact avec capteur CMOS plein format de 24 Mpx
 - ✓ Objectif professionnel à focale fixe 35 mm
 - ✗ Masse : 482 g
 - ✗ Prix : 2 000,00 €
 - ✗ Cadence faible : 0.6 imgs/s
 - ✗ Objectif non amovible
 - ✗ Absence de connectique de déclenchement



5. http://www.dpreview.com/products/sony/compacts/sony_dscrx1

- La caméra légère de l'IGN :
 - ✓ Caméra haute résolution de 20 Mpx
 - ✓ Caméra haute cadence : 5 – 10 imgs/s
 - ✓ Monture objectifs M-Leica
 - ✓ Couche batterie optionnelle
 - ✓ Masse : 300 g (optique comprise)
 - ✓ Global shutter
 - ✓ Synchronisation temporelle précise



- Le drone DJI-F550⁵ :
 - ✓ Décollage/Atterrissage à la verticale
 - ✓ Prix (en kit) : 400 €
 - ✗ Autonomie (2 kg, charge utile comprise) < 10 min
 - ✗ Logiciel de gestion de vol non abouti & Windows uniquement



5. <http://www.dji.com/product/flame-wheel-arf>

- **Modèle minimal** après mise en place des images & calcul de la trajectoire GPS du drone. Pour l'image i :

$$\left\{ \begin{array}{c} \dots\dots\dots \\ \vec{G}_i|_m - \mu \cdot \mathcal{R} \cdot \vec{C}_i|_r - \vec{T} - \mathcal{R}_i \cdot \vec{O} = \vec{0} \\ \dots\dots\dots \end{array} \right. \quad (3)$$

avec :

- $\vec{G}_i|_m$: sommet caméra par GPS exprimé dans le repère monde
- $(\mu, \mathcal{R}, \vec{T})$: paramètres de la similitude
- $(\vec{C}_i|_r, \mathcal{R}_i)$: position et orientation de la caméra dans le repère relatif
- $\vec{O}$: vecteur bras de levier

- **Problème : la composante verticale du bras de levier est indéterminée !**
- **Ajout d'équation(s) de contrainte(s) ;** Pour le GCP⁶ k par exemple :

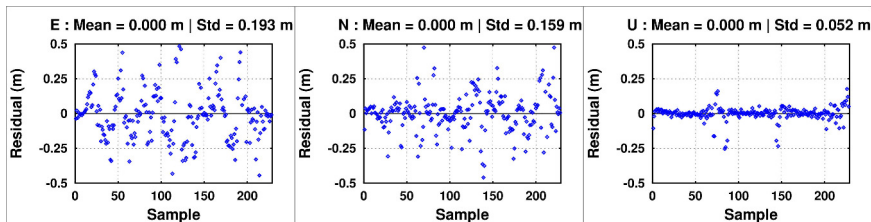
$$\left\{ \begin{array}{c} \dots\dots\dots \\ \vec{G}_i|_m - \mu \cdot \mathcal{R} \cdot \vec{C}_i|_r - \vec{T} - \mathcal{R}_i \cdot \vec{O} = \vec{0} \\ \dots\dots\dots \\ \vec{P}_k|_m - \mu \cdot \mathcal{R} \cdot \vec{P}_k|_r - \vec{T} = \vec{0} \\ \dots\dots\dots \end{array} \right. \quad (3)$$

avec :

- $\vec{P}_k|_m$: position du GCP dans le repère monde
- $\vec{P}_k|_r$: position du GCP dans le repère relatif

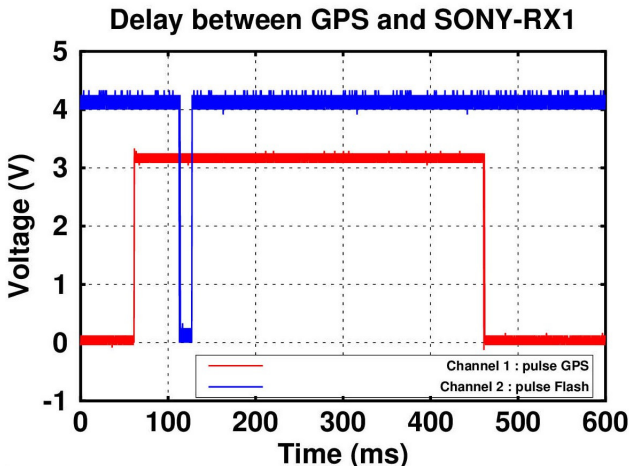
- Résidus de l'équation [3] pour un vol de 231 images (caméra utilisée : Sony Cyber-shot DSC-RX1) :

$$\left\{ \begin{array}{c} \vec{G}_i|_m - \mu \cdot \mathcal{R} \cdot \begin{array}{c} \dots\dots \\ \vec{C}_i|_r \\ \dots\dots \end{array} - \vec{T} - \mathcal{R}_i \cdot \vec{O} = \vec{0} \end{array} \right.$$



- La synchronisation est réalisée avec une fonction **TimePulse** du module GPS u-blox :
 - le récepteur **GPS** envoie un **pulse** pour déclencher la caméra
 - la durée et la fréquence de ce pulse sont **paramétrables & stables**
 - la **datation** est alignée sur l'échelle de temps **GPS** dès qu'un satellite est locké
 - l'incertitude de la datation à 1 Hz est : **$u = \pm 15 \text{ ns}$**

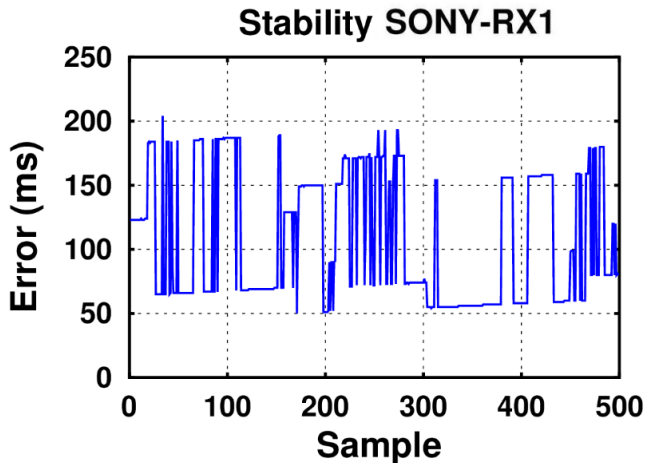
- Mesure en laboratoire du **retard électronique** entre le récepteur GPS et la caméra Sony Cyber-shot DSC-RX1 (existence) :



- **Test de stabilité** du retard électronique :
 - La datation est réalisée avec la fonction **TimeMark** du module GPS u-blox

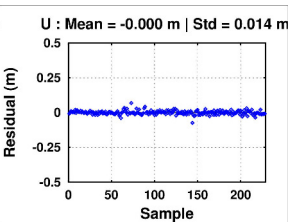
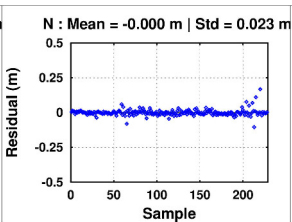
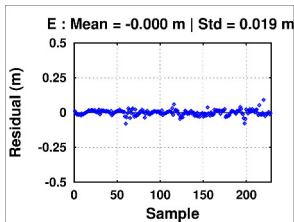


- **Test de stabilité** du retard électronique :
 → Tracé de la variation de $\Delta t_i = \text{TimeMark}_i - \text{TimePulse}_i$

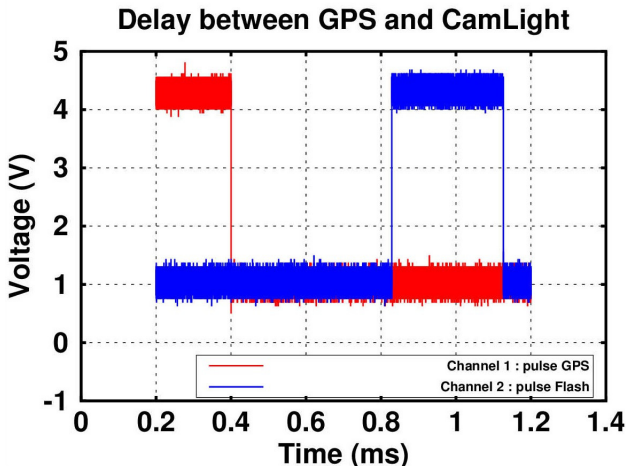


- Prise en compte du retard électronique dans le modèle :

$$\left\{ \begin{array}{c} \vec{g}_i|_m - \mu \cdot \mathcal{R} \cdot -\vec{c}_i|_r - \vec{\mathcal{T}} - \mathcal{R}_i \cdot \vec{\mathcal{O}} - \vec{v}_i \cdot t_i^d = \vec{0} \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \end{array} \right. \quad (4)$$

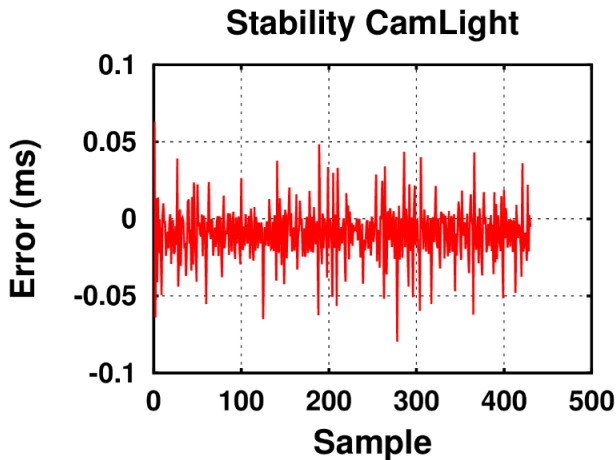


- Mesure en laboratoire du **retard électronique** entre le récepteur GPS et la caméra légère de l'IGN (existence) :

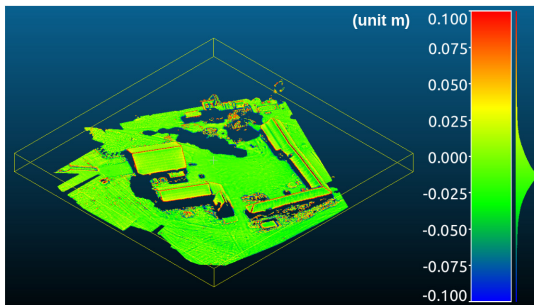


- **Test de stabilité** du retard électronique :

→ Tracé de la variation de $\Delta t_i = \text{TimeMark}_i - \text{TimeMark}_{i+1}$

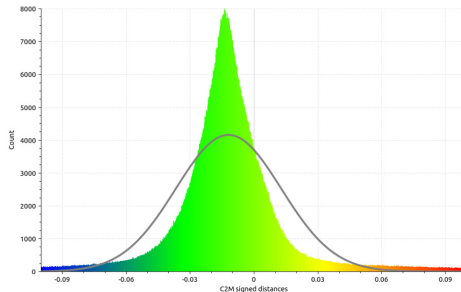


- Pour les données d'un vol :
 - **Comparaison des modèles 3D** issus d'un côté d'un jeu d'orientations calculé à partir de **points de référence** disponibles et de l'autre côté **uniquement en s'appuyant sur les données GPS** embarquées :



- Pour les données d'un vol :
 - **Comparaison des modèles 3D** issus d'un côté d'un jeu d'orientations calculé à partir de **points de référence** disponibles et de l'autre côté **uniquement en s'appuyant sur les données GPS** embarquées :

Gauss: mean = -0.012 / std.dev. = 0.025 [1291 classes] (unit m)



Plan

- 1 Systèmes de positionnement par satellites
- 2 Une brève histoire de la photogrammétrie
- 3 L'avènement des drones civils ?
- 4 Le géo-référencement
- 5 Problématiques
- 6 Conclusions**

- La possibilité d'atteindre une **exactitude de 1 cm avec 1 point terrain et 1 fréquence** nous semble possible !
- La possibilité de l'atteindre avec 0 point terrain aussi ! ?
- Le développement d'une autre procédure de calibration du bras de levier nécessitant 0 point terrain (résultats prometteurs)
- Tester l'apport d'une **seconde fréquence**, prototype ébauché, mais non finalisé
- Aller vers du plus « **low cost** » en testant des caméras plus accessibles (limitations avec les problématiques de synchronisation)