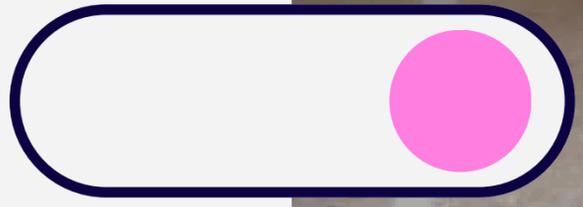


# Ajustement de la pose d'un vidéo-projecteur



Abdelhakim Ourkia, Bilal Azdad, Abdelmouhaimen Sarhane





## Contexte historique :

- La grotte Chauvet : plus ancien vestige classé au patrimoine mondial (38 000 ans).
- Visite limitée à une réplique (Chauvet 2, inauguré en 2015).

## Défi actuel :

Reproduire les peintures originales sur une réplique avec précision.

## --► Problèmes :

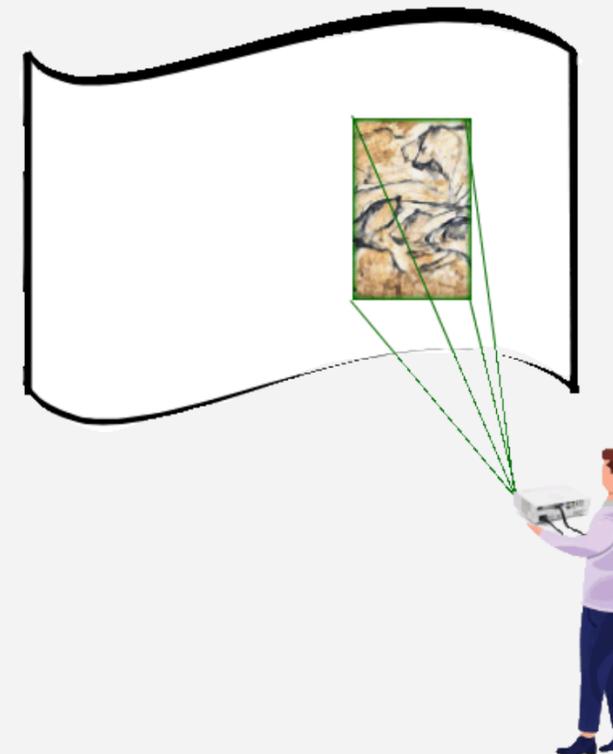
- Positionnement manuel fastidieux par essais erreurs.
- Fiabilité dépendante du jugement de l'artiste.



Originale



L'artiste utilisant un vieoprojecteur pour positionner les repères manuellement.

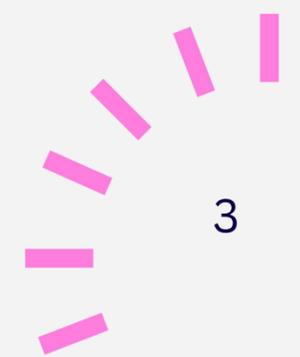




# Astuce



- ▶ Fixer le video projecteur dans une position qui recouvre toute la grotte.
- ▶ Projeter une image déformée qui s'adapte au relief obtenu par rendu.





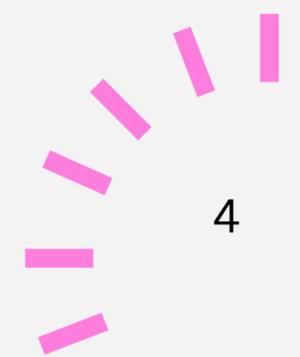
# Objectif Général

Reproduire fidèlement les peintures originales sur une Réplique de la grotte Chauvet.

## ► Solution Proposée :

### Étapes :

1. Capturer des photos de la réplique blanche avec une texture projetée.
2. Reconstruire le modèle 3D de la réplique (MVS).
3. Estimer la pose du vidéoprojecteur (SFM).
4. Aligner le modèle reconstruit avec le modèle original.
5. Projeter les peintures originales sur la réplique en utilisant un rendu.





# Décomposition du Problème :

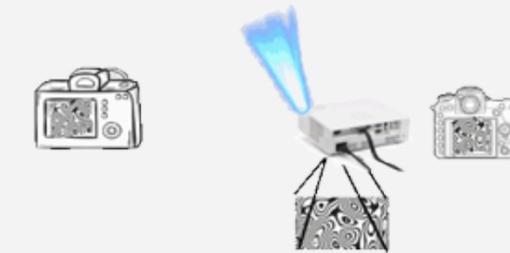
## 1. Calibration du vidéoprojecteur :

- ▶ Déterminer les paramètres intrinsèques.



## 2. Reconstruction 3D et estimation de pose :

- ▶ Utiliser MVS (Multi-Vues Stereo) et SfM (Structure-from-Motion).
- ▶ Sous-problème : Choisir la texture optimale pour la projection.



## 3. Alignement des modeles 3D :

- ▶ Recaler le modèle reconstruit sur le modèle original.
- ▶ Gérer les différences d'échelle et de résolution.



# Objectif 1: Calibrer un projecteur pour un systeme de reconstruction 3D.

Principes clés :

- ▶ Le projecteur est considéré comme une caméra inversée.
- ▶ Utilisation de la méthode de Zhang pour la calibration.
- ▶ Mesure des paramètres intrinsèques et extrinsèques.



Principe : Basé sur le modèle de caméra à trou d'épingle.

Équation de projection :

$$q = s \cdot M \cdot \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot Q \quad (1)$$

- ▶  $q$ : point image (2D).
- ▶  $Q$ : point objet (3D).
- ▶  $M$ : matrice des paramètres intrinsèques.
- ▶  $R$  et  $t$ : rotation et translation (paramètres extrinsèques).

- ▶ Le projecteur envoie un motif (damier) sur un écran ou une surface plane.
- ▶ La caméra, déjà calibrée capture l'image de ce damier projeté et nous donne les points  $Q$ .
- ▶ Le projecteur connaît les points  $q$ .
- ▶ Ensuite le video projecteur est calibré comme une caméra

# ○ ○ ○ ○ Comment calibrer le video-projecteur (paramètres intrinsèques) ?

## Outils :

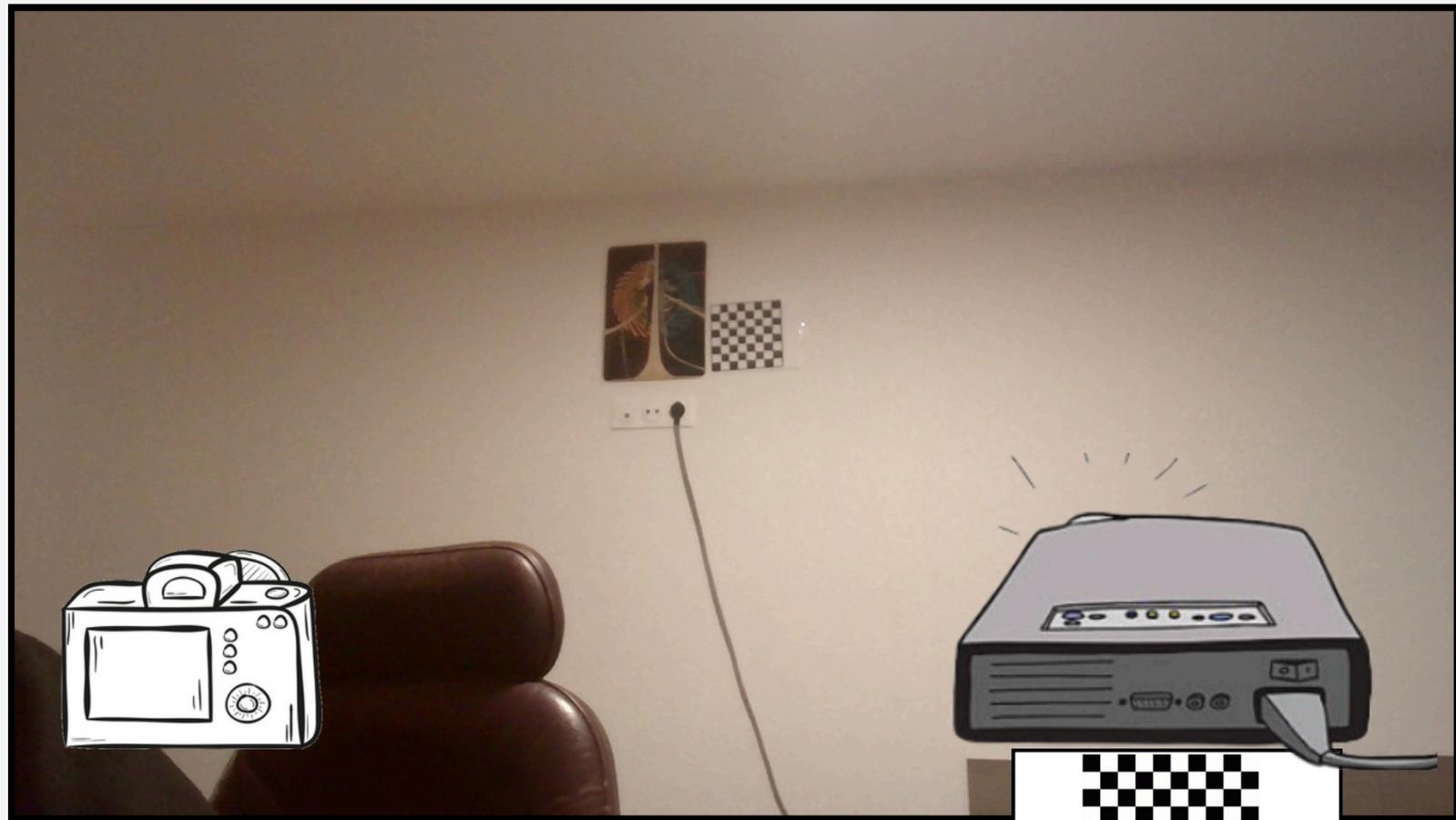
Vidéo-projecteur

Une image de damier

Appareil photo calibrée et fixe

Un damier imprimé

Un plan pour la projection



## Résultats:

Paramètres calculés :

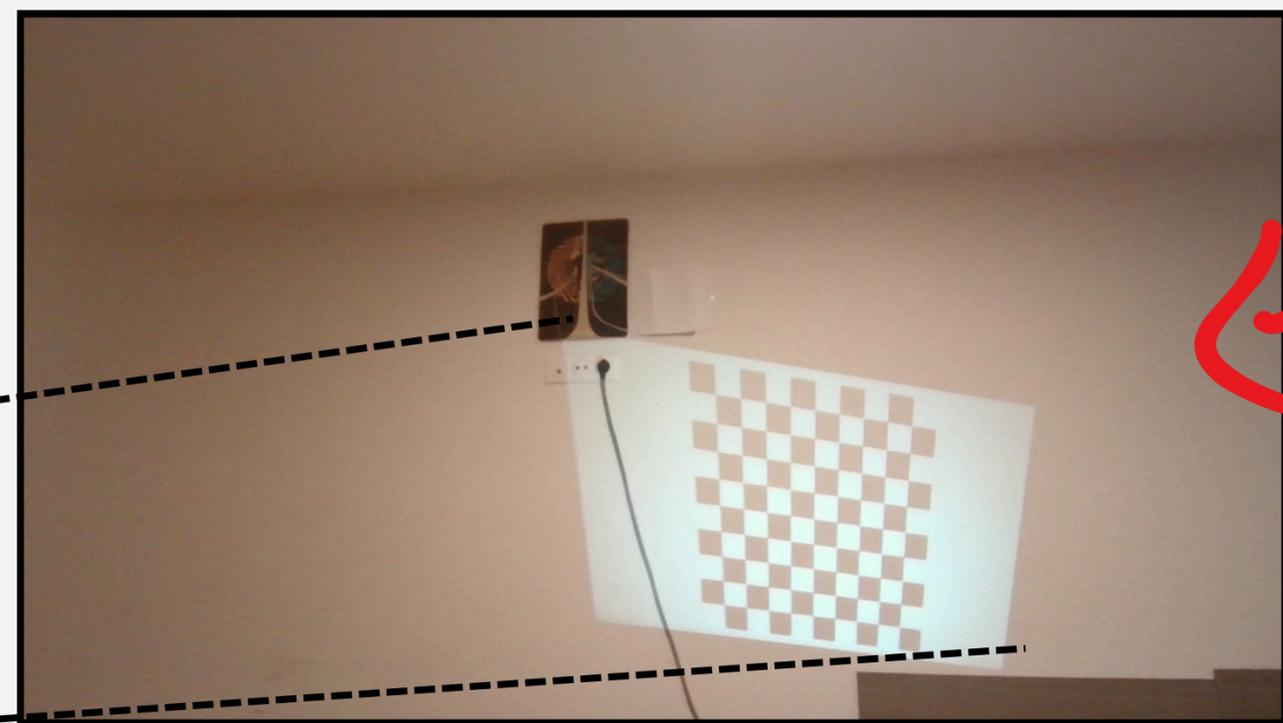
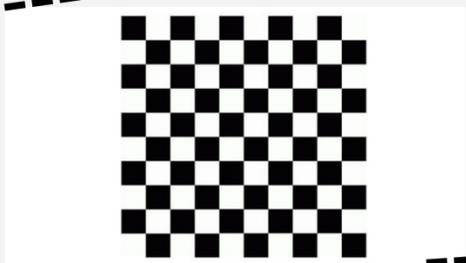
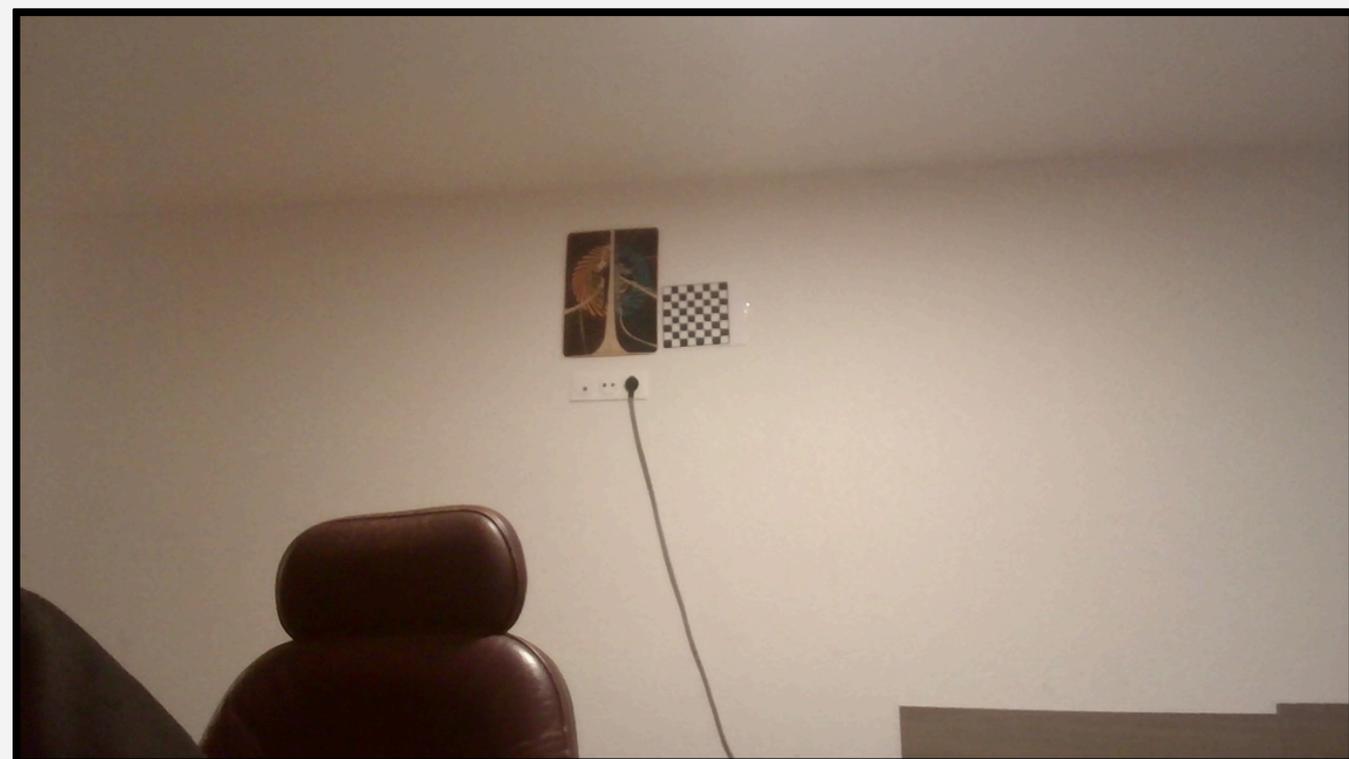
▶ Paramètres intrinsèques (distance focale, point principal, distorsion).

▶ Paramètres extrinsèques (position et orientation du projecteur).



# ○ ○ ○ ○ Étapes principales de la calibration de video-projecteur:

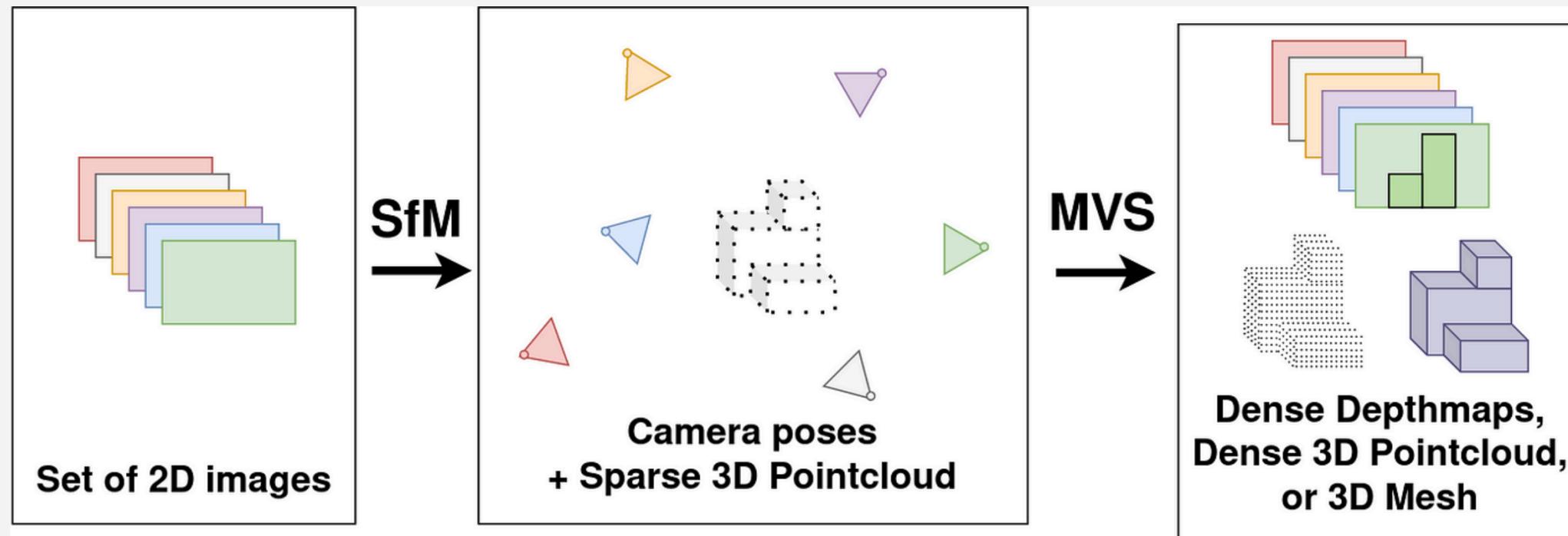
1. Capture d'une image d'un premier damier imprimé pour trouver les paramètres extrinsèques de l'appareil photo.
2. Projection d'une image de damier sur le même plan.
3. Détection des coins du damier projeté avec l'appareil photo.
4. Estimation des coordonnées des coins du damier projeté en utilisant les paramètres extrinsèques de la caméra.
5. Utilisation de la calibration d'OpenCV et les correspondances entre le damier projeté et l'image du damier pour trouver les paramètres intrinsèques du vidéoprojecteur.



## Objectif 2: *Obtention d'un modèle 3D riche*

Principes clés :

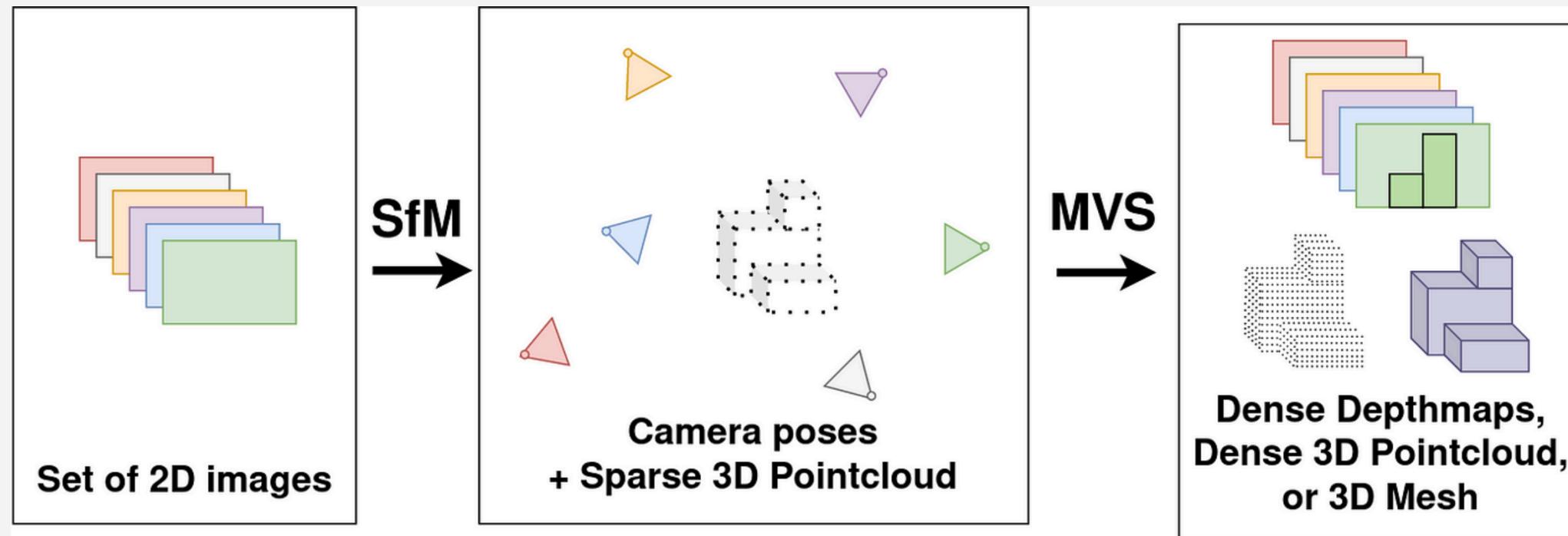
- ▶ SfM pour l'estimation de pose
- ▶ MVS pour l'enrichissement du modèle 3D



## Objectif 2: *Obtention d'un modèle 3D riche*

### ► Solution Proposée :

Utilisation du logiciel Metashape qui fournit simplement les poses (SfM) ainsi que les modèles 3D (MVS)





# Objectif 3: Alignement de deux modèles 3D

- ▶ **Objectif** : Aligner des nuages de points 3D d'une même scène avec des échelles différentes
- ▶ **Problème** : Les techniques de reconstruction 3D produisent des nuages de points avec des variations d'échelle.

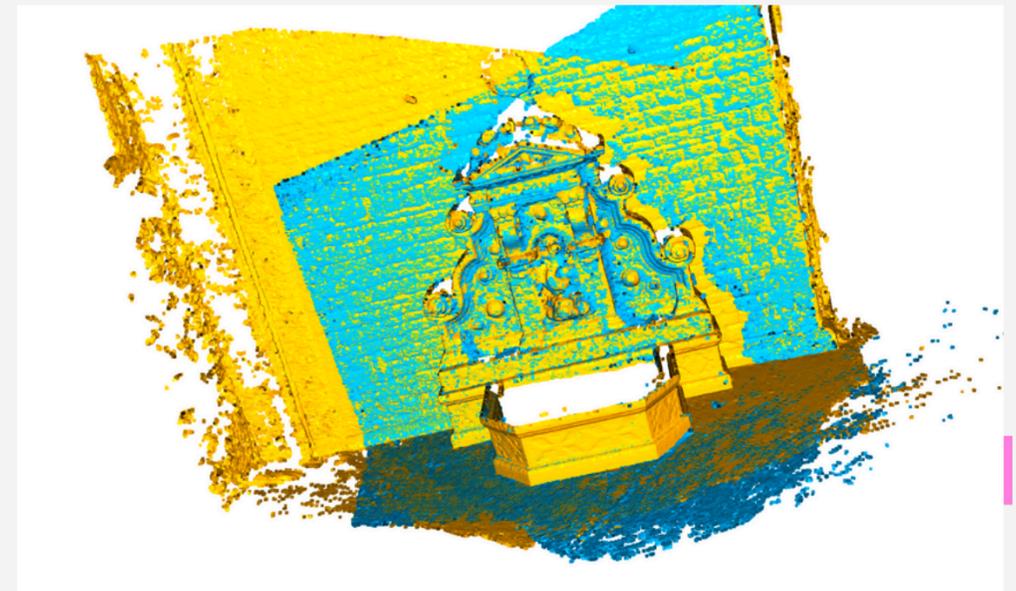
1. Modèle 3D de la grotte originale



2. Modèle 3D de la réplique



3. Les deux modèles 3D alignés





# Estimation du rapport d'échelle

## ► Solution Proposée :

1. La résolution du nuage de points.
2. Méthode semi-supervisée
3. Scale Ratio icp.



# 1. La résolution du nuage de points

Pour aligner les échelles de deux nuages de points 3D arbitraires on pourrait utiliser la méthode de résolution de maillage, qui calcule la médiane des distances entre tous les points 3D. Cependant, cette méthode échouera évidemment lorsque les deux nuages de points ont des densités de points différentes.

## 2.Méthode semi-supervisée

Cette méthode permet à l'utilisateur de sélectionner manuellement des points correspondants entre les deux nuages. L'échelle est ensuite estimée en calculant la médiane des distances entre les points sélectionnés dans chaque nuage, puis en divisant ces médianes. Cette approche assure une estimation robuste du facteur d'échelle.

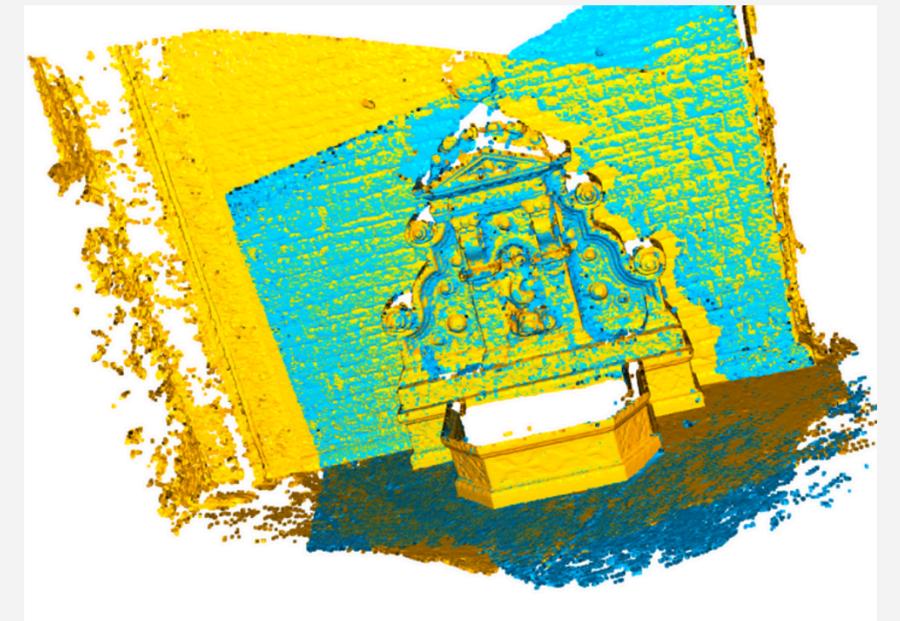
1.Calcul de la médiane des distances entre les points.



2.Calcul de la médiane des distances entre les points.



3.Division des deux résultats pour déterminer le facteur d'échelle.



# 3.Scale Ratio icp

Idée principale :

- ▶ Transformer le problème d'alignement des échelles en un problème d'alignement unidimensionnel des courbes cumulatives.
- ▶ Utiliser une variante de l'algorithme ICP (Iterative Closest Point) pour estimer directement le rapport d'échelle



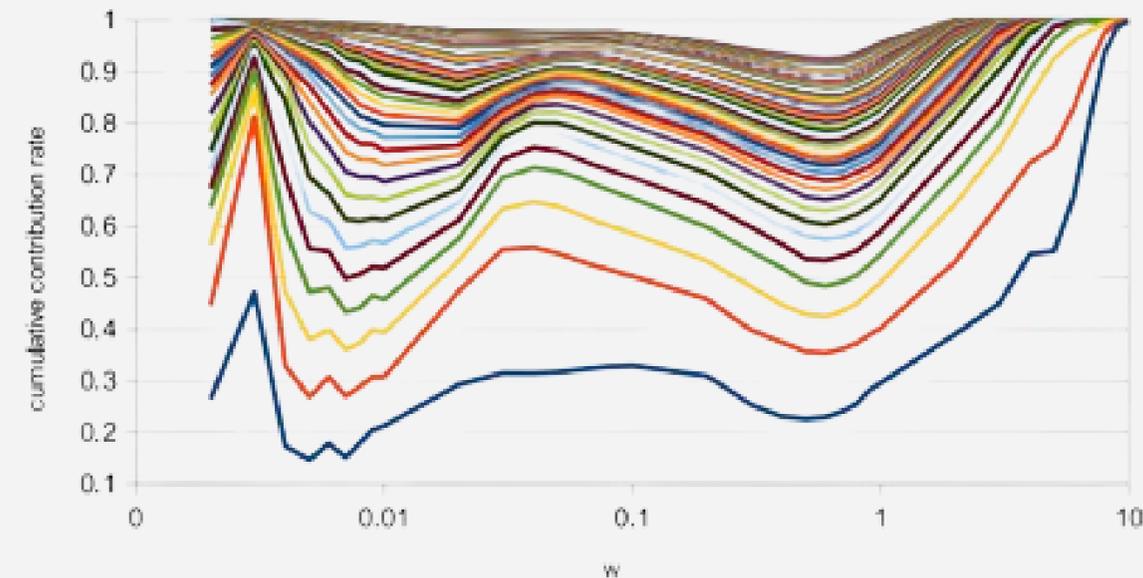
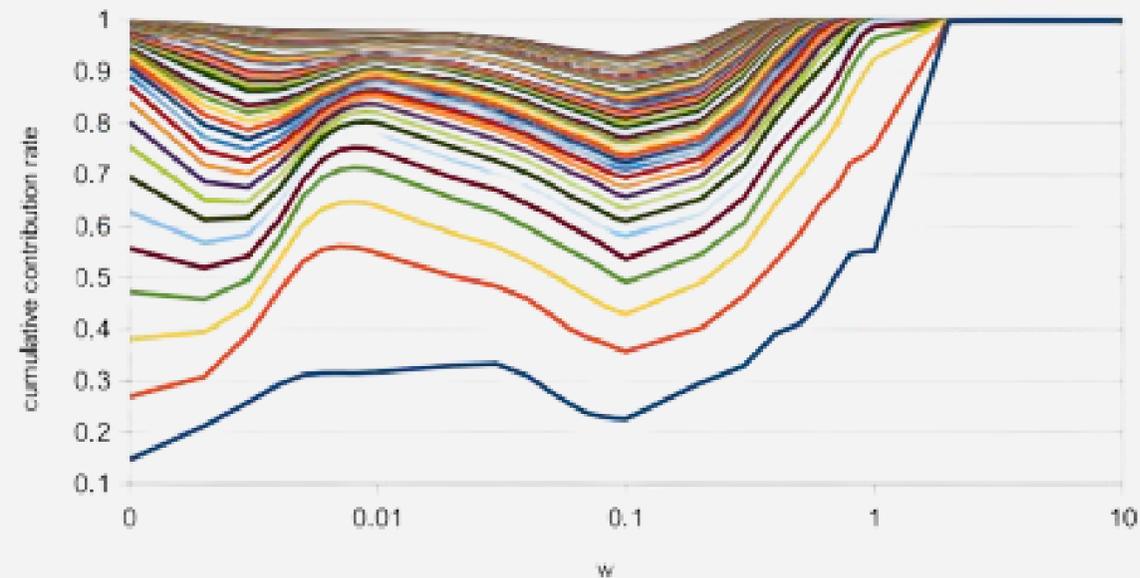
## Étapes principales de la méthode

### 1. Génération des courbes cumulatives (PCA sur images de spin) :

- Utiliser des images de spin pour représenter les caractéristiques locales des nuages de points.
- Calculer les valeurs propres et les taux de contribution cumulatifs à partir de la décomposition PCA des images de spin.

### 2. Alignement des courbes :

- Les courbes sont supposées différer uniquement par un facteur d'échelle.
- Définir un objectif à minimiser pour aligner les courbes



## Étapes principales de la méthode

### 3. Itérations ICP pour estimer le facteur d'échelle :

- Initialisation : Recherche exhaustive pour une estimation initiale du rapport d'échelle  $t$
- Correspondance : Trouver les correspondances entre les points des deux courbes.
- Optimisation : Mettre à jour  $t$  en minimisant  $E(t)$

**Fonction à minimiser :**

$$E(t) = \sum_d \sum_i \left\| \begin{pmatrix} y_{w'_i}^d \\ w'_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{w_i}^d \\ tw_i \end{pmatrix} \right\|^2$$

où  $x_{w_i}^d$  et  $y_{w'_i}^d$  sont les valeurs des courbes cumulatives respectives.

## Images de spin : Caractéristiques locales

- ▶ Une image de spin représente la géométrie locale autour d'un point  $\mathbf{p}_i$  :

$$\alpha_{ij} = \sqrt{\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|^2 - (\mathbf{n}_i^T (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j))^2}$$

$$\beta_{ij} = \mathbf{n}_i^T (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)$$

### Condition de sélection :

- ▶ Seuls les points voisins  $\mathbf{p}_j$  proches de  $\mathbf{p}_i$  sont utilisés pour former une image de spin.
- ▶ Les conditions sont :

$$\alpha_{ij} \leq w \quad \text{et} \quad |\beta_{ij}| \leq w$$

### Construction de l'image de spin :

- ▶ Les distances  $(\alpha_{ij}, \beta_{ij})$  sont discrétisées pour construire une image 2D, appelée image de spin.
- ▶ Ces images ne sont pas invariantes à l'échelle, d'où l'importance de l'étape d'estimation du rapport d'échelle.

## Etapes de l'algorithme Scale Ratio ICP

### Principe :

- ▶ On suppose que les courbes  $c1_d^w$  et  $c2_d^w$  diffèrent uniquement par un facteur d'échelle  $t$ , ou :

$$c1_d^w = \{x_{w_i}^d, w_i\} \quad \text{et} \quad c2_d^w = \{y_{w'_i}^d, w'_i\} \quad \text{où} \quad 1 \leq d \leq m^2.$$

- ▶ L'objectif est d'estimer  $t$  pour aligner ces courbes.

### Fonction à minimiser :

$$E(t) = \sum_d \sum_i \left\| \begin{pmatrix} y_{w'_i}^d \\ w'_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{w_i}^d \\ tw_i \end{pmatrix} \right\|^2$$

où  $x_{w_i}^d$  et  $y_{w'_i}^d$  sont les valeurs des courbes cumulatives respectives.

### Etapes de l'alignement :

#### 1. Initialisation :

- ▶ Utiliser une recherche exhaustive pour trouver une estimation initiale  $t_{\text{init}}$ .
- ▶ Définir une plage de recherche basée sur la résolution du maillage.

#### 2. Trouver les correspondances :

- ▶ Pour chaque point d'une courbe, trouver le point correspondant dans l'autre courbe en fonction de  $t$ .

#### 3. Mise à jour du rapport $t$ :

$$t = \frac{\sum_i w_i w'_i}{\sum_i w_i^2}$$

#### 4. Itérations :

- ▶ Répéter les étapes 2 et 3 jusqu'à convergence.



# Alignement de deux modèles 3D

## ► Solution Proposée :

1. Pour aligner deux modèles 3D, une estimation initiale de la transformation entre les deux nuages de points est d'abord effectuée. Ensuite, l'algorithme ICP est appliqué en utilisant cette transformation initiale, car il repose sur un alignement approximatif pour converger efficacement.

# 1. Global registration

## Étapes principales de la méthode

### 1. Prétraitement des nuages de points :

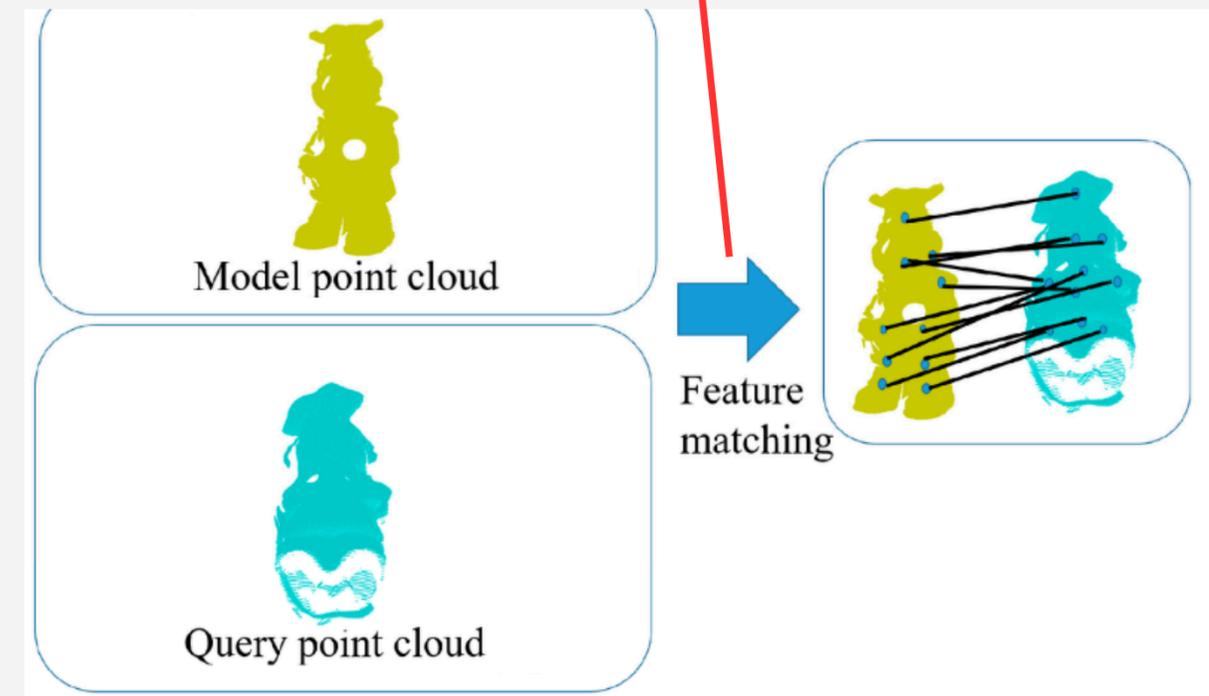
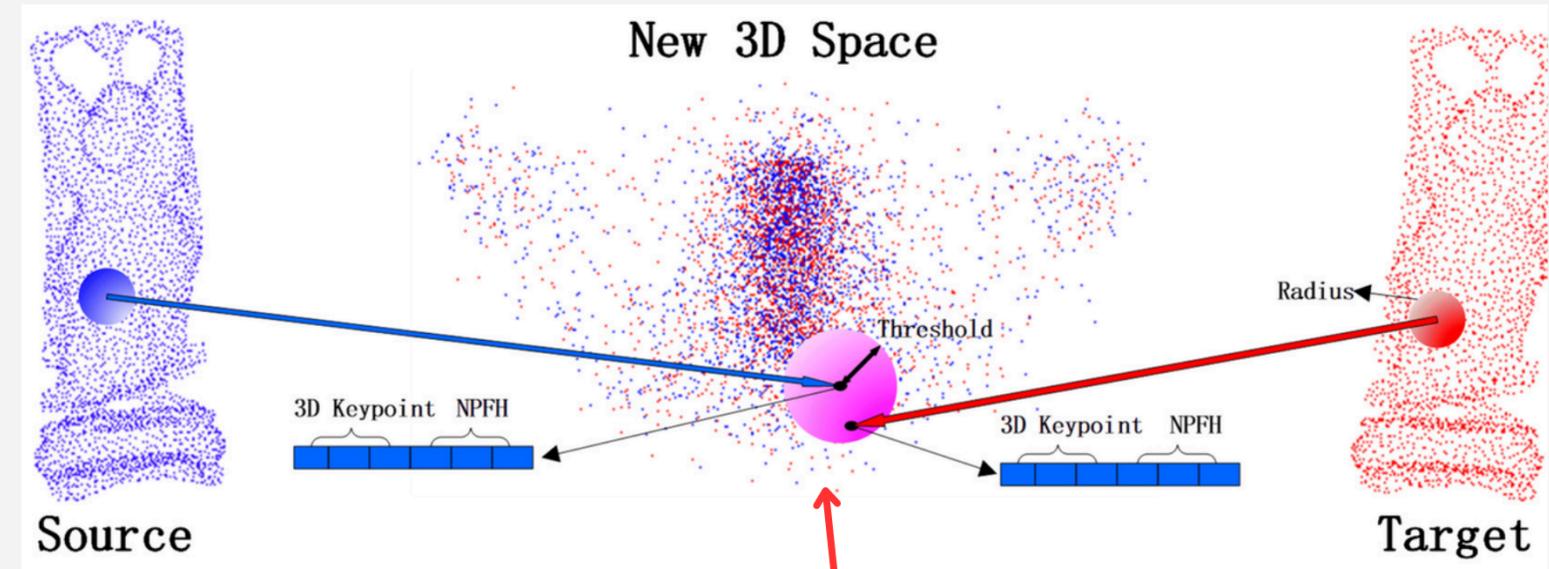
- Sous-échantillonnage des nuages de points avec une taille de voxel définie.
- Estimation des normales à partir du nuage sous-échantillonné.
- Calcul des descripteurs FPFH pour chaque point du nuage.

### 2. RANSAC pour l'alignement global :

- Sélection aléatoire de points du nuage source.
- Recherche des points correspondants dans le nuage cible en utilisant les descripteurs FPFH.
- Application de techniques de pruning pour éliminer les mauvaises correspondances

### 3. Calcul de la transformation :

- Utilisation des correspondances validées pour calculer la transformation entre les deux nuages de points.



## 2. Point-to-plane ICP

### Étapes principales de la méthode

#### 1. Trouver le jeu de correspondances :

- Identifier les correspondances entre le nuage de points cible et le nuage de points source, ce dernier étant transformé avec la matrice de transformation actuelle.

#### 2. Mettre à jour la transformation :

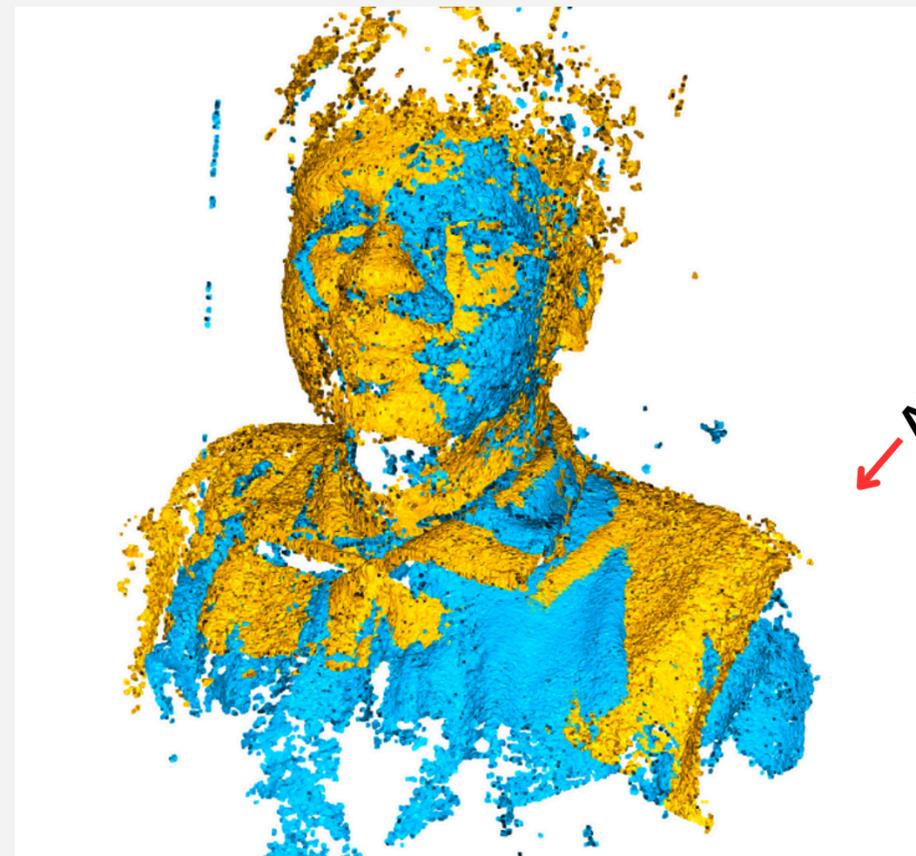
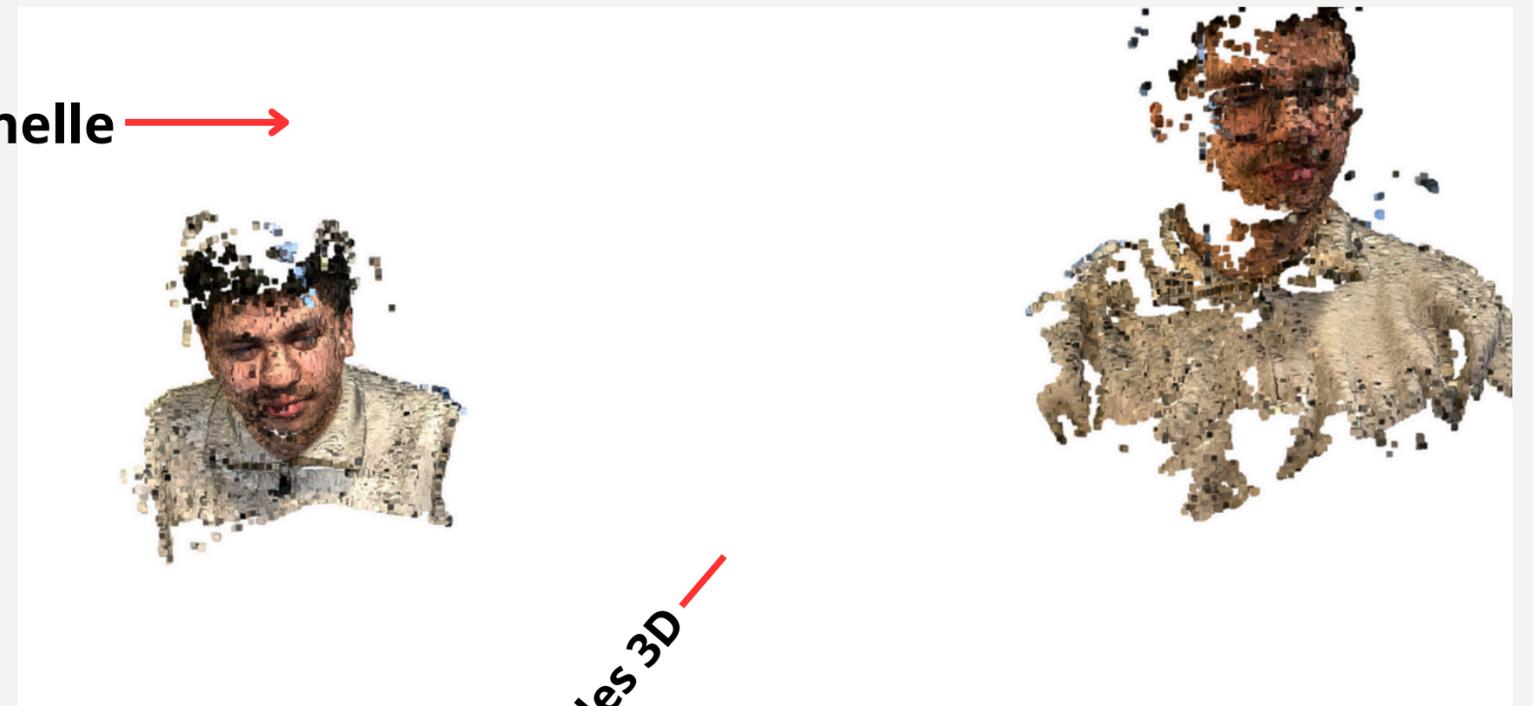
- Minimiser une fonction objective définie sur le jeu de correspondances trouvé, afin d'ajuster la transformation.

$$E(\mathbf{T}) = \sum_{(\mathbf{p}, \mathbf{q}) \in \square} \left( (\mathbf{p} - \mathbf{T}\mathbf{q}) \cdot \mathbf{n}_{\mathbf{p}} \right)^2,$$

# Résultat



Estimation du rapport d'échelle



Alignement des deux modèles 3D

# Conclusion

## Ce que nous avons fait

- ▶ Calibrage du vidéo projecteur, recalage des modèles 3D

## Ce qu'il nous reste à faire

- ▶ Rendu Inverse : projection de l'image déformée calculée par le rendu inverse en conditions réelles

[Lien vers le Code](#)