

Fessenheim : le numérique au service du démantèlement nucléaire d'EDF

■ Frédéric FAGUET - Jean-Baptiste LARANGE

Au sein du groupe EDF, la Direction des projets déconstruction et déchets (DP2D) est engagée dans son plus grand chantier : le démantèlement de la centrale de Fessenheim. Pour l'équipe du bureau d'études, c'est l'occasion d'utiliser au maximum les technologies de capture 2D et 3D, d'intelligence artificielle et de jumeaux numériques au service de l'industrie afin d'en tirer les gains. Les méthodes d'IA, de BIM (Building Information Management), de réalité virtuelle et augmentée permettent l'exploitation de grandes quantités de données. Au-delà de la constitution de jumeaux numériques de très haute fidélité, la question de leur mise à jour est cruciale. Comment garantir aux utilisateurs une donnée 2D et 3D toujours la plus proche de la réalité possible avec des budgets raisonnables ? Ceci pour onze réacteurs nucléaires, répartis sur huit sites partout en France ? Dans cet article, nous verrons comment l'équipe du Bureau d'études intégrateur (BEI) de la Direction des projets déconstruction et déchets (DP2D) d'EDF met en pratique les innovations internes ou celle de la R&D EDF Saclay en ce qui concerne les plans, les photos panoramiques, les nuages de points 3D et les maquettes 3D. Des schémas mécaniques aux photos satellites, en passant par le SLAM et le BIM, le BEI innove régulièrement pour baisser les coûts, améliorer la qualité des données ou accélérer les plannings au bénéfice des projets de déconstruction d'EDF.

■ MOTS-CLÉS

Scanner 3D, photo panoramique 360, maquette 3D BIM, intelligence artificielle, photos satellites, SLAM, réalité virtuelle

pales : acquérir les données d'entrée des études sur site (2D et 3D), maintenir les bases de données à jour, étudier et modéliser (en 2D ou 3D) les futures installations à créer pour démanteler, et diffuser l'ensemble des données aux ingénieurs, techniciens, responsables projet, exploitants, filiales et partenaires externes. Ces données sont cruciales. Étant donné la distance de plusieurs centaines de kilomètres séparant les sites industriels du siège de Lyon, les jumeaux numériques prennent tout leur intérêt. Ils permettent aux projets de prendre les bonnes décisions, à l'ingénierie de réaliser de meilleures études et cahiers des charges, et même aux exploitants sur place d'éviter des ouvertures régulières de locaux aux accès complexes ou à risques (radio-protection, amiante, sécurité, etc.). Un fort intérêt pour ces données est également présent au sein des équipes de communication d'EDF, par les illustrations détaillées et fidèles qu'elles proposent.

Dans un premier temps, EDF réalise très souvent des scans 3D et de très nombreuses vues panoramiques 360° des installations. Ensuite, ces données sont exploitées en visite virtuelle et sémantisées à l'aide de l'IA. Si le gain est justifié, une maquette 3D BIM est réalisée pour les bâtiments qui comportent le plus d'enjeux ou de besoin d'inventaire des matériels. Étant donné la durée du démantèlement, EDF a mis au point des méthodes "rapides" de mise à jour des visites virtuelles et maquettes 3D afin de conserver les gains fournis par les investissements dans des bases de données initialement coûteuses. Enfin, le bureau d'études étudie la mise à jour rapide des plans de masse des centrales nucléaires par photos satellites pour réduire les coûts par rapport aux anciennes méthodes (avion ou drone).

Le contexte du numérique 3D à la déconstruction nucléaire d'EDF

La Direction des projets déconstruction et déchets (DP2D) est l'entité du Groupe EDF en charge du démantèlement de onze réacteurs nucléaires de quatre technologies différentes. Ces réacteurs ont été exploités de 1963, pour Chinon A1, à 2020 pour Fessenheim 1 et 2. Située à Lyon, la Direction de l'ingénierie numérique (DIN) de la DP2D regroupe 300 ingénieurs et techniciens représentants de nombreux métiers (électricité, installation mécanique, génie civil, manutention, sûreté nucléaire, gestion des risques, radio-protection, conception des scénarios de démantèlement...) et responsables des avant-projets sommaires afin de cadrer les grandes options techniques à appliquer pour déconstruire en toute sûreté ces anciennes installations nucléaires.

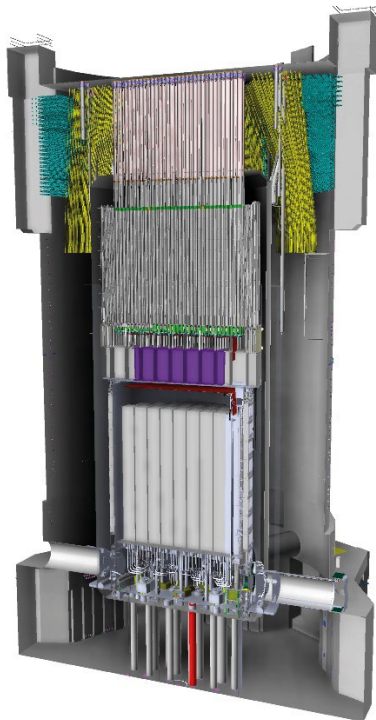
Le terme de démantèlement couvre l'ensemble des activités, techniques et administratives, réalisées après l'arrêt définitif d'une installation nucléaire, afin d'atteindre un état final prédéfini où la totalité des substances dangereuses et radioactives a été évacuée de l'installation. Ces activités peuvent comprendre, par exemple, des opérations de démontage d'équipements électromécaniques, l'assainissement des locaux et des sols (nettoyage et ponçage des surfaces jusqu'au retour à la propreté conventionnelle), de destruction de structures de génie civil (démolition classique), de traitement, de conditionnement, d'évacuation et d'élimination de déchets, radioactifs ou non. Cette phase de vie des installations est marquée par des changements rapides de l'état des installations et une grande évolution de la nature des risques.

Le Bureau d'études intégrateur (BEI), est chargé de quatre missions princi-



La genèse de la 3D à la déconstruction dans les années 2000

Depuis 2009, le BEI a pris en main le sujet des grands jumeaux numériques, accompagné par l'Unité technique opérationnelle (UTO) de Paris et la R&D EDF. À cette époque, le centre d'ingénierie de la déconstruction (ancien nom de la DP2D) avait prévu l'ouverture exceptionnelle du caisson réacteur graphite gaz de Bugey 1 (un réacteur de 50 m de haut, 27 m de diamètre, entouré de 6 m de béton précontraint réalisé en 1974), afin de réaliser l'analyse de la tenue des structures pour l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). C'était l'occasion de réaliser aussi une visite virtuelle dans ce lieu difficilement accessible, contaminé en radionucléides Alpha. 120 photos panoramiques de haute résolution et autant de points de vue de scanner 3D ont été réalisés en toute sécurité par une société externe composée de géomètres topographes habitués aux environnements nucléaires complexes. Une maquette 3D "telle que construit" (figure 1) a aussi été réalisée avec une précision de quelques centimètres (dans le logiciel 3D IPSOS, créé par une filiale d'EDF), afin d'illustrer, de servir



© Frédéric FAGUET

Figure 1. Modélisation mix entre tel que construit pour les parties accessibles et théorique pour les parties du cœur.



© Frédéric FAGUET

Figure 2. Numérisation SCAN 3D sur char robotisé dans le réacteur de Brennilis en 2016 (à d.) et de Saint-Laurent-des-Eaux (en haut) en 2011.

de support et d'intégrer les futures études de démantèlement.

Durant les années 2010, l'ensemble des réacteurs et bâtiments annexes nucléaires sous responsabilité de la DP2D verront eux aussi la création de leur jumeau numérique : Brennilis, Saint-Laurent A, Chinon A, Chooz A, Creys-Malville et la Base chaude opérationnelle du Tricastin. Parfois à l'aide de chars robotisés pour les zones le nécessitant depuis 2011 (figure 2).

Nous allons voir ici comment la DP2D et le BEI déploient ces techniques innovantes de mesure 3D au service des projets de déconstruction, quels sont les enjeux spécifiques et quelle est la place des géomètres dans ces projets hors norme.

Fessenheim : Le plus grand chantier de déconstruction pour un jumeau numérique 3D hors norme

Le 1^{er} décembre 2017, la décision d'arrêt définitif des réacteurs de Fessenheim 1 et 2 est prononcée.

Le Bureau d'études intégrateur sera l'un des premiers groupes d'ingénierie à intervenir afin de réaliser le jumeau numérique par scanner 3D et appareils photos panoramiques du bâtiment réacteur numéro 2 (BR2), alors à l'arrêt pour maintenance. Suivront le BR1 en 2019, puis l'ensemble de "l'îlot



nucléaire" (tous les locaux considérés en zonage radioprotection) en 2020 et 2021.

Un chantier réparti sur plus de 450 locaux différents. Avec des conditions d'intervention parmi les plus complexes possibles : risques anoxie, chimique, atmosphère explosive, grande co-activité de travaux, planning serré par les contraintes d'exploitation et, bien évidemment, gestion de la contamination et de la radioactivité nucléaire.

Avec l'ensemble de ces contraintes cumulées les réacteurs d'EDF font partie des lieux les plus complexes à numériser par les géomètres topographes. Aussi, les équipes d'EDF du site ont soigneusement préparé les activités et ont veillé à ce que le chantier de numérisation se passe en toute sécurité, sans aucun risque pour tous les intervenants, quels que soient les conditions et le danger, ce qui a demandé une grande organisation pour l'accès à tous les locaux en quelques semaines. Heureusement, le BEI et les sous-traitants géomètres et photo-



© Frédéric FAGUET

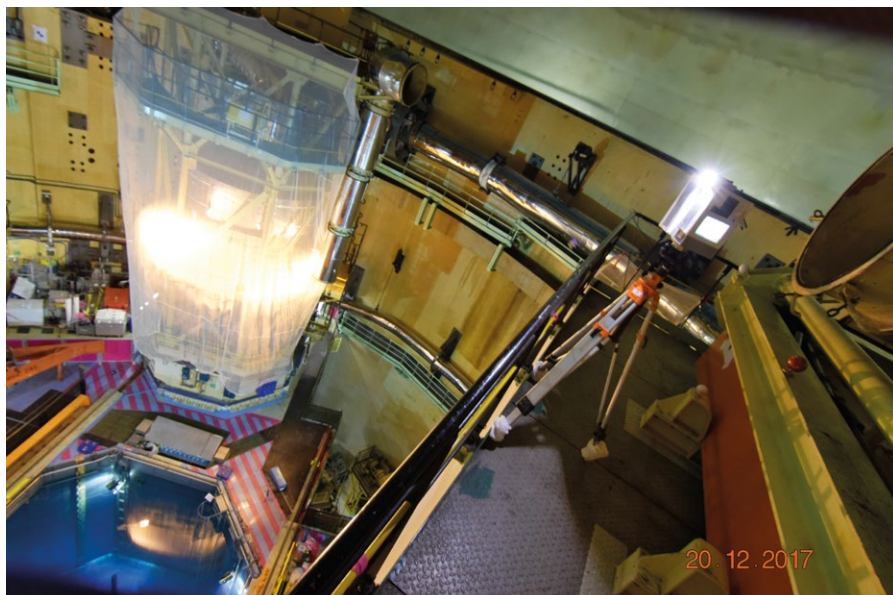
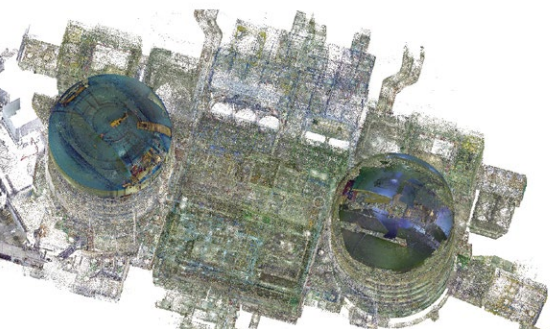


Figure 3. Du sous-sol jusqu'au sommet des générateurs de vapeur, les équipes de géomètres sont allées dans tous les lieux possibles.

graphes disposaient d'un grand retour d'expérience, car déjà sept bâtiments réacteurs avaient été entièrement numérisés depuis 2013 par les équipes de la maintenance nucléaire sur le parc en exploitation.

L'ensemble des bâtiments de l'îlot nucléaire représente au total un chantier plus de 5 000 points de vue scanner 3D en couleur (figure 3 et figure 4), autant de photos panoramiques de 450 millions de pixels chacune et plusieurs centaines de stations de tachéomètre pour la polygonale topographique. EDF prescrit (en moyenne) aux sous-traitants géomètres et photographes une densité de point de vue variable entre un tous les quatre mètres carrés pour les zones denses en maté-

Figures 4. Plus de 5 000 points de vue 3D colorisés et recalés dans le même référentiel géométrique 3D de plus de 200 m de longueur permettent d'analyser l'ensemble de la centrale nucléaire jusqu'au moindre détail.



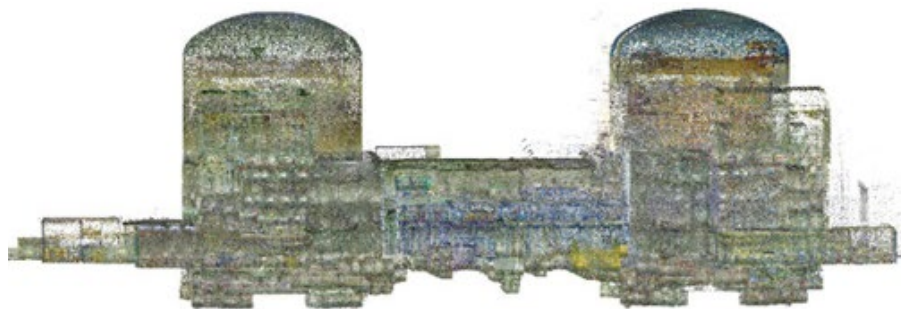
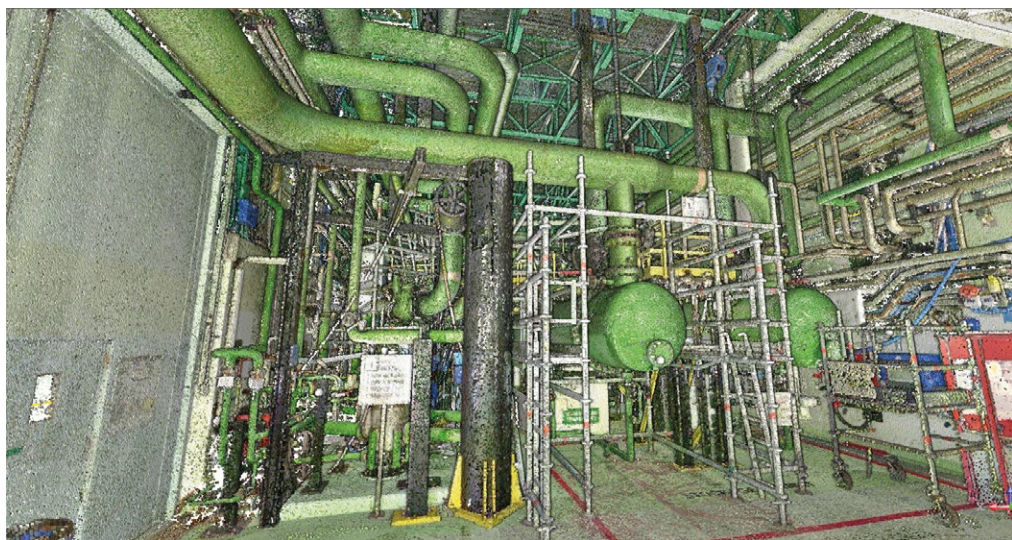
riel, tous les trente mètres carrés pour les locaux quasiment vides.

L'ensemble est évidemment recalé dans un seul système géométrique. Ceci a été possible en réalisant des polygones topographiques dans les règles de l'art, c'est-à-dire avec des centaines de stations topographiques en mode

centrage forcé (embase fixe sur trépied, alternant avec le prisme assurant une exactitude des mesures allers-retours inférieure au dixième de millimètre) ou en calcul de réseau (multitude de points fixes sur les murs avec toutes les stations topographiques en mode "station libre"), assurant *in fine* 1 à 2 cm maximum de tolérance d'erreur sur plusieurs centaines de scans 3D dans les mêmes bâtiments. Pour assurer la meilleure qualité topographique possible, des prismes coins cubes de métrologie (CCR 1,5 pouce, figure 5) sont utilisés dans l'ensemble des réacteurs sur des supports coniques, ce qui assure des résidus de recalage moyen topométrique largement inférieurs au millimètre.

Des photographies panoramiques très haute résolution pour de nombreuses utilisations

Au-delà du nuage de points 3D, dont l'analyse détaillée demande des compétences d'expert métier, l'usage des photographies panoramiques 360°

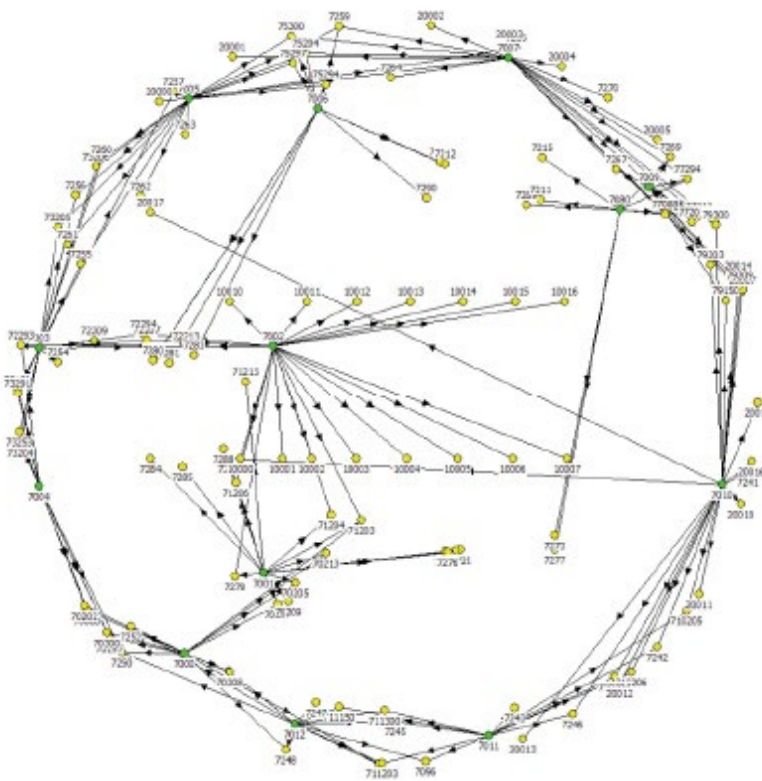


© Frédéric FAGUET



© Frédéric FAGUET

Figure 5. Utilisation de prismes CCR 1,5 pouce de métrologie à l'échelle du bâtiment entier pour le calcul précis du réseau de points 3D topographiques. À droite, un réseau de points au niveau 7 du BR2.



(capture photographique complète de la sphère autour de l'appareil photo, figure 6) s'est largement démocratisé chez EDF dans tous les corps de métier, sans besoin de compétences particulières. Le fait d'être maintenu en "vue bulle 360°" (point de vue fixé dans l'espace), permet à tous les non-initiés de la 3D de profiter d'une source d'information extrêmement riche (et bien plus précise graphiquement et qualitative que les appareils photos de base qui sont intégrés dans les scanners 3D), contrairement aux maquettes BIM dont l'usage requiert un minimum d'aisance dans un outil de navigation et visualisation 3D des données. Ainsi, à chaque position du

scanner laser, il est réalisé une prise de vue ultra haute définition de 450 millions de pixels (un équirectangulaire de 30 000 pixels de large x 15 000 pixels de haut, couvrant 360°) à l'aide d'appareils photos très haut de gamme (Canon, Nikon, Sony, figure 7) sur des tourelles robotisées. Le résultat est standardisé depuis 2015 et EDF demande une maîtrise parfaite des paramètres techniques aux photographes (lumière, mise en hyperfocale pour la netteté, plage de dynamique, couleur, bruit, géométrie...).

Le but est multiple : utilisation rapide en vue bulle, visite virtuelle détaillée, immersion en réalité virtuelle avec casque et exploitation des informations par intelligence artificielle. Bien évidemment, de la qualité initiale des photos découlent les performances des outils utilisés en aval. Par exemple, une excellente netteté à partir de 70 cm (et jusqu'à l'infini) est exigée afin de ne pas provoquer de malaise en réalité virtuelle et permettra une meilleure reconnaissance par IA des objets. Chaque photo est orientée par rapport au nord conventionnel et repérée en 3D dans l'espace par intelligence artificielle (ce qui permet d'éviter de faire réaliser ce travail répétitif par un technicien et de gagner du temps pour les opérateurs sur place), ce qui permet ensuite un couplage précis photo 360°-scanner 3D. Ces photos permettent la découverte des installations et locaux par les nouveaux arrivants sur le projet, l'analyse de l'état du génie civil, la nature des revêtements ou la lecture des caractères des étiquettes des matériels de 10 mm de hauteur jusqu'à cinq mètres de distance. Aujourd'hui, la DP2D possède plus de 15 000 photos panoramiques haute qualité de toutes ses installations, permettant à tous les corps de métiers d'EDF de se téléporter dans les installations.



© Frédéric FAGUET



Figure 6. Protection du matériel de photographie 360° pour les accès en fond de piscine du réacteur, réalisés en tenue étanche ventilée.



© Frédéric FAGUET

Figure 7. Acquisition de photos 360° très haute résolution de 450 Mpx.

Une démarche de veille technologique et d'innovation continue

Tous les cinq ou six ans, les ingénieries d'EDF réalisent des cas tests techniques sur bancs de tests afin d'analyser les meilleurs matériels (photo 360° et scan 3D) et les méthodes de pointe des meilleures entreprises existantes, afin de mettre à disposition les données les plus qualitatives possibles avec des coûts maîtrisés. Le dernier cas test explorait quatre sujets :

- le scan 3D terrestre classique de haute qualité ;
- le scanner 3D portable ;
- la photographie 360° de haute qualité ;
- la photographie 360° rapide (moins de 10 secondes par prise de vue).

Pour le scan 3D, un banc de mesure spécial a été conçu par la R&D. Celui-ci dispose de différentes surfaces très foncées et mates, ou d'autres très brillantes et réfléchissantes pour tester les limites de bruits de mesure. Des tuyauteries verticales, horizontales et de diamètres variés sont présentes afin de tester les limites de résolution. Une position obligatoire est imposée à tous les géomètres testés, et les autres positions sont libres. Le nettoyage du nuage de points en condition de surfaces très réfléchissantes est aussi une épreuve très discriminante pour choisir les bons partenaires.

lantes et réfléchissantes pour tester les limites de bruits de mesure. Des tuyauteries verticales, horizontales et de diamètres variés sont présentes afin de tester les limites de résolution. Une position obligatoire est imposée à tous les géomètres testés, et les autres positions sont libres. Le nettoyage du nuage de points en condition de surfaces très réfléchissantes est aussi une épreuve très discriminante pour choisir les bons partenaires.

Pour la photographie, un banc de test a été réalisé avec des mires graphiques et colorimétriques qui sont disposées à des distances fixes. Des étiquettes standards de matériel EDF sont disposées de 50 cm jusqu'à 6 m de distance afin d'apprécier les possibilités de lecture. Des zones de la scène sont volontairement très sombres et d'autres très claires pour tester la dynamique ou le bruit, et des éclairages sont en contre-jour pour tester le phénomène de *flare* (voile ou halo lumineux) sur les diffé-

rents objectifs. Les temps de prises de vue sont mesurés, pour en déduire l'efficacité et le coût potentiel des différentes méthodes. Par exemple, quel est le bon ratio pour photographier les 360° entre nombre de positions de tourelle et la focale utilisée ? Quels seront les résultats en termes de champ de netteté et de résolution à 5 m ? Quelle valeur utiliser pour le diaphragme pour avoir une bonne netteté à courte portée, sans trop augmenter le temps de mesure ? Doit-on forcément travailler en RAW avec post-traitement et des quantités de données très lourdes ou peut-on travailler directement en JPEG ? Quel *bracketing*¹ d'exposition utiliser pour une belle image de haute dynamique ? Doit-on utiliser des éclairages additionnels de type anneaux embarqués, ou plutôt disposés dans la scène à photographier ?

Autant de questions pour lesquelles EDF connaît aujourd'hui les réponses. Par exemple, ces nombreux tests et recherches ont permis de confirmer nos choix technologiques sur l'usage de certaines marques de matériels, ou sur certaines méthodes. Quatre scanners 3D différents et quatre appareils photos ont été testés sur des bancs de test et des exigences identiques, ce qui représente un jeu de données de grande valeur. EDF a aujourd'hui trouvé et largement affiné ses standards en termes de ratio qualité-prix pour l'imposer à ses titulaires géomètres et photographes tout en s'adaptant aux compétences disponibles, car nous restons sur de l'exigence de résultats et non de méthodes.

La visite virtuelle des locaux pour tous

Toutes ces données photos et scanner 3D sont concaténées dans un seul logiciel : *MySurvey de Cyclife Digital Solutions* (CDS), filiale d'EDF. Ce logiciel permet à tout utilisateur de prendre des cotes dans les nuages de points, de profiter très rapidement des photos en haute définition, de naviguer sur les plans, d'insérer des données 2D/3D et

¹Technique de prise de vue qui consiste à réaliser plusieurs clichés d'une même scène en faisant varier un ou plusieurs paramètres.





des liens dans les propriétés des objets. Les plans de l'intérieur des locaux sont corrigés si besoin, afin d'être les plus fidèles à la réalité possible. Cette visite virtuelle est mise à disposition de tous les acteurs et même lors des appels d'offres, il s'agit d'une donnée d'entrée numérique aujourd'hui largement utilisée en entreprise étendue.

Les maquettes 3D BIM TQC pour aller plus loin que les nuages de points et la photographie

Un des grands défis de la DP2D est la quantification et la caractérisation des déchets à évacuer de ses installations en démantèlement. Mais à partir des photos et des scans 3D, il est difficile d'estimer des masses de matériaux. Lorsque ces technologies ne suffisent pas, la meilleure solution est de faire du BIM en 3D pour répondre à ces besoins. Chaque déchet a un coût de traitement (cent fois plus cher pour du nucléaire que du conventionnel), qui doit être prévu le plus tôt possible dans les budgets des projets. *A contrario*, certains déchets conventionnels peuvent rapporter de l'argent en les recyclant. Par exemple, le BEI réalise des prototypes d'inventaires des quantités prévisionnelles de cuivre et d'aluminium des bâtiments électriques, qui pourront être revendues pour autofinancer une partie du démantèlement. Ainsi, chaque chemin de câbles est modélisé en largeur et longueur, et diverses métadonnées sont enregistrées dans chacun d'entre eux : taux de remplissage, numéro d'identification, nature (HTA, BT, signal...) matière (aluminium, cuivre). Ainsi, les bases de données théoriques sont corrigées et les quantités de métaux précieux et valorisables sont estimées à l'avance avec des données conformes à l'exécution (CAE), *figure 8*.

La reconstruction complète de maquettes 3D BIM, réalisée aussi par notre filiale *Cyclife Digital Solutions* (CDS), permet bien d'autres avantages : formation aux nouveaux arrivants, compréhension générale de l'architecture de l'installation en "vue d'aigle" (contrairement aux vues bulles de la

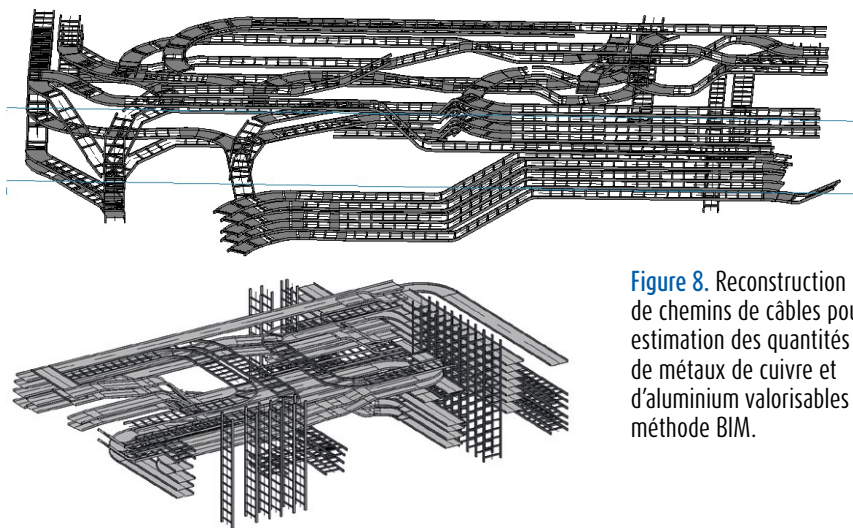


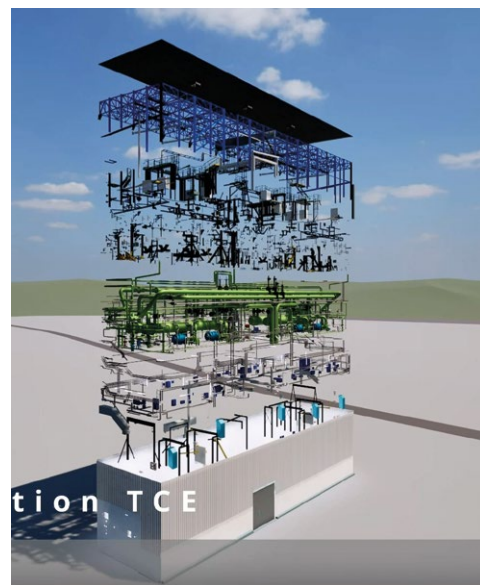
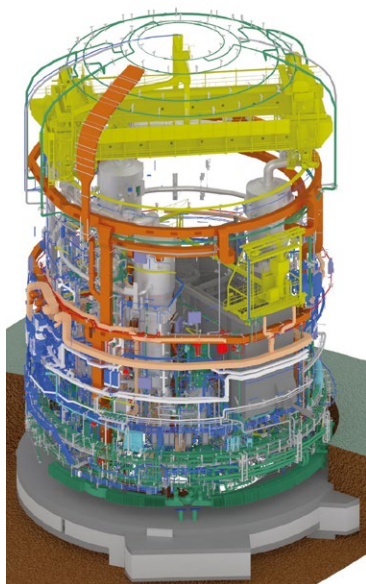
Figure 8. Reconstruction de chemins de câbles pour estimation des quantités de métaux de cuivre et d'aluminium valorisables par méthode BIM.

visite virtuelle), inventaire même des zones inaccessibles (modélisées suivant les plans), intégration d'études, export dans des logiciels de réalité virtuelle comme *Unity* ou *Unreal Engine*, utilisation pour la communication, etc. Chaque élément est rangé en discipline (génie civil, menuiserie, tuyauterie, ventilation, électricité, autre) et en catégorie de familles. Géométriquement, la reconstruction est réalisée avec une tolérance de 5 cm par rapport aux nuages de points afin de permettre

d'éventuelles études dimensionnelles d'encombrement (*figure 9*).

La réalité virtuelle dans les nuages de points pour s'immerger dans la 3D

Depuis 2018, le bureau d'études élabore l'intégration des données de la DP2D dans les technologies d'immersion via les casques de réalité virtuelle et les lunettes de réalité augmentée (*figure 10*).



© Frédéric FAGUET

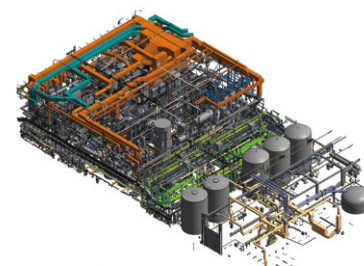


Figure 9. Vue des modèles BIM complets du réacteur et du bâtiment des auxiliaires nucléaires.



© Frédéric FAGUET

Figure 10. 2018, premières études d'immersion dans les grandes bases de données de photos 360°

Après avoir testé de nombreuses solutions et avoir étudié les diverses possibilités lors de différents salons (Laval Virtual 2018 et 2019), un constat était clair. Les photos offrent un très grand réalisme, mais pas de déplacement en 3D, les reconstructions de maquettes 3D sont longues et coûteuses et n'offrent que très peu de réalisme et il n'existait pas de solutions pour s'immerger en nuages de points colorisés à l'époque.

En collaboration avec EDF, notre filiale *Cyclife Digital Solutions* a donc créé le logiciel VISU (figure 11), solution de

réalité virtuelle innovante qui permet de s'immerger dans les nuages de points 3D avec un grand réalisme. Les avantages sont le travail collaboratif pour la revue de conception entre personnes sur des sites distincts, l'intégration des données d'études dans les maquettes TQC, la possibilité d'accéder physiquement aux détails de l'infrastructure qui sont inatteignables dans la réalité. Un module donne aussi la possibilité de réaliser des études de manutention, d'ajout, de déplacement et d'enlèvement d'équipements en immersion totale. Ceci évite les coûts et les délais de mise à jour des études et permet une analyse au plus tôt des interférences à venir.

L'intelligence artificielle pour repérer les photos et sémantiser les grandes quantités de données

La numérisation des sites industriels produit de grandes quantités d'informations qui sont proportionnelles à la taille des installations, ainsi qu'à la définition des capteurs en constante augmentation.

Elles ont malgré tout un grand défaut : elles ne sont pas sémantisées. Un pixel reste un pixel, et un point 3D sur un tuyau ne nous dit pas le fluide en circulation ou la fonction desservie, s'il est en acier brut ou en acier inoxydable ou si sa peinture contient de l'amiante. D'autre part, comment retrouver et localiser un équipement parmi des milliers dans ces centaines de locaux ? On pourrait utiliser les bases de données existantes de la maintenance. Celles-ci ne sont détaillées que jusqu'au niveau du local, et peuvent comporter des omissions volontaires de certains matériels qui ne sont pas soumis à maintenance régulière (chemin de câbles, chatières, trémies, portes...), car ces bases de données n'ont pas été créées pour le démantèlement, mais pour l'exploitation du site. Dans un local, on peut retrouver parfois une centaine d'équipements.

C'est là que les performances des IA développées par EDF R&D peuvent être déployées par l'ingénierie : les dizaines de milliers de photos panoramiques et autant de nuages de points 3D sont un terrain de jeu parfait pour tirer du gain projet sur la sémantique de ces données. L'ensemble du développement de ces méthodes est exposé dans le



Figure 11. *Cyclife Digital Solutions* - Logiciel VISU de *Cyclife Digital Solutions* qui permet les études en immersion dans des nuages de points 3D.

© Frédéric FAGUET

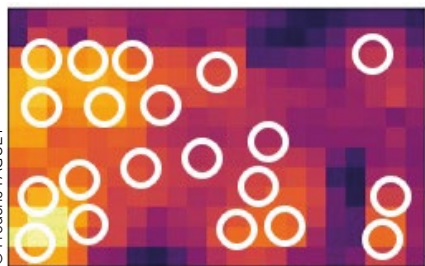


Figure 12. Recherche automatique des positions des photos 360° dans un local rectangulaire, vue de dessus.



Figure 13. Matériels issus d'une photo panoramique très haute définition d'un local de la centrale de Fessenheim - Les rectangles verts montrent la détection des textes par ALBERT.



XYZ n° 126 "Enjeux de l'IA pour l'aide à la modélisation 3D d'intérieur d'installation industrielle tel que construit et leur exploitation en réalités virtuelle et augmentée" et sont aujourd'hui industrialisées par les différentes ingénieries EDF.

Une première IA, ESTIPOSE, permet de trouver le centre d'une image 360° à quelques centimètres près, et son orientation à quelques degrés près dans un nuage de points (figure 12).

Une deuxième IA : ALBERT, qui permet de retrouver les "repères fonctionnels" (étiquette plaque d'im-

© Frédéric FAGUET

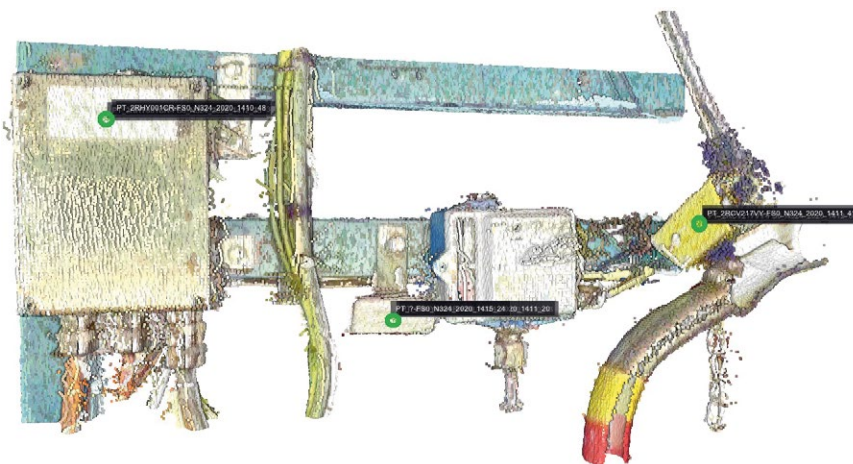


Figure 14. Détections d'ALBERT en 3D sur le nuage de points dans le logiciel 3D. Les coordonnées projetées sont très précises malgré la petite taille des étiquettes (environ 5 cm x 10 cm).

matriculation d'un matériel) dans une photo de 450 millions de pixels. Déployée depuis 2018 progressivement dans les ingénieries d'EDF, cette IA détecte tous les textes dans une photo 360° et les géolocalise en "coordonnées pixel" par rapport aux angles de l'image (figure 13).

En connaissant les coordonnées 3D du centre, ainsi que les coordonnées en pixel d'un texte dans une image orientée, un simple algorithme permet de projeter les coordonnées 2D sur le nuage de points et ainsi, chaque repère fonctionnel se retrouve positionné sur l'étiquette en 3D (figure 14). Près de 30 000 repères géo-fonctionnels de matériels ont été ainsi mis à disposition dans l'îlot nucléaire de Fessenheim, permettant à chacun, dans la visite virtuelle ou dans la maquette 3D, de retrouver un équipement en trois clics et sans compétences spécifiques

(figure 15). Auparavant, les équipes étaient dépendantes du savoir des "anciens" qui connaissaient d'expérience où est la petite vanne cachée derrière la pompe au fond d'un local, ou devaient chercher des heures dans les locaux en comparant les installations avec les plans, schémas isométriques ou mécaniques...

L'IA sur les photos n'en est qu'à ses débuts. Par exemple, des tests avec une troisième IA sont en cours pour détecter et supprimer automatiquement les équipements de sécurité (caméra, détecteur de présence...) parmi les centaines de milliards de pixels d'une campagne de photos d'un bâtiment. Une autre utilisation est le respect de la réglementation RGPD : le floutage automatique des visages afin de ne plus le faire manuellement, même si le personnel n'est que très rare sur les images. Nous envisageons aussi de

© Frédéric FAGUET

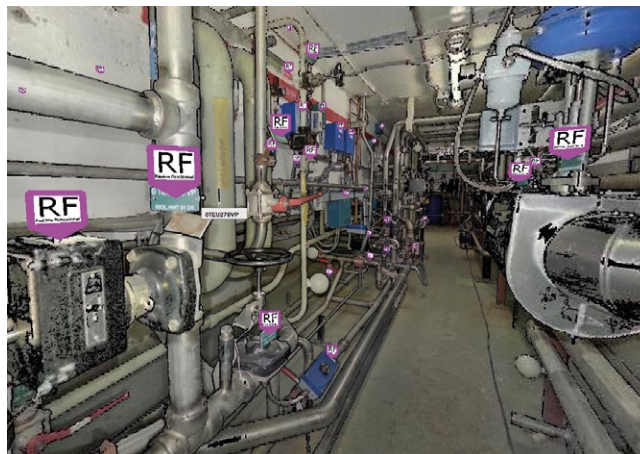
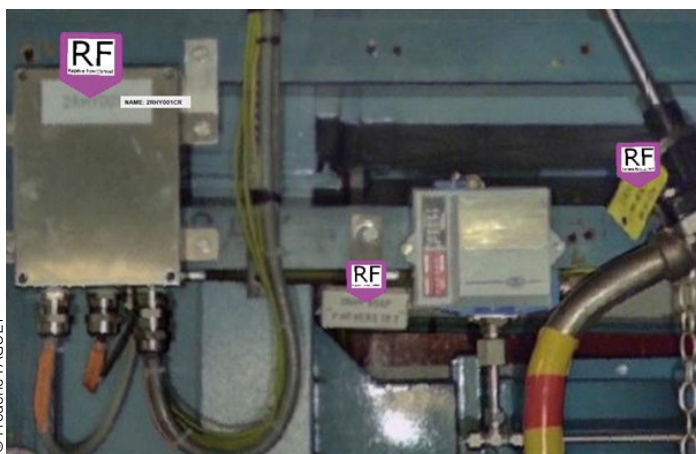


Figure 15. Résultats insérés dans la visite virtuelle MySurvey. À l'aide d'une barre de recherche, l'utilisateur peut trouver un matériel parmi plusieurs dizaines de milliers sans connaître l'installation.



détecter sur les photos panoramiques n'importe quels petits équipements qui seraient difficiles à trouver : détecteur incendie, petit coffret électrique, joint amianté, détecteur, piquage sur tuyauteries...

L'ingénierie teste aussi une quatrième IA qui permet la segmentation automatique des nuages de points selon leur classe (porte, mur, tuyaux, chemin de câbles, armoire électrique, structure métallique, escalier, etc.) dans le but d'inventorier, d'analyser une seule catégorie de matériel, ou de gagner du temps sur la segmentation manuelle pour la reconstruction 3D des maquettes BIM. Cette IA est en cours d'évolution et permettra sans doute des gains de temps importants dans les années à venir.

Le défi de la mise à jour des données par les technologies d'acquisition "rapides" 2D et 3D

Aujourd'hui, les technologies "statiques" classiques pour créer de grands jumeaux numériques sont maîtrisées par EDF et ses sous-traitants. Quasiment tous les paliers technologiques de réacteurs disposent d'un jumeau en nuage de points, de milliers de photographies haute résolution disponibles, ainsi que d'une maquette 3D conforme à l'existant. L'usage de ces données permet, par exemple, de baisser les coûts lors des visites de chiffrage des futurs chantiers. Une demande de trois semaines de visites de l'installation se transforme en trois jours de visites physiques (et le reste avec jumeau numérique), ce qui a permis l'économie de plusieurs dizaines de milliers d'euros sur la centrale démantelée de Chooz A. L'ingénierie nucléaire du parc en exploitation, basée à Marseille, envisage même de photographier à 360° l'intégralité des locaux nucléaires (environ un million de m² d'installations) en France d'ici 2030. Bien que cela représente déjà un défi formidable, il ne faut pas ignorer celui encore plus grand qui arrive par la suite : le défi de la mise à jour de ces données.

Le démantèlement d'une installation nucléaire comme Fessenheim est

estimé aujourd'hui à cinq ans pour la phase de "fin d'exploitation" et quinze ans pour la phase de démantèlement. Toutefois, certaines installations plus complexes sont arrêtées depuis plusieurs dizaines d'années. Ces délais imposent un suivi de l'installation réelle par le jumeau numérique qui doit se mettre à jour dans une certaine mesure afin de rester utilisable et de ne pas se déprécier au fil du temps. S'il n'est pas mis à jour, il devient en quelques années obsolète, et n'a plus qu'un faible intérêt en dehors de la communication visuelle, ce qui représenterait une perte substantielle de capitaux investis par EDF. En effet, bien que les photos nous téléportent géographiquement, elles nous emmènent aussi temporellement dans le passé. Quel projet nucléaire prendra le risque d'utiliser des données obsolètes pour concevoir un nouvel équipement ? Une photo ou des maquettes BIM d'il y a cinq ou dix ans sont-elles toujours valables ? Et donc, comment éviter de ne pas refinancer régulièrement des numérisations complètes d'installations ?

Le défi réside donc dans le suivi précis de l'évolution des installations. Comment savoir finement ce qui se passe sur les sites industriels, étant donné qu'il est possible que des travaux ne se passent pas comme prévu, et que plusieurs ingénieries modifient le même site ? Comment savoir ce que l'exploitant a fait réaliser comme petites modifications locales qui sont parfois nécessaires en urgence pour la sécurité ? Comment surveiller la qualité de la livraison des plans conformes à exécution livrés par un titulaire de commande qui a installé de nouveaux équipements ?

La DP2D a travaillé à la mise en place d'un processus de suivi avec les exploitants qui fourniraient régulièrement la liste des locaux à renumériser et à rephotographier. Ceci permettra d'analyser l'impact, puis potentiellement de mettre à jour la visite virtuelle ainsi que la maquette BIM, mais aussi, au-delà du BEI, les données de conception de toutes natures (GC, environnement, déchet, sûreté, électricité, systèmes...). Cela étant fait, doit-on appliquer les mêmes technologies très haut de gamme qui nécessitent beaucoup de

compétences actuellement externalisées pour faire de petits états des lieux de quelques locaux ? Doit-on prendre le temps de consulter plusieurs entreprises externes pour de petits travaux ? Pendant ce temps, la veille technologique permanente des équipes du BEI, ainsi que de R&D et des géomètres d'EDF (DTG) ont permis de suivre l'évolution des technologies SLAM (*Simultaneous Locating And Mapping*) ainsi que des petites caméras 360°. En 2021, ces technologies sont assez matures et le choix est fait d'internaliser les compétences. L'idée est d'envoyer toujours deux personnes du bureau d'études pour réaliser la nouvelle acquisition de données sur le site, permettant ensuite les mises à jour des visites virtuelles et des maquettes 3D. Ce fonctionnement en binôme permet une meilleure montée en compétence, une transmission des savoir-faire plus rapide et une sécurité accrue sur le terrain, ainsi que la création de liens renforcés dans l'équipe.

Deux appareils sont choisis par le BEI : un appareil photo qui capture des images de 130 Mpx sur 360° en deux secondes et un scanner à main portatif SLAM.

Dans de bonnes conditions, l'appareil photo 360° permet de réaliser jusqu'à 300 photos panoramiques de 130 mégapixels par jour ou plus de 40 par heure (les experts photographes des sociétés externes dépassaient difficilement 100 photos par jour sur les tourelles robotisées, mais pour de meilleures images). Ce nouveau standard est toujours de bonne qualité, permettant tout de même de lire des caractères de 10 mm jusqu'à 2 m de distance, mais le traitement est beaucoup plus rapide : seulement 20 secondes automatisées pour la fusion de 25 capteurs pour réaliser une image équirectangulaire de 130 mégapixels (une image équirectangulaire est un rectangle de proportion 2:1, couvrant 360° x 180°. Il s'agit du standard pour les photos panoramiques).

Le scanner portatif permet aussi de couvrir des milliers de mètres carrés chaque jour, ce qui était impossible avec les technologies statiques. D'autre part, en scannant le long d'une trajec-





toire et non pas avec des points isolés tous les 3 m, nous avons remarqué que de nombreux détails supplémentaires apparaissent et que les zones d'ombres du nuage de points sont drastiquement réduites. Au-delà des mises à jour, d'autres possibilités sont offertes par ces nouveaux appareils grâce à la suppression du trépied :

- Facilité d'acquisition des données :
 - au fond de puits de plusieurs mètres (figure 16),
 - dans des équipements de type réservoir,
 - à travers des carottages réalisés initialement pour des inspections télévisuelles par caméras classiques,
 - à travers des "trous" dans des bardages pour atteindre des lieux inaccessibles,
 - au-dessus des chemins de câbles les plus hauts, à l'aide de perches, pour aller chercher des détails cachés.
- Des baisses de coûts pour obtenir toujours une garantie de "gains projet" dans les affaires de moindre enjeu, en dehors des zones nucléaires par exemple. Là où les technologies de haute précision n'étaient pas justifiées par un manque de retour sur investissement, les technologies d'acquisition rapide sont ici plus rentables ;
- Des baisses de dose radioactive pour



© Frédéric FAGUET

Figure 16. Capture de données 2D et 3D au fond d'un puisard de 4 m.

les équipes : avec la simplicité de mise en œuvre, des numérisations 3D dans les zones les plus irradiantes sont envisagées à Fessenheim pour les mois à venir, qui étaient trop coûteuses avec les méthodes statiques historiques.

En 2024, le BEI a déjà réalisé 6 000 photos panoramiques "rapides" de 130 millions de pixels et a déjà réalisé des mises à jour de maquette 3DTQC.

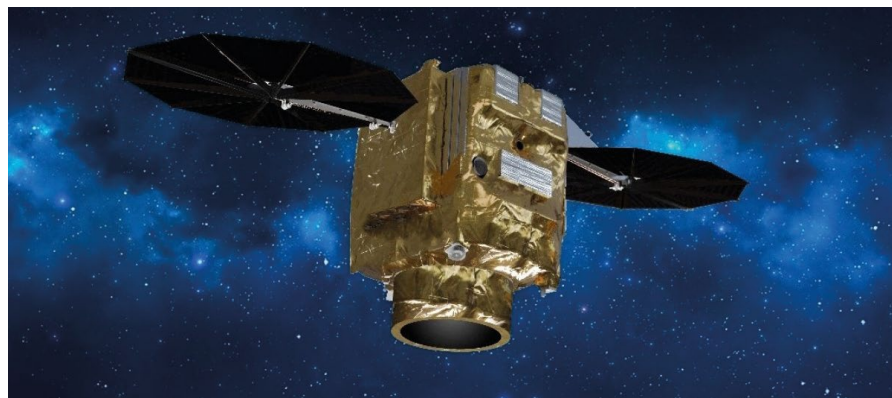
Les photos satellites plutôt que les avions ou les drones

Depuis 2015, EDF fait réaliser des photogrammétries 3D par avion de ses sites nucléaires. La compétence a été transmise dernièrement à l'ingénierie conventionnelle située à Tours. Tous les cinq ans environ, sera réalisée une photogrammétrie 3D complète avec des vues obliques pour en obtenir un maillage 3D colorisé d'une précision graphique de quelques centimètres, et une précision 3D d'environ 30 cm. Cependant, pendant cinq ans ou plus, le site industriel peut parfaitement évoluer : construction ou démolition de bâtiments, aménagement d'aire d'entreposage, modifications diverses des voiries ou du canal, etc. De la même manière qu'à l'intérieur des locaux, les projets identifient le risque d'utiliser des données obsolètes et demandent des mises à jour à moindres coûts par le bureau d'études. Le défi de la mise à jour concerne toutes les données de toutes natures.

Une dernière innovation de la DP2D concerne la mise à jour des plans de masse (vue aérienne). Ces corrections étaient historiquement réalisées par des géomètres qui se déplaçaient sur

le terrain, puis plus récemment, par des prestations de photos aériennes par avion, mais qui ont un certain coût de plusieurs milliers d'euros. Afin de réaliser des mises à jour annuelles en baissant les coûts, nous avons envisagé d'acheter un drone permettant de réaliser régulièrement des ortho-images. Mais pour accélérer le processus, nous avons exclu de le faire réaliser en prestation externe. Mais même en réalisation interne EDF, cela posait plusieurs difficultés : allers-retours supplémentaires dans chaque centrale, des compétences de pilote de drone à maintenir pour moins de dix vols par an, de l'achat et entretien de matériel, des autorisations complexes de survol de site nucléaire à faire valider par la sécurité des sites et par la Direction générale de l'aviation civile (DGAC). Ces difficultés nous ont poussés à continuer à chercher d'autres solutions.

C'est là qu'est venue l'idée : chaque jour, des dizaines d'appareils photos passent au-dessus des sites nucléaires sans aucun besoin d'autorisation, mais à 620 km d'altitude. Nous avons donc pris contact avec Airbus Défense & Space, afin d'acheter des photos satellites. Évidemment, celles-ci sont floutées sur les sites sensibles pour le grand public, mais pas pour le propriétaire de l'installation en question. Airbus a donc réalisé pour nous une demande de dérogation auprès du Secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN) et le BEI a été habilité à recevoir et utiliser des photos satellites des sites nucléaires. Airbus nous a mis à disposition des photographies GeoTIFF *pan-sharpened* (fusion d'une image de haute résolution noire et blanche



© AIRBUS

Figure 17. Satellite Pléiade NEO d'AIRBUS Défense & Space de résolution 30 cm.



© Frédéric FAGUET

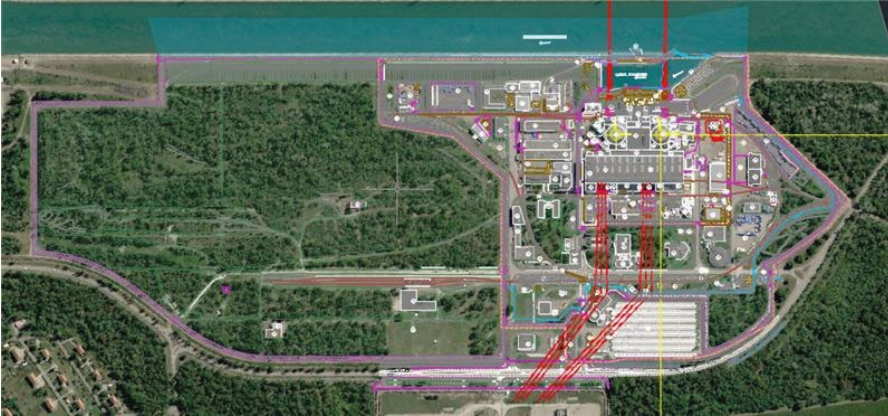


Figure 18. Superposition de la photo satellite au plan de masse de référence pour correction et mise à jour. de résolution 30 cm avec une image multispectrale colorisée de résolution inférieure pour obtenir les avantages des deux capteurs), issue des satellites de la constellation Pleiade NEO.

Les satellites "Pleiade NEO" (figure 17) sont les descendants des célèbres SPOT. Ils ont une résolution de 30 cm au sol, avec des fauchées de 20 km de large en orbite héliosynchrone. Ce type d'orbite garantit que deux photos d'un même point du globe sont toujours prises à la même heure de la journée, ce qui permet des comparaisons photographiques sans devoir prendre en compte les différences de lumière ou d'ombre au-delà des différences dues à la saison.

Une fois la photo reçue, les géomaticiens d'EDF recalent automatiquement l'image dans le bon système de coordonnées du SIG, (photos livrées en WGS84, UTM 32N pour Fessenheim à l'est de la France) et il suffit de superposer le plan de masse (figure 18) en coordonnées locales pour analyser les différences significatives et réaliser la mise à jour.

Bilan : les temps et les coûts sont divisés par dix par rapport aux autres méthodes. Ces coûts sont moins importants qu'un aller-retour en train Lyon-Mulhouse. Cela n'empêche pas que des photogrammétries bien plus précises seront toujours réalisées quand cela sera nécessaire, mais la DP2D s'assure d'avoir une image à jour régulièrement pour des coûts extrêmement faibles, ce qui permet de diminuer le risque des projets d'utiliser des données erronées avec des éléments manquants ou mal placés sur le plan. D'autre part, de nouveaux satellites ou de nouveaux

traitements informatiques (comme le sur-échantillonnage par IA à 15 cm de résolution, qui permet un confort d'utilisation supérieur, bien que n'étant qu'une interpolation) arrivent rapidement et vont se rapprocher très bientôt des photos d'avion. La DP2D s'assure ainsi d'être en avance sur l'utilisation de ces nouvelles technologies et de les intégrer dès maintenant dans ses processus et sa culture technique.

Témoignage du client

"Le démantèlement des deux réacteurs de Fessenheim est un projet de grande ampleur qui mobilise plus de cent ingénieurs (sans compter les sous-traitants) pour réaliser les études. Les développements du BEI permettent un gain de temps et de fiabiliser les études. Aujourd'hui, il ne nous semblerait plus envisageable de réaliser des études de démantèlement sans les outils numériques."

Vincent Champouillon, directeur technique du projet Fessenheim.

Conclusion

Le numérique est devenu un levier prioritaire chez EDF. Tous les corps de métier sont concernés, et les bureaux d'études de chaque ingénierie d'EDF sont à l'avant-garde de la révolution digitale. Les topographes d'EDF se sont bien saisis des nouveaux outils, ont déjà changé la profession et restent les garants de la bonne utilisation des nouvelles technologies. À la DP2D, l'usage du numérique est démocratisé. Les processus de mise à jour à coûts raisonnables sont déjà en place pour les données photos et 3D. D'ailleurs, le BEI recrute un nouvel ingénieur géomètre.

Si nos réalisations vous intéressent, ce sera un plaisir de vous rencontrer ! N'hésitez pas à aller sur EDF recrute. ●



Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Mael Le Ber et Mickael Beal qui rendent l'innovation possible au service de la performance.

Contacts

Frédéric FAGUET - EDF Géomètre topographe, ingénieur génie nucléaire référent jumeaux numériques - frederic.faguet@edf.fr

Jean-Baptiste LARANGE - EDF Ingénieur méthodes et outils CAO jean-baptiste.larange@edf.fr

ABSTRACT

Within the EDF group, the Deconstruction and Waste Projects Department (DP2D) is engaged in its largest project: the decommissioning of the Fessenheim nuclear power station. For the design office team, this is an opportunity to make maximum use of 2D and 3D capture technologies, artificial intelligence and digital twins at the service of the industry in order to get a maximum of benefits. AI, BIM (Building Information Management), virtual and augmented reality methods allow the exploitation of large quantities of data. Beyond the creation of very high fidelity digital twins, the question of their updating is crucial. How can we guarantee users 2D and 3D data that is always as close to reality as possible with reasonable budgets? This for 11 nuclear reactors, spread over 8 sites throughout France? In this article, we will see how the team of the Integrative Design Office (BEI) of the Deconstruction and Waste Projects Department (DP2D) of EDF puts into practice internal innovations or that of EDF Saclay R&D about plans, panoramic photos, 3D point clouds, and 3D models. From mechanical diagrams to satellite photos, including SLAM and BIM, the BEI regularly innovates to get lower costs, improve data quality or accelerate schedules for the benefit of EDF decommissioning projects.