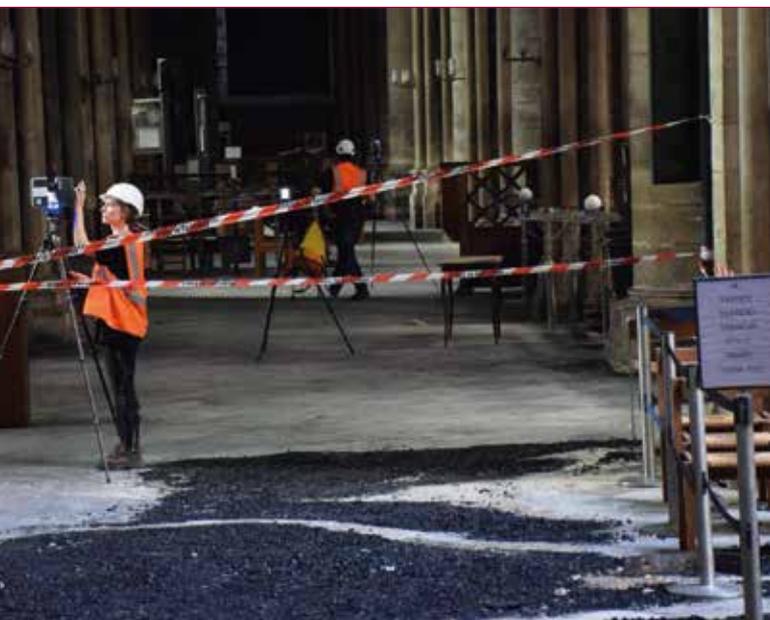


LA DIGITALIZZAZIONE AL CENTRO DEL PROGETTO DI RICOSTRUZIONE DELLA CATTEDRALE DI NOTRE-DAME

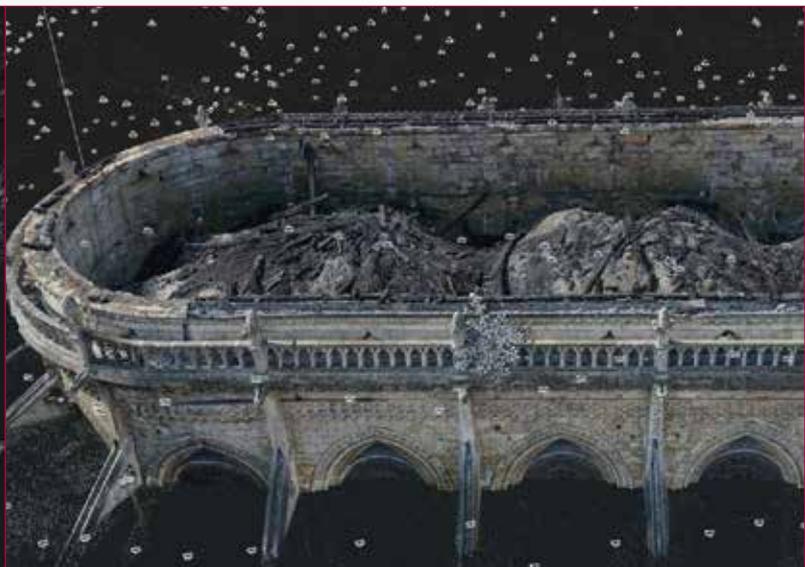


di Art Graphique & Patrimoine

L'azienda francese high tech Art Graphique & Patrimoine mette il proprio savoir-faire e le più avanzate tecnologie digitali al servizio del cantiere di restauro della cattedrale di Parigi.

Art Graphique & Patrimoine, pioniera delle nuove tecnologie ed esperta del Patrimonio culturale, ha affiancato l'«Etablissement public» incaricato della conservazione e del restauro di Notre-Dame e il CNRS -Centro Nazionale di Ricerca Scientifica- nell'ambito della creazione del «gemello digitale» della cattedrale. Nel marzo 2021, a due anni dall'incendio che ha distrutto il tetto e le capriate medievali, AGP ha portato a termine il suo lavoro per il progetto digitale di Notre-Dame.

In 27 anni di attività la squadra di 33 specialisti di AGP («tailleurs de pierre», architetti, archeologi, storici, ma anche ingegneri geometri-topografi, grafici e informatici) ha acquisito la traccia digitale di numerosi siti e monumenti storici patrimonio dell'umanità, e ha oggi al suo attivo più di 3.000 importanti referenze, tra cui il Mont-Saint-Michel, la Reggia di Versailles, la Tour Eiffel, il Museo d'Orsay, il Ponte del Gard e le collezioni del Museo del Louvre e Louvre Abu Dhabi, oltre a più di trenta cattedrali in Francia. Grazie alla sua attività di rilievo laser, ricostruzione



3D e realizzazione di visite virtuali per il grande pubblico, AGP contribuisce alla salvaguardia e alla valorizzazione di opere, architetture e siti in pericolo in Francia e all'estero.

Operatore storico della digitalizzazione 3D di Notre-Dame, AGP è stata incaricata dalle autorità pubbliche, subito dopo l'incendio del 15 aprile 2019, di raccogliere dati preziosi e misure tecniche sul monumento a seguito del sinistro, grazie a dei rilievi 3D in lasergrammetria e fotogrammetria terrestre e aerea tramite drone. Queste misure 3D o "nuvola di punti" sono indispensabili alla diagnosi, allo studio e alla ricostruzione del monumento, permettendo la produzione di documenti grafici, metrici e tecnici delle strutture fragilizzate della cattedrale.

UN INTERVENTO D'EMERGENZA IN SOCCORSO DELLA CATTEDRALE

Un'importante operazione d'emergenza è stata condotta a qualche giorno dall'incendio, sabato 20 aprile 2019, per rispondere in tempi brevissimi ai bisogni della direzione dei lavori, delle aziende e degli esperti mobilitati per mettere in sicurezza la cattedrale.

Questa « missione comando » ha permesso di effettuare una digitalizzazione 3D metrologica delle zone sinistrate, con l'obiettivo di produrre una documentazione tecnica primordiale per intraprendere il progetto di consolidamento, salvaguardia, ricostruzione e restauro in questo cantiere d'eccezione.

I rilievi effettuati a seguito dell'incendio, cumulati ai numerosi rilievi digitali effettuati da AGP nei vent'anni precedenti all'incendio del 15 aprile, sono stati molto utili per estrarre delle informazioni preziose sulle dimensioni della struttura e i movimenti causati dai crolli.

Queste misure di alta precisione hanno consentito in particolare la realizzazione di orto-immagini metriche in pianta, in prospetto e in sezione, permettendo:

- Di misurare senza intervento fisico la portata tra le murature, così da permettere la posa delle travi della tettoia provvisoria, installata la settimana successiva al sinistro per proteggere la struttura da ulteriori danni;
- Di cartografare i volumi totali e le dimensioni precise della cattedrale per la costruzione degli elementi di consolidamento realizzati su misura.

In questo modo, la fabbricazione d'emergenza delle strutture di protezione e di sostegno ai contrafforti ha potuto essere realizzata, da parte delle aziende specializzate, per ogni elemento.

Questi elementi preparatori, realizzati in urgenza per rispondere ai bisogni imperiosi della messa in sicurezza della struttura della cattedrale, sono stati adoperati ed elaborati per la produzione di tutta la documentazione tecnica (piante, prospetti, sezioni, orto-immagini, monitoraggio delle deformazioni, modelli 3D) necessaria alla diagnosi e alla pianificazione dei lavori di ricostruzione.

ESEMPI DI APPLICAZIONE

Nell'autunno 2019, una delle prime tappe del cantiere è stata la gestione dell'agglomerato di detriti delle capriate, del tetto e della guglia, risultanti dall'incendio e che ingombravano il coro.

Art Graphique & Patrimoine è intervenuta a monte dell'operazione di sgombero, fornendo al SRA -Servizio Regionale d'Archeologia- le orto-immagini risultanti dai rilievi 3D in lasergrammetria e dalle acquisizioni tramite drone. Il lavoro di AGP è consistito inoltre nel misurare i movimenti dei detriti che avrebbero potuto verificarsi prima della fase di sgombero. A tal fine, un sistema di sensori ultra precisi è stato allestito ai quattro angoli del coro in modo da rilevare il minimo movimento.

Questi documenti (orto-immagini e orto-fotografie) e misure tecniche consentono di visualizzare con grande pre-

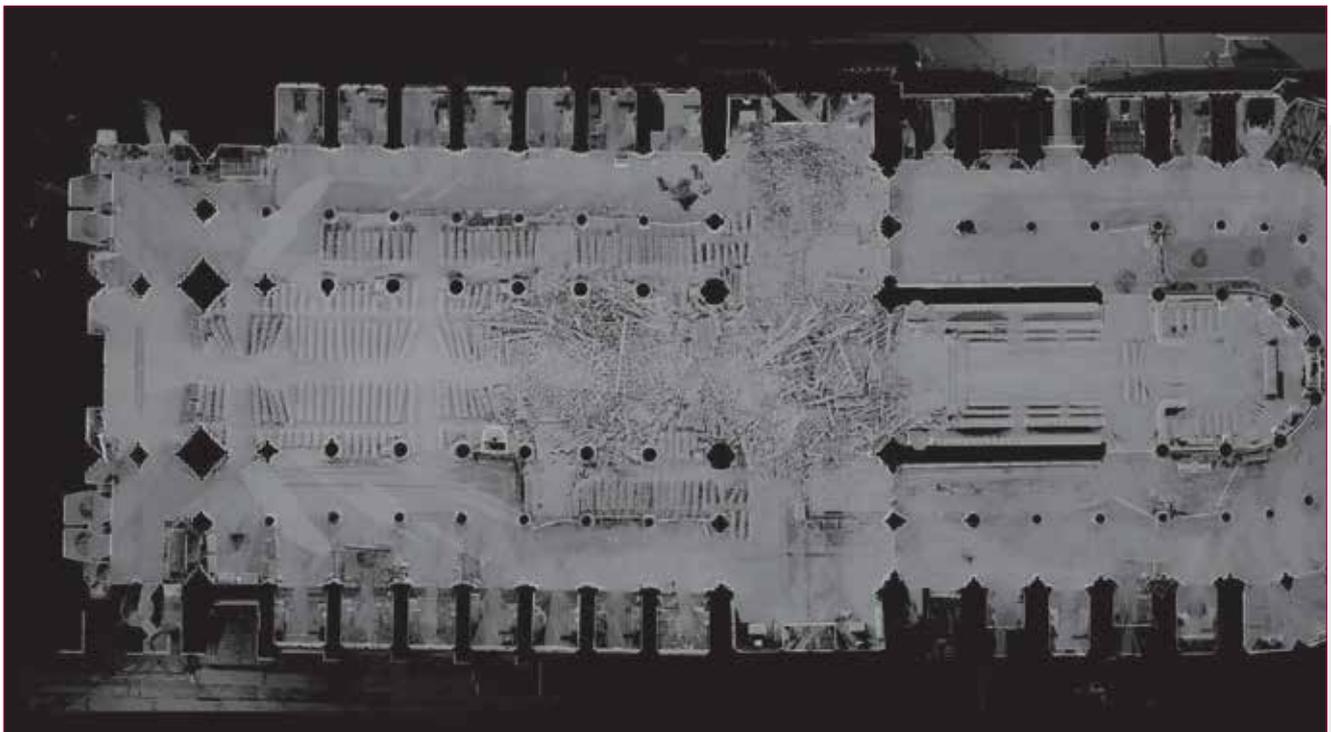


Fig. 4 - Orto-immagine in pianta della navata.



cisione la localizzazione dei diversi detriti. Il SRA ha così potuto realizzare con il Centro di Ricerca e di Restauro dei Musei di Francia (C2RMF) un inventario completo di travi, pietre, blocchi di bronzo e altri elementi presenti nella navata: una tappa necessaria per organizzare efficacemente la rimozione dei detriti, la loro conservazione -per un futuro riutilizzo-, e garantire la sicurezza del cantiere. Un lavoro simile è stato inoltre realizzato dal CNRS -Centro Nazionale della Ricerca Scientifica- per quanto riguarda le volte della cattedrale, basandosi su una orto-fotografia realizzata grazie a uno dei primi rilievi aerei tramite drone effettuati da AGP, qualche giorno prima dell'incendio.

IL CANTIERE, DUE ANNI DOPO

Tra l'aprile 2020 e l'aprile 2021, durante la crisi sanitaria, Art Graphique & Patrimoine ha lavorato per fornire le misure e le ricostituzioni 2D e 3D necessarie alla diagnosi e ai lavori di consolidamento, restauro e ricostruzione. I dati acquisiti dalla sua squadra di ingegneri geometritopografi nella fase di rilievo 3D, durante la primavera del



Fig. 7 - Orto-fotografia della facciata di Notre-Dame.

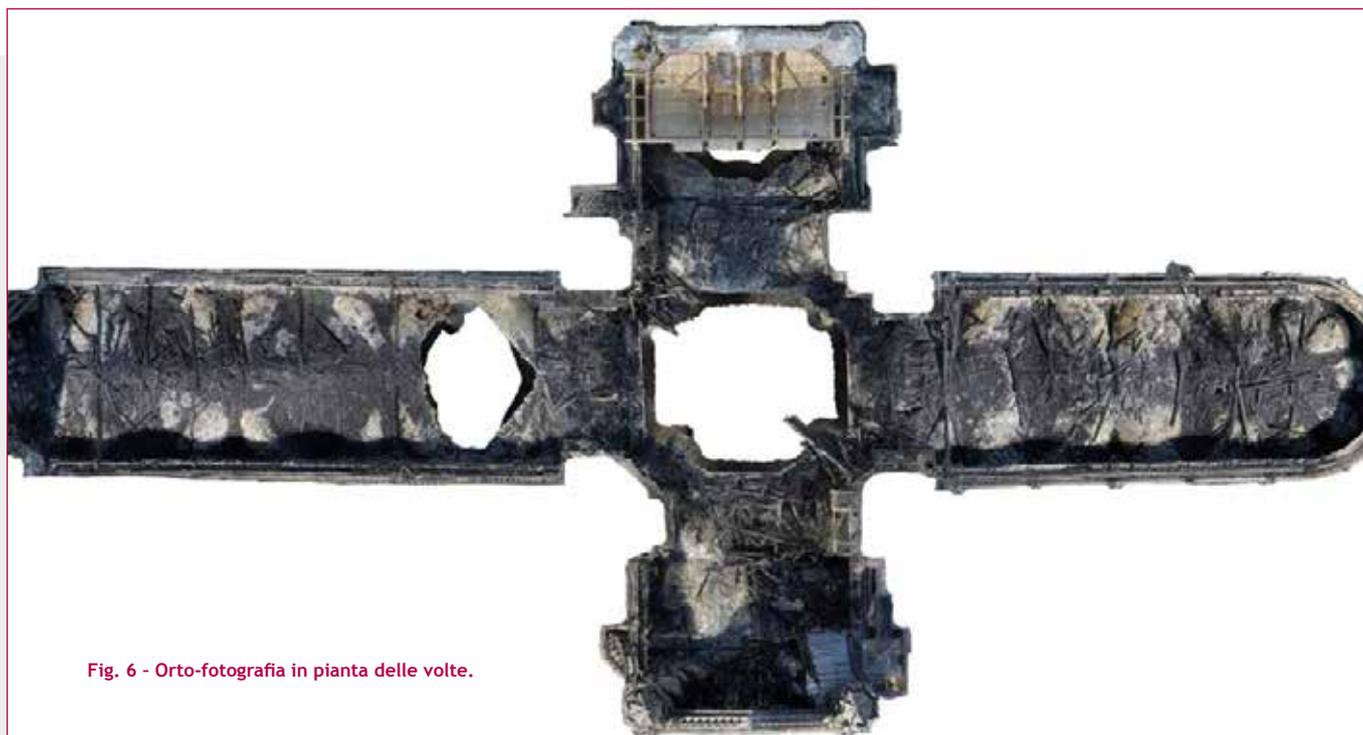


Fig. 6 - Orto-fotografia in pianta delle volte.

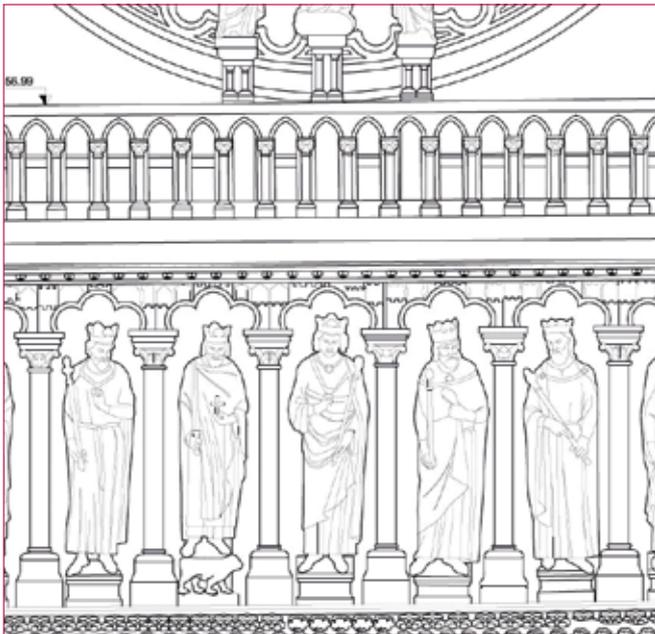
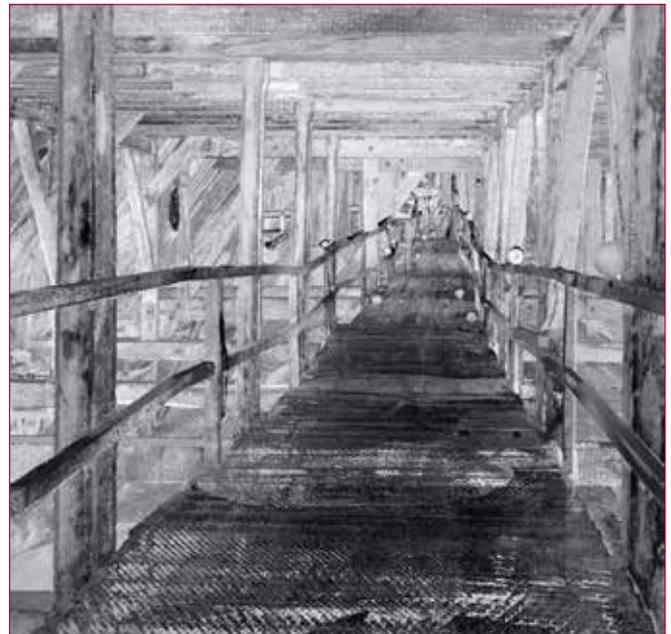


Fig. 8 - Dettaglio del rilievo tecnico della facciata, della Galerie des rois e del rosone centrale.

2019 e grazie a rilievi complementari durante l'estate del 2020, sono stati assemblati ed elaborati per cominciare la realizzazione dei disegni tecnici della cattedrale (piante, prospetti e sezioni), destinati alla direzione dei lavori e all'Établissement public che li sovrintende. Un lavoro minuzioso e meticoloso è stato effettuato dalle mani esperte dei disegnatori e "tailleurs de pierre" di AGP per riprodurre la cattedrale, le sue strutture e i suoi elementi decorativi unici al mondo, nei minimi dettagli.

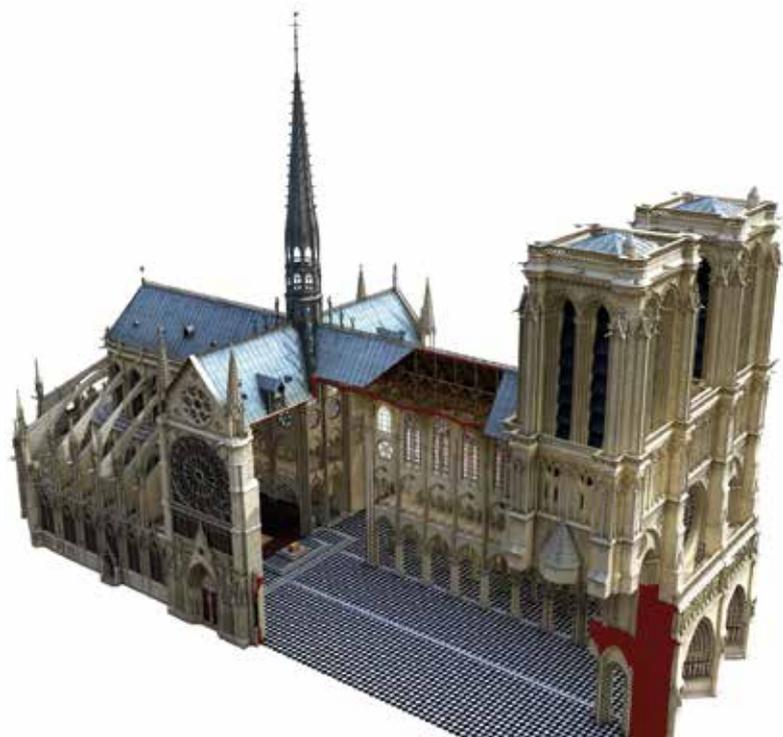
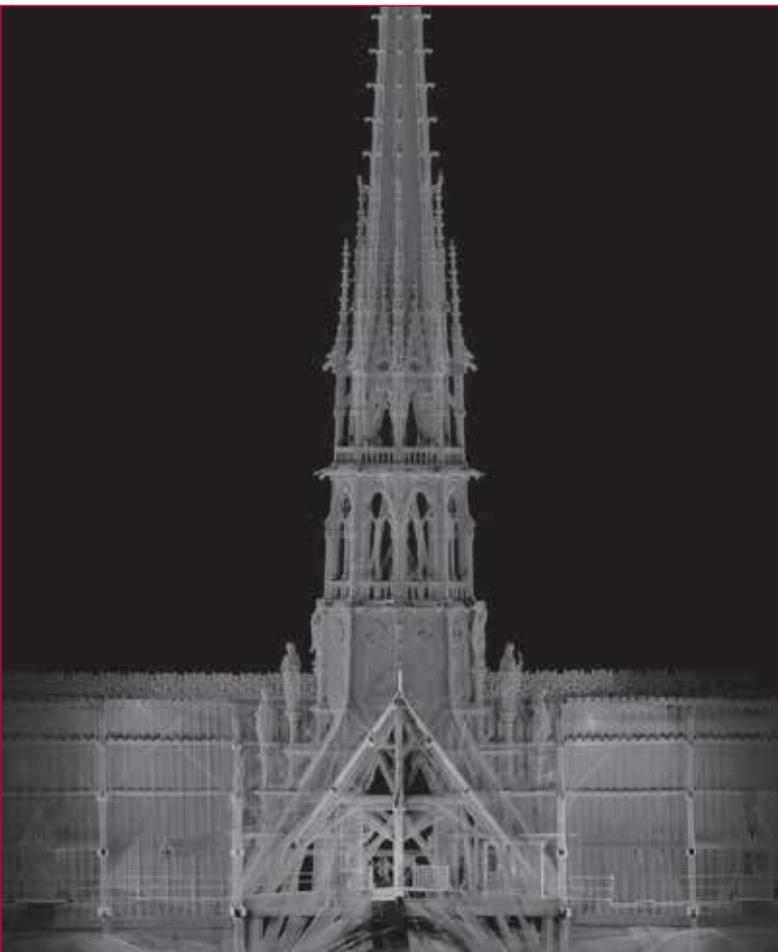


I DATI DELLE SCANSIONI LASER

Nei suoi 26 anni di attività AGP ha effettuato molteplici rilievi 3D nella cattedrale attraverso le tecniche della scansione laser e della fotogrammetria. Questi dati assemblati hanno permesso di recuperare tutte le misure (nuvole di punti) del tetto a capriate (la "foresta") e della guglia che sono scomparsi con l'incendio.

Per la cosiddetta « foresta » si tratta di:

- 150 scansioni di precisione millimetrica per un totale tra i 3 e i 5 miliardi di punti;
- La densità eccezionale dei punti (tra 1 e 2 punti per mm^2) permette di ottenere una riproduzione estrema-





mente precisa, con ridottissimo margine di errore, dei dettagli del tetto a capriate, contrariamente alla digitalizzazione di Andrew Tallon (un punto ogni 2-3 cm) che nel suo progetto puntava solo all'acquisizione dei volumi generali dell'edificio, nel quadro di ricerca dei sistemi costruttivi delle cattedrali.

Per la totalità della cattedrale:

- La nuvola di punti di AGP di tutta la cattedrale contiene tra i 30 e i 50 miliardi di punti, contro 1 miliardo dei dati di Andrew Tallon.

Video (navigazione nella nuvola di punti del tetto):

https://www.youtube.com/watch?v=O2z5jiJ_2tU&feature=youtu.be

UNA RICOSTRUZIONE 3D DELL'EVOLUZIONE STORICA DI NOTRE-DAME

Laurence Stefanon, infografista e storica dell'arte di AGP, ha lavorato nel 2013 a una ricostruzione storica della cattedrale di Parigi, realizzando un modello 3D per 14 fasi architettoniche, dal 1163 a oggi.

Questo modello 3D, realizzato con obiettivi pedagogici per una pubblicazione editoriale, presenta la ricostruzione 3D di Notre-Dame dalle sue origini all'epoca attuale, prima dell'incendio.

ART GRAPHIQUE & PATRIMOINE

Art Graphique & Patrimoine è un'azienda pioniera e leader nel settore delle nuove tecnologie applicate al patrimonio culturale. Impresa di 33 persone (tailleurs de pierre, ingegneri e topografi, architetti, archeologi, storici dell'arte, grafici e informatici) con sede alle porte di Parigi.

Da oltre 27 anni AGP mette la sua conoscenza del patrimonio e la sua esperienza nelle nuove tecnologie al servizio della conservazione e del restauro dei monumenti storici. Specialista del rilievo laser e della ricostruzione 3D, l'azienda contribuisce alla valorizzazione di opere, architetture e siti in pericolo in Francia e all'estero.

Tra le sue 3000 referenze, AGP enumera edifici importanti in Francia quali: il Mont-Saint-Michel, la Reggia di Versailles, la Tour Eiffel, il Museo d'Orsay, il Museo del Louvre, il Ponte del Gard, l'Anfiteatro romano di Arles e di Nîmes, una trentina di cattedrali sparse sul territorio; e in 18 paesi, con in particolare: l'Università Lomonosov di Mosca (Russia), il Campidoglio di Dougga (Tunisia), la Cittadella romana di Palmira (Siria), il Krac dei Cavalieri (Siria), la Moschea di Haji Piyada (Afghanistan) [...]

Art Graphique & Patrimoine ha ottenuto il marchio di eccellenza di Entreprise du Patrimoine Vivant, un riconoscimento speciale dello Stato creato per distinguere le imprese francesi dal raro savoir-faire artigianale e industriale di eccellenza.

ABSTRACT

ART GRAPHIQUE & PATRIMOINE, PIONEER OF NEW TECHNOLOGIES AND EXPERT IN CULTURAL HERITAGE, HAS JOINED THE "ETABLISSEMENT PUBLIC" IN CHARGE OF THE CONSERVATION AND RESTORATION OF NOTRE-DAME AND THE CNRS - NATIONAL CENTER FOR SCIENTIFIC RESEARCH - IN THE CONTEXT OF THE CREATION OF THE "DIGITAL TWIN" OF THE CATHEDRAL. IN MARCH 2021, TWO YEARS AFTER THE FIRE THAT DESTROYED THE MEDIEVAL ROOF AND TRUSSES, AGP COMPLETED ITS WORK ON THE DIGITAL NOTRE-DAME PROJECT.

PAROLE CHIAVE

DIGITALIZZAZIONE; SCANSIONE LASER; RESTAURO VIRTUALE; PATRIMONIO; NOTRE-DAME

AUTORE

ARTGRAPHIQUE&PATRIMOINE

Tecnologie per le Scienze della Terra e del Mare



Strumenti ad alta tecnologia anche a noleggio per:

Studio dei fondali e delle coste

Multibeam, SSS, SBP, sismica marina ...

Ingegneria civile

Georadar 3D, laser scanner, inclinometri ...

Monitoraggio sismico

Sismometri, strong motion, reti early warning ...

Studio del sottosuolo

Georadar, sismica, geoelettrica ...

Monitoraggio ambientale

Magnetometri, elettromagnetismo,
sonde oceanografiche ...



CODEVINTEC

Tecnologie per le Scienze della Terra e del Mare

tel. +39 02 4830.2175 | info@codevintec.it | www.codevintec.it