

# Systemes et Algorithmes de Traitement d'Images pour l'Estimation de Déformations de Structures d'Avion en Vol.

*Quentin Demoulin<sup>1,2</sup>*

*Dirigée par : Jean-Yves Tourneret<sup>2</sup>, Denis Kouamé<sup>3</sup> et Adrian Basarab<sup>3</sup>*

*Co-encadrée par : François Lefebvre-Albaret<sup>1</sup> et Jean-Luc Vialatte<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Airbus, 316 route de Bayonne, 31060 Toulouse, France,

<sup>2</sup> IRIT/ENSEEIH/Tésa, Université de Toulouse, 31071 Toulouse, France

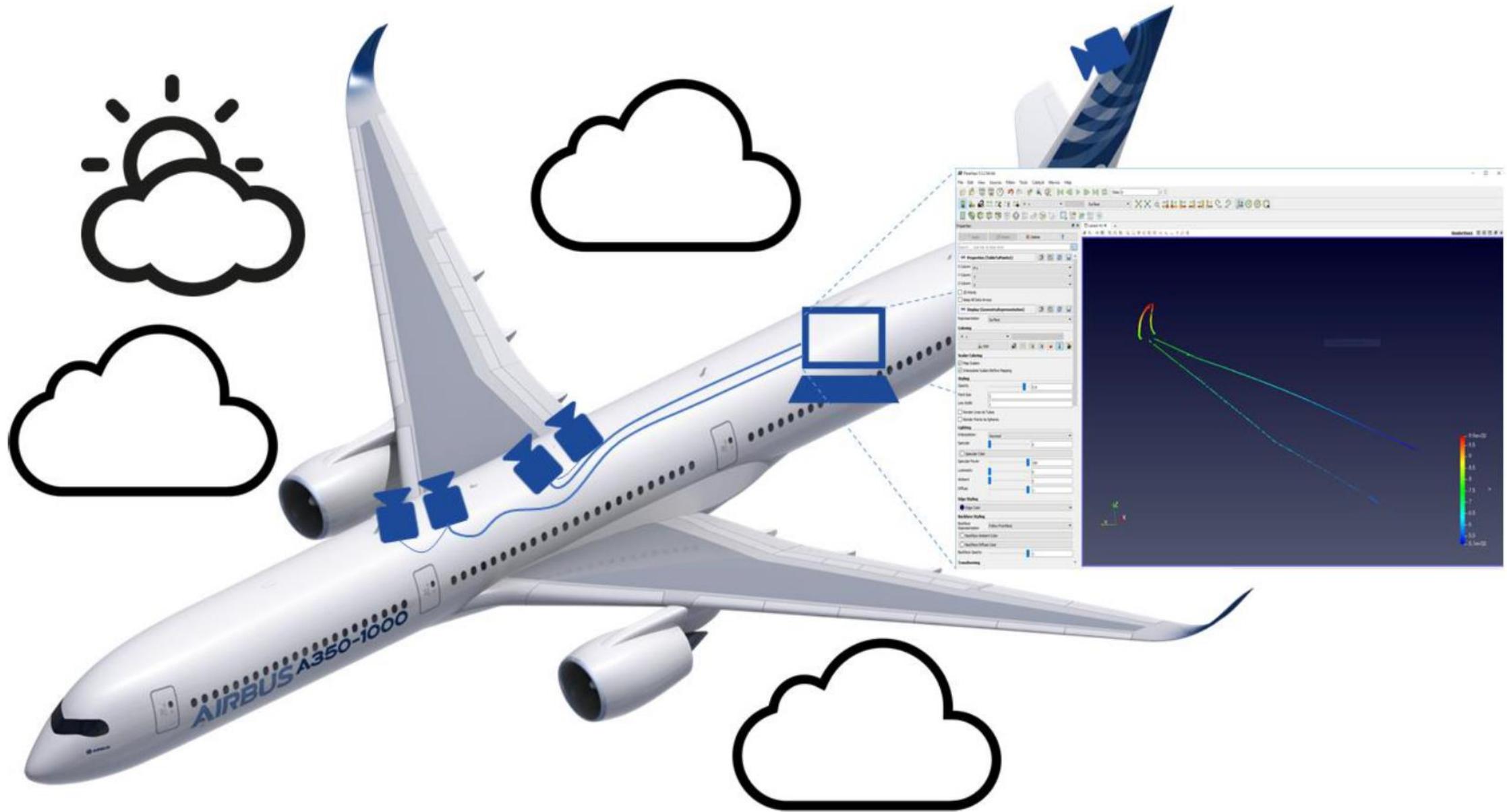
<sup>3</sup> IRIT UMR CNRS 5505, Université de Toulouse, Université Paul Sabatier, CNRS, France

email: [quentin.demoulin@airbus.com](mailto:quentin.demoulin@airbus.com)



x 4





# Plan

## A. Introduction

1. Contexte industriel
2. Objectifs et Enjeux
3. La reconstruction 3D sans contact

## B. Reconstruction 3D d'aile par photogrammétrie

1. Principe de la photogrammétrie
2. Méthodologie
3. Ajustement de faisceaux contraint

## C. Évaluation de l'incertitude de reconstruction 3D

1. Méthodologie
2. Principales sources d'incertitude
3. Propagation d'incertitude

## D. Validation industrielle

1. Essais en vol
2. Premiers résultats
3. Réponse aux attentes d'Airbus

## E. Conclusion et perspectives

# Plan

## A. Introduction

1. Contexte industriel
2. Objectifs et Enjeux
3. La reconstruction 3D sans contact

## B. Reconstruction 3D d'aile par photogrammétrie

1. Principe de la photogrammétrie
2. Méthodologie
3. Ajustement de faisceaux contraint

## C. Évaluation de l'incertitude de reconstruction 3D

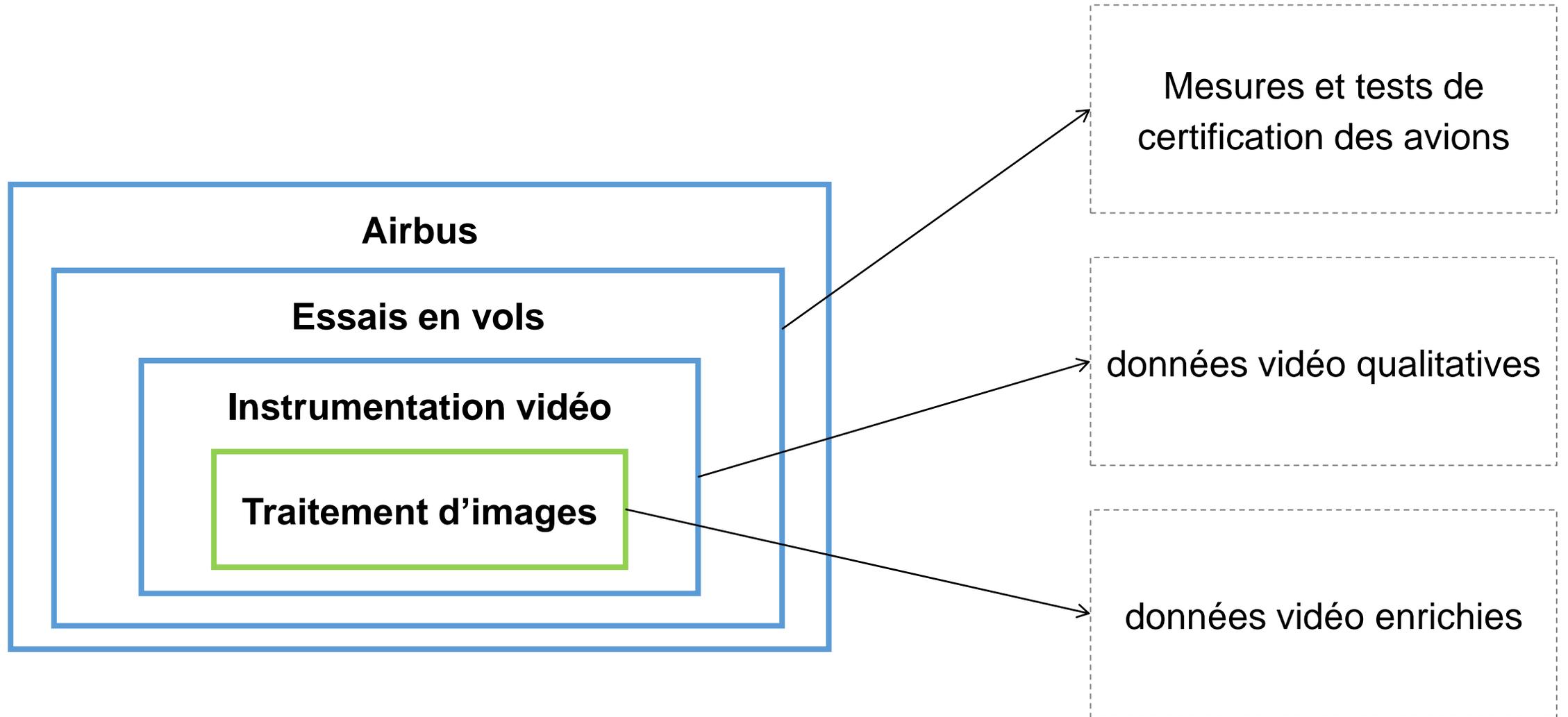
1. Méthodologie
2. Principales sources d'incertitude
3. Propagation d'incertitude

## D. Validation industrielle

1. Essais en vol
2. Premiers résultats
3. Réponse aux attentes d'Airbus

## E. Conclusion et perspectives

# Contexte industriel



# Contexte industriel

Développement d'une solution en accord avec les axes des essais en vol d'Airbus :



Réduction du temps  
d'installation



Réduction de l'empreinte  
sur l'avion



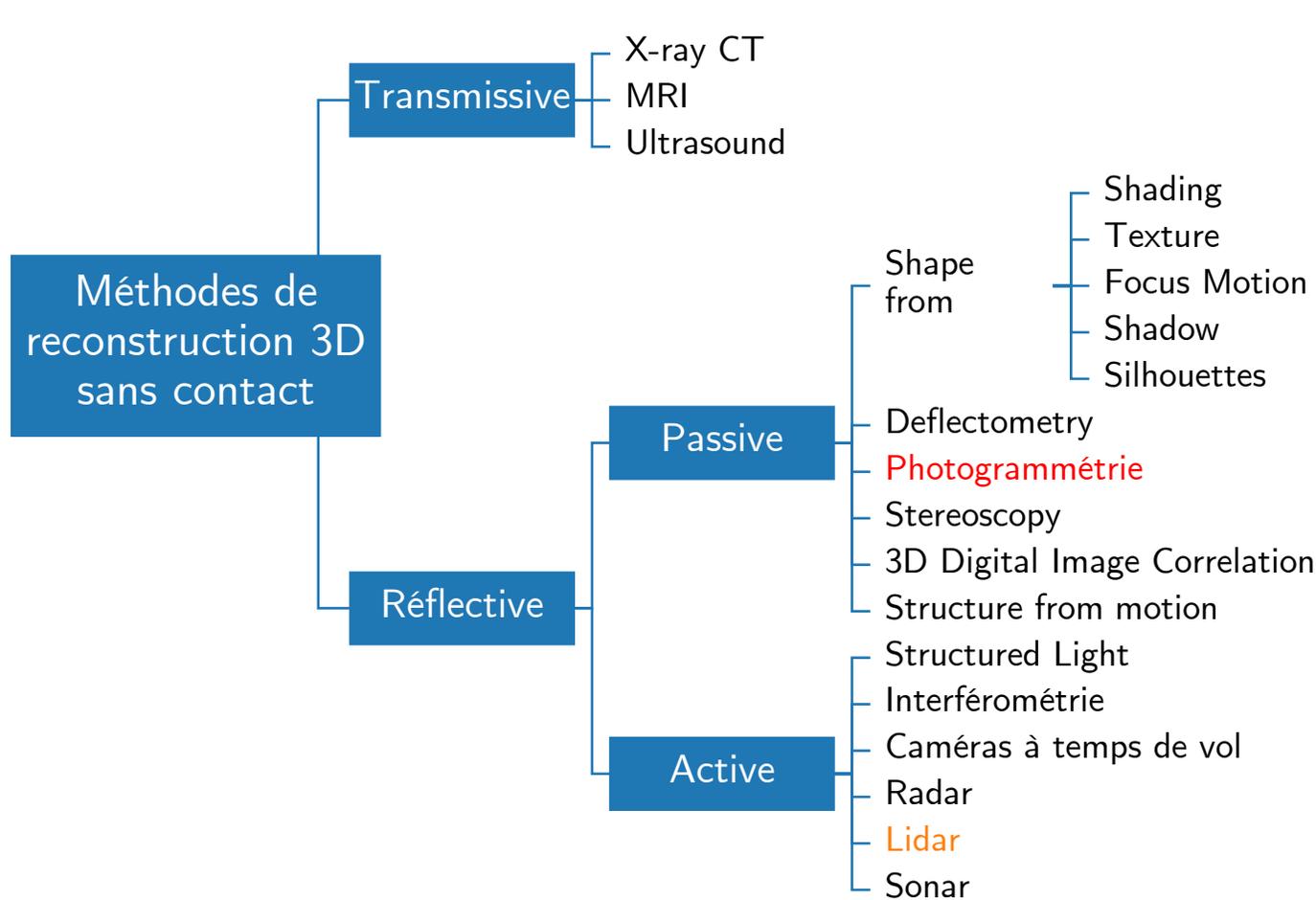
Réduction des coûts

# Objectifs et enjeux

## Besoins et contraintes de l'application :

Volume de la scène	10 x 30 x 10 m <sup>3</sup>
Incertitude de mesure sur l'élévation de l'aile	± 10cm à 30m
Fréquence de mesure	1 à 30 mesures par seconde
Durée du test	jusqu'à 4h
Intrusivité	pas avoir d'impact sur les performances de vol, pas de perturbations des autres installations.
Contraintes d'installation	capteurs positionnés aux hublots, installation en moins d'un jour.
Environnement non contrôlé	variations d'illumination non contrôlées, réflexions et ombres potentielles, vibrations et déformations de l'avion complet.

# La reconstruction 3D sans contact



## Choix de la photogrammétrie

- Flexible
- Précision ajustable (résolution, nombre de caméras)
- Fréquence ajustable
- Intrusivité limitée
- Caméras disponibles et maîtrisées aux essais en vol

# Plan

## A. Introduction

1. Contexte industriel
2. Objectifs et Enjeux
3. La reconstruction 3D sans contact

## B. Reconstruction 3D d'aile par photogrammétrie

1. Principe de la photogrammétrie
2. Méthodologie
3. Ajustement de faisceaux contraint

## C. Évaluation de l'incertitude de reconstruction 3D

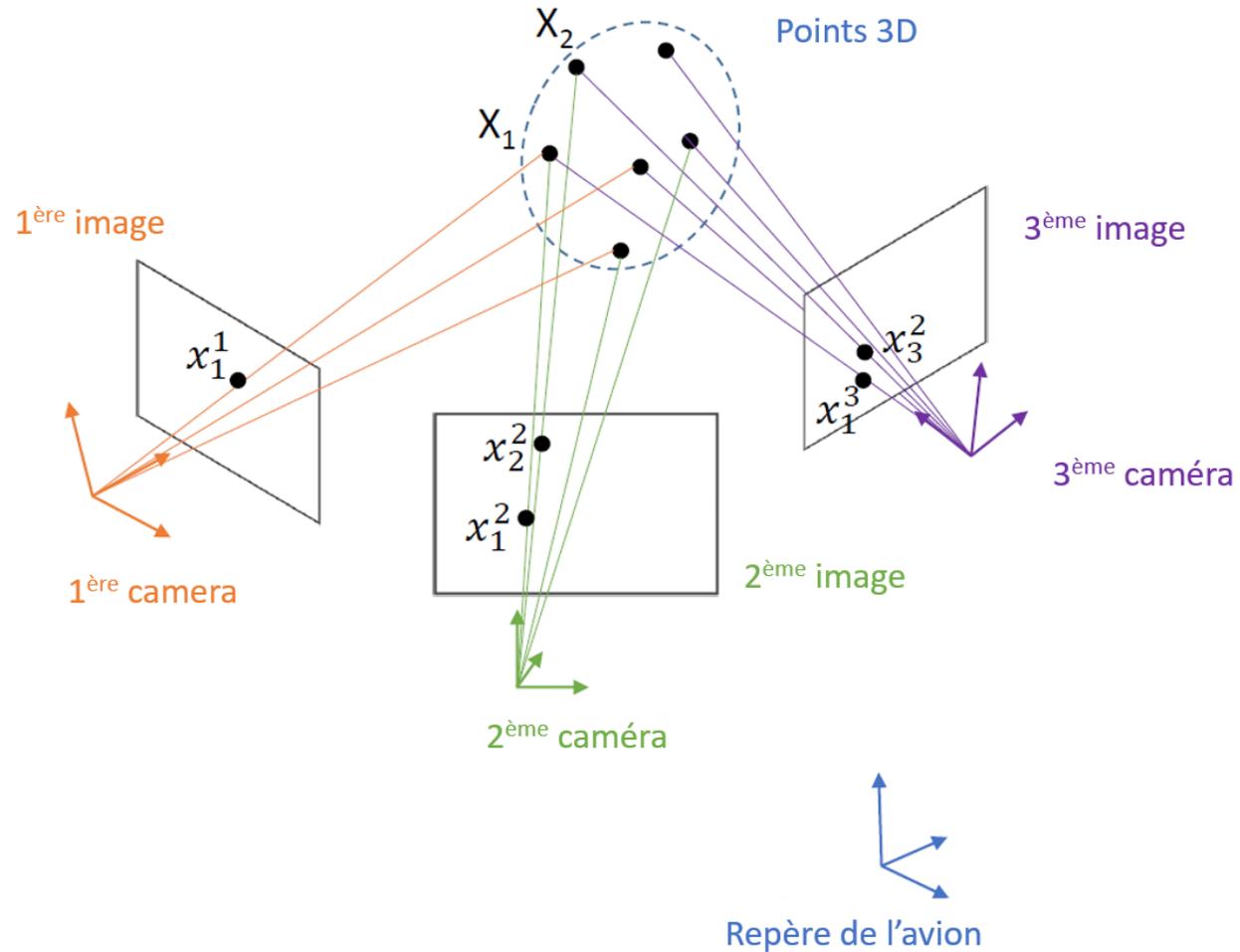
1. Méthodologie
2. Principales sources d'incertitude
3. Propagation d'incertitude

## D. Validation industrielle

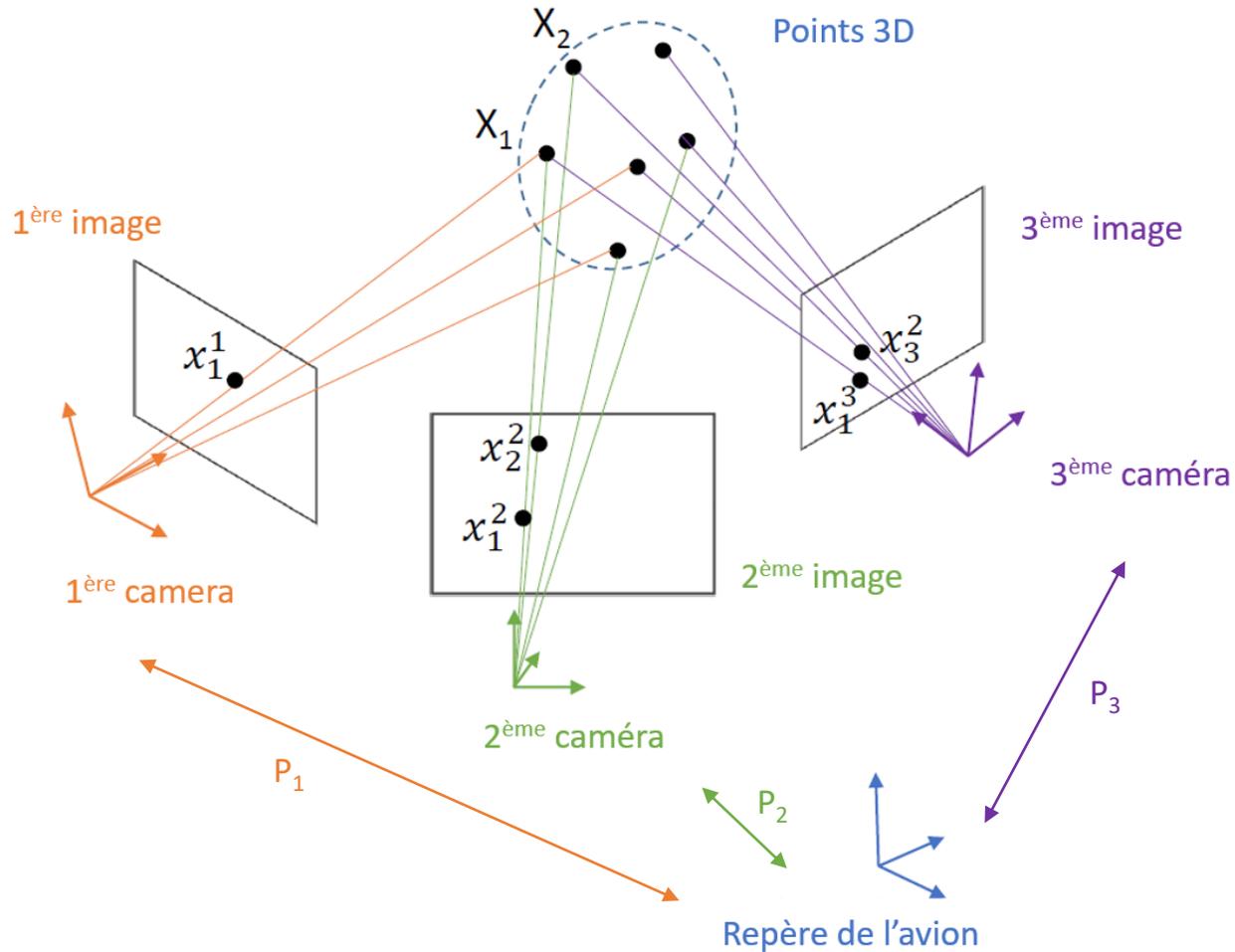
1. Essais en vol
2. Premiers résultats
3. Réponse aux attentes d'Airbus

## E. Conclusion et perspectives

# Principe de la photogrammétrie



# Principe de la photogrammétrie



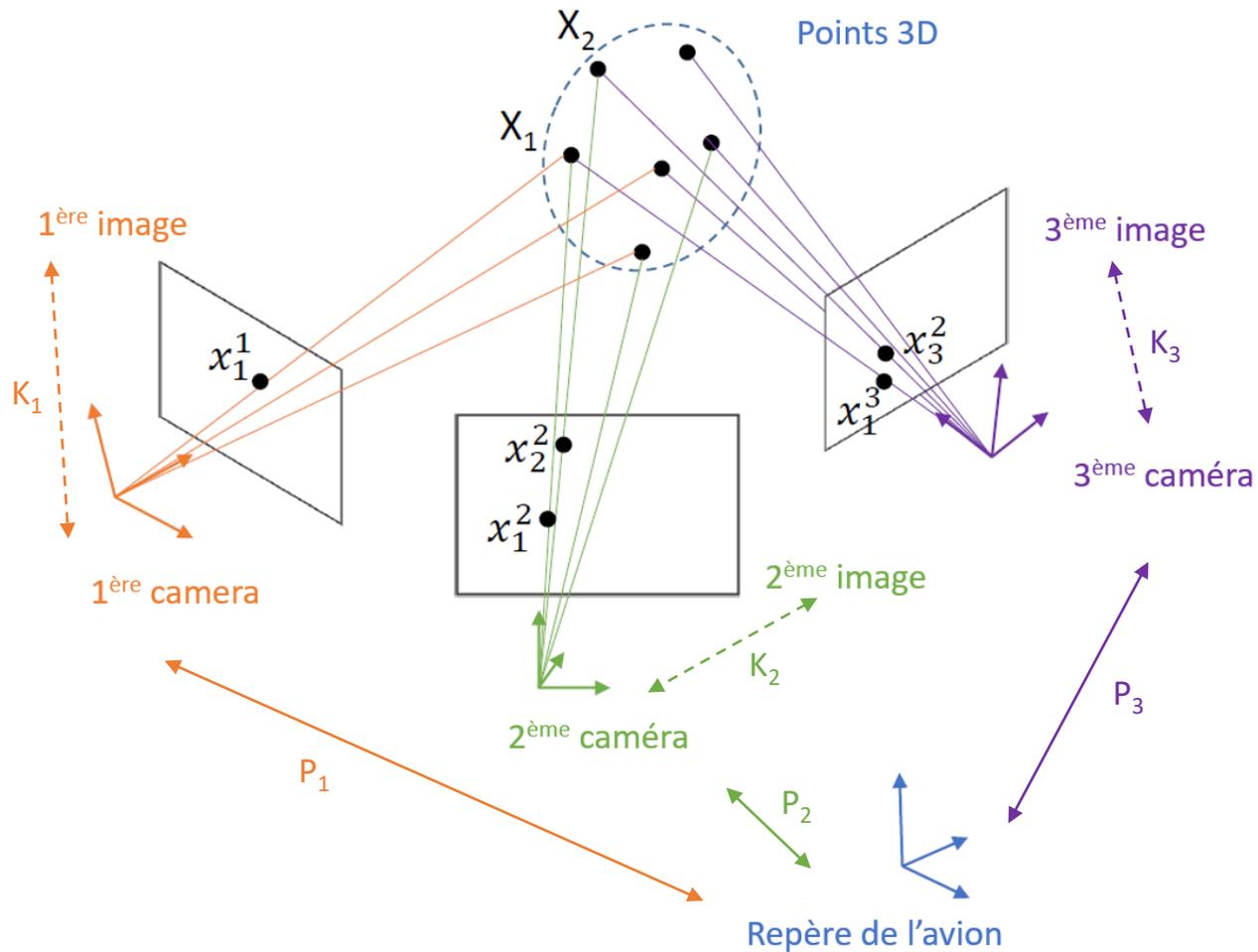
1 – Transfert des points du repère de l'avion vers ceux des caméras à l'aide de  $P_j \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ , modélisant les rotations et translations des caméras, représenté par le vecteur  $\alpha_j = (v^j, t_j)^T \in \mathbb{R}^6$

$$P_i = \begin{bmatrix} R_j^T & -R_j^T t_j \end{bmatrix}, \text{ avec } R_j \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

$$l_j^i = (a_j^i, b_j^i, c_j^i)^T = \begin{bmatrix} R_j^T & -R_j^T t_j \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X^i \\ 1 \end{pmatrix}$$

$i = 1 \dots$  nombre de points  
 $j = 1 \dots$  nombre de caméras

# Principe de la photogrammétrie



1 – Transfert des points du repère de l'avion vers ceux des caméras à l'aide de  $P_j \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ , modélisant les rotations et translations des caméras, représenté par le vecteur  $\alpha_j = (v^j, t_j)^T \in \mathbb{R}^6$

$$P_i = \begin{bmatrix} R_j^T & -R_j^T t_j \end{bmatrix}, \text{ avec } R_j \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

$$l_j^i = (a_j^i, b_j^i, c_j^i)^T = \begin{bmatrix} R_j^T & -R_j^T t_j \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X^i \\ 1 \end{pmatrix}$$

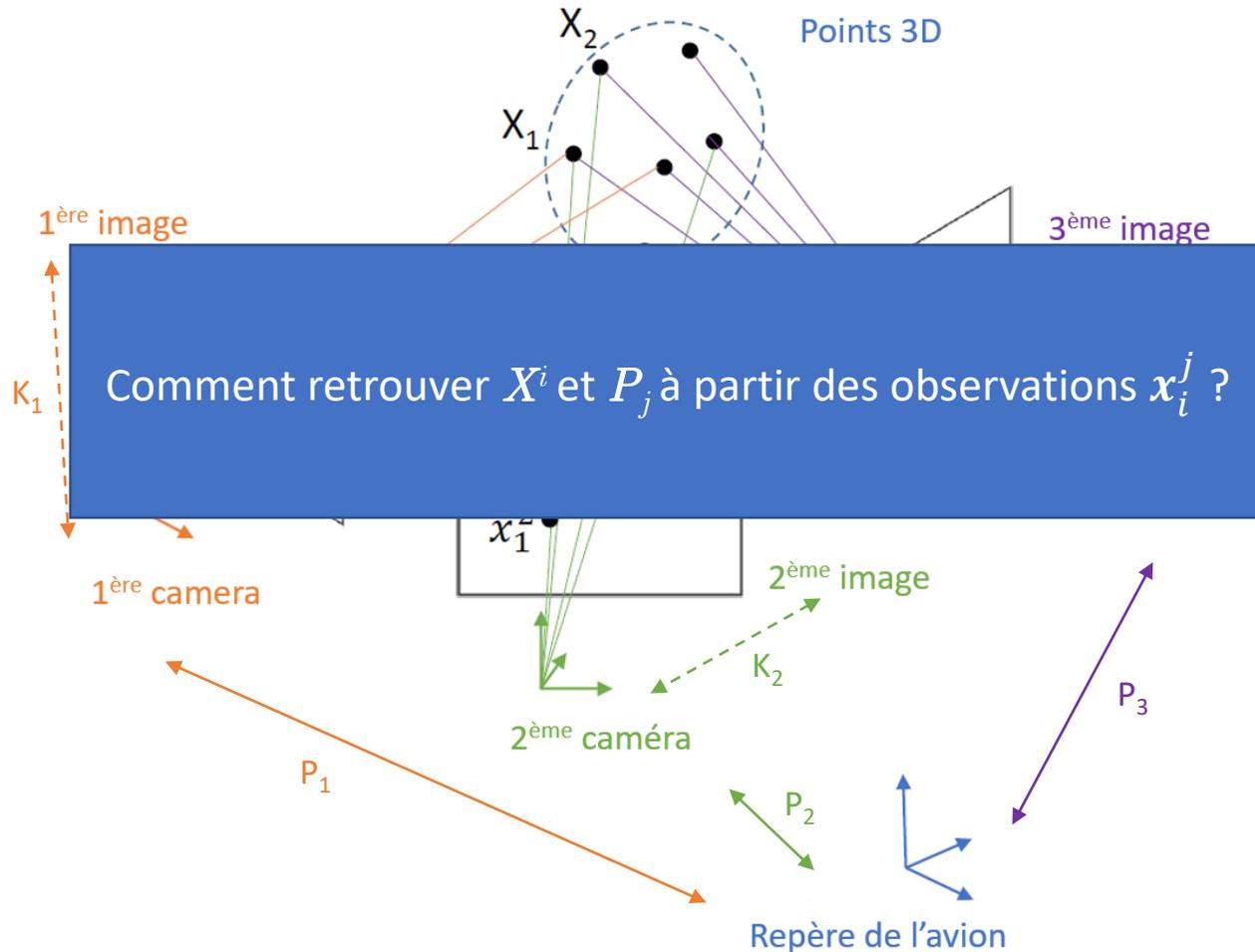
$i = 1 \dots$  nombre de points  
 $j = 1 \dots$  nombre de caméras

2 – La projection des points de la caméra vers les coordonnées de l'image se fait à l'aide de la matrice  $K_j$ , qui contient les paramètres intrinsèques de la caméra (focale, centre du capteur, taille des pixels).

Conséquence :

$$\hat{x}(\alpha_j, X^i) = \frac{1}{c_j^i} K_j l_j^i,$$

# Principe de la photogrammétrie



1 – Transfert des points du repère de l'avion vers ceux des caméras à l'aide de  $P_j \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$ , modélisant les rotations et translations des caméras, représenté par le vecteur  $\alpha_j = (v^j, t_j)^T \in \mathbb{R}^6$

$$P_j = \begin{bmatrix} R_j^T & -R_j^T t_j \end{bmatrix}, \text{ avec } R_j \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

$$l_j^i = (a_j^i, b_j^i, c_j^i)^T = \begin{bmatrix} R_j^T & -R_j^T t_j \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X^i \\ 1 \end{pmatrix}$$

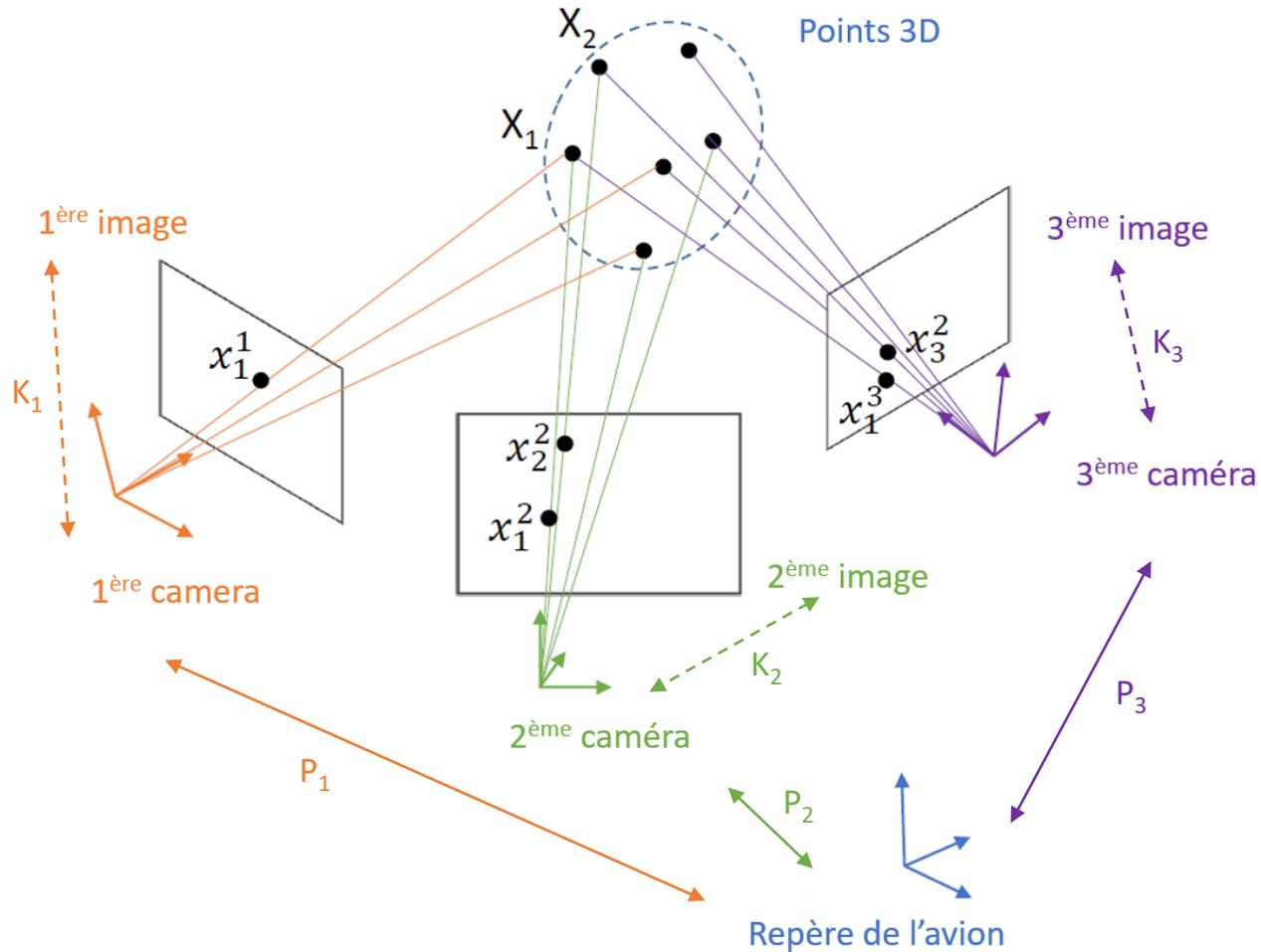
$i = 1 \dots$  nombre de points

$j = 1 \dots$  nombre de caméras

2 – La projection des points de la caméra vers les coordonnées de l'image se fait à l'aide de la matrice  $K_j$ , qui contient les paramètres intrinsèques de la caméra (focale, centre du capteur, taille des pixels).

Conséquence : 
$$\hat{x}(\alpha_j, X^i) = \frac{1}{c_j^i} K_j l_j^i,$$

# Principe de la photogrammétrie

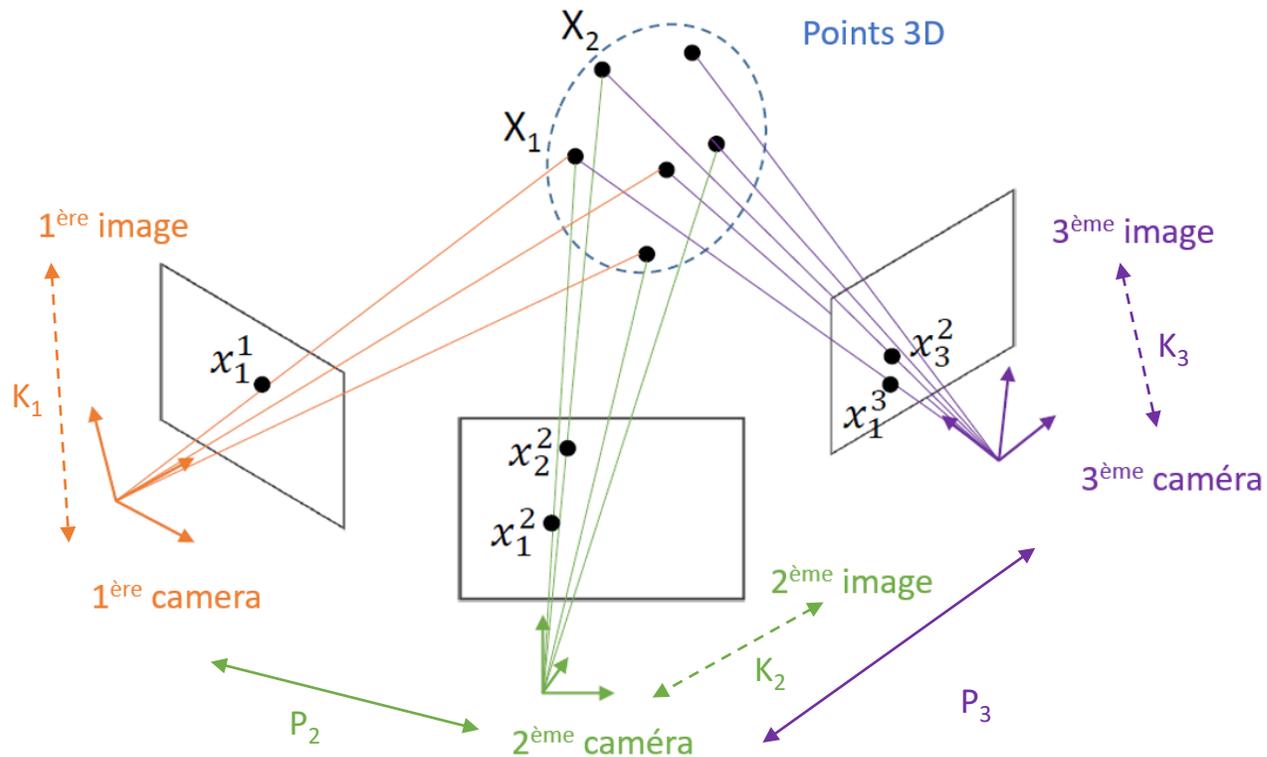


Plusieurs possibilités de résolution :

1 – considérer  $P_j$  connue

2 – ajouter des contraintes aux  $X_i$  (ex: solides rigides)

# Principe de la photogrammétrie



Plusieurs possibilités de résolution :

1 – considérer  $P_j$  connue

2 – ajouter des contraintes aux  $X_i$  (ex: solides rigides)

3 – Méthode générique :

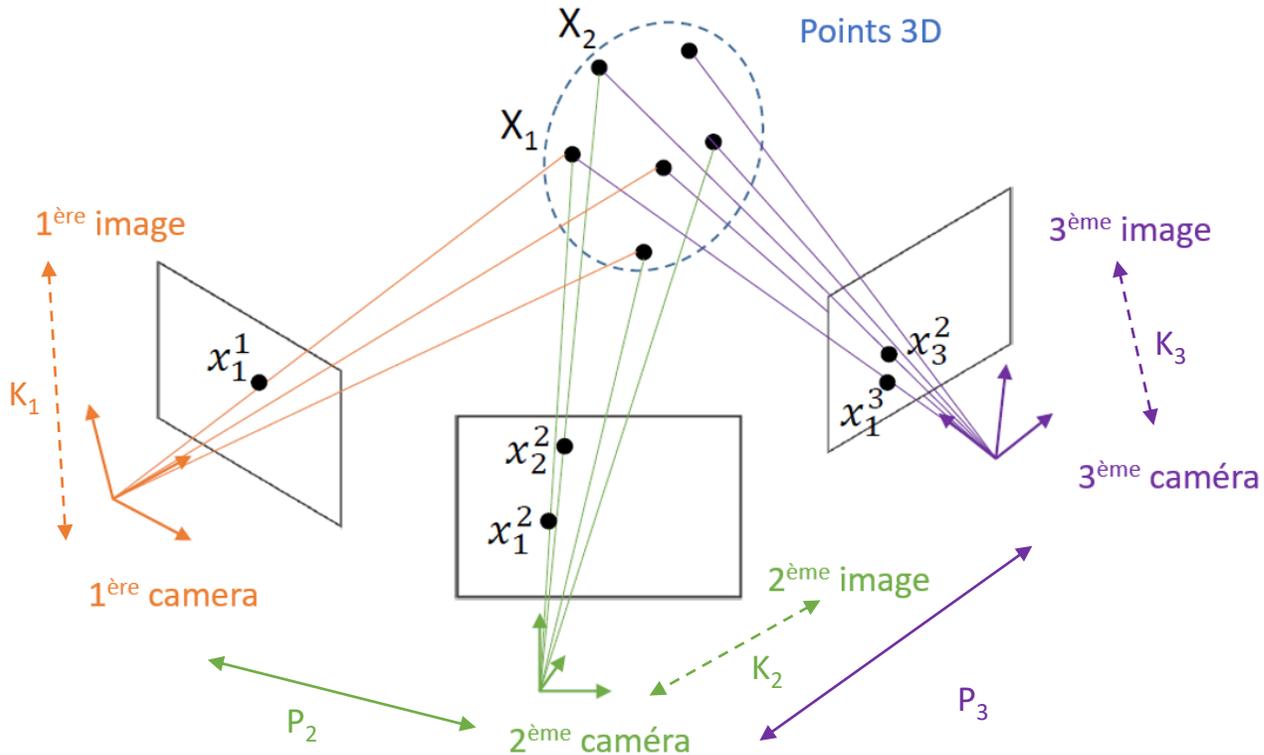
a. Travailler dans le repère d'une des caméras

b. Trouver  $P_j$  et  $X_i$  qui minimisent l'erreur de reprojection, c'est à dire la distance entre la projection du point estimé  $\hat{x}_i^j$  et son observation  $x_i^j$  sur l'image :

$$\arg \min_{\alpha_j, X^i} \sum_{i,j} [x_j^i - \hat{x}(\alpha_j, X^i)]^2$$

➡ Ajustement de faisceaux

# Principe de la photogrammétrie



Plusieurs possibilités de résolution :

1 – considérer  $P_j$  connue

2 – ajouter des contraintes aux  $X_i$  (ex: solides rigides)

3 – Méthode générique :

a. Travailler dans le repère d'une des caméras

b. Trouver  $P_j$  et  $X_i$  qui minimisent l'erreur de reprojection, c'est à dire la distance entre la projection du point estimé  $\hat{x}_i^j$  et son observation  $x_i^j$  sur l'image :

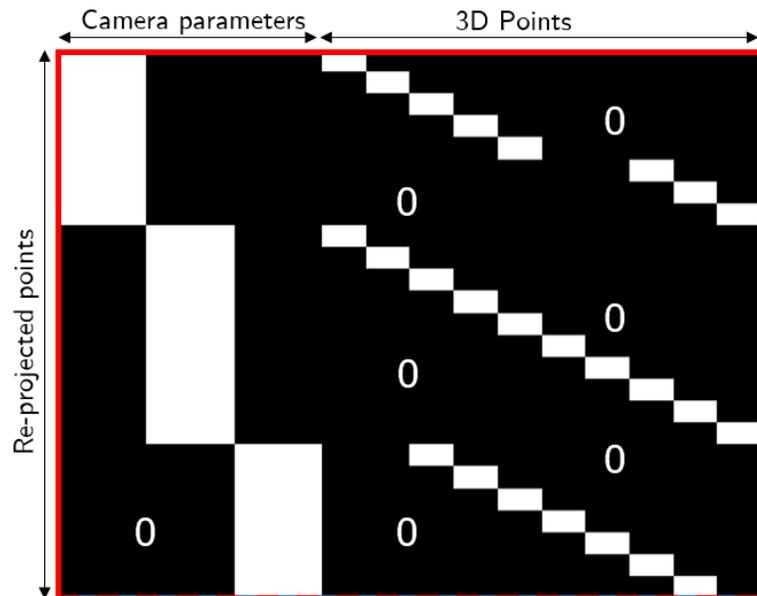
$$\arg \min_{\alpha_j, X^i} \sum_{i,j} [x_i^j - \hat{x}_i^j(\alpha_j, X^i)]^2$$

➡ Ajustement de faisceaux

Résolu en utilisant des méthodes itératives telles que Gauss-Newton ou Levenberg Marquardt.

# Principe de la photogrammétrie

Matrice Jacobienne :



$$\frac{\partial(x_j^p - \hat{x}(\alpha_j, \mathbf{X}^p))^2}{\partial \mathbf{X}^q} = 0, \forall p \neq q, \forall j \in \{1, \dots, M\}$$

$$\frac{\partial(x_p^i - \hat{x}(\alpha_p, \mathbf{X}^i))^2}{\partial \alpha_q} = 0, \forall p \neq q, \forall i \in \{1, \dots, N\}.$$

Plusieurs possibilités de résolution :

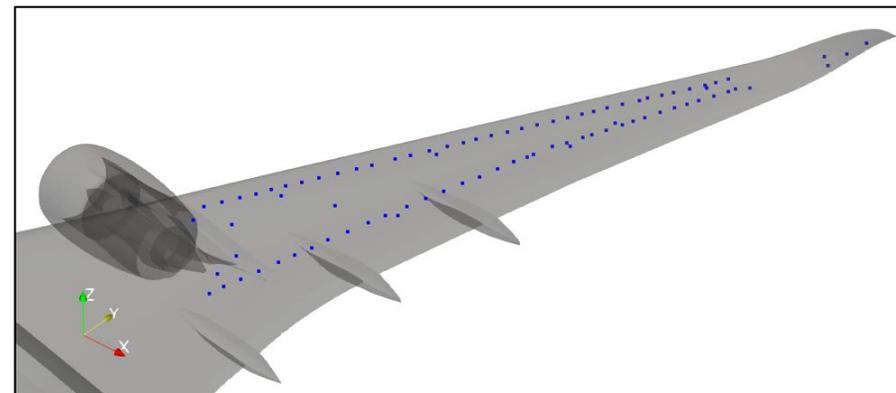
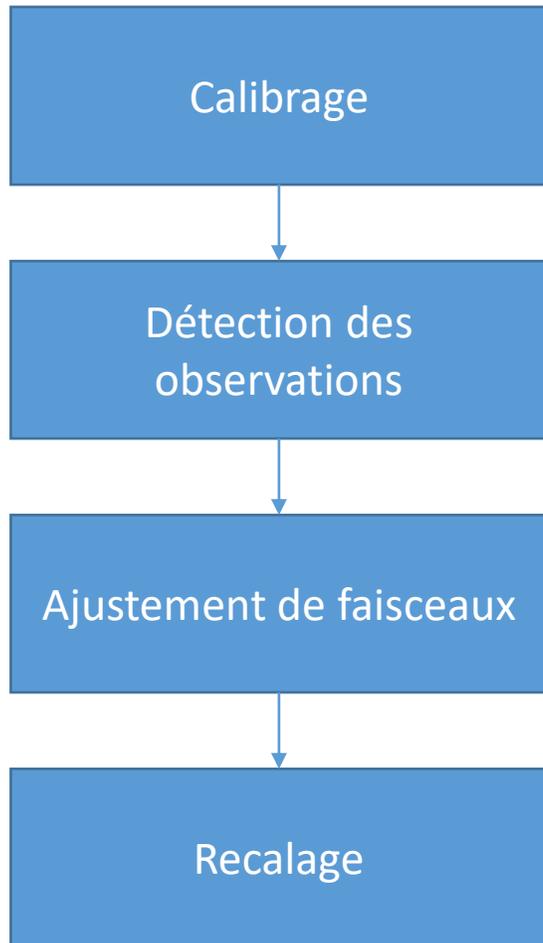
- 1 – considérer  $P_j$  connue
- 2 – ajouter des contraintes aux  $X_i$  (ex: solides rigides)
- 3 – Méthode générique :
  - a. Travailler dans le repère d'une des caméras
  - b. Trouver  $P_j$  et  $X_i$  qui minimisent l'erreur de reprojection, c'est à dire la distance entre la projection du point estimé  $\hat{x}_i^j$  et son observation  $x_i^j$  sur l'image :

$$\arg \min_{\alpha_j, \mathbf{X}^i} \sum_{i,j} [x_j^i - \hat{x}(\alpha_j, \mathbf{X}^i)]^2$$

➔ Ajustement de faisceaux

Résolu en utilisant des méthodes itératives telles que Gauss-Newton ou Levenberg Marquardt.

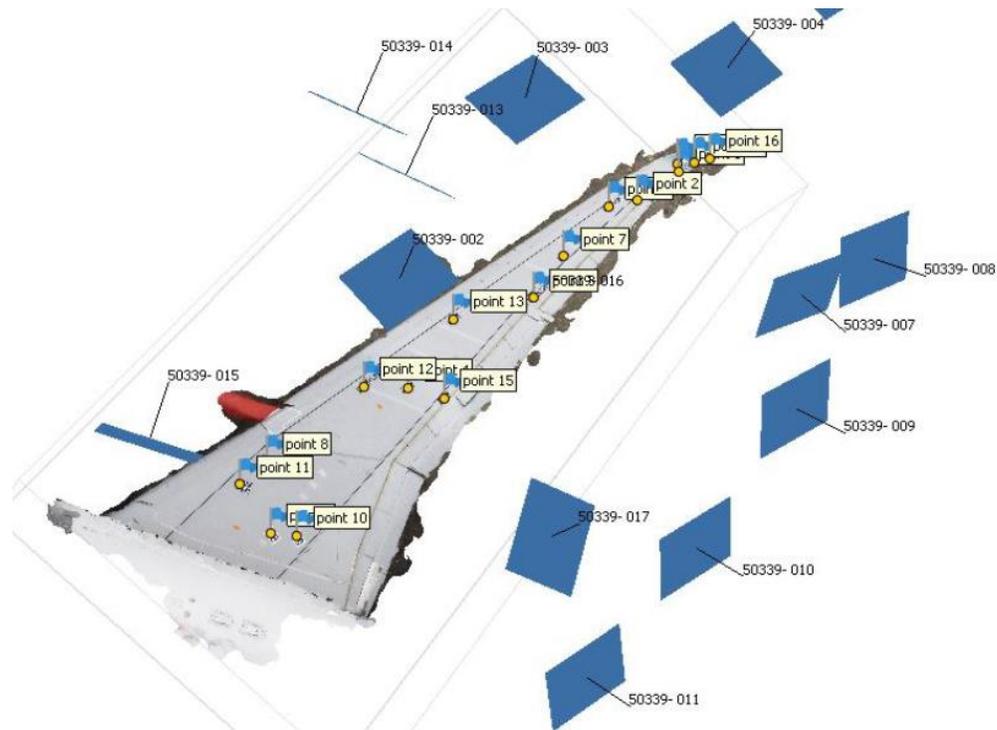
# Méthodologie



# Méthodologie

Calibrage

Scan par drone – initialisation des positions 3D



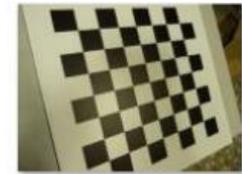
Calibrage des cameras – calcul des paramètres intrinsèques  $K_j$



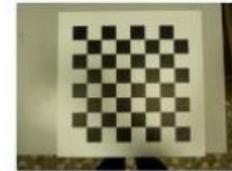
c2.JPG



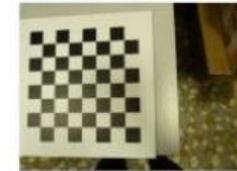
c3.JPG



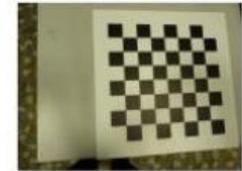
c4.JPG



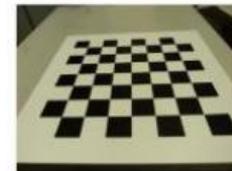
c5.JPG



c6.JPG



c7.JPG



c8.JPG



c9.JPG



c10.JPG



c11.JPG

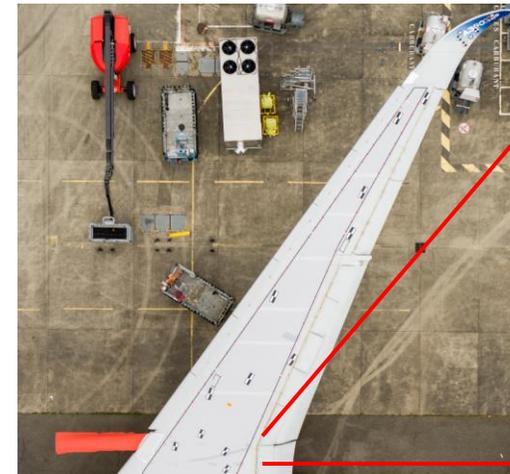
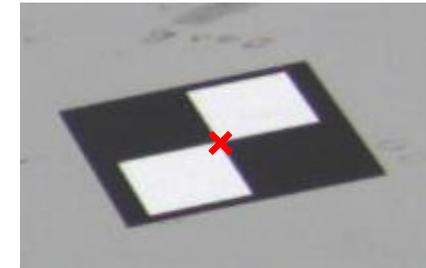
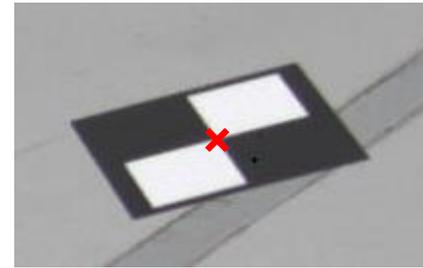
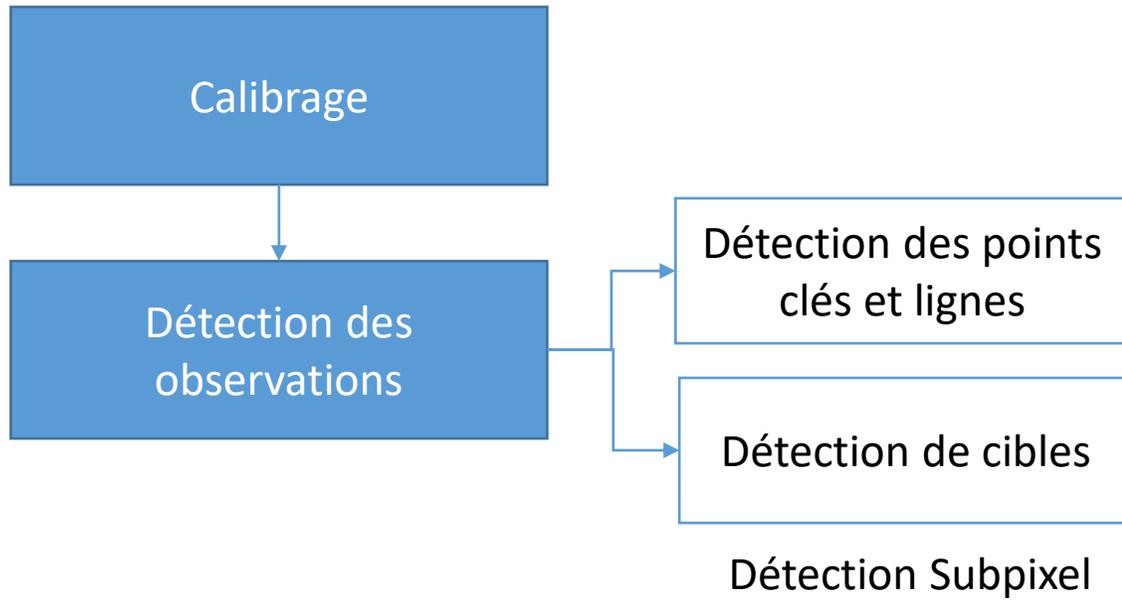


c12.JPG

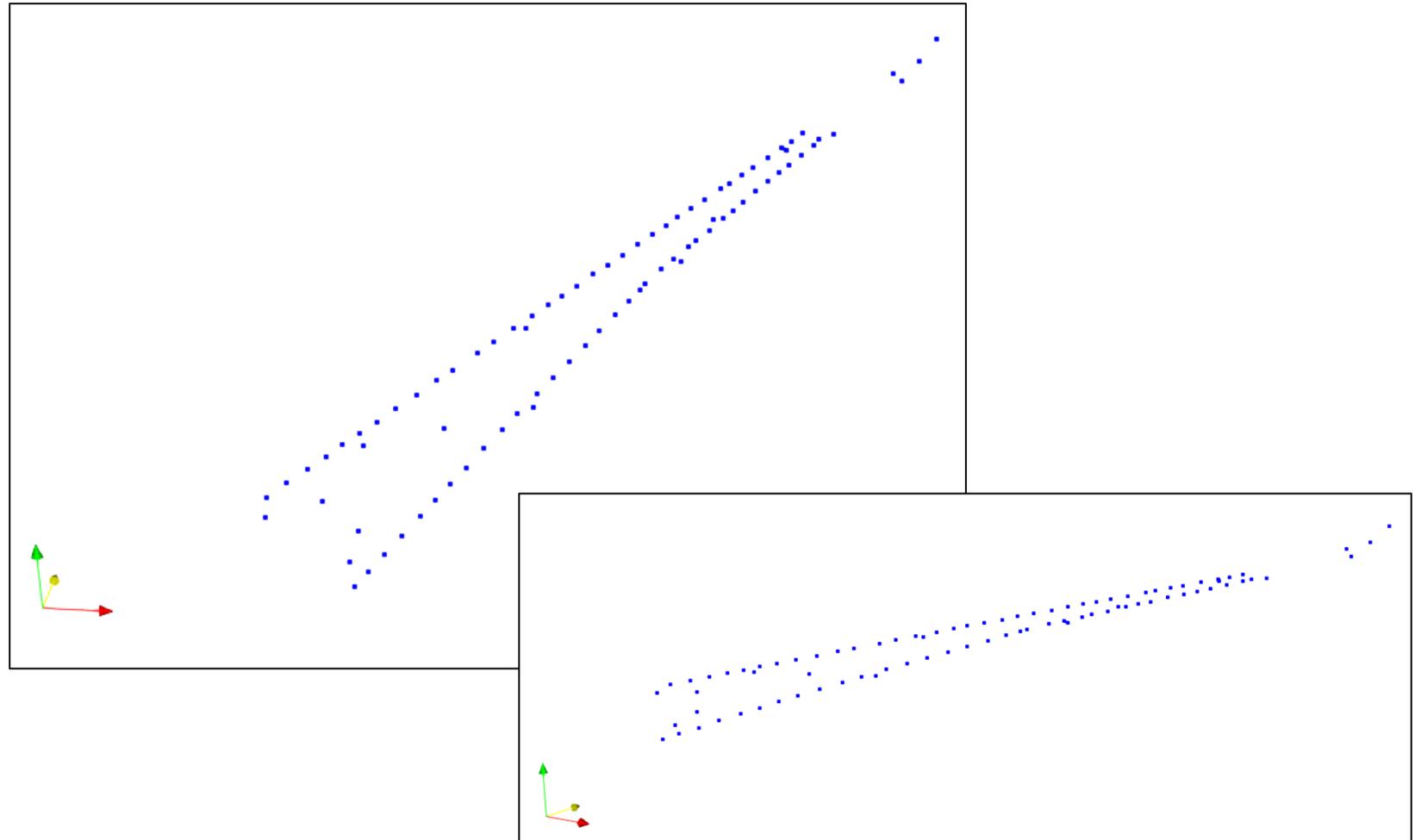
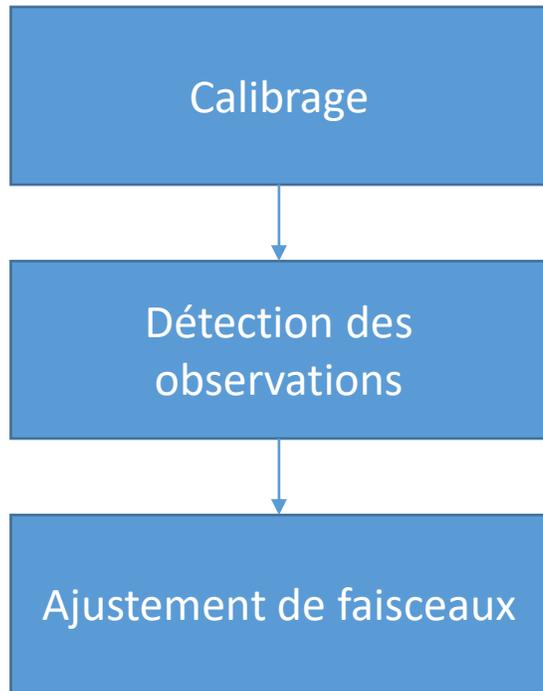


c13.JPG

# Méthodologie



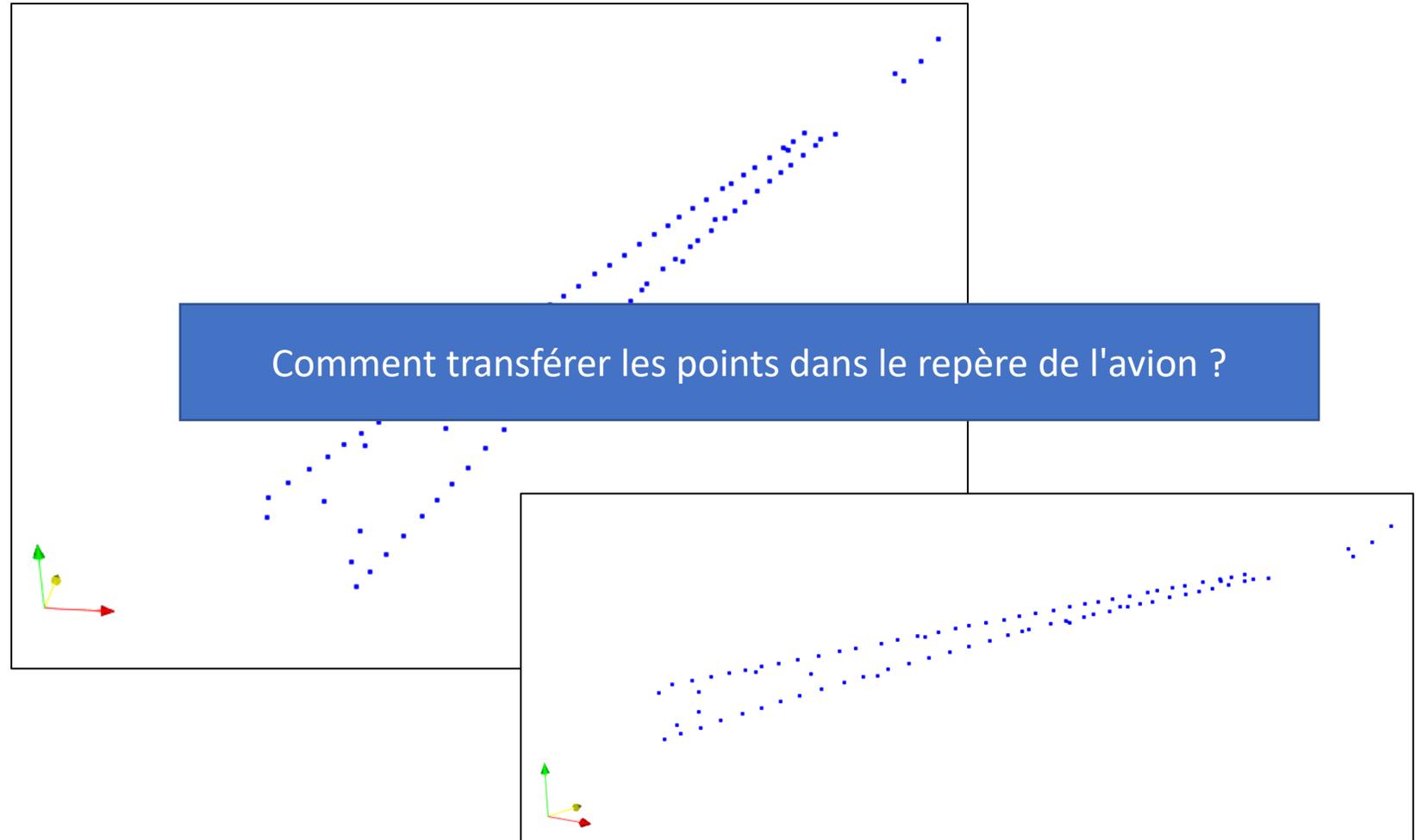
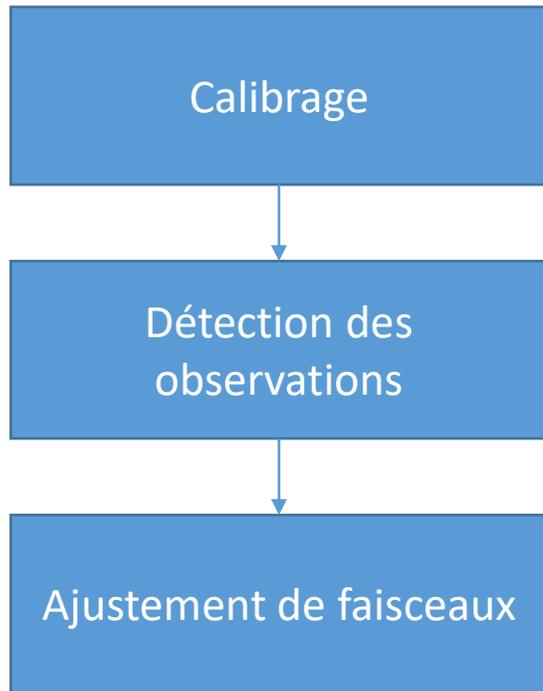
# Méthodologie



$$\arg \min_{\alpha_j, \mathbf{X}^i} \sum_{i,j} [\mathbf{x}_j^i - \hat{\mathbf{x}}(\alpha_j, \mathbf{X}^i)]^2$$

Résultat de l'ajustement de faisceaux

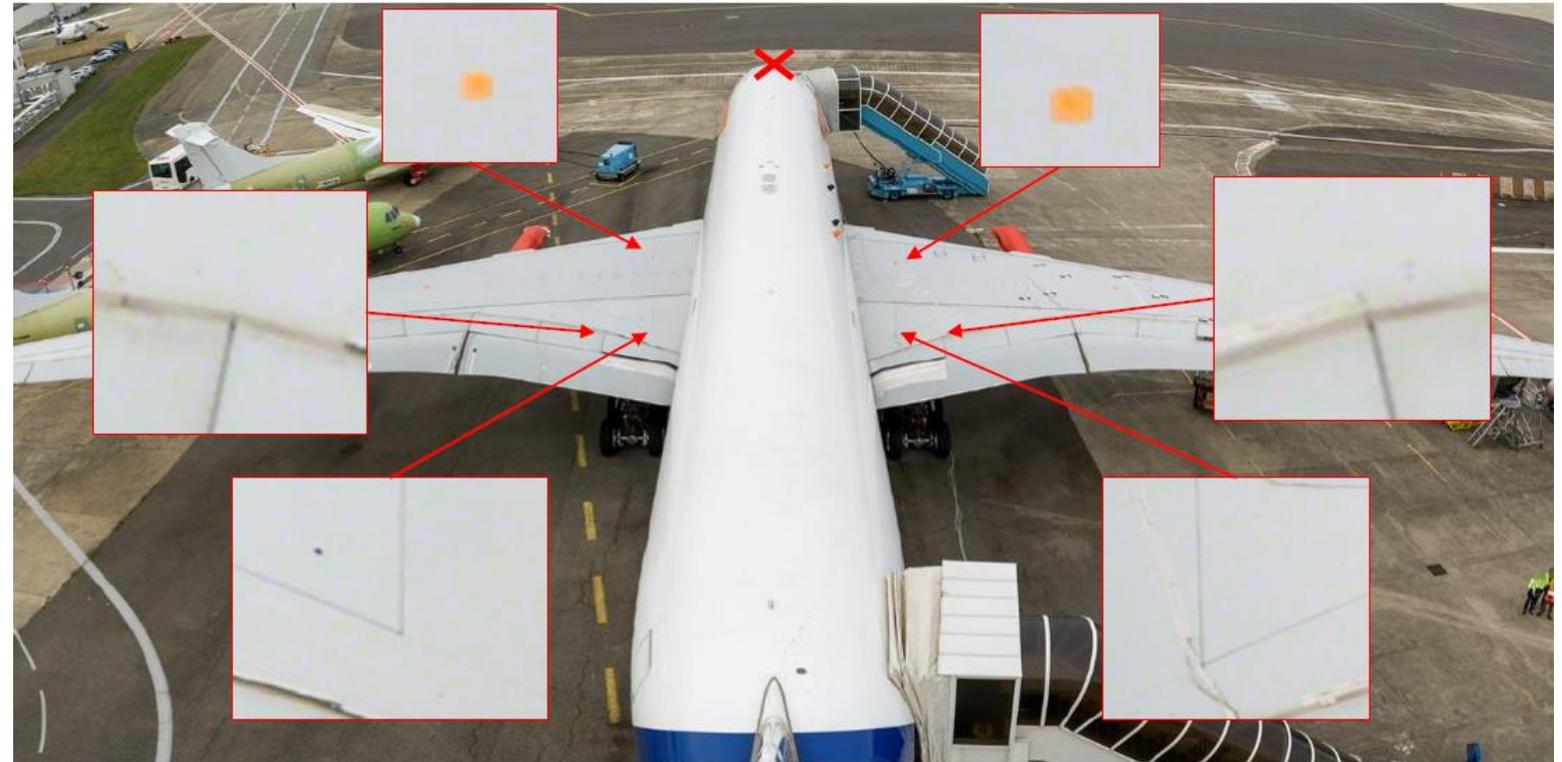
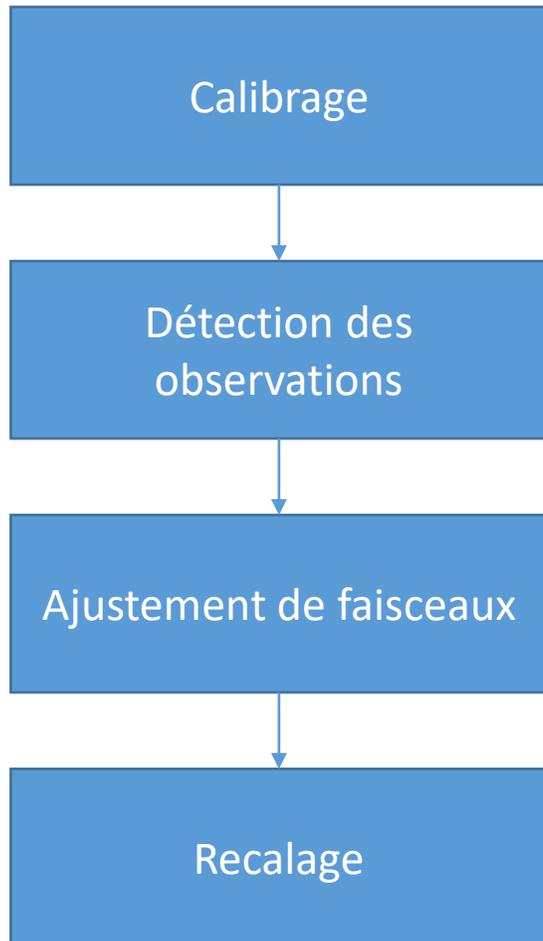
# Méthodologie



$$\arg \min_{\alpha_j, \mathbf{X}^i} \sum_{i,j} [\mathbf{x}_j^i - \hat{\mathbf{x}}(\alpha_j, \mathbf{X}^i)]^2$$

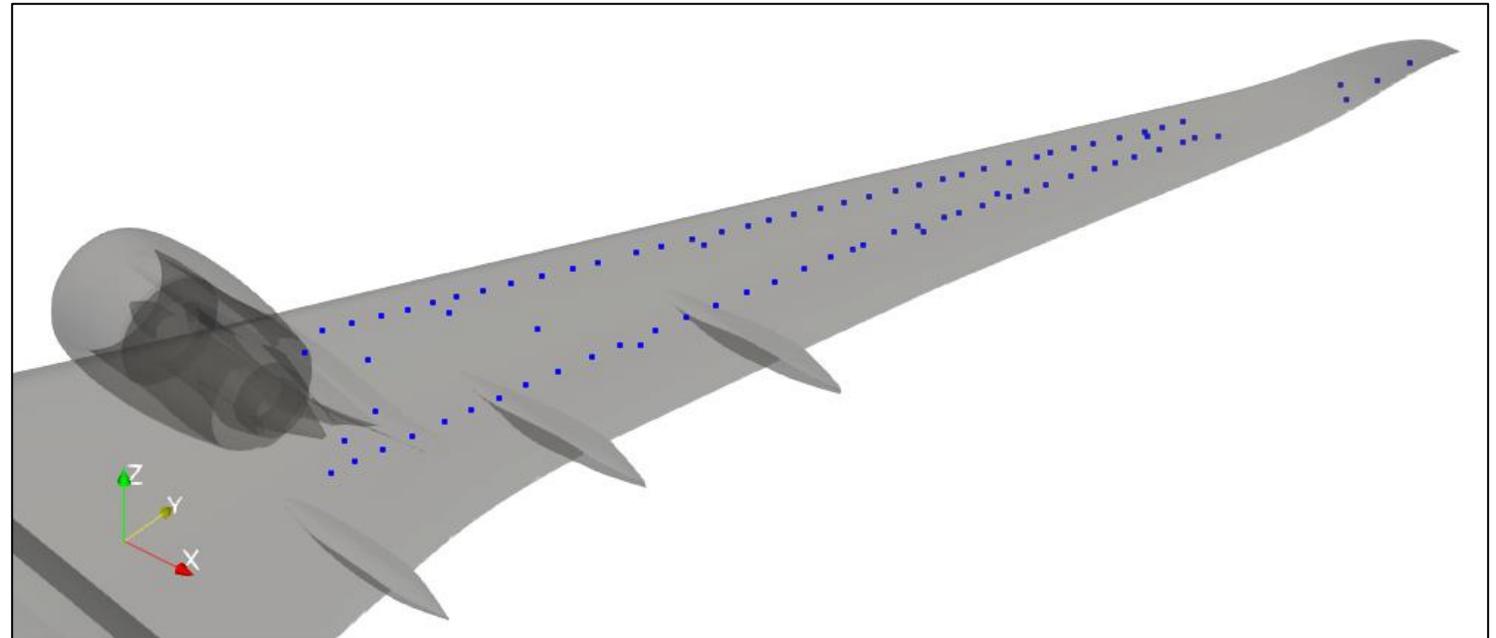
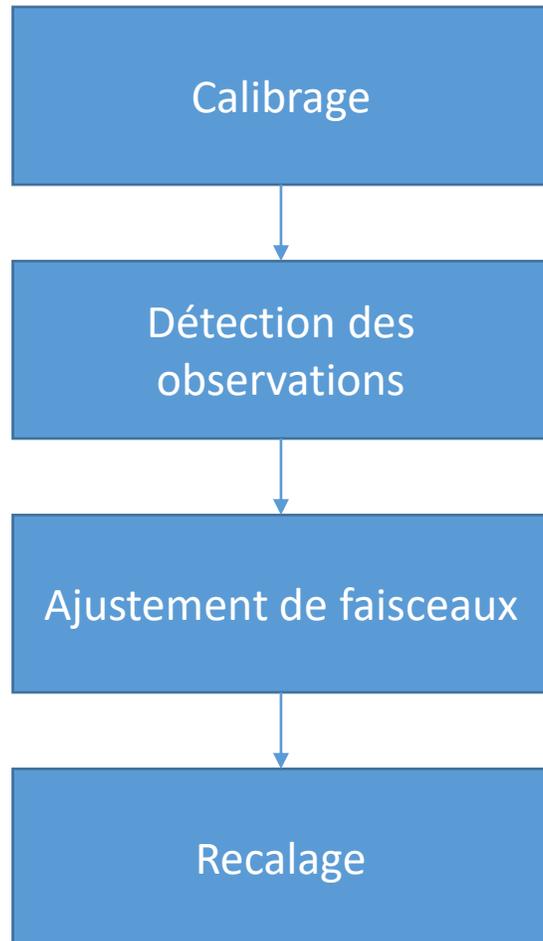
Résultat de l'ajustement de faisceaux

# Méthodologie



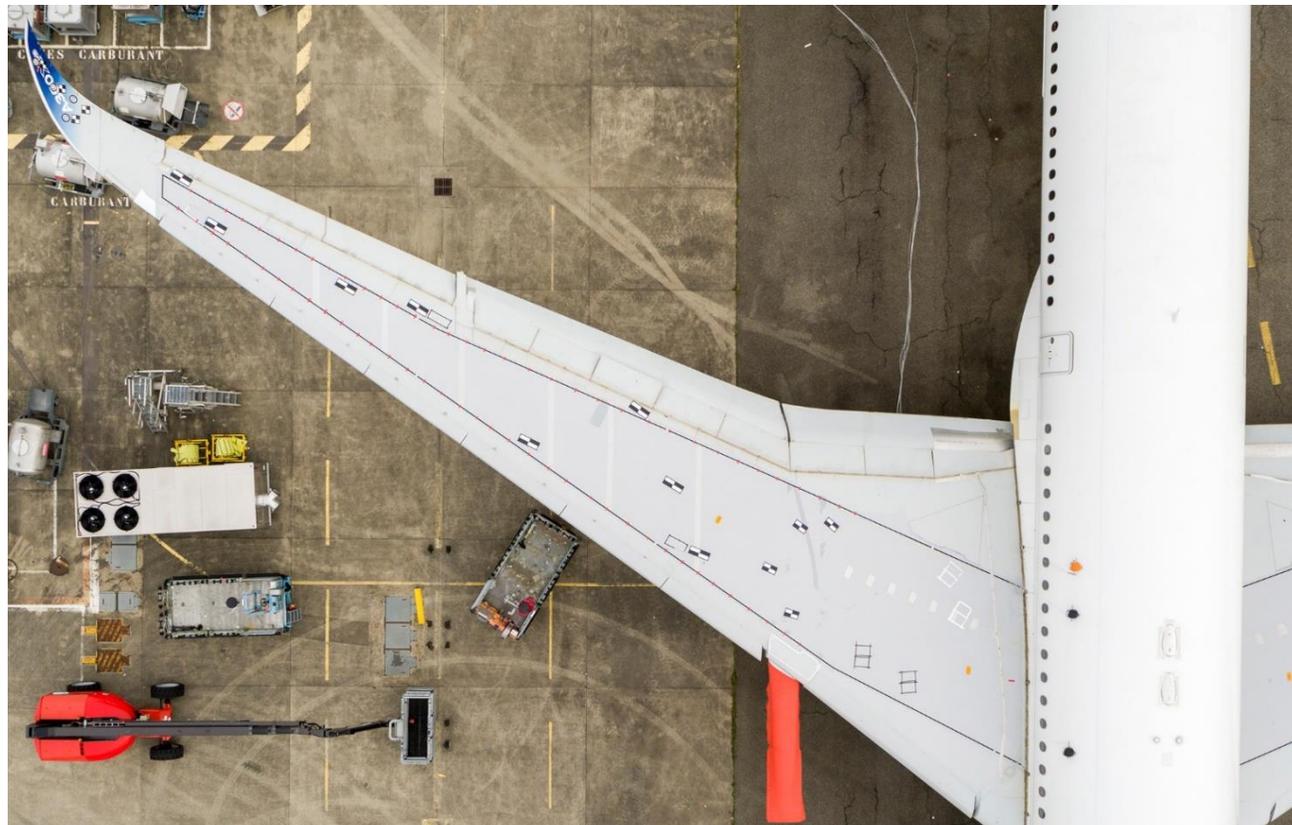
Utilisation de la vue de la caméra arrière et des points de référence proches du fuselage pour le recalage

# Méthodologie



Résultat du recalage

# Expérimentations



Installation au sol sur A350-900

# Expérimentations

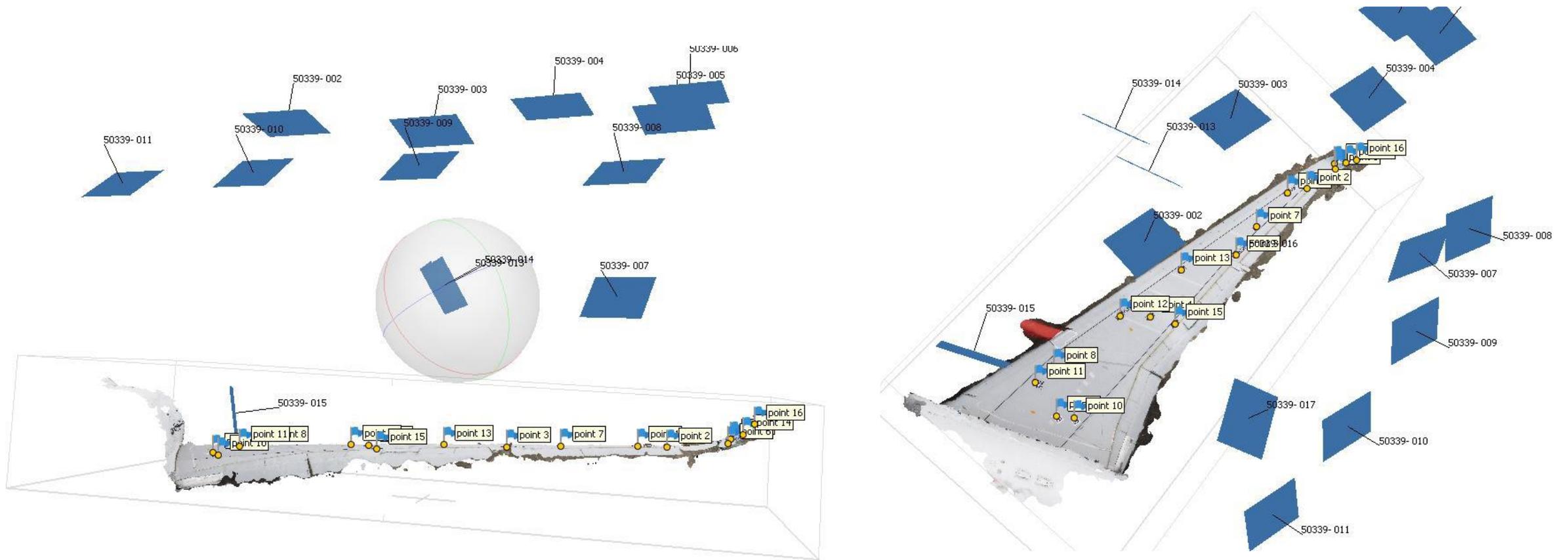


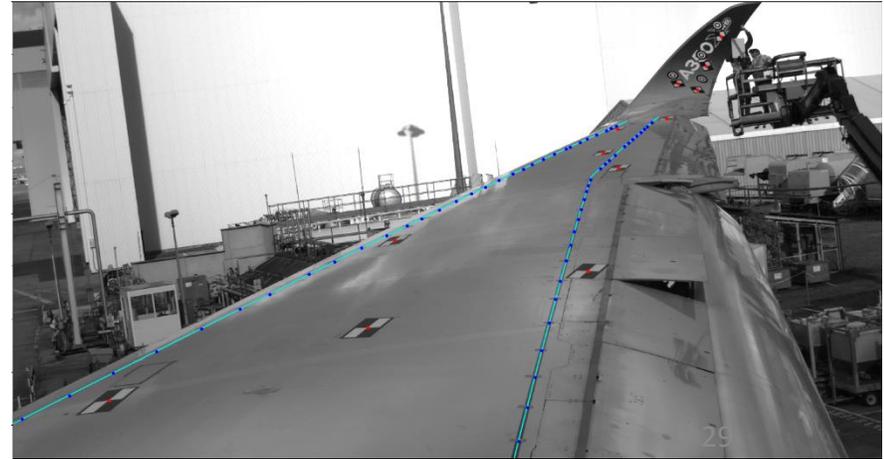
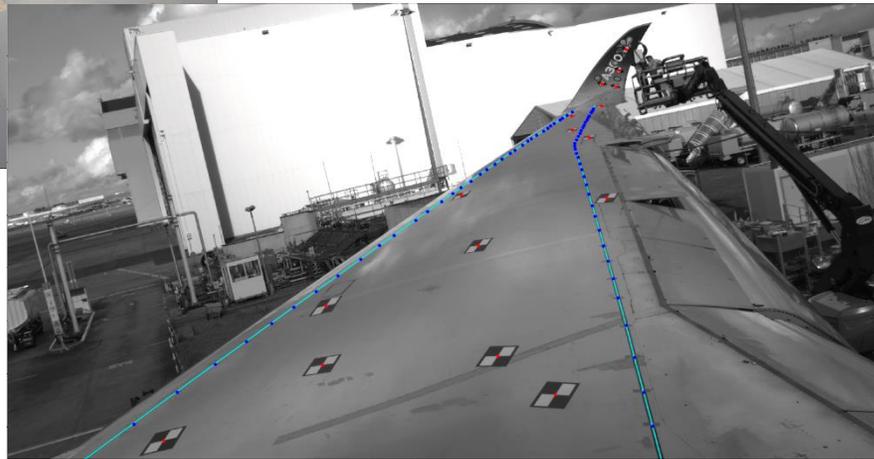
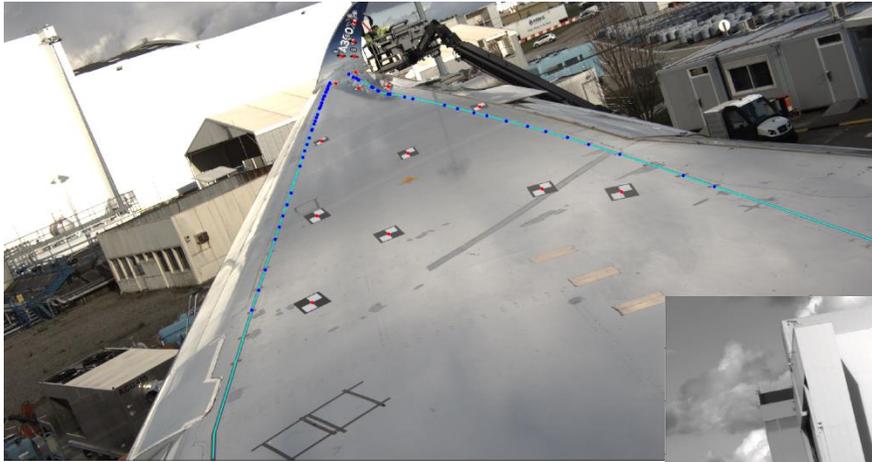
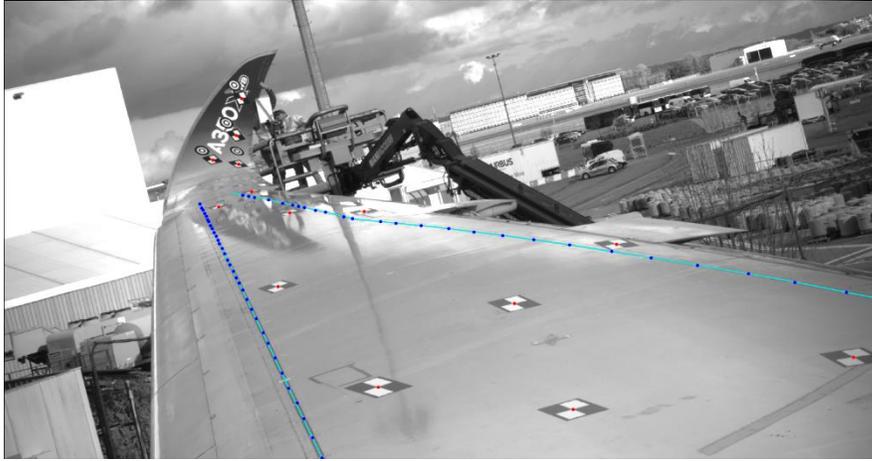
Installation au sol sur A350-900

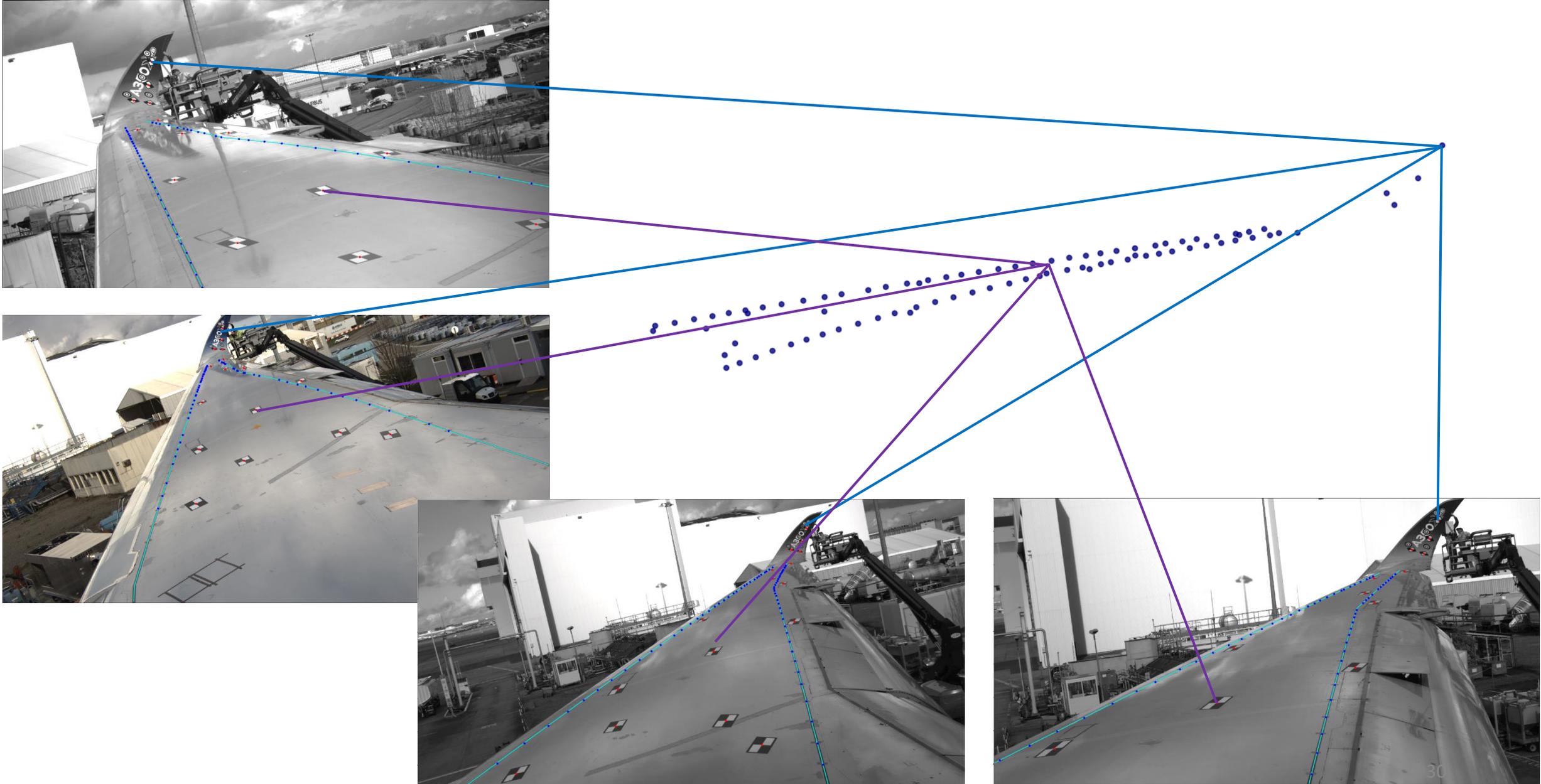
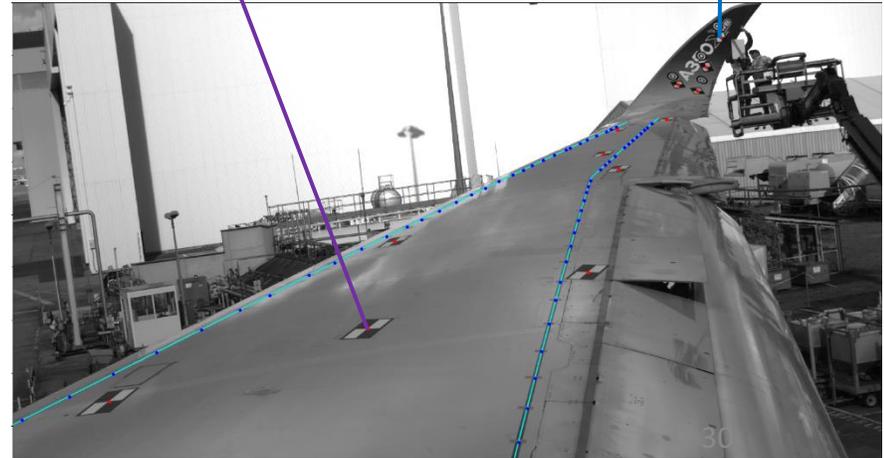
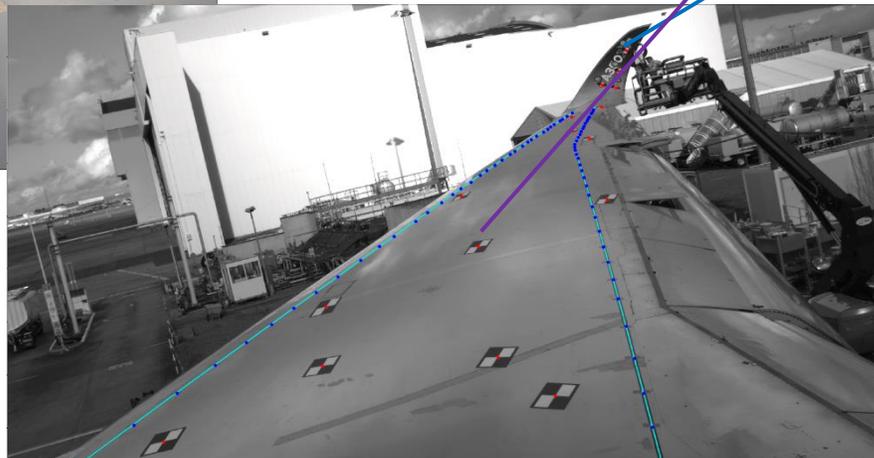
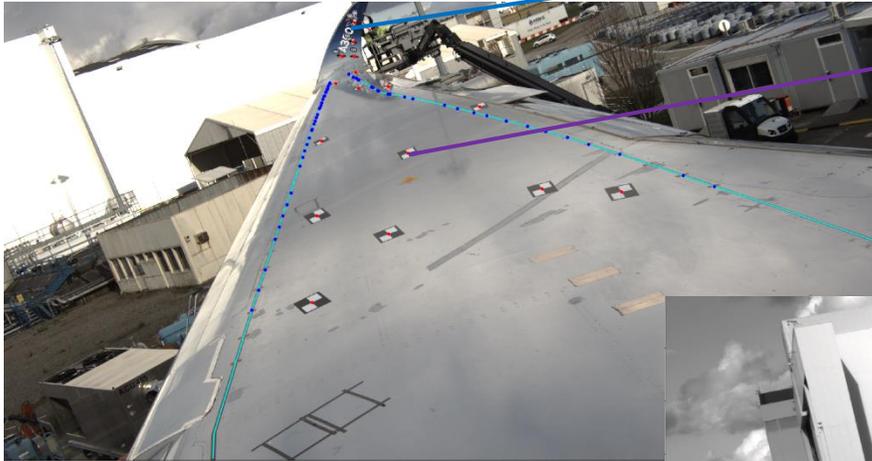
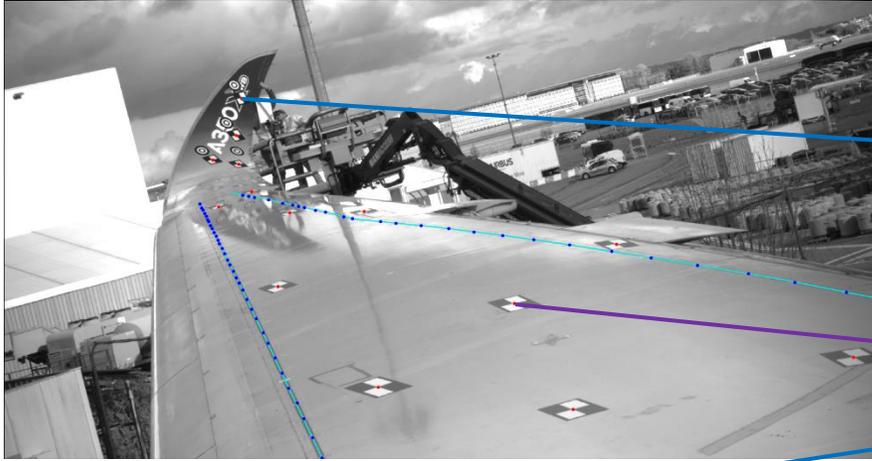


# Expérimentations

Scan par photogrammétrie à l'aide de vues de drones et du logiciel Metashape





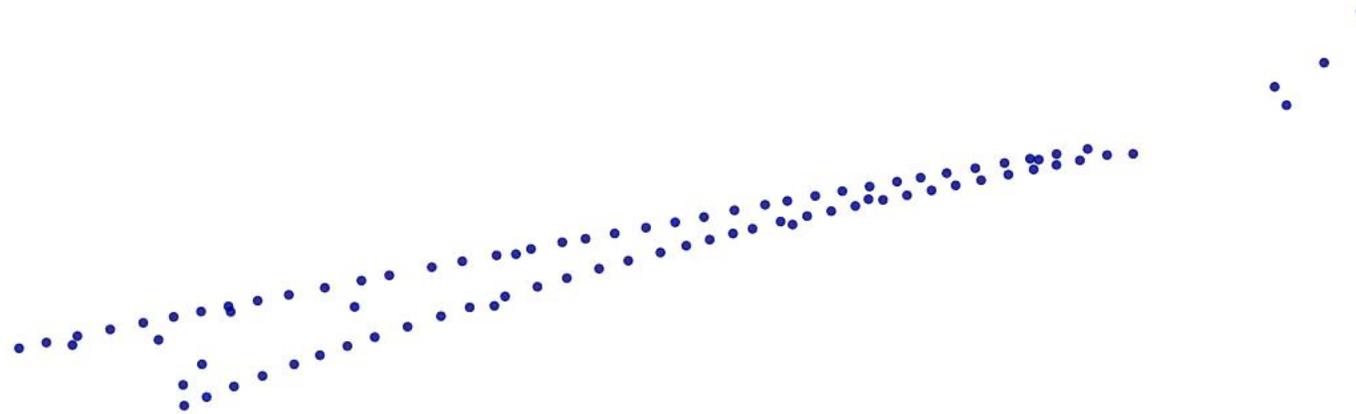


# Expérimentations



# Méthodologie

## Résultats



Résultat de la reconstruction avec amplification du mouvement

# Méthodologie

➡ Mauvais résultats

Configuration des caméras et cibles non adéquates

Jusqu'à présent :

- Pas de contraintes sur les points
- Pas de contraintes sur les caméras

Axe d'amélioration par l'ajout de contraintes :

- Utilisation de modèle de déformation **interdit**

Ref :

-M. Lhuillier. "Incremental Fusion of Structure-from-Motion and GPS Using Constrained Bundle Adjustments," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, Vol. 34, no. 12, 2012.

- G. Briskin, A. Geva, E. Rivlin, and H. Rotstein. "Estimating Pose and Motion Using Bundle Adjustment and Digital Elevation Model Constraints," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 53, no. 4, 2017.

# Méthodologie

➔ Mauvais résultats

Configuration des caméras et cibles non adéquates

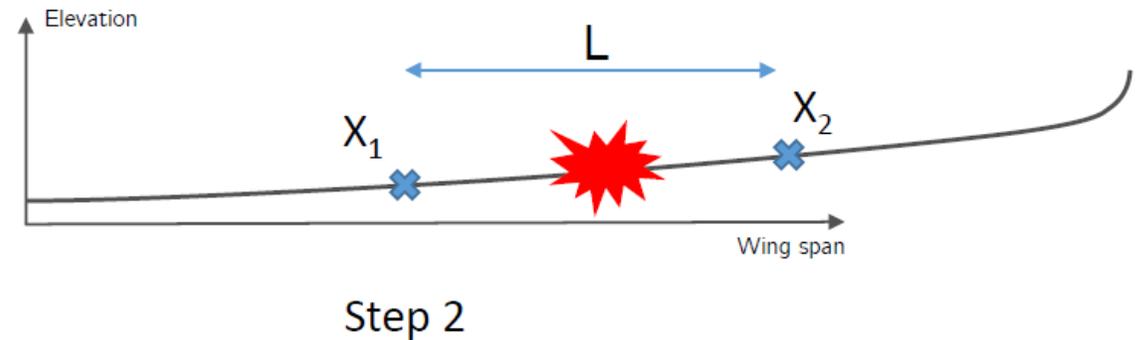
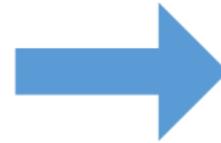
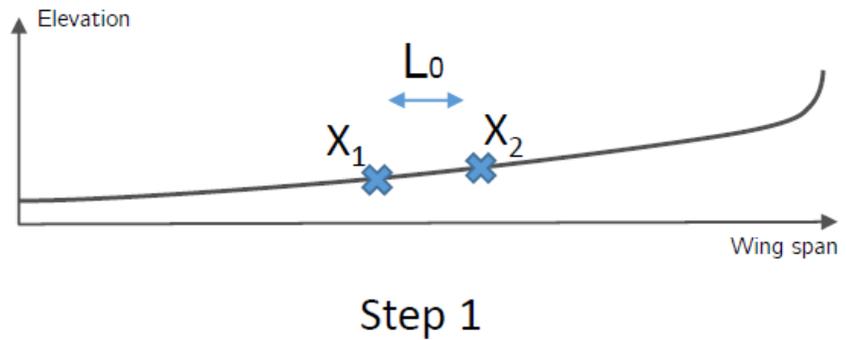
Proposition de contraintes de limites mécaniques

Ref :

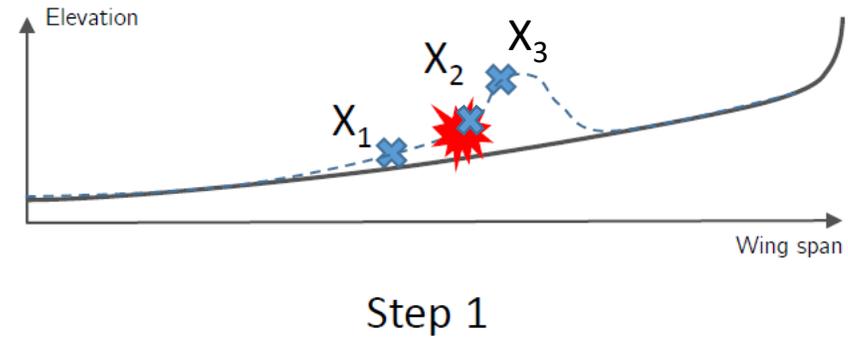
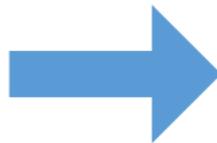
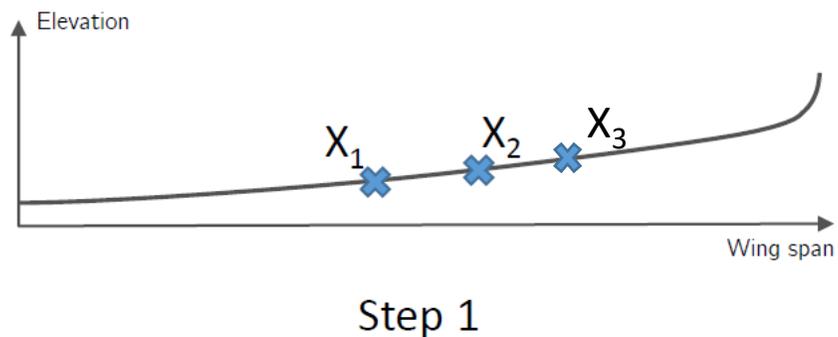
- Q. Demoulin, F. Lefebvre-Albaret, A. Basarab, D. Kouamé and J.-Y. Tournéret. “A New Flexible Photogrammetry Instrumentation for Estimating Wing Deformation in Airbus.” In *Proc. European Test and Telemetry Conference (ETTC)*. Nuremberg, Germany, 2020.
- Q. Demoulin, F. Lefebvre-Albaret, A. Basarab, D. Kouamé and J.-Y. Tournéret. “Constrained Bundle Adjustment Applied To Wing 3D Reconstruction With Mechanical Limitations.” In *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2020.
- Q. Demoulin, F. Lefebvre-Albaret, A. Basarab, D. Kouamé and J.-Y. Tournéret. “Wing 3D Reconstruction by Constraining the Bundle Adjustment with Mechanical Limitations.” In *Proc. 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*. Amsterdam, Netherlands, 2020.

# Ajustement de faisceaux contraint

## Contrainte d'élongation



## Contrainte de flexion locale



# Ajustement de faisceaux contraint

## Définition des contraintes

i. Limites de volume : chaque point a un volume maximal

i. Limites de flexion :  $\forall i, \exists (b_{\min}^i, b_{\max}^i)$  tel que la flexion  $\frac{\partial^2 z^i}{\partial y^2}$  appartienne à  $[b_{\min}^i, b_{\max}^i]$ ,

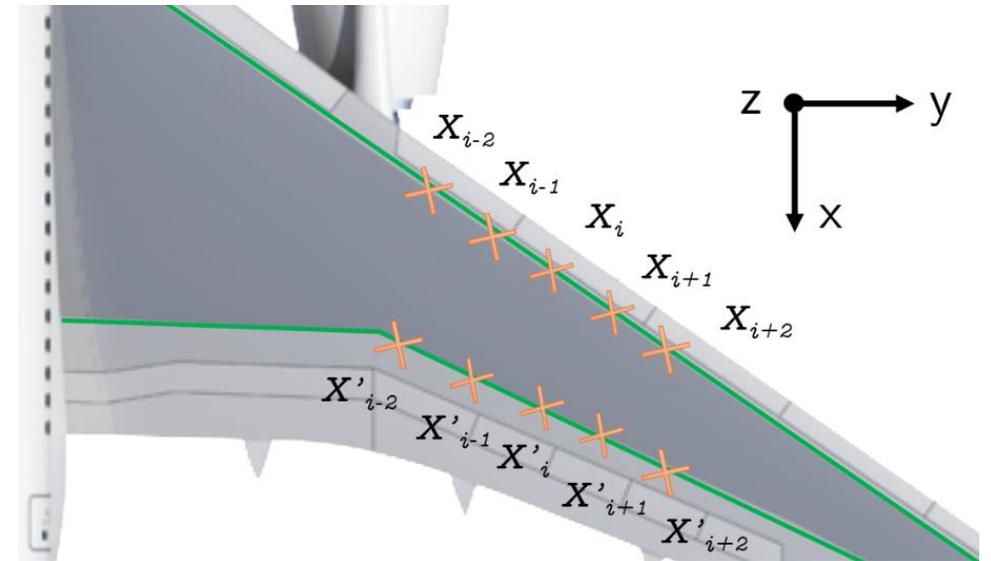


Illustration des points sur l'aile de l'avion

ii. Torsion, élongation, ...

# Ajustement de faisceaux contraint

## Définition des contraintes

- i. Limites de volume : chaque point a un volume maximal

$$g_0(\alpha_r, \mathbf{X}^i) = (r_x^i - x^i) < 0,$$

$$g_1(\alpha_r, \mathbf{X}^i) = (x^i - r_x^i - r_w^i) < 0,$$

- i. Limites de flexion :  $\forall i, \exists (b_{\min}^i, b_{\max}^i)$  tel que la flexion  $\frac{\partial^2 z^i}{\partial y^2}$  appartienne à  $[b_{\min}^i, b_{\max}^i]$ ,

$$g_4(\mathbf{X}^i) = \frac{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}}{(y_{i+1} - y_i)^2} - b_{\max}^i < 0,$$

$$g_5(\mathbf{X}^i) = b_{\min}^i - \frac{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}}{(y_{i+1} - y_i)^2} < 0.$$

- ii. Torsion, élongation, ...

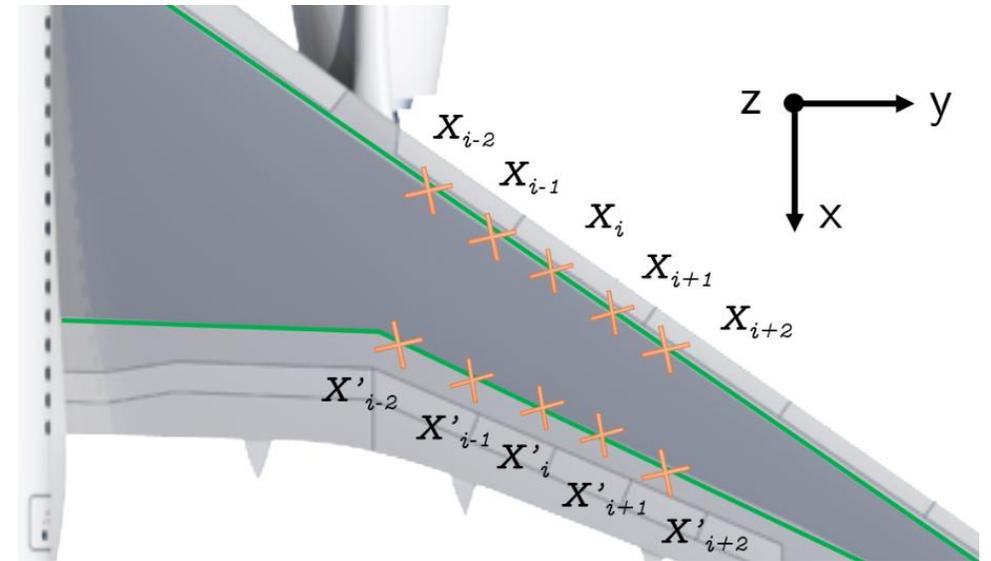
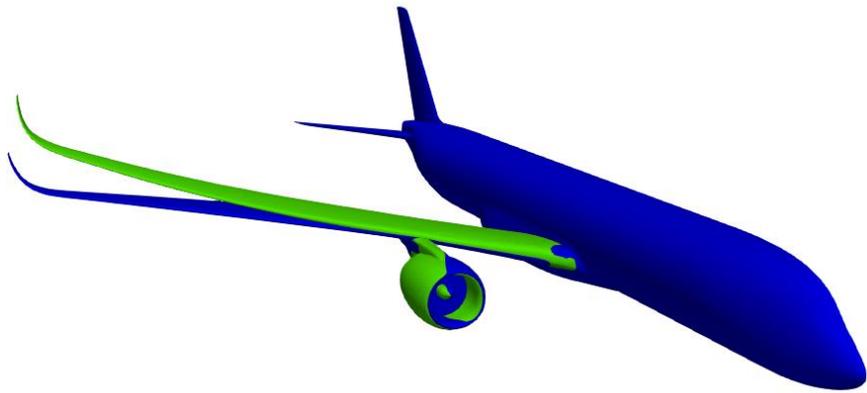


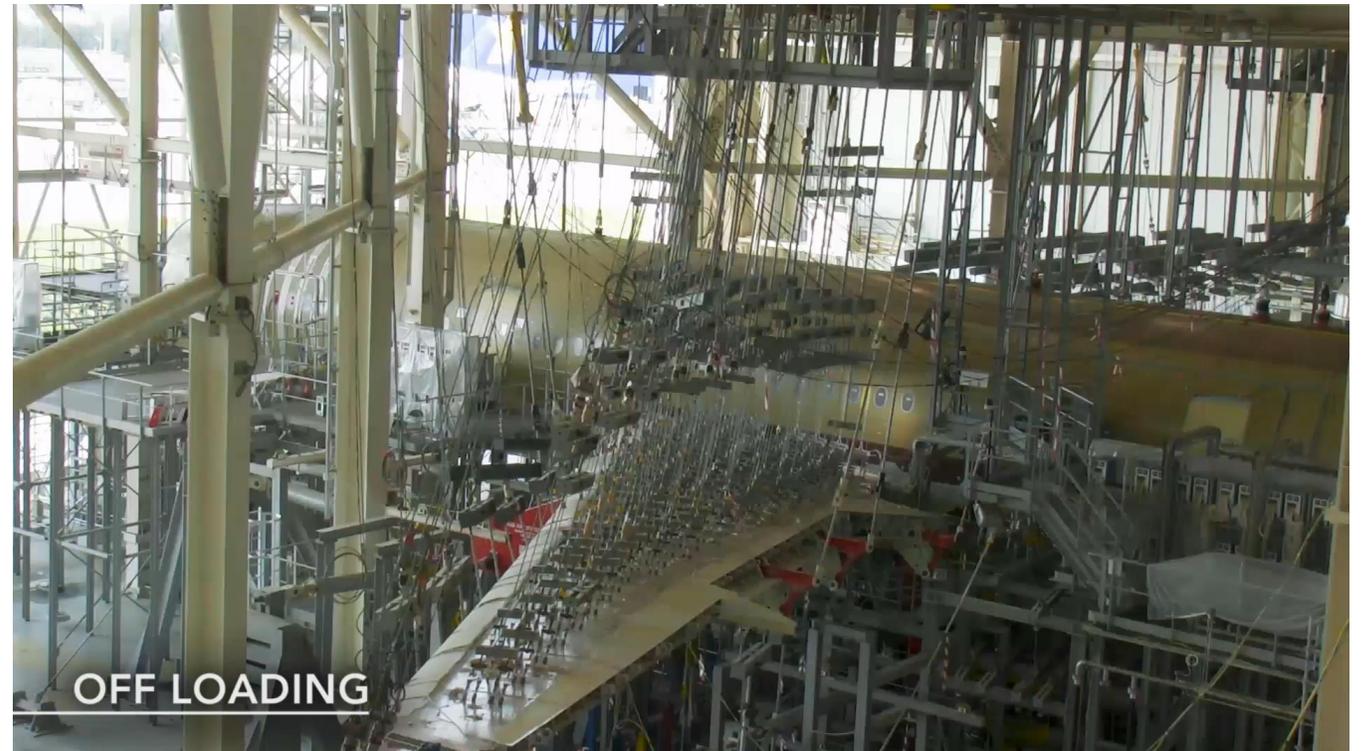
Illustration des points sur l'aile de l'avion

# Ajustement de faisceaux contraint

Extraction de contraintes à partir d'essais de charge ultime



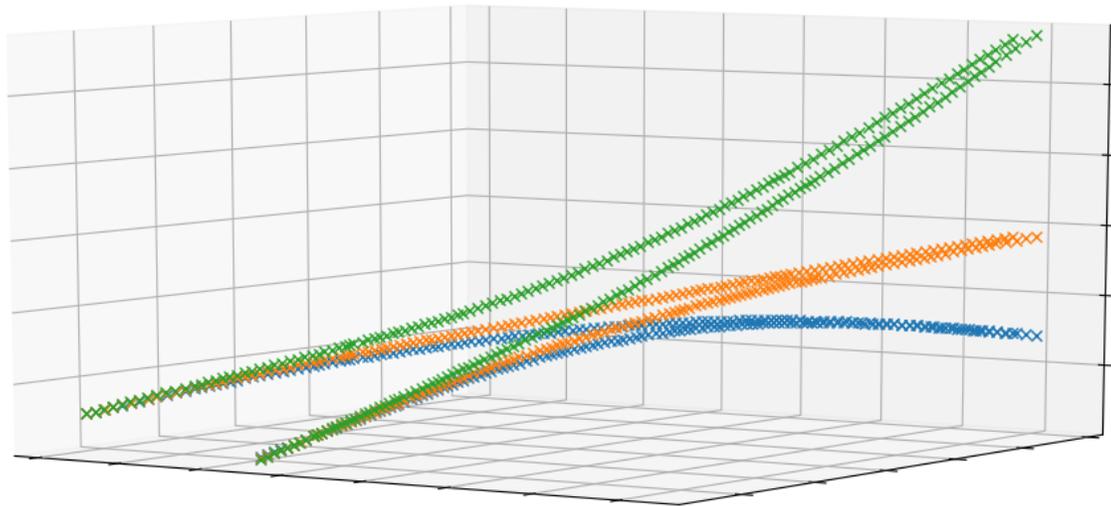
Simulation par la méthode des éléments finis



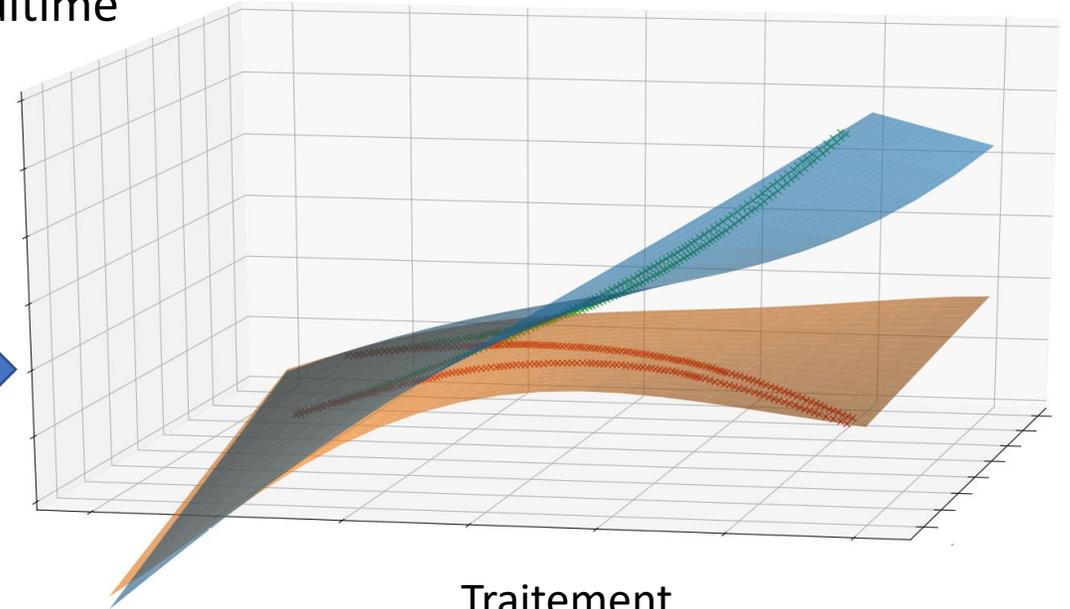
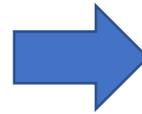
Validation lors des tests statiques

# Ajustement de faisceaux contraint

Extraction de contraintes à partir d'essais de charge ultime



Extraction des points



Traitement



Jeu de contraintes

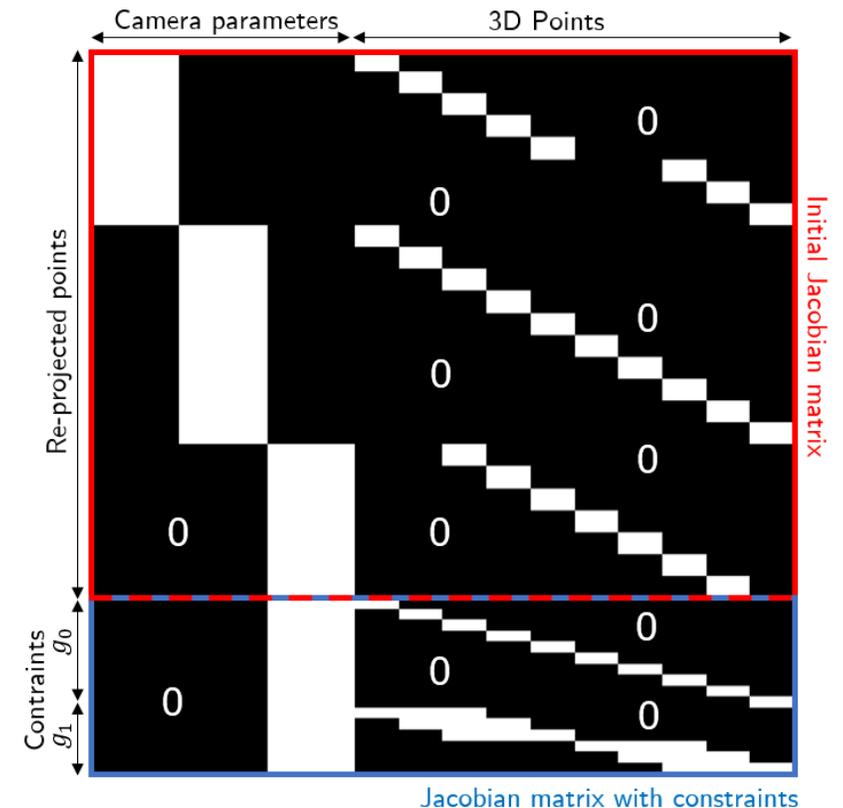
# Ajustement de faisceaux contraint

Les contraintes sont exprimées sous forme de termes de régularisation pour pénaliser la fonction objectif de l'ajustement du faisceaux :

$$\arg \min_{\alpha_j, \mathbf{X}^i} \sum_{i,j} \left[ \mathbf{x}_j^i - \hat{\mathbf{x}}(\alpha_j, \mathbf{X}^i) \right]^2 + \sum_k \mu_k \left\{ \sum_i \left[ g_k^+(\alpha_r, \tilde{\mathbf{X}}^i) \right]^2 \right\}$$

où  $g_k^+(\alpha_r, \tilde{\mathbf{X}}^i) = \max(0, g_k(\alpha_r, \tilde{\mathbf{X}}^i))$ ,

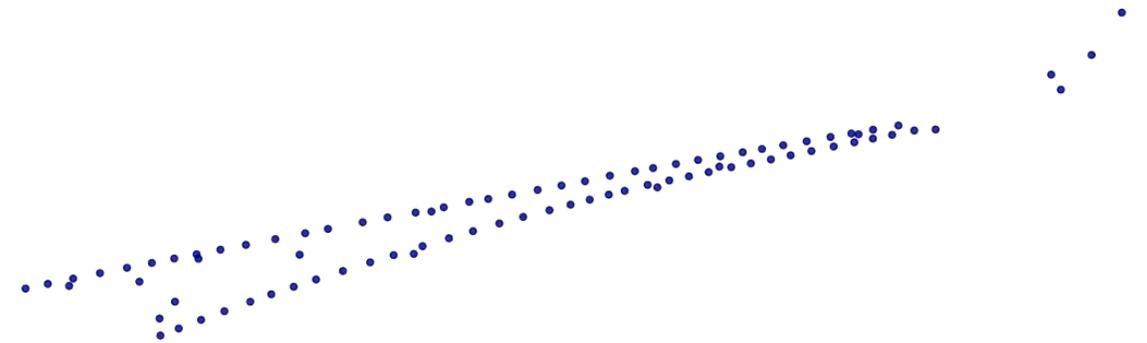
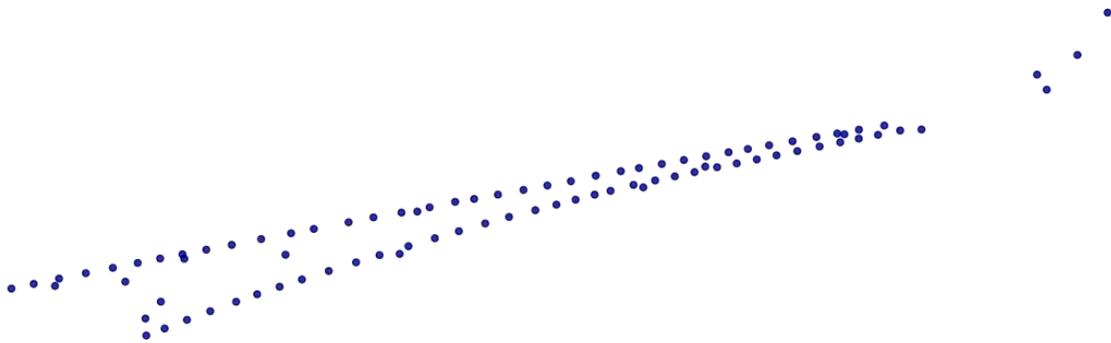
avec la fonction de pénalité de *Courant-Beltrami* pour assurer la différentiabilité (terme quadratique).



# Expérimentations et résultats

Sans contraintes

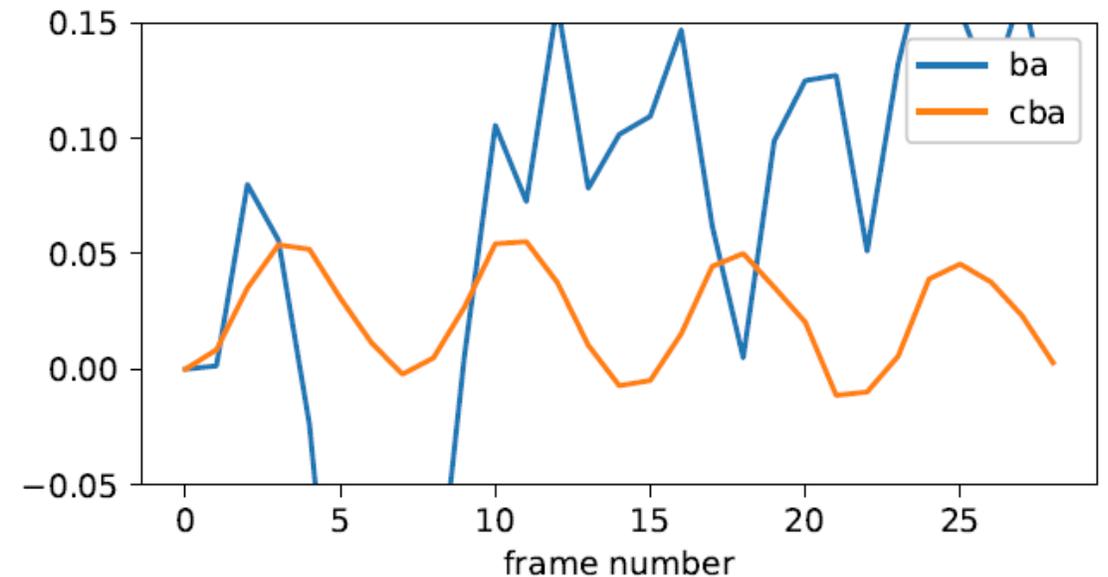
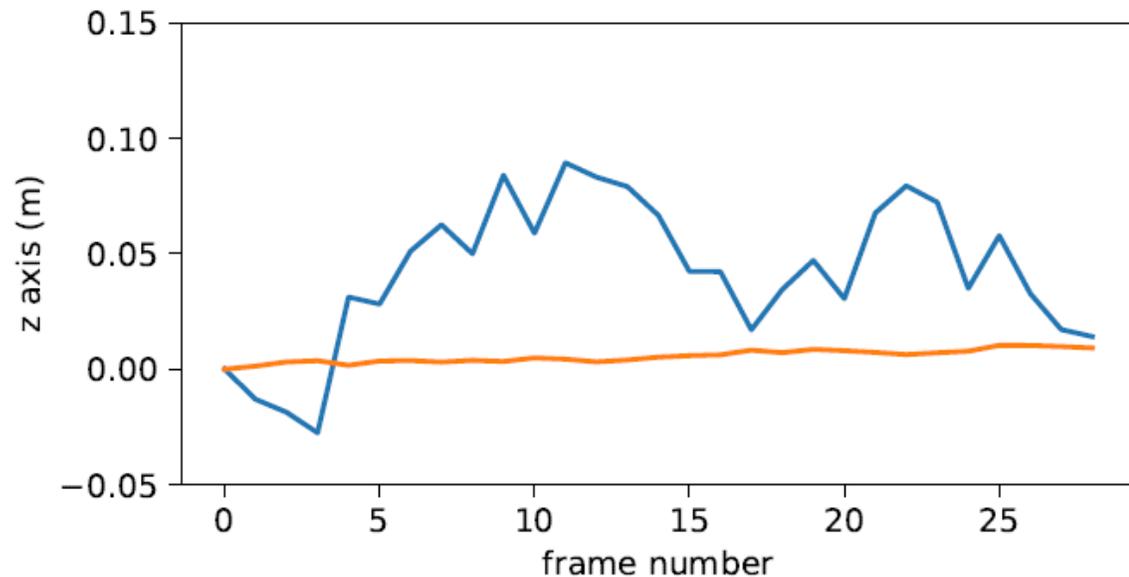
Avec contraintes



Résultat de la reconstruction avec amplification du mouvement

# Expérimentations et résultats

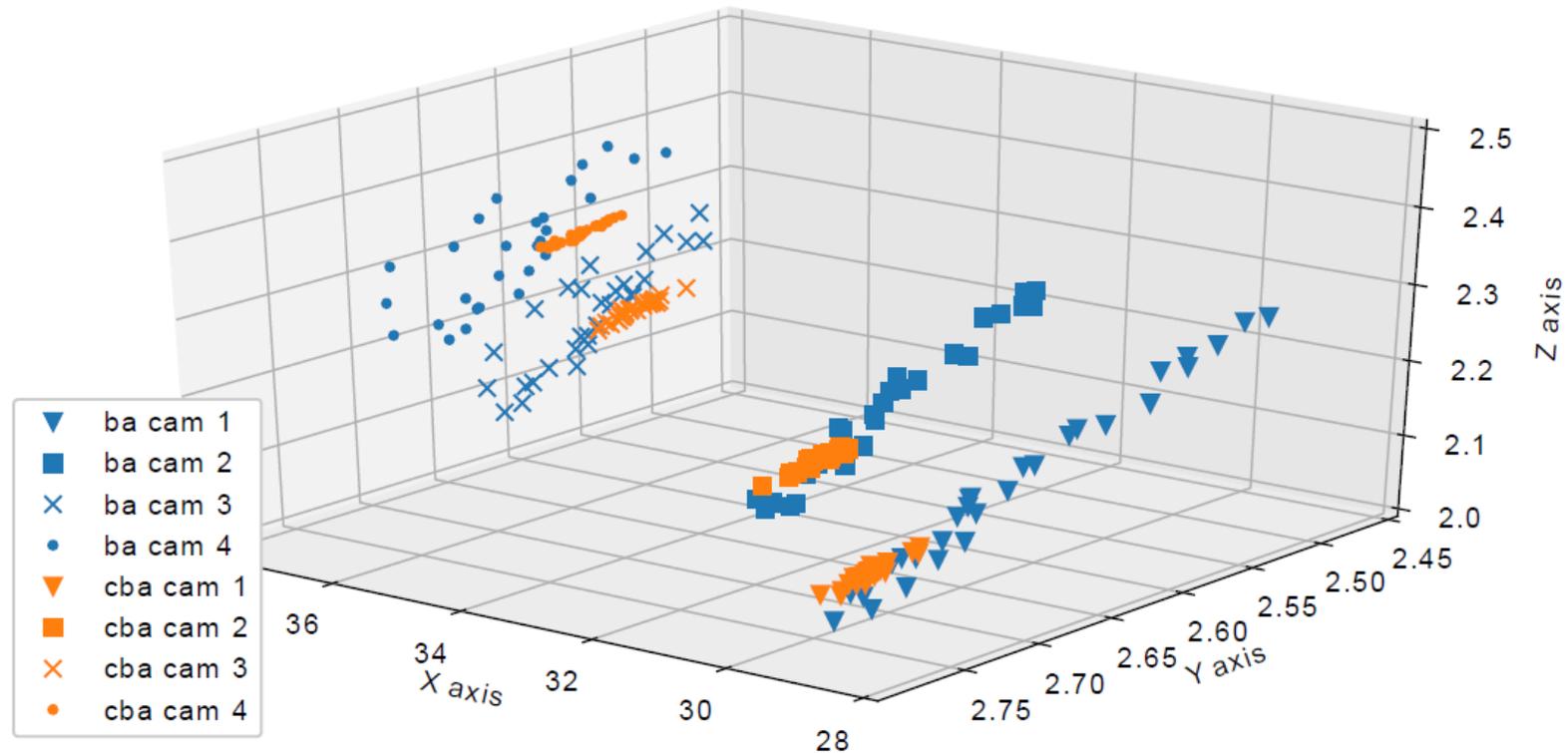
Résultats de la flexion au milieu de l'aile (à gauche) et au bout de l'aile (à droite).



Sans contrainte (ba), et avec des contraintes (cba).

# Expérimentations et résultats

Déplacements estimés (en mètres) des 4 caméras situées sur les fenêtres de l'avion.  
Caméras immobiles au sol.



Sans contrainte (ba), et avec des contraintes (cba).

# Plan

## A. Introduction

1. Contexte industriel
2. Objectifs et Enjeux
3. La reconstruction 3D sans contact

## B. Reconstruction 3D d'aile par photogrammétrie

1. Principe de la photogrammétrie
2. Méthodologie
3. Ajustement de faisceaux contraint

## C. Évaluation de l'incertitude de reconstruction 3D

1. Méthodologie
2. Principales sources d'incertitude
3. Propagation d'incertitude

## D. Validation industrielle

1. Essais en vol
2. Premiers résultats
3. Réponse aux attentes d'Airbus

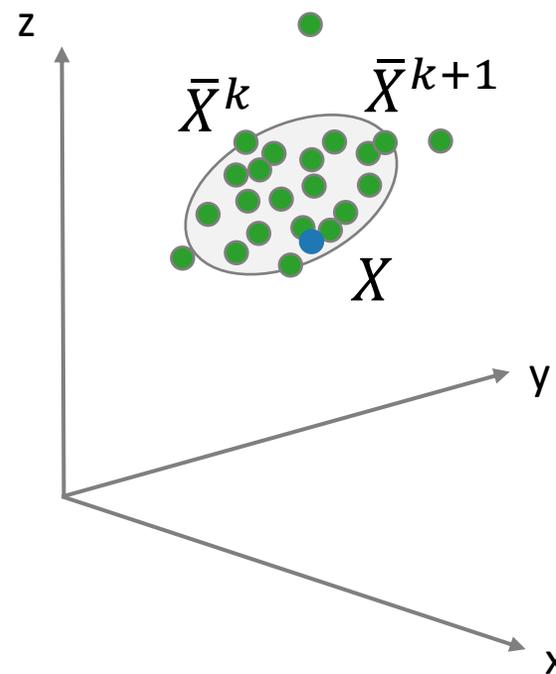
## E. Conclusion et perspectives

# Définition de l'incertitude

$k$



$k + 1$



# Définition de l'incertitude

Soit  $\bar{x}$  une estimation d'un paramètre  $x$ , obtenue à partir de d'un ensemble d'observation  $(x_1, \dots, x_n)$ . L'incertitude  $\bar{u}$  permet de donner un intervalle de confiance à l'estimation.

En effet, il y a une probabilité  $\alpha$  que

$$\bar{x} - t_\alpha \bar{u} < x < \bar{x} + t_\alpha \bar{u}$$

avec  $t_\alpha$  un coefficient déterminé à l'aide d'une loi de Student et de la probabilité  $\alpha$ .

# Définition de l'incertitude

L'incertitude est obtenue soit :

- Par approche statistique  $\bar{u} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}$

avec  $\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$  ,  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  .

- Par connaissance à priori – tests précédents, jugements d'ingénieur, spécification du constructeur.

# Définition de l'incertitude

L'incertitude est obtenue soit :

- Par approche statistique  $\bar{u} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}}$

avec  $\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1}$

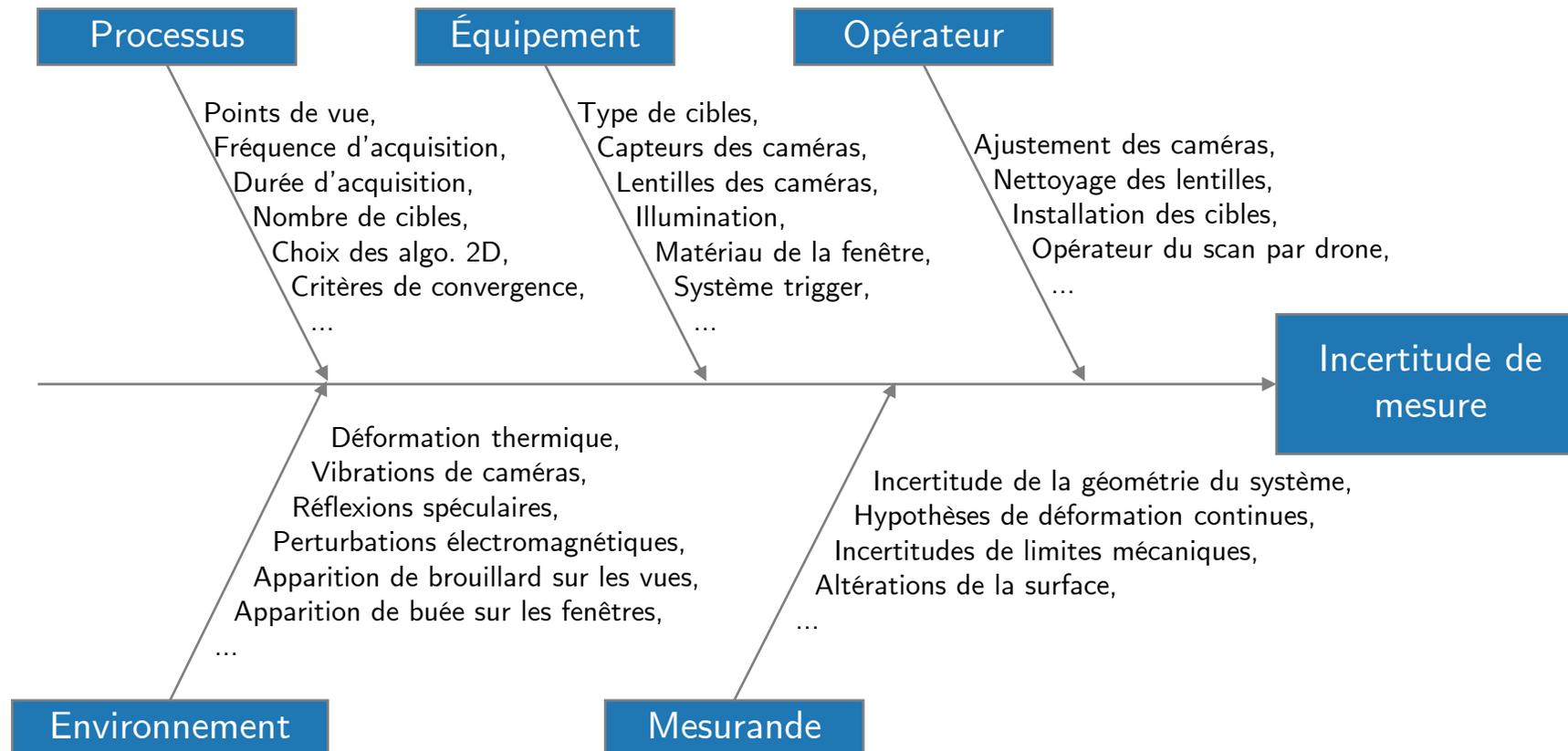
- Par connaissance

**Objectif :**  
Évaluer les sources d'incertitude du système et propager leurs erreurs pour obtenir l'incertitude de reconstruction 3D.

constructeur.

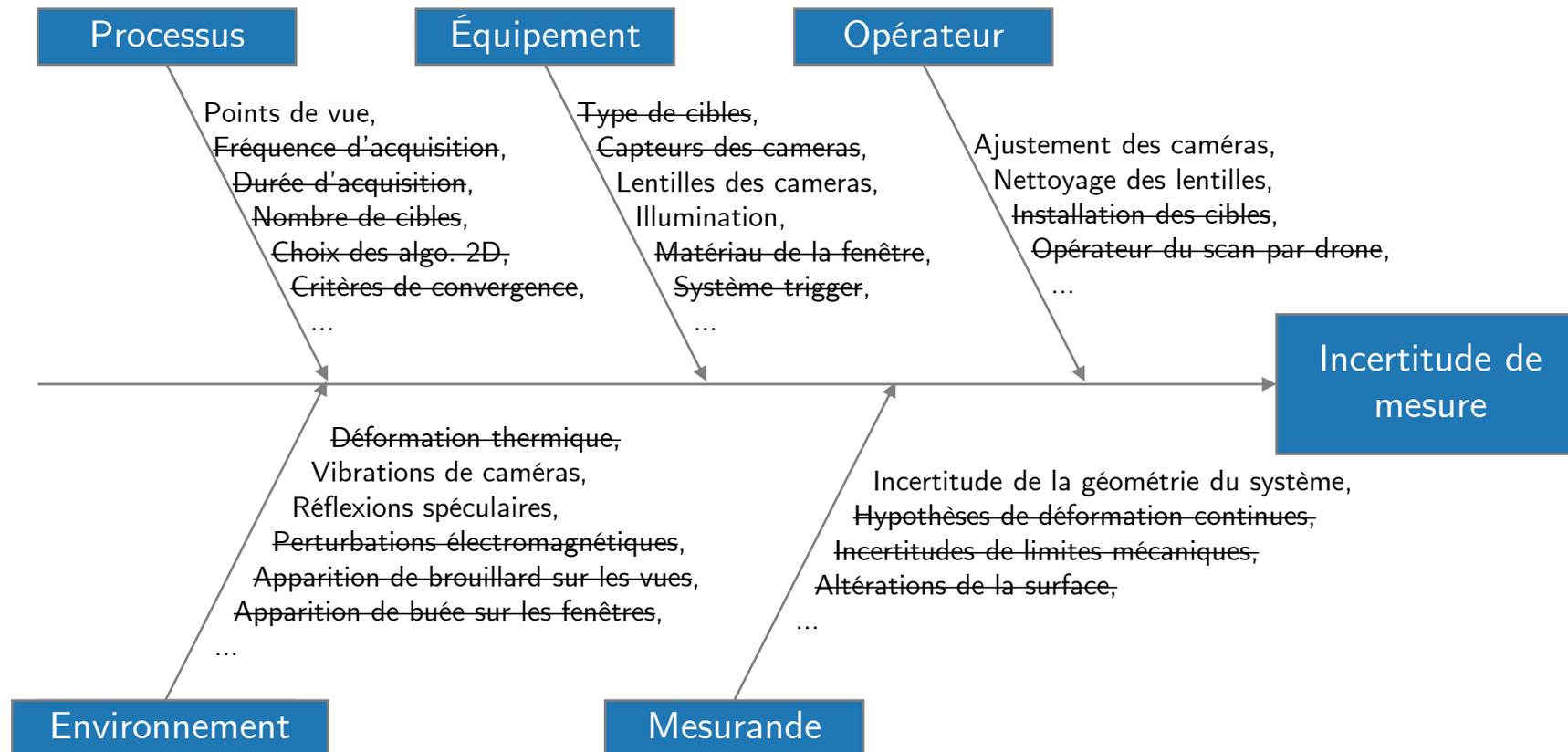
# Principales sources d'incertitude

## Diagramme de causes et effets



# Principales sources d'incertitude

## Diagramme de causes et effets

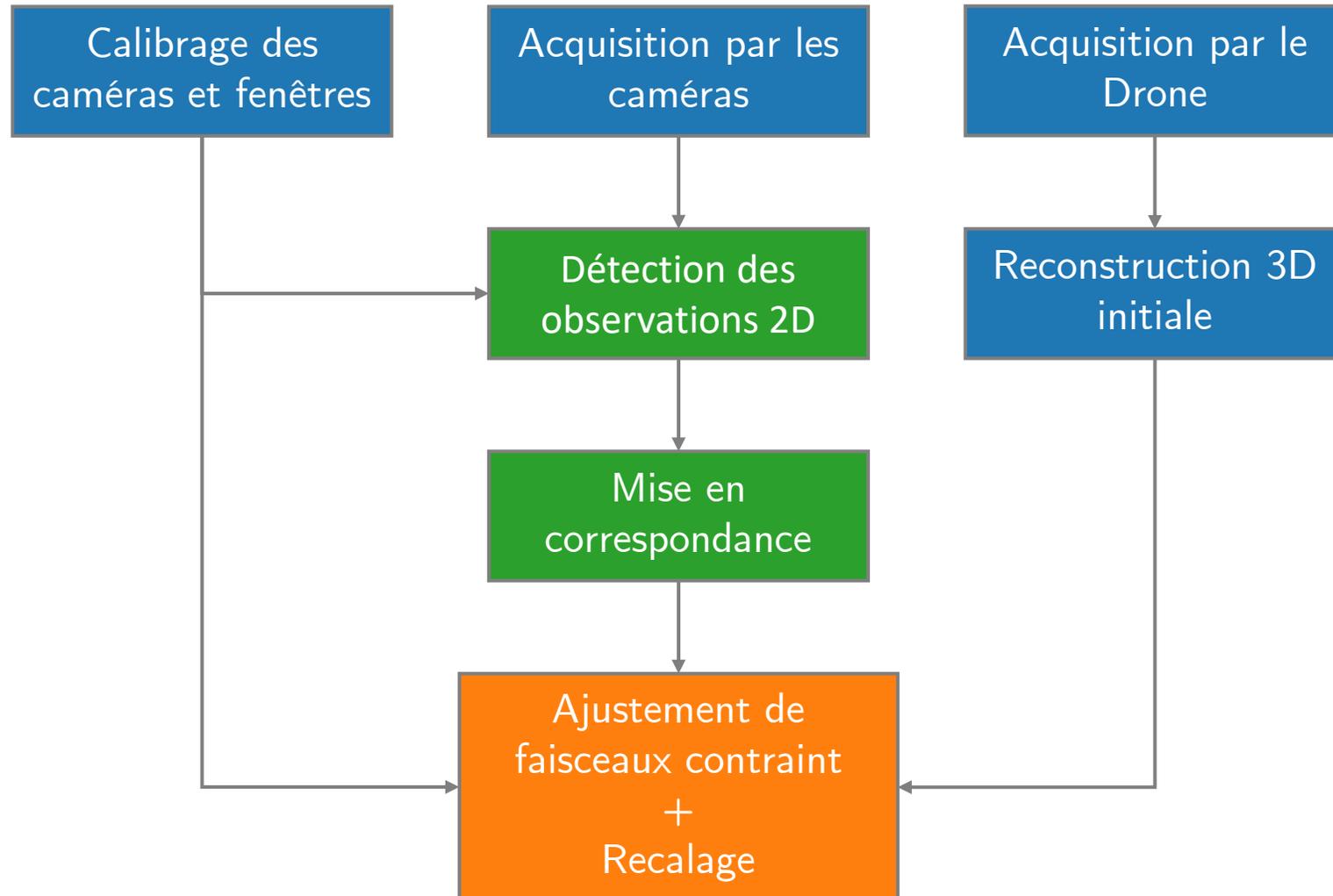


# Principales sources d'incertitude

Sources d'incertitude retenues :

- le nombre de vues
- l'utilisation de contraintes dans l'ajustement de faisceaux
- les dimensions et orientations des cibles
- le flou, le bruit, le contraste et l'intensité non homogène des images
- le calibrage de la caméra
- la précision de la reconstruction initiale à partir du scan du drone.

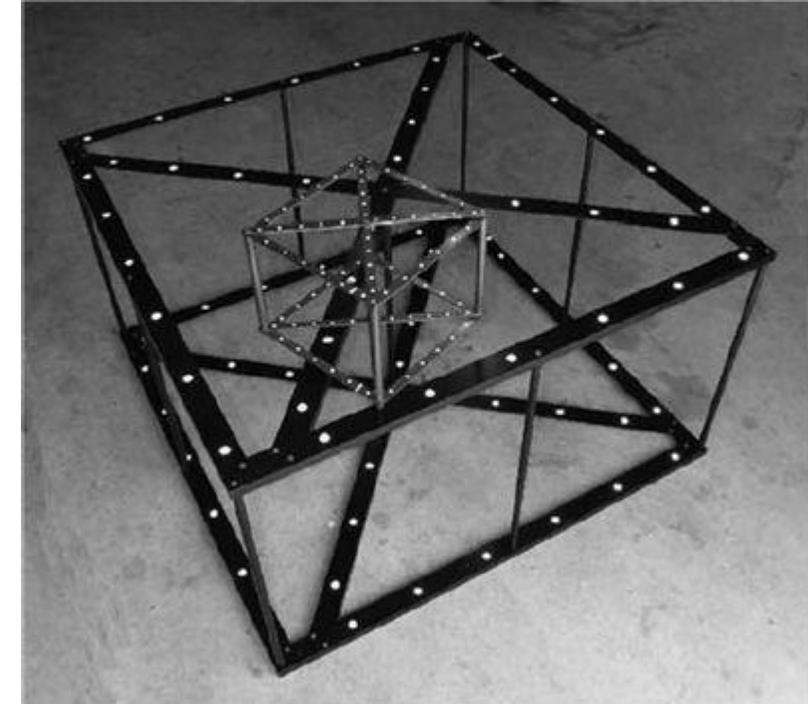
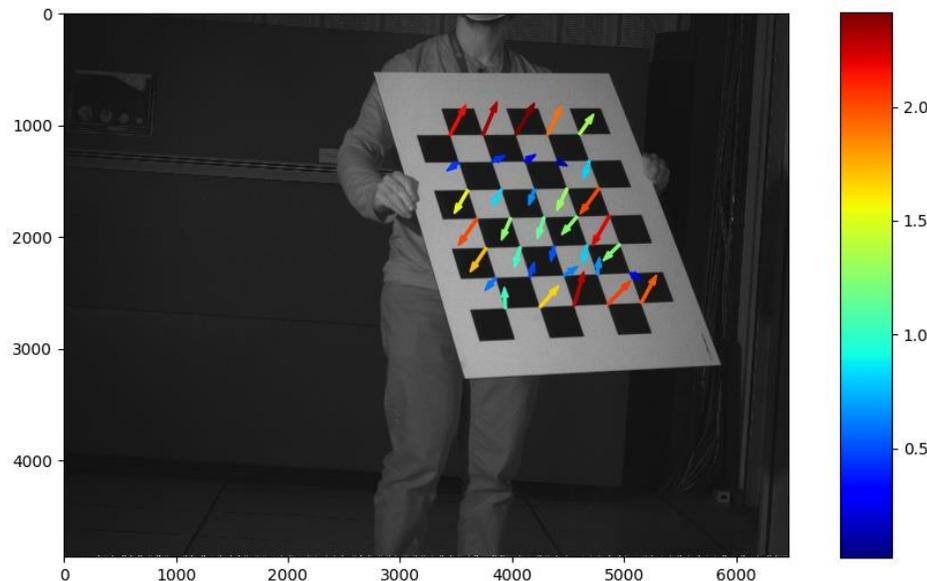
# Principales sources d'incertitude



# Principales sources d'incertitude

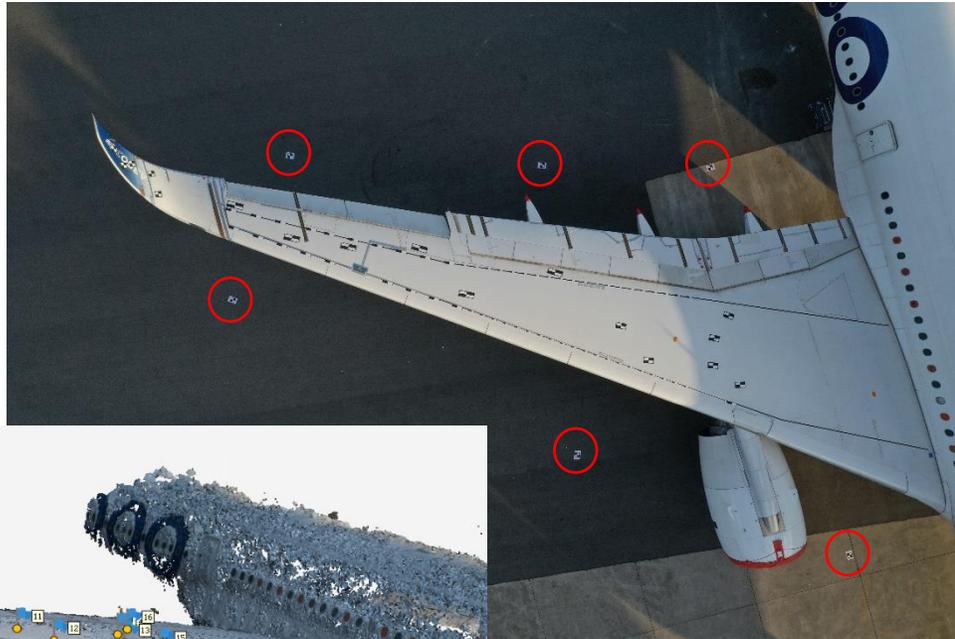
Incertitude de calibrage des paramètres intrinsèques :

- Subpixel dans la littérature
- Fixée à 1px d'après de précédentes études chez Airbus



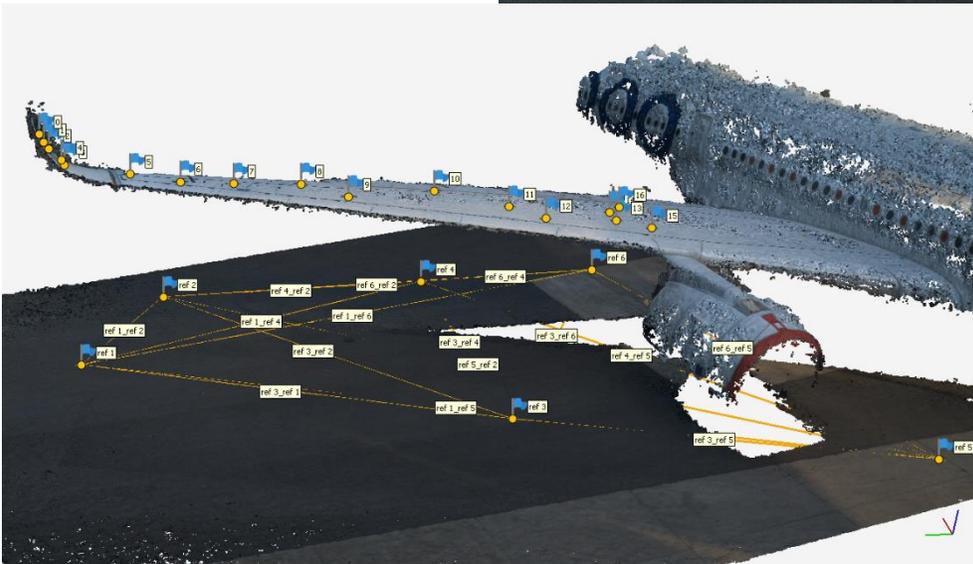
Exemple de mire 3D calibrée et utilisée pour calibrer les caméras

# Principales sources d'incertitude



## Scan par drone

- Prise de mesures de référence au télémètre laser entre 6 cibles placées au sol et visibles lors du scan
- Comparaison avec la reconstruction 3D



Incertitude plan (x,y) = 0.0031m  
Incertitude axe z = 0.0259m

# Principales sources d'incertitude

## Acquisition d'image :

- Duplication d'image
- Bruit, flou
- Positions et inclinaisons des cibles
- Inhomogénéité de la lumière
- Compression d'image

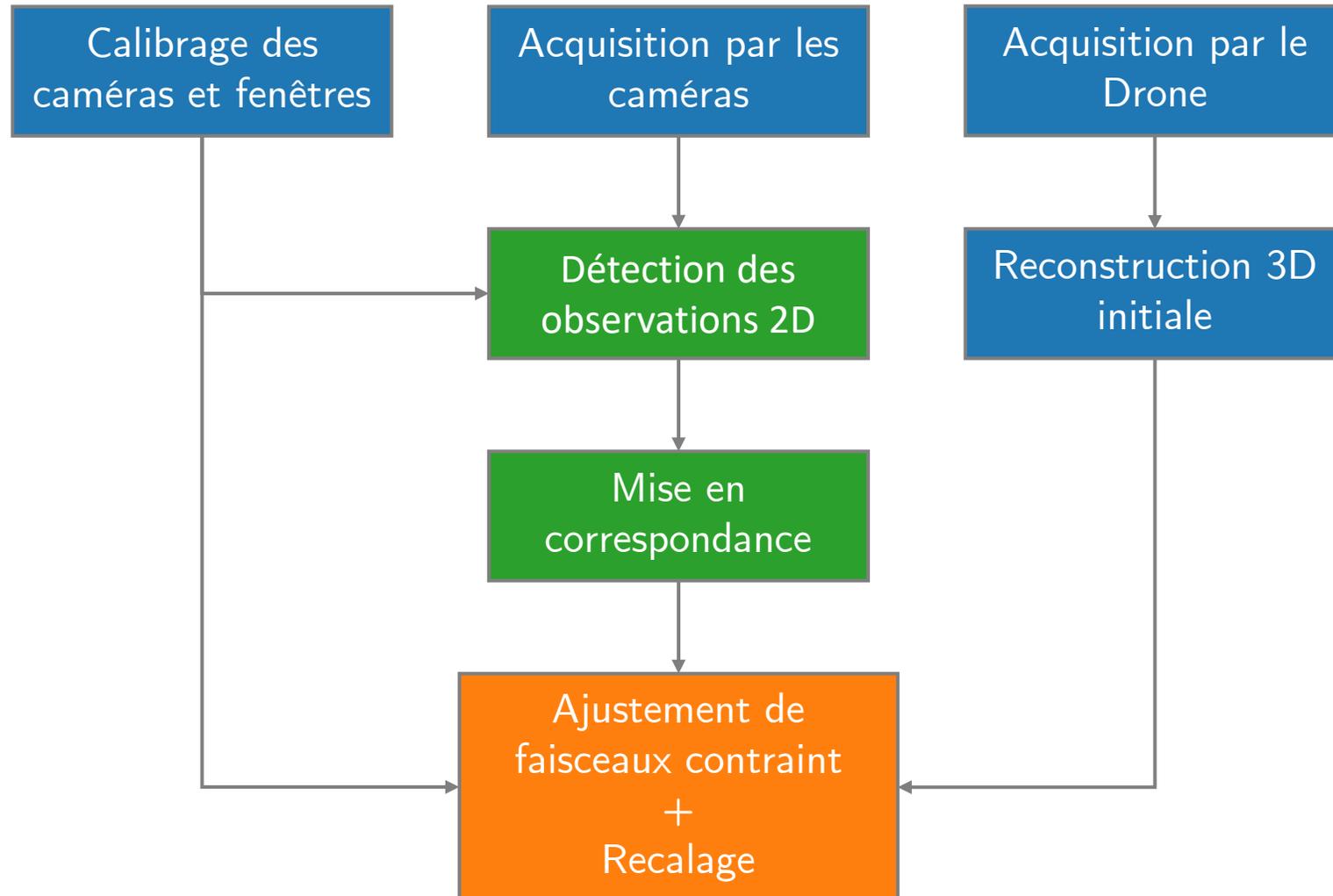


Duplication d'image

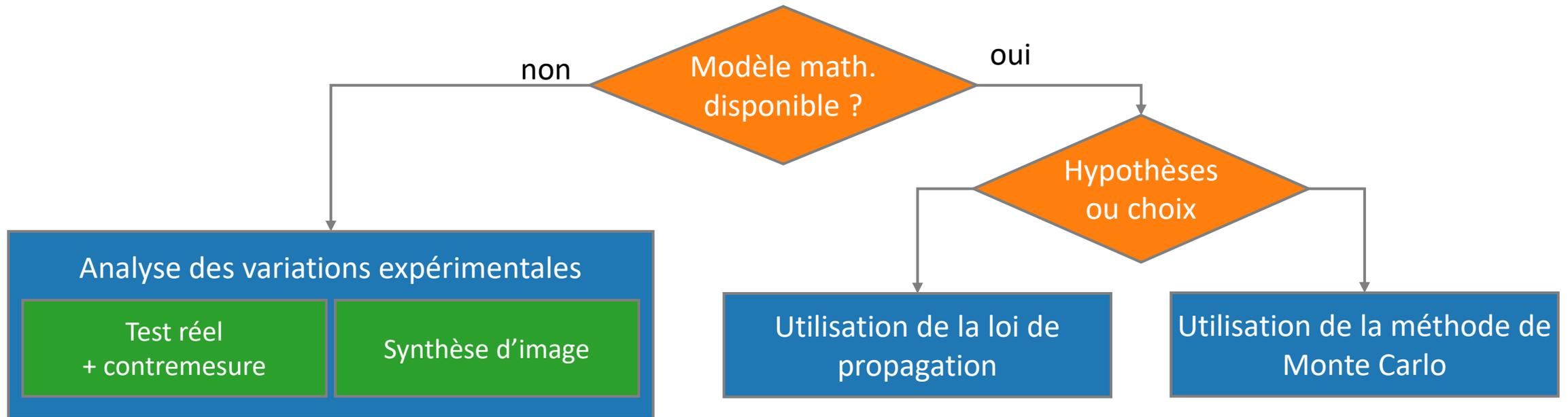
Incertitudes estimées en laboratoire  
et à partir de vidéos de vol.



# Principales sources d'incertitude



# Propagation d'incertitude

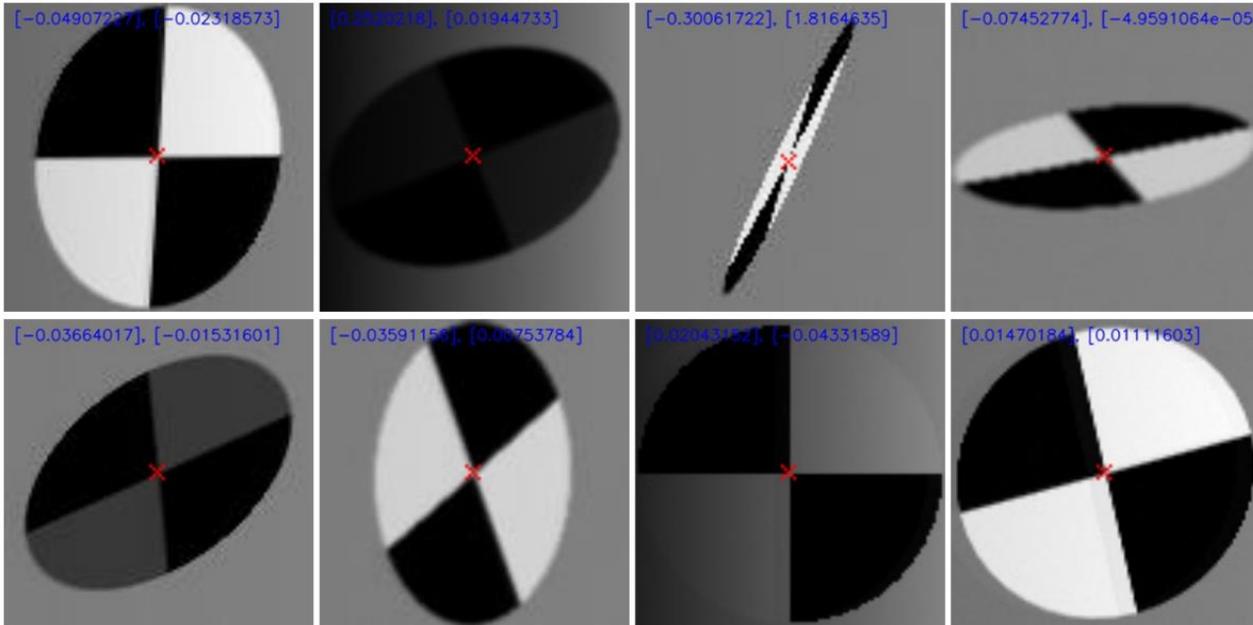


Objectif :

Évaluer l'incertitude de la chaîne de mesure à l'aide des différentes approches

# Propagation d'incertitude

## Monte Carlo



## Détection 2D

Simulation de Monte Carlo de  $10^6$  images de cibles avec les dégradations et configurations définies de :

- Contraste
- Orientation
- Translation
- Flou
- Duplication
- Homogénéité de la lumière

Distribution des détections 2D obtenues :

$$x \sim \mathcal{N}(-0.15, 0.76),$$

en pixels

$$y \sim \mathcal{N}(0.02, 0.69),$$

# Propagation d'incertitude

## Monte Carlo

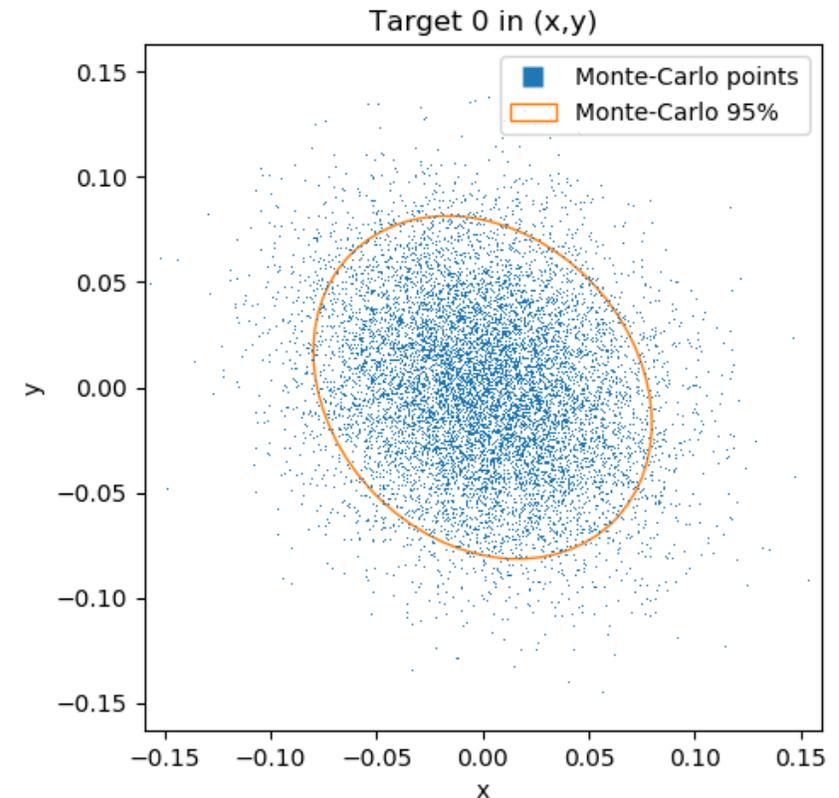
### Ajustement de faisceaux

Simulation d'observations 2D d'un nuage de point de l'aile.  
Reconstruction 3D à l'aide de l'ajustement de faisceaux avec ou sans contraintes mécaniques.

Bruit ajouté sur :

- Les paramètres intrinsèques (calibrage)
- Les observations 2D
- La reconstruction 3D initiale (scan par drone)

Génération de  $10^4$  essais en un jour.



# Propagation d'incertitude

## Loi de propagation

On pose  $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)^T$  le vecteur aléatoire des  $m$  quantités mesurées  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$  tel que

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x})$$

Si ce modèle est connu, la loi de propagation permet de propager l'incertitude des variables d'entrées vers celles de sortie au travers de leurs matrices de covariance  $\mathbf{U}_x$  et  $\mathbf{U}_y$  :

$$\mathbf{U}_y = \mathbf{J}_x^f \mathbf{U}_x \mathbf{J}_x^{fT}$$

avec  $\mathbf{J}_x^f$  la matrice jacobienne de  $f$  par rapport à  $x$  .

(Résultat issu d'un développement de Taylor de  $f$  au premier ordre)

# Propagation d'incertitude

## Loi de propagation

Cas de l'ajustement de faisceaux

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}) = \arg \min_z \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}(z, \mathbf{K})\|^2$$

on peut montrer que

$$\mathbf{J}_x^f = (\mathbf{J}_z^{\hat{\mathbf{x}}^T} \mathbf{J}_z^{\hat{\mathbf{x}}})^{-1} \mathbf{J}_z^{\hat{\mathbf{x}}^T}$$

$$\mathbf{J}_K^f = -(\mathbf{J}_z^{\hat{\mathbf{x}}^T} \mathbf{J}_z^{\hat{\mathbf{x}}})^{-1} \mathbf{J}_z^{\hat{\mathbf{x}}^T} \mathbf{J}_K^{\hat{\mathbf{x}}}.$$

Notes :

- points de références fixés pour contraindre le repère et l'échelle de la solution (contrainte de jauge).
- Rapide à implanter et résultat instantané.

# Propagation d'incertitude

## Loi de propagation

Cas de l'ajustement de faisceaux sous contraintes mécaniques

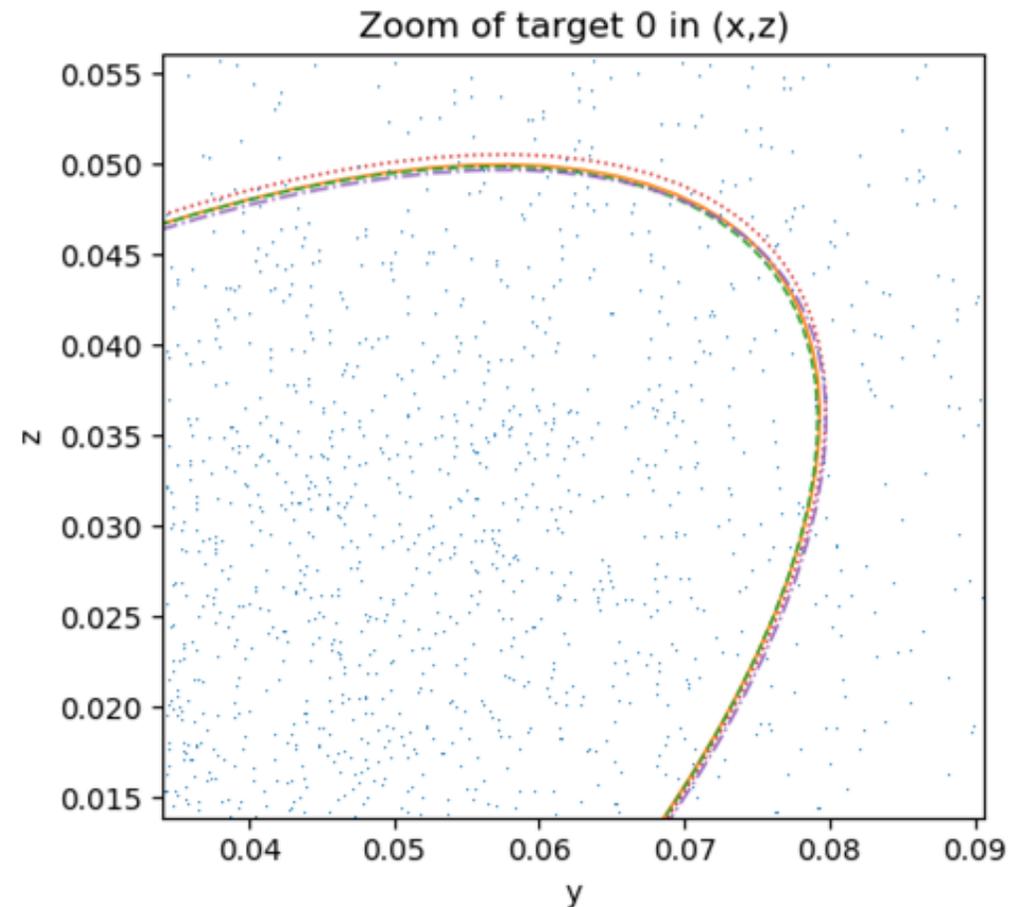
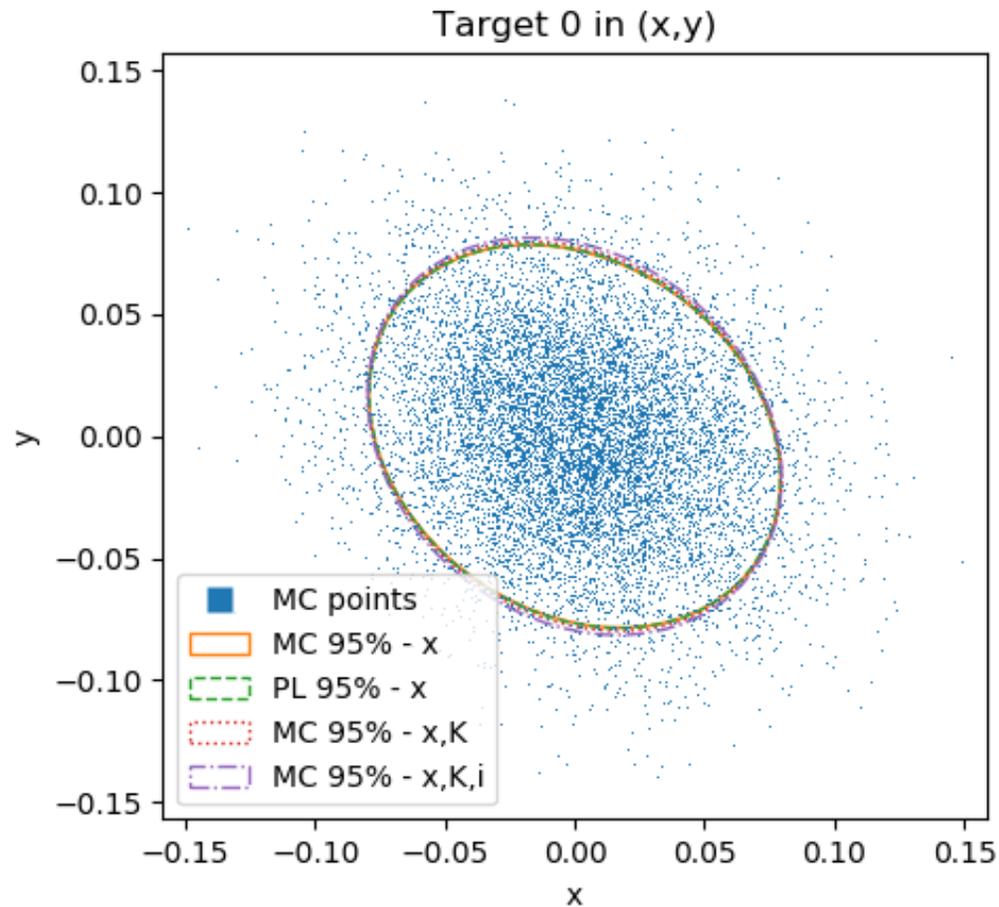
$$\arg \min_{\alpha_j, \mathbf{X}^i} \sum_{i,j} [\mathbf{x}_j^i - \hat{\mathbf{x}}(\alpha_j, \mathbf{X}^i)]^2 + \sum_k \mu_k \left\{ \sum_i [g_k^+(\alpha_r, \tilde{\mathbf{X}}^i)]^2 \right\}$$

Contraintes non activées à proximité de la solution du problème

→ Contraintes non prises en compte en appliquant le théorème des fonctions implicites.

# Propagation d'incertitude

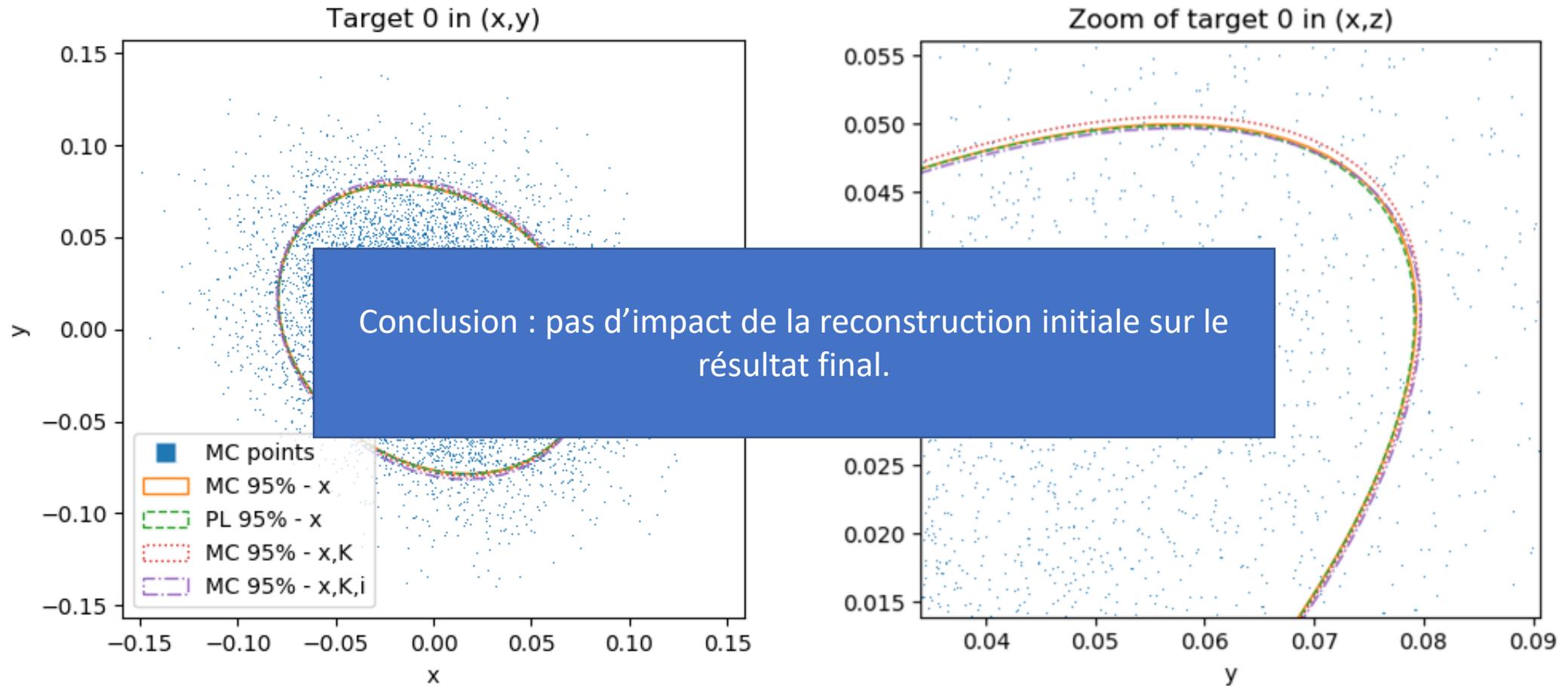
## Résultats



Résultats en mètres pour une cible en bout d'aile du MC et PL, avec bruit d'observation ( $x$ ), plus le bruit de calibration ( $x, \mathbf{K}$ ), et avec le bruit ajouté de la reconstruction initiale ( $x, \mathbf{K}, i$ )

# Propagation d'incertitude

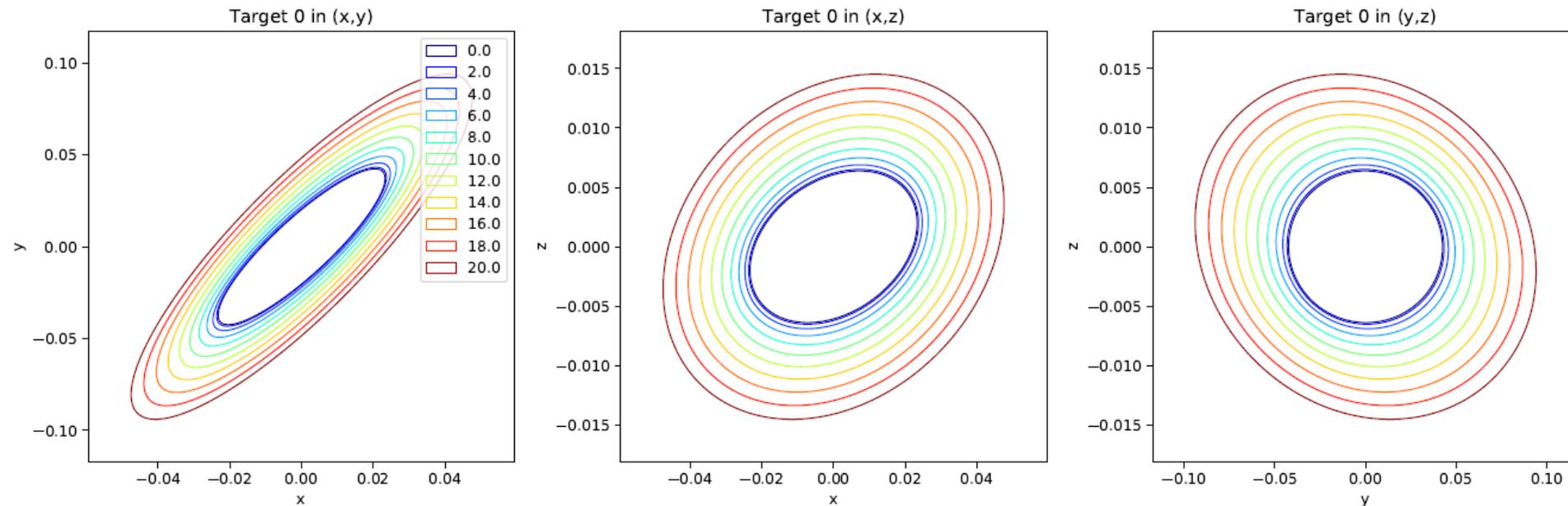
## Résultats



Résultats en mètres pour une cible en bout d'aile du MC et PL, avec bruit d'observation ( $x$ ), plus le bruit de calibration ( $x, \mathbf{K}$ ), et avec le bruit ajouté de la reconstruction initiale ( $x, \mathbf{K}, i$ )

# Propagation d'incertitude

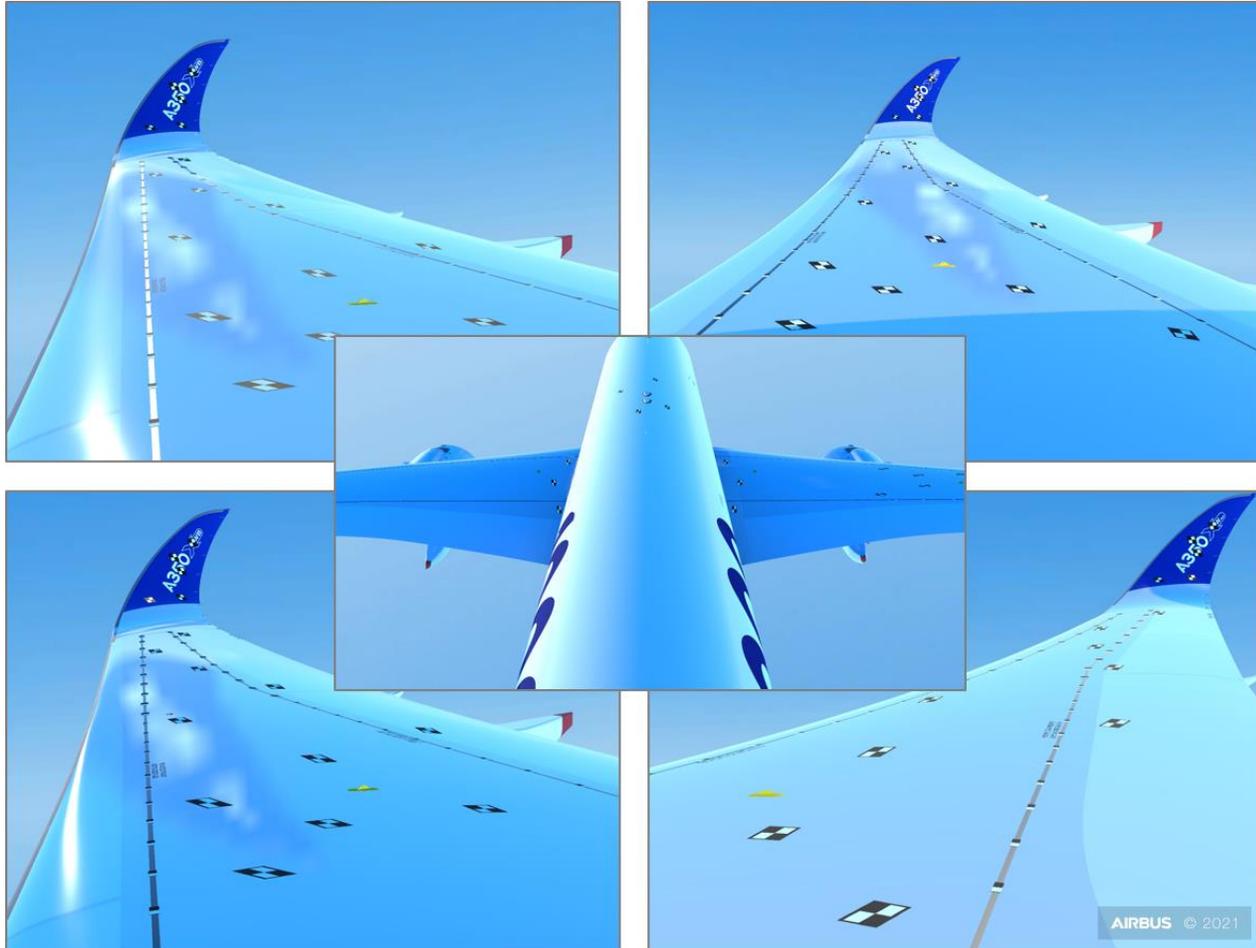
## Résultats



Résultats de l'incertitude en utilisant la PL pour différents niveaux de bruit de calibrage des caméras, à l'extrémité de l'aile (en mètres).

# Propagation d'incertitude

## Synthèse d'images

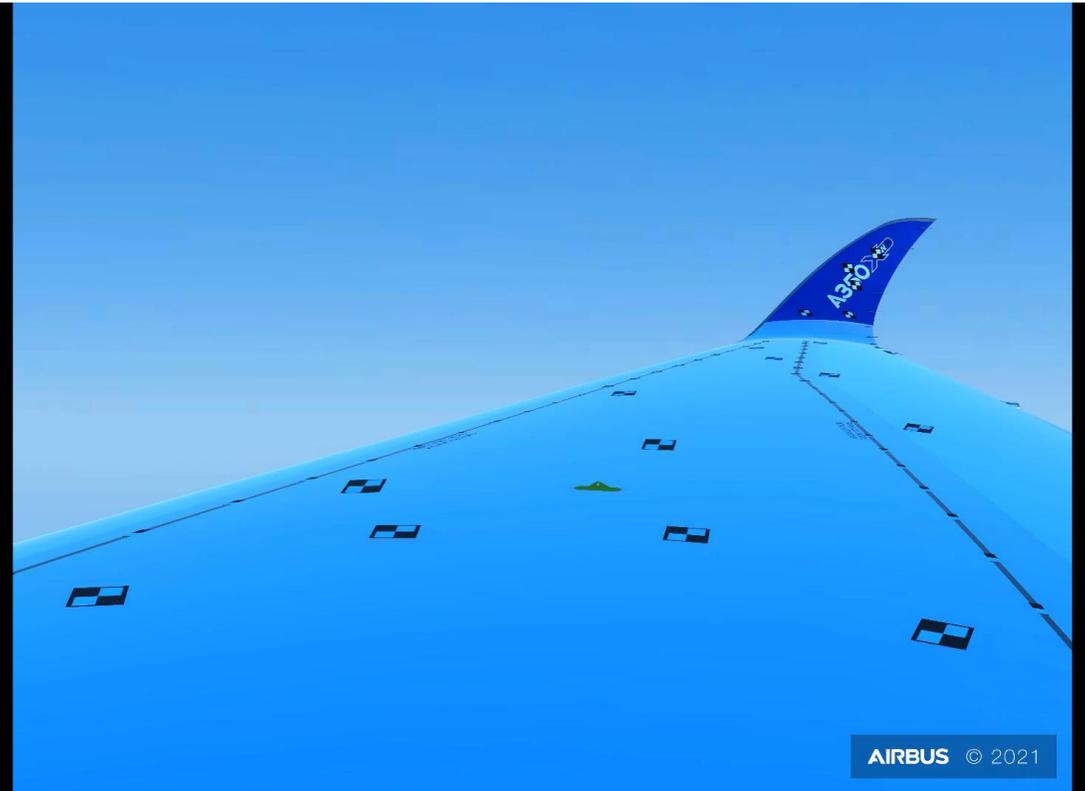
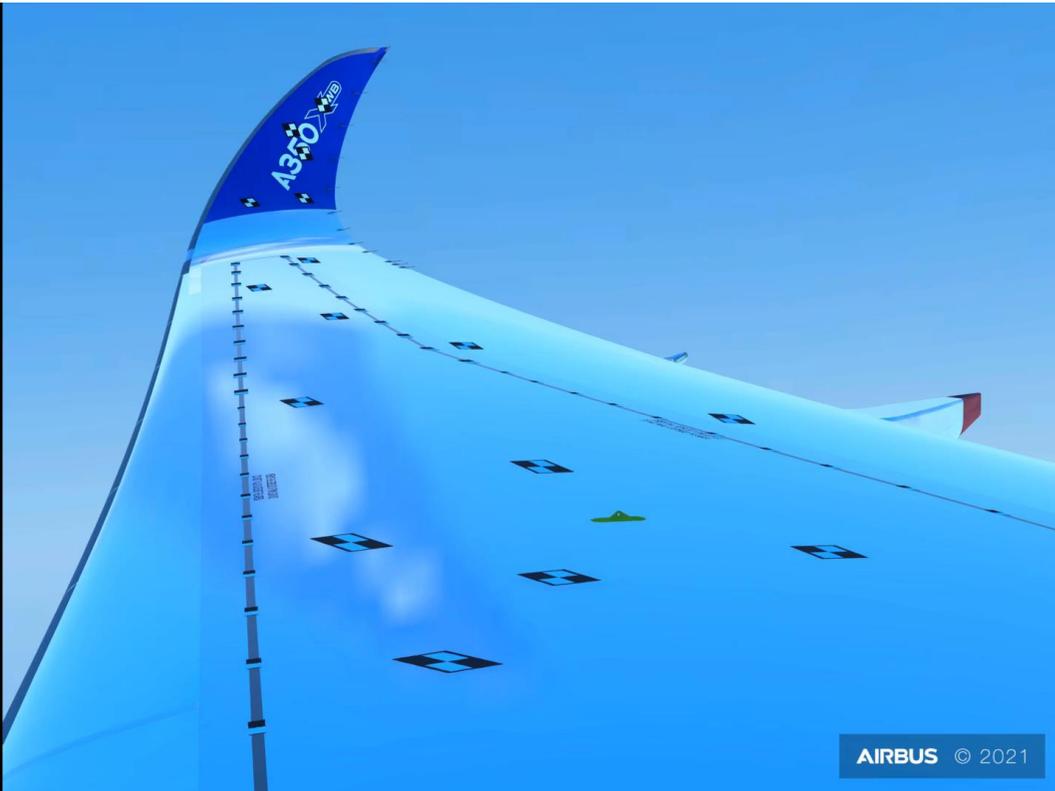


Synthèse d'image avec le moteur de jeu Unity :

- Maquette 3D d'A350-1000 au sol
- Déformation à l'aide des données de déformations en croisière (Méthode des éléments finis)
- Génération de diverse orientations du soleil.

# Propagation d'incertitude

## Synthèse d'images



# Plan

## A. Introduction

1. Contexte industriel
2. Objectifs et Enjeux
3. La reconstruction 3D sans contact

## B. Reconstruction 3D d'aile par photogrammétrie

1. Principe de la photogrammétrie
2. Méthodologie
3. Ajustement de faisceaux contraint

## C. Évaluation de l'incertitude de reconstruction 3D

1. Méthodologie
2. Principales sources d'incertitude
3. Propagation d'incertitude

## D. Validation industrielle

1. Essais en vol
2. Premiers résultats
3. Réponse aux attentes d'Airbus

## E. Conclusion et perspectives

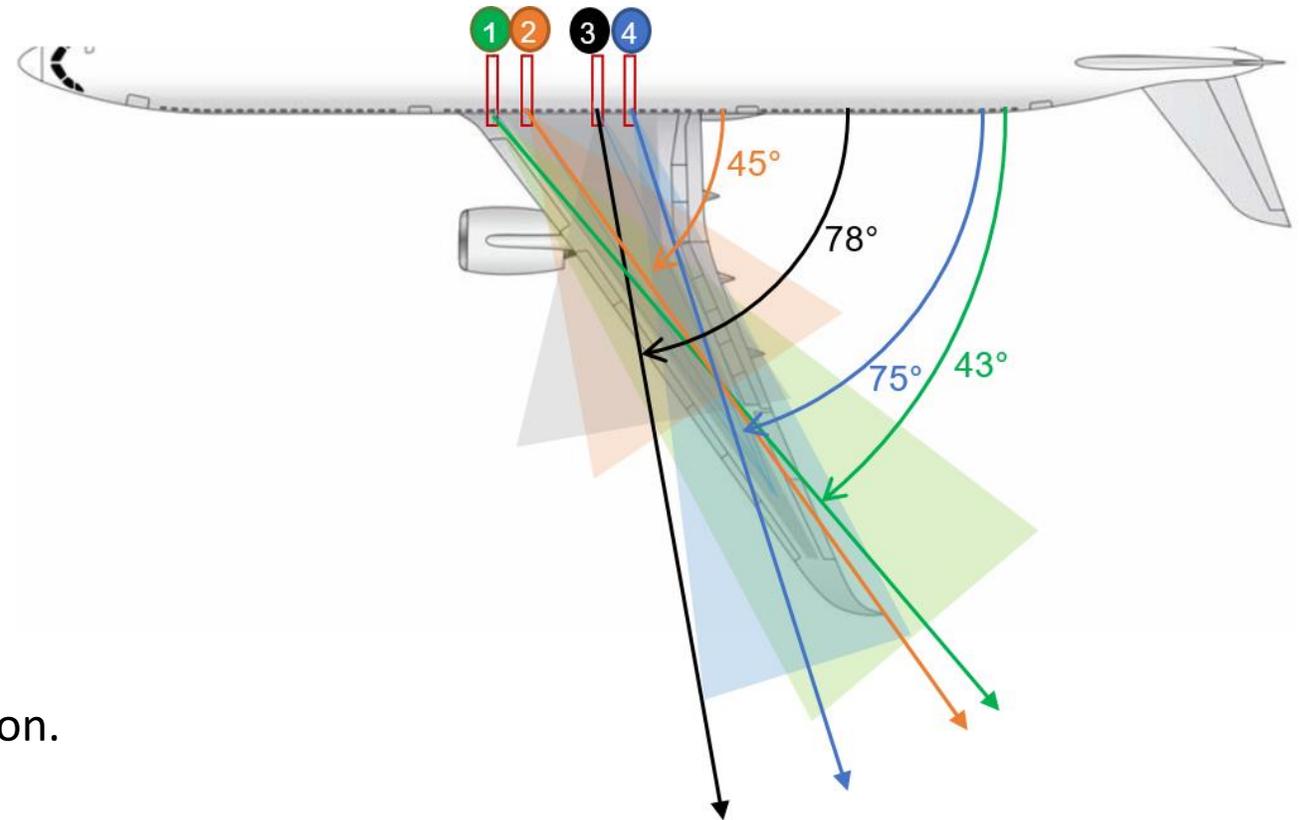
# Essais en vol

Design d'un système complet à installer sur avion :

- 4 caméras 31Mpx (6464x4860)
- Optiques
- Vitres métrologiques
- Supports en impression 3D
- Ordinateur d'acquisition
- Interface de synchronisations des caméras
- Connexion au système d'essais de l'avion
- Cibles autocollantes

Test et configuration en labo.

Positions et orientations définies par simulation.



# Essais en vol

## Installation en cabine



# Essais en vol

## Installation des cibles sur l'aile



Cibles autocollantes avec impression matte  
De différentes tailles.

# Essais en vol

## Premiers vols (Février 2021)



# Essais en vol

## Premiers vols (Février 2021)



# Premiers résultats

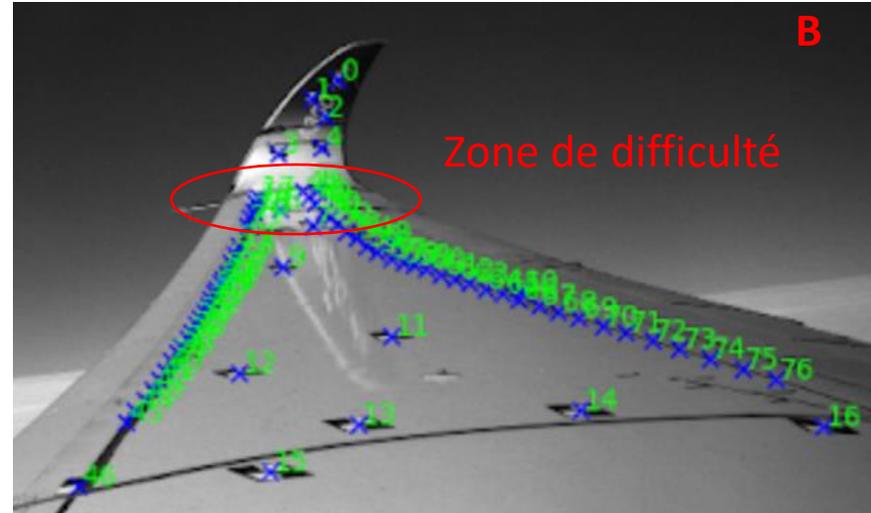
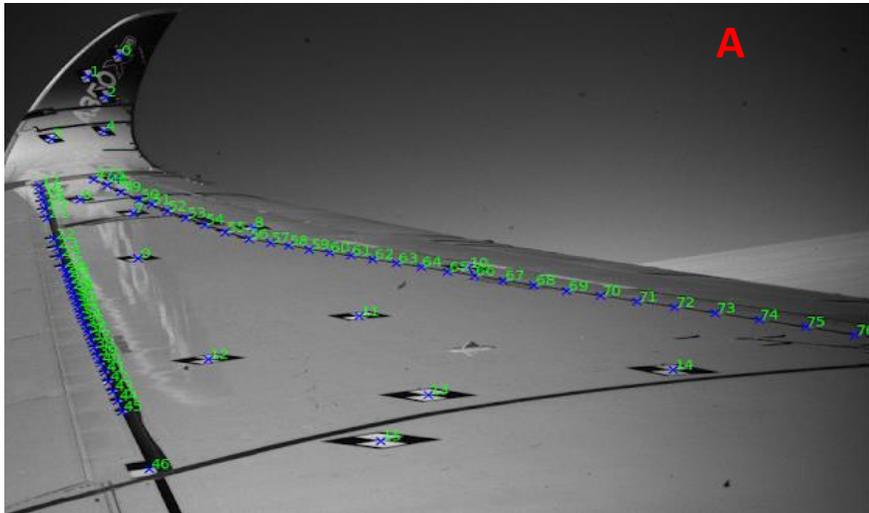
## Remarques

- Variation très rapide de luminosité – potentiels problèmes de suivi,
- Surexposition lorsque le soleil est dans le champ de vue des caméras,
- Bout d'aile à peine visible au sol = initialisation difficile,
- Majorité d'images de très bonne qualité (contraste, netteté, sans réflexion)



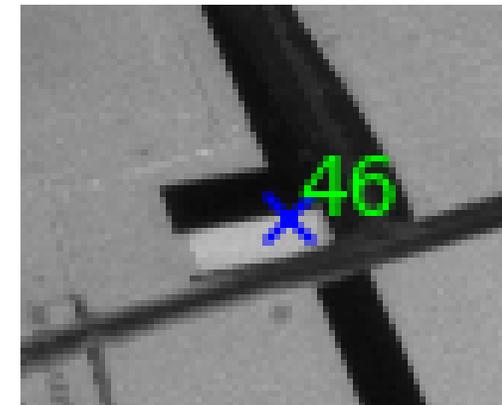
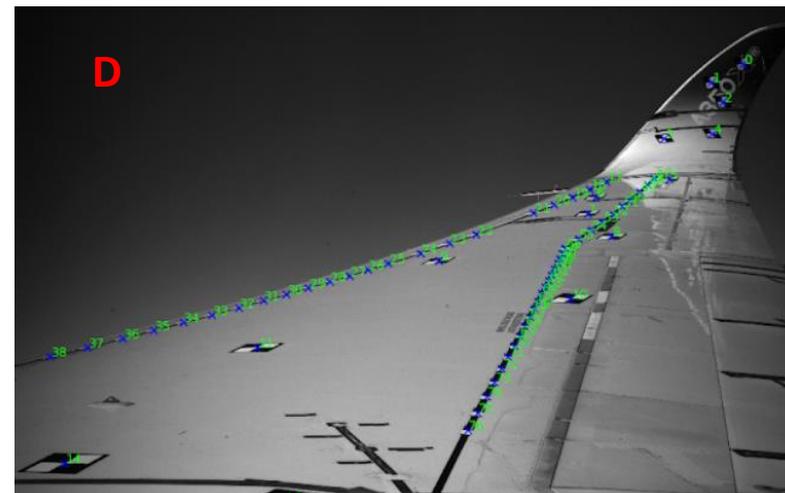
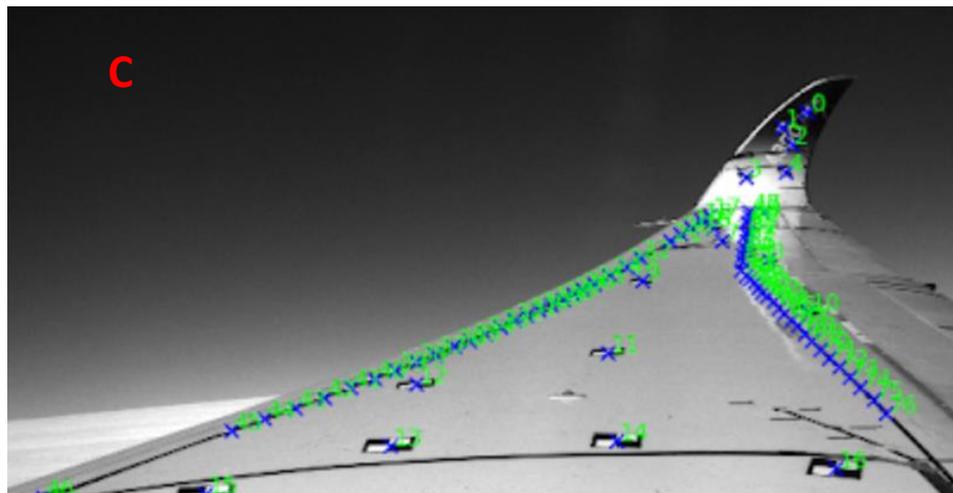
# Premiers résultats

## Observation 2D



Incertitude des observations 2D conforme aux prédictions

Cibles non optimales en bout d'aile



# Premiers résultats

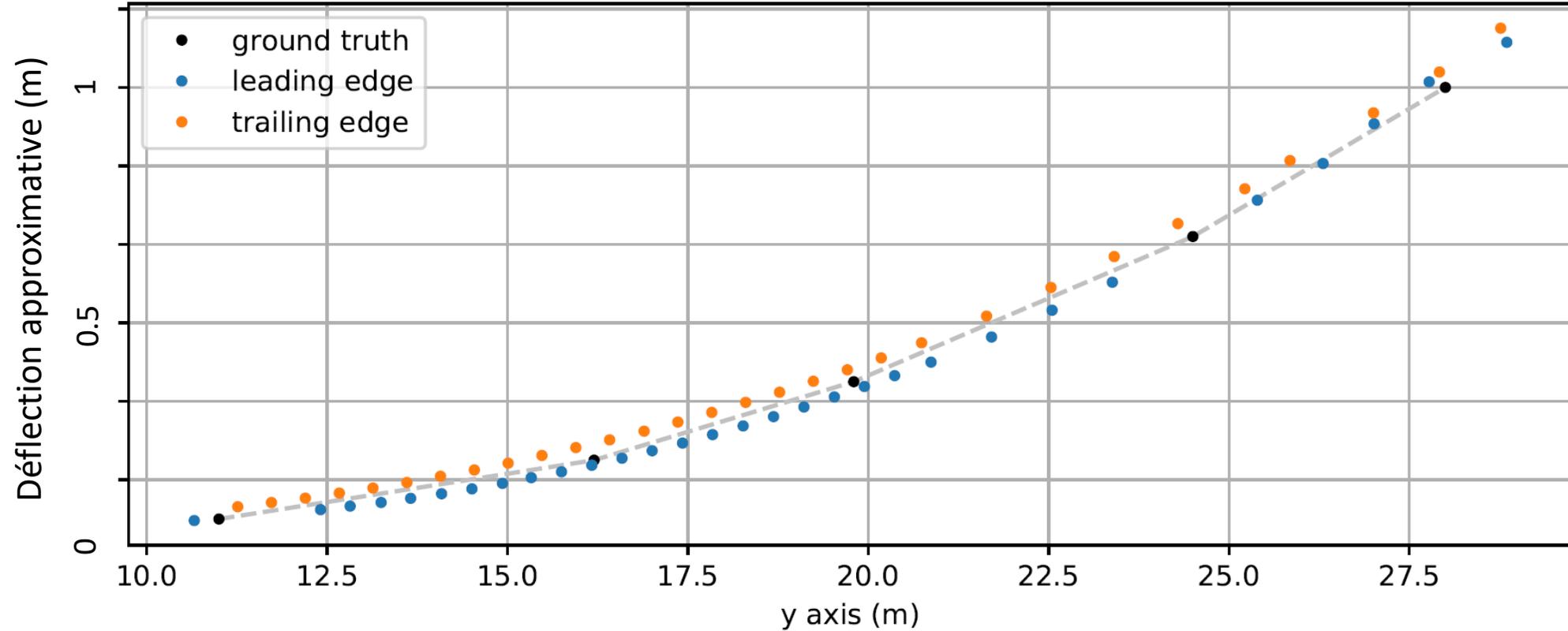
Nouvelles hypothèses :

- Positions 3D des caméras connues
- Contrainte d'indéformabilité locale de l'aile
- Utilisation d'un capteur de contremesure (IMU) pour recalibrer la reconstruction 3D dans le repère avion

# Premiers résultats

## Calcul de la déflexion

$$\text{Déflexion} = z_{\text{vol}} - z_{\text{sol}}$$

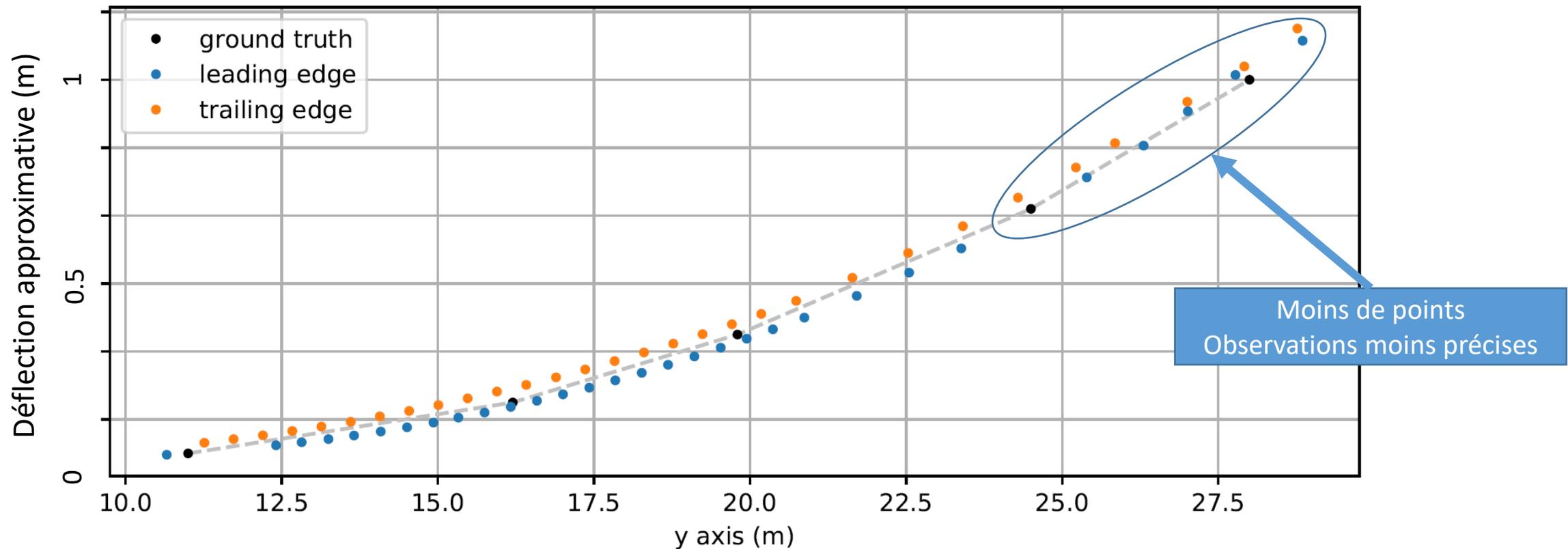


# Premiers résultats

## Calcul de la déflexion

$$\text{Déflexion} = z_{\text{vol}} - z_{\text{sol}}$$

- +/- 10 cm en bout d'aile
- Conforme aux prédictions



# Réponse aux attentes d'Airbus

## Environnement non contrôlé

Spécification	Solution	Validation
Variations de luminosité et ombres potentielles	<ul style="list-style-type: none"><li>- Algorithme de détection Cibles 2D sur faible contraste</li><li>- Cible imprimée avec une encre mate</li></ul>	OK
Travail avec les réflexions	<ul style="list-style-type: none"><li>- Vues multiples permettant la redondance et limitant la perte de cible</li><li>- Pas encore de solution lorsque le soleil est dans le champ de vision de toutes les caméras</li></ul>	Partielle

## Mesurande

Spécification	Solution	Validation
Volume de la scène de 10×30×10m	<ul style="list-style-type: none"><li>- 4 caméras qui regardent en se concentrant sur différentes parties de l'aile</li></ul>	OK
Fréquence entre 1 et 30Hz	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fréquence d'images réglable réglée sur 4Hz</li></ul>	OK
Durée de 4 heures, capacité limitée capacité du disque	<ul style="list-style-type: none"><li>- Fréquence d'image réglable, compression réglée pour environ 10h d'enregistrement</li></ul>	OK

# Réponse aux attentes d'Airbus

## Installation

Spécification	Solution	Validation
Positions limitées du capteur	- Installation flexible aux fenêtres	OK
Non intrusif	- Marqueurs affleurants - Appareils compacts - Émissions électromagnétiques limitées	OK
Installation rapide	- Installation simple du dispositif - Mouvements de caméra autorisés - Cibles autocollantes - Calibrage rapide et balayage des drones	1 jour

## Incertitude finale

Spécification	Solution	Validation
Incertitude de flexion inférieure à 10 cm	- Ajustement de faisceaux sous contraintes - Contre-mesure à partir des IMUs - Validation des erreurs propagées dans le chapitre 3	Partielle

# Plan

## A. Introduction

1. Contexte industriel
2. Objectifs et Enjeux
3. La reconstruction 3D sans contact

## B. Reconstruction 3D d'aile par photogrammétrie

1. Principe de la photogrammétrie
2. Méthodologie
3. Ajustement de faisceaux contraint

## C. Évaluation de l'incertitude de reconstruction 3D

1. Méthodologie
2. Principales sources d'incertitude
3. Propagation d'incertitude

## D. Validation industrielle

1. Essais en vol
2. Premiers résultats
3. Réponse aux attentes d'Airbus

## E. Conclusion et perspectives

# Conclusion et perspectives

- État de l'art des méthodes de reconstruction 3D sans contact
  - ✓ • Photogrammétrie répond au besoin – pertinent par rapport aux contraintes d'installation
  - ➔ • Utilisation de LIDAR possible
  - ➔ • Hybridation avec un capteur sur l'aile (fibre optique, centrale inertielle)
- Reconstruction 3D d'aile par photogrammétrie
  - ✓ • Choix de cibles quadrants
  - ➔ • Ajout de cibles circulaires et cibles codées
  - ➔ • Détection des cibles par apprentissage profond (YOLO)
  - ✓ • Ajustement de faisceaux sous contrainte
  - ➔ • Ajustement de faisceaux pondérés pour réduire l'influence des observations erronées
  - ➔ • Étude approfondie des méthodes d'optimisation
  - ➔ • Étude approfondie de l'impact des différentes contraintes

# Conclusion et perspectives

- Evaluation de l'incertitude de mesure
  - ✓ • Étude approfondie des sources d'incertitude
  - ✓ • Évaluation de l'incertitude par différentes méthodes et comparaison
  - ➔ • Propagation analytique avec contraintes mécaniques
  - ➔ • Évaluation statistique en vol
  - ➔ • Étude de l'incertitude de détection sans cibles
- Validation industrielle
  - ✓ • Preuve de concept de la photogrammétrie pour Airbus,
  - ✓ • Validation primaire de l'incertitude de mesure
  - ➔ • Étude de l'incertitude en fonction des paramètres de vol
  - ➔ • Étude de l'incertitude de torsion de l'aile
  - ➔ • Industrialisation du système
  - ➔ • Évaluation de l'ajustement de faisceaux sous contrainte en vol

Merci

