

Les techniques de numérisation utilisées pour la reproduction des cartes et plans de grands formats conservés par les Archives nationales de France

(espaces de traitement, méthodologies, archivage)

*Marc Paturange, chef de travaux d'art principal, département de l'image et du son,
responsable des ateliers de photographie et de numérisation des Archives nationales de France*

« Journées nationales du Patrimoine écrit », 15 et 16 juin 2023, Aix-en-Provence

Projet Verspera



Archives nationales de France/DIS

« Le projet de recherche **VERSPERA, numérisation et modélisation des plans de Versailles sous l'Ancien Régime**, vise à rendre accessibles à tous, les plans du domaine de Versailles sous l'Ancien Régime et à en restituer certains espaces grâce à la numérisation et à la modélisation 3D.

Depuis 2013, le Centre de recherche du château de Versailles pilote en partenariat avec les Archives nationales, la Bibliothèque nationale de France et le laboratoire ETIS (Équipes Traitement de l'Information et Systèmes, UMR8051, Cergy Paris Université / ENSEA Cergy / CNRS), avec le soutien financier de la Fondation des sciences du patrimoine et du ministère de la Culture, une vaste opération de numérisation de près de 9 000 documents graphiques relatifs à Versailles (château, parc, domaine, administrations royales et urbanisme).

Ces plans sont essentiellement conservés dans les fonds des Archives nationales (7 500 dessins du fonds du secrétariat d'État de la Maison du roi sous l'Ancien Régime), mais également dans celui de la Bibliothèque nationale de France (1 000 dessins de la collection Robert De Cotte) et de l'Établissement public du château, du musée et du domaine national de Versailles (200 dessins). »

<https://youtu.be/dMFKOSbRMjA>



Archives nationales de France/DIS

Projet Verspera



Archives nationales de France/DIS

« Ce corpus documentaire est issu du travail des agences des premiers architectes du roi (Louis Le Vau, Richard Mique, Jules Hardouin-Mansart, Robert De Cotte, Ange-Jacques Gabriel) qui évoquent l'excellence de l'architecture française aux XVII^e et XVIII^e siècles. La reproduction en images numériques de haute qualité de ce corpus unique a nécessité une importante campagne de restauration de **750 documents fragiles et précieux** et la mise en place de procédures innovantes pour faire face à des défis techniques, notamment dus aux dimensions de certains documents et plans de très grand format (jusqu'à 3 m x 4 m) ou à la présence de nombreuses et complexes retombes de papier... À partir de 2017, le projet parvient à mettre en ligne gratuitement 16 000 images numériques d'un corpus exceptionnel et extrêmement varié (plans généraux, coupes, élévations, détails d'architecture ou de décoration). Cette opération permet la préservation de ces fonds uniques, fragiles et difficilement accessibles jusqu'ici et facilite le travail de la recherche.

En parallèle, le laboratoire ETIS rattaché à l'université de Cergy-Pontoise a développé un logiciel original de modélisation 3D à partir des plans anciens en 2D du château de Versailles. »

<https://verspera.hypotheses.org/>

Le projet a été piloté aux Archives nationales de France par Pierre Jugie, conservateur général au département du Moyen Age et de l'Ancien Régime, en charge du fonds de la Maison du Roi, en étroite relation avec Mathieu Da Vinha, responsable du Centre de recherche du Château de Versailles et l'équipe de Michel Jordan au Laboratoire ETIS.

L'atelier photographique des Archives nationales de France est impliqué dans le projet Verspera depuis janvier 2013.

« Gros plan sur la numérisation » Marc Paturange, Gazette des Archives, 2015

https://www.persee.fr/doc/gazar_0016-5522_2015_num_239_3_5338

Cette opération a nécessité de nombreux transferts de documents depuis le site historique parisien où sont conservés les documents originaux vers les espaces de traitement de haute technologie situés à Pierrefitte.

Projet Verspera

L'atelier de photographie des Archives nationales a effectué la numérisation des documents fragiles, complexes et hors formats dans le but de créer des substituts numériques aux originaux.

Les documents plus simples ont été traités par la société Arkhenum.

L'atelier s'est appuyé sur les fichiers de récolement réalisés par le responsable de fonds et son équipe scientifique. Je tiens à saluer ici ce remarquable travail qui a guidé pas à pas les photographes dans leur mission.

Trois corpus de documents ont été constitués dans ce projet :

AN1 : le Château

AN2 : Les jardins et le Trianon

AN3 : les bâtiments annexes

L'opération sur le Corpus AN3 s'achèvera à la fin de l'année 2023.

Pour chacun de ces corpus, 3 lots sont distincts :

Lot 1 : documents confiés en numérisation externe sans restauration

Lot 2 : numérisation directe en interne sans restauration

Lot 3 : numérisation en interne après restauration

Quelques données chiffrées :

11337 images sur les 3 corpus confondus réalisées en numérisation externe.

2009 vues réalisées sur les 3 corpus en interne (Corpus AN3 en cours de réalisation)



Archives nationales de France/DIS

Verspera AN3 lot3, situation avril 2023

536 fichiers images réalisés au Métis et au GF
dont 174 réalisés depuis septembre 2022

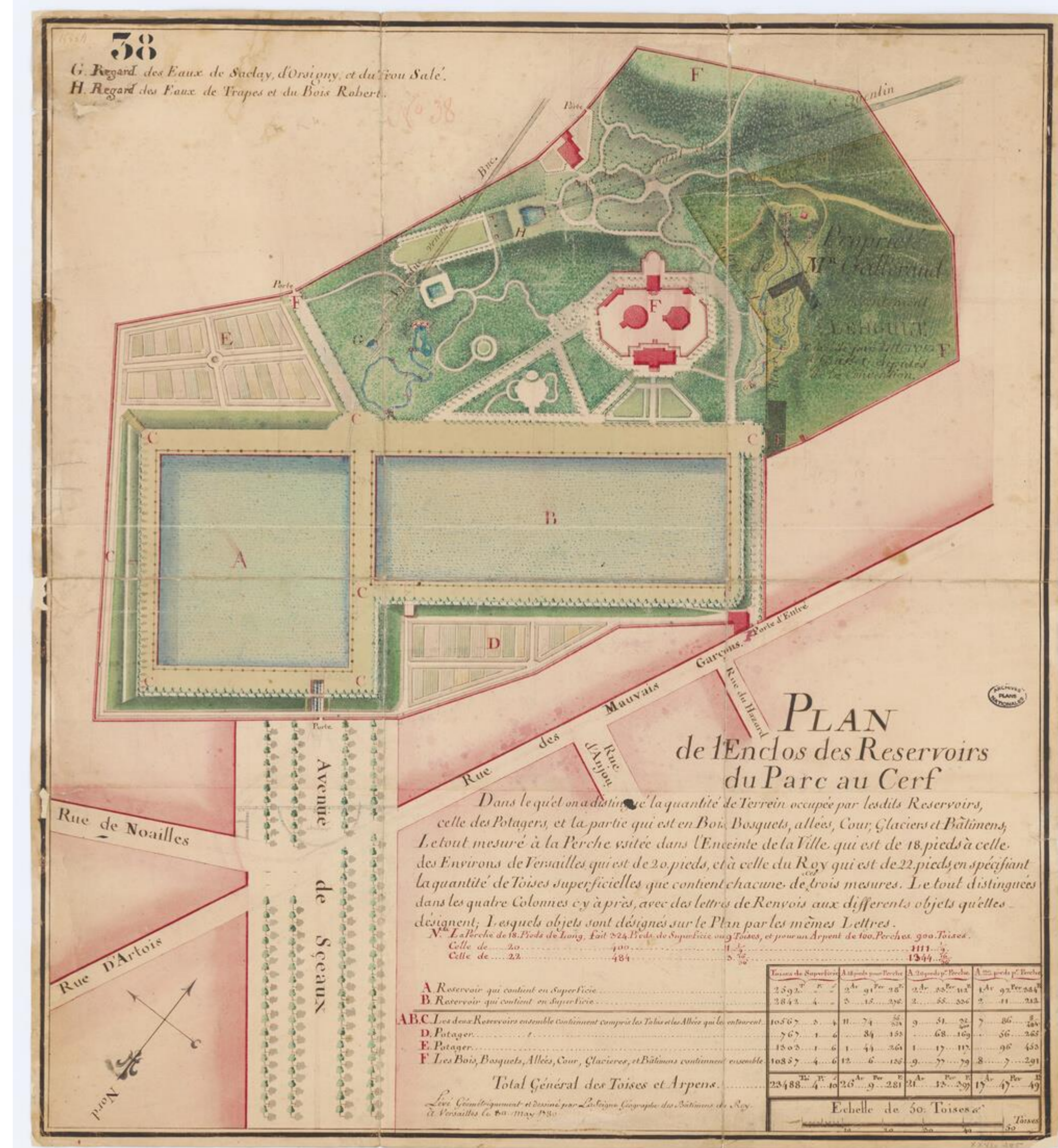
Reste à réaliser à ce jour :

29 documents restant à numériser
56 vues à réaliser

Travaux très délicats à réaliser, mise en place de
binômes nécessaire

Archivage des fichiers numériques :

Serveurs de type NAS au sein de l'institution
Serveur photothèque
Serveur réservé aux codes projets de
numérisation (ex Verspera)
Archivage à froid sur bandes LTO6 au CNMN
d'Espeyran (envois réguliers de DD nomades
pour codes projets réalisés par prestataires et
production similaire interne)
Etude phase test du **SIA numérique** (chantier de
faisabilité en cours)



Projet Verspera

Matériels employés

Pieds photo FOBA sur rail avec bras coulissants

Numériseur Métis DRSA0, surface d'acquisition inférieure à 93 x 130 cm (studio spécifique)

Chambre ALPA 12XY et /ou **Boitier PhaseOne XF** avec dos numérique moyen format 80 Mpixels et 100 Mpixels

Studio grand format avec plateau aspirant vertical de 2 x 3 m

Studio très grand format avec plateau magnétique de 3,50 x 5m

Capture d'images en mode connecté, logiciel Capture One

Eclairage studio flash Broncolor et grandes boîtes à lumière

Assemblage d'images par Photoshop, fonction Photomerge

Ce projet comporte de nombreux **plans à retombes** de tailles variables qui simulent l'empilement des niveaux ou projets envisagés sur les bâtiments : ces retombes doivent être numérisées relevées ou rabattues et chaque variation d'un état de la retombe doit être compris localement mais aussi sur la vue d'ensemble.

Toutes les retombes sont identifiées et numérotées et il est fréquent de les saisir relevées ou rabattues simultanément par ensembles pour comprendre des niveaux d'étages sur plusieurs bâtiments.

A chaque état du document demandé correspond une image unique, les métadonnées sont importées à partir du fichier de récolement à l'issue de la numérisation de chaque plan.

Un plan à retombes doit donc être numérisé en vues multiples fixant tous ses états variables.

Protocoles de numérisation:

Résolution d'acquisition de **300 dpi** d'après le document original, en mode RVB, 8 bits, présence QP Card en marge pour restitution échelle et valeurs cibles

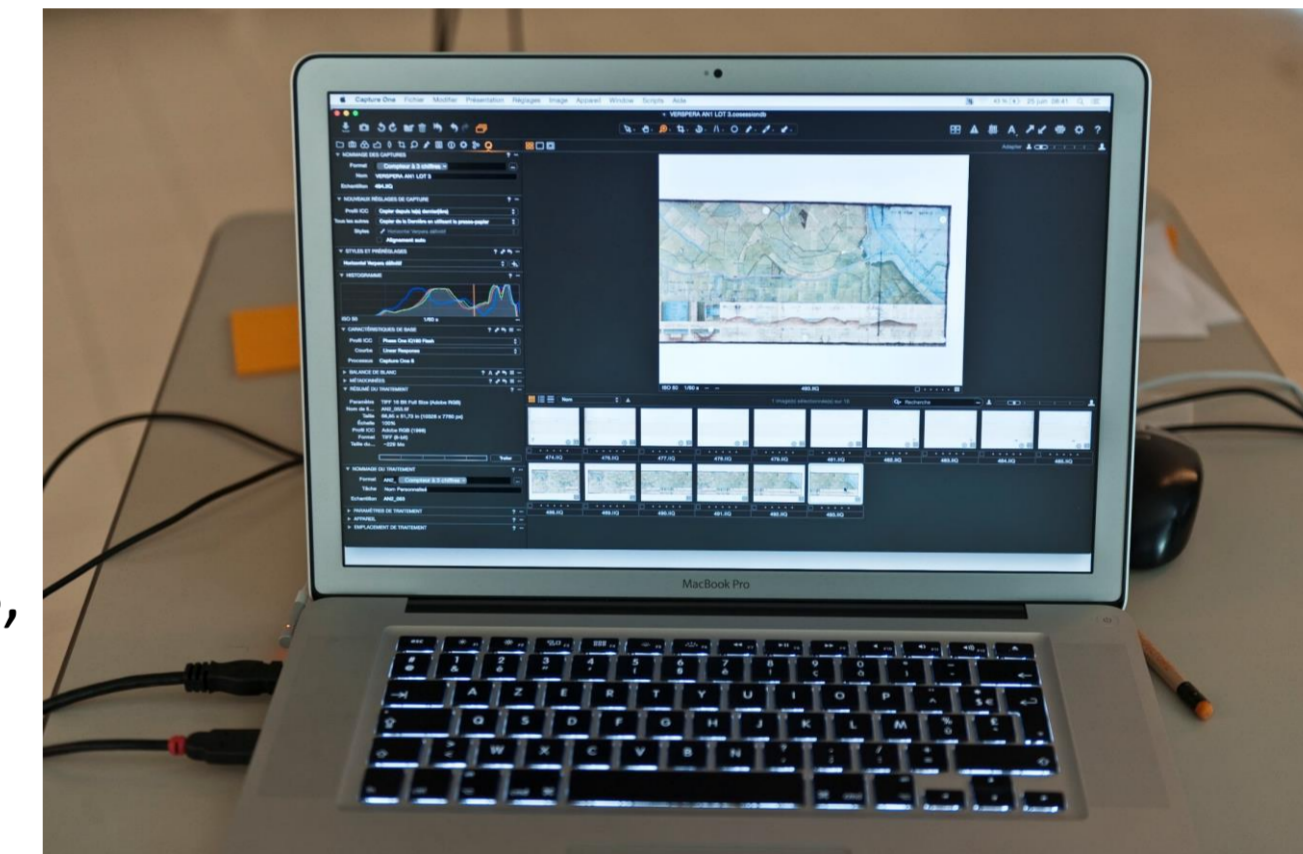
Documents dont formats inférieurs au format A0 :

scanner à balayage Métis DRSA0 avec vitre, acquisitions et assemblages d'images multiples avec recouvrement successifs de 50 % pour documents hors formats de dimensions en largeur inférieures à 93 cm

Cadrage intégral du document sur fond blanc avec marges techniques de 5 mm

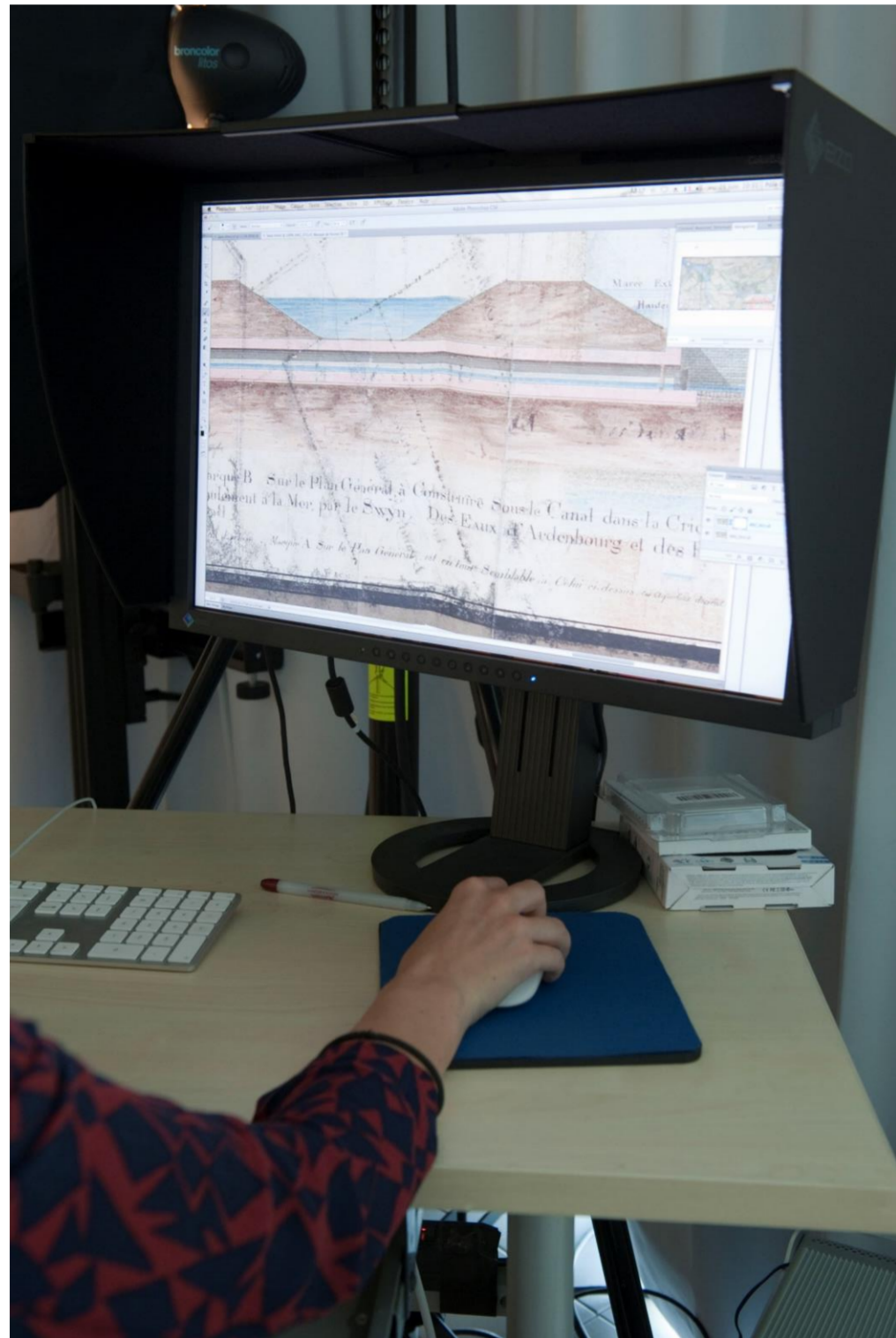
Documents dont formats supérieurs au format A0 :

Prises de vues numériques multiples sur plateau aspirant vertical sur fond noir ou plateau magnétique avec recouvrement minimal de 50 % entre chaque vue pour couvrir la surface du document original avec dos numériques matriciels PhaseOne avec utilisation d'un pied Foba avec bras coulissant (dispositif orthonormé réglé avec télémètre laser et miroir)



Archives nationales de France/DIS

Projet Verspera



Archives nationales de France/DIS

La numérisation de plans de grands formats a nécessité la mise en place de nouvelles méthodologies et dispositifs de numérisation :

Dispositifs orthonormés avec plateaux verticaux de grande taille associés à des pieds colonnes de studio sur rails et bras coulissants ont été conçus en interne de manière à capter et numériser les documents par séquences d'images Haute définition face à un document original fixe.

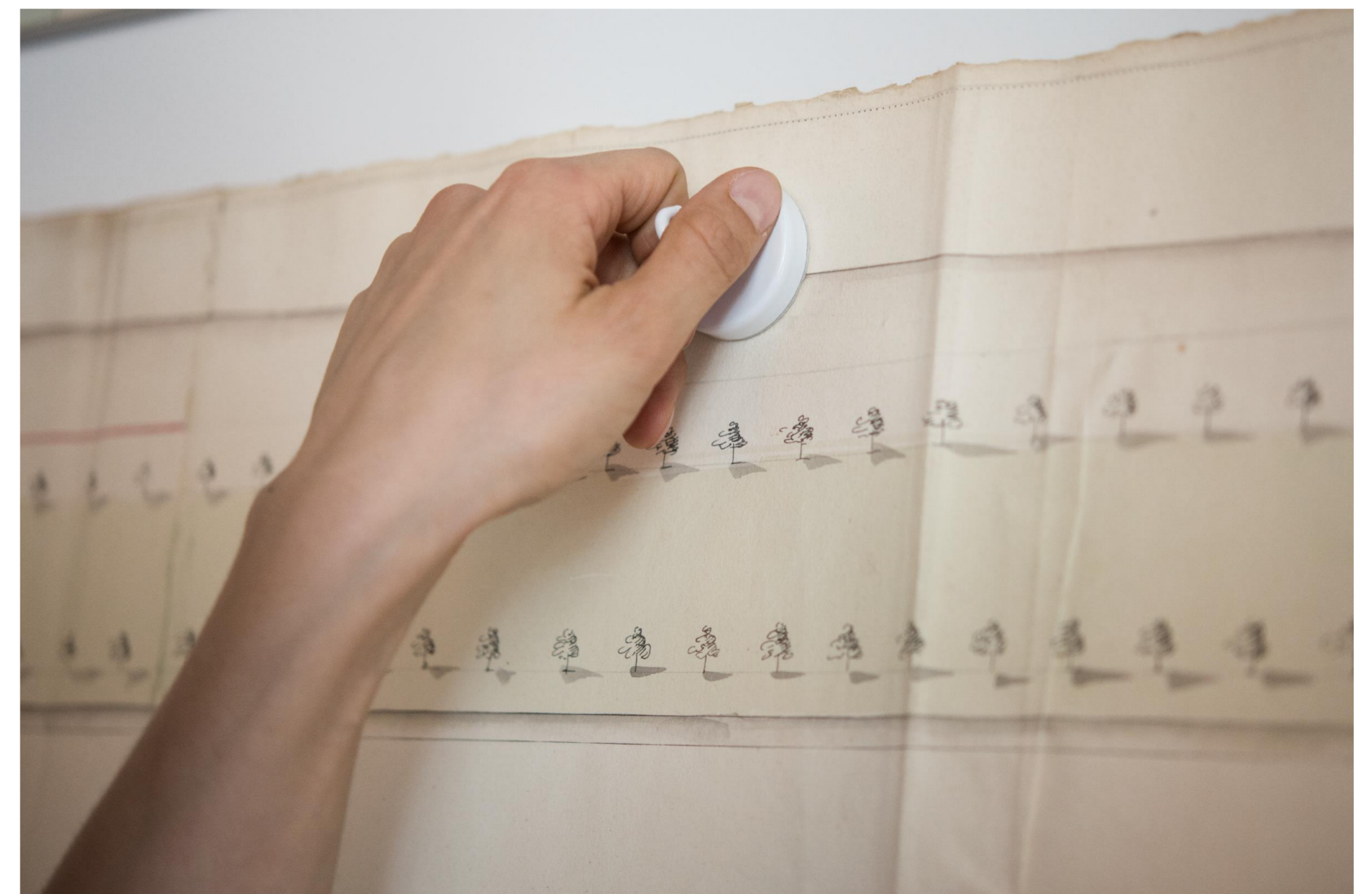
Une parfaite géométrie de l'installation est nécessaire pour garantir un résultat final optimal de la numérisation (emplois de mires de confusion et d'un miroir magnétique)

Les prises de vues successives se font avec un dos numérique de moyen format avec un recouvrement de 50 % entre chaque vues. l'éclairage flashes électroniques adapté et réparti sur ces plateaux techniques. La manipulation des originaux fragiles prévoit souvent le concours des restaurateurs.

La projection du cadrage est calculée pour correspondre à une résolution de 300 dpi en fonction de la définition de la caméra utilisée : un capteur de 100 mpixels offre une visée d'environ 80 x 120 cm.

L'assemblage se fait en post-production

Les documents sont souvent maintenus à plat par des aimants lorsque l'usage de vitres n'est pas possible afin de garantir une parfaite netteté des documents : ceux-ci doivent disparaître en post-traitement des images.



Archives nationales de France/DIS

Projet Verspera

Autres dispositifs de numérisation adaptés aux documents de grand format

Plateau aspirant Charpiot -Reinhel, dimensions utiles 2 x 3 m



Numériseur Métis DRSA0, dimensions utiles 93 x 130 cm; porte-livre ouvert sur les côtés permettant la numérisation de documents de grandes dimensions (plans roulés ou rouleaux de parchemins)

Film de démonstration, présentation du pôle image
<https://youtu.be/W5NUBXJ-BfA>



Projet Verspera

Méthodologie de plaquage par aimants

Les aimants sont disposés sur les retombes pour les maintenir à plat pour garantir netteté et géométrie des originaux.

Deux prises de vues sont nécessaires, les aimants doivent être déplacés sur chaque vue.

Les images sont ensuite superposées, la retouche à partir de Photoshop permet de gommer définitivement la présence des aimants et de leurs ombres.

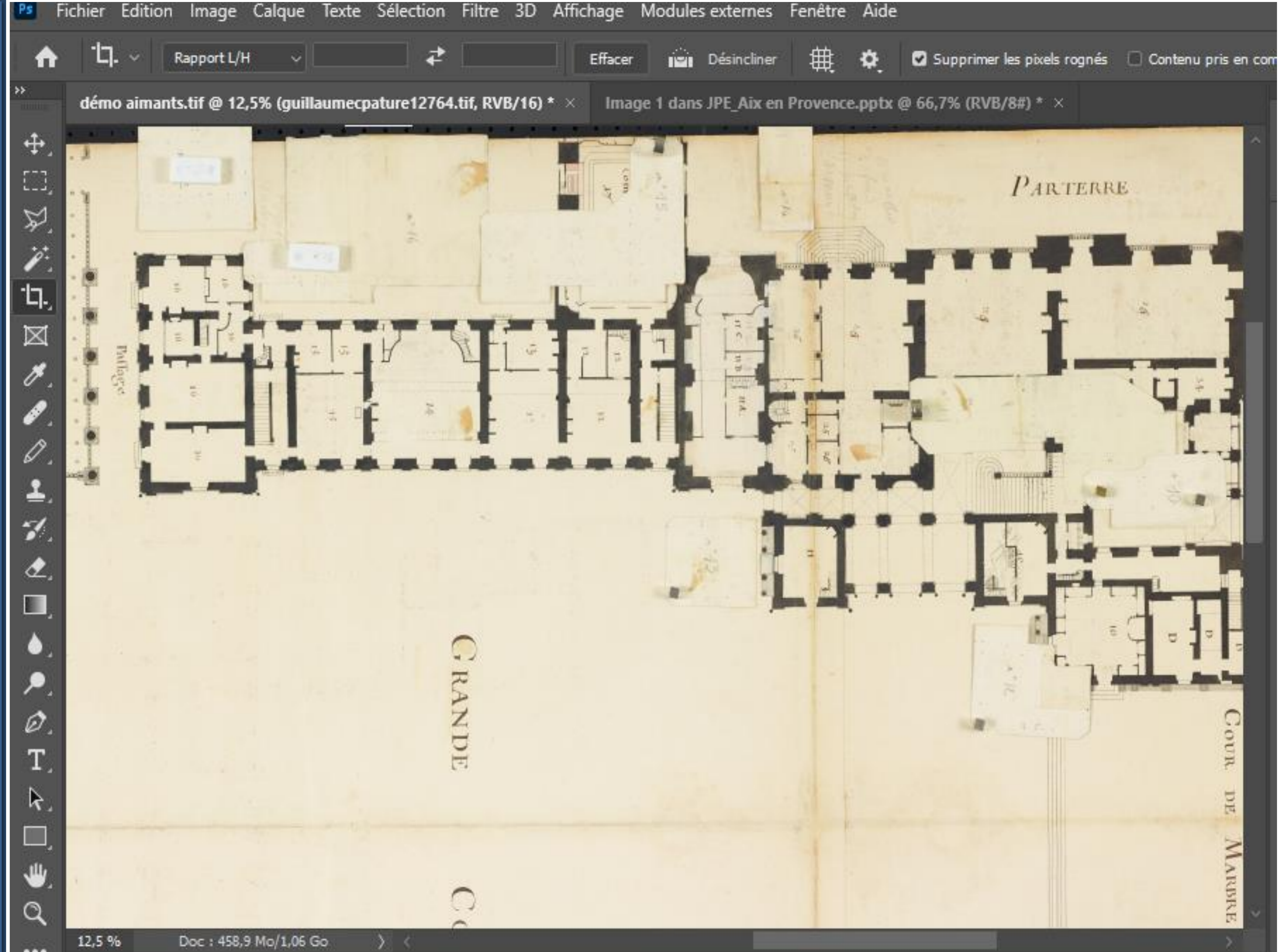
1^{ère} capture d'images



Projet Verspera

2ème capture
d'image avec
déplacements
d'aimants sur les
mêmes retombes

Il s'agit du même
cadrage



Projet Verspera

Image finalisée
retouchée
dépourvue
d'aimants

Résultat final obtenu
avec superposition
et fusion des images
précédentes



Projet Verspera

Exemple d'un plan à retombes
Du Corpus AN 1 Verspera

O/1/1848/4/n°1

Plan général de la
surintendance, premier et
second étage

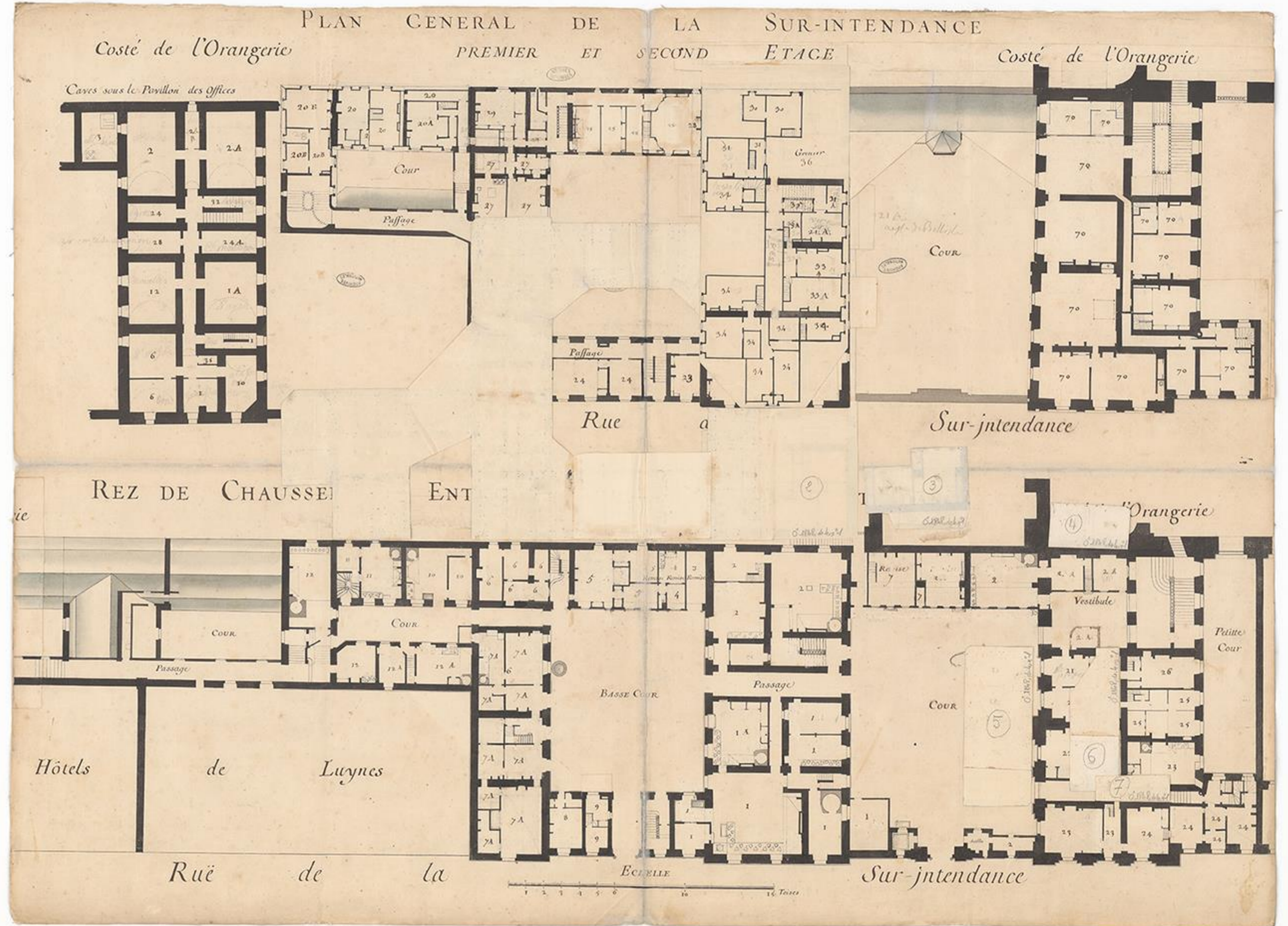
Numérisation faite avec
scanner Métis DRSA0

10 images pour fixer tous les
états successifs en vues
d'ensembles du document
avec restitution des retombes
relevées et rabattues

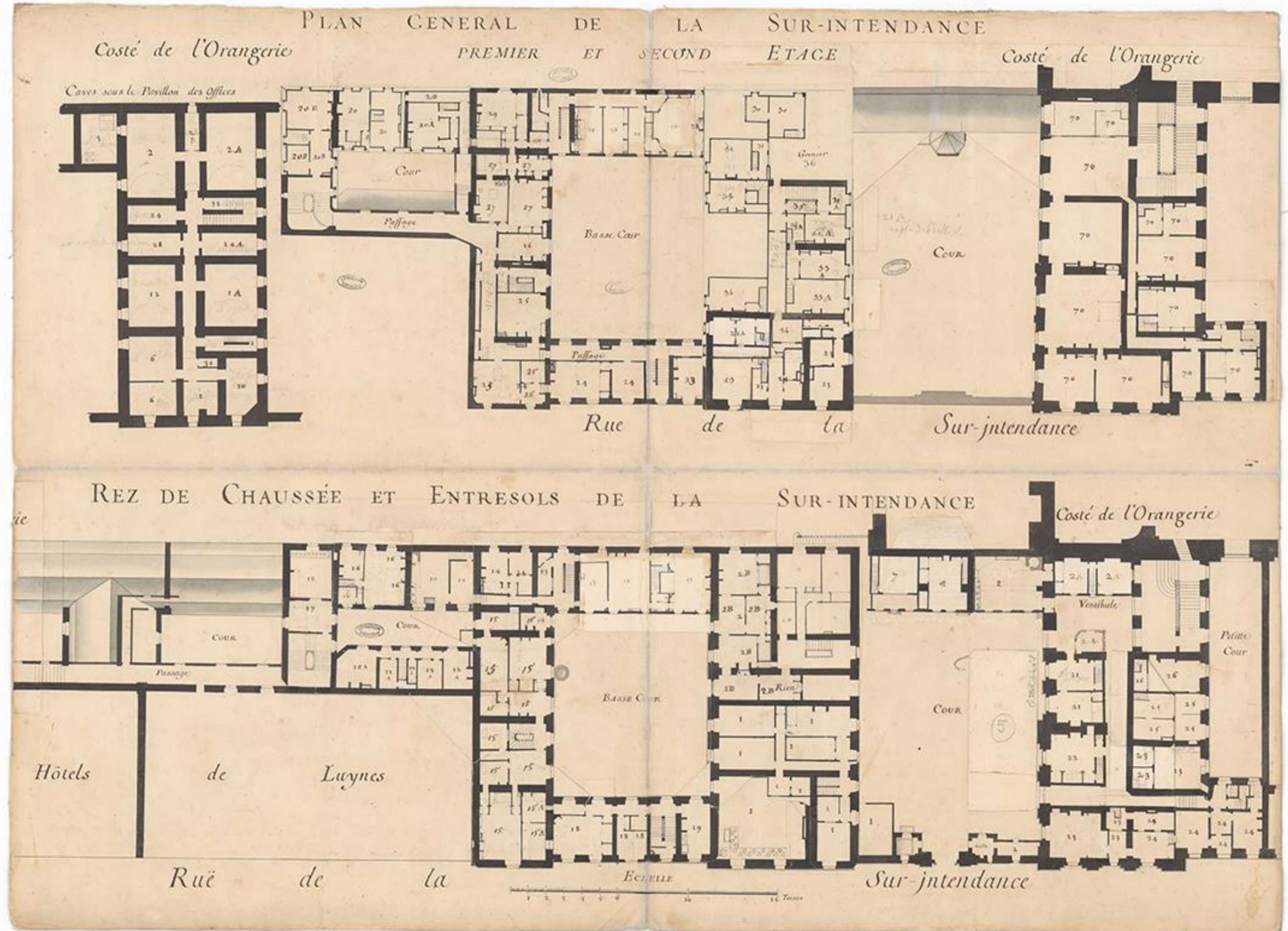
Images directes réalisées
sous la vitre du scanner qui
effectue la mise à plat du
document et dispense de
l'utilisation des aimants



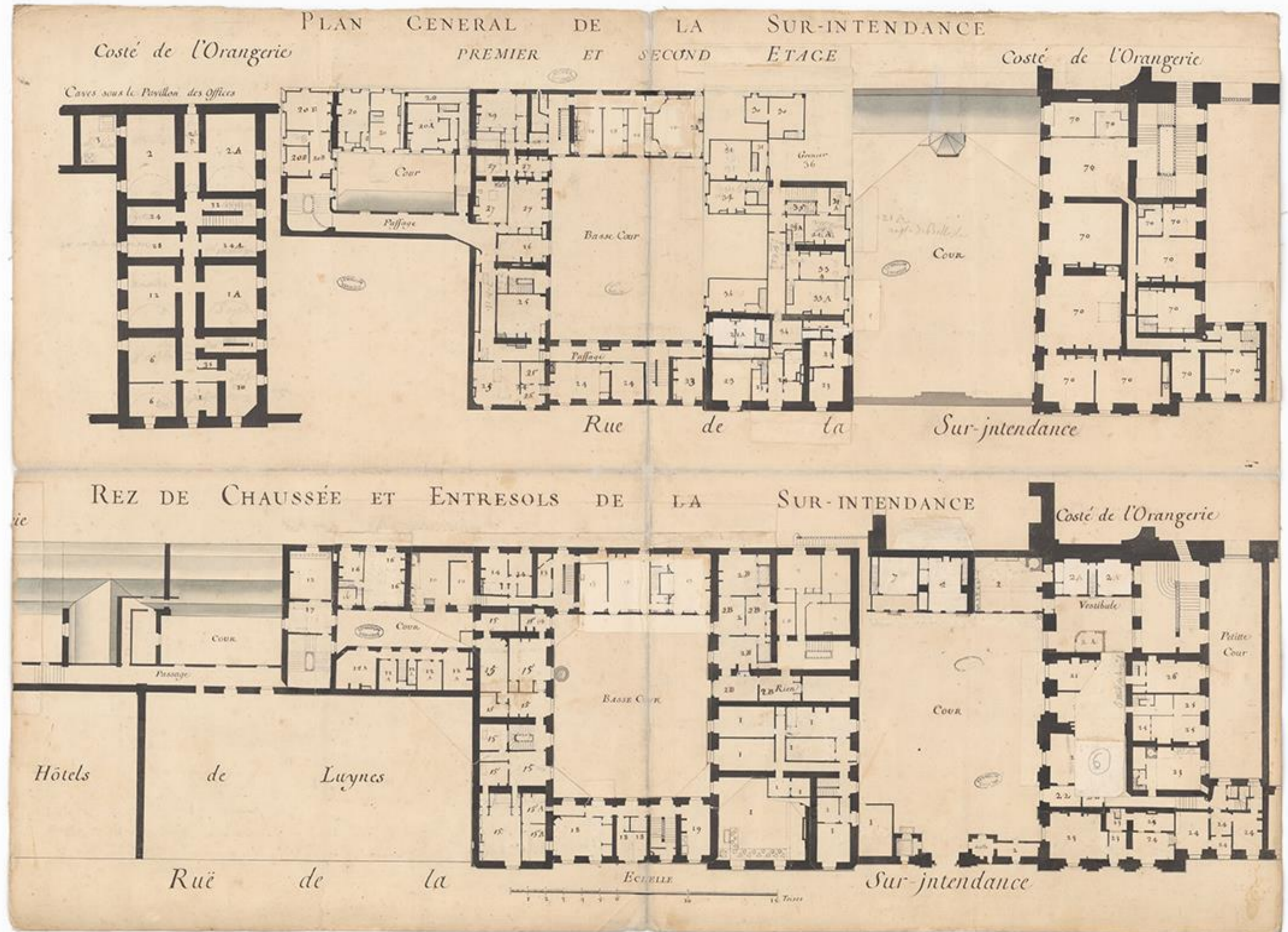
Projet Verspera



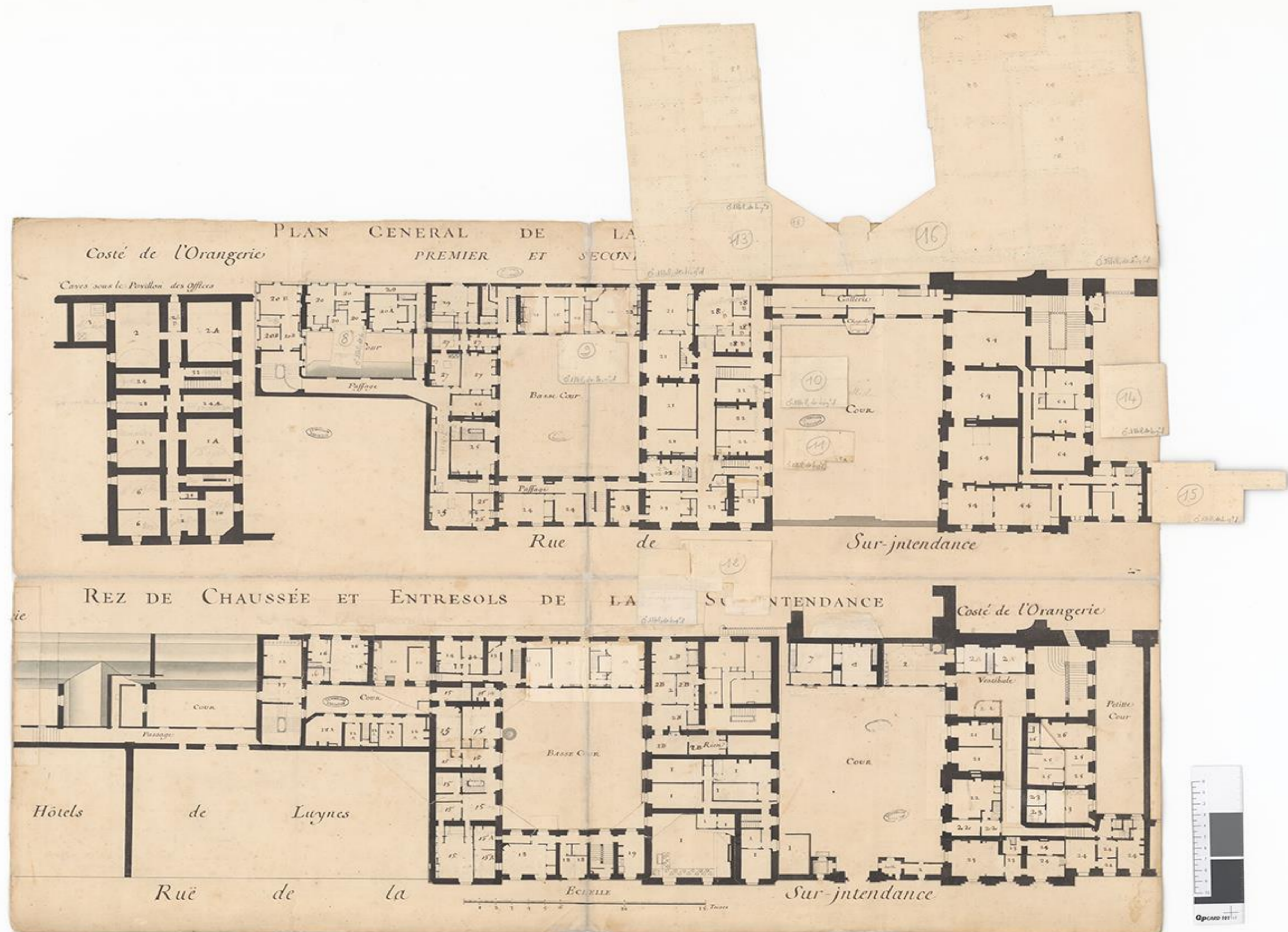
Projet Verspera



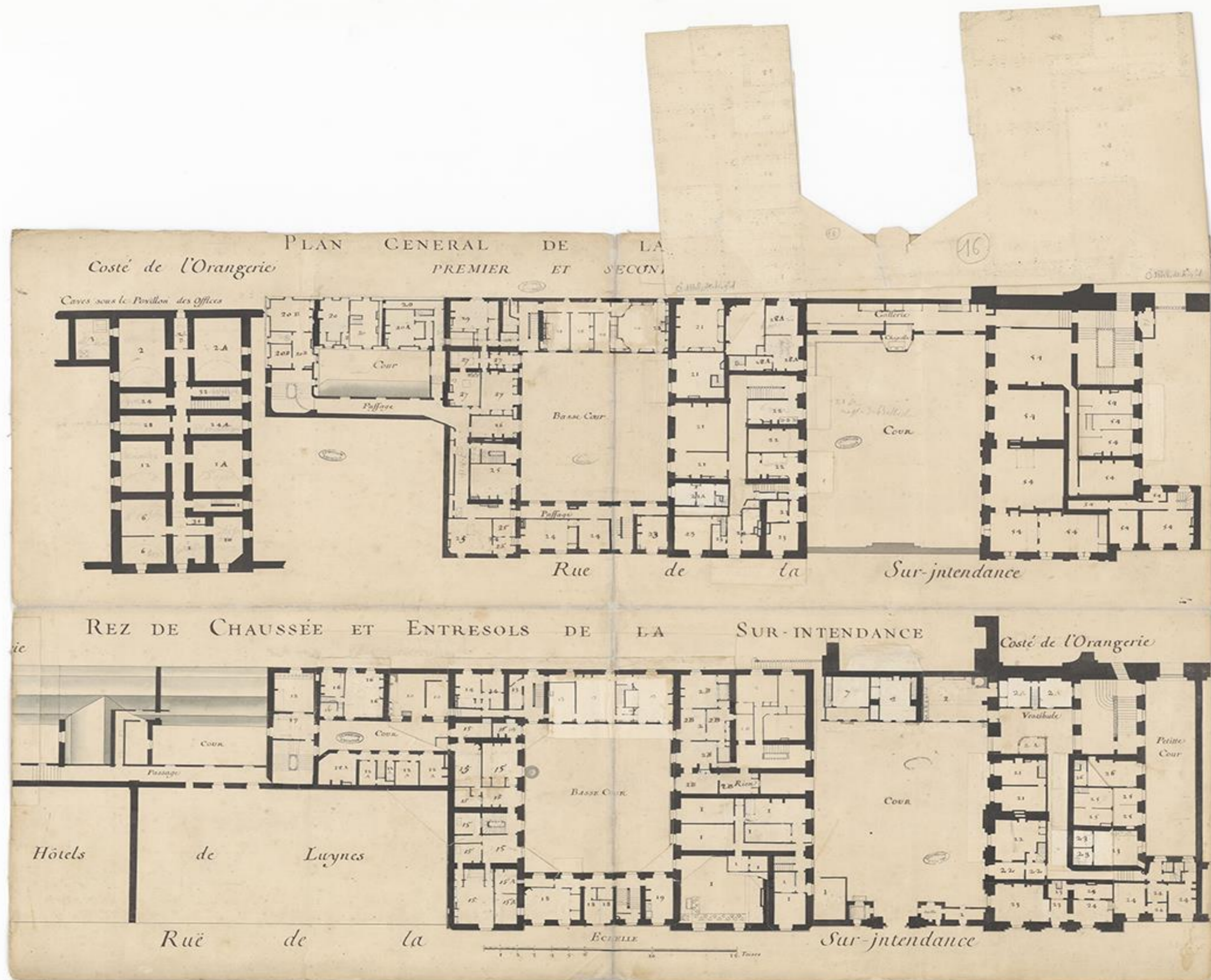
Projet Verspera



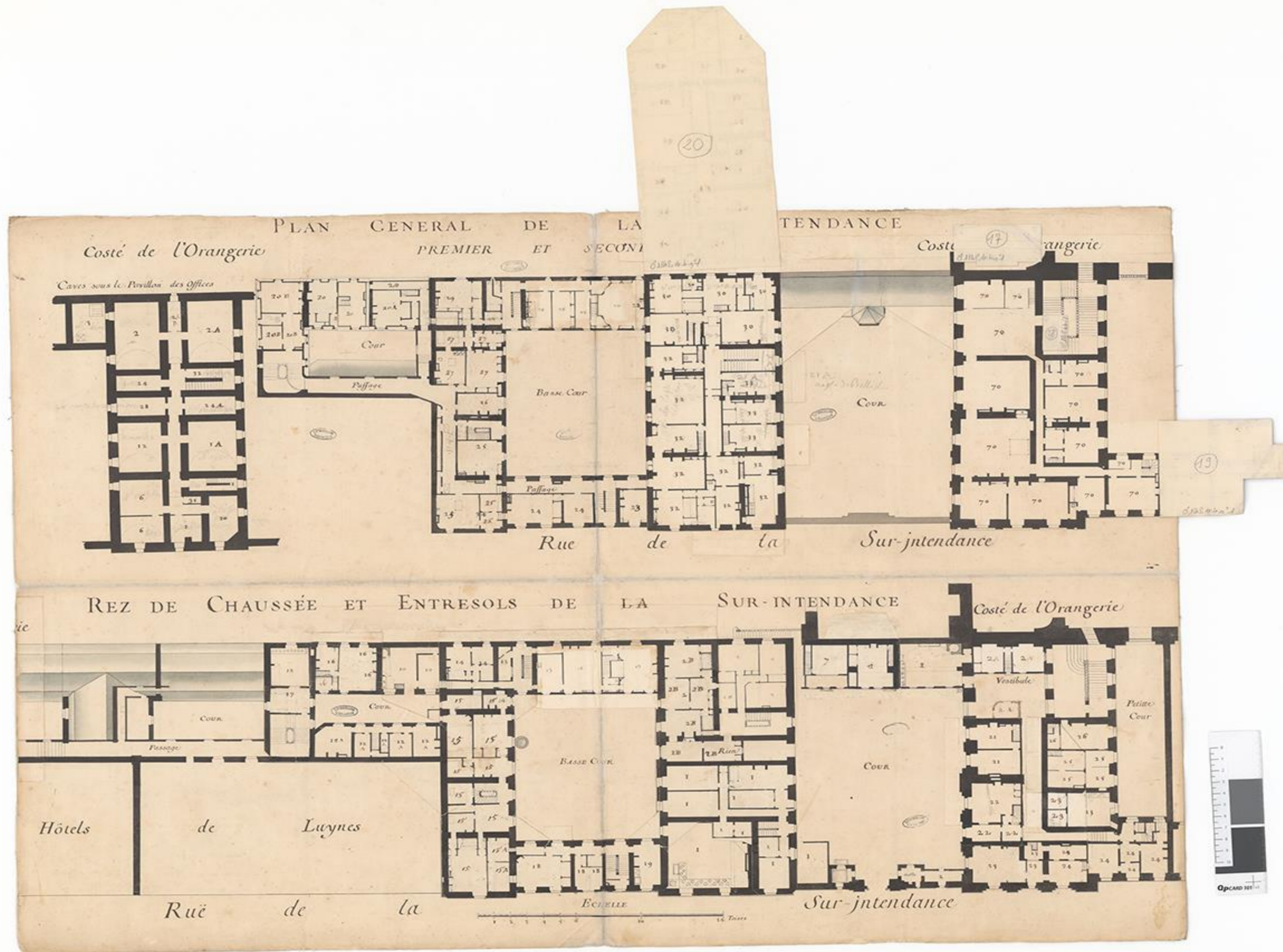
Projet Verspera



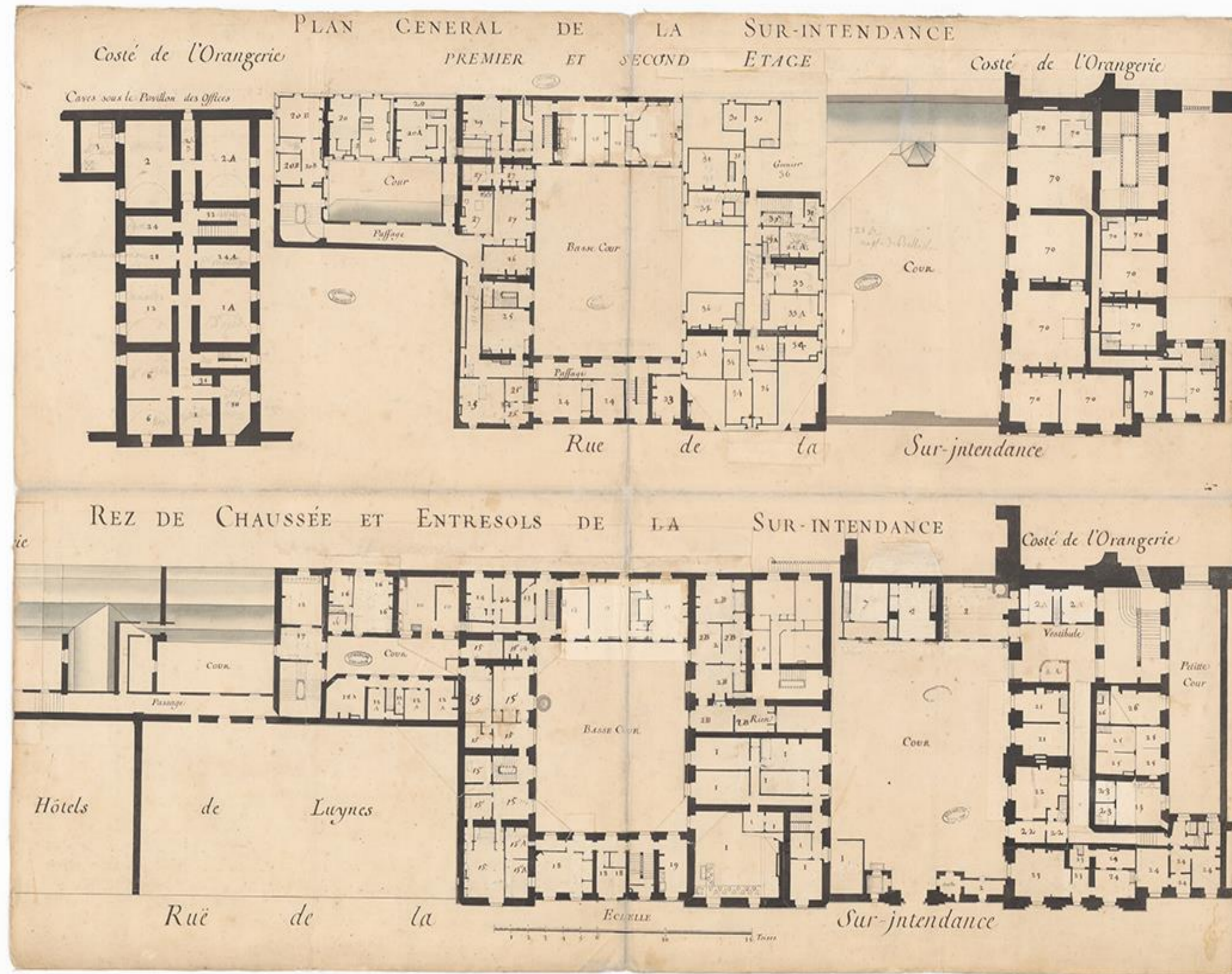
Projet Verspera



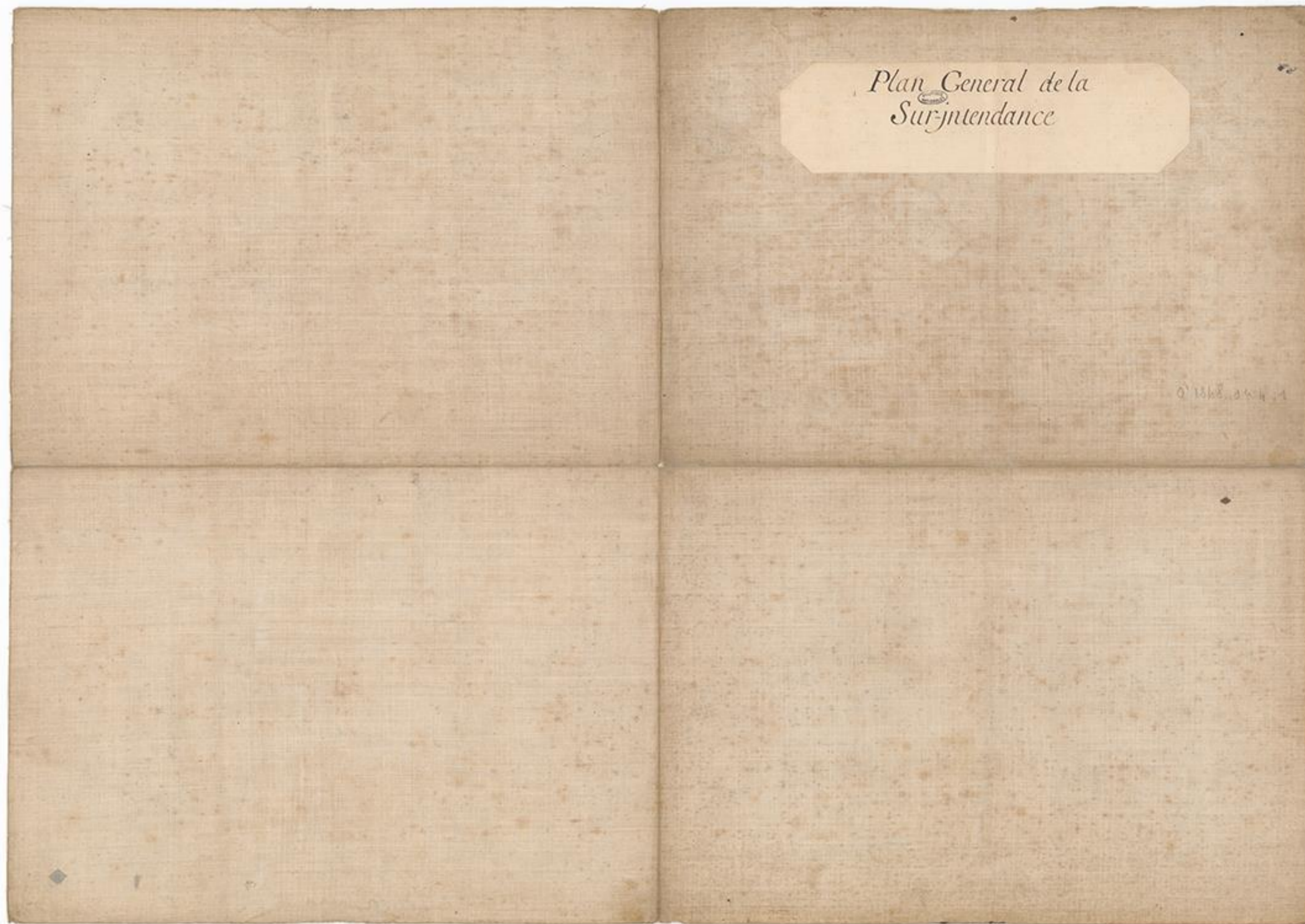
Projet Verspera



Projet Verspera



Projet Verspera



*Plan General de la
Sur-jntendance*

Q 1868.044.1



Opca 101

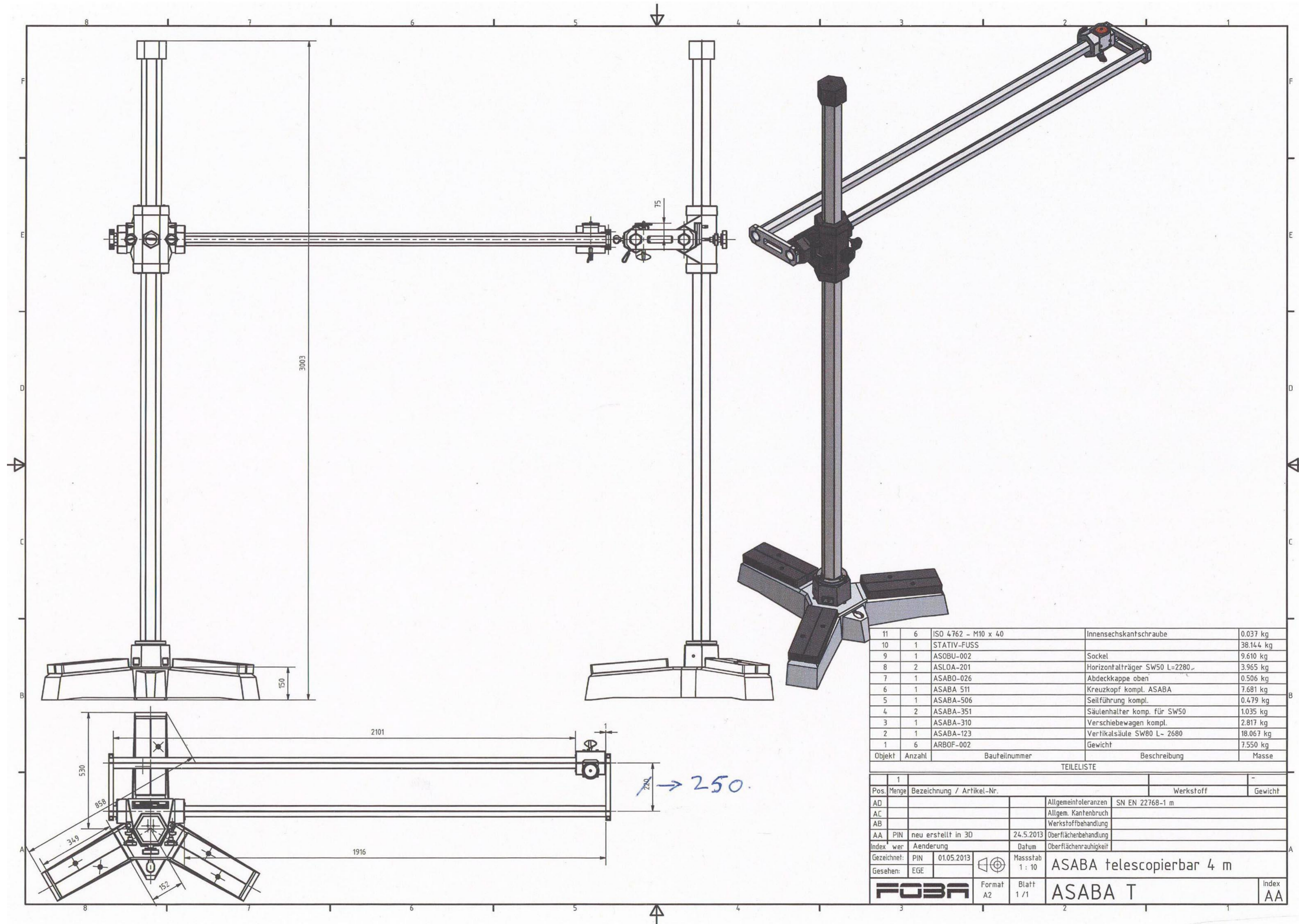
Projet Verspera

numérisation de plans
avec assemblages
d'images



Projet Verspera

Techniques de numérisation de plans avec assemblages d'images

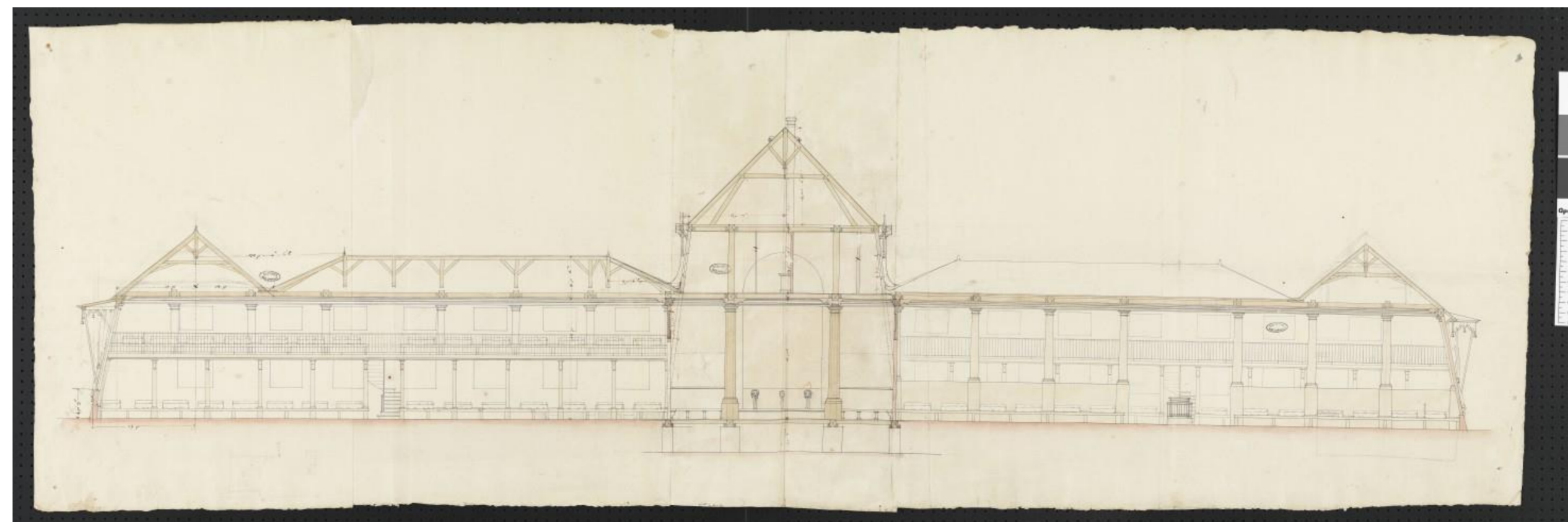
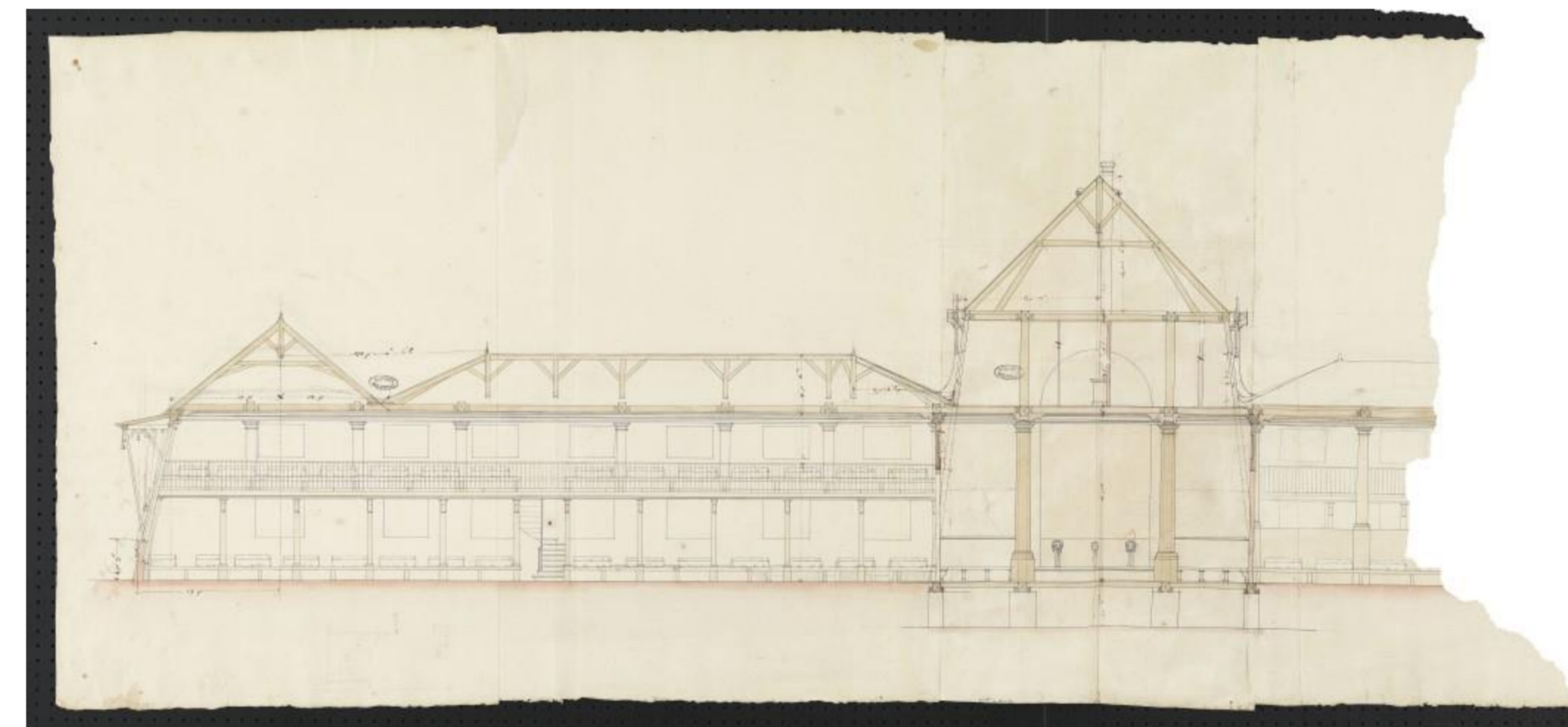
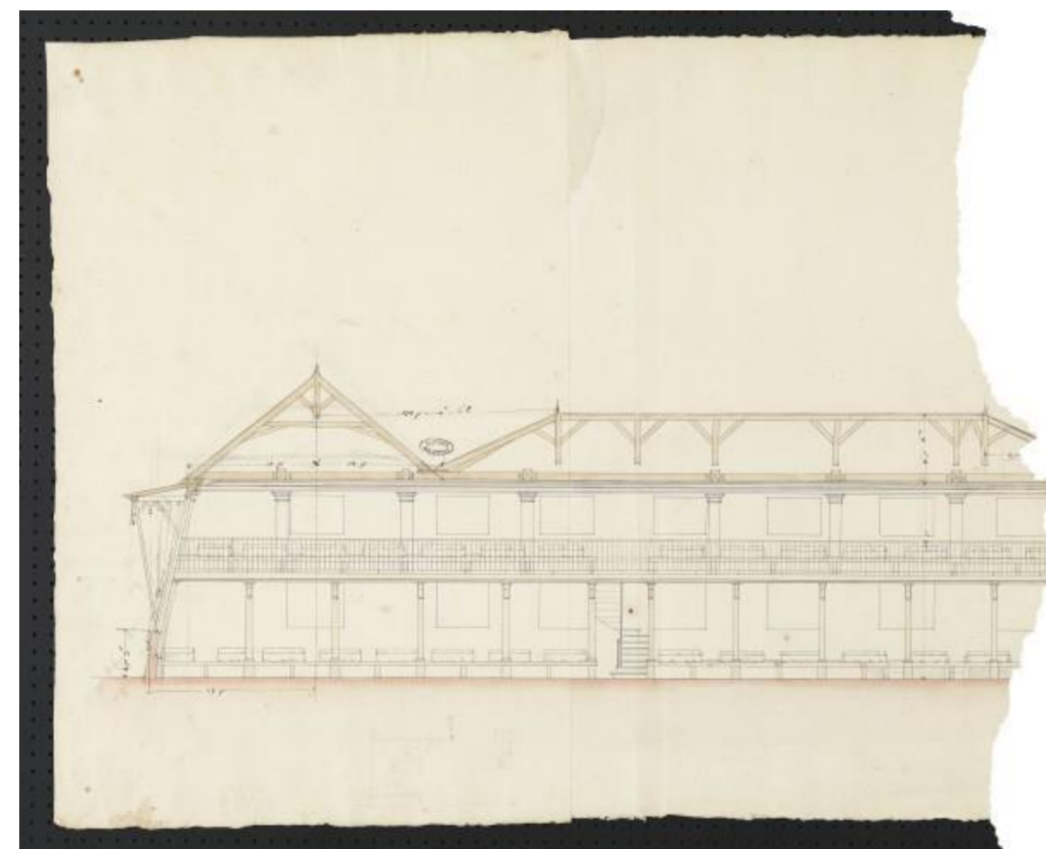
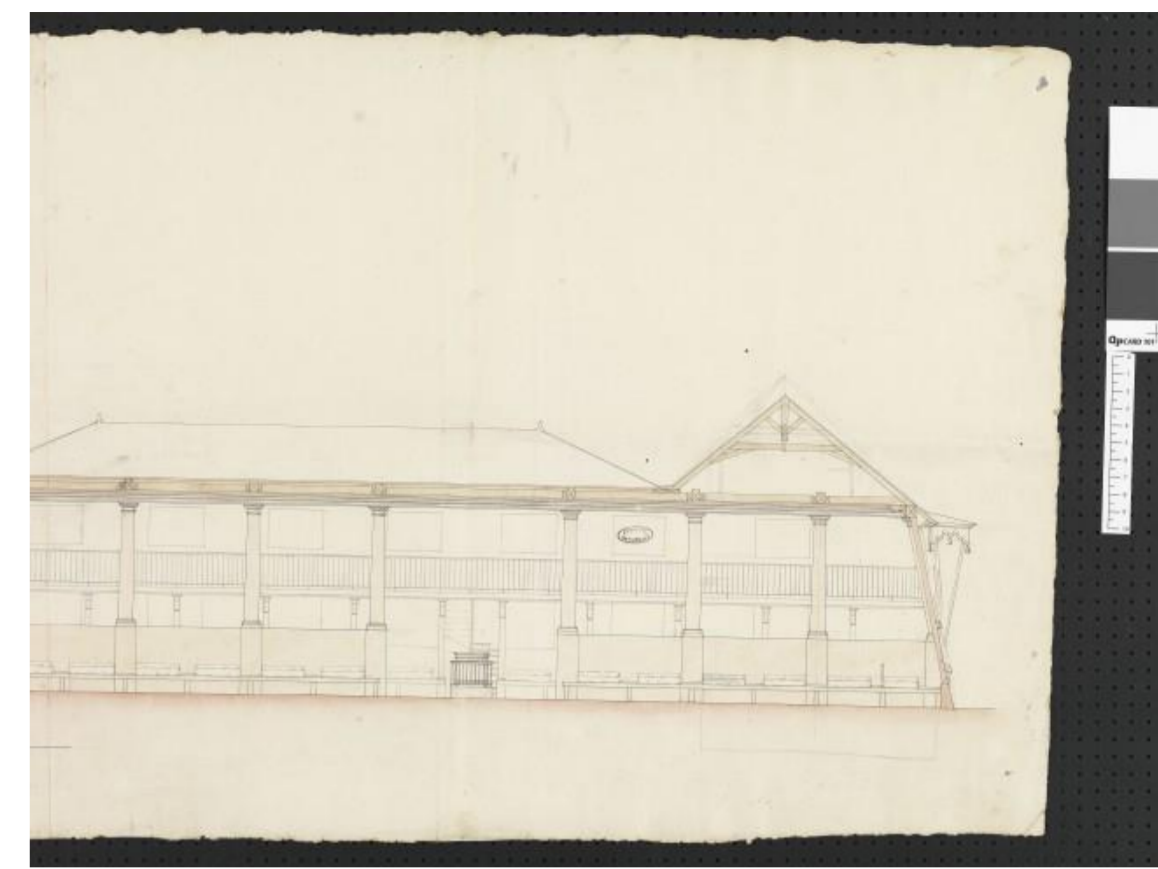
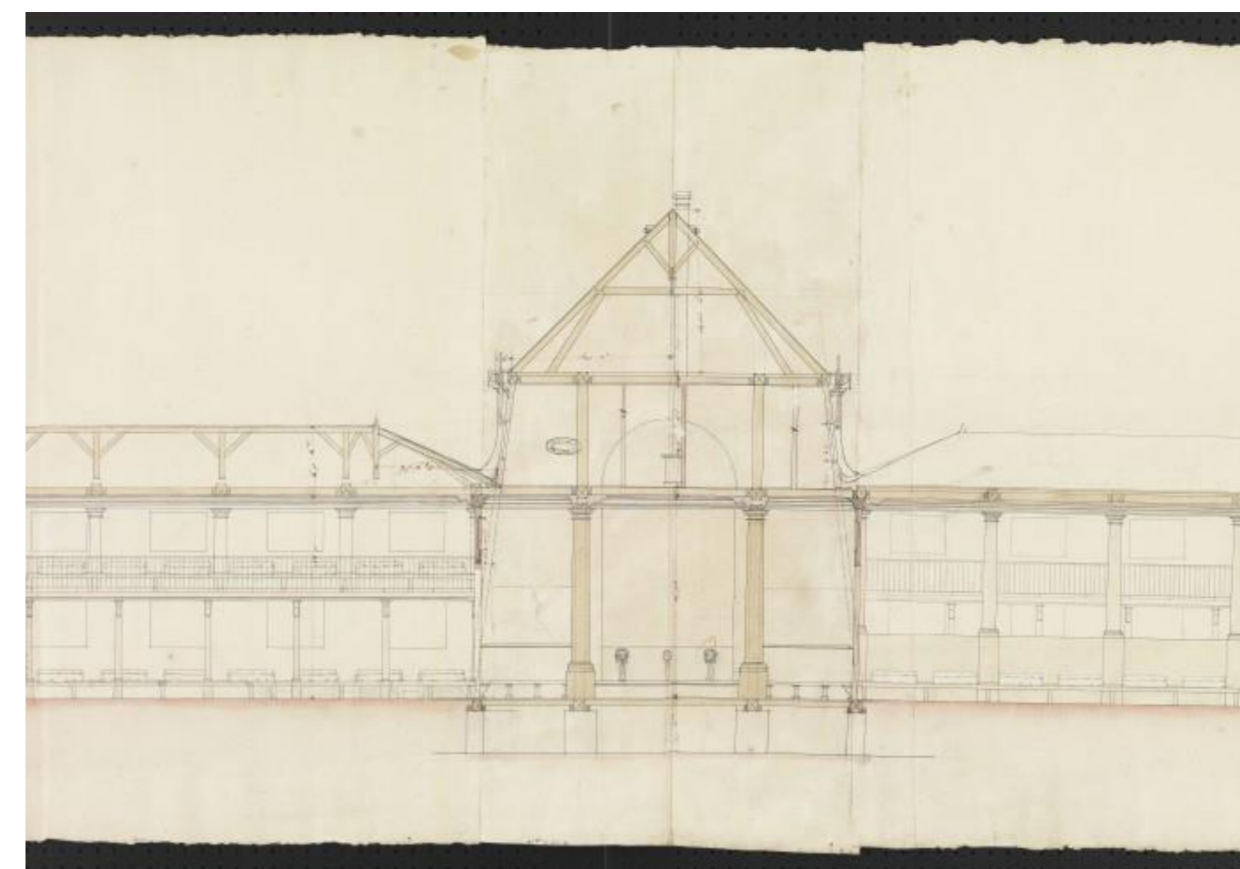
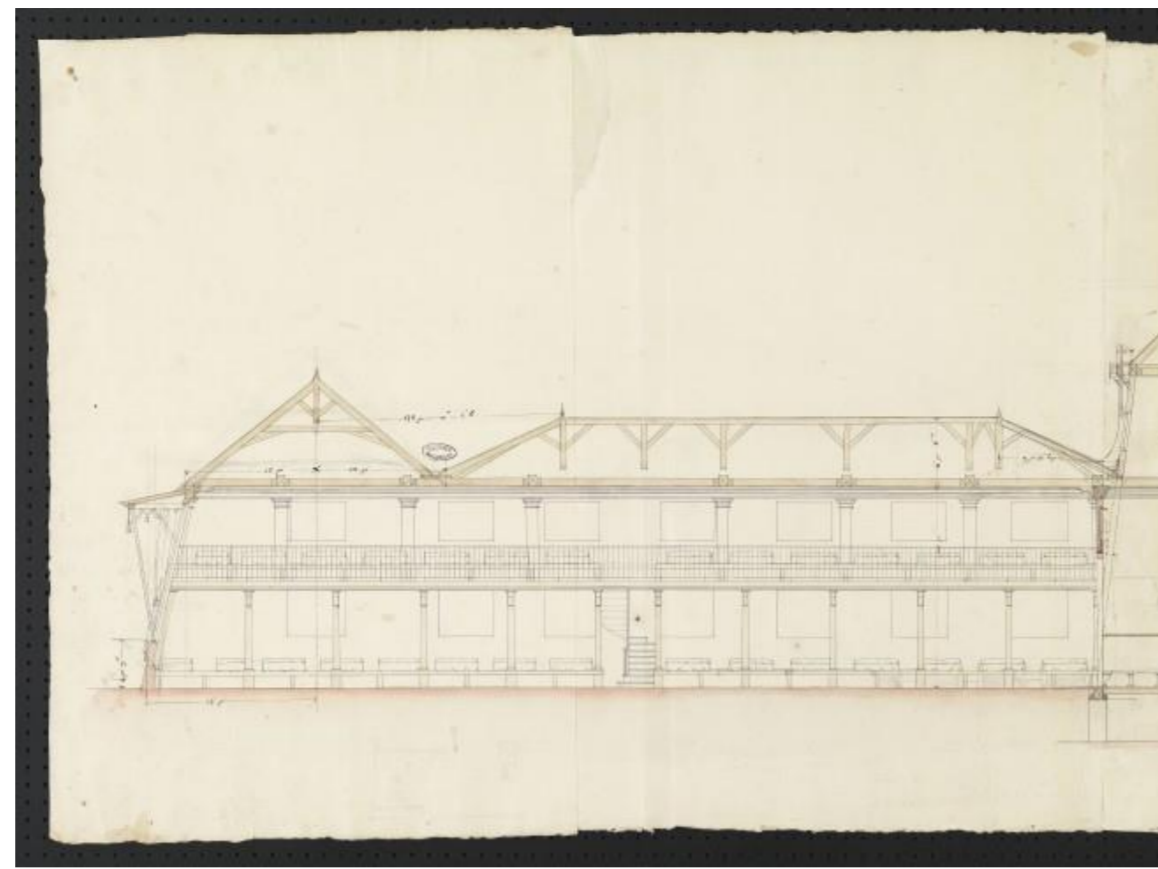


Pos.	Menge	Bezeichnung / Artikel-Nr.	Werkstoff	Gewicht
AD		Allgemeintoleranzen	SN EN 22768-1 m	
AC		Allgem. Kantenbruch		
AB		Werkstoffbehandlung		
AA	PIN	neu erstellt in 3D	24.5.2013	Oberflächenbehandlung
Index	wer	Aenderung	Datum	Oberflächenrauhigkeit
Gezeichnet:	PIN	01.05.2013	Massstab 1:10	ASABA telescopierbar 4 m
Gesehen:	EGE			ASABA T
FOBA		Format A2	Blatt 1/1	Index AA

Projet Verspera

Techniques de numérisation de plans avec assemblages d'images

Pour cet exemple, 3 prises de vues ont été nécessaires pour numériser ce plan



Projet Verspera

Techniques de numérisation de plans avec assemblages d'images



Principales étapes de réalisation du projet:

1. Réglages des dispositifs de prises de vues orthonormés (géométrie, résolution, netteté)
2. Répartition et qualité de la lumière des plateaux techniques, réalisation d'un étal lumineux (LCC) avec logiciel Capture One et génération d'un profil ICC d'entrée de la caméra afin
3. Manipulation et mise en place du document original à reproduire (2 à 3 personnes)
4. Résolution de captation de **300 dpi d'après le document original** (réglage style utilisateur unique pour chaque plateau pour garantir homogénéité du résultat final)
5. Examen attentif du tableau de récolement (préparation scientifique préalable indispensable)
6. Captations multiples de photographies numériques au format RAW d'un document original en mode connecté avec dos numérique matriciel de 100 millions de pixels selon état du document original demandé avec fort recouvrement des vues: couverture successive par étapes de l'intégralité du format du document à reproduire avec visée vidéo et/ou graduation en cm sur bras coulissants
7. Développement des fichiers RAW en TIF avec Capture One, processus d'assemblage des images avec fonction PhotoMerge (Photoshop): contrôle et vérification des assemblages, validation de l'image finale, nommage définitif du fichier, insertion des métadonnées par les photographes à partir du fichier de récolement : génération fichiers de conservation au format TIF, images de diffusion en JPEG
8. Production d'un jeu d'images de lecture au responsable de fonds pour contrôle de cohérence, à l'issue reprises et compléments si nécessaire. Validation des fichiers et retour des originaux sur site de conservation
9. Archivage des fichiers numériques sur serveurs de l'institution et transfert des fichiers sur disque durs nomades au CRCV et Laboratoire ETIS pour modélisation 3D.
10. Mise en ligne des images JPEG sur site des AN de France en SIV et banque d'images CRCV (copie conforme)

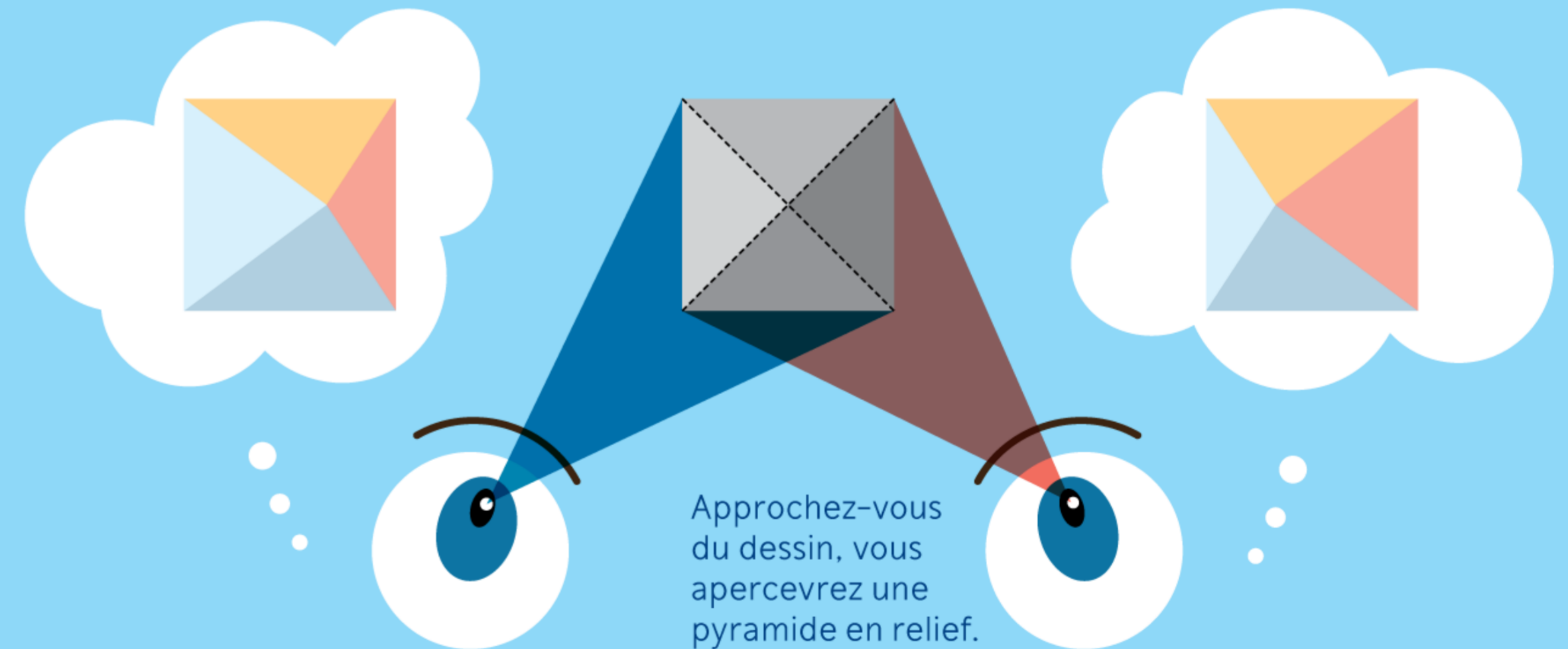
La captation par la photogrammétrie

« **La photogrammétrie** est une technique de mesure qui consiste à déterminer la forme, les dimensions et la situation d'un objet dans l'espace à partir de plusieurs prises de vues photographiques de cet objet. Elle permet tout simplement de restituer géométriquement des objets en trois dimensions, à la manière de la vision humaine. » (définition site IGN)

Les étapes de la photogrammétrie

Le principe : la vision stéréoscopique

La photogrammétrie repose sur le principe de la vision humaine. Lorsque nous observons un objet, deux images différentes se forment sur la rétine de chacun de nos yeux. C'est ensuite notre cerveau, qui, grâce au réflexe oculaire de convergence-accommodation, traite les deux images pour que nous voyons l'objet en relief.



La photogrammétrie offre de nouvelles perspectives beaucoup plus fiables pour la numérisation de grands formats.

La captation des documents en photogrammétrie se fait également par le biais d'un cumul de vues multiples avec fort recouvrement de surface entre elles, à minima de 50% mais le plus souvent entre 70 et 80 %. Cette technique permet de capter des documents de grande taille avec une plus grande précision en s'inspirant des techniques de la photographie aérienne (orthophotographie)

Etalonnage et positionnement précis de la caméra, afin de déterminer une perspective rigoureuse des points de vues

Eclairage du document original de manière indirecte, diffuse pour ne pas créer d'ombre portée

Enregistre la position exacte des points de vues et les angles des prises de vues

Reconnaissance et analyse de points homologues à partir de plusieurs caméras afin de bien fusionner les images

Génération de nuages de points afin de constituer un modèle 3D de l'original (ensembles de points de données représentés selon coordonnées X,Y,Z)

Maintenir résolution d'acquisition de 300 dpi pour la numérisation de documents d'archives

Ce nouveau processus de traitement des images engendre de lourds calculs et nécessite des moyens informatiques très performants

Les logiciels utilisés :

Agisoft Metashape

MicMac (IGN) associé à Meshroom et Cloud Compare laissent entrevoir des développements extrêmement intéressants pour la numérisation patrimoniale

Les étapes de la photogrammétrie

Photogrammétrie : méthodes et rendus

Les projets de numérisation de certains documents originaux qui nécessitent des modélisations 3D génèrent des partenariats scientifiques très stimulants depuis quelques années.

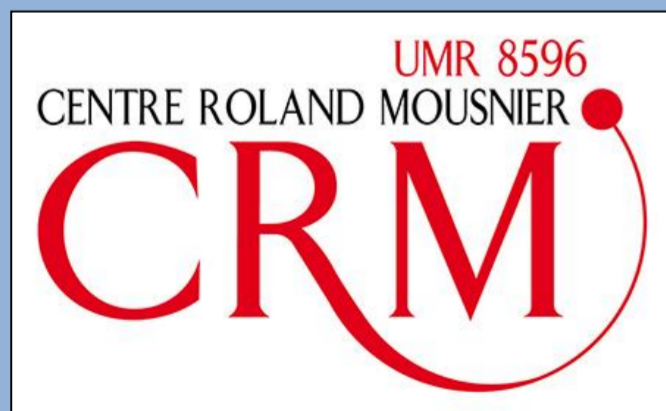
L'atelier photographique des Archives nationales de France ont ainsi bâti un projet de partenariat exemplaire et indispensable avec le CNRS, Sorbonne Université, le Centre Roland Mousnier et le Centre André Chastel.

Cette alliance de compétences illustre aujourd'hui parfaitement l'indispensable complémentarité des métiers dans des projets de numérisation patrimoniale.

D'autres travaux vont se poursuivre sur des projets de numérisation en interne avec l'utilisation de cette technique avec une forte montée en compétences des agents de notre service.

Les étapes de la photogrammétrie





NUMÉRISATION 3D : LE PLAN DE CHARLEVILLE, DIT PLAN DODET, 1724

Conception et mise en place de la captation

Vidéo réalisée par le département de l'image et du
son des Archives nationales

<https://youtu.be/X-mDO1044ZE>

32. Le plan Dodet

Le plan Dodet : une archive spatiale et urbaine exceptionnelle en 3D de 1727 :

- **213 façades et élévations (habitations, fortifications, etc.),**
- **organisations internes (espaces de circulation, lots, etc.).**

Conservé aux Archives nationales (cote « CP/N/II/ARDENNES/1 »).

1,98 x 1.73 m, H maximale 0.30 m.



Figure 14. Plan maquette de 1727 dit « Dodet ». © Coll. Archives Nationales

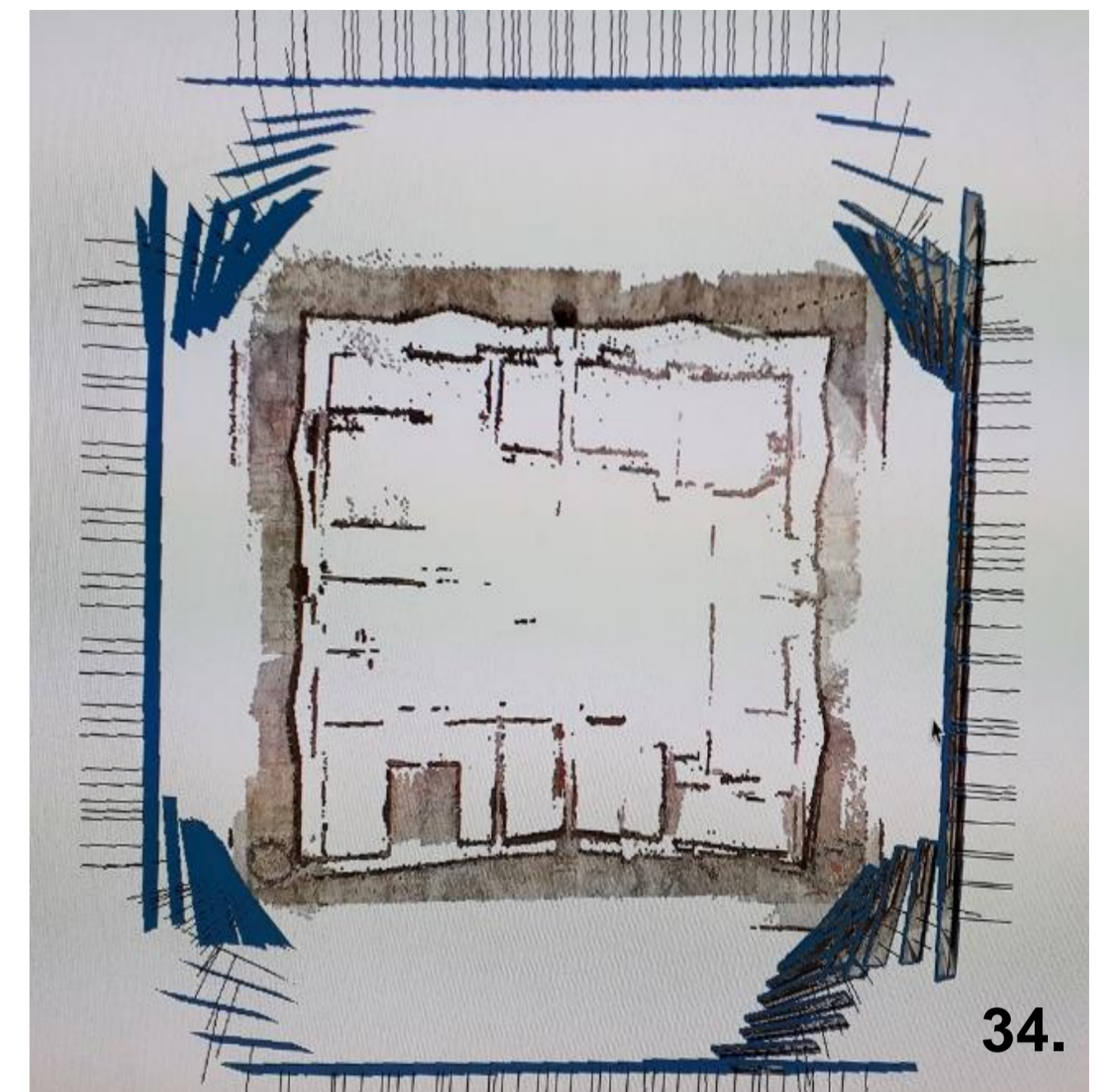
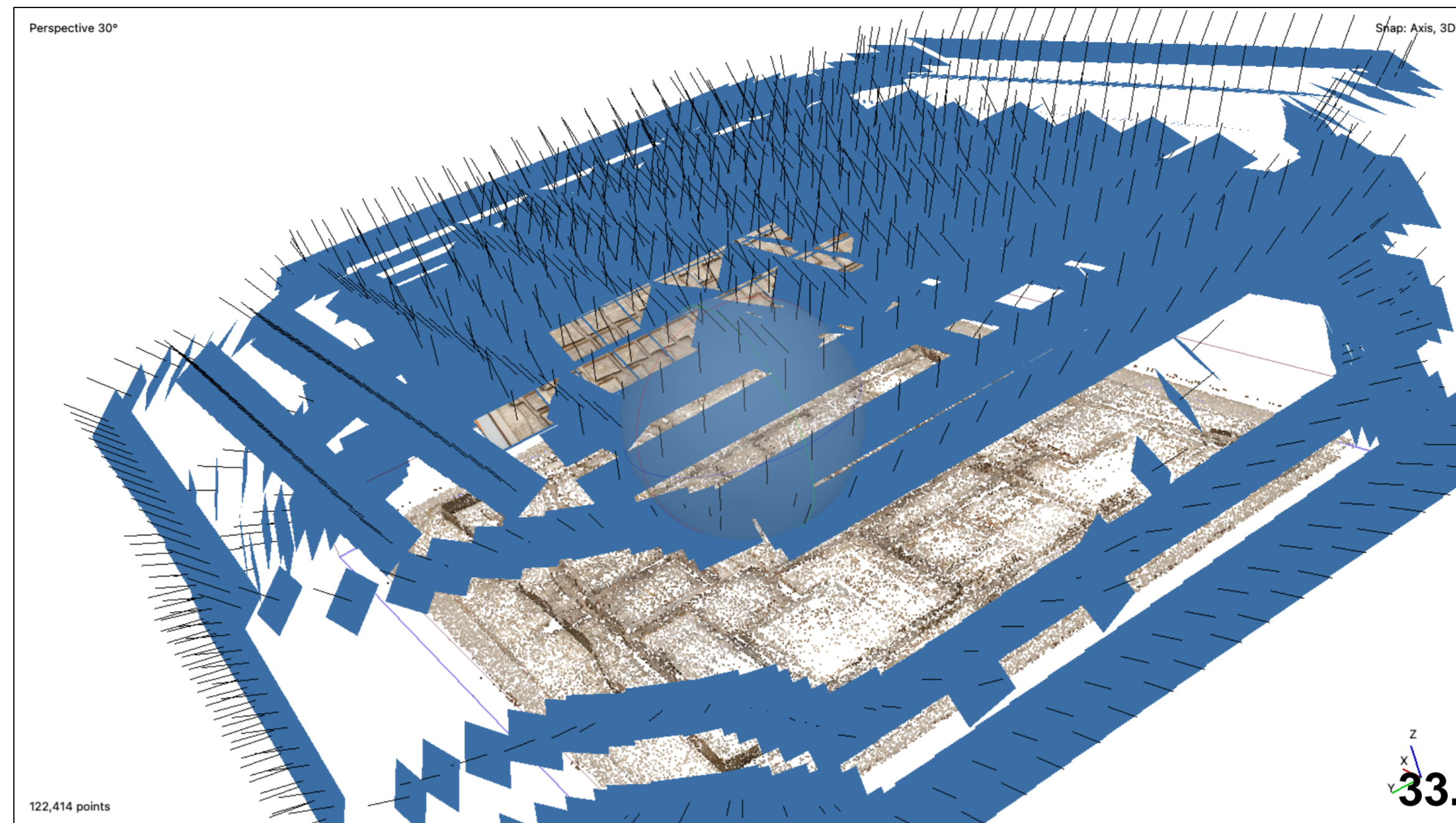
Les 5 étapes de la
photogrammétrie

- 1 - Prises de vues (captation)
- 2 - Alignement des photos et construction du nuage clairsemé
- 3 - Construction du nuage dense
- 4 - Maillage
- 5 - Texture

La captation

2050 clichés effectués (1300 conservés actuellement pour le traitement).

Une prise de mesure de type « macro ».



Figures 33, 34 et 35. Vues des caméras alignées, crédits : William Siméonin.

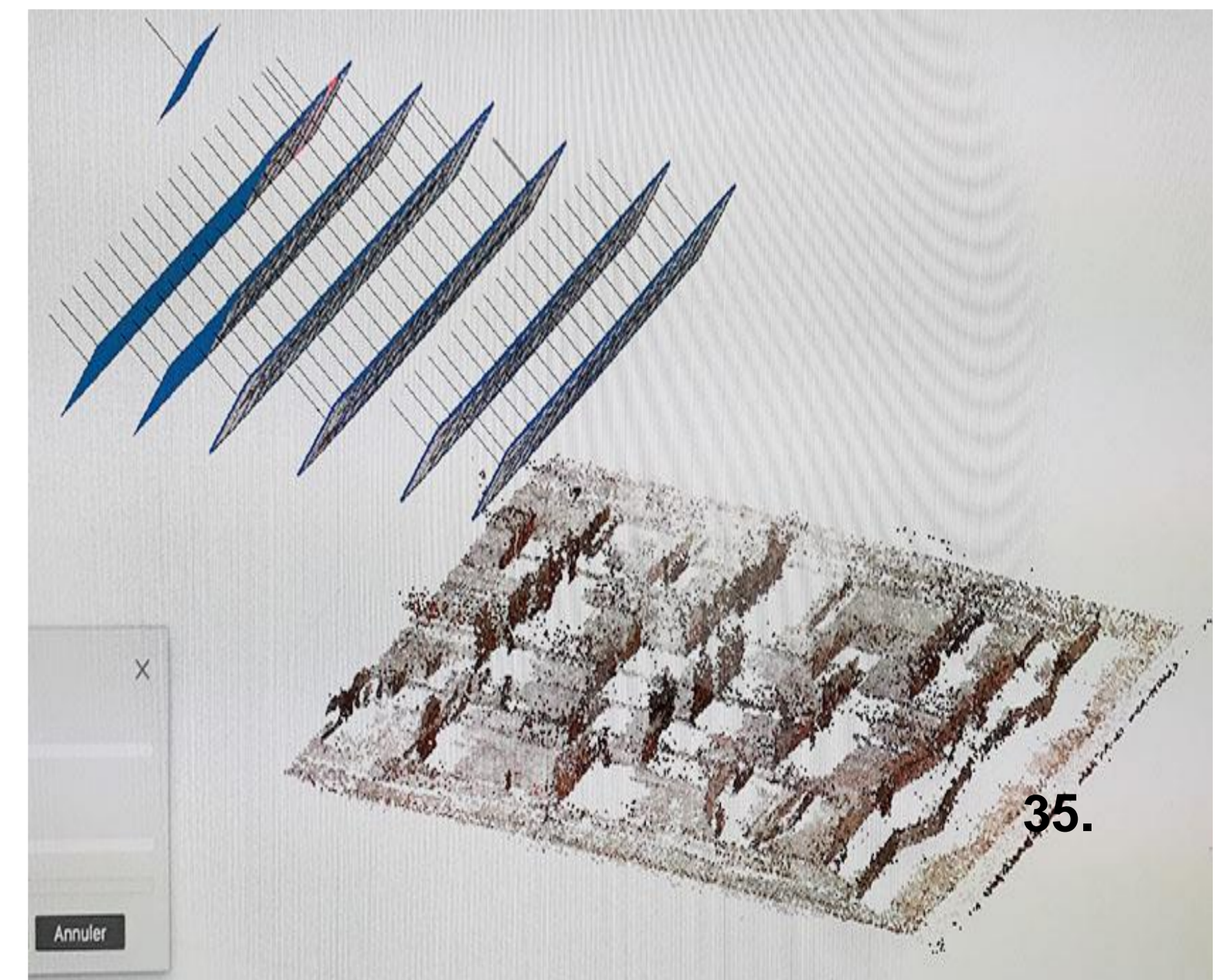
Nous avons décidé de faire des photos sur 7 niveaux (altitude).

Le chemin des photos des niveaux 0 à 3 tourne autour de la maquette

Le chemin des photos des niveaux 4 et 5 quadrille la maquette suivant les 4 cotés

Le chemin des photos du niveau 6 consiste à faire des orthophotos

(prise de vue Zénithale) et quadrillage de la maquette suivant deux cotés perpendiculaires

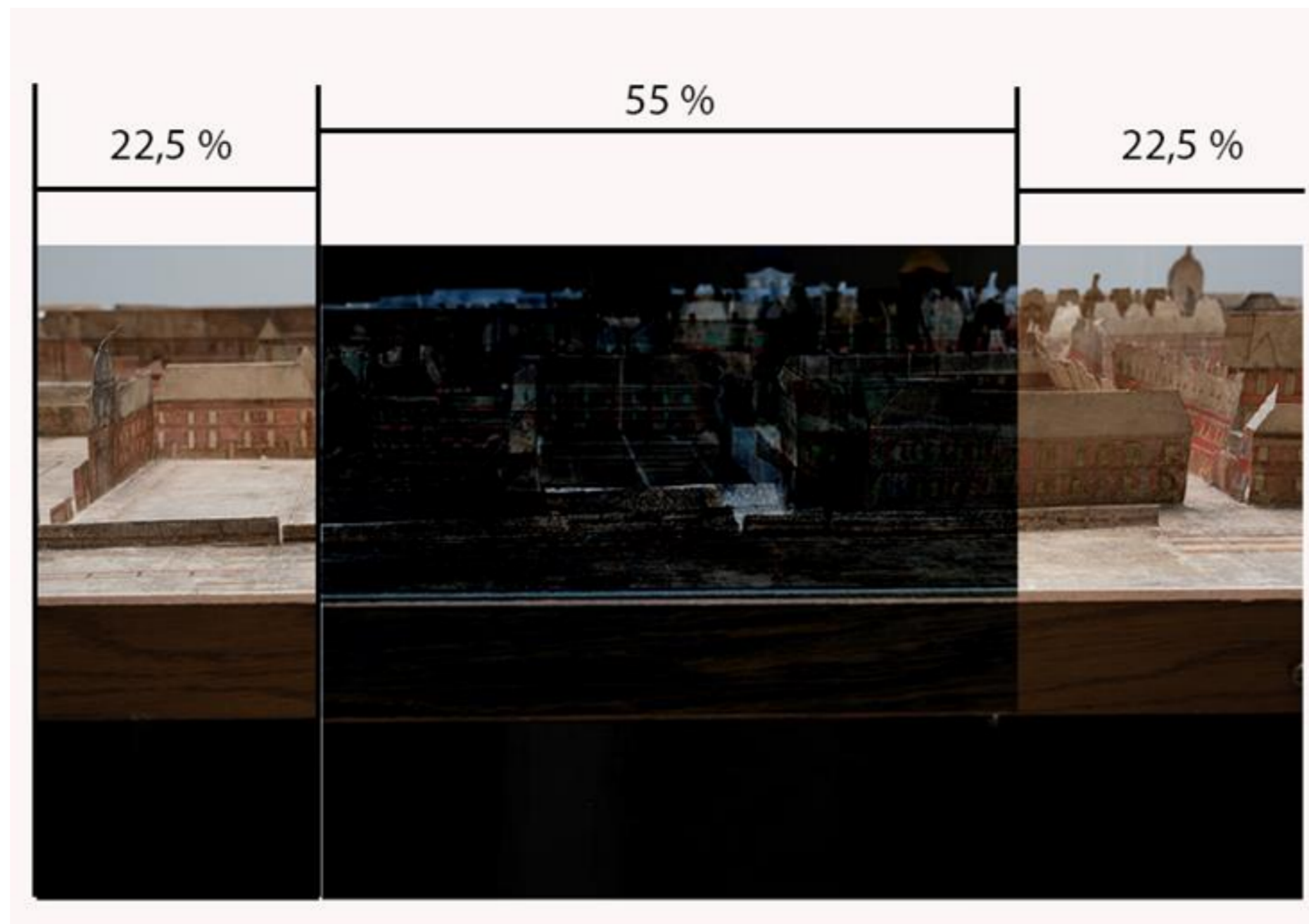


La captation

Un recouvrement minimum de 55 % cliché par cliché

2050 clichés effectués (1300 conservés actuellement pour le traitement).

Une prise de mesure de type « macro ».



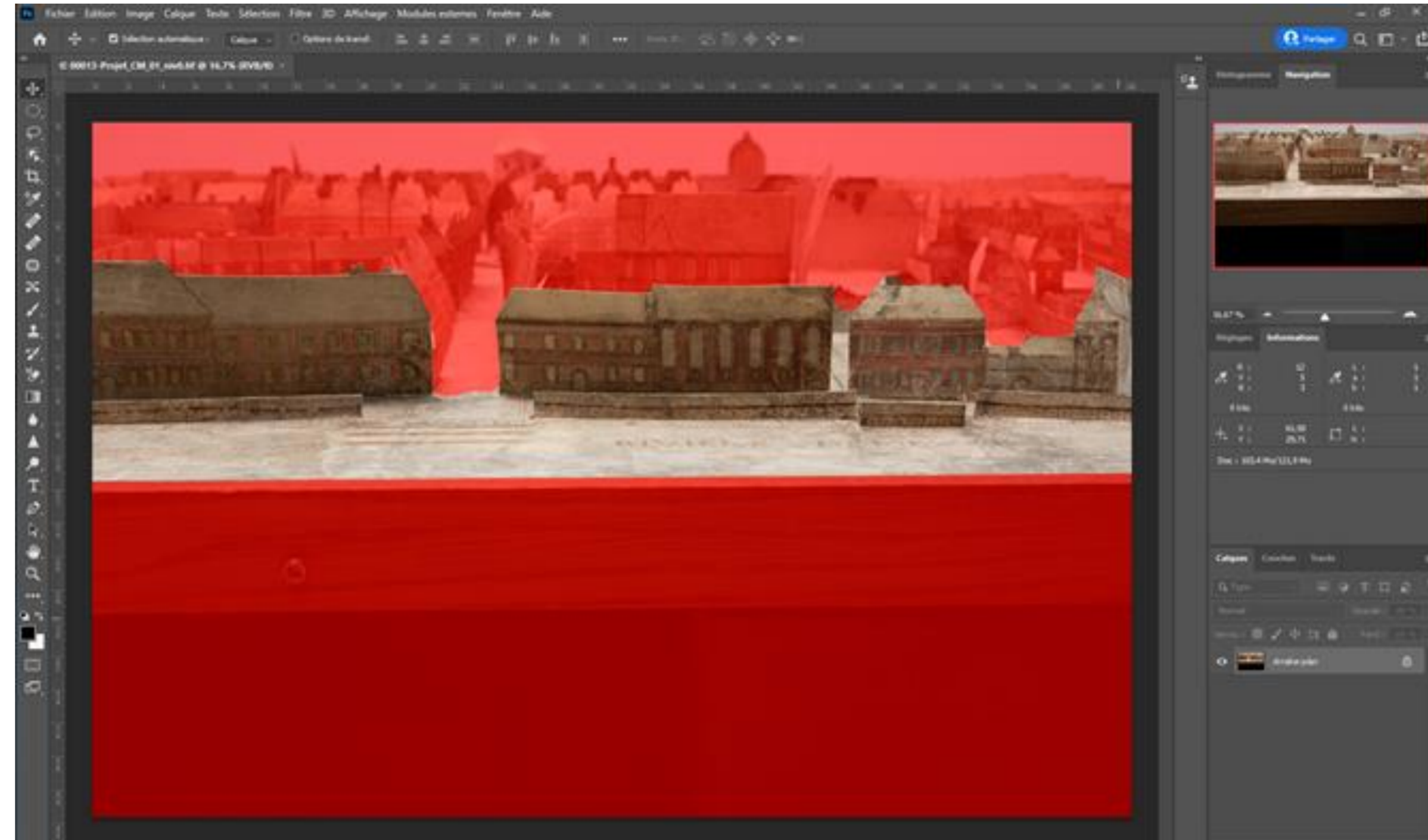
Figures 36. Vue du taux de recouvrement, crédits : William Siméonin.

- Prises de vue avec un Nikon D810, soit un capteur de 7360 x 4912 px (36 M) et un 60 mm 2,8
- Balance des blancs personnalisée d-1 a été définie en début de prise de vue et restera la même tout au long du processus de numérisation
- Toutes les prises de vues sont faites au 1/125, f16, 100 ISO
- Résolution de l'image : 440 DPI
- Chaque photo couvre une zone de 42 cm de large sur la maquette cela permet d'avoir une précision de 0,057 mm par pixel soit presque 1/20ème de millimètre

20. La captation

**Création automatique
d'un masque de
netteté**

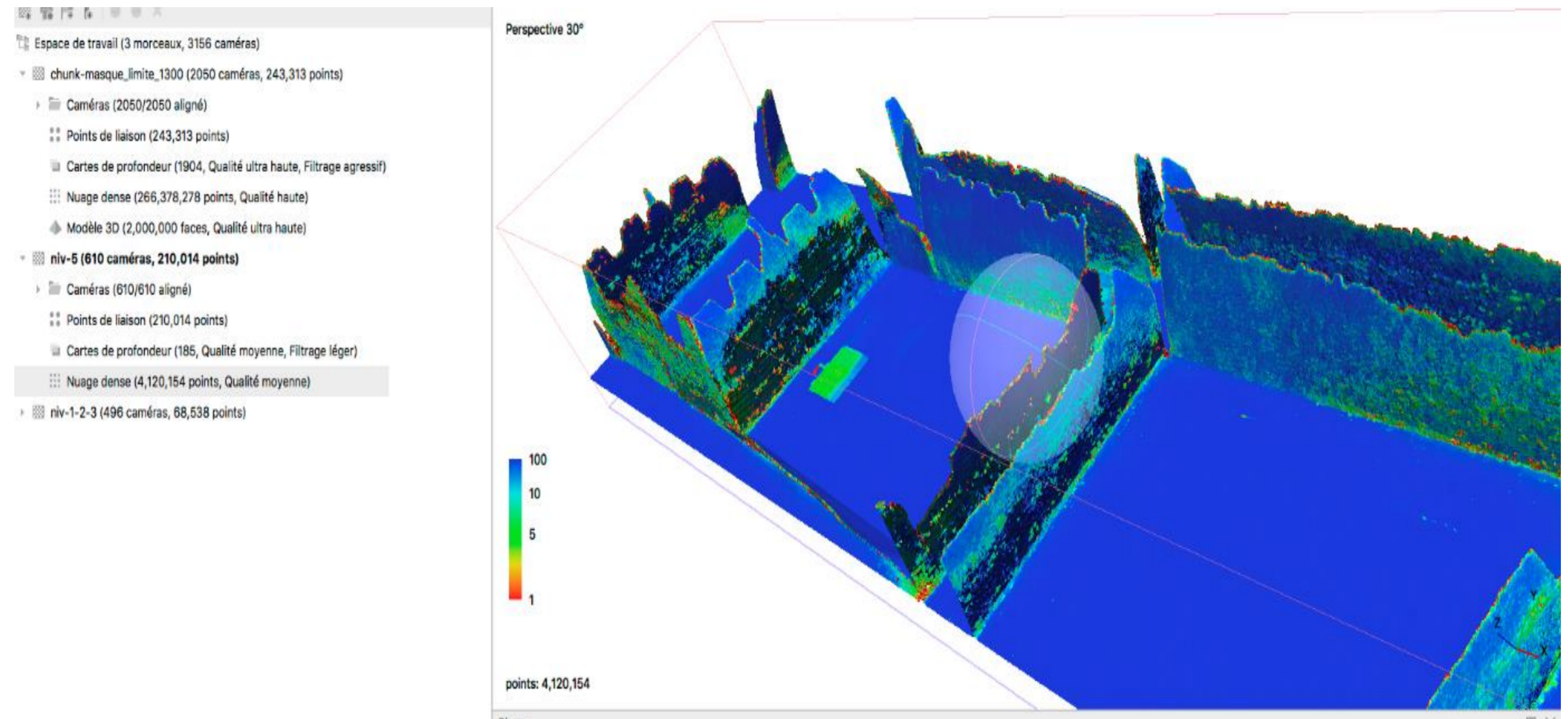
**Création d'une
couche Alpha lisible
par Metashape**



Figures 37. Vue du masque d'information, crédits : William Siméonin.

Pour un traitement plus « court » et plus précis des photos, nous avons décidé de créer un masque (zone rouge sur l'illustration) rejetant les zones floues de chaque image. Cette opération est réalisée avec Photoshop. Création d'une couche Alpha sur chaque image.

Analyse des modélisations de chaque niveau avec CloudCompare



Figures 38. Vue de vérification, crédits : William Siméonin.

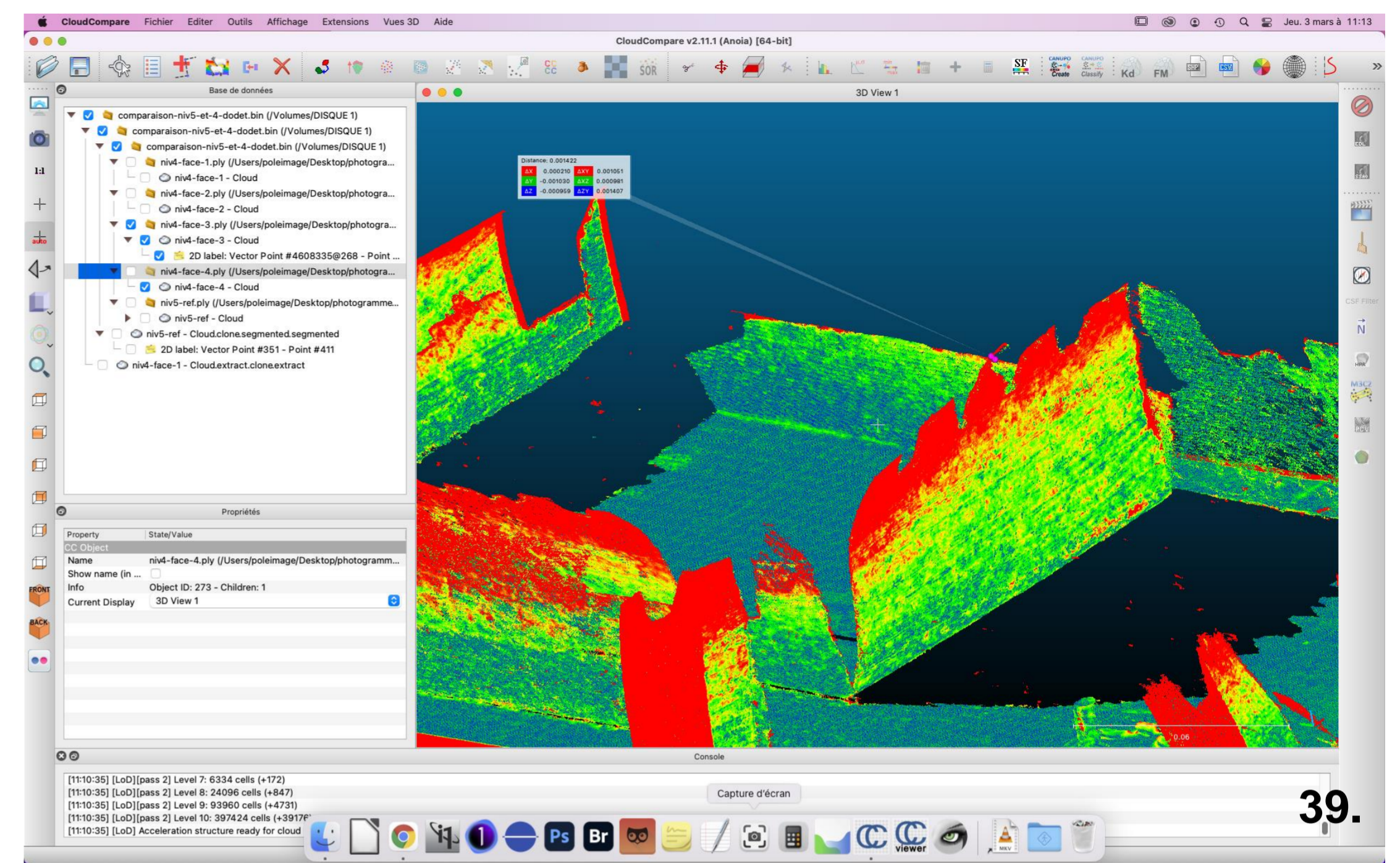
Durée des prises de vues : 6 semaines

Chaque niveau a été modélisé pour vérifier si la géométrie de la maquette n'a pas bougé durant cette période.

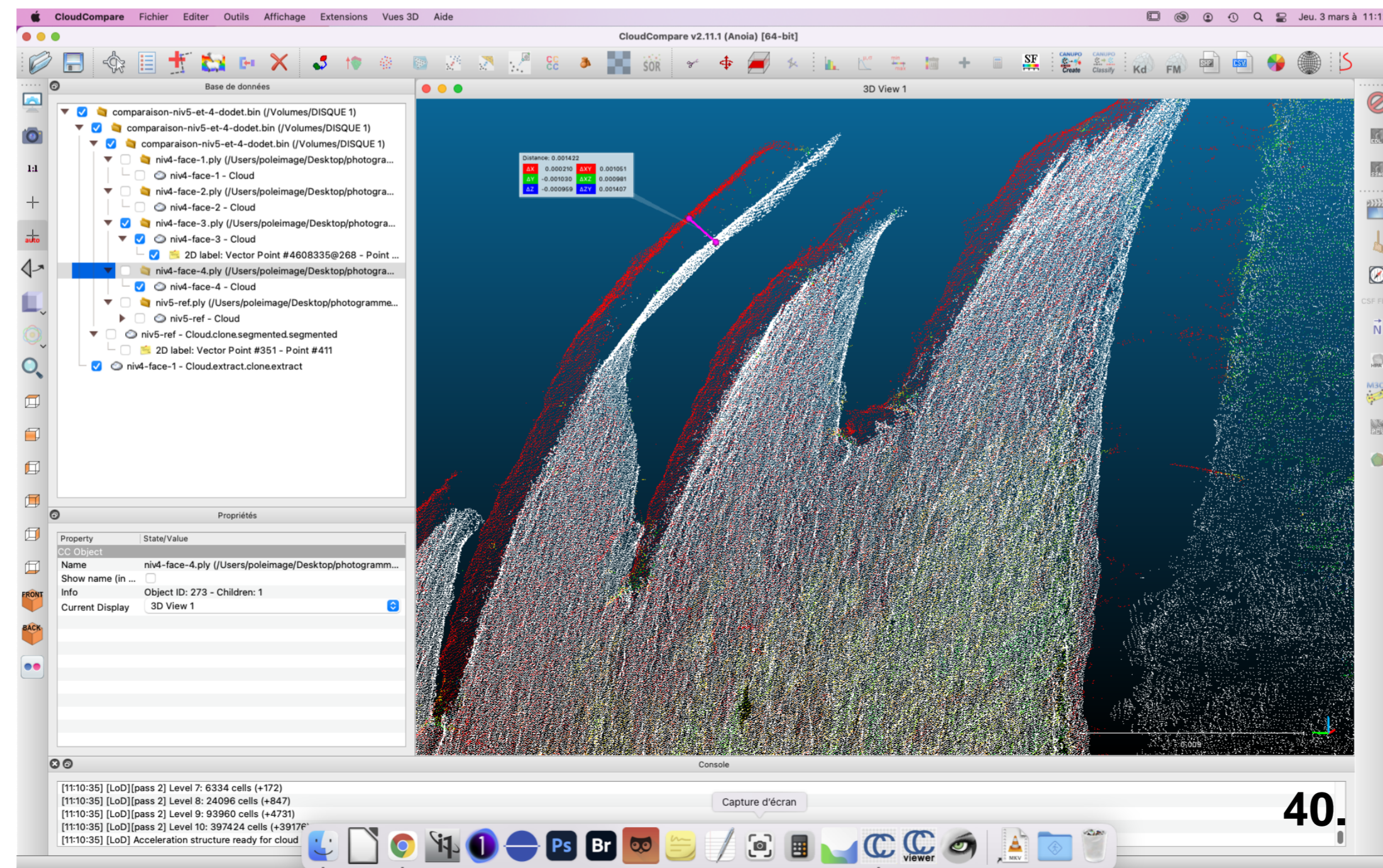
Les aléas du terrain

Résultats de l'auscultation

31. Modélisation des phénomènes liés au climat



Figures 39 et 40. Vue des surfaces impactées, crédits : William Siméonin.



1,4 mm

Sur l'image ci-dessus, les zones rouges nous indiquent qu'il y a un déplacement de la position des façades entre les niveaux 5 et 4

Les photos du niveau 4 ont été rejetées de la modélisation.

Un nouvel objet patrimonial

Résultats de
l'auscultation

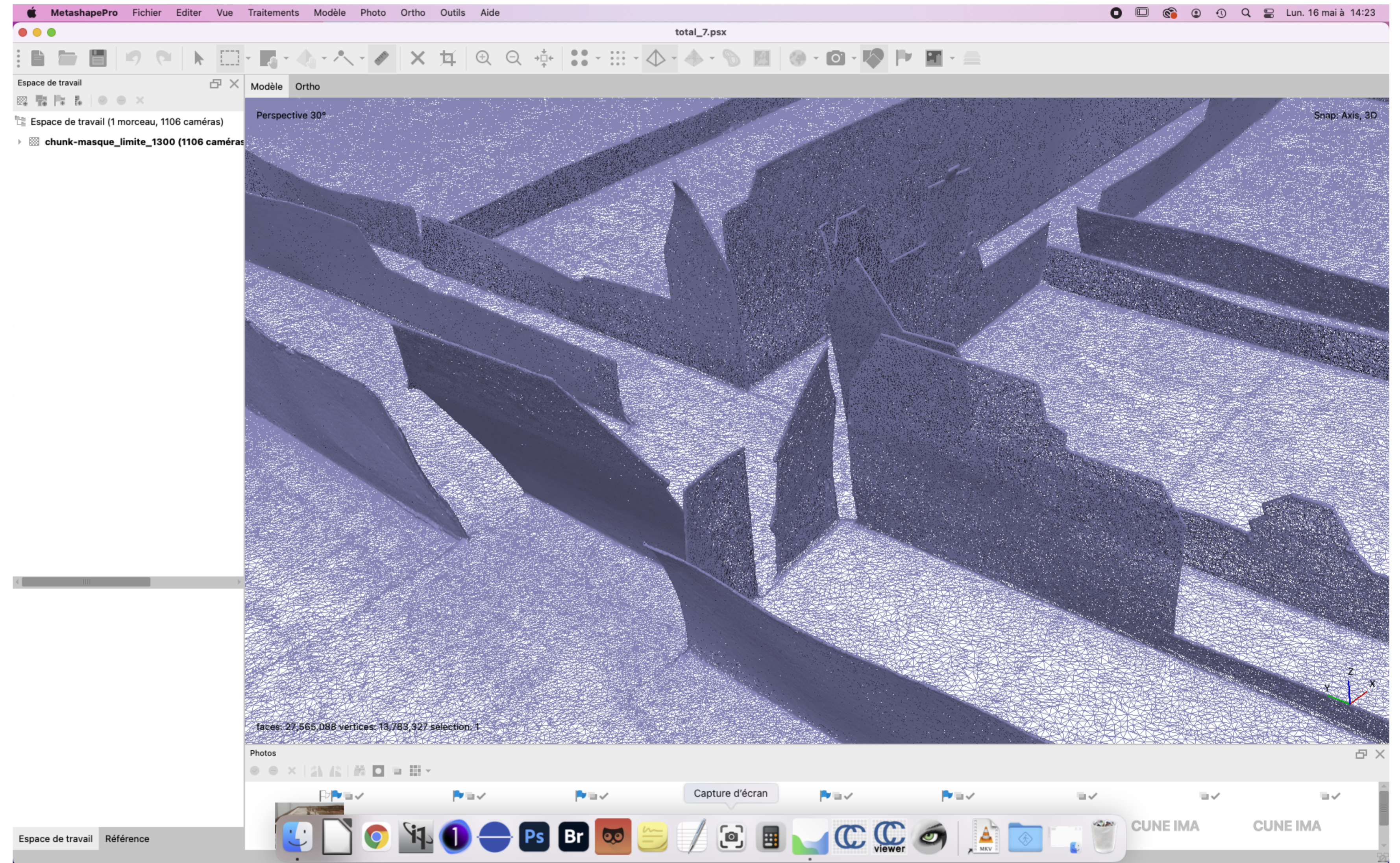


Figure 41 . Vue du maillage (modèle filaire) de la porte de France du plan Dodet, crédits : William Siméonin..

Un nouvel objet patrimonial

Résultats de l'auscultation

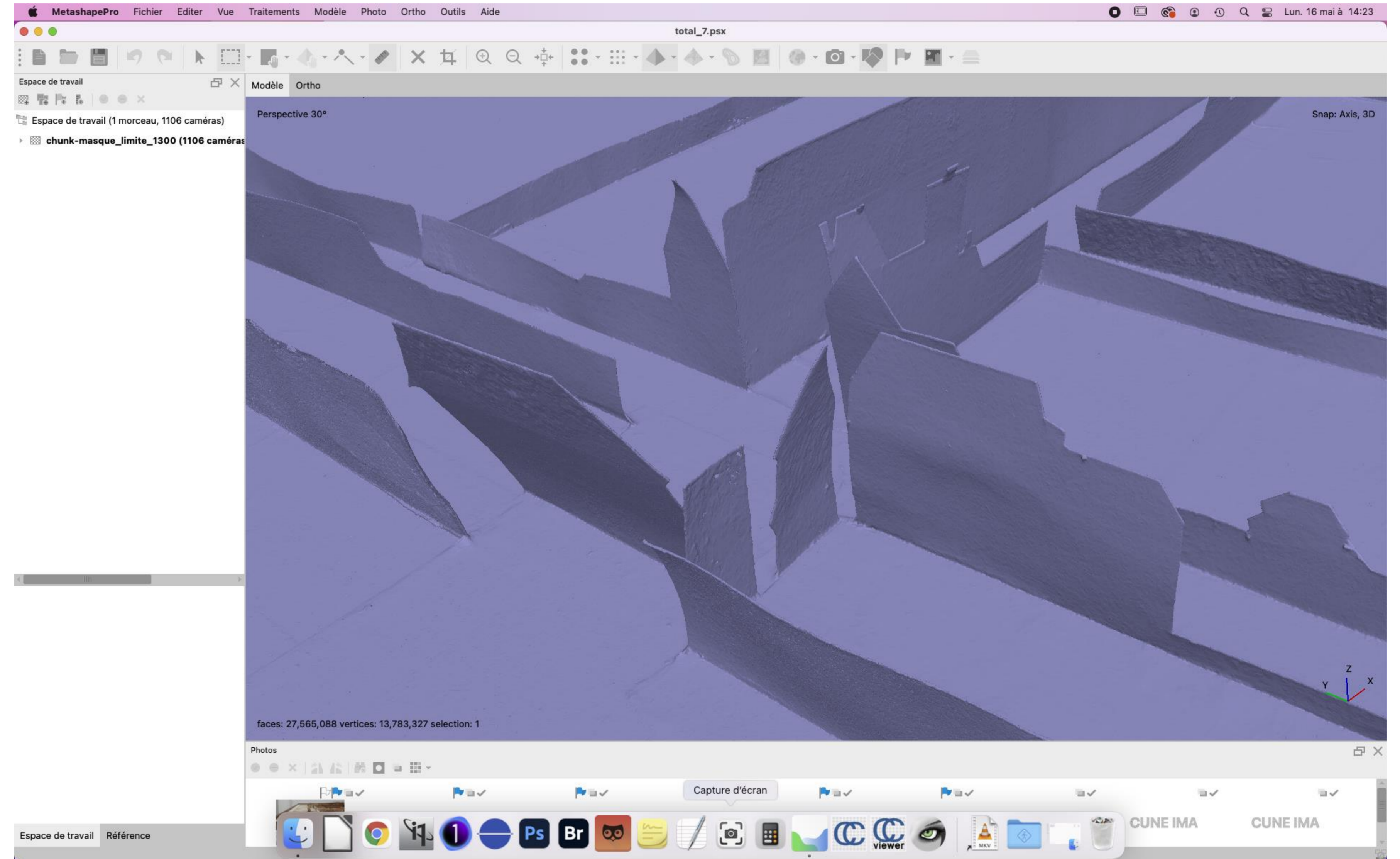


Figure 42 . Vue du modèle solide de la porte de France du plan Dodet , crédits : William Siméonin.

Un nouvel objet patrimonial

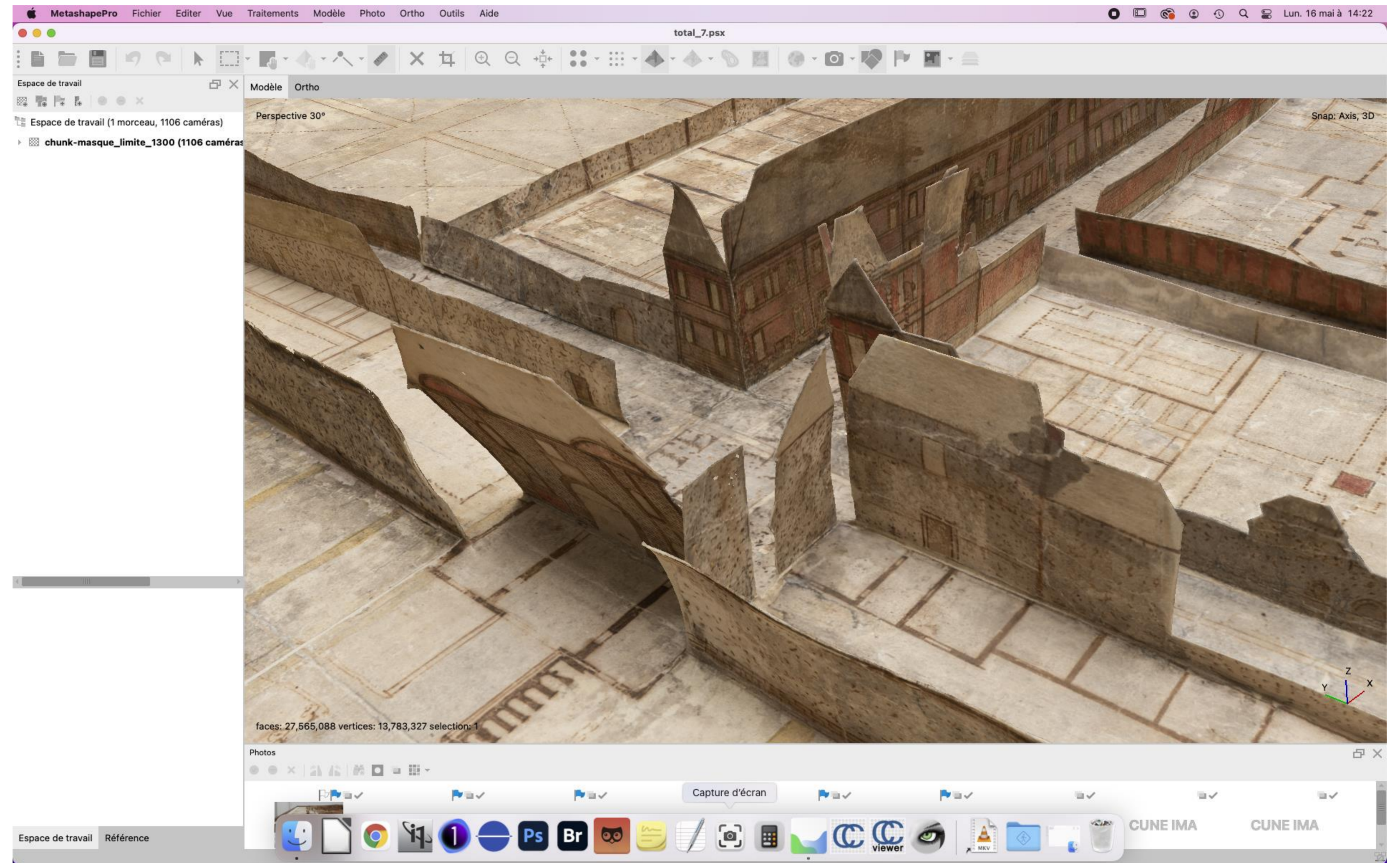


Figure 43 . Vue de la surface texturée de la porte de France du plan Dodet , crédits : William Siméonin.

Mise en place
d'un jumeau numérique

Le modèle texturé en
cours
d'implémentation.



Figure 44 . Vue de la surface texturée de la porte de France du plan Dodet , crédits : William Siméonin, Sylvain Rassat.

Un objet patrimonial numérique

Un item numérique
consultable en ligne.

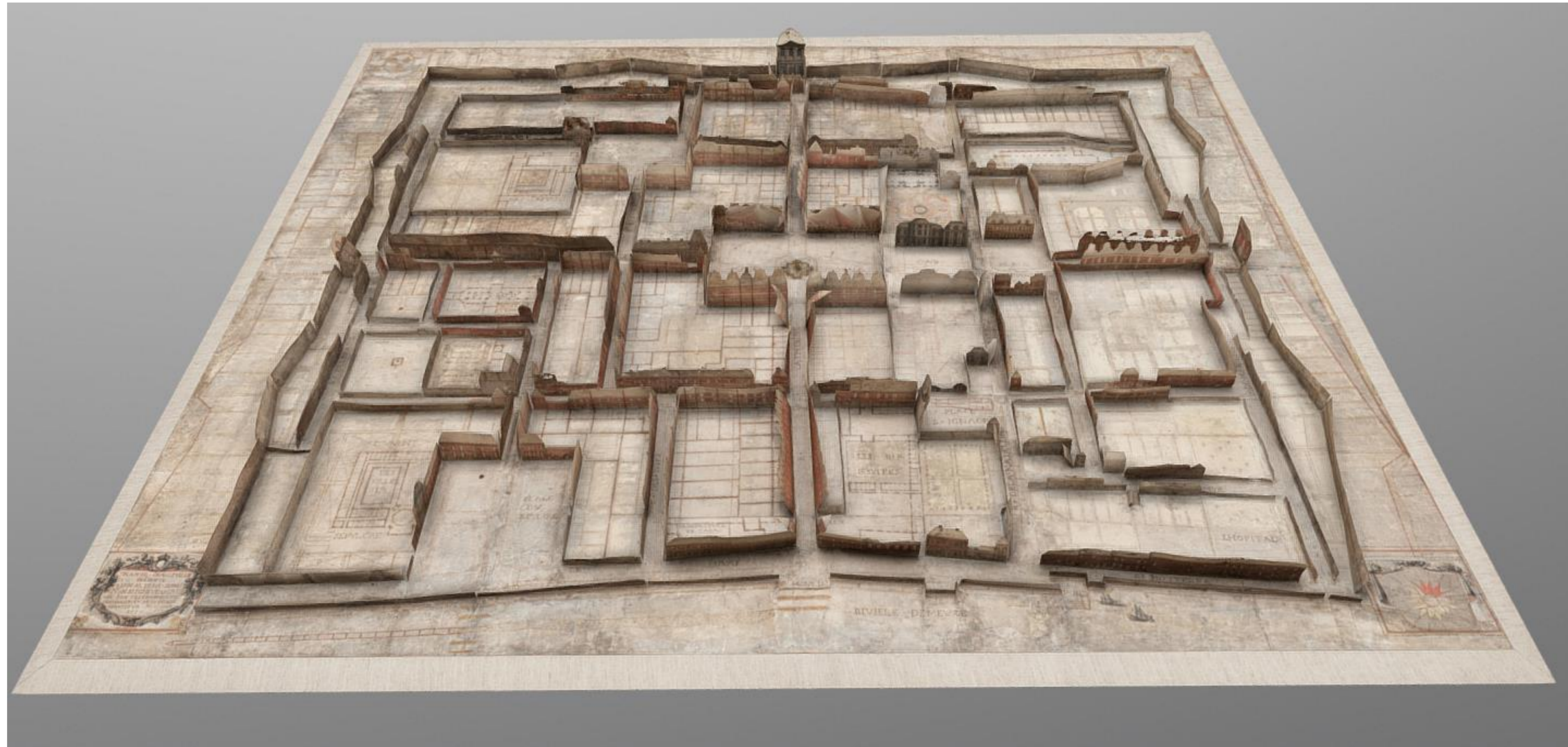


Figure 45 . Vue du modèle 3D optimisé et déposé en ligne, crédits : William Siméonin, Sylvain Rassat..

<https://skfb.ly/oxDRy>

Productions d'orthophotographies

**Possibilités de
consultations et
d'édition de données
thématiques.**

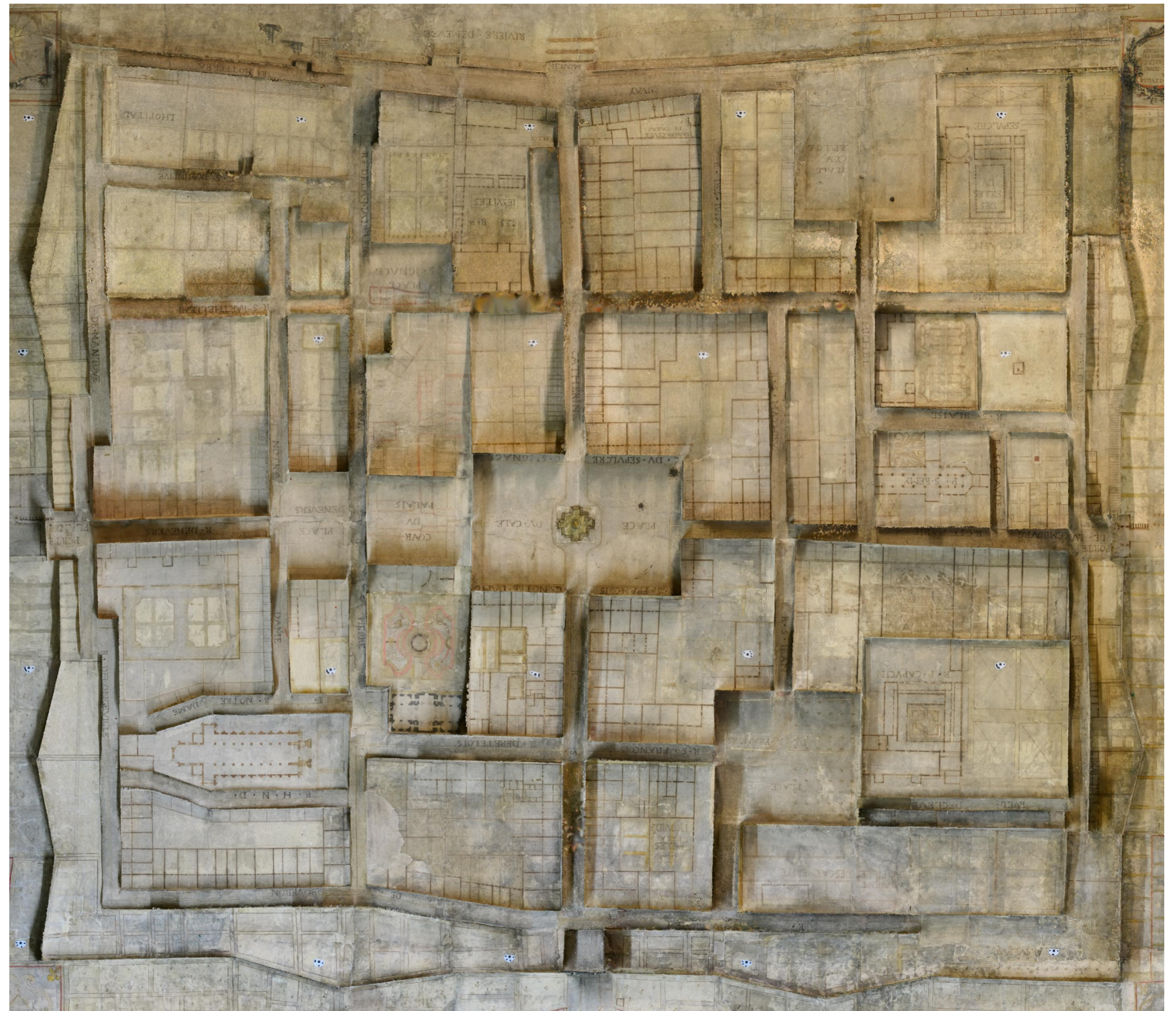


Figure 46 . Orthophotographie , crédits : William Siméonin, Sylvain Rassat.

Productions d'orthophotographies

Techniques de
numérisation de plans
avec assemblages
d'images

Pour cet exemple, 72
images ont été
nécessaires pour
numériser ce plan à
baguettes

Carte de Cassini CP/NN//5/3/1

Carte de France de Cassini réduite
au quart. Par L. Capitaine, 1790.
Carte en 25 feuilles assemblées.
Carte avec noms des nouveaux
départements, cartouche achevée,
dédicace au roi, magnifique mise
en couleur et baguettes dorées et
peintes



La photogrammétrie appliquée aux documents
déformés de grandes dimensions :

les cartes et plans à baguettes conservés aux Archives
nationales de France

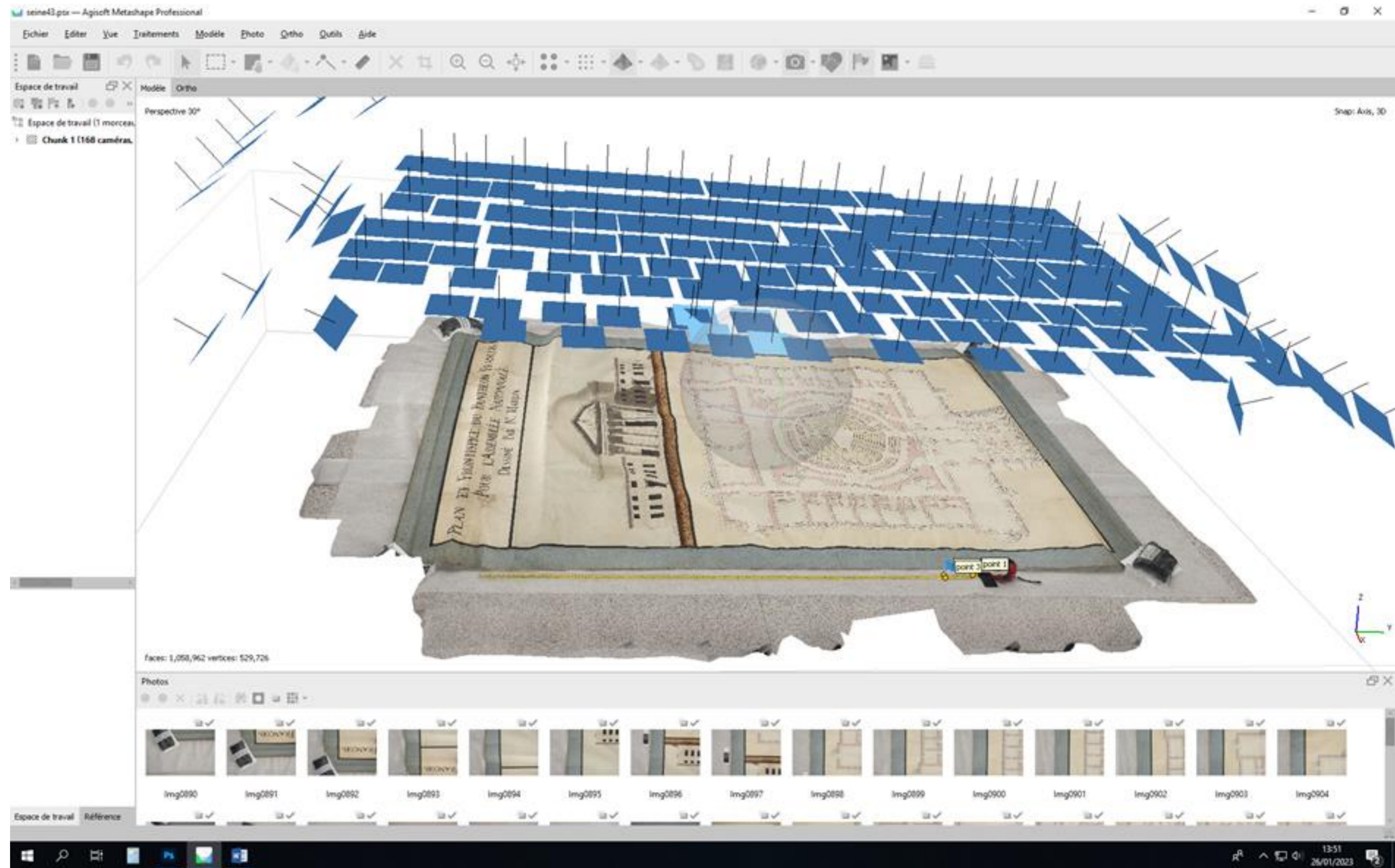
Photogrammétrie et plans déformés

Exemple de photogrammétrie à partir d'un plan à baguettes

Traitement via logiciel Metashape

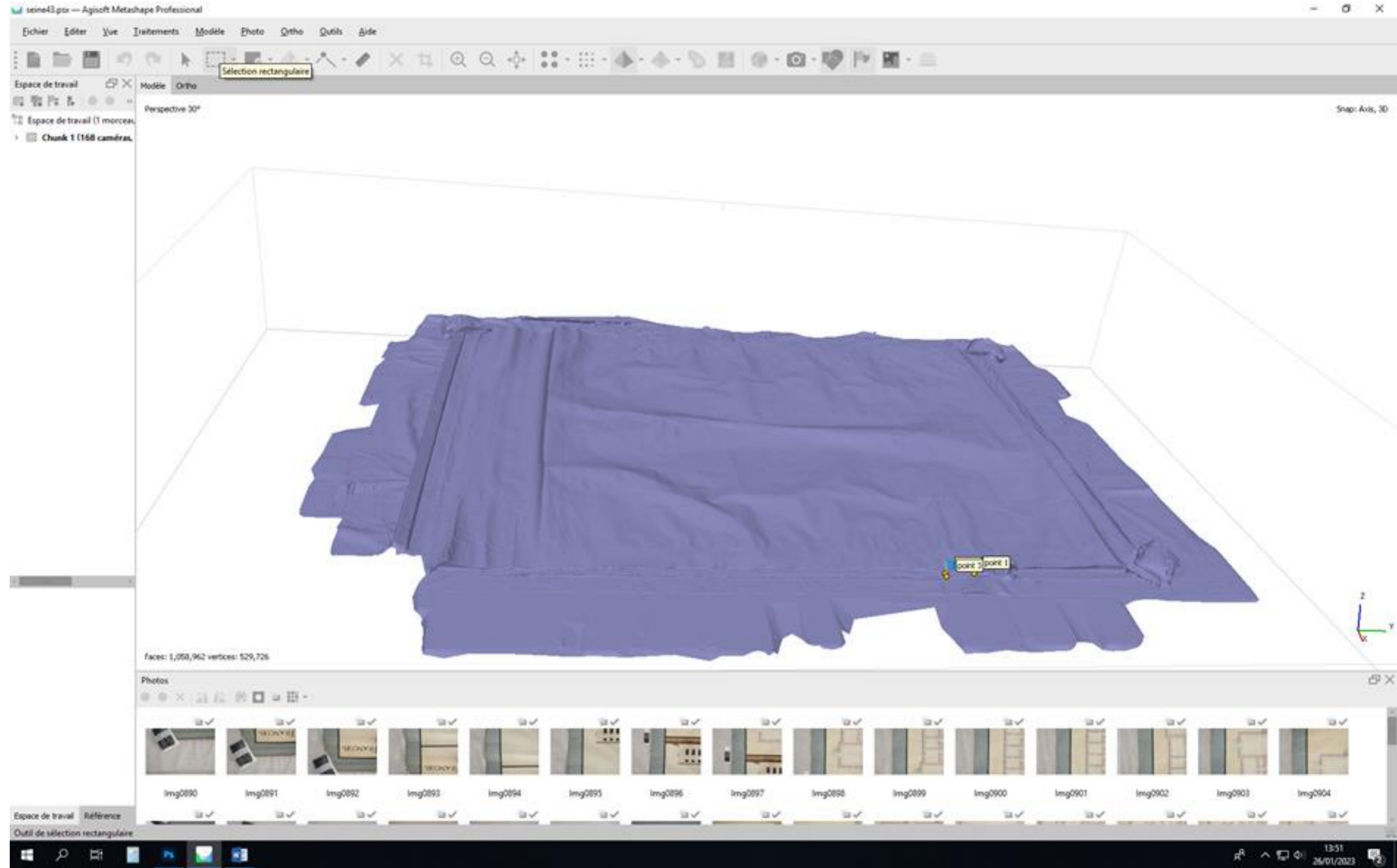
CP//I/SEINE/43

Position des caméras



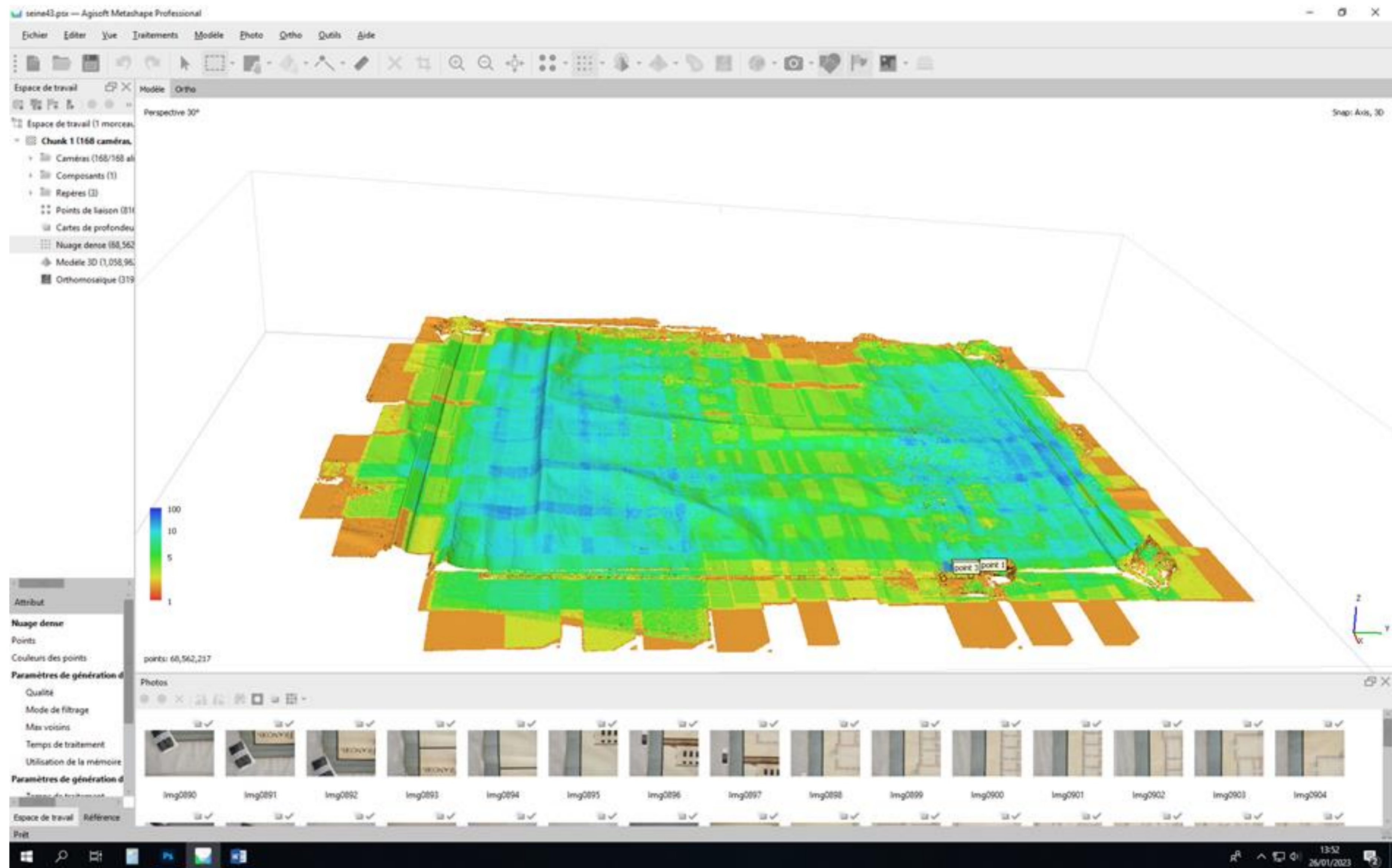
Photogrammétrie et plans déformés

Modèle solide



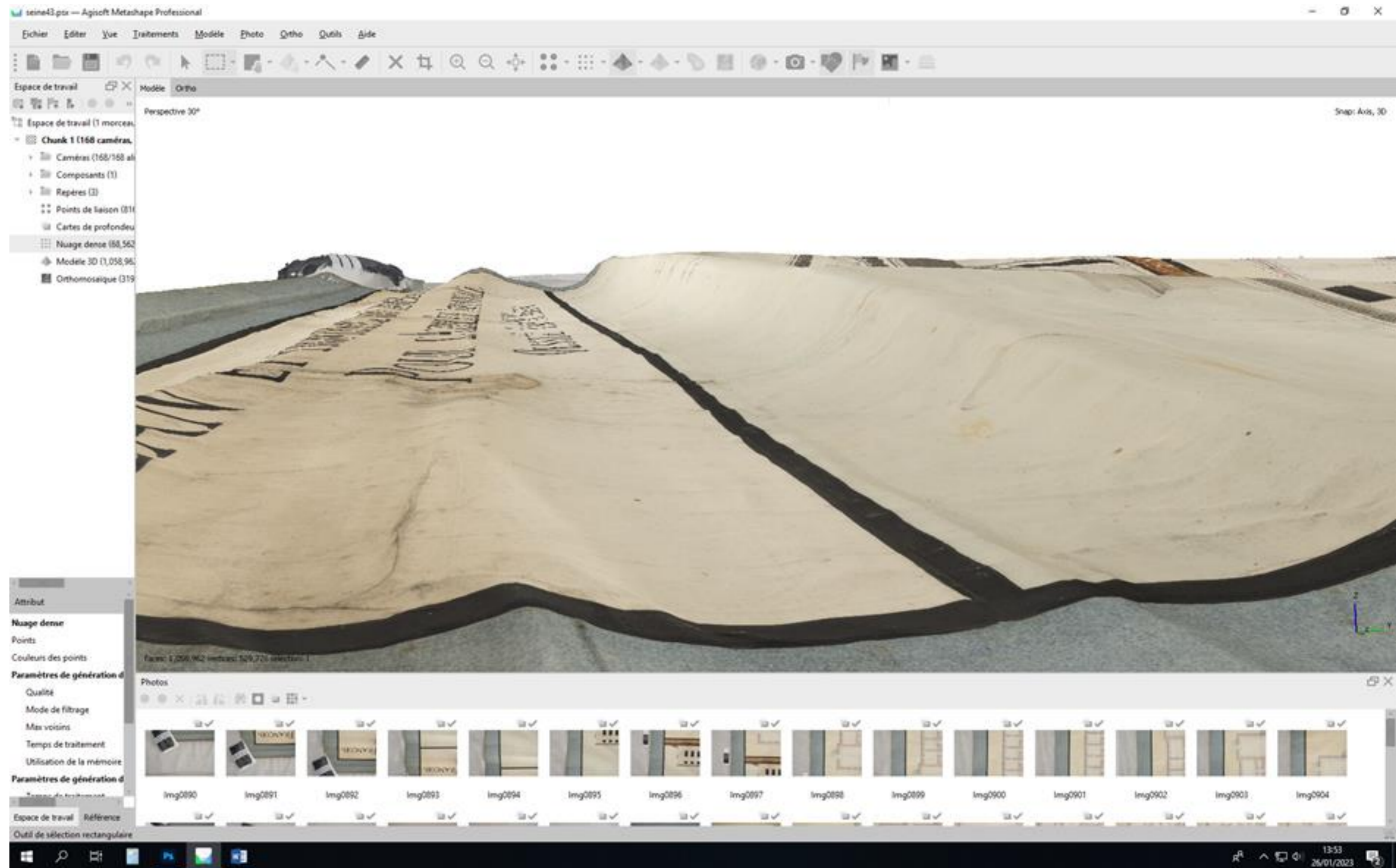
Photogrammétrie et plans déformés

Niveaux de confiance du nuage de points



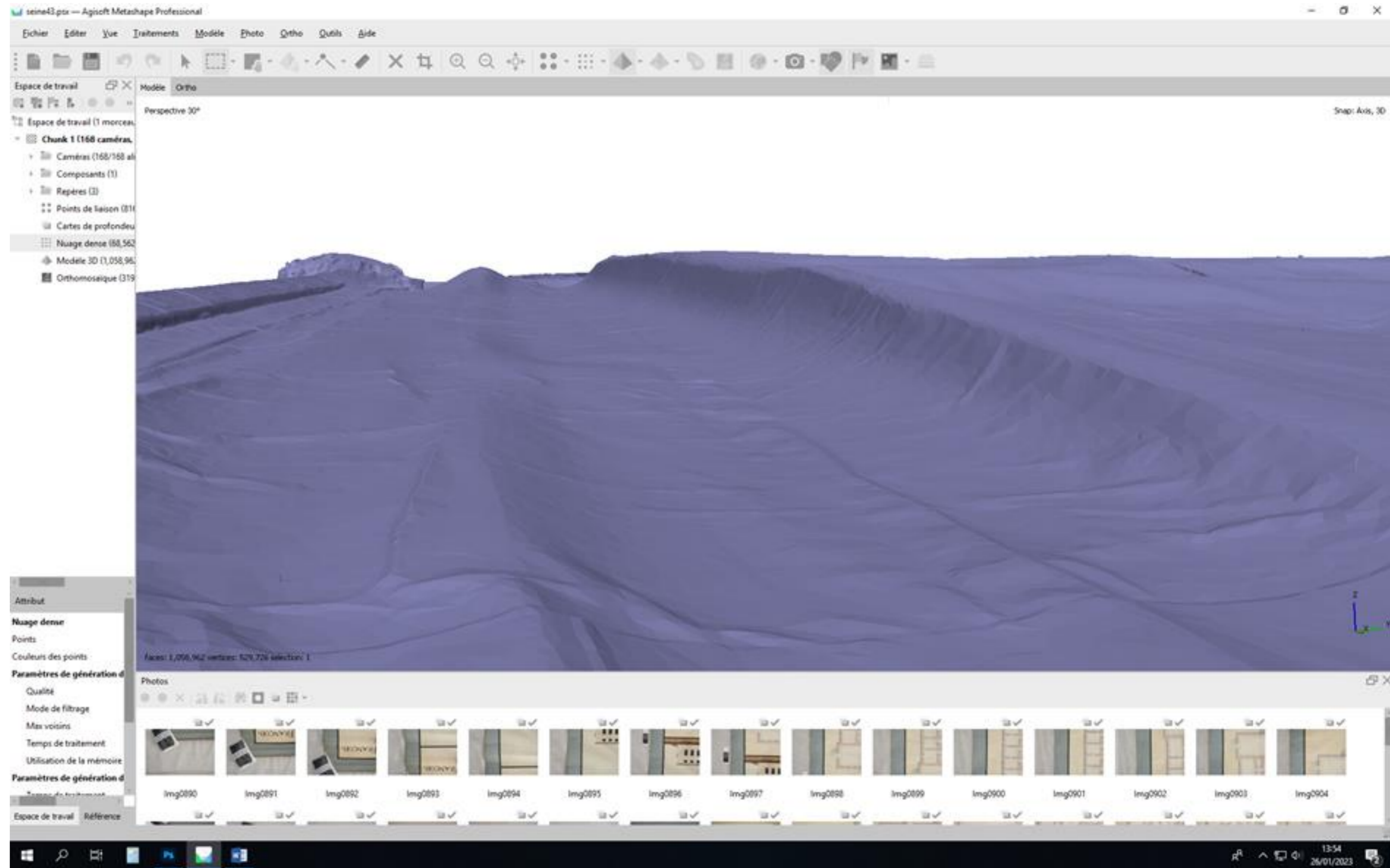
Photogrammétrie et plans déformés

Détail du plan modélisé avec textures



Photogrammétrie et plans déformés

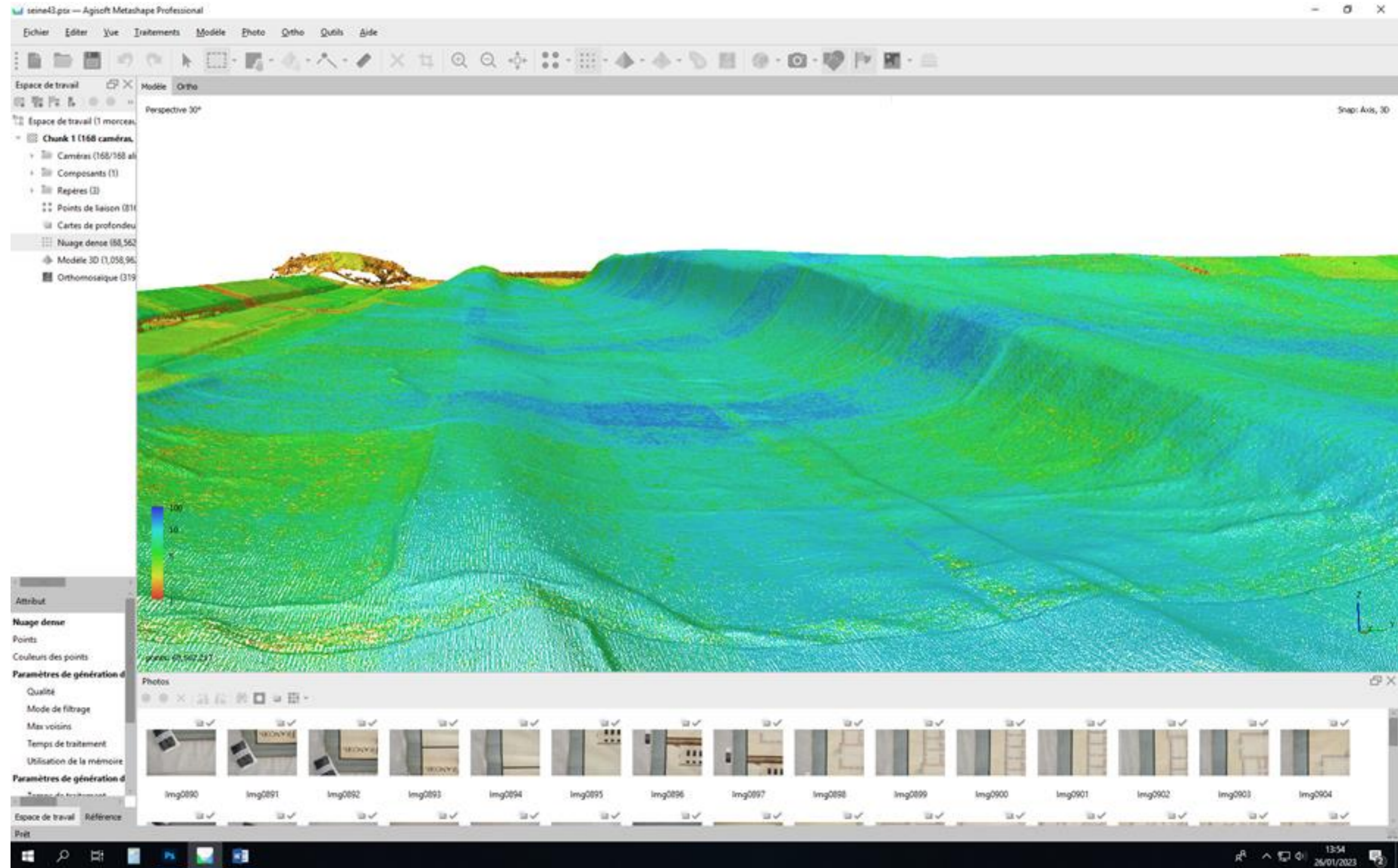
Modèle solide sans textures



Photogrammétrie et plans déformés

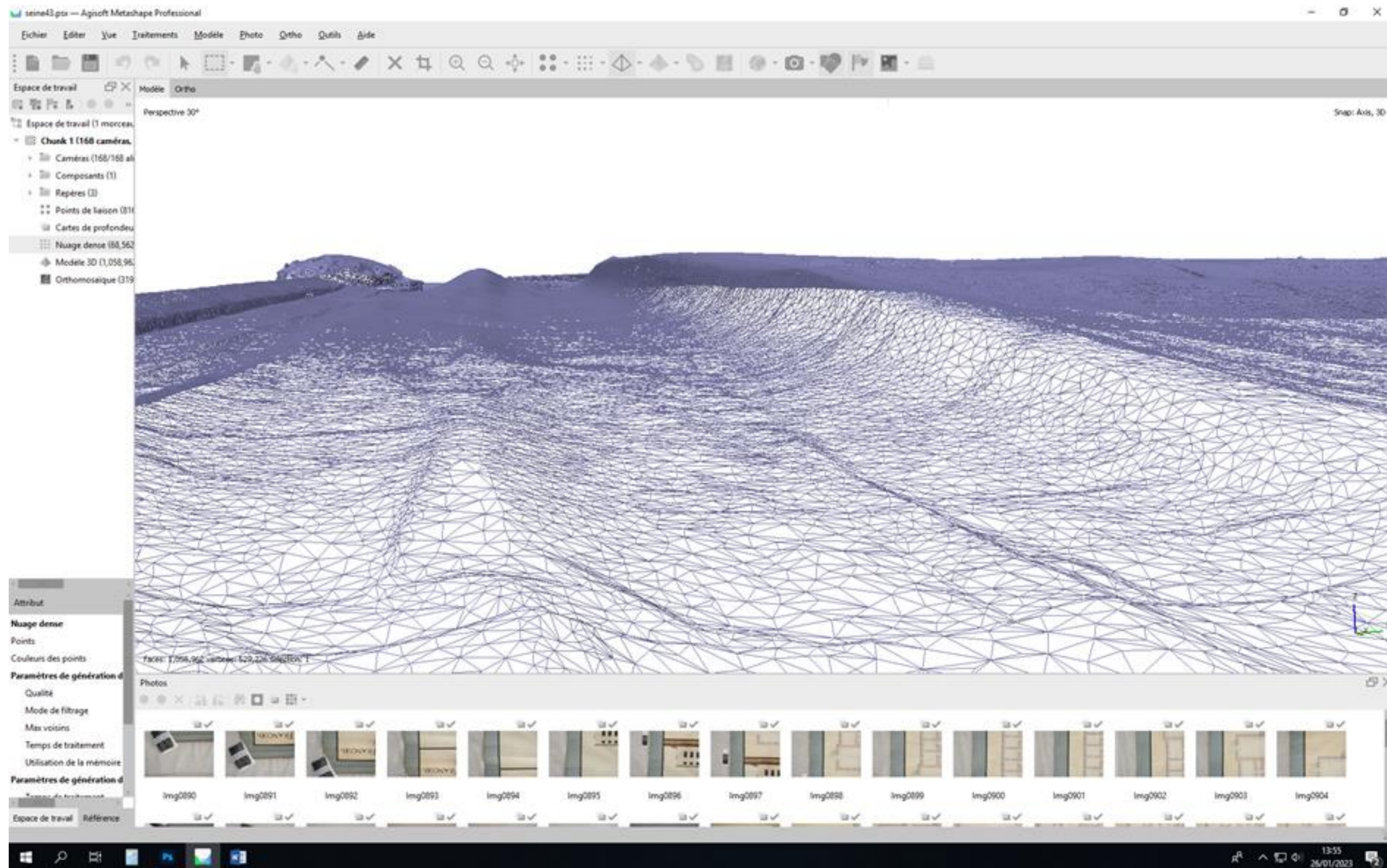
Détail avec niveaux de confiance

(Nuages de points)
Échelle en périphérie



Photogrammétrie et plans déformés

Maillage

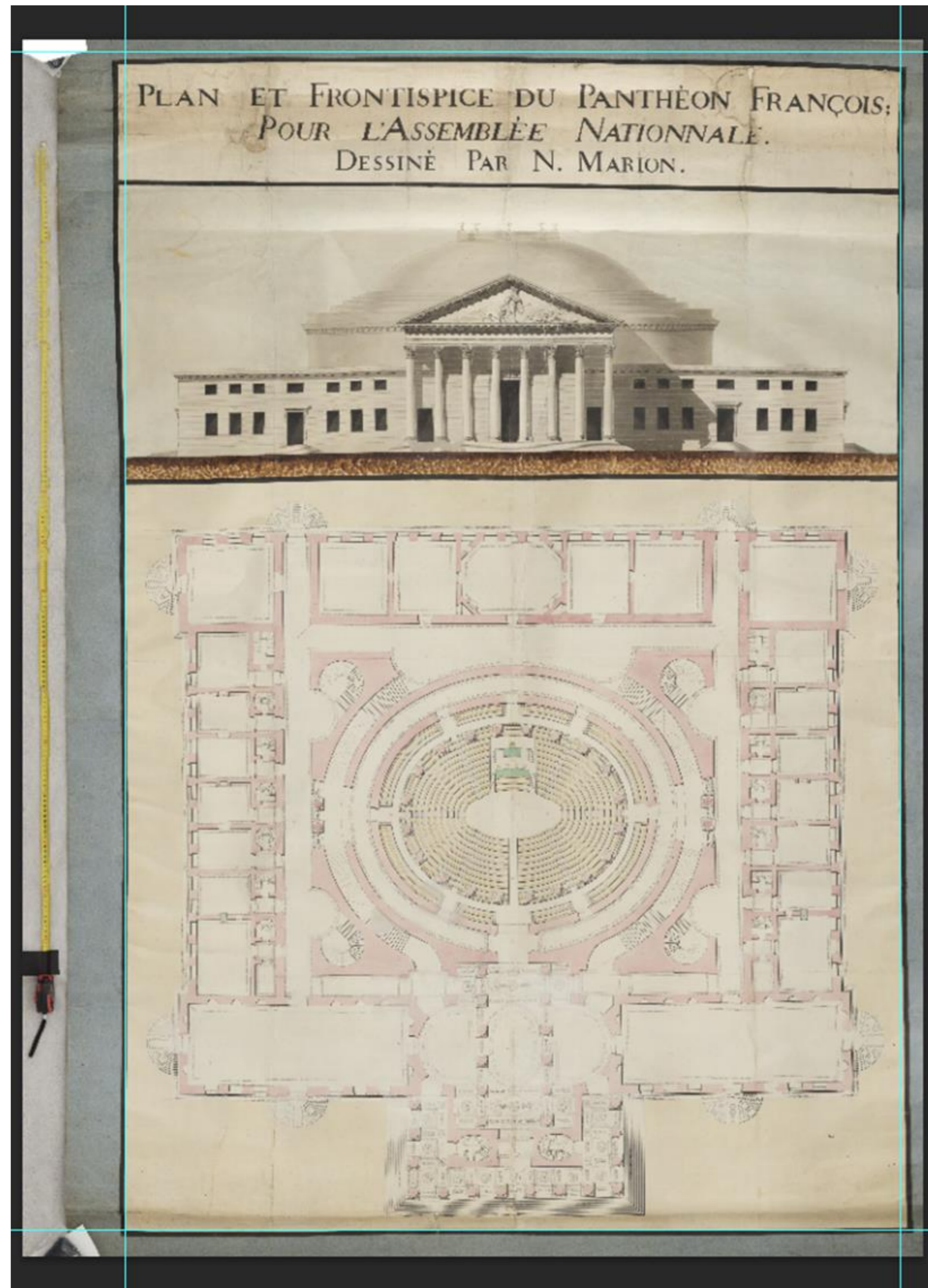


Photogrammétrie et plans déformés

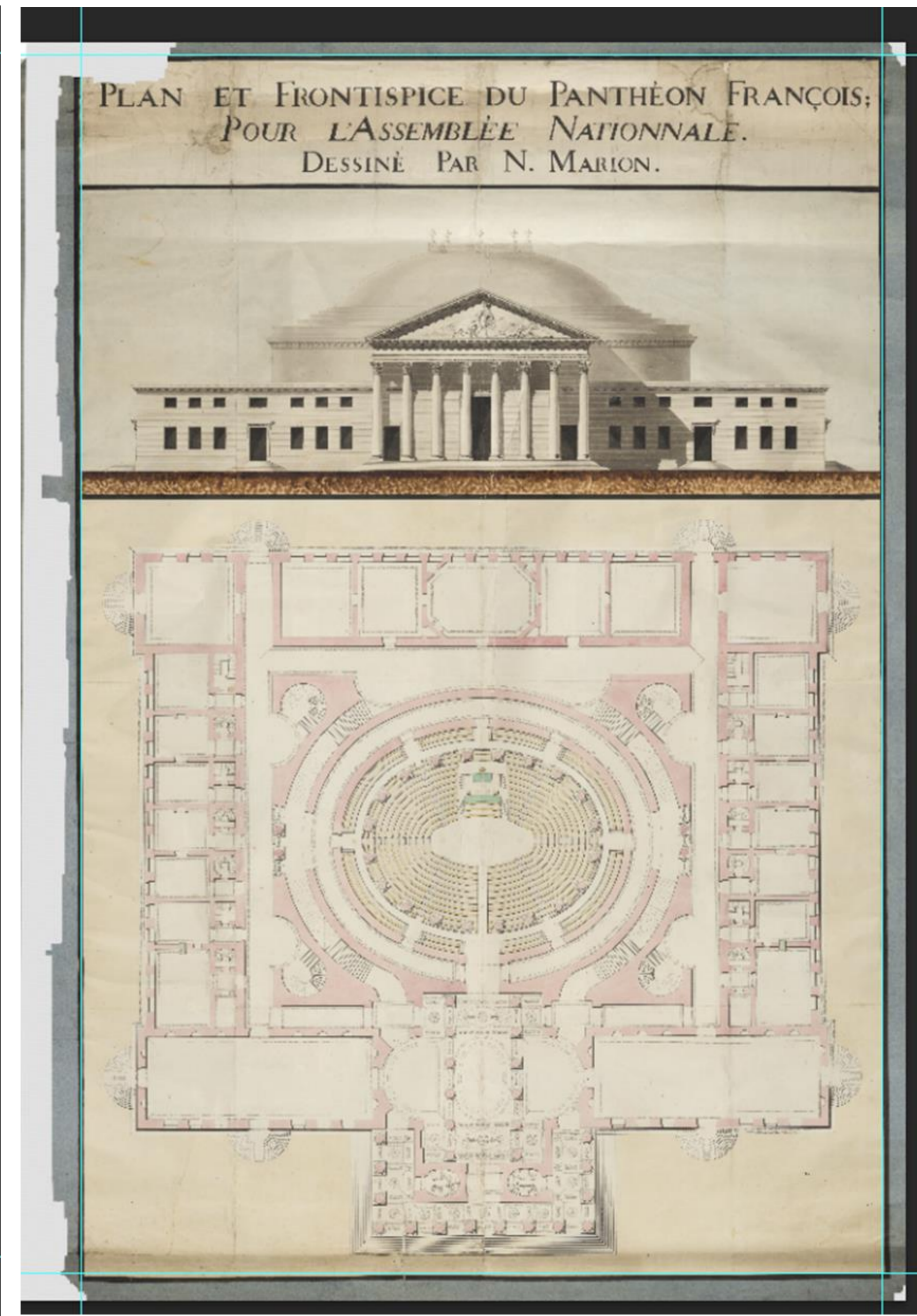
2 orthophotographies

1- orthophoto classique

2- orthophoto avec mise à plat du modèle effectuée par MicMac



1



2

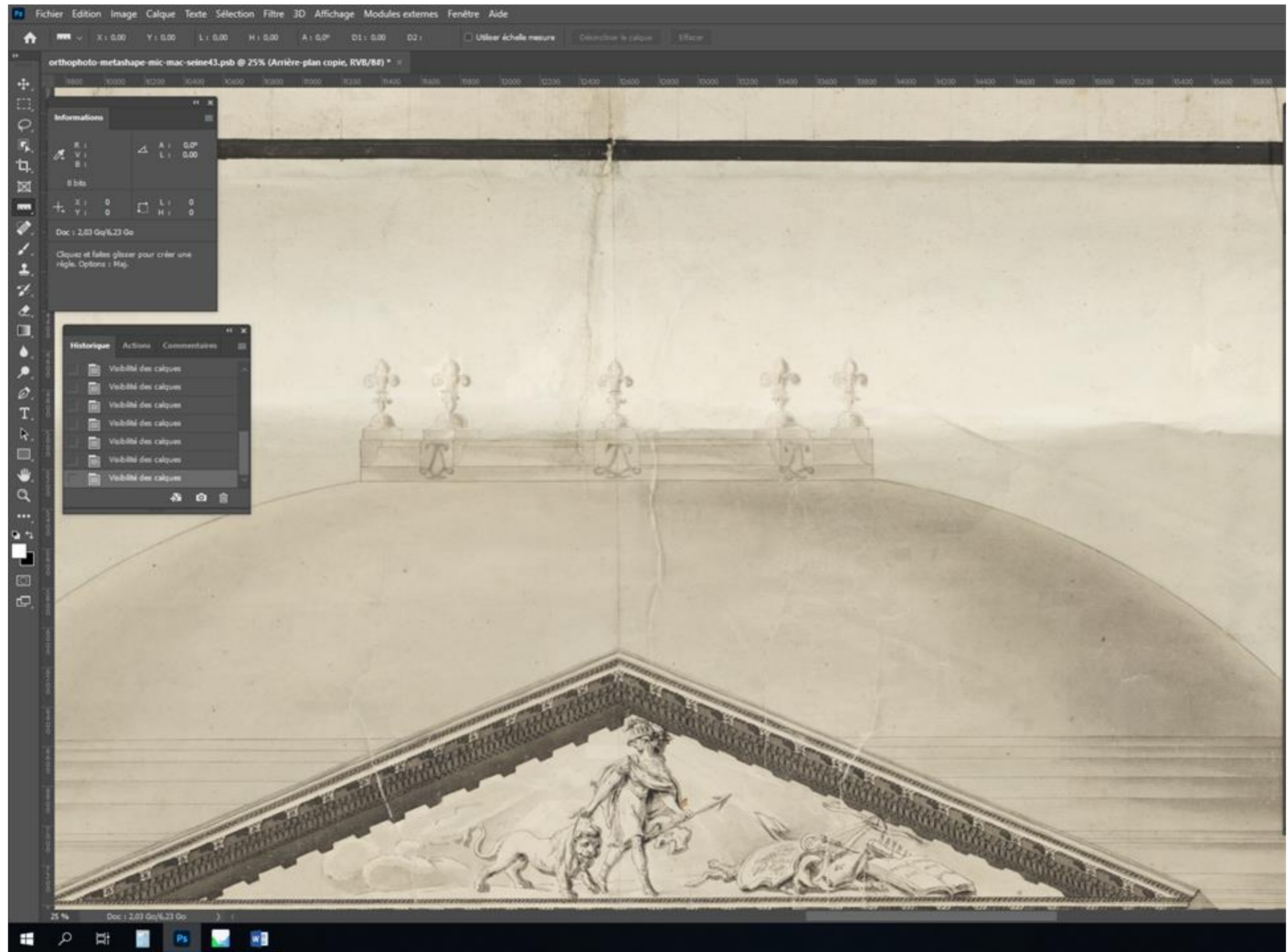
Photogrammétrie et plans déformés

Détail orthophoto sans mise à plat du modèle



Photogrammétrie et plans déformés

Détail orthophoto avec mise à plat du modèle



Photogrammétrie et plans déformés

Exemple de captures isolées du document CP/N/I/Seine/26 :

Déformations constatées sur ce plan entoilé de grandes dimensions pourvus de 2 baguettes en chêne aux extrémités.

La numérisation se fait en vues multiples au sol pour éviter des tensions mécaniques sur les bords du plan.



Photogrammétrie et plans déformés

Protocole acquisition photogrammétrique des plans déformés pour une mise à plat

Cadre de réalisation :

Partenariat entre le LaSTIG de l'IGN et l'atelier de photographie des Archives nationales de France
Stage professionnel d'Alexandre Nghien, élève ingénieur de 3^{ème} année à L'ENSG géomatique au LaSTIG (stage en cours de réalisation pour une durée de 6 mois de mai à octobre 2023)

Enseignants référents:

Marc-Pierrot-Deseligny et Ewelina Rupnik, directeurs de recherche à l'IGN

Tuteurs de stage : Marc Paturange et William Siméonin, ateliers de photographie des AN de France

Le protocole d'acquisition des plans baguettes est élaboré à partir d'échantillons de 16 items du fonds CP/N/I/Seine. Les prises de vues seront réalisées directement au sol avec des protections adaptées sur une surface pouvant accueillir des plans de dimensions **500cm x 380cm maximum**.

Le premier montage réalisé comporte deux trépieds supportant une barre transversale de 2m. Le maximum en dimensions possibles d'un plan est de 380cm x 180cm (le dispositif va se développer en cours de stage sur de plus grandes dimensions)

Il est question d'obtenir des images développées de surfaces complexes à aplanir manuellement à une résolution de 300 dpi minimum (1 dpi = 2,54cm). Ces surfaces, étant des cartes, sont par définition des surfaces mathématiquement développables.

Alexandre Nghien formera les photographes des AN à l'emploi du logiciel de photogrammétrie MicMac développé par l'IGN qui fonctionne uniquement en lignes de commandes sous LINUX et permet la mise à plat virtuelle des documents déformés (une interface graphique sera développée par ses soins pour notre équipe)



Dispositif de prise de vue orthonormé



Photogrammétrie et plans déformés

Moyens à disposition

La caméra utilisée est un Nikon D810, capteur plein format (35,9mm x 24mm) comportant 7360 x 4912 pixels. L'objectif possède une focale de 60 mm.

Taille photosite = $4.87E-4\text{cm} = 4.87\mu\text{m}$

Résolutions

La résolution de 300 dpi impose une contrainte sur la hauteur de l'appareil photo (la taille des pixels étant connue et la focale fixée).

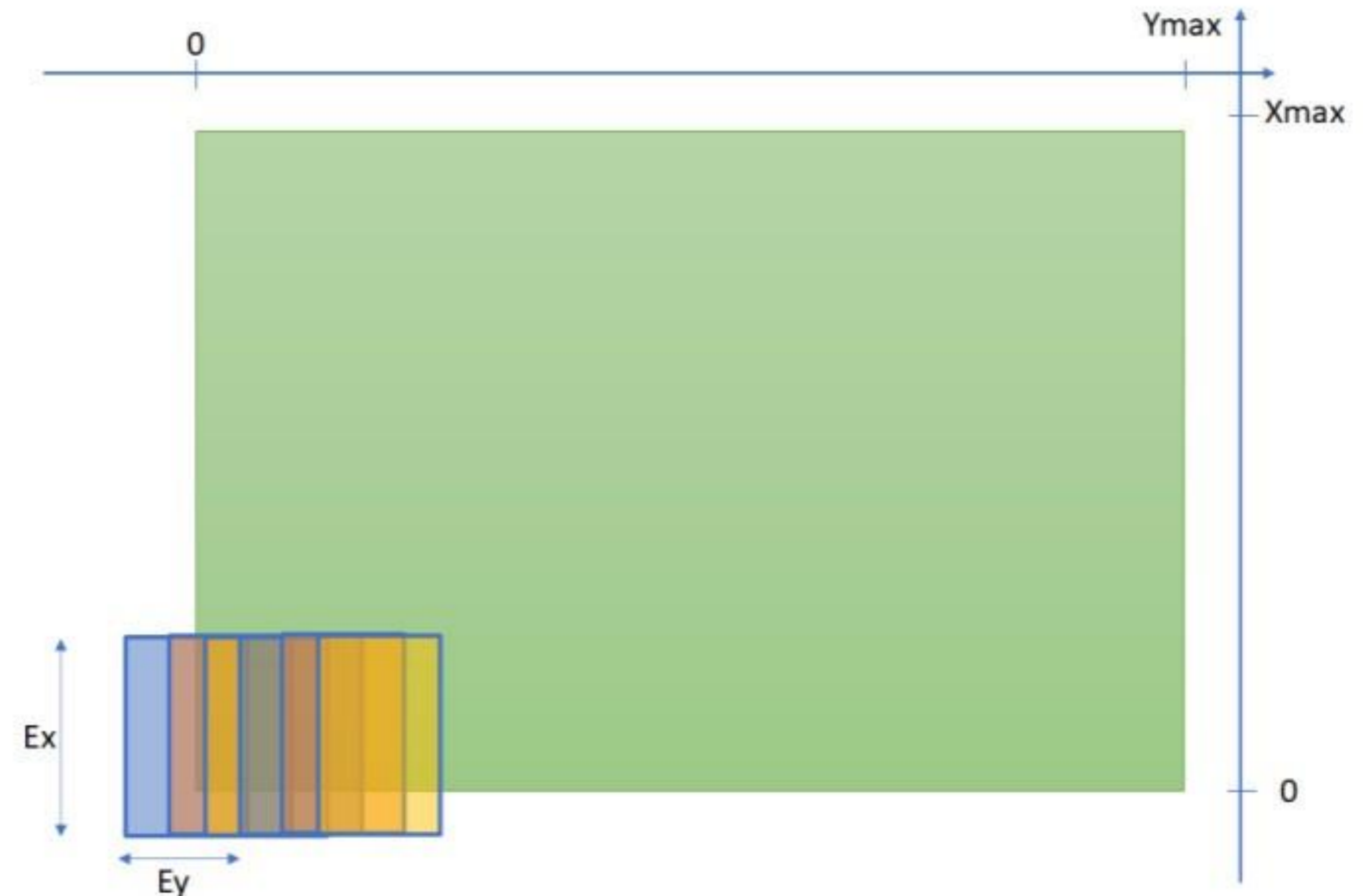
Afin de s'assurer un minimum de 300dpi, on prendra comme hauteur maximale $H=103,8\text{cm}$.

À 103cm :

Emprise = **61,6 cm x 41.2 cm**

Vue nadir du parcours de l'appareil:

En vert : carte à photographier
En bleu/rouge/jaune : les clichés successifs



L'objectif est de réaliser le moins de photographies possibles afin de limiter les erreurs et les temps de calcul, avec comme contrainte d'avoir un triple recouvrement pour chaque détail des objets capturés.

Ainsi pour un recouvrement identique, il est plus pertinent de réaliser des recouvrements longitudinaux (on avance dans le sens perpendiculaire au plus grand côté du capteur, cf schéma).

Vue de profil du parcours de la caméra

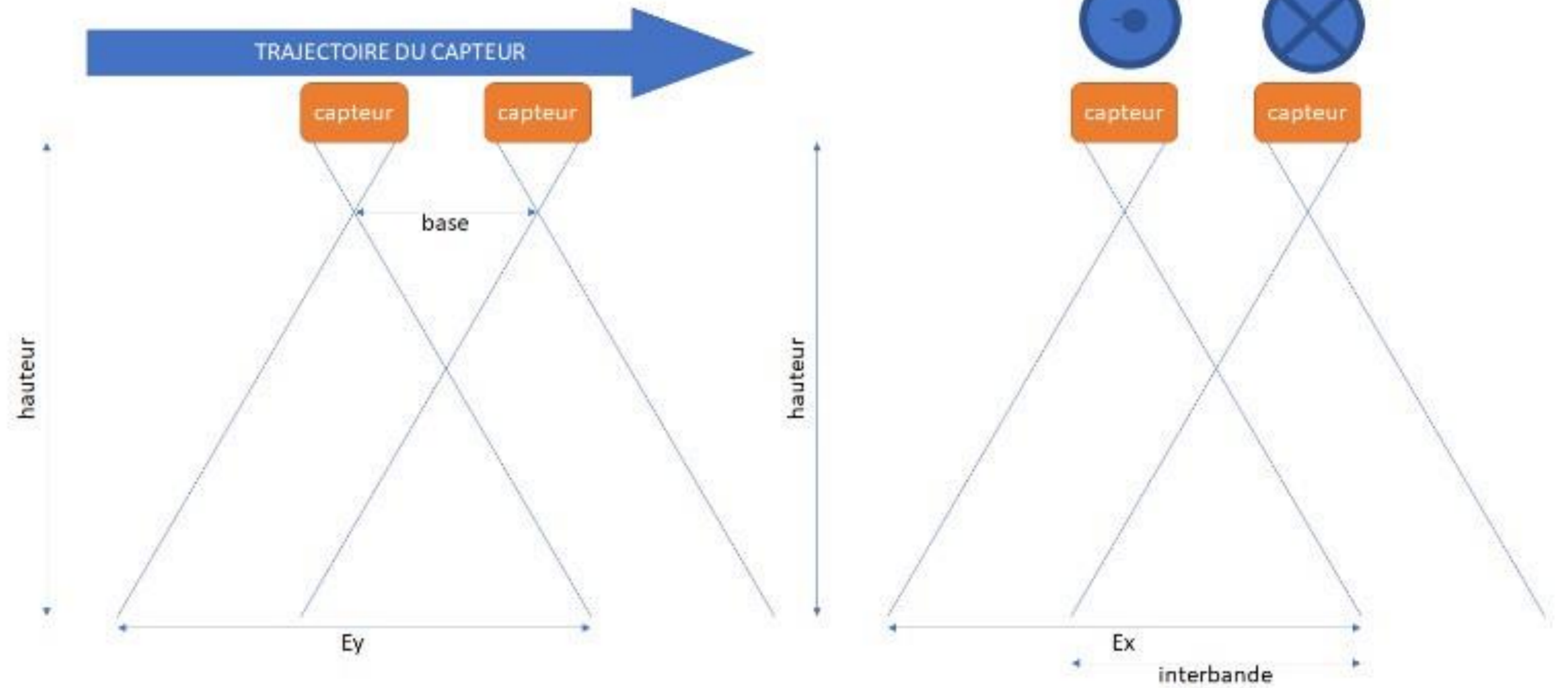
On suppose que la hauteur sera identique pour toutes les prises de vue (sauf exception si une focale différente est utilisée : recalculer la hauteur et la base).

La base (distance entre deux prises de vues successives) vaut ici :

$$\text{Base} = 8.24\text{cm}$$

L'écart interbande vaut :
emprise * (1 -
recouvrement interbande)

$$\text{Ecart interbande} = 40.04\text{cm}$$



Avec Ex = grand côté de l'emprise, Ey = petit côté de l'emprise.

Étapes d'acquisition

On définit au préalable pour chaque plan baguette le nombre de bandes et de photographies à prendre afin de vérifier pendant et après l'acquisition le bon déroulé du processus.

Les plans étant déformés, on commence par effectuer les acquisitions au nadir sur le rail puis on effectuera ensuite les acquisitions obliques à main levée, uniquement sur les zones courbées pour récupérer le maximum d'information en texture pour avoir une résolution similaire.

1. Acquisitions nadir

- Positionner la rampe à peu près à 1m du sol et fixer l'appareil sur la rampe
- Ajuster la hauteur du centre optique de l'appareil à exactement 103,6cm
- Fixer le zoom et la focale et NE PLUS Y TOUCHER

On peut positionner l'appareil photo de façon orthogonale par rapport au sol.

- Se positionner dans un coin du plan, avec uniquement 25% du plan maximum dans la prise de vue
- Commencer l'acquisition
- Résolution finale en DPI sur l'image développée : 300 dpi.

2. Acquisition main levée

Lorsque les acquisitions sont réalisées à main levée, l'utilisateur veillera à prendre en photo sur les zones pliées



Chaîne de traitement

Les clichés réalisés, il faut les développer en corrigeant si possible le vignettage, mais sans corriger les déformations optiques liés à la diffraction, MicMac s'en chargera.

L'objectif de cette chaîne de traitement est de développer la surface acquise.

Modéliser : recréer le modèle 3D du plan déformé.

Relier les différentes photos entre elles, pour les superposer et savoir les repositionner entre elles dans l'espace (ici espace en 3 dimensions, repère orthogonal). Les tâches effectuées sont :

Détecter des points homologues entre les différents clichés successifs

Un point homologue est un point d'intérêt (angle, point comportant une forte variation) qui est détecté sur plusieurs images.

Déterminer l'orientation relative entre les caméras

Dans un repère quelconque (en l'occurrence celui du premier cliché) on estime les poses dans l'espace des caméras et ainsi des clichés par triangulation dans l'espace.

Saisie d'une échelle, d'un plan

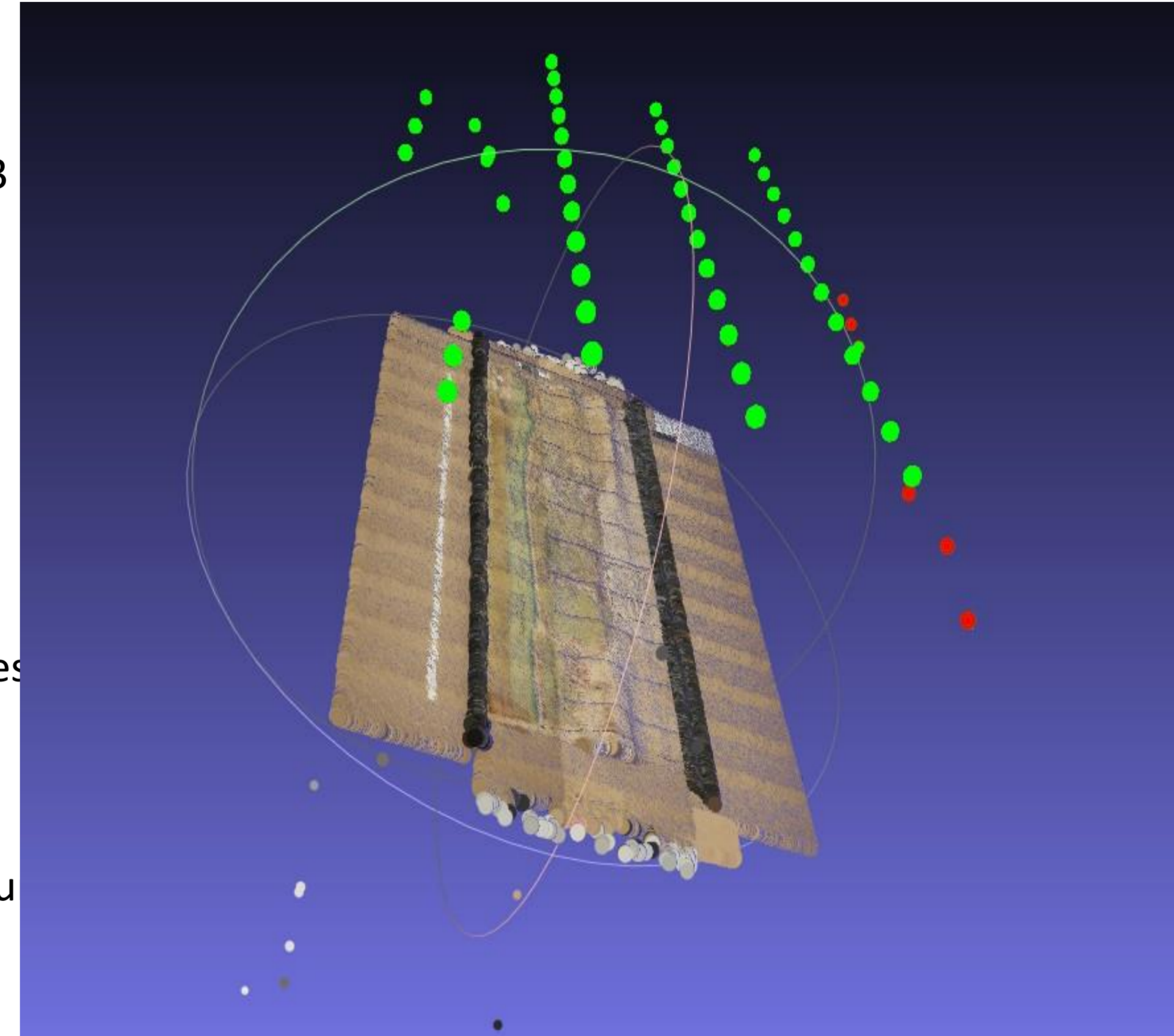
On saisit à la main l'échelle de travail à partir de la mire posée sur le chantier photo afin d'avoir une référence et signification physique du traitement.

Basculement du bloc

Le bloc est basculé afin de correspondre au plan saisi et remis à l'échelle

A partir de cette étape, on peut déjà visualiser un aperçu du bloc et de la position des caméras.

En vert (rouge aussi mais vu de devant) apparaissent les positions des prises de vue des différents clichés.

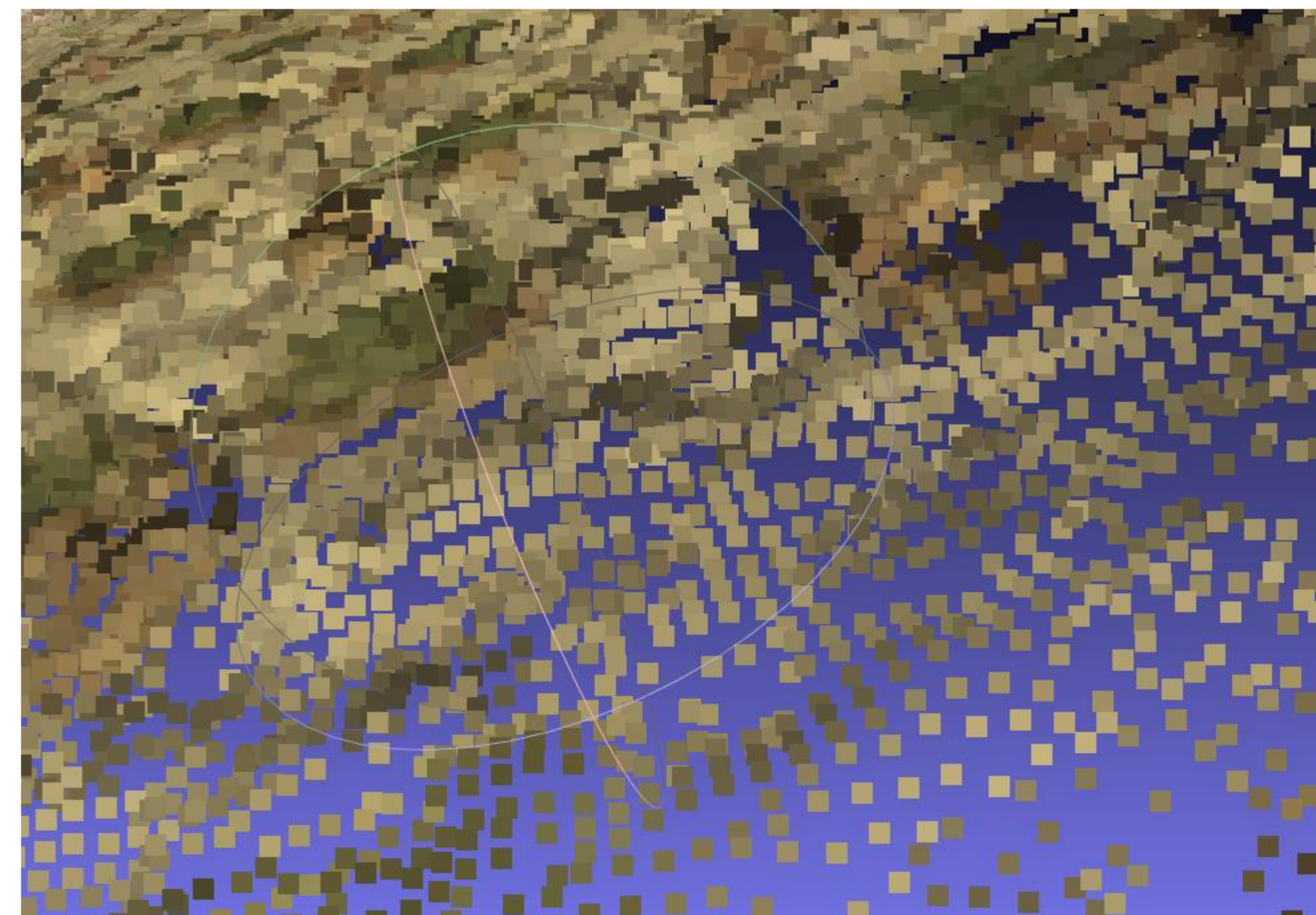
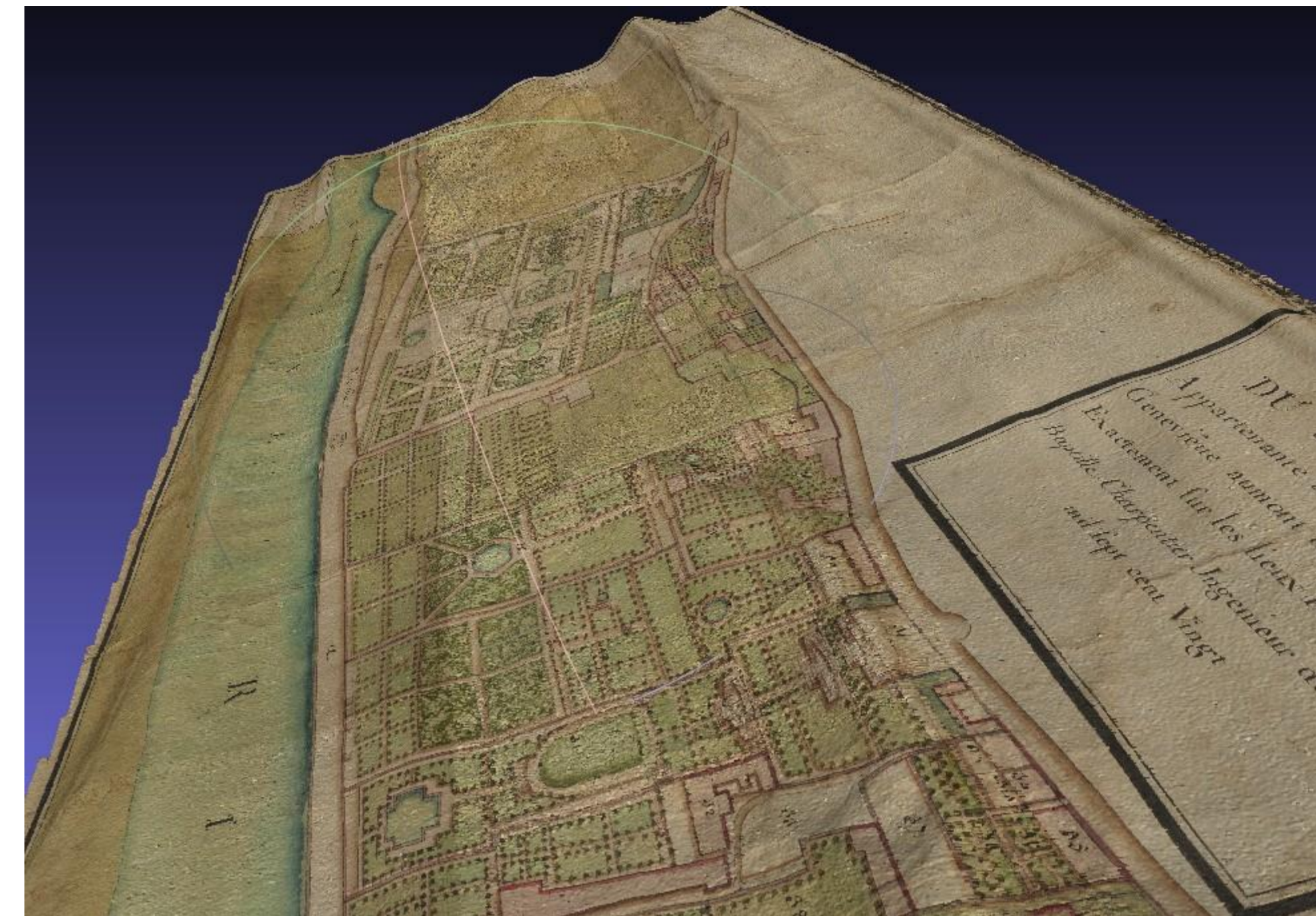


Réalisation du modèle 3D

Réaliser le nuage de points dense

Nous connaissons la position des caméras lors de chacun des clichés. Ainsi, nous allons projeter chacun des détails (pixels) pour estimer une position dans l'espace et ainsi un point. Cette étape est coûteuse en temps de calcul.

On visualise ici le nuage de points dense. Un point 3D correspond à un pixel dans une photo, ce qui explique que nous ne voyons qu'une surface.



Réalisation du modèle 3D

Réaliser le maillage 3D

A partir du nuage de points dense, on relie les points les plus proches entre eux, afin d'obtenir un maillage constitué uniquement de triangles.

La suite concerne la chaîne de traitement expérimentale d'aplatissement de surfaces.

(Travail en cours !!...)

Restriction de la zone d'étude en appliquant le masque défini plus tôt (maillage précédent corrigé et découpé)

Développement du maillage 3D (sans texture)

Calcul de la visibilité, qualité et radiométrie des triangles, Égalisation radiométrique

Application de la texture sur la surface développée

Critères d'évaluation radiométriques et colorimétriques à prendre en compte

