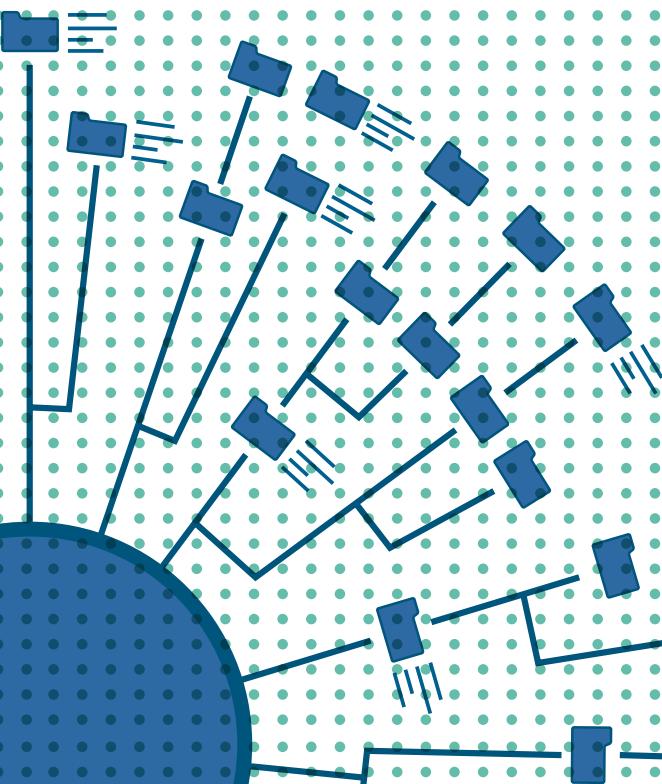


LIVRET MÉTHODOLOGIQUE

DESCRIPTION DES MÉTADONNÉES DES ACQUISITIONS NUMÉRIQUES

Et quelques préconisations

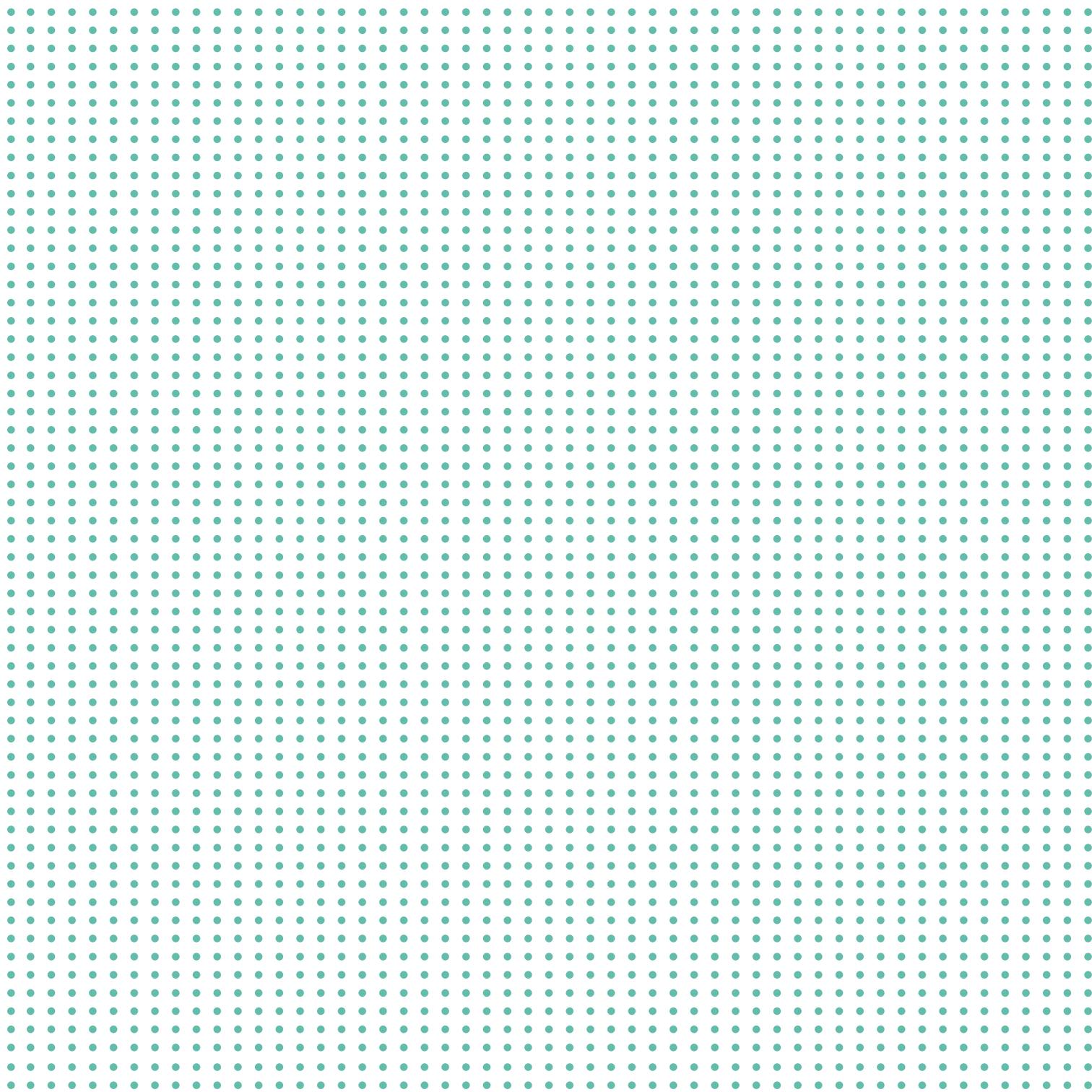


Centre
National de
Préhistoire



Direction générale des Patrimoines - Sous-direction de l'archéologie





Ecriture et conception : 2017

SOMMAIRE

INTRODUCTION	P.6
TOPOGRAPHIE	P.8
PHOTOGRAPHIE	P.12
LES RELEVÉS 3D	P.21
LASERGRAMMÉTRIE	P.22
PHOTOGRAMMÉTRIE	P.30
RECONSTRUCTION DE SURFACE	P.36
ENRICHISSEMENT VISUEL	P.40
FINALISATIONS	P.50
FICHES FORMATS DE FICHIERS	
PHOTOGRAPHIES / IMAGES	P.54
NUAGES DE POINTS	P.55
MODÈLES MAILLÉS	P.56
RÉFÉRENCES	P.57
CRÉDITS IMAGES	P.59

INTRODUCTION

Avec l'évolution des techniques de numérisation 3D, nous avons assisté à une augmentation des commandes de ressources numériques 3D de biens patrimoniaux à des prestataires spécialisés. Ceux-ci sont exploités le plus souvent dans des buts de recherche et de valorisation auprès du public. Au delà de leur capacité à fournir des ressources précieuses pour faire progresser les connaissances de ces objets patrimoniaux, ces programmes de numérisation ont précipité les acteurs du domaine patrimonial dans un des grands défis de notre époque : le **Big Data**. En effet, l'acquisition de telles ressources représente de très gros volumes de données complètement hétérogènes selon les techniques utilisées et les sources dont elles proviennent.

Les différentes techniques d'acquisition sont complémentaires et s'adaptent toutes à un contexte ou un besoin particulier. Or, chaque outil matériel (appareil photographique, scanner ...) ou immatériel (logiciel informatique) influe sur les données produites et les conditionne : des algorithmes différents produisent des données différentes, sans que cela soit visible à l'œil nu. Il devient alors primordial d'archiver les données explicitant les démarches ou les techniques qui ont permis d'obtenir les ressources numériques : les métadonnées. En effet, pour accéder de la valeur aux analyses réalisées sur des objets virtuels issus d'une numérisation, il faut

en connaître la qualité et être capable de savoir comment ils ont été produits. Une ressource numérique 3D doit être documentée, afin d'assurer son utilité pour la recherche et sa pérennité.

L'objectif de ce livret est d'aider tout commanditaire de ressources numériques 3D à obtenir les informations fondamentales pour l'exploitation de sa commande, le plus en amont possible de la création de ces données. Dans le cadre de l'accord cadre **CNRS / Ministère de la Culture**, dans un projet associant le **Centre National de Préhistoire (CNP)** et l'**UMR MAP (Modèles et simulations pour l'architecture et le patrimoine)**, **Violette Abergel** a analysé les ressources 3D des grottes et abris ornés dont le **CNP** est dépositaire. Elle a travaillé à mettre en place et à expliciter des descripteurs qualifiant les données relatives aux ressources numériques 3D, présentés dans ce livret. Certains de ces descripteurs sont issus du projet **MEMORIA**, mené au **MAP** et du projet européen **3Dicons**. Ils sont toujours l'objet de recherches, et sont donc amenés à évoluer.

Ainsi, ce document réalise la synthèse des informations actuellement nécessaires à l'exploitation des données de numérisation de sites patrimoniaux. Ces éléments doivent être demandés aux prestataires au moment de la commande, sous la forme d'une notice technique accompagnant chaque fichier restitué.

TOPOGRAPHIE

DANS LE CAS D'UN RELEVÉ 3D, LES TECHNIQUES DE TOPOGRAPHIE PEUVENT ÊTRE UTILISÉES DANS DIFFÉRENTS OBJECTIFS, DONT LE PLUS COURANT EST LA GÉOLOCALISATION, LA MISE À L'ÉCHELLE ET L'ORIENTATION DES DONNÉES 3D ACQUISES. LA TOPOGRAPHIE EST UNE TECHNIQUE QUI A POUR BUT L'EXÉCUTION, L'EXPLOITATION ET LE CONTRÔLE DES OBSERVATIONS CONCERNANT LA POSITION PLANIMÉTRIQUE ET ALTIMÉTRIQUE, LA FORME, LES DIMENSIONS ET L'IDENTIFICATION DES ÉLÉMENTS CONCRETS, FIXES ET DURABLES EXISTANT À LA SURFACE DU SOL À UN MOMENT DONNÉ.

Matériel		
Nombre de stations		
Croquis de repérage	Oui	
	Non	
Coordonnées GPS des stations		

À partir de méthodes photogrammétriques ou lasergrammétriques il est possible d'obtenir des **Modèles Numériques de Terrain (MNT)**, des orthophotographies, des plans topographiques ou des modélisation en 3D à une précision centimétrique. On utilise également les méthodes topographiques pour géoréférencer à une précision centimétrique les nuages de points du modèle 3D dans un système géodésique (et sa projection associée) préalablement défini. Il existe différentes méthodes de géoréférencement :

Une première méthode est de réaliser un cheminement polygonal (ou polygonation) afin de matérialiser et définir en coordonnées l'ensemble des stations. Ces stations vont alors

permettre, dans le cas de la lasergrammétrie, de géoréférencer directement les nuages de points sans l'utilisation de cibles.

Une deuxième méthode est de déterminer à partir de ces stations les coordonnées de l'ensemble de cibles (sphères, damiers, points remarquables) placées sur l'objet à numériser, permettant ainsi l'orientation absolue (c'est-à-dire le géoréférencement et la mise à l'échelle) du calcul photogrammétrique.

Une troisième méthode est d'utiliser directement les méthodes GNSS en levant au GPS différentiel les cibles.

DÉFINITION PROPOSÉE PAR INES PORTES, STAGIAIRE TOPOGRAPHE AU MAP (CNRS).

La façon minimale de documenter un relevé topographique est de renseigner ces descripteurs :

- Système de référence géodésique et projection associée
- Méthode ou matériel utilisé (GPS, tachéomètre)
- Donner un schéma de polygonation
- Précision du géoréférencement

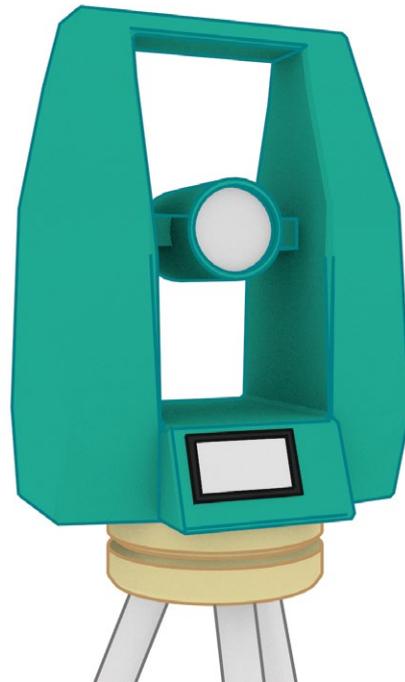
Système de référence géodésique et projection associée : Un système géodésique est défini par un repère dont le centre peut se trouver proche des masses de la Terre (systèmes spatiaux) ou à quelques centaines de mètres du centre de la terre (système locaux) et par un ellipsoïde de référence. En France, le système géodésique en vigueur est le **RGF93** auquel on associe le système de projection **Lambert 93** ou les projections **CC9 zones**. Il s'agit donc d'une projection conique permettant de conserver les angles.

Précision du géoréférencement : Cette précision est habituellement représentée par une valeur en centimètres. Cela donne une indication sur la précision du « positionnement » du nuage de points final dans le repère global.

Matériel : Référence du matériel utilisé pour la levée topographique.

Coordonnées GPS des stations : Relevé des coordonnées X, Y et Z de chaque station et le système géodésique utilisé (WGS84, RGF93 ...).

Nombre de stations : Il représente le nombre de points d'acquisition de coordonnées GPS.



Théodolite

Croquis de repérage : Présence ou non de croquis de repérage comportant une légende concernant le référentiel utilisé pour les coordonnées GPS recueillies.

Parmi le corpus étudié pour établir ces descripteurs, les métadonnées liées aux acquisitions topographiques n'étaient que très rarement renseignées, il est donc pour l'instant difficile d'envisager d'autres descripteurs exprimant la qualité de ces données.

PHOTOGRAPHIE

LES PHOTOGRAPHIES ONT UN RÔLE IMPORTANT PARMIS LES DONNÉES DES ACQUISITIONS NUMÉRIQUES. ELLES ENTRENT EN JEU DANS LA RÉALISATION DE PHOTOGRAMMÉTRIES (VOIR P.30) OU PEUVENT SERVIR À TEXTURER LES MODÈLES 3D (VOIR ENRICHISSEMENT VISUEL P.40). CEPENDANT IL EST IMPORTANT DE DÉTENIR UN CERTAIN NOMBRE D'INFORMATION POUR POUVOIR LES EXPLOITER, NOTAMMENT POUR LES ANALYSES COLORIMÉTRIQUES.

Matériel		Nikon D800
Capteur		FX : CMOS (24x36)
Format des photos		NEF & JPEG
Dimensions des photos		2208x1474 (3,2 Mpx)
Nombre de photos		263 NEF, JPEG
Géoréférencement	A posteriori sur un nuage de points	
	A posteriori par relevé topographique	
	Par position du scanner	
	Pas de géoréférencement	X
Traitement éventuel	Nature du traitement	Oui (non communiqué)
	Logiciel utilisé	DxO Optics Pro v7

EXEMPLE D'UNE SÉRIE DE PHOTOGRAPHIES



TITRE : Série de photographies intérieures

AUTEUR : Art Graphique et Patrimoine

DATE : 2013

SITE : Abri de Cap Blanc (Dordogne)

SOURCE : Projet Grottes Ornées - UMR MAP / Centre National de Préhistoire / MCC

MÉTADONNÉES : Voir tableau ci-contre

Matériel : Référence de l'appareil photographique utilisé. En effet, chaque appareil possède des caractéristiques qui induisent certaines distorsions propres.

Type de capteur : Un capteur numérique, ou photographique, est un composant électronique photosensible qui convertit les rayons électromagnétiques en un signal électrique analogique qui sera converti en données numériques, éventuellement compressées, puis stockées.

Les plus répandus sont : les capteurs **CCD** (*Charge Coupled Device*) et les capteurs **CMOS** (*Complementary Metal Oxide Semi-conductor*). C'est le dispositif de transfert de charge exploité qui différencie les deux familles. Notons simplement que les appareils photographiques numériques compacts sont généralement équipés de capteurs **CCD** et les Reflex de capteurs **CMOS** (*Adeline Manuel, 2016*).

Taille du capteur : Un grand capteur permet de restituer avec une meilleure précision le signal lumineux reçu, et une plus grande résolution permet d'obtenir davantage de détails. La qualité de l'image est améliorée notamment dans les zones très ou faiblement lumineuses. La taille du capteur s'exprime en fraction de pouce.

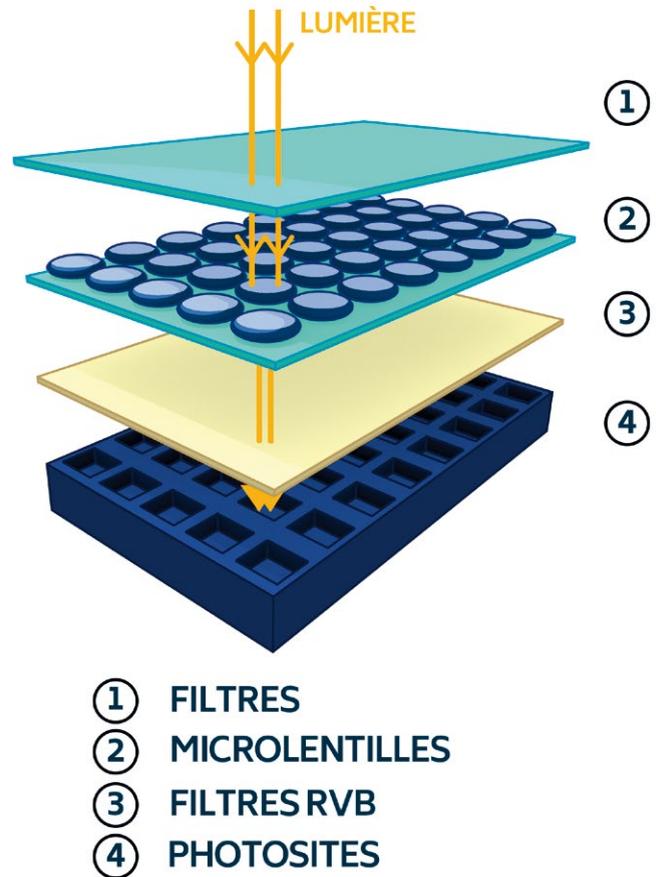


Schéma d'un capteur photographique

Format : Il existe des formats **RAW** («brut» en anglais) qui sont des formats sans perte, c'est-à-dire qu'ils conservent toutes les données brutes des images sans leur appliquer de traitement. Ils enregistrent les métadonnées (appelées « **EXIF** ») liées à chaque image telles que le temps de pose, l'ouverture ou la balance des blancs, ce qui est indispensable notamment pour les analyses colorimétriques.

Les autres formats d'images ne sont pas propres à la photographie. Parmi eux on trouve également des formats sans perte tels que le **TIFF**, et des formats avec perte tels que le **JPEG**. Ces derniers présentent l'avantage d'être plus légers, mais sont de qualité moindre du fait de la compression des données. Voir la [fiche formats de fichiers « Photographies et images » p.54.](#)

Lors d'une commande, il faut systématiquement demander les données brutes : les fichiers RAW.

Données EXIF : Les données **EXIF** sont des métadonnées décrivant les réglages de l'appareil photographique au moment de chaque prise de vue. Elles doivent être présentes dans les livraisons des prestataires.

Ces données sont liées aux photographies, et renseignent, par exemple, le temps de pose,

l'ouverture du diaphragme ou la balance des blancs, ce qui est indispensable notamment pour les analyses colorimétriques.

Les formats **RAW**, **JPEG** et **TIFF** peuvent contenir des données **EXIF** (sauf le format **JPEG 2000**). Elles sont consultables grâce à des logiciels de traitement d'images ou des logiciels spécialisés (par exemple : **ExifTool**).

Une partie des données EXIF peut-être consultée dans les propriétés de l'image (sous Windows : clic droit / propriétés / détails, sous Mac : clic droit / lire les informations).

Image	
Temps d'exposition	1/10
Nombre-F	3.5
Programme d'exposition	Normal (2)
Sensibilité équivalente ISO	200
Version EFIX	02.30
Date / Heure d'origine	10/09/2016 - 16:19:30
Date / Heure numérisées	10/09/2016 - 16:19:30
Luminosité	631/640

Tableau de données EXIF

Les données EXIF des photographies ne sont pas toujours consultables, parfois tronquées ou supprimées volontairement par leur auteur. C'est un élément important à prendre en compte.

Qualité d'une image : La qualité d'une image dépend de plusieurs facteurs : sa **définition**, sa **résolution**, sa **taille** et son **taux de compression**.

- **La définition** d'une image représente ses dimensions en nombre de pixels. Elle se calcule avec le produit de sa longueur par sa largeur en pixels. On l'exprime le plus souvent en Mégapixels (Mpx).

Exemple : 7360 x 4912 px (= 36,3 Mpx)



Dimensions d'une photographie

- **La résolution** d'une image s'exprime en « **pixel par pouce** » (« **ppp** », ou en anglais « **dpi** » pour « **dot per inch** »), et représente la densité de pixels de l'image. Il existe des standards, basés sur la perception de l'œil humain, garantissant une bonne qualité visuelle : la norme pour un écran est de **72ppp**, celle pour une image destinée à l'impression est de **300ppp**.

La résolution varie avec le rapport d'agrandissement (la taille, en unité de longueur) de l'image : la résolution diminue à mesure que la taille de l'image augmente. C'est pour cela qu'une image dont la résolution est plus forte pourra être plus agrandie. De la même manière, une image comportant une faible résolution ne pourra pas être agrandie sans perte de qualité (effet de pixellisation).



▲
8,7 x 5,8 cm
300 ppp

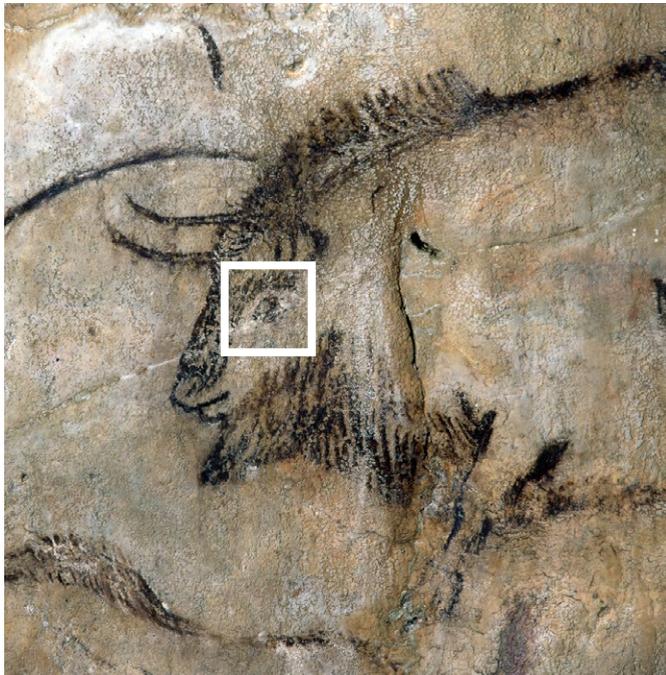


▲
Après agrandissement : 111 ppp

Rapport entre résolution et taille d'une image

- **Le taux de compression** d'une image dépend notamment du format du fichier (Voir la [fiche formats de fichiers « Photographies et images » p.54](#)). Le taux de compression n'influe pas sur les autres facteurs de qualité (définition, résolution, taille), mais sur les informations contenues dans l'image. Par exemple, en groupant des pixels approximativement de la même teinte et en leur attribuant une seule et même couleur. Ainsi, plus une image est compressée, moins elle contient de détails.

IMAGE NON COMPRESSÉE :



APRÈS PLUSIEURS COMPRESSIONS JPEG :



Zoom sur l'effet de la compression JPEG

Géo-référencement : Il existe plusieurs moyens de géo-référencer des photographies :

- Certains appareils **dotés de GPS** peuvent inscrire les coordonnées dans les données **EXIF**.
- **A posteriori sur un nuage de point :** grâce à un logiciel permettant de plaquer les images sur un nuage de points déjà référencé : par exemple lorsqu'on utilise les photographies pour texturer un nuage provenant de lasergrammétrie (si celui-ci est géoréférencé).
- **A posteriori par relevé topographique :** les mesures topographiques servent directement à géoréférencer les photographies.

Rarement renseignées, ces informations doivent être communiquées par le prestataire sous la forme d'un récapitulatif de leur démarche de relevé.

Traitement : Indication de la nature du traitement appliqué aux images (s'il y a lieu), et du logiciel utilisé. Souvent non renseigné, il est important de savoir si les photographies ont subi des manipulations telles qu'une calibration des couleurs ou de balance des blancs.



Image brute (gauche) - Image traitée (droite)

LES RELEVÉS 3D

L'ÉLABORATION DE LA REPRÉSENTATION 3D D'UN ARTEFACT PATRIMONIAL PASSE PAR L'EXPRESSION GÉOMÉTRIQUE DE SA FORME PUIS PAR LA DÉTERMINATION DE L'ASPECT DE SURFACE DE SES DIFFÉRENTES PARTIES. TROIS PHASES D'ÉLABORATION INTERDÉPENDANTES SONT NÉCESSAIRES :

- L'ACQUISITION DES DONNÉES 3D (VOIR LASERGRAMMÉTRIE P.22 ; PHOTOGRAMMÉTRIE P.30),
- LA RECONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE TRIDIMENSIONNELLE (VOIR RECONSTRUCTION DE SURFACE P.36),
- LA RESTITUTION DE L'APPARENCE VISUELLE (VOIR ENRICHISSEMENT VISUEL P.40).

SOURCE : DÉFINITION DE L'UMR MAP (TECHNIQUES ET OUTILS DE NUMÉRISATION 3D)

LASERGRAMMÉTRIE

LA LASERGRAMMÉTRIE EST UNE TECHNIQUE DE NUMÉRISATION 3D SANS CONTACT PERMETTANT D'OBTENIR, PAR BALAYAGE, UN ENSEMBLE DE COORDONNÉES X Y Z DES POINTS DE LA SURFACE DE L'OBJET ÉTUDIÉ. C'EST UNE TECHNIQUE D'ACQUISITION ACTIVE, QUI SE BASE SUR L'ÉMISSION D'ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES OU MÉCANIQUES (TANDIS QUE LES TECHNIQUES PASSIVES SE BASENT SUR L'ÉTUDE DU RAYONNEMENT AMBIANT NATUREL). LES MESURES SONT OBTENUES PAR COMPARAISON ENTRE UN SIGNAL ÉMIS ET UN SIGNAL REÇU. CES COORDONNÉES SONT RELATIVES, ET PEUVENT ÊTRE CONVERTIES EN COORDONNÉES ABSOLUES PAR GÉORÉFÉRENCEMENT.

Matériel		FARO Focus 3D S 120
Méthode métrologique	Temps de vol	
	Décalage de phase	X
	Triangulation optique	
Nombre total de stations		19
Résolution angulaire		0,035°
Résolution spatiale		6,136 mm/10m
Densité de points moyenne		26569 pt/m ² à 10m
Qualité Q des données (selon l'équation de Barber, Mills et Bryan)		?
Couverture		?
Modèles bruts (pointclouds)	Architecture de fichiers	?
	Format de fichiers	.FLS
Modèles extraits (pointclouds)	Nombre de fichiers	8
	Architecture des fichiers	X Y Z, Nx Ny Nz
	Format de fichier	.ASC

EXEMPLE DE NUAGE DE POINTS OBTENU PAR LASERGRAMMÉTRIE



TITRE : Relevé laser du squelette

AUTEUR : Art Graphique et Patrimoine

DATE : 2013

SITE : Abri de Cap Blanc (Dordogne)

SOURCE : Projet Grottes Ornées - UMR MAP / Centre National de Préhistoire / MCC

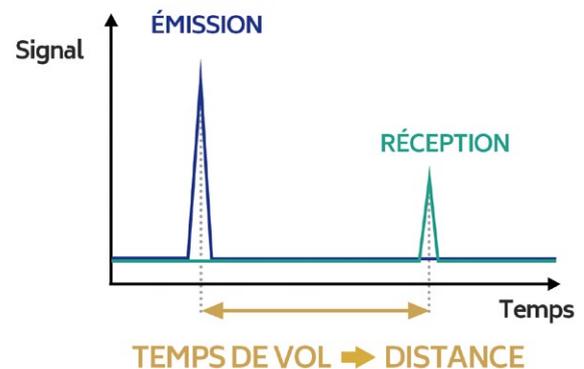
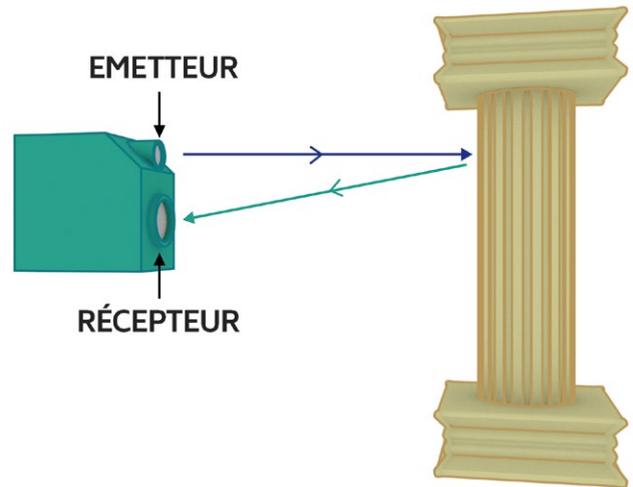
MÉTADONNÉES : Voir tableau ci-contre

Certains appareils sont capables, grâce à un capteur photographique, d'acquérir des valeurs colorimétriques (RVB) qui serviront à texturer le modèle numérique. Cependant, ces capteurs sont généralement de moins bonne qualité que ceux des appareils utilisés pour la photogrammétrie. En conséquence les couleurs obtenues dans cette configuration ne sont pas forcément fiables, même si les coordonnées 3D, elles, sont très précises.

Matériel utilisé : La référence du matériel permettra de se renseigner sur ses spécificités et de donner un ordre de grandeur de la précision maximale des relevés.

Méthode métrologique : Ce descripteur renvoie au type de technologie employé par le scanner. On distingue les scanners laser « **temps de vol** », « **à décalage de phase** », ou « **par triangulation optique** ».

- **Temps de vol :** Le principe d'un scanner dit « **temps de vol** » consiste à déduire des distances à partir de mesures télémétriques. Le scanner émet une impulsion lumineuse et mesure son temps de retour. Ainsi, connaissant la vitesse de la lumière, ce dernier peut déduire la distance séparant l'objet et l'émetteur. Globalement, les scanners temps de vol permettent d'obtenir des modèles dont la précision est d'ordre centimétrique.

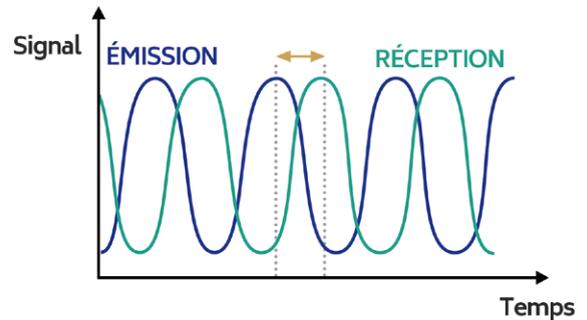


Fonctionnement d'un scanner temps de vol

- **Décalage de phase** : Les scanners dits à « **décalage de phase** » se basent sur la mesure de la différence de phase entre l'onde harmonique d'un faisceau laser émis par l'appareil (également appelé « lumière émise ») et la même onde, réfléchie par l'objet scanné (on parle de « lumière retour »). La mesure du décalage ondulatoire entre ces signaux permet de déduire la position de chaque point scanné.

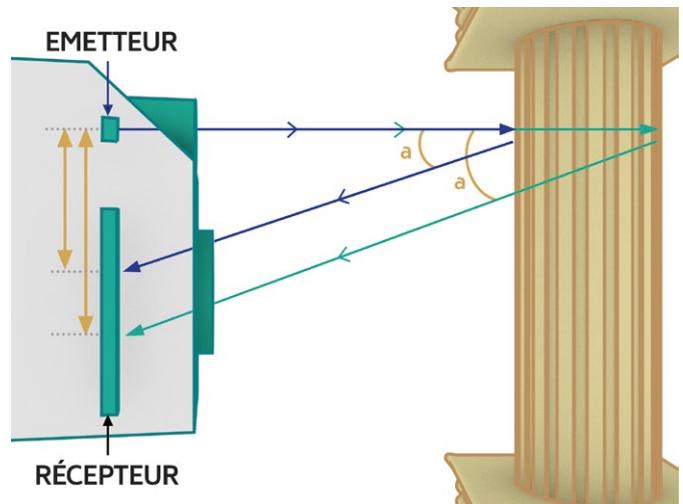
Ce type de scanner offre globalement une précision d'ordre demi-centimétrique. Cette technique est également intéressante par sa capacité à enregistrer de grandes quantités de points mais présente une portée inférieure aux portées proposées par les scanners laser temps de vol.

- **Triangulation optique** : Les scanners par triangulation exploitent des principes de géométrie plane à partir du réfléchissement d'un faisceau laser. Ils émettent un rayon laser sur l'objet. L'angle d'incidence de ce rayon est mesuré au niveau de l'émetteur par un capteur optique, et l'angle réfléchi est mesuré par un second capteur optique disposé dans le plan de balayage du scanner. Connaissant la distance entre les deux capteurs, et les deux angles formés par le faisceau laser émis et réfléchi, l'appareil peut déduire la position du point ciblé.



DÉCALAGE DE PHASE → DISTANCE

Fonctionnement d'un scanner à décalage de phase



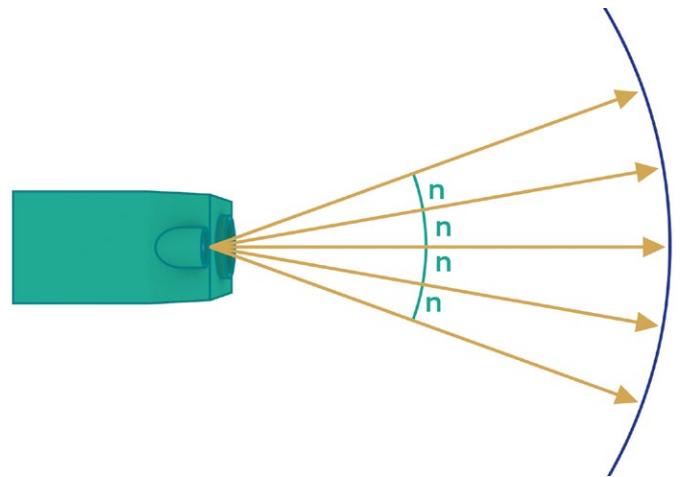
Fonctionnement d'un scanner à triangulation optique

D'une manière générale, le procédé de balayage devrait être réalisé avec le dispositif le plus précis disponible pour la taille de l'objet à numériser et en fonction de la distance d'acquisition.

Nombre total de stations : Il donne un ordre de grandeur des dimensions de l'objet numérisé, ou de sa complexité géométrique, mais également du nombre total de points présents dans l'ensemble des nuages.

Résolution angulaire (ou pas de balayage) :

Cette valeur est destinée à qualifier le nuage de point brut issu de la numérisation laser. Elle caractérise la capacité de l'appareil à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visée adjacentes. Elle s'exprime en degrés ou en radians. Un pas de balayage de N degrés signifie que le scanner mesure les coordonnées de $360/N$ points lors d'une rotation complète.

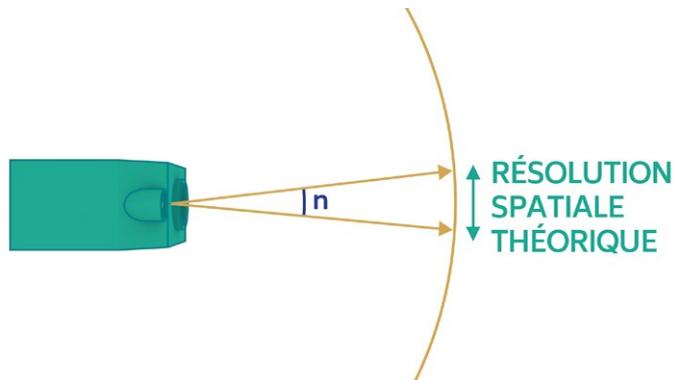


Résolution angulaire d'un scanner

Il est difficile de préconiser une « bonne » valeur de résolution angulaire, car cela dépend de ce que l'on cherche à mesurer.

La résolution spatiale théorique : Elle correspond à la distance cartésienne séparant deux points de capture successifs, pour une distance objet - scanner fixe. Cette distance est le produit de la résolution angulaire (en radians) et de la portée du laser (sa distance à l'objet).

Elle représente le pas le plus fin que le scanner laser est capable de mesurer, à une distance objet - scanner fixe.



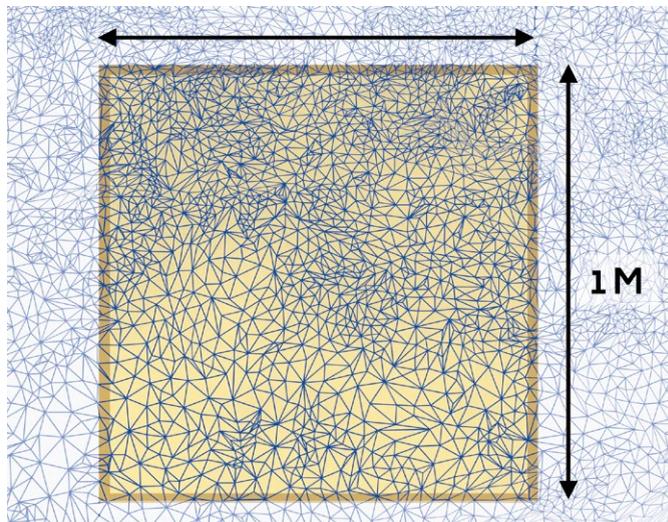
Résolution spatiale théorique d'un scanner

La densité de points moyenne : Elle se définit comme le nombre moyen de points dans le nuage par unité de surface, et s'exprime en pts/m². Pour les fichiers bruts, la densité théorique peut se déduire de la résolution spatiale.

La couverture : Elle qualifie la proportion de surface numérisée en 3D par rapport à la surface totale de l'objet réel et s'exprime en pourcentage.

Qualité Q des données : Elle se réfère à l'équation proposée par **P.G. Bryan, D.M. Barber, et J.P. Mills** en 2003 dans un article intitulé « *Towards a standard specification for terrestrial laser scanning in cultural heritage – one year on* ». Cette équation vise à qualifier en pourcentage la qualité Q des données en fonction de la résolution spatiale m et de la plus petite entité s à numériser. La relation est la suivante : **$Q = 1 - (m/s)$**

Exemple : Une résolution spatiale de 5 mm, pour une entité de 10 mm, donneront une valeur Q de



Aperçu de la densité de points d'un modèle sur 1m²

0,5, soit 50 % d'assurance que l'entité soit visible dans le relevé.

La qualité des données permet de vérifier l'adéquation entre le résultat de l'acquisition et l'interprétation que l'on compte en faire. Cela permet de juger la pertinence d'une observation à partir de telles données.

Format de fichiers : Voir la [fiche formats de fichiers « Nuages de points » p.55.](#)

Architecture des fichiers : Cela renseigne sur les informations contenues dans le fichier et donc permettent sa pérennité.

En effet, l'architecture des données décrit la nature de celles-ci. Par exemple, une architecture de type « **XYZ RVB NxNyNz** » signifie que pour chaque point, les trois premières colonnes correspondent aux coordonnées en X, Y, puis Z, les trois suivantes aux valeurs colorimétriques du rouge, du vert, et du bleu, et enfin les trois dernières correspondent aux valeurs X, Y et Z des vecteurs normaux.

C'est important pour la réutilisation des données, car les logiciels ne savent pas forcément à quoi ces valeurs correspondent.

Modèles bruts/Modèles extraits : Chaque station produit son propre nuage de points (mo-

dèles bruts). Ils doivent par la suite être fusionnés pour obtenir un nuage de points global de l'objet numérisé (modèle extrait).

Cela signifie que les données subissent un premier traitement dès cette étape, il est donc important de garder à disposition les données brutes, dans un souci de traçabilité.

PHOTOGRAMMÉTRIE

LA RESTITUTION 3D PAR PHOTOGRAMMÉTRIE PERMET D'EXTRAIRE, À PARTIR D'UNE SÉRIE DE PHOTOGRAPHIES, UN ENSEMBLE DE COORDONNÉES EXPRIMÉES DANS UN REPÈRE LOCAL LIÉ À L'OBJET NUMÉRISÉ.

Matériel		Nikon D800
Capteur		FX : CMOS (24x36)
Type d'acquisition	Mono	
	Stéréo	
	Multi-stéréo	X
Format des fichiers images brutes		NEF
Format des fichiers images traitées		JPEG (traitées par DXO)
Nombre de photos		5
Logiciel utilisé		MicMac
Type de restitution photogrammétrique	Redressement d'images	
	Corrélation dense stéréo	
	Corrélation dense multi-stéréo	X
Type de référencement sur les nuages (ou maillages)	Caméra intégrée	
	Résection spatiale mono-image	X
	Calcul d'orientations d'images basées sur des repères	
Résolution angulaire		?
Résolution spatiale		?
Densité de points moyenne		?
Qualité Q des données (selon l'équation de I.Bryan)		?
Couverture		?
Modèles bruts : Pointclouds	Architecture des fichiers	XYZ, RVB, alpha
	Format de fichier	.PLY

EXEMPLE DE NUAGE DE POINTS OBTENU PAR PHOTOGRAMMÉTRIE



TITRE : Nuage de points coloré du squelette (test)

AUTEUR : Violette Abergel

DATE : 2015

SITE : Abri de Cap Blanc (Dordogne)

SOURCE : Projet Grottes Ornées - UMR MAP / Centre National de Préhistoire / MCC

MÉTADONNÉES : Voir tableau ci-contre

Matériel, capteur, format de fichier image :

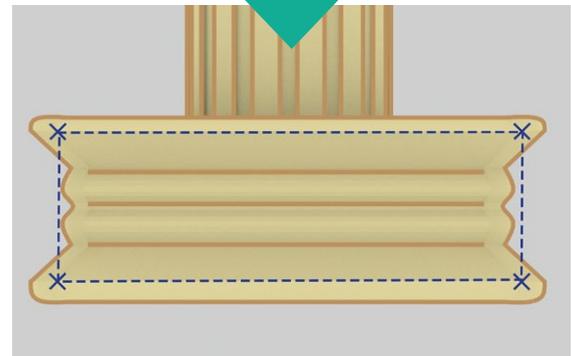
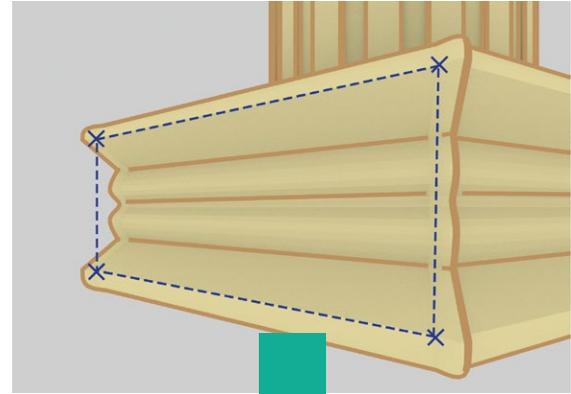
Voir « *Photographies* » p.12 et la *fiche formats de fichiers « Photographies et images »* p.54.

Type d'acquisition : Les restitutions photogrammétriques diffèrent principalement en fonction de la configuration choisie pour l'acquisition. Il existe trois configurations possibles : **Mono-image, Stéréo, Multi-stéréo.**

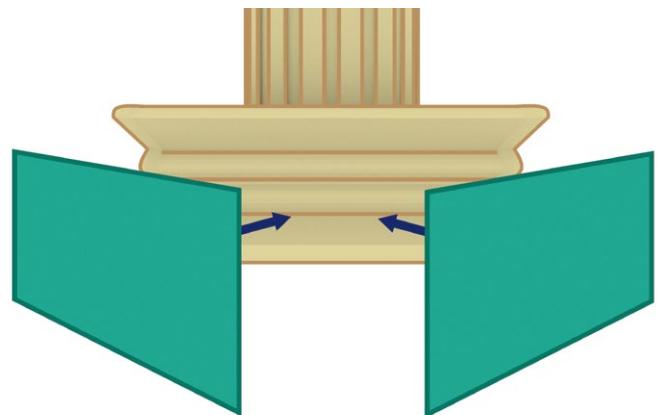
- **Mono-image :** Ce type de restitution à partir d'une image isolée de parties planes d'un objet s'apparente à la correction de la perspective que présente cette image : l'image est « redressée » grâce à la considération que la surface est plane et identifiée par au moins quatre points d'appui. L'image obtenue est une **orthophotographie**.

SOURCE : DÉFINITION DE L'UMR MAP (TECHNIQUES ET OUTILS DE NUMÉRISATION 3D)

- **Stéréo :** La restitution à partir d'un couple d'images utilise une configuration **stéréo**. Ce mécanisme permet de réaliser des représentations bidimensionnelles de façades, ou des modèles filaires et surfaciques en trois dimensions. Ces techniques s'appuient sur l'analyse d'images et permettent d'extraire de façon automatique ou semi-automatique un ensemble de points détectés sur les variations chromatiques des surfaces.



Restitution photogrammétrique mono-image



Restitution photogrammétrique stéréo

SOURCE : DÉFINITION DE L'UMR MAP (TECHNIQUES ET OUTILS DE NUMÉRISATION 3D)

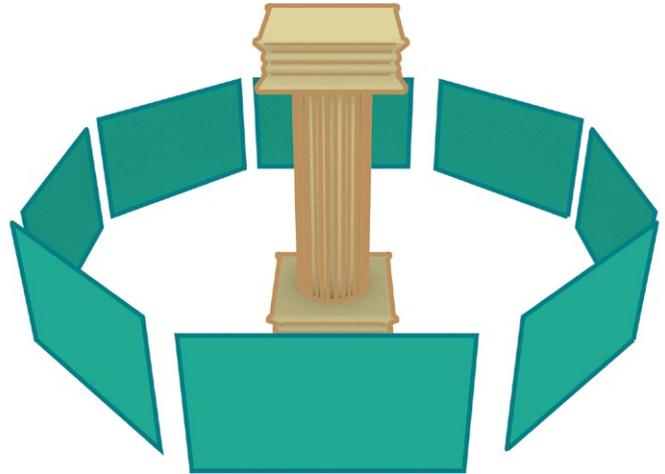
- **Multi-Stéréo (ou « multi-images »)** : La restitution à partir de multiples images peut utiliser des photographies convergentes, horizontales, verticales ou obliques. La restitution se base sur l'ajustement des images à partir de groupes de pixels homologues sélectionnées sur les photographies. Les résultats de la photogrammétrie multi-images peuvent être des modèles filaires en 3D ou des photomodèles (modèles 3D texturés).

SOURCE : DÉFINITION DE L'UMR MAP (TECHNIQUES ET OUTILS DE NUMÉRISATION 3D)

Type de restitution : La restitution photogramétrique découle du type d'acquisition et peut être de trois sortes : **Redressement d'image**, **Corrélation dense stéréo**, **Corrélation dense multi-stéréo**.

Type de référencement sur les nuages ou maillages : Il renseigne les processus exploités pour attribuer à un nuage de points les informations colorimétriques issues des photographies. On distingue :

- **Le référencement par caméra intégrée** : Certains scanners laser embarquent un capteur



Restitution photogramétrique multi-stéréo

photographique afin de fournir une information colorimétrique au nuage de points. Dans ce cas, l'information colorimétrique issue du capteur embarqué est directement superposée au nuage de points de façon précise et cohérente. Néanmoins, sur certains dispositifs cette information est trop peu définie (du fait de la qualité du capteur interne, cf photographie), ou sa projection sur le nuage est insatisfaisante. Dans ce cas, il est envisageable d'effectuer séparément une série d'acquisitions d'images de meilleure résolution, que l'on projetera a posteriori sur le nuage de points.

Pour évaluer la qualité des images réalisées par un capteur embarqué, se référer à la section « Photographies : qualité d'une photographie p.16). Cette évaluation est à confronter avec les objectifs de la numérisation (médiation, études morphologiques ...): le niveau d'exigence dépend de ce que l'on désire faire de la ressource 3D.

- Le référencement par résection spatiale

mono-image: Cette notion se réfère à l'orientation d'une image sur un ensemble de coordonnées 3D connues. Dans le cas où la colorisation d'un nuage de points est issue d'une acquisition d'images avec un appareil photo séparé, les paramètres internes, la position et l'orientation de l'appareil photo au moment de chaque prise de vue, sont évaluées par un calcul dit « **de résec-**

tion spatiale » dans le but de permettre la projection de chaque photographie sur le nuage.

- **Le calcul d'orientation d'images basé sur des repères** : processus lors duquel la position et l'orientation d'une photographie sont déterminées à partir de mesures photogrammétriques de points de contrôle apparaissant sur les clichés.

Si les points de contrôles utilisés ne sont pas précis, les valeurs RVB attribuées à un point ne seront en réalité pas forcément les siennes mais celles d'un point voisin. Il est difficile d'évaluer la qualité de la projection, mais connaître la méthode utilisée permet déjà de se faire une idée de la fiabilité de l'information.

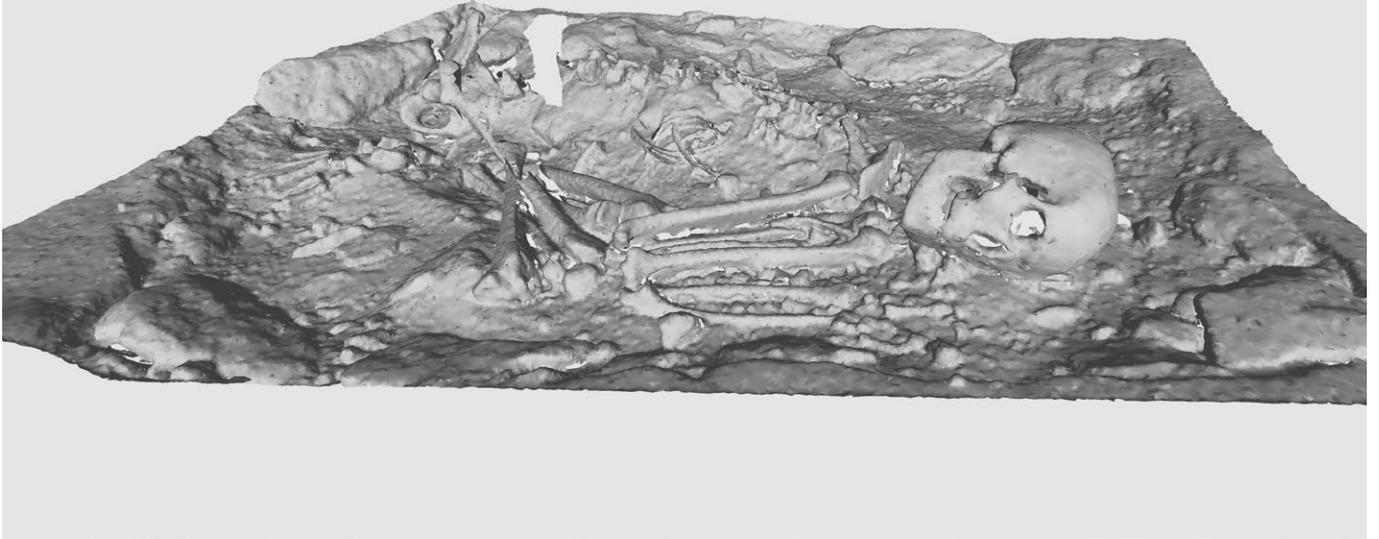
Résolution angulaire, Résolution spatiale, Densité de points moyenne, Qualité Q des données, Couverture, Architecture et format de fichier : Voir « Lasergrammétrie » p.26-27-28.

RECONSTRUCTION DE SURFACE

À PARTIR D'UN NUAGE DE POINTS, IL EXISTE PLUSIEURS PROCÉDÉS PERMETTANT DE CONSTRUIRE UNE REPRÉSENTATION GÉOMÉTRIQUE DE L'OBJET NUMÉRISÉ. CES TECHNIQUES PEUVENT ÊTRE MANUELLES, AUTOMATIQUES, OU SEMI-AUTOMATIQUES. ON DISTINGUE AINSI NOTAMMENT LA **RECONSTRUCTION AUTOMATIQUE PAR MAILLAGE POLYGONAL** (QUI COMPREND LUI-MÊME PLUSIEURS SOUS-CATÉGORIES SELON LES ALGORITHMES UTILISÉS), LA **RECONSTRUCTION À PARTIR DE PRIMITIVES GÉOMÉTRIQUES** (LE NUAGE PERMET DE DÉTERMINER DES PROFILS QUI PERMETTRONT PAR EXEMPLE PAR BALAYAGE OU INTERPOLATION DE GÉNÉRER UNE SURFACE COHÉRENTE), OU ENCORE LA **MODÉLISATION PARAMÉTRIQUE** (PROCÉDANT PAR OPÉRATIONS SUR DES PRIMITIVES SOLIDES). CES MÉTHODES SONT EXTRÊMEMENT VARIÉES, C'EST LA RAISON POUR LAQUELLE L'ENTRÉE DU TABLEAU « MÉTHODE DE MAILLAGE » EST UNE ENTRÉE OUVERTE, POUR LAQUELLE IL FAUT SPÉCIFIER AU CAS PAR CAS LES PROCÉDÉS UTILISÉS.

Méthode de maillage	?
Densité moyenne du maillage	150198 pts/m ²
Pourcentage de décimation	?
Carte de normales	Non
Format(s) des fichiers	.DAE

EXEMPLE DE RECONSTRUCTION DE SURFACE (MODÈLE MAILLÉ)



TITRE : Modèle maillé du squelette

AUTEUR : Art Graphique et Patrimoine

DATE : 2013

SITE : Abri de Cap Blanc (Dordogne)

SOURCE : Projet Grottes Ornées - UMR MAP / Centre National de Préhistoire / MCC

MÉTADONNÉES : Voir tableau ci-contre

Densité moyenne du maillage : Elle se définit comme le nombre moyen de points dans le nuage par unité de surface, et s'exprime en pts/m². Pour les fichiers bruts, la densité théorique peut se déduire de la résolution spatiale.

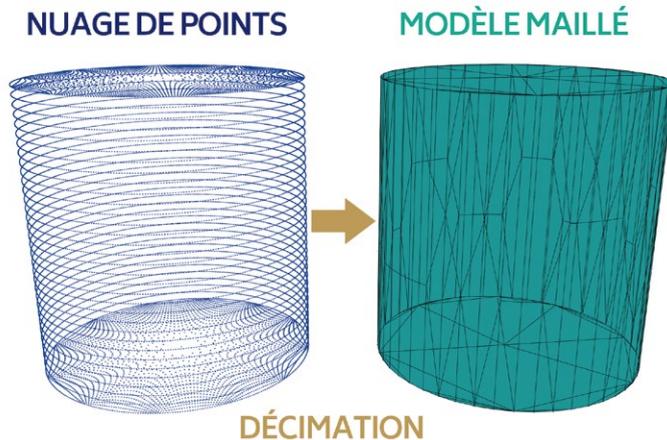
Pourcentage de décimation : Cette valeur permet d'évaluer la perte d'information due à la reconstruction de surface, entre le nuage de points « bruts » et sa représentation géométrique.

Exemple : Une décimation de 50% signifie, par exemple, que seul un point sur deux a été conservé pour établir le maillage de l'objet.

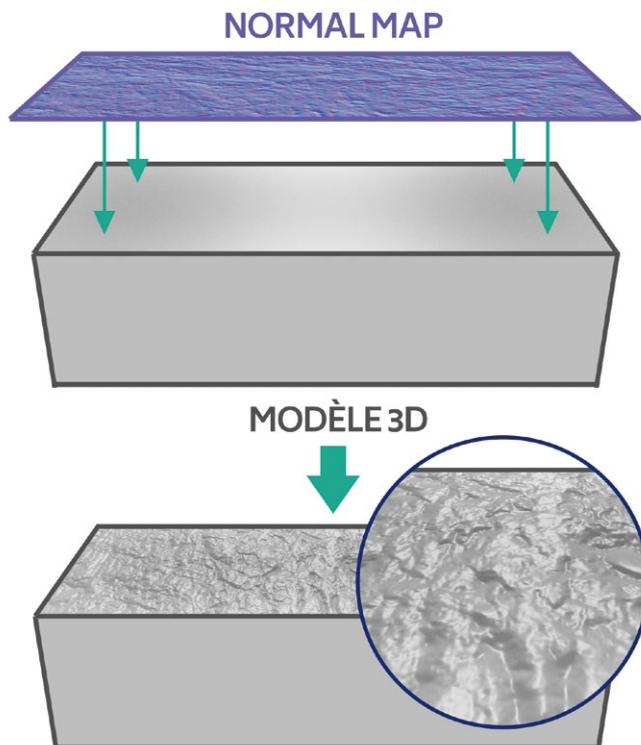
Carte de normales (ou Normal Map) : Les cartes de normales sont des images qui se plaquent sur le modèle 3D et qui contiennent dans leurs valeurs RVB la direction des normales des pixels correspondants, selon les axes X, Y et Z. Elles permettent de simuler du relief en modifiant l'incidence de la lumière sur la surface.

Rappel : Une normale est une droite perpendiculaire à une face (ou polygone) d'un objet 3D maillé, qui définit son orientation.

Format de fichier : Voir la [fiche formats de fichiers « Modèles maillés » p.56.](#)



Reconstruction de surface et décimation



Fonctionnement d'une Normal Map

ENRICHISSEMENT VISUEL

L'ENRICHISSEMENT VISUEL DES RECONSTRUCTIONS 3D RENVOIE AUX PROCÉDÉS EXPLOITÉS POUR LEUR ATTRIBUER DES TEXTURES, QUI PEUVENT ÊTRE DE DIFFÉRENTES NATURES. L'OBJECTIF EST D'ASSOCIER AU MODÈLE 3D DES ATTRIBUTS REPRÉSENTATIFS DES ASPECTS DE SURFACE DE L'OBJET RÉEL.

Méthode de texturage	Texturage par projection fine de photographies orientées sur la numérisation 3D (couplage Laser/Photo)	X
	Texturage par échantillons photographiques de matériaux ou de parties de l'objet numérisé	
	Texturage par échantillons photographiques de matériaux génériques	
	Matériaux de synthèse	
Type de texture	Diffuse map	X
	Normal map	
	Displacement map	
	Bump map	
	Autre	
Projection 2D /3D des textures	Carte UV unique	
	Cartes UV multiples	X
	Vertex-Coloring	
Format des fichiers de textures		.BMP

EXEMPLE DE MODÈLE 3D ENRICHIS



TITRE : Intérieur de la grotte de Commarque

AUTEUR : Art Graphique et Patrimoine, Julie Lepelé

DATE : 2013

SITE : Grotte de Commarque (Dordogne)

SOURCE : Centre National de Préhistoire / MCC

MÉTADONNÉES : Voir tableau ci-contre

Méthodes de texturages : Il existe quatre méthodes de texturage :

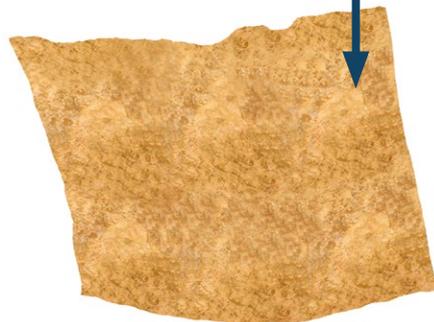
- **Texturage par projection fine de photographies orientées sur la numérisation 3D :** Il s'agit d'exploiter des photographies de l'objet numérisé, afin de les orienter et les projeter de façon cohérente sur le maillage.



Texturage par projection fine de photographies

Cette méthode est préconisée en cas d'étude de la colorimétrie, des éléments graphiques de l'objet ou de toute autre étude concernant l'aspect coloré de l'objet (en dehors de la volumétrie). Elle l'est aussi pour les projets de valorisation qui doivent présenter l'objet le plus fidèlement possible.

- **Texturage par échantillons photographiques de matériaux ou de parties de l'objet numérisé :** Il s'agit d'extraire des photographies de l'objet numérisé un matériau générique qui sera ensuite appliqué sur l'ensemble du modèle numérique.



Texturage par échantillon photographique

Cette méthode est préconisée lorsque l'apparence colorée de l'objet n'est pas déterminante pour l'étude. Elle présente l'avantage de rester proche de la réalité.

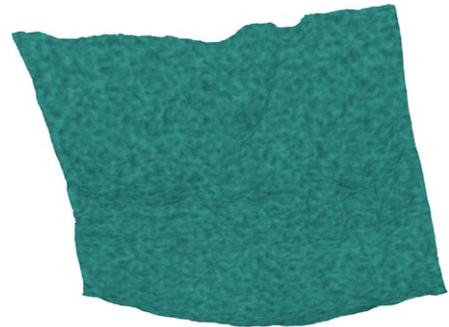
- **Texturage par échantillons photographiques de matériaux génériques** : Ce procédé est semblable au procédé précédent. Néanmoins, dans ce cas, les matériaux ne sont pas spécifiquement issus de photographies de l'objet d'étude prises « in situ », mais de banque de textures génériques réalisées à partir d'autres sites d'études.



Texturage par échantillon photographique de matériaux génériques

Cette méthode est préconisée dans le cas où l'on désire simuler un aspect de surface réel mais que la ressemblance avec l'objet original n'est pas importante.

- **Texturage par utilisation de matériaux de synthèse** : Utiliser des matériaux de synthèse pour le texturage d'un modèle 3D consiste à paramétrer manuellement le comportement des matériaux vis-à-vis de la lumière par le moteur de rendu. Notamment en termes de diffusion, de réflexion, ou de réfraction lumineuse. Cette méthode permet d'atteindre différents niveaux de réalisme, selon la précision des réglages.



Texturage par matériaux de synthèse

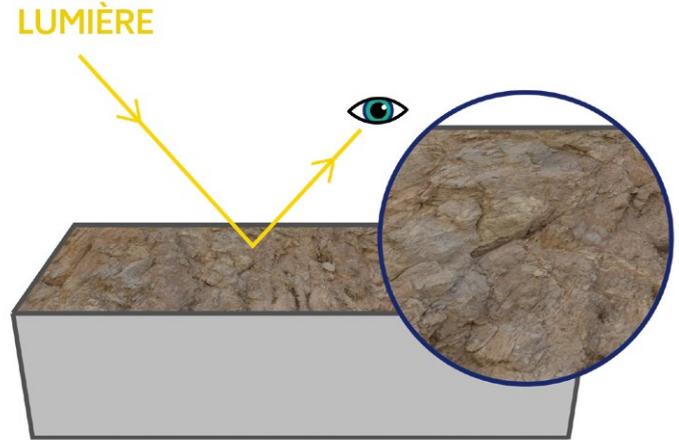
Les matériaux de synthèse peuvent représenter une matière quelconque, réelle ou artificielle. Ils peuvent être paramétrés en fonction des données mathématiques qui décrivent le modèle 3D et donc mettre en évidence certaines caractéristiques. Par exemple, faire apparaître des courbes de niveaux.

Types de textures : Il existe plusieurs types de cartes de textures susceptibles d'être associées à un modèle 3D :

- **Diffuse Map :** C'est la texture principale d'une surface : celle qui affiche les couleurs de l'objet.



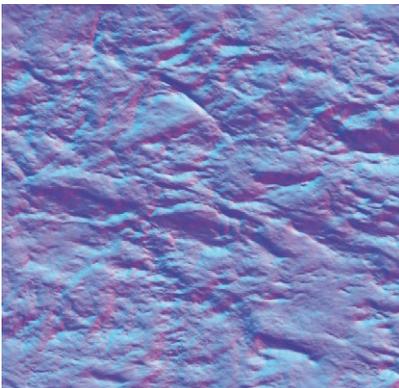
Diffuse map



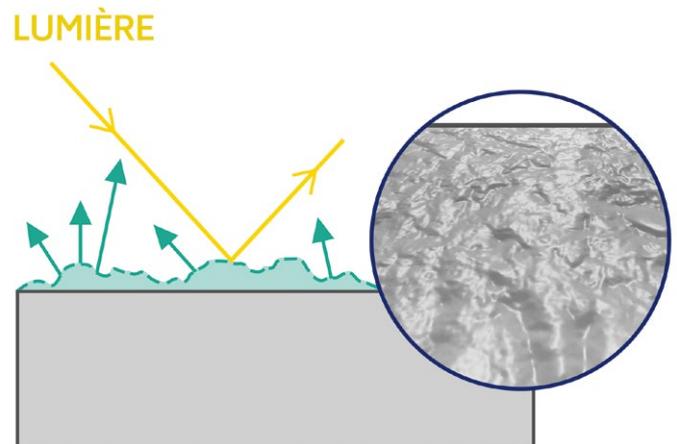
Effet d'une diffuse map

- **Normal map (ou carte de normales) :**

Voir « Cartes de normales » p.38.



Normal map

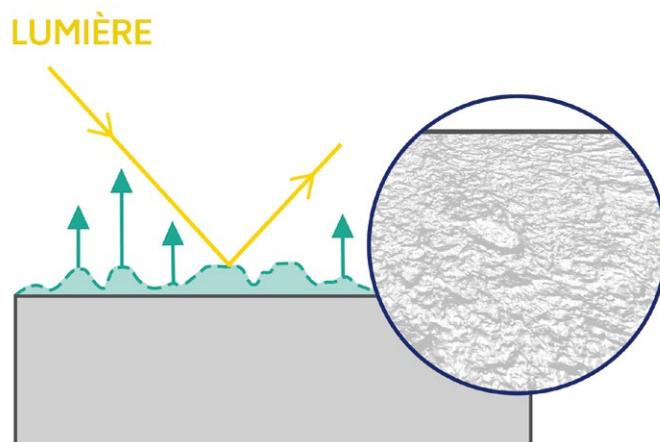


Effet d'une normal map

- **Bump map (ou placage de relief)** : Image en valeur de gris utilisée pour attribuer à une surface un aspect de relief en modifiant les normales de celle-ci selon un seul axe (vertical).

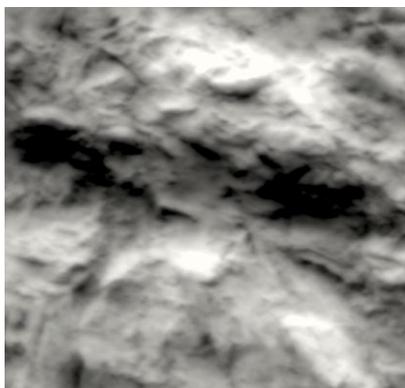


Bump map

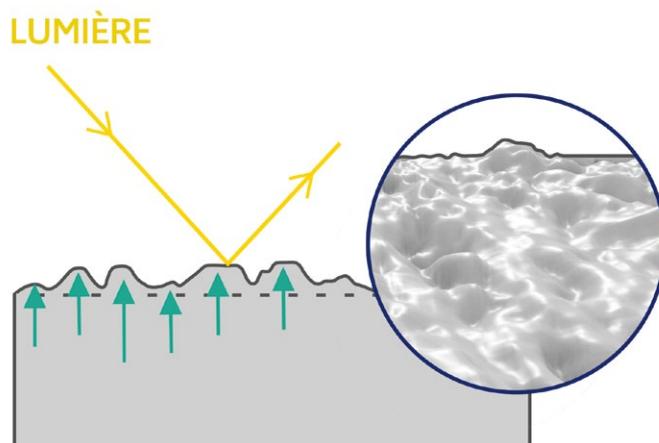


Effet d'une bump map

- **Displacement map (ou Height map)** : C'est une image en valeur de gris dont l'intensité des valeurs va modifier la position géométrique de la surface correspondante du modèle.



Displacement map



Effet d'une displacement map

Les normales map et les bump map sont utilisées pour simuler un relief tout en limitant le nombre de points du maillage (pour l'optimisation du modèle et l'économie des ressources informatiques), tandis que les displacement map agissent directement sur les points du modèle : on est obligé de conserver un nombre de points élevé pour visualiser l'effet de cette carte. Cependant, le résultat est plus réaliste puisque la lumière interagit avec une véritable surface (présente géométriquement, et non simulée).

Un type de carte n'a pas spécialement plus d'importance qu'une autre, c'est plutôt la combinaison de plusieurs cartes qui donnera un aspect de surface réaliste.

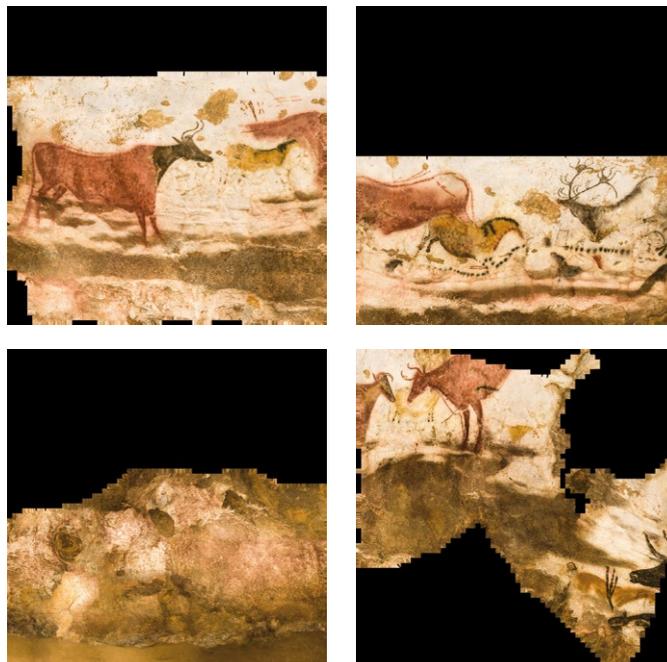
Projection 2D / 3D des textures : Les informations de texture peuvent être associées à un objet 3D de différentes manières, ce qui a une incidence sur l'organisation des fichiers au sein du livrable. On peut y associer une carte de texture unique, plusieurs cartes de textures, ou utiliser le « vertex coloring ».

- Carte UV unique : L'ensemble des textures de l'objet est compris dans une image unique, représentée sur un plan bidimensionnel de coordonnées U et V, puis associée au modèle 3D par projections géométriques.



Carte UV unique (exemple fictif)

- **multiples cartes UV** : Dans le cas d'une série d'images, les textures sont constituées d'images distinctes dont la projection sur le modèle est effectuée séparément, chaque image correspond à une zone précise du modèle. Par commodité, ces images sont stockées dans un seul dossier.

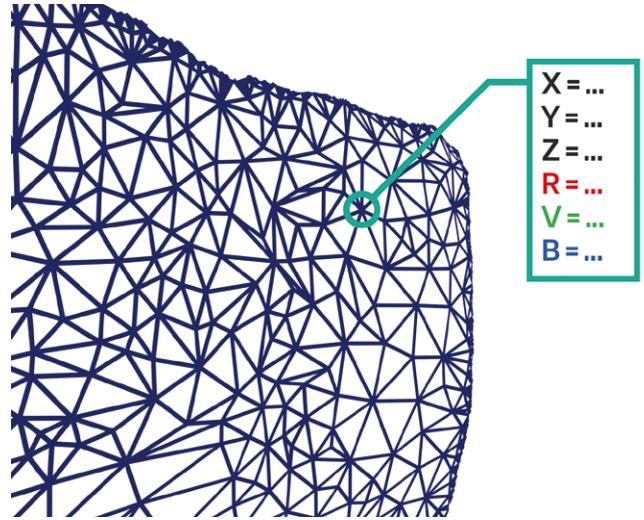


Cartes UV multiples

Le type de projection des textures n'a pas d'importance, à part si l'on considère un objet 3D de grande taille : en effet, il sera impossible de rassembler toutes les textures sur une seule image, car l'image devrait comporter beaucoup trop de pixels pour pouvoir offrir une bonne qualité visuelle à chaque zone de paroi.

Exemple : Le modèle 3D de la grotte de Lascaux est composé de très nombreux fichiers 3D, qui s'assemblent dans un logiciel. Chaque fichier 3D est associé à une carte de texture, et chacune d'entre elle mesure 16000 pixels par 16000 pixels (c'est déjà une définition extrêmement élevée). Si l'on voulait projeter les textures de Lascaux grâce à une carte UV unique, cette image serait tellement grande et lourde que les logiciels de 3D seraient incapables de la prendre en charge.

- **Vertex coloring** : Cela consiste à stocker les instructions de textures dans les données intrinsèques de l'objet 3D. Chacun de ses sommets est associé à des informations colorimétriques, en plus des informations concernant sa position dans l'espace. Dans ce cas, le modèle 3D est composé d'un fichier unique et il n'y a pas de carte de texture.



Fonctionnement du vertex coloring

Dans ce cas la texture a tendance à être moins réaliste, à moins que la densité de points du modèle soit très forte.

Format des fichiers de texture : Ce sont des formats images classiques : Voir la [fiche formats de fichiers « Photographies et Images » p.54.](#)

FINALISATIONS

LES FINALISATIONS SONT LES FICHIERS PRODUITS À PARTIR DU MODÈLE 3D DE L'OBJET NUMÉRISÉ. PAR EXEMPLE : IMAGES PANORAMIQUES, ORTHOPHOTOGRAPHIES, RENDUS STATIQUES, VIDÉOS, ANIMATIONS, SCÈNES INTERACTIVES ...

Images panoramiques	Point d'intérêt		Diverticule axial
	Type	Face de cube	
		Équirectangulaire	X
	Multires	Oui	
		Non	X
	Champ de vision		360° x 360°
	Dimensions		4000 x 2350 px
Format de fichier		JPG	
Logiciel utilisé pour l'assemblage		Blender	
Orthophotographies	Plan de référence		
	Format		
	Dimensions		
Rendu statique	Format		JPG
	Dimensions		1627 x 846 px
Vidéo	Titre		Reverdit Intro
	Format		.mov
	Durée		00:00:22
	Bande son		Non
	Objet		Aperçu du modèle 3D
Animation			
Scène interactive			

Images panoramiques : Les images panoramiques permettent la visualisation d'une scène selon un point de vue fixe mais sur un large champ de vision (jusqu'à 360°). Il faut alors renseigner l'emplacement du point d'intérêt et le type de projection à l'origine de l'image panoramique : **équirectangulaire** ou **face de cube**.

- **Équirectangulaire :** la scène est projetée sur une sphère ou un hémisphère, au centre duquel se trouve l'observateur.



Image panoramique équirectangulaire

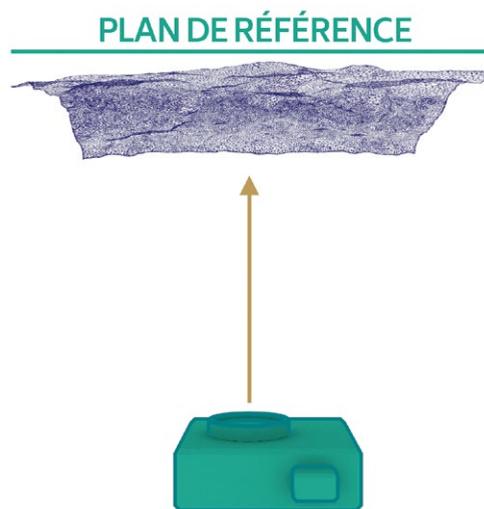
- **Face de cube** : la scène est projetée sur les 6 faces d'un cube au centre duquel se trouve l'observateur.



Image panoramique « Face de cube »

Multires : Certaines images panoramiques sont dites « multires », c'est-à-dire, dotées d'une résolution multiple, qui dépend du facteur de zoom dans la scène. Cela permet d'afficher un plus grand niveau de détail tout en optimisant les performances d'affichage.

Orthophotographie : C'est une image obtenue à partir d'une ou plusieurs photographies, pour laquelle les déformations liées au relief, à l'inclinaison des prises de vue, et à la distorsion de l'appareil photo, ont été corrigées suivant un plan de référence ou une surface de l'objet. Il faut renseigner le plan de référence, le format de l'image et ses dimensions.



Orthophotographie

Les autres types de rendus peuvent être décrits comme des fichiers multimédias, pour lesquels le Ministère de la Culture a déjà travaillé à la mise en place de métadonnées pertinentes.

PHOTOGRAPHIES / IMAGES

EXTENSION	PROPRIÉTAIRE	CARACTÉRISTIQUES
.NEF	Nikon	Fichier RAW - Sans compression
.CR2	Canon	Fichier RAW - Sans compression
.ARW	Sony	Fichier RAW - Sans compression
.SRW	Samsung	Fichier RAW - Sans compression
.BMP		Sans compression. Il a tendance à disparaître au profit de formats sans compression plus légers.
.TIFF		Sans compression. Optimisé pour l'impression.
.PNG		Sans compression. Optimisé pour le web, il permet la transparence et 16,7 millions de couleurs.
.GIF		Compressé pour le web. Il permet la transparence mais ne peut contenir que 256 couleurs.
.JPEG		Compressé. Optimisé pour le web.
.PDF		Universel, optimisé pour les documents mixtes (image et texte).

Liste non-exhaustive

NUAGES DE POINTS

EXTENSION	PROPRIÉTAIRE	CARACTÉRISTIQUES
.ASCII		Pérenne car c'est un format non binaire, il est donc possible de lire son contenu sans avoir à le « décoder ».
.PLY		Peut contenir des données tridimensionnelles, de la couleur, de la transparence, des normales, des coordonnées de texture.
.STL		Il contient uniquement des données 3D (pas de couleur ...).
.LAS		Spécialisé pour les nuages de points aéroportés Lidar.
.FLS / .FWS	Faro	Numérisation issue d'un scanner Faro.
.BIN	Cloud Compare	Nuage édité à partir du logiciel Cloud Compare.
.PSZ	Photoscan	Format issu du logiciel Photoscan.

Liste non-exhaustive

MODÈLES MAILLÉS

EXTENSION	PROPRIÉTAIRE	CARACTÉRISTIQUES
.OBJ		Ce format tend à être générique, il est lisible par la plupart des logiciels de 3D. Il peut contenir des informations de texture.
.STL		Il contient uniquement des données 3D (pas de couleur ...).
.PLY		Peut contenir des données tridimensionnelles, de la couleur, de la transparence, des normales, des coordonnées de texture.
.FBX	Autodesk	C'est un format propriétaire de la société Autodesk mais il est exploitable par d'autres logiciels (Blender, Sketchfab ...).
.DAE		Ce format a été conçu pour l'échange de données 3D inter-programmes.
.3DS / .MAX	Autodesk	Formats propriétaires Autodesk (Logiciels 3DS Max et Maya). Ils peuvent contenir des données 3D, des textures, de l'animation, des éclairages ...
.DXF / .DWG	Autodesk	Formats pouvant contenir de la 3D, issus du logiciel AutoCad.

Liste non-exhaustive

RÉFÉRENCES

ABERGEL Violette, *Projet «Grottes ornées» Documentation de ressources numériques, rapport intermédiaire*. Le 11/11/2015.

BREILLAT Laurent , *Le raw : qu'est ce que c'est ?* [en ligne]. Apprendre la photo, [consulté le 19/10/2017] <https://apprendre-la-photo.fr/le-raw-quest-ce-que-cest/>

DESKTOP ARCGIS, *Qu'est ce qu'un jeu de données LAS ?* [en ligne]. [consulté le 19/10/2017] desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-a-las-dataset-.htm

FÜRST Guillaume, *Introduction sur les fichiers / images numériques* [en ligne]. Tuto-photos, 2010-2016 [consulté le 19/10/2017] www.tutos-photo.com/retouches-simples/formats-fichiers.php

Iwona DUDEK, Jean-Yves BLAISE, Livio DE LUCA, Laurent BERGEROT, Noémie RENAUDIN, *How Was This Done? An attempt at Formalising and Memorising a Digital Assets 's Making-Of* [en ligne]. [consulté le 19/10/2017] <http://memoria.gamsau.archi.fr/projet/pdf/DCH2015.pdf>

LA PHOTO EN FAITS, *Fonctionnement d'un capteur photo* [en ligne]. La photo en faits, 06/06/2013 [consulté le 19/10/2017] www.la-photo-en-faits.com/2013/06/capteur-photo-fonctionnement.html

LUNDQUIST Samuel , *Les formats des fichiers graphiques : tout ce que vous avez toujours voulu savoir (sans jamais oser le demander)*[en ligne]. 99Designs, 2017 [consulté le 19/10/2017] <https://99de->

signs.fr/blog/conseils-design/formats-fichiers-images/

MICRO-EPSILON, *Glossaire, Triangulation laser* [en ligne]. Micro Epsilon, [consulté le 19/10/2017]
www.micro-epsilon.fr/service/glossar/Laser-Triangulation.html

N. CARBONI, G. BRUSEKER, A. GUILLEM, D. BELLIDO CASTAÑEDA, C. COUGHENOUR, M. DOMAJNKO, M. DE KRAMER, M. M. RAMOS CALLES, E. K. STATHOPOULOU, R. SUMA ; *Data Provenance in Photogrammetry through documentation protocols* [en ligne]. [consulté le 19/10/2017]
<https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/III-5/57/2016/isprs-annals-III-5-57-2016.pdf>

TECHNIQUES INGÉNIEUR, *Levée de topographie* [en ligne]. Editions T.I., 01/03/2005, journal : « techniques de l'ingénieur techniques du bâtiment : reconnaître le terrain », réf article tba420 [consulté le 19/10/2017] <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-reconnaitre-le-terrain-43801210/leve-de-topographie-tba420/>

TROCHON Marie-Laure, *Analyse des méthodes photogrammétriques de corrélation d'images pour l'étude des ouvrages rocheux* [en ligne]. 2012 [consulté le 19/10/2017]
http://eprints2.insa-strasbourg.fr/1220/1/M_TROCHON_Marie-Laure.pdf

UMR MAP, *MEMORIA* [en ligne]. UMR MAP [consulté le 19/10/2017]
http://www.map.cnrs.fr/?portfolio_page=pavage-3-3-13

UMR MAP, *Techniques et outils de numérisation 3D* [en ligne]. UMR MAP [consulté le 19/10/2017]
http://www.gamsau.map.archi.fr/3D-monuments/etudemcc/Etude3D/Numerisation_3D.html

CRÉDITS IMAGES

Page 13 : *Exemple d'une série de photographies* : Photographie de la frise sculptée de Cap Blanc (Dordogne). **Art Graphique et Patrimoine, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture.**

Page 17 : *Qualité d'une image, la résolution* : Cheval galopant – Panneau du Grand Taureau noir, grotte de Lascaux (Dordogne). **Cliché J.-M. Geneste, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture.**

Page 18 : *Qualité d'une image, le taux de compression* : Salon Noir, Bison. Grotte de Niaux (Ariège). **Cliché N. Aujoulat, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture.**

Page 19 : *Traitement d'une image* : Entrée de la grotte de Lascaux. **Cliché O. Huard, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture.**

Page 23 : *Exemple d'un nuage de point obtenu par lasergrammétrie* : Relevé laser du squelette. Abri de Cap Blanc (Dordogne). **Art Graphique et Patrimoine, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture.**

Page 31 : *Exemple d'un nuage de point obtenu par photogrammétrie* : Nuage de points coloré du squelette (test). Abri de Cap Blanc (Dordogne). **Violette Abergel, UMR MAP.**

Page 37 : *Exemple de reconstruction de surface (modèle maillé)* : Modèle maillé du squelette. Abri de Cap Blanc (Dordogne). **Art Graphique et Patrimoine, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture.**

Page 41 : *Exemple de modèle maillé enrichi* : Intérieur de la grotte de Commarque. Grotte de Commarque (Dordogne). **Art Graphique et Patrimoine, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture, Julie Lepelé.**

Page 42, 43 : *Les méthodes de texturage* : Images d'un fichier 3D extrait du modèle 3D de la grotte de Lascaux (Dordogne), fragment de la salle des Taureaux. **Cabinet Perazio, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture.**

Pages 44, 45 : *Types de textures* : Cartes de textures provenant de la banque de textures en ligne polyigon.com.

Pages 46, 47 : *Projection 2D/3D des textures* : Fichiers textures (images) correspondant à quelques fichiers 3D du Diverticul Axial de la grotte de Lascaux (Dordogne). **Cabinet Perazio, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture, Julie Lepelé.**

Page 51 : *Image panoramique équirectangulaire* : Image panoramique créée à partir du modèle numérique de la grotte de Lascaux pour les **Grands Sites Archéologiques** (www.lascaux.culture.fr). **Cabinet Perazio, Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture, Grands Sites Archéologiques, Julie Lepelé.**

Page 52 : *Image panoramique face de cube* : Image issue du site web <http://paulbourke.net/miscellaneous/cubemaps/>. **Paul Bourke**

Toutes les autres illustrations et la mise en page du document ont été créées par **Julie Lepelé - D-VISION** pour le **Centre National de Préhistoire.**

D-VISION

INFOGRAPHIE 2D/3D

Pour les Sciences & le Patrimoine

