



A collaborative work on the digital-physical anastylosis of the nave arch

Anaïs Guillem

2022-11-02

Workshop Web3D technologies for the Notre-Dame de Paris by Violette Abergel and Livio de Luca (online)

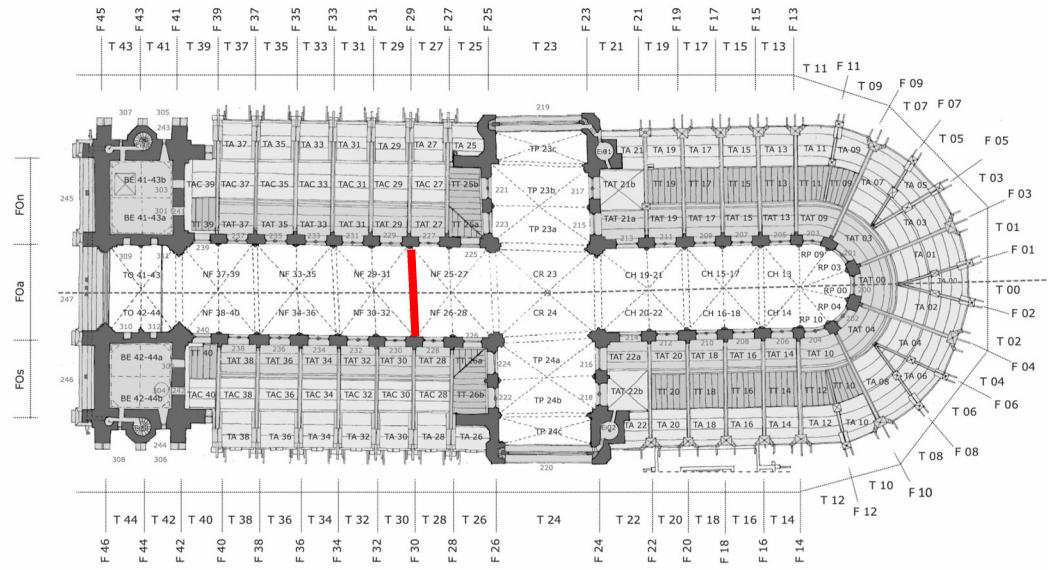


Fondation
des
Sciences
du Patrimoine



Laboratoire
de Recherche
des Monuments
Historiques

The case study: the collapsed arch F29-30 in the nave



Fonds de plan : agence Benjamin Mouton, ACMH

BE	Belfroi	FO	Façade ouest	TAC	Terrasse sur combles
CH	Choeur	NF	Nef	TP	Transept
CR	Croisée	RP	Rond-point	T	Travée
EI	Escalier int.	TA	Terrasse	TT	Toiture
F	File	TAT	Terrasse sur tribune	VO	Vitrail

CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE PARIS
 NOMENCLATURE DES ESPACES
 Plan des terrasses

ECHELLE 1/5000
 DATE 23.04.2019
 COVALENCE architects

Collapsed arch (GT Pierre – Bruno Phalip)

Juxtapositions of 3D Data in Aïoli

Point cloud
Tallon 2010
before fire

Point cloud surveys post
fire : vaults and nef
(cleaning operations)



The physical anastylosis test



Physical anastylosis
by LRMH and Stone
working group
(Leroux Lise, LRMH)

Digital and physical reconstruction

Digital:

2010 Tallon point cloud

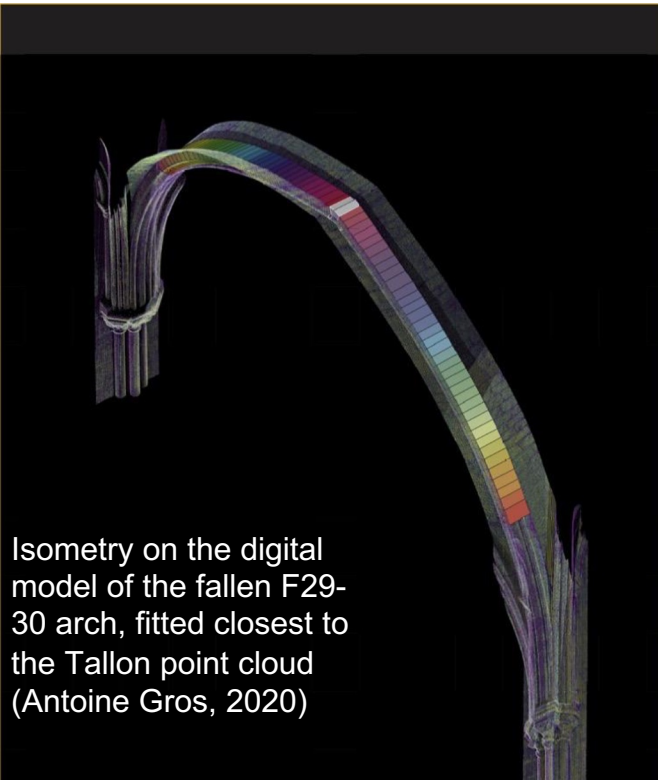


Physical:

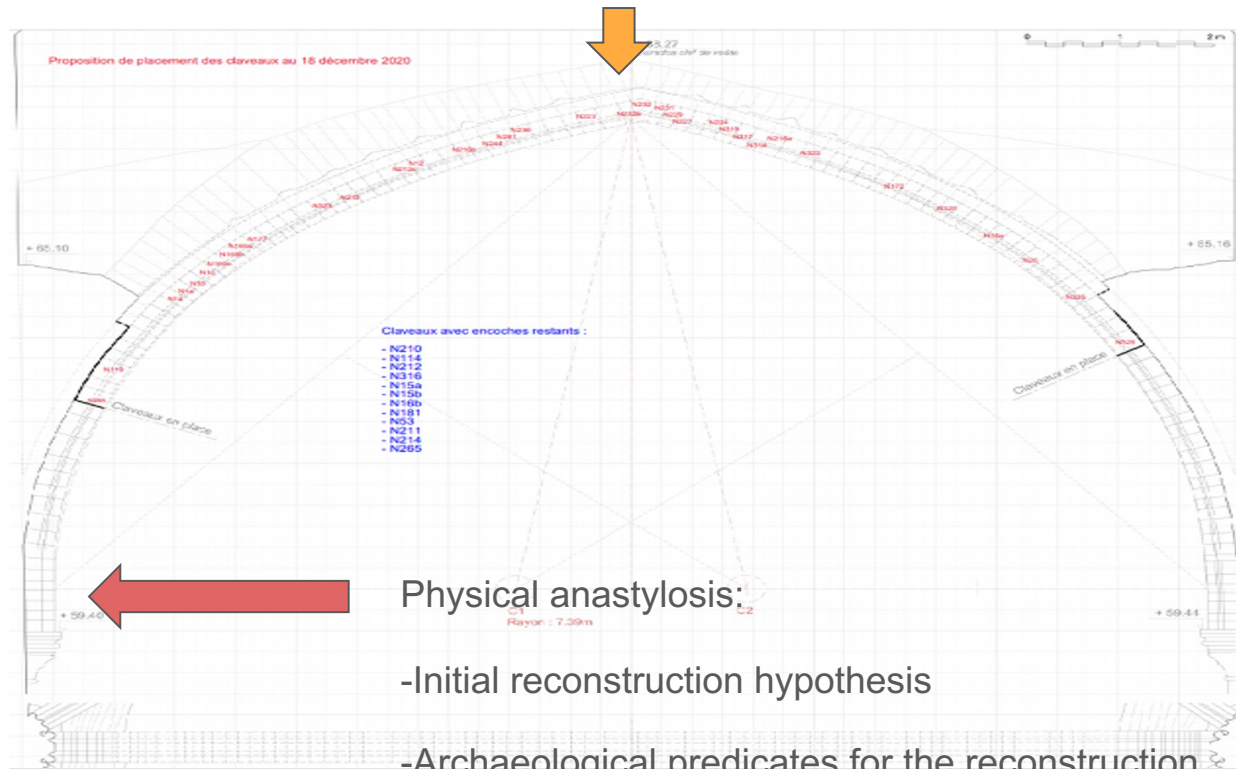
Tarpaulin printed at scale 1 (shapes and dimensions of the voussoir slots)

Virtual anastylosis:

Volumes & shapes reconstruction



Isometry on the digital model of the fallen F29-30 arch, fitted closest to the Tallon point cloud (Antoine Gros, 2020)



Physical anastylosis:

- Initial reconstruction hypothesis
- Archaeological predicates for the reconstruction (=reconstruction criteria)

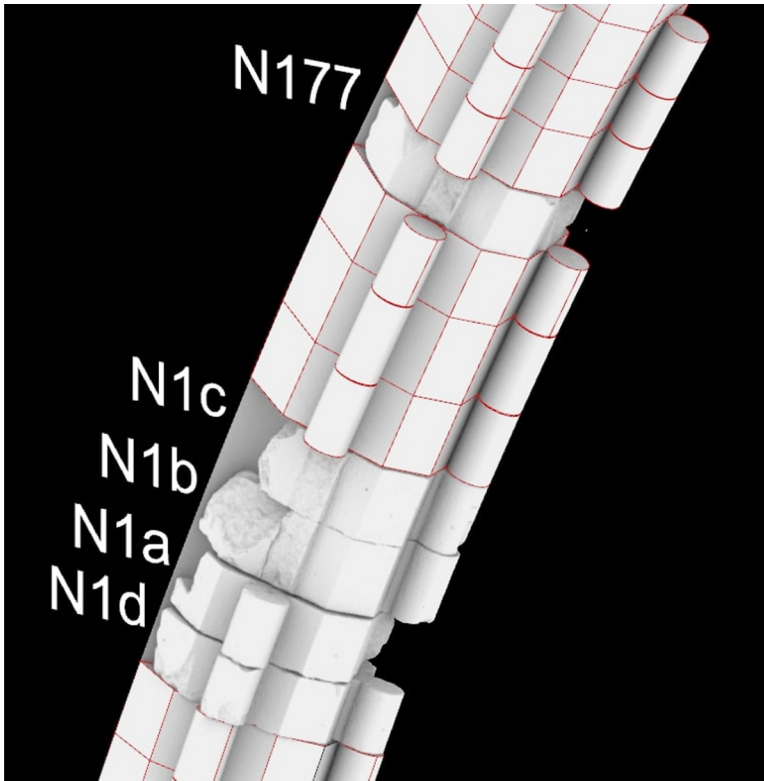
Digital and physical reconstruction



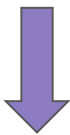
Input of the physical anastylosis results in the parametric model



Visualization of the physical anastylosis in the virtual environment



Lapidary mark in situ



The anatomy of a voussoir



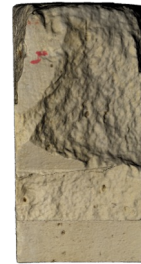
Notches on voussoirs (GT Pierre – Elise Baillieul & Arnaud Ybert)



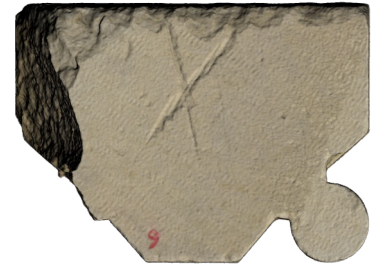
Side 2 **EXTRADOS**



Side 5 **SEAL SURFACE**



Side 4



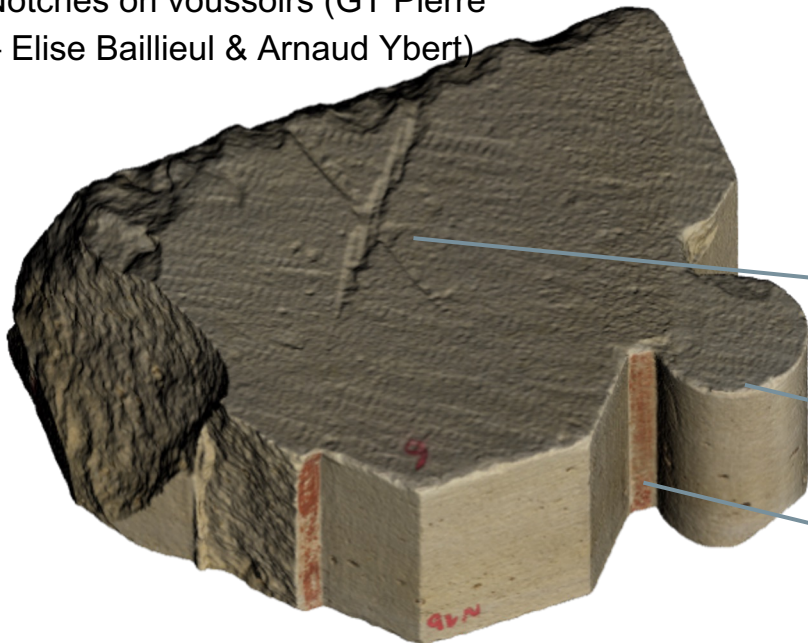
Side 6 **SEAL SURFACE with MARK**



Side 3



Side 1 **INTRADOS**



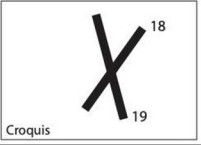

cross lapidary mark

moulding features
ie. ("tore" (fr.), "throat
moulding" (en.)

polychromy

Fiche descriptive Bloc

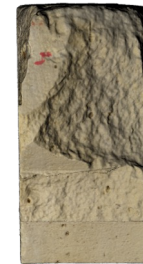
Rapport Claveaux GT Pierre - novembre 2020

Site Cathédrale Notre-Dame, Paris	Structure doubleau entre les travées 1 et 2 de la nef	N° d'inventaire N 1b	Lieu de conservation MOE 76 - rack 17	
Fonction de la pierre <input checked="" type="checkbox"/> Claveau <input type="checkbox"/> Clef <input type="checkbox"/> Sommier <input type="checkbox"/> Voutain <input type="checkbox"/> Chapiteau <input type="checkbox"/> Autre :	Nature <input checked="" type="checkbox"/> Calcaire <input type="checkbox"/> Grès <input type="checkbox"/> Granite <input type="checkbox"/> Schiste <input type="checkbox"/> Marbre <input type="checkbox"/> Autre :	Aspect Couleur de la pierre : épiderme : <input type="text"/> entraille : <input type="text"/> blanc-beige Grain : <input type="text"/> fin Fossiles visibles : <input type="checkbox"/> Nummulites <input type="checkbox"/> Ditrupa <input type="checkbox"/> Milioles <input type="checkbox"/> Orbitolites <input type="checkbox"/> Cérithes <input type="checkbox"/> Alvéolines Inclusions noires : <input type="checkbox"/> Silix <input type="checkbox"/> Galets <input type="checkbox"/> Fossiles <input type="checkbox"/> Autres :	Géologie & Site possible <input type="checkbox"/> Lutétien sup. <input type="checkbox"/> Lutétien moy. <input type="checkbox"/> Val-de-Grâce <input type="checkbox"/> Cochin <input type="checkbox"/> Charrenton <input type="checkbox"/> Chaillot <input type="checkbox"/> Saint-Maur <input type="checkbox"/> Saint-Denis	
Métrie longueur : 47 cm largeur : 34,5 cm hauteur int : 17,4 cm hauteur ext : 17,7 cm courbure :	Traces de taille Equarrissement : <input type="checkbox"/> Chasse <input type="checkbox"/> Pic <input type="checkbox"/> Tête <input type="checkbox"/> Polka Dégrossissage : <input type="checkbox"/> Pic <input type="checkbox"/> Broche <input type="checkbox"/> Ciseau (ciselure) larg. : <input type="text"/> Finition : <input type="checkbox"/> Laie <input checked="" type="checkbox"/> oblique <input checked="" type="checkbox"/> Bretture <input type="checkbox"/> Gradine <input type="checkbox"/> Grain d'orge <input type="checkbox"/> Boucharde <input type="checkbox"/> Ripe Orientation : <input type="checkbox"/> oblique <input type="checkbox"/> croisée <input type="checkbox"/> chevron <input type="checkbox"/> gerbe <input type="checkbox"/> désordonnée <input checked="" type="checkbox"/> parallèle Impacts : <input type="checkbox"/> longueur : 8 cm trainée : 12-15 mm nb de dents : > 11 larg. dents : 4 mm latéralité : droite			
Signe lapidaire <input type="checkbox"/> Marque de tailleur / d'atelier <input type="checkbox"/> Marque de montage <input checked="" type="checkbox"/> Marque de pose <input type="checkbox"/> Marque de hauteur d'assise <input type="checkbox"/> Graffiti <input type="checkbox"/> Epure <input type="checkbox"/> Indéterminé	 Croquis	Levage <input type="checkbox"/> Trou de pince <input type="checkbox"/> Trou de louve <input type="checkbox"/> Tenons <input type="checkbox"/> Sans trace	Pose <input type="checkbox"/> Délit <input type="checkbox"/> Stigmates de pose	Scellement <input type="checkbox"/> Trou d'agrafe <input type="checkbox"/> Trou de goujon <input type="checkbox"/> Abrevoir <input type="checkbox"/> Mortier
Liant associé Nature : <input type="checkbox"/> Mortier <input type="checkbox"/> Ciment <input type="checkbox"/> Joint sec <input type="checkbox"/> Autre : <input type="text"/> Couleur : <input type="text"/> Granulométrie : <input type="text"/> Pulvéulence : <input type="text"/> Composition : <input type="checkbox"/> Sable <input type="checkbox"/> Argile <input type="checkbox"/> Chaux <input type="checkbox"/> Charbon <input type="checkbox"/> Galet <input type="checkbox"/> Végétal <input type="checkbox"/> Terre cuite <input type="checkbox"/> Eclat de pierre <input type="checkbox"/> Incl. métalliques <input type="checkbox"/> Autre : <input type="text"/>	Photo 			
Enduit initial <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui Décor : <input type="checkbox"/> Uni <input type="checkbox"/> Végétal <input type="checkbox"/> Faux joints <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/> Indéterminé Composition : <input type="checkbox"/> Sable <input type="checkbox"/> Argile <input type="checkbox"/> Chaux <input type="checkbox"/> Charbon <input type="checkbox"/> Galet <input type="checkbox"/> Végétal <input type="checkbox"/> Terre cuite <input type="checkbox"/> Eclat de pierre <input type="checkbox"/> Incl. métalliques <input type="checkbox"/> Autre : <input type="text"/> Couleur de fond : <input type="text"/> Couleur du décor : <input type="text"/>	Décor sculpté <input type="checkbox"/> Feuille d'acanthé <input type="checkbox"/> Crochet <input type="checkbox"/> Scène historiée <input checked="" type="checkbox"/> Autre : méplat central, tore <input type="checkbox"/> Grottesque <input type="checkbox"/> Animalier <input type="checkbox"/> Héraldique			
Remploi <input checked="" type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui, fonction primaire <input type="checkbox"/> fonction secondaire	Ragréage <input type="checkbox"/> Non <input checked="" type="checkbox"/> Oui enduit : <input type="text"/> rubané rouge outil : <input type="text"/>			
Observations Décor rubané rouge ajouté lors de restaurations le long de l'extrados et dans les gorges entre les tores et le méplat central. Surface visible traitée à la gradine et brettature en frappe perpendiculaire ; surface enfouie dans la maçonnerie traitée à la brettature. Réalisation de la croix à la brettature. Une branche a été mal réalisée, les coups d'outils n'étant pas alignés.				
Date de rédaction : 17 septembre 2020	Rédacteur(s) : Cédric Moulis, Bruno Phalip			

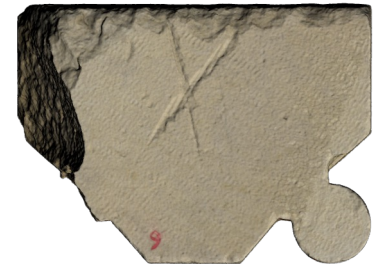
Voussoir N1B: graphical documentation and lapidary study inventory



Side 2 EXTRADOS



Side 4



Side 6 SEAL SURFACE with MARK



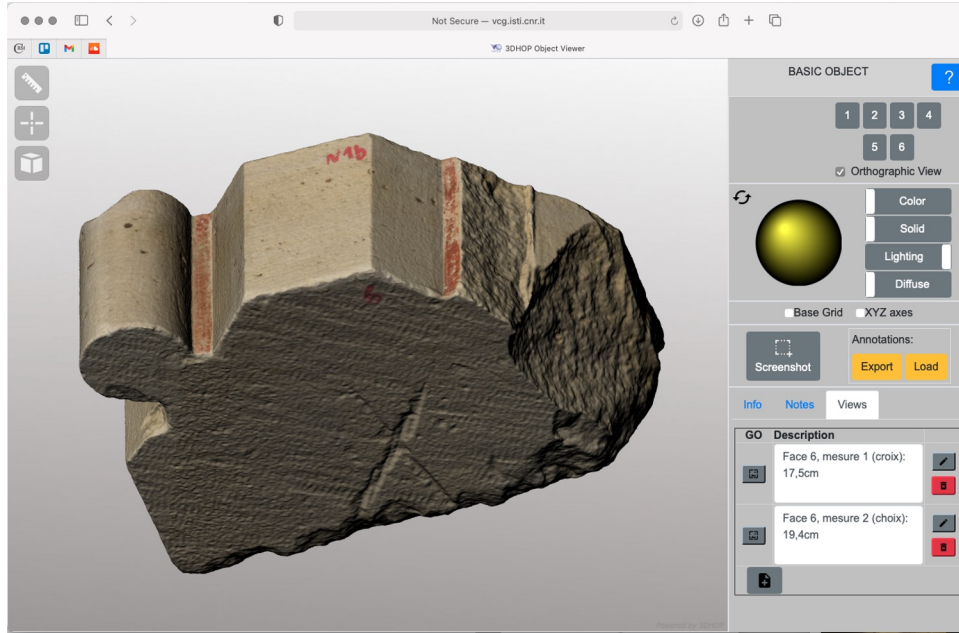
Side 3



Side 1 INTRADOS

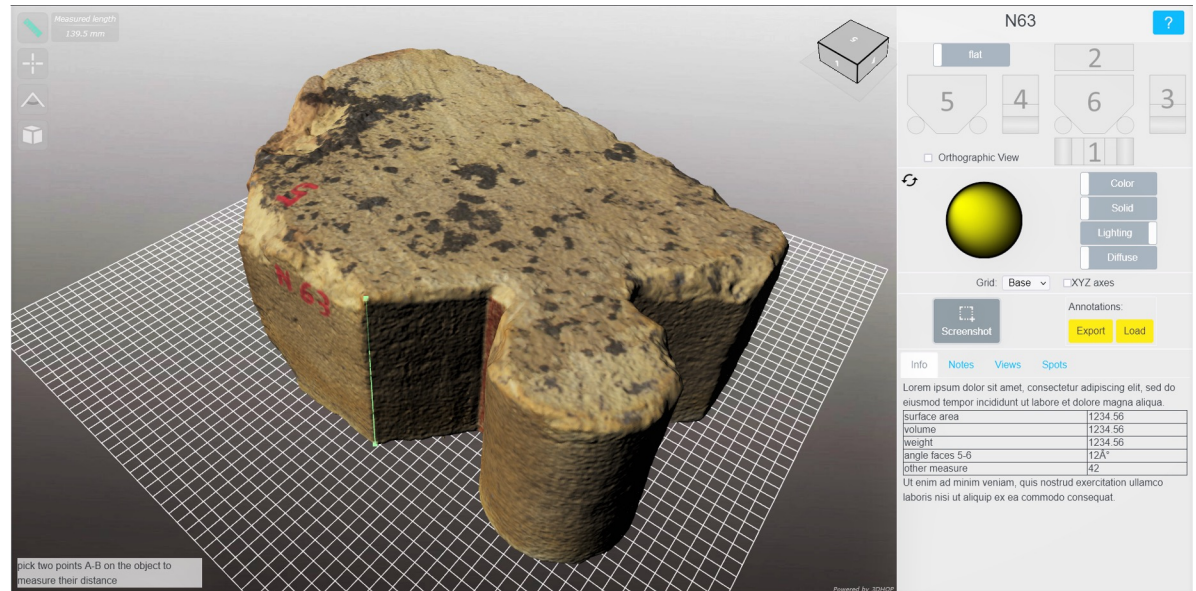


Side 5 SEAL SURFACE



User experience tests

- nomenclature
- angle measurement
- observation/annotation tests



Lapidary study of the voussoir collection

Digital:

- +No accessibility obstacle
- +Digital surrogate
- Need for digital tool appropriation

-> Adjusting digital protocols and tools as close as possible of archaeological research

Physical:

- +Direct observation
- +Traditional workflow for archaeologists and other specialists

-Accessibility obstacles (work authorization, safety protocols, disperse teams, storage location)

-Handling problems (heavy, pallets)

How to replicate archaeologists or heritage specialists' work using the 3D models of voussoirs ?

Method:

-questionnaire

-interview & work session with archaeologists from the Stone working group

-feedback to 3DHop team

Test utilisateur du Viewer Claveaux 3D

<http://vcg.isti.cnr.it/~callieri/notredame/>

Information générales	
Nom de l'utilisateur [Nom Prénom] :	Moulis Cédric
Date [YYYY-MM-DD] :	22/02/2021
Groupe [GT..., MOE, MOA, chercheur indépendant] :	GT Pierre
# Bloc visualisé avec le viewer 3d [exemple N1b] :	N1a
Navigateur Web utilisé [Chrome, Safari, etc]	Chrome

• 1/ Accessibilité :

Est-ce que le modèle 3D était facilement accessible ? Avez-vous rencontré des problèmes (Si oui, lesquels)

Pas de pb.

Temps de chargement :

Est-ce que le temps de chargement était instantané, relativement court, relativement long ? instantané...

• 2 Vues et manipulation:



Choisir des vues différentes en cliquant sur les boutons vues 1, 2, 3, 4, 5, 6 et en (de)cochant « orthographic view ». Exporter chaque visuel en cliquant « screenshot » dans le panneau à droite. Copier-coller les visuels dans le tableau suivant et indiquer les commentaires que vous souhaitez. Au total, 14 visuels vont être créés.

Vue	Perspective	Ortho	Commentaire utilisateur (utilité, problème, question)

Vue 1			
Vue 2			
Vue 3			
Vue 4			
Vue 5			
Vue 6			De manière générale, la vue orthographique est nettement plus intéressante. Mais la vue en perspective permet d'approcher les détails. Les 2 vues restent donc utiles.
Vue (autre)	Perspective :	Axonométrie :	On aimerait beaucoup pouvoir avoir la face 6 visible en perspective avec des angles identiques à celui de la face 5 (voir le screenshot ici)

⇒ Here there is an interesting feedback about the difficulty because of the origin of the model placed on one face. The manipulation in 3d is not homogeneous.

- 3/ Outils :
- Mesures :

Trajectory of a voussoir after its collapse

Voussoirs in the
remains of the nave



Cleaning operations by
unmanned machines



Trajectory of a voussoir after its collapse

Remains sorting, temporary
storage on pallets



SRA Archaeologists and LRMH:
bucket unloading and sorting

Inventory number attribution
& initial inventory



Pallet temporary storage

Trajectory of a voussoir after its collapse

Cleaning operations dataset:

Photo sorting/indexing, metadata extraction

The screenshot displays the Adobe Bridge interface. On the left, a table lists files with columns for SourceFile, FileName, and FileSize. A red arrow points from the table to a grid of photo thumbnails on the right. The thumbnails show various scenes, including a collapsed stone block (voussoir) and interior views of a building. The interface includes navigation tools, a search bar, and a metadata panel on the right side.

SourceFile	FileName	FileSize
.N169-N170/20190717_162642-cl-amm-N.JPG	20190717_162642-cl-amm-N.JPG	1962
.N169-N170/20190717_163507-cl-amm-N.JPG	20190717_163507-cl-amm-N.JPG	1984
.N171/20190718_093957-cl-amm-N.JPG	20190718_093957-cl-amm-N.JPG	2.3 N
.N171/20190718_094117-cl-amm-N.JPG	20190718_094117-cl-amm-N.JPG	1983
.N171/20190718_094301-cl-amm-N.JPG	20190718_094301-cl-amm-N.JPG	1998
.N171/20190718_094302-cl-amm-N.JPG	20190718_094302-cl-amm-N.JPG	1978
.N171/20190718_094311-cl-amm-N.JPG	20190718_094311-cl-amm-N.JPG	1978
.N171/20190718_094428-cl-amm-N.JPG	20190718_094428-cl-amm-N.JPG	2004
.N171/20190718_094456-cl-amm-N.JPG	20190718_094456-cl-amm-N.JPG	1985
.N171/20190718_094515-cl-amm-N.JPG	20190718_094515-cl-amm-N.JPG	1970
.N171/20190718_094730-cl-amm-N.JPG	20190718_094730-cl-amm-N.JPG	1967
.N171/20190718_094922-cl-amm-N.JPG	20190718_094922-cl-amm-N.JPG	1962
.N171/20190718_094931-cl-amm-N.JPG	20190718_094931-cl-amm-N.JPG	1980
.N173-N176/20190718_095018-cl-amm-N.JPG	20190718_095018-cl-amm-N.JPG	2016
.N173-N176/20190718_095120-cl-amm-N.JPG	20190718_095120-cl-amm-N.JPG	2036
.N173-N176/20190718_095126-cl-amm-N.JPG	20190718_095126-cl-amm-N.JPG	2043
.N173-N176/20190718_105113-cl-amm-N.JPG	20190718_105113-cl-amm-N.JPG	1979
.N173-N176/20190718_105114-cl-amm-N.JPG	20190718_105114-cl-amm-N.JPG	1992
.N173-N176/20190718_105329-cl-amm-N.JPG	20190718_105329-cl-amm-N.JPG	1961
.N173-N176/20190718_105336-cl-amm-N.JPG	20190718_105336-cl-amm-N.JPG	2010
.N173-N176/20190718_111115-cl-amm-N.JPG	20190718_111115-cl-amm-N.JPG	1994
.N173-N176/20190718_111128-cl-amm-N.JPG	20190718_111128-cl-amm-N.JPG	1987
.N173-N176/20190718_111135-cl-amm-N.JPG	20190718_111135-cl-amm-N.JPG	1967
.N173-N176/20190718_111147-cl-amm-N.JPG	20190718_111147-cl-amm-N.JPG	1987
.N173-N176/20190718_111152-cl-amm-N.JPG	20190718_111152-cl-amm-N.JPG	1983
.N173-N176/20190718_112123-cl-amm-N.JPG	20190718_112123-cl-amm-N.JPG	1969
.N173-N176/20190718_112135-cl-amm-N.JPG	20190718_112135-cl-amm-N.JPG	1975
.N173-N176/20190718_112148-cl-amm-N.JPG	20190718_112148-cl-amm-N.JPG	1975
.N177/20190718_112204-cl-amm-N.JPG	20190718_112204-cl-amm-N.JPG	1989
.N177/20190718_112223-cl-amm-N.JPG	20190718_112223-cl-amm-N.JPG	2015
.N177/20190718_112231-cl-amm-N.JPG	20190718_112231-cl-amm-N.JPG	2025
.N177/20190718_112658-cl-amm-N.JPG	20190718_112658-cl-amm-N.JPG	1990
.N179-N181/20190718_112715-cl-amm-N.JPG	20190718_112715-cl-amm-N.JPG	1979
.N179-N181/20190718_112724-cl-amm-N.JPG	20190718_112724-cl-amm-N.JPG	1978
.N179-N181/20190718_113831-cl-amm-N.JPG	20190718_113831-cl-amm-N.JPG	1981
.N179-N181/20190718_113901-cl-amm-N.JPG	20190718_113901-cl-amm-N.JPG	1965
.N179-N181/20190718_113917-cl-amm-N.JPG	20190718_113917-cl-amm-N.JPG	1961
.N179-N181/20190718_113925-cl-amm-N.JPG	20190718_113925-cl-amm-N.JPG	1990
.N179-N181/20190718_113935-cl-amm-N.JPG	20190718_113935-cl-amm-N.JPG	1954
.N179-N181/20190718_114824-cl-amm-N.JPG	20190718_114824-cl-amm-N.JPG	1960
.N179-N181/20190718_114841-cl-amm-N.JPG	20190718_114841-cl-amm-N.JPG	2005

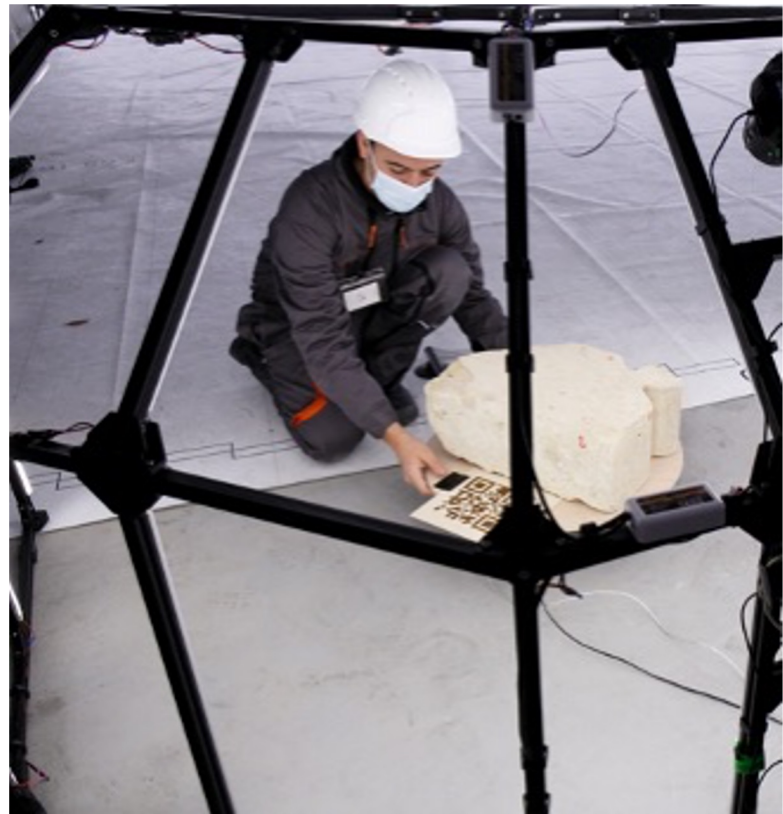
Olivier Malavergne, LRMH

Trajectory of a voussoir after its collapse

Decontamination

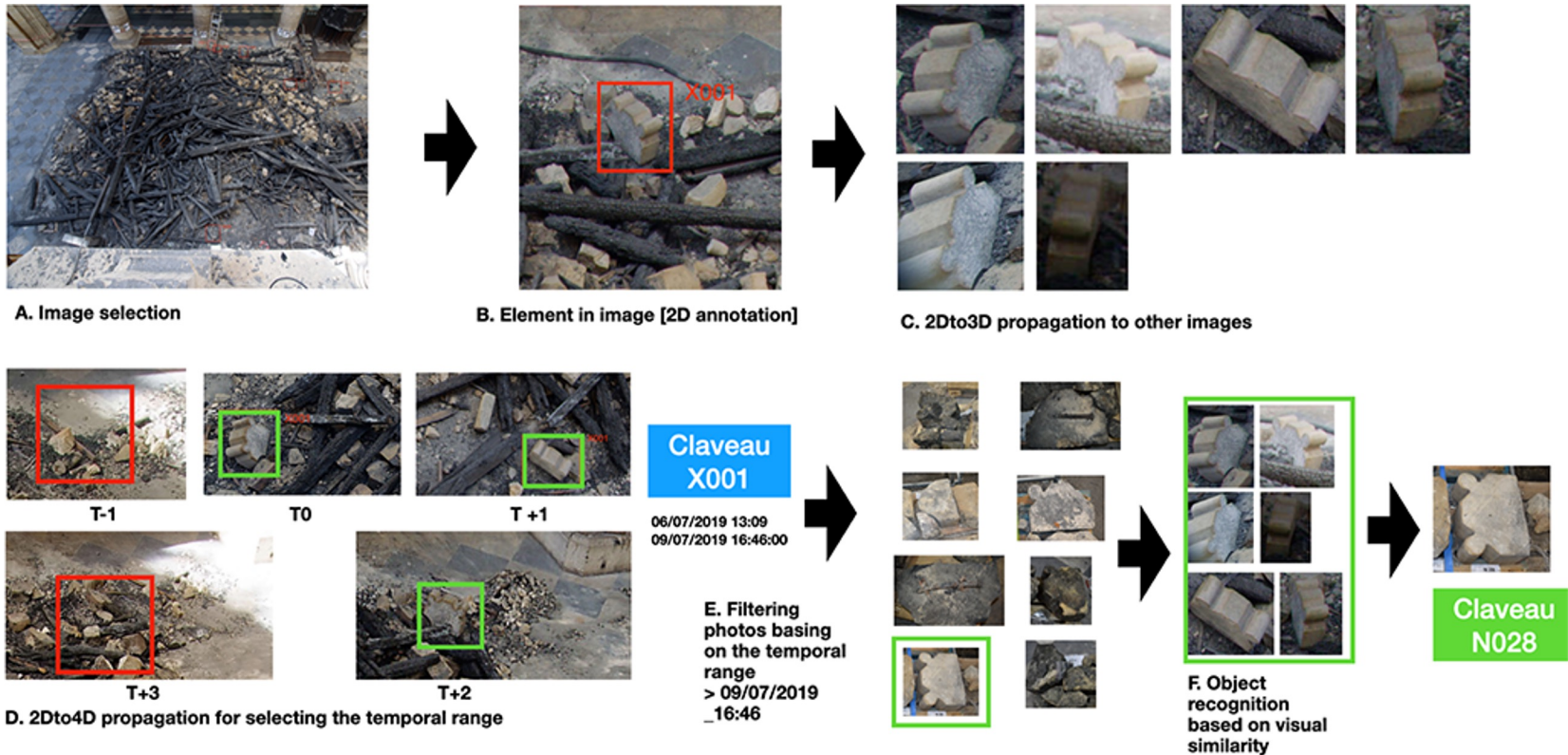


Voussoir digitization

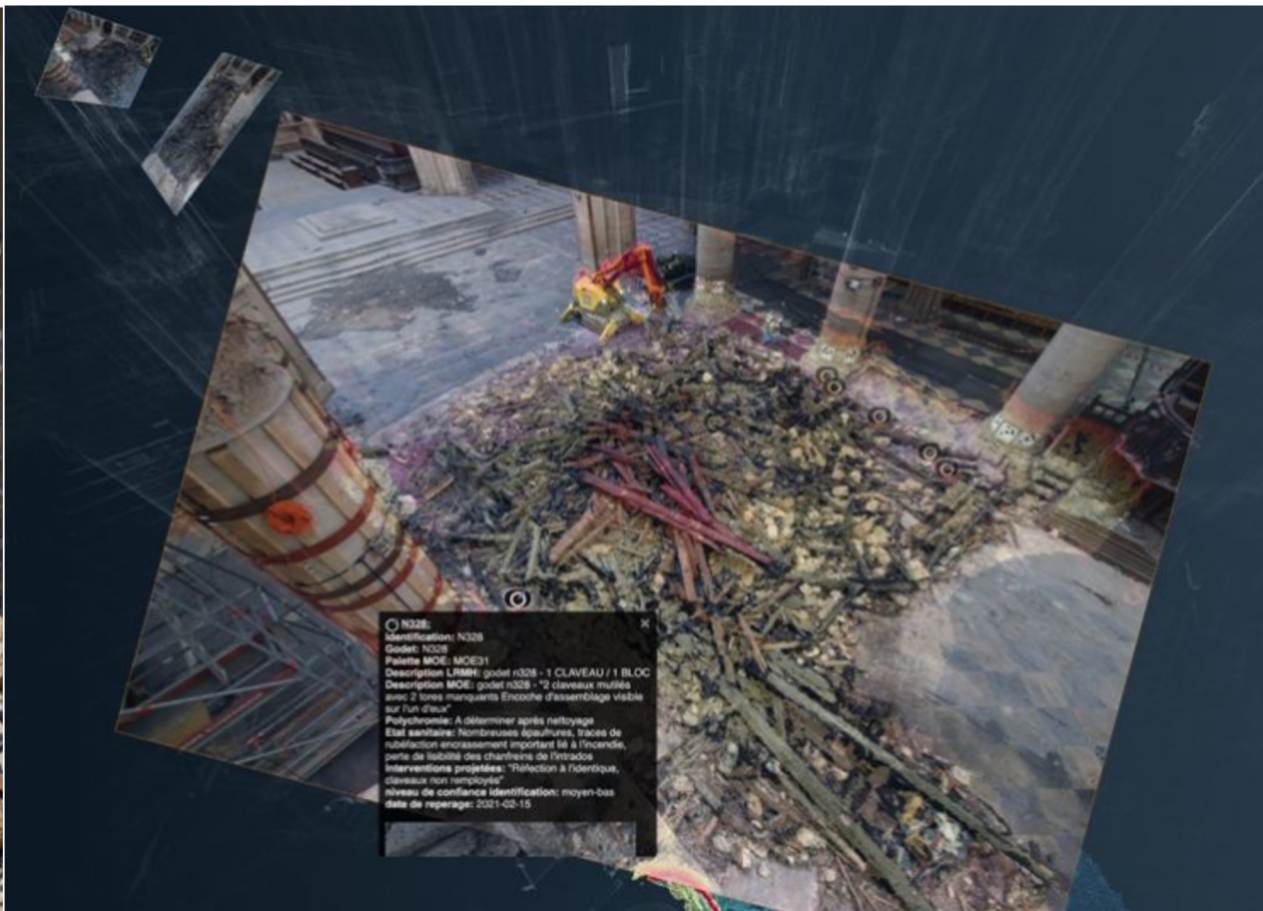


Eloi Gattet, Mercurio, Feb. 2021

Aioli for tracking and identifying voussoirs



Fall position of voussoirs in the nave



0 N328
Identification: N328
Gedet: N328
Palette MOE: MOE31
Description L1818: godet n328 - 1 CLAVEAU / 1 BLOC
Description MOE: godet n328 - "2 clavaires moulés avec 2 fentes manquants Encoche d'assemblage visible sur l'ut d'aux"
Polychromes: A déterminer après nettoyage
Etat sanitaire: Nombreuses sculptures, traces de ruissellement enrobage important lié à l'incendie, perte de stabilité des charnières de l'extrados
Interventions projetées: "Réfection à l'épave, clavaires non remplissées"
niveau de confiance Identification: moyen-bas
date de repérage: 2021-02-15

Identification of the voussoir fall location



The collapsed arch reconstruction as an optimization problem

Linear Programming:
minimisation of the objective
function to be framed by a
set of constraints gathered in
a system of inequalities

1. Problem statement+ Problem modelling

2. Import of libraries

3. Declaration of the solver

4. Creation of variables
(constants and decision vars.)

5. Definition of the objective
function

6. Definition of constraints

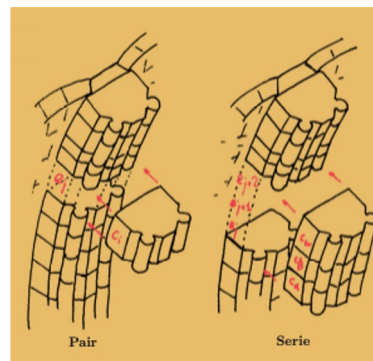
7. Invocation of the solver

8. Display and analysis of the
solution(s)

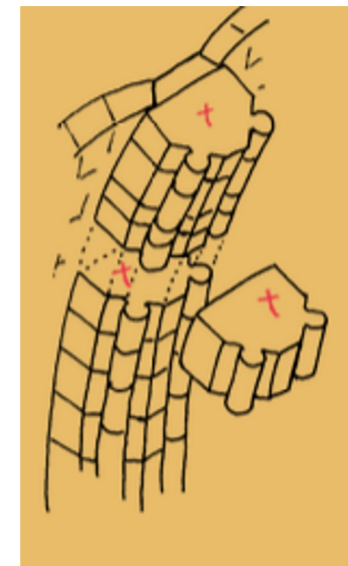
Archaeological
predicates



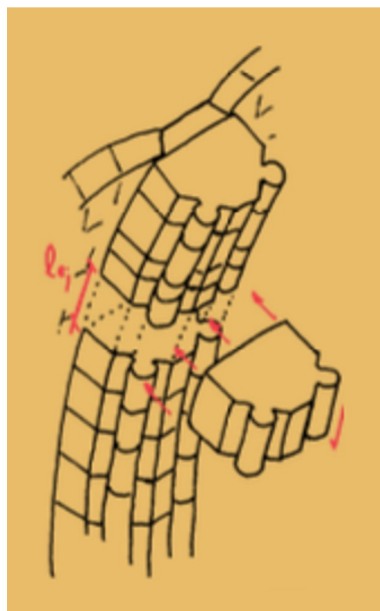
Fonction and
constraints definition



Pairs and series



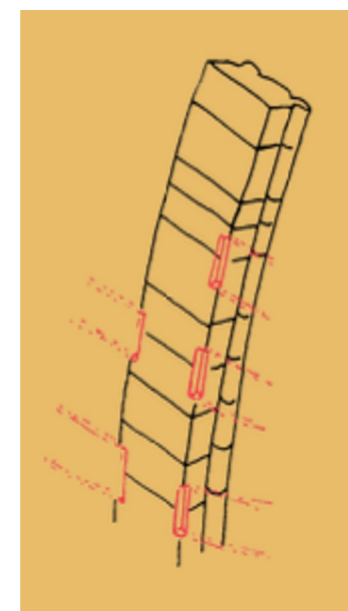
Marks



Width



Fall location



Notches

The collapsed arch reconstruction as an optimization problem

solution type	Width	Fall Location	Keystone	Crosses	Notches	Notches Location	PA Clusters	total number of replaced voussoirs	violations	average model confidence
Physical Anastylis	x		x					36 (50%)	4	na
Digital 'gl'	x		x					71 (100%)	2	19.46%
Digital 'glec'	x		x	x	x			71 (100%)	2	32.72%
Digital 'glecr'	x	x	x	x	x			71 (100%)	0	62.20%
Digital 'glecrt'	x	x	x	x	x	x		71 (100%)	0	62.44%
Hybrid	x	x	x	x	x	x	x	71 (100%)	0	73.55%

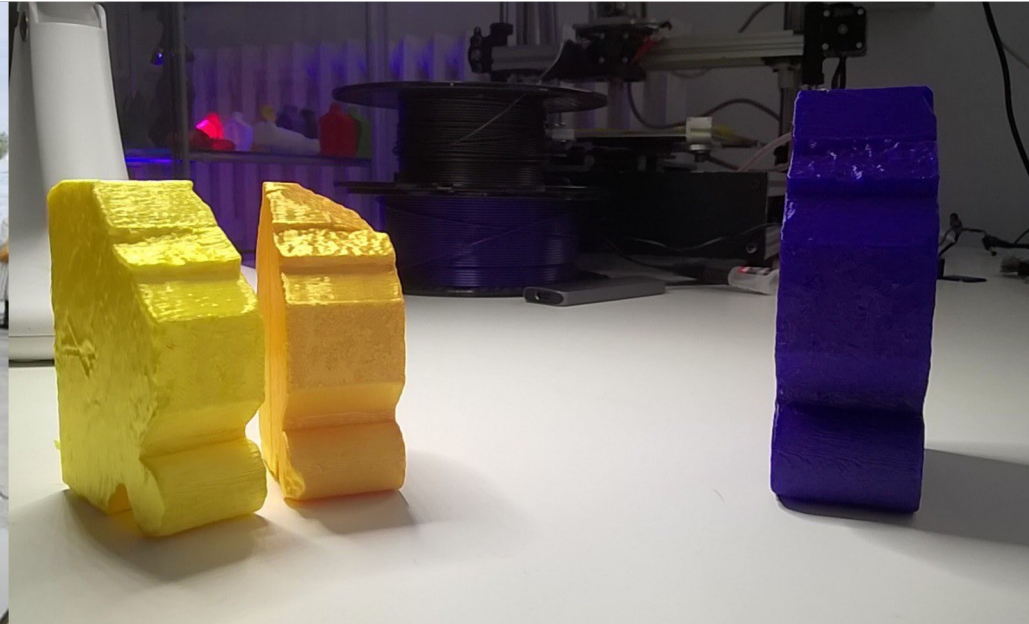
Table 1. Detailing of the milestone models for reconstruction hypothesis with their performance and uncertainty. With gl: gaussian distribution of width; ec: notches and crosses; r: matching fall location with slot location; t: notches locations; hybrid hypothesis: full LP model with pairs from the physical anastylis input.

The collapsed arch reconstruction as an optimization problem



Visualization in the 3D viewer of the reconstruction hypothesis (Gros, Abergel, 2022)

Impression 3D de claveaux



Reconstruction hypothesis tests,
communication about different
hypothesis, general audience
dissemination

(Journée du Patrimoine, 2021)

FSP-REPERAGE Project and Notre-Dame Working Groups

REPERAGE Project team:

Livio de Luca (MAP), Dorothee Chaoui-Derieux (SRA), Antoine Gros (MAP), Anaïs Guillem (FSP), Lise Leroux (LRMH), Olivier Malavergne (LRMH), Thierry Zimmer (LRMH).

Stone Working Group: especially Élise Bailleul (UMR 8529-IRHiS), Cédric Moulis (EA1132- Hiscant-MA), Bruno Phalip (Université Clermont-Auvergne)

The whole team of the Digital Data Working Group

