



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



# Ci2ANum, des jumeaux numériques pour les centres de l'Aube

## Retours d'expériences





# Préambule

Les technologies numériques, et en particulier les jumeaux numériques, ouvrent des perspectives inédites à la filière nucléaire. Ils permettent de créer des répliques virtuelles dynamiques et évolutives des installations et des processus, et vont certainement transformer profondément les méthodes de conception, d'exploitation, de maintenance et de démantèlement des sites comme les centres d'exploitation de l'Andra dans l'Aube.

Ce document est un premier retour d'expérience sur le potentiel des jumeaux numériques, et sur les opportunités qu'ils offrent pour optimiser la performance, renforcer la sûreté, et améliorer la prise de décision tout au long du cycle de vie des sites de l'Andra.

Au-delà des promesses, il aborde également les enjeux critiques liés à l'implémentation des jumeaux numériques, la structuration et la gestion des données, et l'intégration avec les systèmes existants.

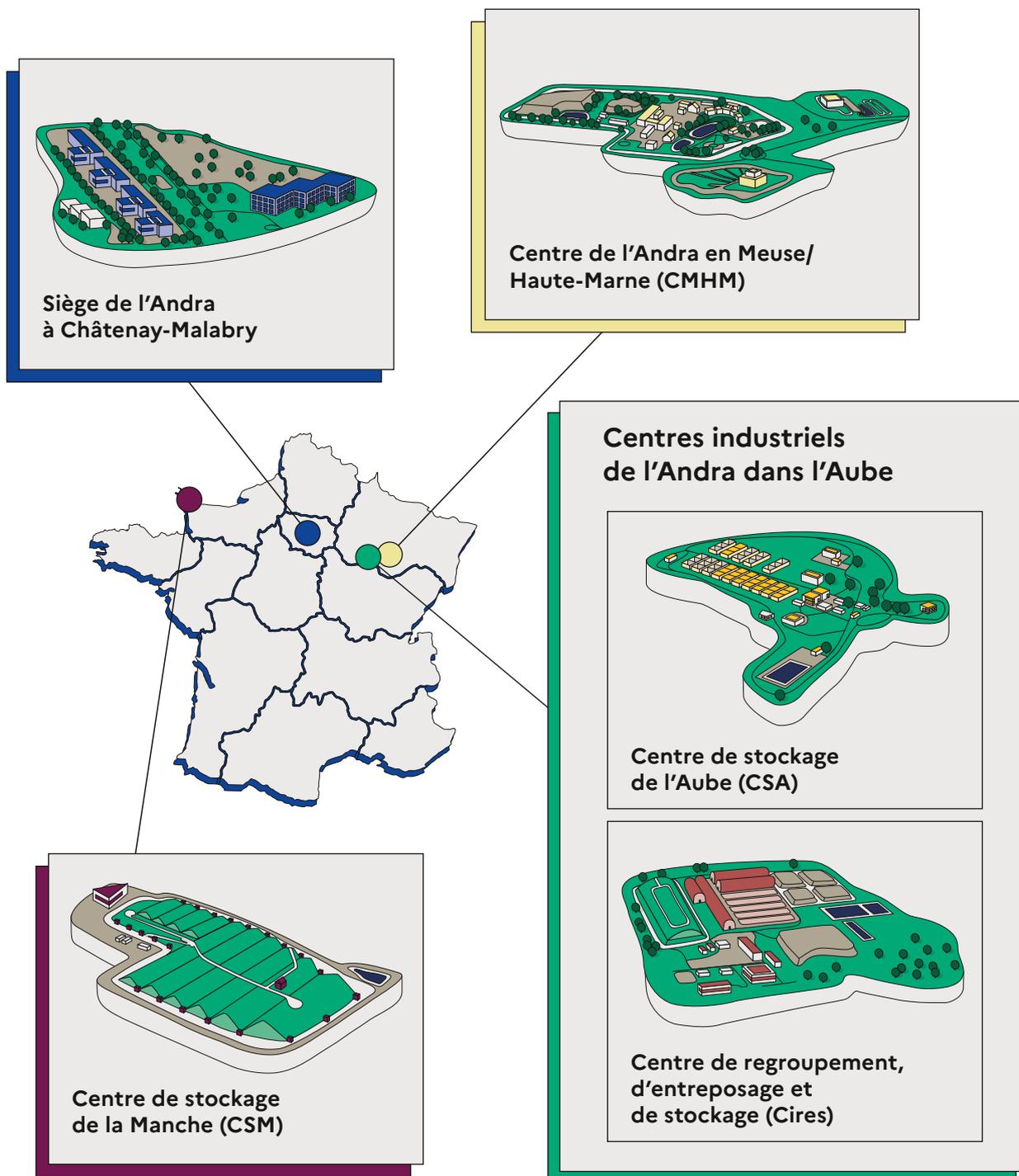
En nous appuyant sur des cas d'usages, des témoignages d'experts et d'utilisateurs, nous souhaitons offrir une vision claire et nuancée de ce que le jumeau numérique peut apporter à des sites en exploitation. Que vous soyez un acteur du secteur ou un observateur intéressé, nous espérons que ce document saura éclairer vos réflexions et inspirer vos actions.

**Sylvain Guilloteau, ingénieur jumeaux numériques à l'Andra**  
**Brice Roffino, chef de projets Assystem**

# L'Andra

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs est un établissement public à caractère industriel et commercial placé sous la tutelle des ministères en charge de l'Énergie, l'Environnement et la Recherche.

Au 31 décembre 2023, elle employait 720 salariés répartis sur plusieurs sites.



Pour en savoir plus  
[andra.fr](http://andra.fr)

<b>01.</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>p. 4</b>
	Le mot de Patrice Torres, directeur industriel et des activités du Grand Est (DIGE)	p. 5
	Le projet	p. 6
	Le consortium	p. 10
	Enjeux et défis actuels de l'exploitation des sites	p. 11
<b>02.</b>	<b>Industrie 4.0 et Jumeaux numériques: une vision partagée appliquée au projet Ci2ANum</b> .....	<b>p. 12</b>
	L'industrie 4.0	p. 13
	Les jumeaux numériques	p. 14
<b>03.</b>	<b>Application à l'exploitation des centres de stockages de l'Andra dans l'Aube</b> .....	<b>p. 17</b>
	Le recueil des besoins	p. 18
	Témoignages partagés	p. 19
<b>04.</b>	<b>Retours d'expériences techniques ...</b>	<b>p. 29</b>
	Structuration de la donnée	p. 30
	Les cas des hyperviseurs	p. 31
	Viewer 3D/portail 3D	p. 32
<b>05.</b>	<b>Extraits des fiches des cas d'usages</b> .....	<b>p. 33</b>
	Formation des opérateurs	p. 34
	Simulation du remplacement du malaxeur du CSA	p. 35
	Scan to BIM du Centre de stockage de l'Aube	p. 36
	Un hyperviseur pour le suivi des contrôles colis	p. 37
	Démonstrateur BIM-SIG d'accès à la donnée 3D	p. 38
<b>06.</b>	<b>Conclusion et perspectives</b> .....	<b>p. 39</b>
	Synthèse des résultats	p. 40
	Défis à relever et opportunités futures	p. 41

# 01. Introduction



# Le mot de Patrice Torres, directeur industriel et des activités du Grand Est (DIGE)

L'une des spécificités de la mission confiée à l'Andra, à savoir gérer de façon sûre les déchets radioactifs, est sans aucun doute la responsabilité qui nous incombe sur le temps long.



**Patrice Torres**  
Directeur industriel  
et des activités du Grand Est  
chez l'Andra

La prise en compte de l'impact de nos activités sur les générations actuelles et également futures nous oblige donc sans cesse à nous réinventer et innover.

Ainsi, tirer parti de l'innovation numérique est sans aucun doute un levier majeur en vue d'expérimenter, de gagner en agilité, en adaptabilité et en efficacité.

L'innovation numérique est une véritable révolution qui se doit d'être accompagnée et chaque expertise métier au sein de l'Agence est ou sera concernée par cette transformation. Cette démarche nécessite des investissements importants et doit être soutenue par une expertise technique ainsi qu'une montée en compétences et en savoir-faire de l'ensemble des collaborateurs.

Le projet Ci2ANum lancé en 2022 est un parfait exemple de cette démarche de transformation accompagnée. Avec la création de jumeaux numériques (CSA et Cires), Ci2ANum, composé d'une équipe pluridisciplinaire avec des expertises métiers internes et externes, a pour objectif d'améliorer considérablement la préparation de nos interventions de maintenance et facilitera ainsi l'exploitation de nos centres.

Les premiers retours des collaborateurs sont très positifs et la phase d'appropriation des outils et des méthodes mis en œuvre est lancée.

Il s'agit désormais de mesurer les impacts d'une telle transformation numérique. Cela peut sembler évident pour certaines applications comme l'utilisation de la réalité virtuelle pour former les collaborateurs et ainsi de gérer au mieux une crise ou une situation à risque. Il est cependant moins évident à court terme d'évaluer les bénéfices générés par la dématérialisation d'un processus industriel ou la modélisation 3D d'un local ou d'un équipement.

Le projet Ci2ANum marque donc le commencement d'un long chemin pour développer de nouveaux outils numériques et modéliser nos installations en vue d'un jumeau numérique opérationnel au service de l'exploitant-mainteneur.

« **Tout cela permettra à l'Andra de maintenir son expertise, d'innover et de saisir les opportunités qu'offre la transition numérique des métiers de la filière nucléaire.** »

## LA DIRECTION INDUSTRIELLE ET GRAND EST (DIGE)

La direction industrielle et Grand Est ont pour missions principales :

- l'exploitation et la surveillance des centres industriels de l'Andra dans l'Aube (Ci2A : CSA et Cires) et la mise en œuvre de toutes les composantes permettant la prise en charge industrielle des déchets radioactifs ;
- la surveillance du centre de stockage de la Manche (CSM) et la mise en œuvre des modifications nécessaires au fonctionnement de ses installations ou en vue de sa fermeture définitive ;
- l'exploitation du Centre de Meuse/Haute-Marne avec la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance des installations pour permettre l'acquisition des données scientifiques et technologiques nécessaires au projet Cigéo.

# Le projet

La décision de démarrer le projet Ci2ANum par l'Andra a coïncidé avec le lancement du plan France Relance en 2020, une initiative gouvernementale visant à redynamiser l'économie française pour favoriser la transition écologique, la compétitivité et la cohésion. Ce plan est notamment doté d'un volet spécifique dédié à la modernisation industrielle et à la transition numérique.



01.

L'appel à projets France Relance a représenté pour l'Andra et ses partenaires une double opportunité : d'une part, un potentiel soutien financier, et d'autre part, une validation externe de la pertinence stratégique du projet Ci2ANum. Les critères de sélection, axés sur l'innovation, la durabilité et l'impact stratégique, ont trouvé un écho direct dans les objectifs de ce projet.

Le projet Ci2ANum a été sélectionné par l'État, début 2022, comme lauréat de l'appel à projet du Plan de Relance pour l'industrie « Soutien à l'investissement et à la modernisation de l'industrie ». Cette reconnaissance a élevé le projet au rang d'initiative d'intérêt national, soulignant son potentiel d'impact sur l'ensemble de la filière nucléaire française.

Le soutien de France Relance a permis d'accélérer la mise en œuvre du projet et d'amplifier ses ambitions initiales, notamment :

- **d'implémenter et déployer le processus BIM** sur les centres industriels de l'Andra dans l'Aube (Ci2A) au travers d'une phase de « Scan to BIM ». L'Andra disposera ainsi d'une représentation numérique 3D des infrastructures, permettant d'optimiser les coûts de constructions neuves ou des futures modifications et ainsi de renforcer sa compétitivité et la performance de la filière de stockage ;
- **de mettre en place une méthodologie et une infrastructure** informatique et technologique robustes facilitant le développement d'un jumeau numérique « as-built » et son évolution en fonction des besoins. Cette étape couvre les choix technologiques, de logiciels, de progiciels et de l'infrastructure informatique, le déploiement et l'accompagnement au changement.

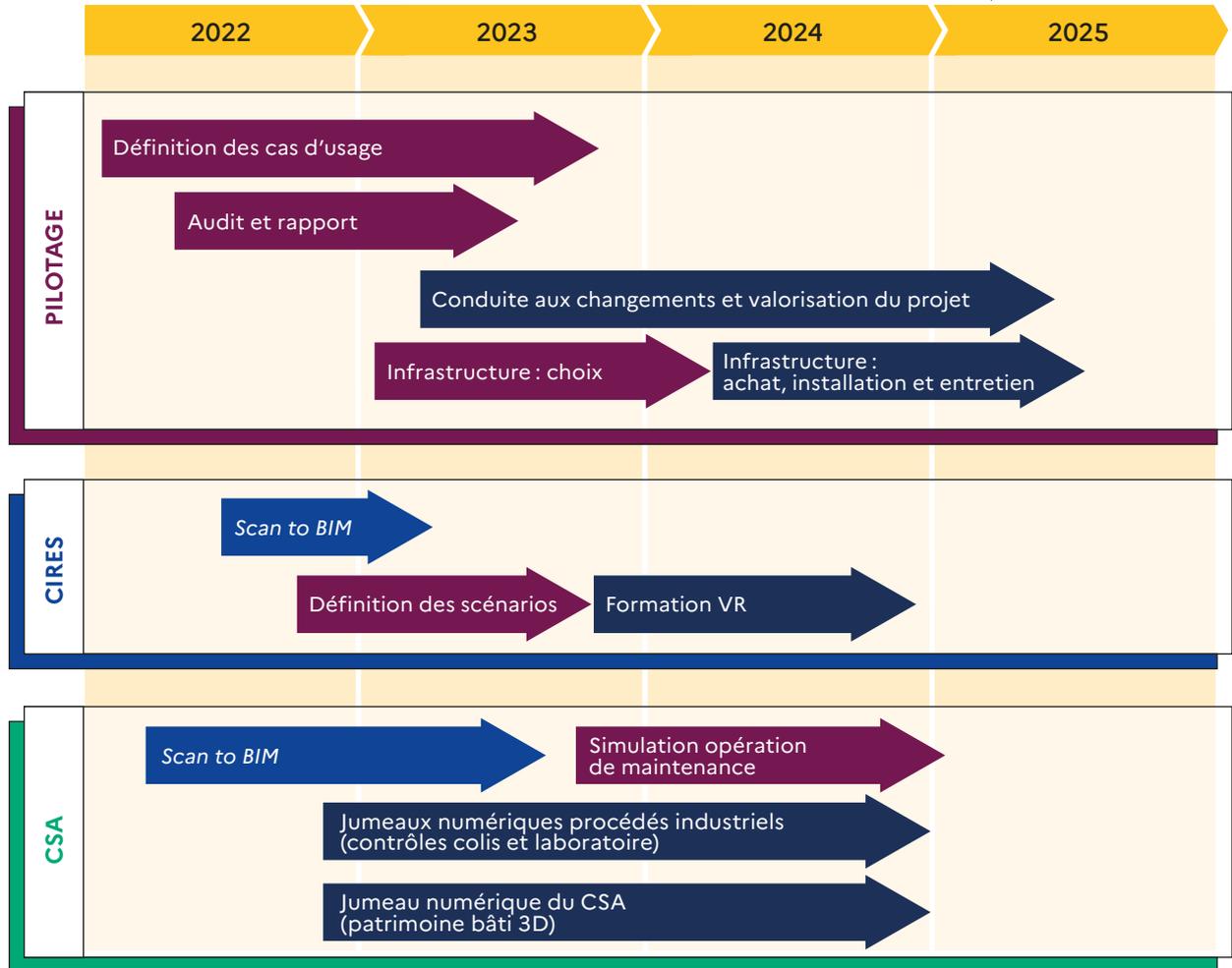
Un des atouts techniques de ce projet est l'approche multi-échelle et évolutive capable de construire et manipuler des jumeaux numériques à différentes échelles de représentation :

- un jumeau numérique à l'échelle du **centre de stockage** de l'Aube, pour améliorer la connaissance du site et l'accès aux données patrimoine ;
- un jumeau numérique à l'échelle du **procédé industriel** afin de faciliter significativement la maintenance ou la réalisation de modifications diverses d'un procédé de tri de déchets issus d'environnement non électronucléaire.

**L'enjeu pour le projet est de définir et mettre en place l'organisation, les processus, l'infrastructure informatique et technologique adéquate, pour avoir la capacité de créer deux maquettes numériques et d'exploiter ces modèles. Ce projet contribue à la montée en compétences des équipes dans les domaines du « Scan to BIM » (modélisation d'un bâtiment sur la base de son nuage de points), des data sciences, de l'intelligence artificielle ou encore de la réalité virtuelle/augmentée.**

# PLANNING SIMPLIFIÉ DU PROJET

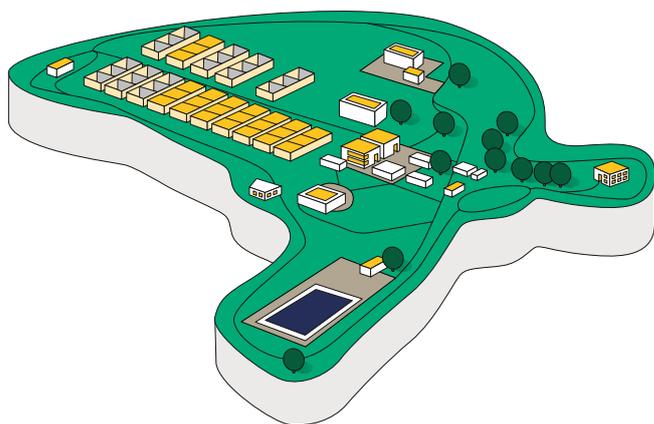
Fin du projet  
janvier 2025



01.

## LE CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE (CSA)

Implanté sur les communes de Soulaines-Dhuys, Ville-aux-Bois et Épothémont dans le département de l'Aube, le Centre de stockage de l'Aube (CSA) est dédié au stockage des déchets radioactifs de faible et moyenne activité principalement à vie courte (FMA-VC)\*. Mis en service en 1992, il a pris le relais du Centre de stockage de la Manche.



**30 hectares**  
de superficie de stockage

**1 million de m<sup>2</sup>**  
de colis de déchets  
radioactifs en capacité  
de stockage autorisée

**87 salariés Andra**  
au 31 décembre 2023

\* Les déchets à vie courte ont une période radioactive inférieure ou égale à 31 ans, c'est-à-dire qu'au bout de cette période, ils ont perdu la moitié de leur radioactivité.

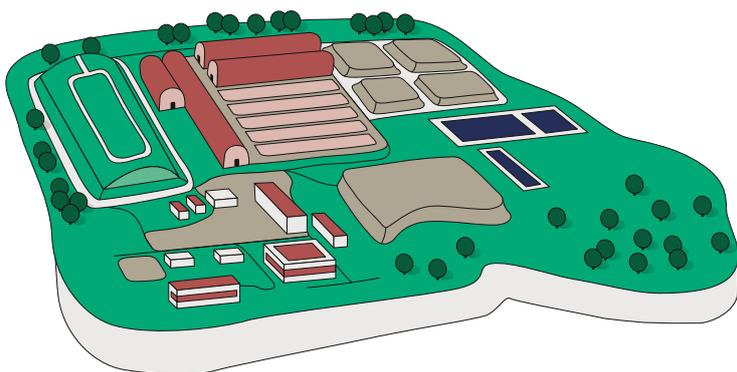


Vue aérienne du centre de stockage dans l'Aube

© Andra/ADN (Aube Drone Netcam)

## LE CENTRE INDUSTRIEL DE REGROUPEMENT, D'ENTREPOSAGE ET DE STOCKAGE (CIRES)

Implanté sur les communes de Morvilliers et de La Chaise, dans le département de l'Aube, le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) est dédié, depuis 2003, au stockage des déchets de très faible activité (TFA). Il dispose également d'installations dédiées au regroupement, au tri-traitement et à l'entreposage de déchets radioactifs issus d'activités non électronucléaires.



**46 hectares**  
de superficie de stockage

**650 000 m<sup>3</sup>**  
de colis de déchets  
radioactifs en capacité  
de stockage autorisée

**+ de 30 salariés**  
travaillent sur le Cires



Vue générale du Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage

© Andra/Vincent Duterme

# Le consortium

L'Andra a pris la décision stratégique de former un consortium pluridisciplinaire pour s'entourer de partenaires experts dans leurs domaines respectifs et capables d'apporter une réponse transversale aux défis du projet Ci2ANum.

01.

La première étape a été le rapprochement avec Assystem, groupe d'ingénierie reconnu dans le secteur nucléaire.

Assystem a été choisi pour accompagner l'Andra dans le montage et le pilotage du projet Ci2ANum, apportant son expertise dans la gestion de grands projets complexes.

Une équipe projet pluridisciplinaire, réunissant des acteurs aux compétences complémentaires a été ainsi constituée.



## Andra

En tant qu'exploitant des sites des centres industriels de l'Andra dans l'Aube (Ci2A).

- Assure le co-pilotage et la coordination technique du projet
- Apporte sa connaissance des enjeux de la gestion des déchets radioactifs
- Définit la vision stratégique du projet
- Définit les cas d'usages
- Met en place et fournit l'infrastructure informatique
- Assurera la maintenance et sera l'utilisateur des jumeaux numériques



## ATIS.cloud

CYDIS est la société éditrice de la solution ATIS.cloud utilisé par le projet.

ATIS.cloud est une application « web » permettant de rendre accessible les nuages de points très volumineux sans aucun logiciel, grâce à un navigateur web.

- Visualisation et manipulation des nuages de points et modèles 3D du projet



## Assystem

Groupe d'ingénierie indépendant, Assystem a plus de 50 ans d'expérience au service des infrastructures industrielles dans l'ingénierie et la gestion de projets complexes du fait de leur taille, leur contenu technologique et leurs exigences sécuritaires.

- Co-pilotage du projet
- Assistance aux choix méthodologiques, de technologies et d'infrastructure informatique
- Activités de modélisation



## Human Games

Human Games développe depuis 2013 des applications immersives de réalité virtuelle pour des entreprises mondiales telles que Nestlé (Vevey - Suisse), EDF, Ely Lilly et des institutions prestigieuses, telles que l'University Hospital Zurich, l'École nationale supérieure des Mines de Nancy.

Elle est spécialisée dans la gamification immersive de programmes de formation et de procédures de sécurité et également la simulation des comportements humains.

- Réalité virtuelle



## ATFF Mesures

Membre du groupe FTMesures, ATFF Mesures est spécialisée dans le domaine de la capture de la réalité (*reality capture*), la réalisation de relevés 3D et l'exploitation des nuages de points, en particulier dans le monde industriel.

- Relevés LiDAR statique, photogrammétrie par drone, photos 360°
- Traitement des nuages de points



## SPARTE

La société SPARTE, start-up spécialisée dans le pilotage de projets de jumeaux numériques et d'industrie 4.0, est chargée des audits, du conseil en choix technologiques, de la modélisation et de la gestion des données BIM. L'écosystème CITADEL est déployé pour faciliter l'exploitation 4.0 des sites de l'Andra.

- Dématérialisation des processus
- Hyperviseurs

# Enjeux et défis actuels de l'exploitation des sites

L'exploitation des sites de stockage de déchets radioactifs, tels que le Centre de stockage de l'Aube (CSA) et le Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) gérés par l'Andra, présente de nombreux enjeux et défis complexes. Cette section vise à exposer les principales problématiques auxquelles l'Andra fait face dans la gestion quotidienne de ces installations cruciales.

01.

## SÛRETÉ ET SÉCURITÉ

La priorité absolue dans l'exploitation des sites de stockage est d'assurer la sûreté et la sécurité à long terme. Cela implique :

- la protection de l'environnement et des populations contre les risques radiologiques ;
- la mise en place de barrières multiples pour confiner les déchets ;
- la surveillance continue des installations et de leur environnement ;
- la gestion des risques liés aux facteurs externes (conditions météorologiques extrêmes, risques sismiques, etc.).

## TRAÇABILITÉ ET GESTION DES DONNÉES

La gestion d'un volume important de déchets radioactifs nécessite :

- un suivi précis de chaque colis de déchets, de son arrivée à son stockage final ;
- la collecte et l'analyse d'une quantité massive de données (caractéristiques des déchets, mesures de radioactivité, données environnementales, etc.) ;
- la conservation et la transmission des informations sur le très long terme (plusieurs centaines d'années).

## OPTIMISATION DES OPÉRATIONS

L'efficacité opérationnelle est un défi constant, qui inclut :

- la planification et l'organisation des flux de déchets entrants ;
- l'optimisation de l'espace de stockage disponible ;
- la gestion des ressources humaines et matérielles ;
- la maintenance préventive et corrective des installations.

## ADAPTATION AUX ÉVOLUTIONS RÉGLEMENTAIRES ET TECHNOLOGIQUES

Le secteur du nucléaire étant en constante évolution, l'Andra doit :

- s'adapter aux changements réglementaires fréquents ;
- intégrer les avancées technologiques pour améliorer ses processus ;
- former continuellement son personnel aux nouvelles pratiques et technologies.

## TRANSPARENCE ET OUVERTURE À LA SOCIÉTÉ

La gestion des déchets radioactifs est un sujet qui nécessite :

- une communication claire et transparente avec le public et les parties prenantes ;
- la prise en compte des préoccupations des communautés locales ;
- l'organisation de visites et d'événements pour informer le public.

## ANTICIPATION DES BESOINS FUTURS

L'Andra doit constamment se projeter dans l'avenir pour :

- anticiper les futurs volumes et types de déchets à traiter ;
- planifier l'extension ou la création de nouvelles installations de stockage ;
- développer des solutions innovantes pour la gestion à très long terme des déchets radioactifs.

## MAÎTRISE DES COÛTS

La gestion économique des sites est un enjeu majeur qui implique :

- l'optimisation des ressources financières ;
- la recherche d'un équilibre entre investissements et exploitation ;
- la justification des coûts auprès des financeurs et du public.

**Face à ces enjeux et défis multiples, l'Andra explore continuellement de nouvelles approches pour améliorer ses pratiques. C'est dans ce contexte que l'industrie 4.0 et les jumeaux numériques apparaissent comme des solutions prometteuses pour répondre à ces problématiques complexes et interdépendantes.**

# 02. Industrie 4.0 et Jumeaux numériques : une vision partagée appliquée au projet Ci2ANum

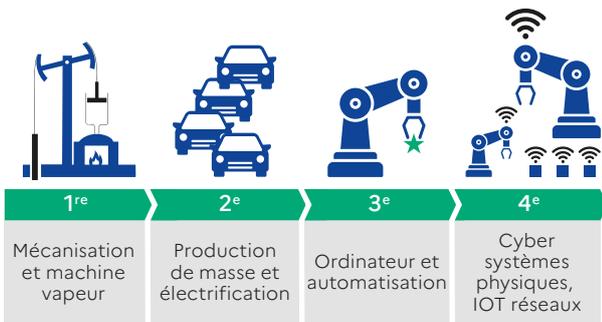


# L'industrie 4.0

## ORIGINES

Le terme « Industrie 4.0 » a été introduit pour la première fois en 2011 lors de la foire de Hanovre en Allemagne. Il fait référence à la quatrième révolution industrielle, s'inscrivant dans la continuité des trois précédentes :

- première révolution industrielle (fin du XVIII<sup>e</sup> siècle): mécanisation, utilisation de la vapeur ;
- deuxième révolution industrielle (fin du XIX<sup>e</sup> siècle): production de masse, électrification ;
- troisième révolution industrielle (années 1970): automatisation, électronique et informatique ;
- l'Industrie 4.0 marque une nouvelle ère caractérisée par l'interconnexion des systèmes physiques et numériques, transformant radicalement les processus de production et de gestion.



## ENJEUX ET AMBITIONS

Les principaux enjeux et ambitions de l'Industrie 4.0 sont :

- **compétitivité accrue**: optimisation des processus pour une production plus efficace et moins coûteuse ;
- **flexibilité et agilité**: capacité à s'adapter rapidement aux changements du marché et aux demandes des clients ;
- **innovation constante**: facilitation du développement de nouveaux produits et services ;
- **durabilité**: utilisation plus efficace des ressources et réduction de l'impact environnemental ;
- **personnalisation de masse**: production de biens personnalisés à l'échelle industrielle ;
- **amélioration de la qualité**: réduction des erreurs et amélioration continue des produits et processus ;
- **création de nouveaux modèles économiques**: émergence de nouvelles opportunités commerciales basées sur les données et les services.

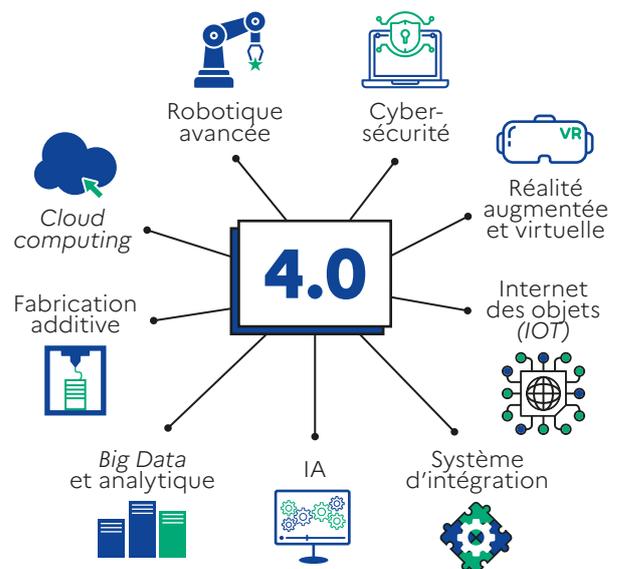
## LES TECHNOLOGIES CLÉS

L'Industrie 4.0 s'appuie sur plusieurs technologies innovantes :

- **Internet des objets (IoT)**: réseau de dispositifs connectés collectant et partageant des données ;
- **cloud computing**: stockage et traitement des données à grande échelle ;
- **intelligence artificielle (IA) et machine learning**: analyse avancée des données et prise de décision automatisée ;
- **robotique avancée**: automatisation des tâches complexes et collaboration homme-machine ;
- **réalité augmentée et virtuelle**: visualisation améliorée des processus et formation immersive ;
- **fabrication additive (impression 3D)**: production flexible et personnalisée ;
- **jumeaux numériques**: représentations virtuelles de produits ou processus physiques ;
- **Big Data et analytique**: analyse de grandes quantités de données pour l'optimisation et la prédiction ;
- **cybersécurité**: protection des systèmes interconnectés contre les menaces numériques.

Ces technologies, combinées et intégrées, forment la base de la transformation numérique de l'industrie, ouvrant la voie à des opportunités sans précédent en termes d'efficacité, d'innovation et de création de valeur.

## TECHNOLOGIES CLÉS DE L'INDUSTRIE 4.0



# Les jumeaux numériques

L'industrie 4.0 s'appuie sur l'utilisation combinatoire de technologies matures, innovantes voire transformationnelles<sup>(1)</sup>. L'objectif majeur est la capacité à simuler, anticiper voire prédire, grâce à un double virtuel enrichi de ses données propres, l'évolution et les réactions des systèmes physiques.

02.

Le jumeau numérique (ou *digital twin* en anglais) consiste au développement d'une représentation numérique réaliste d'un objet, d'un système, d'une implantation, d'un processus, etc. avec des connexions de données qui permettent la convergence entre les états physiques et numériques. Cette représentation est utilisée pour la simulation, le suivi des performances en temps-réel, l'optimisation des performances du système depuis sa conception jusqu'à son exploitation.

On peut dire que le jumeau numérique est à la fois un objet virtuel « en miroir » de l'objet physique et le carrefour des données de l'installation : documents, historique, temps-réel, 3D, etc.

Cette définition met en lumière plusieurs aspects essentiels :

- **la représentation virtuelle :** un jumeau numérique est avant tout une copie numérique fidèle d'un élément physique. Cela peut être un objet (comme une machine), un processus (comme une chaîne de production) ou un système complexe (comme une usine entière) ;
- **la mise à jour continue :** contrairement à un modèle statique, un jumeau numérique est dynamique. Il est constamment alimenté par des données provenant du monde réel, généralement collectées par des capteurs installés sur l'élément physique qu'il représente ;

- **l'analyse et la simulation :** le jumeau numérique ne se contente pas de représenter l'état actuel de son homologue physique. Il permet également de réaliser des simulations, des analyses prédictives et d'explorer différents scénarios

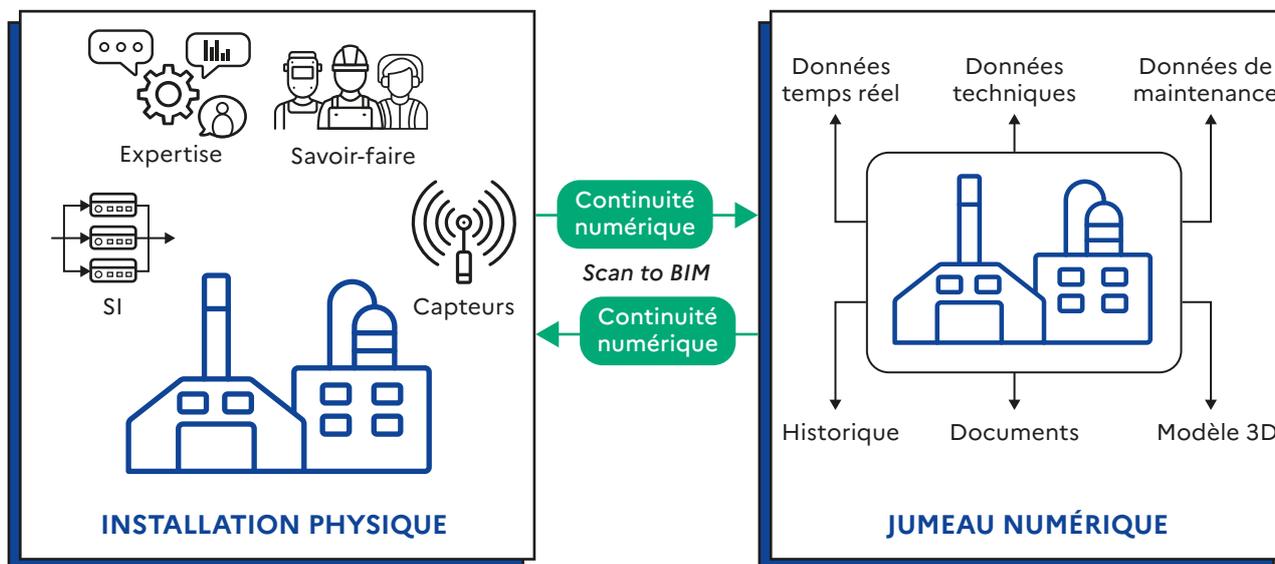
## AU-DELÀ DE LA SIMPLE MODÉLISATION 3D

Il est crucial de comprendre qu'un jumeau numérique va bien au-delà d'une simple modélisation 3D d'une infrastructure. Bien que la représentation visuelle en trois dimensions puisse faire partie d'un jumeau numérique, elle n'en est qu'un aspect parmi d'autres.

Un jumeau numérique est avant tout un écosystème de données complet et dynamique. Il intègre :

- **des données en temps réel :** collectées par des capteurs sur l'objet ou le système physique ;
- **des données historiques :** pour comprendre les tendances et les patterns sur le long terme ;
- **des modèles de simulation :** pour prédire le comportement futur et tester différents scénarios ;
- **des algorithmes d'analyse :** pour interpréter les données et en tirer des *insights* actionnables.

## ASSURER LA CONTINUITÉ NUMÉRIQUE ENTRE UNE INSTALLATION PHYSIQUE ET LE JUMEAU NUMÉRIQUE



(1) Les technologies de l'industrie 4.0 : Internet des objets (IoT), Cloud Computing, intelligence artificielle, robotique avancée, réalités virtuelle et augmentée, fabrication additive, Big Data et analytique & cybersécurité.

## UN MODÈLE DE DONNÉES HOLISTIQUE ET MULTIFORMAT

L'un des aspects les plus puissants des jumeaux numériques est leur capacité à intégrer et à corréliser des données de différentes natures et formats. Cela peut inclure :

- **des données de performance:** vitesse, température, pression, etc.;
- **des données de maintenance:** historique des pannes, interventions, etc.;
- **des données environnementales:** conditions météorologiques, qualité de l'air, etc.;
- **des données économiques:** coûts de production, prix des matières premières, etc.;
- **des données de qualité:** taux de défauts, satisfaction client, etc.

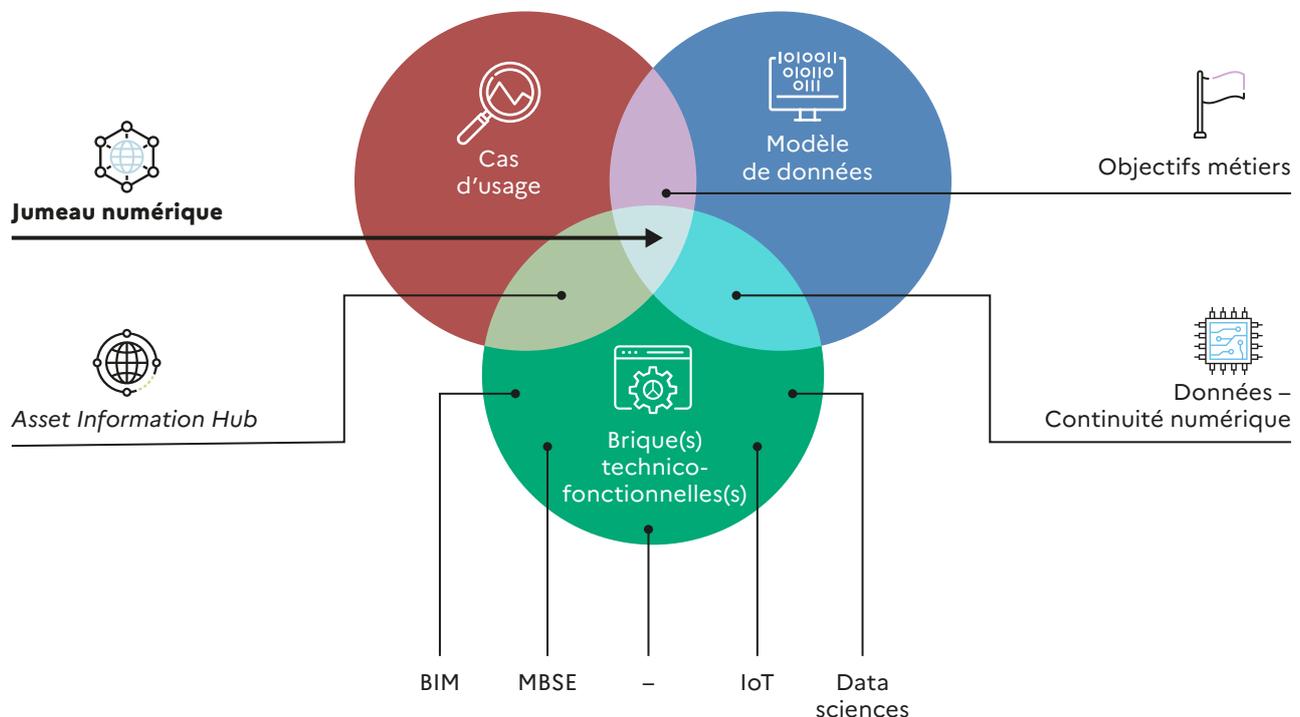
Cette approche holistique permet d'avoir une vue d'ensemble complète et nuancée de l'objet ou du système représenté, offrant ainsi des possibilités d'optimisation et d'innovation bien plus avancées qu'avec des approches traditionnelles.

## UN ÉLÉMENT FONDAMENTAL DE L'INDUSTRIE 4.0

Les jumeaux numériques s'inscrivent parfaitement dans la vision de l'industrie 4.0. Ils incarnent la fusion entre le monde physique et le monde numérique, permettant une gestion plus intelligente, plus réactive et plus efficace des processus industriels.

En connectant les données du monde réel à des modèles numériques sophistiqués, les jumeaux numériques ouvrent la voie à une nouvelle ère d'optimisation industrielle. Ils permettent de prendre des décisions basées sur une compréhension approfondie du passé, une vision claire du présent, et une projection éclairée du futur. Cette approche globale et temporelle transforme radicalement la manière dont les industries gèrent leurs opérations, anticipent les défis et saisissent les opportunités d'amélioration.

## L'APPROCHE ASSYSTEM POUR LA CONSTRUCTION D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE



## LA CONSTRUCTION D'UN JUMEAU NUMÉRIQUE

Il n'existe donc pas un, mais des jumeaux numériques d'une installation. En effet, selon la finalité visée du jumeau numérique – que l'on appellera Cas d'usage dans la suite du document – les sources de données et les technologies mises en jeu ne sont pas les mêmes.

La définition et la mise en œuvre<sup>(2)</sup> des jumeaux numériques espérés reposent donc sur :

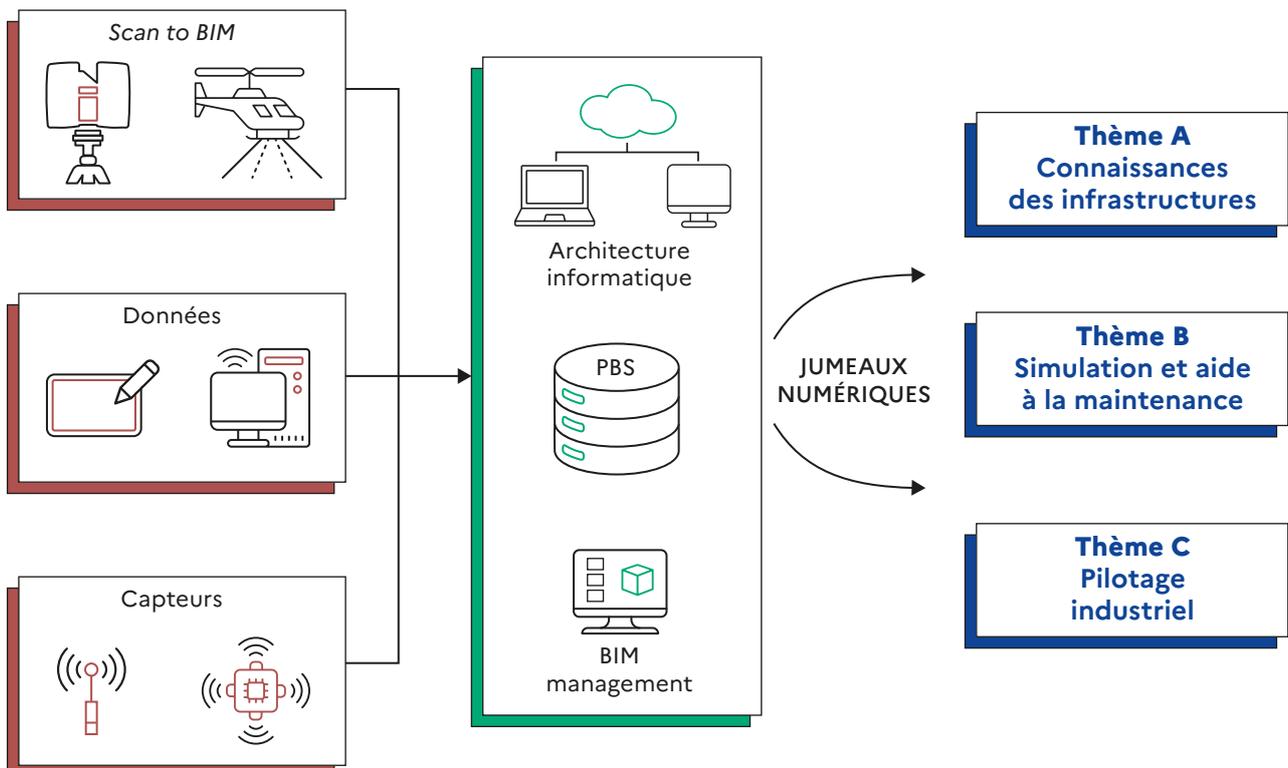
- **la définition des cas d'usage** liés aux besoins de l'utilisateur final ;
- **la construction des modèles de données** (et donc l'identification des sources pertinentes) adaptés aux objectifs métiers ;
- **l'intégration et l'interopérabilité** des briques technologiques et/ou logicielles nécessaires.

L'expérience acquise et partagée par l'ensemble des parties pour la bonne mise en œuvre des jumeaux numériques du projet fait ressortir la nécessité de mettre en place un schéma industriel reposant sur trois rôles principaux<sup>(3)</sup> :

- **l'utilisateur/client final**, dans notre cas l'exploitant mainteneur du CSA et/ou du Cires, qui détient et exprime le besoin fonctionnel auquel doit répondre le jumeau numérique ;
- **le partenaire/l'intégrateur technologique ou logiciel**, en charge de développer, qualifier et mettre en production les technologies ou logiciels nécessaires pour répondre au besoin fonctionnel exprimé et adaptés aux données disponibles ;
- **l'ingénierie digitale** en charge de coordonner les travaux et de faciliter la communication entre le client final et l'intégrateur technologique, notamment en apportant son expertise dans la constitution du modèle de données.

L'ensemble des cas d'usage présentés ci-après font l'objet d'une présentation des résultats obtenus et d'un témoignage d'un représentant de chaque rôle ci-dessus.

## SCHEMA DE MISE EN ŒUVRE DES JUMEUX NUMÉRIQUES DANS LE PROJET Ci2ANum



(2) L'utilisation des technologies nouvelles ou transformationnelles de l'Industrie 4.0 s'accompagne obligatoirement d'une transformation digitale des processus et méthodes et donc par la nécessité d'intégrer la conduite du changement comme un élément clé du succès de la transformation digitale.

(3) Un même organisme peut assumer plusieurs rôles, en fonction de la complexité du projet et de sa maturité sur les différents rôles, ces deux paramètres influant également sur le montage contractuel de ce schéma industriel.

# Application à l'exploitation des centres de stockages de l'Andra dans l'Aube

# 03.



# Le recueil des besoins

Une campagne d'audit a eu lieu pour consolider et préciser les cas d'usages présentés au dossier France Relance et pour collecter les besoins plus largement que ceux retenus dans le cadre de ce dossier. Un rapport spécifique a été rédigé et diffusé aux parties prenantes du projet.

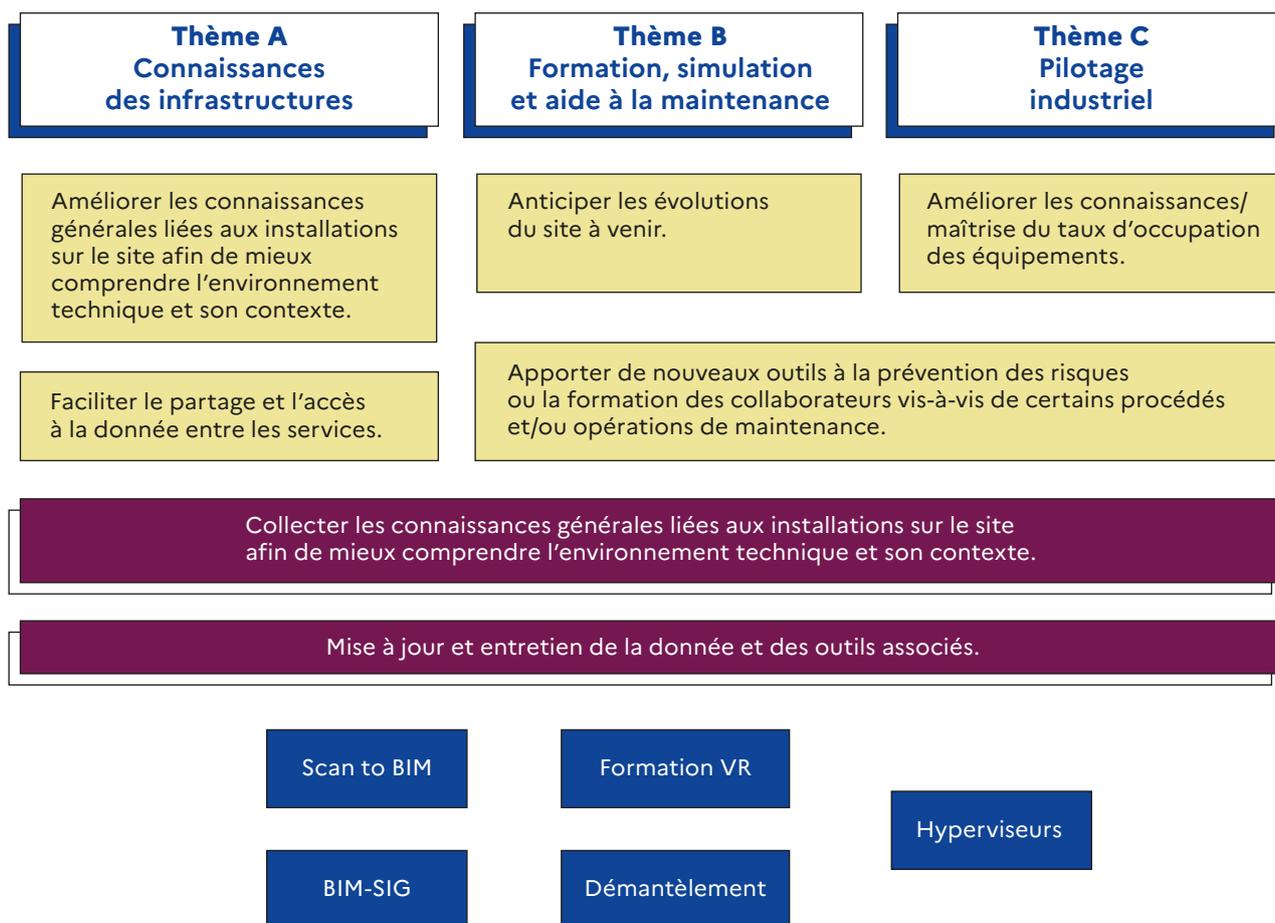
03. À l'issue des audits, la compilation des échanges a permis de faire ressortir les besoins et/ou souhaits des collaborateurs interrogés. Ces besoins et/ou souhaits exprimés alimentent trois thèmes principaux retenus pour le projet :

- A - Connaissance des infrastructures ;
- B - Formation, simulation et aide à la maintenance ;
- C - Pilotage industriel.

Les besoins métier « **Mise à jour et entretien de la donnée** » et « **Collecter les connaissances générales liées aux installations** » constituent les briques essentielles prises en compte par le projet. En effet, ils contribuent à construire et à alimenter le socle de base des jumeaux numériques.

Les données collectées et mises à jour périodiquement ou au fil de l'eau, garantissent la pérennité et la fiabilité de l'information au sein des sites des Ci2A. Ces données peuvent être utilisées pour l'exploitation quotidienne et pour anticiper les évolutions à venir des sites.

## LES TROIS GRANDES THÉMATIQUES DU PROJET Ci2ANum



# Témoignages partagés

## THÈME A : CONNAISSANCE DES INFRASTRUCTURES

### Paroles aux utilisateurs

L'Andra souhaite parfaire ses connaissances générales liées aux installations et améliorer la prévention des risques des collaborateurs vis-à-vis de certains procédés et/ou opérations de maintenance. Cela implique non seulement une meilleure formation des équipes sur le terrain, mais aussi une accessibilité accrue aux informations critiques lors des interventions.

La capture de réalité, grâce aux nuages de points, est devenue un véritable atout pour documenter l'existant avec une grande précision. Disposer d'un modèle numérique de l'ensemble du site permet non seulement d'améliorer la connaissance générale, mais aussi d'anticiper les évolutions à venir, offrant ainsi une base solide pour une planification à long terme et une gestion prédictive des équipements.

---

#### **Florent Delorme,** projeteur au bureau d'études, service Projets, études et réalisation

ATIS.cloud nous a permis d'accéder aux nuages de points capturés durant les différentes campagnes et nous permet d'avoir une source unique d'informations, facilitant la collaboration entre les différents services et réduisant significativement les temps de recherche et de vérification des données. L'outil est simple d'utilisation, même pour les néophytes, ce qui permet à tous les intervenants de l'utiliser facilement et de contribuer efficacement.

---

---

#### **Laurent Schacherer,** chef du département Exploitation, maintenance et travaux

Utiliser ATIS.cloud nous a permis d'optimiser la planification de nos évolutions de site. La précision des modèles et la centralisation des données permettent de voir loin en termes d'aménagements et de concertation.

---

---

#### **Sylvain Guilloteau,** ingénieur jumeau numérique, département intégration système

La modélisation 3D apportée par ATIS.cloud est essentielle pour une vision globale des installations. Grâce aux nuages de points capturés sur site, nous pouvons reconstruire numériquement les installations avec un niveau de détail incroyable, ce qui offre une compréhension approfondie et précise des conditions réelles. Les mesures sont précises et l'interface intuitive permet d'intégrer directement les éléments pertinents pour la maintenance préventive et prédictive. Cela facilite également l'analyse des interactions entre les différentes infrastructures et la détection des anomalies avant qu'elles ne deviennent critiques.

---



Rendu 3D des relevés LiDAR du CSA dans ATIS.cloud

## La réponse des partenaires

**Jules Armagnat,**  
ingénieur ATFF Mesures

Pour créer des jumeaux numériques, il faut disposer d'une base de l'existant. La captation du site complet par la combinaison de différentes technologies permet de générer un nuage de points fidèle à la réalité. Ce nuage de points constitue une source de données fiable et complète de l'état d'un site à un instant donné permettant, notamment la prise de mesures aussi bien au niveau des bâtiments, des équipements ainsi que du terrain. Ces données sont dans ce cas également complétées de photos aériennes et 360° au sol. Les données issues de ces captations servent de support de base pour la réalisation de modélisations, la garantie de leur fidélité est donc capitale.

Le choix des moyens et des méthodes mis en œuvre sont primordiaux et sont à adapter en fonction des besoins pour fournir les données les plus fidèles, exhaustives et exploitables possibles, notamment lorsqu'il s'agit d'installations sensibles comme celles des INB (installations nucléaires de base) ou d'autres environnements industriels.

## Les problématiques et défis

**Florian Fauconnet,**  
directeur de CYDIS, éditeur d'ATIS.cloud

Un nuage de points peut être extrêmement volumineux, rendant sa manipulation complexe et laborieuse. Avec ATIS.cloud, nous offrons une solution web innovante qui permet de stocker ces données en toute sécurité et de les rendre facilement accessibles. Notre plateforme intuitive simplifie la visualisation et la manipulation des fichiers massifs, même pour les utilisateurs sans compétences techniques avancées.

Grâce à ATIS.cloud, il est possible de réaliser des mesures précises, d'intégrer des modèles 3D et d'enrichir vos projets avec des données fiables. La plateforme prend également en charge l'utilisation d'images 360°, qui facilitent la compréhension globale de l'environnement existant, offrant ainsi une vision claire et détaillée des projets.

Les outils de collaboration intégrés permettent aux différents acteurs de travailler simultanément sur les mêmes données. Les modifications effectuées par une équipe sont instantanément accessibles à toutes les autres parties prenantes. Cette approche collaborative garantit une coordination fluide et efficace, particulièrement avantageuse pour les grands projets nécessitant l'intervention de plusieurs parties.

Avec ATIS.cloud, transformez vos données massives en un atout collaboratif et exploitable, au service de vos projets les plus ambitieux.

## Les résultats

**Benjamin Girard,**  
directeur de SPARTE

La modélisation d'un site complet est rendue possible grâce à une combinaison d'outils performants et de données précises. ATIS.cloud a été un atout majeur pour la mise en place de solutions fiables et faciles à prendre en main, tant pour nos équipes que pour les exploitants du site. Cela nous a permis de mieux visualiser les sites, d'identifier rapidement les zones nécessitant des améliorations ou des interventions, et de coordonner les activités sur le terrain avec une précision accrue. La disponibilité de données centralisées et l'accessibilité de l'interface ont joué un rôle essentiel dans l'amélioration de notre efficacité opérationnelle.

**Florian Fauconnet,**  
directeur de CYDIS, éditeur d'ATIS.cloud

Les résultats obtenus avec ATIS.cloud montrent un grand bénéfice pour l'exploitant, notamment en termes de gain de temps et de réduction des erreurs. Cette solution permet également une sauvegarde numérique des installations, offrant ainsi une base solide pour des améliorations continues et une meilleure planification à long terme.



Relevé LiDAR statique dans le local du malaxeur

## Retour d'expérience sur la captation 3D du CSA

---

**Jules Armagnat,**  
ingénieur ATFF Mesures

L'objectif était d'obtenir un nuage de points complet du site du CSA. Ce site s'étend sur plusieurs hectares et possède plusieurs bâtiments. Il était de plus souhaité que celui-ci soit géoréférencé.

**Première difficulté:** obtenir des données précises et exhaustives au niveau des bâtiments, notamment des dessous de toitures, ainsi qu'au niveau d'une des structures porteuses et de l'ensemble du site.

Différentes technologies ont été mises en œuvre (scan laser/LiDAR fixe, scan laser/LiDAR mobile, photographies aériennes par drone, utilisation de cibles imprimées, canne GPS, et scan portable) afin de tirer bénéfice de chacune de ces technologies et de palier leurs faiblesses.

Notre méthodologie a consisté à créer un « squelette » du nuage points complet par l'assemblage de scans laser fixes. Ces scans offrent une précision et un niveau de détails maximum. Les scans laser fixes ont ainsi été réalisés autour des bâtiments et suivant un cheminement le long de la ligne d'ouvrage et sous une des structures porteuses.

Un nuage de points contenant les données issues des scans laser a ainsi servi de base pour la reconstruction par photogrammétrie, à partir des photographies aériennes réalisées par drone. L'avantage de cette méthode est de prévenir tout phénomène de distorsion pouvant survenir sur une reconstruction photogramétrique de très grande taille.

La reconstruction photogramétrique permet de compléter les données issues des scans laser, en particulier concernant les zones non visibles depuis le sol comme les toitures et les dessus des ouvrages. De plus, il est possible de couvrir de très grandes surfaces par ce moyen, la précision est cependant inférieure à celle des scans laser. La reconstruction sur la base du squelette issu des scans laser fixes permet d'avoir des données précises sur toutes les zones relevées par laser au sein d'un nuage de points complet.

**Deuxième difficulté:** assurer le géoréférencement d'un nuage de points d'un site de plusieurs hectares.

Pour assurer le géoréférencement du nuage de points, nous avons relevé la position GPS de différents points du site. Nous avons notamment positionné des cibles imprimées réparties autour du site. Ces cibles étaient visibles à la fois sur des photographies aériennes et sur les scans laser. L'objectif était d'injecter les coordonnées de ces points dans le projet du nuage de points afin de les faire correspondre.

La défaillance de la canne GPS utilisée a empêché dans un premier temps le positionnement du nuage de points dans un système de coordonnées géoréférencées, il restait donc dans un référentiel local. Nous avons utilisé les données issues du relevé LiDAR hélicoptère au niveau de différents points caractéristiques du site pour la suite de nos travaux.

Le système de coordonnées demandé dans le cadre du projet est le Lambert 93. Ce système de coordonnées est une projection conique conforme, ce qui signifie qu'elle déforme la réalité: elle conserve les angles mais pas les surfaces dont l'altération entre représentation plane et ellipsoïde est directement liée à l'altération linéaire. Cette altération linéaire au niveau du CSA est de près de 40 cm/km. La distance entre les bâtiments et les ouvrages au fond du site fait plus de 2 km.

Le nuage de points réalisé est à l'image de la réalité. 1 km dans le nuage représente 1 km dans la réalité.

Dans le cadre du projet, il a été décidé que les coordonnées du nuage de points soient les plus proches possibles des coordonnées en Lambert 93 CC48 autour des bâtiments principaux.

## THÈME B : FORMATION, SIMULATION ET AIDE A LA MAINTENANCE

### Paroles aux utilisateurs

Il a été exprimé le besoin de simuler des scénarios d'interventions afin d'optimiser la conception, vérifier la faisabilité des opérations de maintenance et entraîner les opérateurs notamment sur les boîtes à gants de tri des déchets à faible activité.

### Retour d'expérience spécifique : utilisation de la réalité virtuelle

**Emeric Floczek,**  
ingénieur production, service exploitation

Le projet consistait à utiliser la VR pour placer les opérateurs dans une ambiance le plus proche possible des conditions d'exploitation sur un poste de production du BRTT. Ce poste a été choisi à partir du REX des situations accidentelles et incidentelles afin de sensibiliser les opérateurs à l'ambiance de travail, aux conditions de travail, aux risques radioactifs mais aussi aux risques secondaires comme les coupures et les piqûres. Le projet a également été plus loin afin de placer l'opérateur dans une situation stressante afin de voir ses réactions.

Les premières discussions avaient mis en avant un besoin de formation et de présentation du poste de travail à des opérateurs nouveaux arrivants. Les différents échanges et notamment les propositions du projet sur les possibilités offertes par la VR ont ensuite fait évoluer le support de formation initial en un support de test, avec des choix à faire par le personnel qui se déclinent lors de la phase d'utilisation de la VR en situation accidentelle, avec une coupure de la main et projection de sang, et en situation incidentelle, avec perte de dépression dans une boîte à gants et apparition d'un risque de contamination radiologique interne.

L'évolution du projet a ainsi permis de recréer dans la VR des situations incidentelles et accidentelles dont les opérateurs ont été confrontés dans le passé et de sensibiliser les nouveaux arrivants sur ces situations sans avoir à les amener directement dans les installations, donc les accès sont difficiles.

L'ensemble de la demande et des attentes de l'exploitant (EXP) et du service sécurité/RP a été repris dans le projet et l'Andra dispose maintenant d'un réel support pour l'opérateur industriel du Cires.

**Chloé Petit,**  
ingénieure prévention santé sécurité  
et radioprotection au Cires

La création du local R14 en VR est un véritable atout pour la sécurité et la radioprotection, notamment pour les nouveaux arrivants. Il leur permet de commencer à s'exercer sur le procédé sans toutefois s'exposer aux risques de l'installation. On peut notamment le confronter au choix des équipements de protection individuels et le mettre en face des conséquences d'un mauvais choix. Il est également possible de tester leurs réactions en cas de situations d'urgence.

Ce module VR permettra ainsi de préparer au mieux les nouveaux arrivants sur ce local relativement complexe.

Il a également été présenté lors de la journée portes ouvertes, afin de pouvoir mettre en immersion le public dans notre installation sans l'exposer à ses risques. Cela a d'ailleurs remporté un grand succès.



Opérateur manipulant des fioles de scintillation dans une boîte à gants

### ZOOM SUR LE LOCAL R14 DU BÂTIMENT DE TRI-TRAITEMENT

C'est dans ce local qu'a lieu le procédé du traitement de fioles de scintillation. Ces récipients, utilisés pour conditionner des liquides contenant des radionucléides, sont pris en charge au Cires en fin d'utilisation afin d'assurer leur élimination. Leur traitement est réalisé dans une enceinte confinée, appelée « boîte à gants » dans laquelle sont installés les équipements nécessaires (poste de vidange, broyeur, centrifugeuses, poste d'évacuation des broyats, réseaux de collecte et d'évacuation des solvants...).

## La réponse des partenaires

**Deise Mikhail,**  
co-fondateur de Human Games

Le projet a été de créer un environnement virtuel réaliste pour la simulation et l'entraînement des opérations de traitement de déchets radioactifs.

**Première difficulté: utilisation des modèles BIM**  
(*Building Information Modeling*).

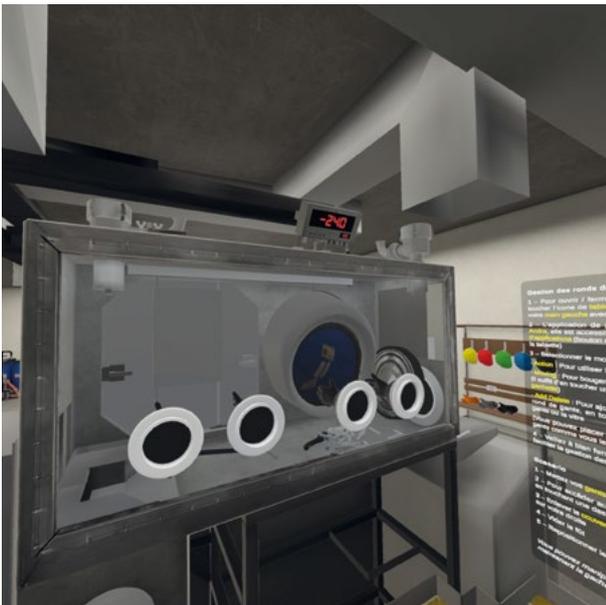
Les modèles 3D BIM ont été utilisés comme base pour le jumeau numérique. Cependant, ces modèles étaient trop volumineux et contenaient des détails inutiles pour le projet. Pour résoudre ce problème, nous avons exporté les modèles BIM en FBX et avons utilisé trois méthodes pour optimiser les polygones.

### Méthodes employées

1. Outil Polygon Reduction dans C4D, mais celui-ci atteint vite ses limites surtout quand il y a trop de triangles. On va dire que ça a permis d'optimiser certains modèles de second plan.
2. Méthode manuelle, c'est-à-dire fusionner des polygones: en effacer pour les recréer simplifiés, les surfaces plates telles que les vitres par exemple. C'est fastidieux mais les résultats sont meilleurs qu'avec un réducteur de polygones automatique.
3. Modélisation complète de certains modèles. Pour certaines parties, on a re-modélisé entièrement les modèles car cela allait plus vite pour obtenir du *low poly*.

### Résultats

L'ensemble du jumeau numérique contient 39929 polygones, ce qui représente une réduction spectaculaire par rapport aux 15161404 polygones initiaux.



Boîte à gants  
Capture d'écran de la réalité virtuelle

**Seconde difficulté: réalisation de la boîte à gants.**

La réalisation de la boîte à gant a été un défi important. Nous avons dû trouver des astuces pour limiter l'effet de « pousser » les objets virtuels, qui permet au corps humain de piloter le corps virtuel mais pas inversement.

### Méthodes employées

1. Ajout d'un *ghost* pour bloquer la main virtuelle.
2. Vibrations sur les manettes et son.

**Résultats:** la boîte à gants a été réalisée avec succès, y compris l'enfilage des gants en caoutchouc.

**Troisième difficulté: faire cohabiter une multitude de règles physique dans 1,5335 m<sup>3</sup>. Le jumeau numérique devait intégrer la physique des mains de l'utilisateur, ainsi qu'une multitude d'objets, tels que des flacons, des seringues et des pièces métalliques. Nous avons réussi à créer un environnement virtuel optimisé qui fonctionne dans les casques VR autonomes Meta ou Pico et sans latence perceptible.**

**Résultats:** le jumeau numérique du R14 a été réalisé avec succès, nous avons atteint les objectifs qu'une la technologie VR autonome peut supporter, y compris la prise d'une seringue au milieu de plusieurs objets.

### Conclusion

Ce projet a permis de repousser certaines limites, mais aussi d'en identifier des insurmontables à ce jour.

## Paroles aux utilisateurs

L'exploitant-mainteneur a exprimé le besoin de simuler des scénarios d'interventions, notamment pour vérifier la faisabilité d'opérations de maintenance. C'est le cas le cas du malaxeur du CSA, un cylindre de 2 mètres de diamètre sur 80 centimètres de hauteur qui sert à mélanger le béton qui enrobe certains colis de déchets radioactifs avant leur stockage.

## Retour d'expérience spécifique : démantèlement du malaxeur du CSA

**Yannick Chevreuil,**  
chef de service maintenance et *facilities management*

L'apport des nouvelles technologies pour ce type de travaux est essentiel.

Nous assurons la maintenance sur une installation pour laquelle une de nos préoccupations majeures est d'optimiser nos délais d'intervention et à ce titre, la préparation des interventions est primordiale.

Pouvoir simuler tout ou partie de notre chantier en amont de l'intervention et pouvoir définir un temps d'arrêt de l'équipement réaliste est un atout qui nous permet d'informer au mieux l'exploitant afin que les bonnes dispositions soient prises en termes de prise en charge des déchets.

C'est un premier chantier pour nous mais que nous reproduirons certainement à l'avenir compte tenu des actions de jouvence que nous devons mener sur les centres.

**Jimmy Lambert,**  
ingénieur maintenance au CSA

On doit changer le malaxeur avant qu'il ne tombe en panne. On va simuler l'acheminement de certaines pièces grâce au jumeau numérique pour identifier les interfaces, là où on risque d'avoir un impact avec le bâti. On modélise les pièces en elles-mêmes et on s'assure que tout va bien passer, en prenant en compte l'implantation de systèmes d'élévages, l'utilisation de chariots et ainsi reproduire virtuellement tout le cheminement des pièces du camion de livraison au local d'accueil.

On a vraiment un usage qui est concret aujourd'hui. C'est un bénéfice en temps de travail, en disponibilité des équipements et en sécurité.

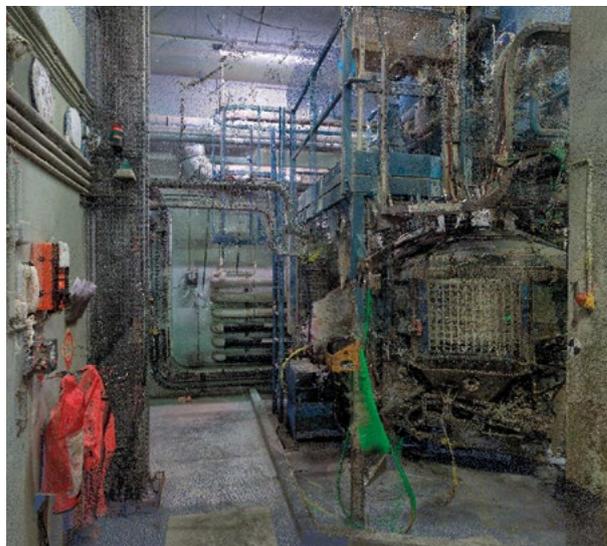
## La réponse des partenaires

**Jules Armagnat,**  
ingénieur ATFF Mesures

La réalisation d'un état des lieux exhaustif, notamment par la réalisation de relevés 3D offre de nouvelles possibilités pour la réalisation d'opérations de transferts industriels au sens large. Le sujet du démantèlement du malaxeur en est un cas d'école.

La captation des différents éléments constitutifs du malaxeur ainsi que de son environnement permet de simuler et de vérifier l'ensemble des étapes de transfert. Il devient ainsi possible d'étudier, en amont, en temps masqué et avec grande précision les possibilités disponibles pour réaliser chacune des opérations :

- analyse des connexions entre l'équipement et son environnement ;
- simulation du déplacement des éléments constitutifs dans l'espace ;
- détection d'interférences ;
- intégration des maquettes numériques des outils à utiliser dans l'environnement réel relevé.



Nuage de points du local du malaxeur,  
visualisation dans ATIS.cloud

**Florian Fauconnet,**  
fondateur de CYDIS, éditeur d'ATIS.cloud

Les nuages de points fournissent une représentation détaillée qui permet une visualisation en 3D des installations avec une précision inégalée. En outre, la possibilité de visualiser les installations en 3D permet de mieux comprendre les interactions entre les différents éléments, ce qui est essentiel pour prévenir les risques, optimiser les processus de maintenance, et détecter précocement les zones à risques potentiels. La réalité capture devient alors un outil d'une valeur inestimable pour non seulement assurer une compréhension visuelle, mais également pour élaborer des stratégies précises d'entretien et de prévention.

ATIS.cloud permet de simuler l'implantation de nouveaux équipements et de les déplacer virtuellement le long d'un chemin prédéfini afin de visualiser les collisions potentielles, ce qui aide grandement à prendre des décisions lors de la planification des projets. En outre, notre interface utilisateur est conçue pour simplifier au maximum la gestion des données volumineuses, offrant une expérience intuitive même pour ceux qui ne sont pas familiers avec la technologie de réalité capture.

**Brice Roffino,**  
chef de projet Assytem

#### **Méthodologie**

Sur la base du scan 3D de l'environnement réalisé par ATFF, nous avons créé une animation 3D à partir des maquettes disponibles pour tester et valider les scénarios d'introduction et de mise en place des éléments du malaxeur précédemment identifiés. Cette animation permet, très en amont du démarrage du projet et des études, d'identifier les risques potentiels, qu'ils soient techniques ou liés à la sécurité et à la sûreté. Aussi, cette animation permet à toutes les parties prenantes du projet de bien visualiser l'opération et d'identifier, dans son domaine de compétences, les contraintes et exigences à prendre en compte.

L'animation 3D, couplée à une projection en réalité augmentée sur le terrain grâce à la solution Holoreka® assure une compréhension totale et partagée de l'opération par toutes les parties concernées, en limitant les incompréhensions, sécurisant de fait le planning du projet.



Visualisation en réalité augmentée dans le local du malaxeur

## THÈME C : PILOTAGE INDUSTRIEL

### Paroles aux utilisateurs

03.

---

#### **Elvina Blot,** cheffe de service exploitation au CSA

Le projet Ci2ANum a permis de déployer pour l'activité de contrôle colis des Ci2A, une Hypervision qui permet de voir en temps réel, pour l'ensemble des acteurs de l'activité, l'avancée des contrôles, l'ensemble des informations disponibles, et l'évaluation du plan de charge.

L'ensemble des fichiers, formulaires, rapports... pourra être supprimé avec une possibilité de vérifications et d'échanges, à tout moment, entre les différents acteurs.

L'implication dans Ci2ANum permet de tester des outils visant à gagner en ressources administratives et de démontrer l'intérêt de le déployer sur d'autres activités d'exploitation.

Sur les sites industriels, on dispose d'outils et d'organisations qui permettent de répondre au besoin et qu'il est intéressant de challenger avec les outils numériques actuels pour :

- gagner en efficacité de traitement;
- motiver nos ingénieurs à optimiser les tâches sans plus-value par rapport à leur métier;
- avancer sur nos outils et nos pratiques de sorte à ne pas être démodé par rapport à l'actuel et motiver, notamment vis-à-vis de la nouvelle génération, habituée à utiliser ce type d'outils qu'ils exploiteront demain.

---

#### **Thomas Casares,** ingénieur production au CSA

Après une présentation des outils, on s'y voit, ça devient concret, ça devient de l'application. Avec cette forme de jumeau numérique, ça me permettrait d'avoir accès à l'information plus rapidement, de façon plus pertinente et la possibilité de mieux organiser le travail au quotidien.

Nous avons commencé à configurer l'hyperviseur en fonction des données du service. Je suis convaincu qu'il présente un réel intérêt pour l'activité de contrôle colis notamment en termes de productivité, de qualité et de traçabilité avec un outil moderne et pratique.

La difficulté repose aujourd'hui sur la configuration en mode industriel qui prendra du temps et sa mise en phase test puis en application quotidienne.

---

#### **Hervé Caritey,** chef de service du laboratoire analyses et contrôle au CSA

Les plus-values attendues par ce premier développement rejoignent les propriétés que peut détenir un tel élément d'aide au pilotage :

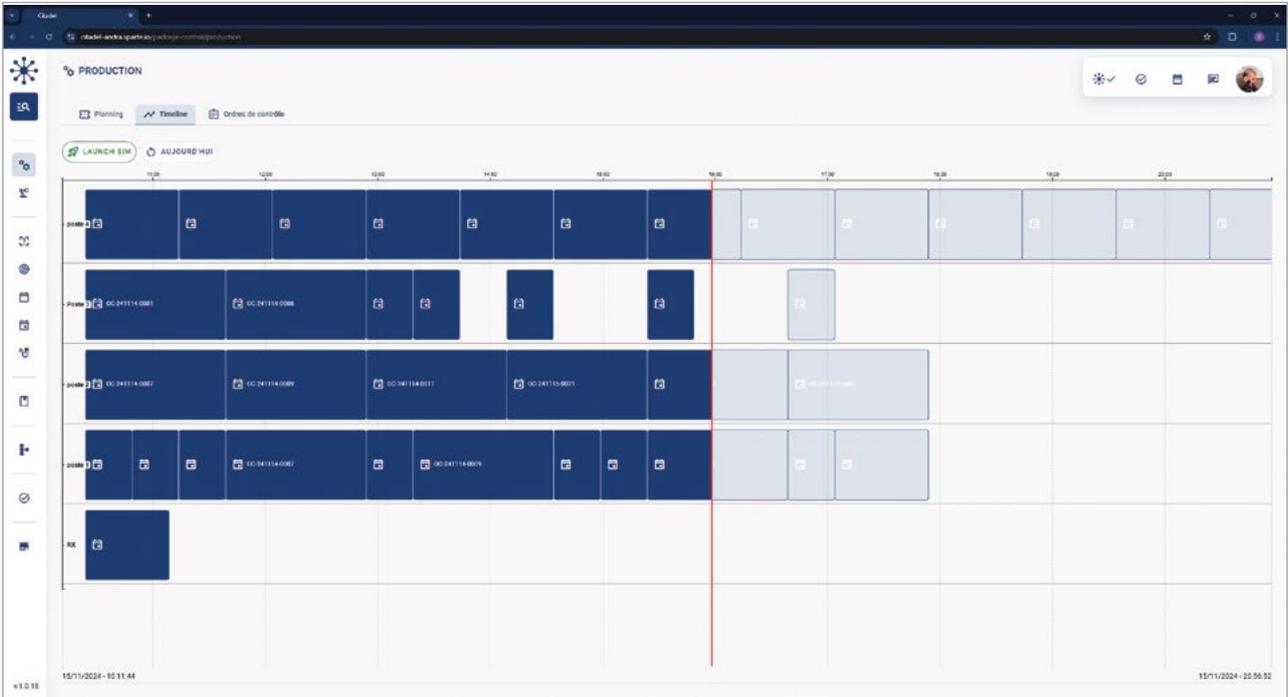
- centralisation d'informations aujourd'hui dispersées sur tous les équipements de mesure;
- élément d'organisation de ces informations de charge par équipement ou technique, qui sont plus de l'ordre du jugé ou de l'expérience aujourd'hui;
- gagner en réactivité pour accéder à cette information; reste à définir à quelle fréquence cette information est utile;
- gagner en précision et ainsi répondre de manière plus rapide et sûre, aux souhaits réguliers des clients internes de prise en charge d'échantillons, hors plans de surveillance.

En parallèle, nous avons identifié :

- des difficultés à estimer l'investissement, les ressources, l'effort, en termes de temps à y consacrer en interne pour mener à bien le projet et développer de nouvelles fonctionnalités.



Vue du site du CSA dans CITADEL



Vue du planning dans l'hyperviseur « contrôle colis »

## La réponse des partenaires

---

03.

### **Benjamin Girard,** directeur de SPARTE

Le déploiement de CITADEL, le nom de l'hyperviseur, pour le laboratoire, en parallèle de celui du contrôle colis, démontre la puissance d'adaptation de la solution. Bien que ces deux services aient des missions et des contraintes distinctes, l'écosystème a su répondre à leurs besoins spécifiques tout en conservant une cohérence dans l'approche :

- excellence métier :
  - recentrage des équipes sur leur expertise technique,
  - optimisation des processus spécifiques au laboratoire,
  - anticipation améliorée des besoins,
  - gestion proactive des ressources ;
- performance opérationnelle :
  - optimisation des stocks de contenants,
  - planification intelligente des calibrations,
  - réduction des tâches administratives,
  - amélioration de l'utilisation des équipements ;
- standardisation intelligente :
  - un même écosystème adapté à des contextes différents,
  - configuration fine de l'ADN numérique selon les besoins,
  - interfaces utilisateur spécialisées par métier,
  - maintien des spécificités de chaque service.

Cette capacité à déployer une solution standardisée tout en respectant les particularités de chaque métier illustre la flexibilité de CITADEL et sa pertinence pour la modernisation globale des processus industriels, quelle que soit leur nature.

---

### **Brice Roffino,** chef de projet Assytem

#### **Les problématiques et défis**

La problématique principale est autant liée à la conduite du changement que du saut technologique : le fonctionnement historique en place depuis plusieurs décennies est centré sur les documents (document centric), qui sont amenés à être silotés pour des contraintes organisationnelles, sécuritaires et/ou de géographiques.

Le défi a donc été d'amener les équipes d'exploitation à se projeter de manière confiante vers un système centré sur les données (data centric) en lui mettant à disposition un outil répondant à ses besoins opérationnels en limitant l'intrusion dans les processus existants et respectant l'héritage logiciel, tout en offrant une souplesse dans les évolutions, que ce soit des ajustements mineurs ou bien l'intégration de futurs cas d'usages plus structurants dans l'avenir.

---

# Retours d'expériences techniques 04.



# Structuration de la donnée

L'élaboration d'une arborescence produit s'inscrit dans la démarche de transformation numérique et vise à identifier et à s'appropriier l'ensemble des éléments qui constitue ces centres.

04.

Une arborescence produit PBS (*Product Breakdown Structure*) est une représentation hiérarchique et détaillée des produits ou éléments d'un projet. Elle permet de décomposer un produit final ou un objectif complexe en sous-éléments plus simples, appelés « produits », et en définir la structure logique. L'objectif principal de l'arborescence PBS est de faciliter la gestion, la planification, et le contrôle d'un projet.

Ce principe d'arborescence et de décomposition est identique pour les deux centres industriels CSA et Cires. Certaines branches de ces arborescences s'arrêtent au niveau 3 ou 4, cela va dépendre du niveau de détail souhaité pour certains nœuds.

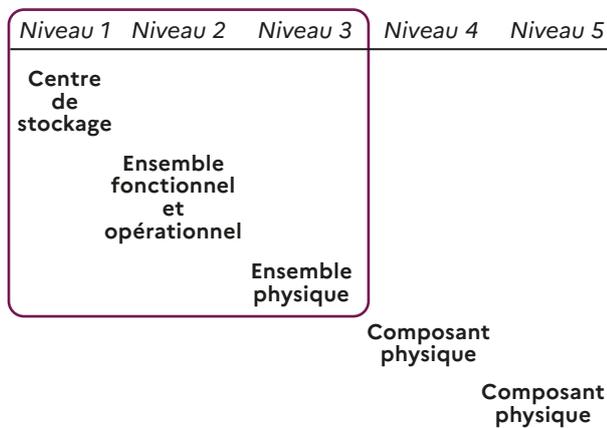
Seuls les niveaux 1 à 3 sont considérés comme validés par le projet (encadré pourpre). Les niveaux plus détaillés restent à être étudiés par la suite en fonction des besoins et des demandes de l'exploitant.

Pour réaliser les arborescences produites des deux sites, il a été réalisé une analyse fonctionnelle, géographique et organisationnelle. Les documents ayant servi à ces analyses sont les suivants :

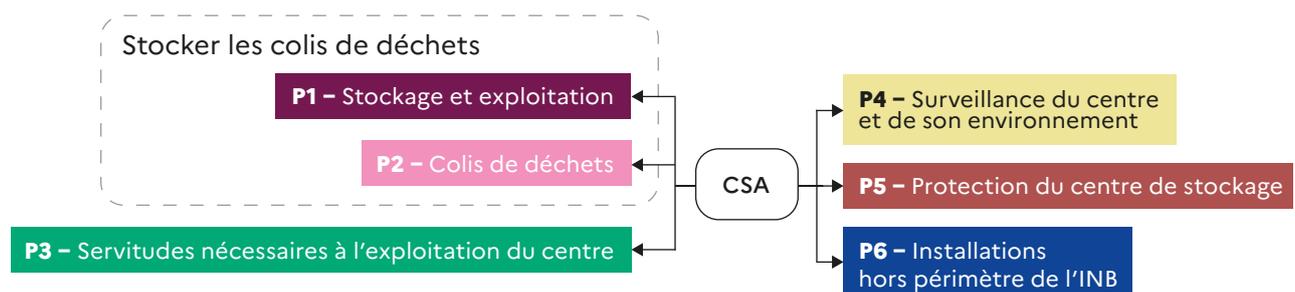
- les règles générales d'exploitation des sites (RGE du CSA et RGE du Cires);
- le rapport de sûreté pour le CSA (chapitres sur la description des centres et de l'exploitation du centre).

Une table de classification des ouvrages des centres a été ensuite produite, compatible avec les règles de codification existantes (gestion documentaire, GMAO).

## PRINCIPE DE L'ARBORESCENCE RETENU



## EXEMPLE DE PBS PRODUITE POUR LE CENTRE DE STOCKAGE DE L'AUBE (deux premiers niveaux)



# Les cas des hyperviseurs

## LA CHAÎNE DE VALEUR DE L'INFORMATION: TRANSFORMER LES DONNÉES EN DÉCISIONS

Dans notre ère numérique, les sites industriels comme ceux de l'Andra génèrent quotidiennement une quantité considérable de données. Cependant, ces données brutes, aussi nombreuses soient-elles, ne créent pas de valeur par elles-mêmes. Pour comprendre comment transformer ce potentiel en valeur réelle, imaginons le parcours d'une goutte d'eau qui deviendrait une perle précieuse.

### Première étape: la collecte des données

Tout commence par la collecte des données brutes. Ces données sont comme des gouttes d'eau dispersées: individuellement, elles ont peu de valeur. Sur un site de stockage, ces données peuvent provenir de multiples sources: capteurs de surveillance, rapports d'inspection, mesures environnementales, ou encore données de traçabilité des colis. À ce stade, ces informations sont fragmentées et difficiles à exploiter.

### Deuxième étape: la transformation en information

La transformation des données en information est comparable à la cristallisation de l'eau en une forme plus structurée. Cette étape cruciale consiste à trier, organiser et contextualiser les données brutes pour leur donner du sens. Par exemple, lorsque les relevés de température d'un entrepôt sont mis en relation avec les normes de sécurité et l'historique des mesures, ils deviennent une information exploitable sur la conformité du stockage.

### Troisième étape: la présentation de l'information

L'information, aussi pertinente soit-elle, doit être présentée de manière claire et accessible pour être utile. C'est comme polir notre cristal pour en révéler

l'éclat. Cette étape utilise des interfaces visuelles intuitives, des tableaux de bord dynamiques, ou encore des représentations en 3D, permettant aux opérateurs de comprendre instantanément la situation et ses enjeux.

### Quatrième étape: la prise de décision

C'est ici que notre « perle » révèle sa véritable valeur. Lorsque la bonne information parvient à la bonne personne au bon moment, elle permet une prise de décision rapide et éclairée. Un responsable d'exploitation qui reçoit une alerte contextualisée sur une anomalie peut immédiatement prendre les mesures nécessaires, évitant ainsi des retards ou des incidents potentiels.

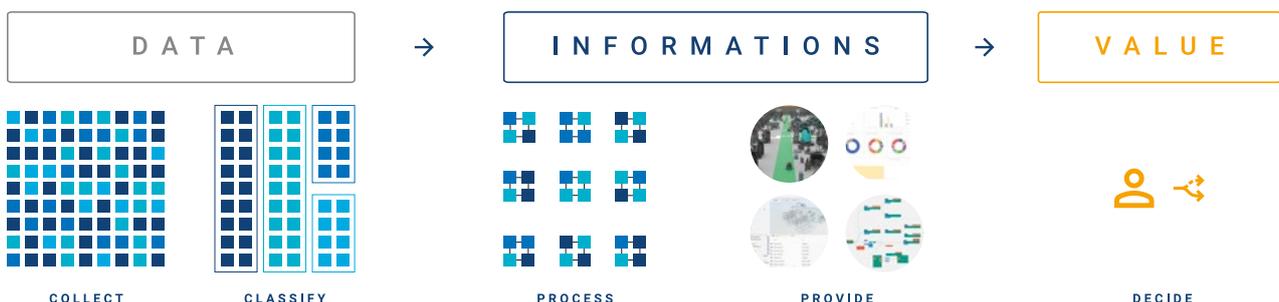
## LA CRÉATION DE VALEUR

La valeur émerge de cette chaîne de transformation lorsque les décisions prises améliorent concrètement les opérations: une maintenance préventive réalisée au bon moment, une optimisation des flux de déchets, ou encore une réduction des temps d'intervention. Ces améliorations se traduisent par des gains tangibles: réduction des coûts, amélioration de la sécurité, optimisation des ressources.

Dans le contexte de l'industrie 4.0, cette chaîne de valeur est automatisée et optimisée grâce à des plateformes numériques intégrées. Ces systèmes, comme la solution CITADEL déployée dans le projet, agissent comme des catalyseurs qui accélèrent et fluidifient chaque étape du processus, transformant un déluge de données en un flux continu de décisions éclairées.

Cette approche systématique de la gestion de l'information représente un changement fondamental dans la manière dont les sites industriels sont exploités. Elle permet non seulement d'améliorer l'efficacité opérationnelle, mais aussi de créer un environnement où l'innovation et l'amélioration continue deviennent naturelles et systématiques.

## REPRÉSENTATION DE LA CHAÎNE DE VALEUR



# Viewer 3D/portail 3D

Tout au long du projet, de nombreux livrables sont mis à disposition des équipes et des collaborateurs.

04.

## LISTE DES LIVRABLES

- Nuages de points
- Photos 360°
- Plan topographique
- Modèle numérique de terrain
- Mesh
- Orthophotos
- Modèles 3D
- Données cartographiques

Chaque donnée individuelle peut être consultée et visualisée avec des outils spécifiques, outils plus ou moins onéreux et facile d'accès par les collaborateurs.

Il est donc important, voire crucial pour la réussite du projet de pouvoir donner accès aux données à un large éventail d'utilisateurs et ce tout au long du cycle de vie de l'ouvrage, ou des infrastructures concernées.

La mise en œuvre d'un viewer 3D et/ou d'un portail d'accès à la donnée 3D est donc nécessaire et doit être étudiée en amont du projet. L'objectif premier étant de visualiser les ouvrages dans leur contexte, pour les Ci2A, l'échelle étant plusieurs communes, voire un territoire.

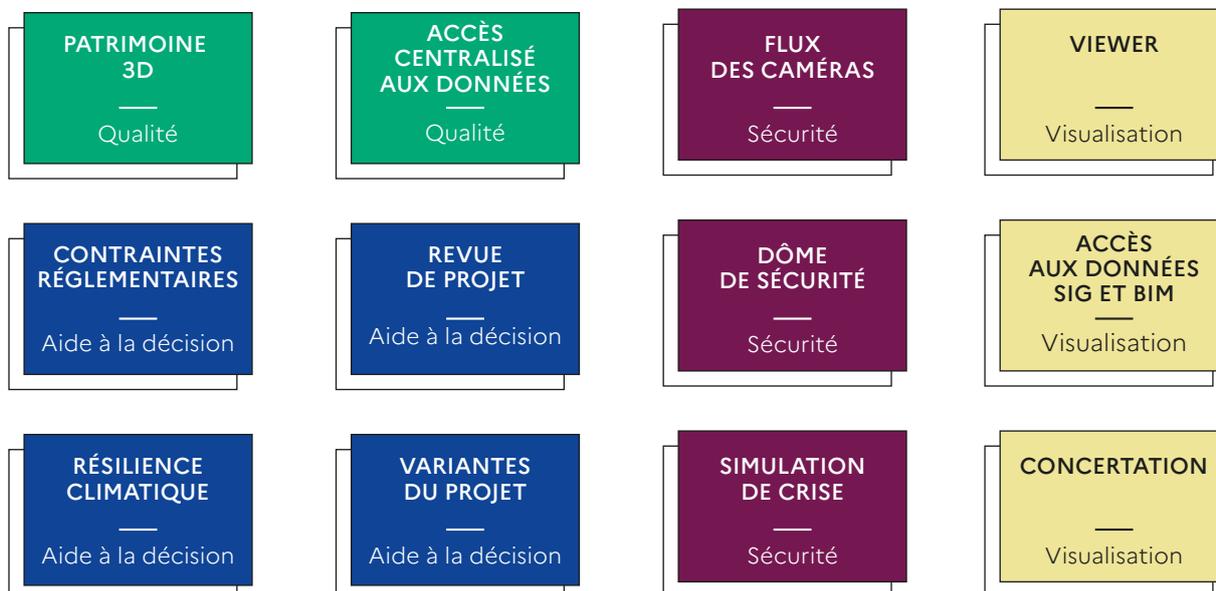
Il a été choisi de réaliser un démonstrateur BIM-SIG avec l'outil Terra Explorer de Skyline Software qui répond aux besoins précédemment exprimés.

## POINTS DE VIGILANCE QUANT À L'UTILISATION D'UN VIEWER 3D

- Définir un géoréférencement des données (Lambert 93 pour le projet Ci2ANum).
- Rédiger un processus de mise à jour des données (à quelle récurrence, qui s'en charge?).
- Vérifier la compatibilité de l'architecture informatique (utilisation d'un cloud ou d'un stockage sécurisé sur un serveur dédié?).
- Former des référents logiciel.
- Réaliser éventuellement un contrat d'AMO spécifique pour réaliser la maintenance et les développements du logiciel.

Tous ces sujets sont à étudier en amont et tout au long du projet pour garantir la continuité numérique et fiabiliser les données produites et stockées.

## EXEMPLES DE FONCTIONNALITÉS ATTENDUES



# 05.

## Extraits des fiches des cas d'usages



# Formation des opérateurs

Désilotage

Gestion des connaissances

Maîtrise des installations

Simulation

## Expression du besoin

- Il a été exprimé le besoin de simuler des scénarios d'interventions afin d'optimiser la conception, vérifier la faisabilité des opérations de maintenance et entraîner les opérateurs notamment sur les boîtes à gants de tri des déchets à faible activité.
- L'exploitant-mainteneur souhaite parfaire ses connaissances générales liées aux installations et améliorer la prévention des risques des collaborateurs vis-à-vis de certains procédés et/ou opérations de maintenance.

## Livrables

- Nuages de points de l'ensemble du local des boîtes à gants.
- Modules de formation en VR pour:
  - manipulation via les trous à gants;
  - changement des filtres;
  - simulation de crise (déclenchement d'une balise).

## Facteurs de réussite

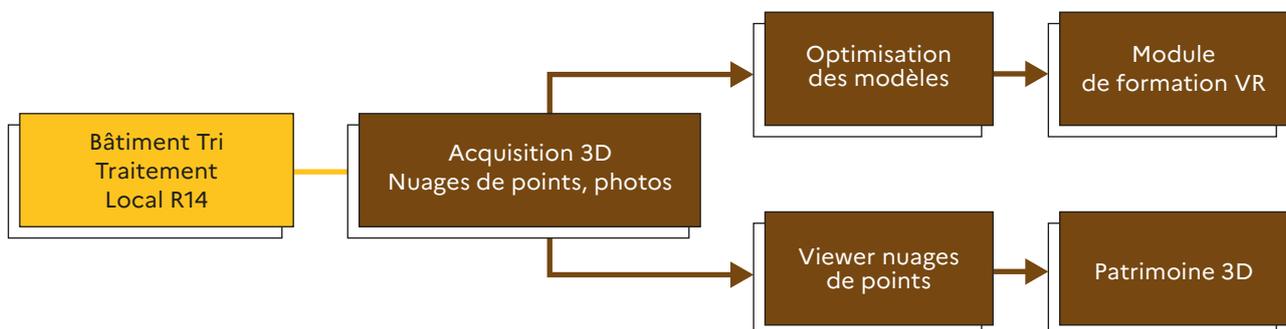
- Disponibilité des acteurs.
- Travailler les scénarios avec les opérateurs terrain et les services concernés.
- Développer une plateforme ergonomique et accessible par les utilisateurs.
- Partager l'expérience VR à tous les utilisateurs (ateliers de co-création).

## Technologies

- LiDAR statique et photogrammétrie, viewer ATIS.cloud, photos 360°, casque de réalité virtuelle.

## Points de vigilance

- Choix du casque de réalité virtuelle (technologie qui évolue rapidement).
- Bien rédiger les scénarios envisagés.
- Outils de modélisation et d'optimisation des polygones.
- Développements et outils spécifiques à Human Games.



# Simulation du remplacement du malaxeur du CSA

Gestion des connaissances

Maîtrise des installations

Simulation

## Expression du besoin

- Situé dans l'Atelier de Conditionnement des Déchets (ACD), le malaxeur du site doit être prochainement remplacé par un matériel neuf.
- L'exploitant souhaite simuler le démontage du matériel usagé et son évacuation, ainsi que son remplacement, pour trouver les solutions d'acheminement (escalier, couloir, sas...) et de montage de l'équipement et sécuriser ainsi la faisabilité de l'opération.
- L'exploitant souhaite également consolider la faisabilité des modifications de conception qui auront lieu lors de cette opération de maintenance.

05.

## Livrables

- Un nuage de points de l'ensemble du local et de ses annexes (couloir, escalier et sas) et du malaxeur tel qu'existant sera livré à l'exploitant et consultable avec l'outil ATIS.cloud.
- Une modélisation à partir du nuage de points sera réalisée et intégrée dans ATIS.cloud.
- Une modélisation des nouveaux équipements et/ou déplacement des équipements modifié.
- L'utilisation de la réalité augmentée sera testée pour valider le scénario retenu.
- Compilation des modèles de l'existant et des équipements nouveaux et modifiés utilisés en cours pour revue technique et synthèse.

## Facteurs de réussite

- Intégrer dès le départ les besoins des services notamment pour définir le niveau de précision du scan et de la modélisation.
- Disponibilité des acteurs.
- Réception du fournisseur d'un modèle 3D exploitable (format step).
- Formation du service aux outils de visualisation 3D (Navisworks et ATIS.cloud).

## Technologies

- LiDAR statique et photogrammétrie, viewer ATIS.cloud, photos 360°, réalité virtuelle.

# Scan to BIM du Centre de stockage de l'Aube

Désilotage

Gestion des connaissances

Maîtrise des installations

## Expression du besoin

- Sur le CSA, le plan d'ensemble topographique historique est mis à jour sur les zones concernées par des travaux de maintenance. De nombreuses zones ne sont pas à jour et le plan est en Lambert 1 Nord.
- Le service EMT souhaite disposer d'un plan à jour sur le périmètre foncier du CSA dans le système géodésique RGF93, avec le système de projection Lambert 93 CC48. Cela permettra d'améliorer la connaissance générale et d'anticiper les évolutions à venir du site.

## Livrables

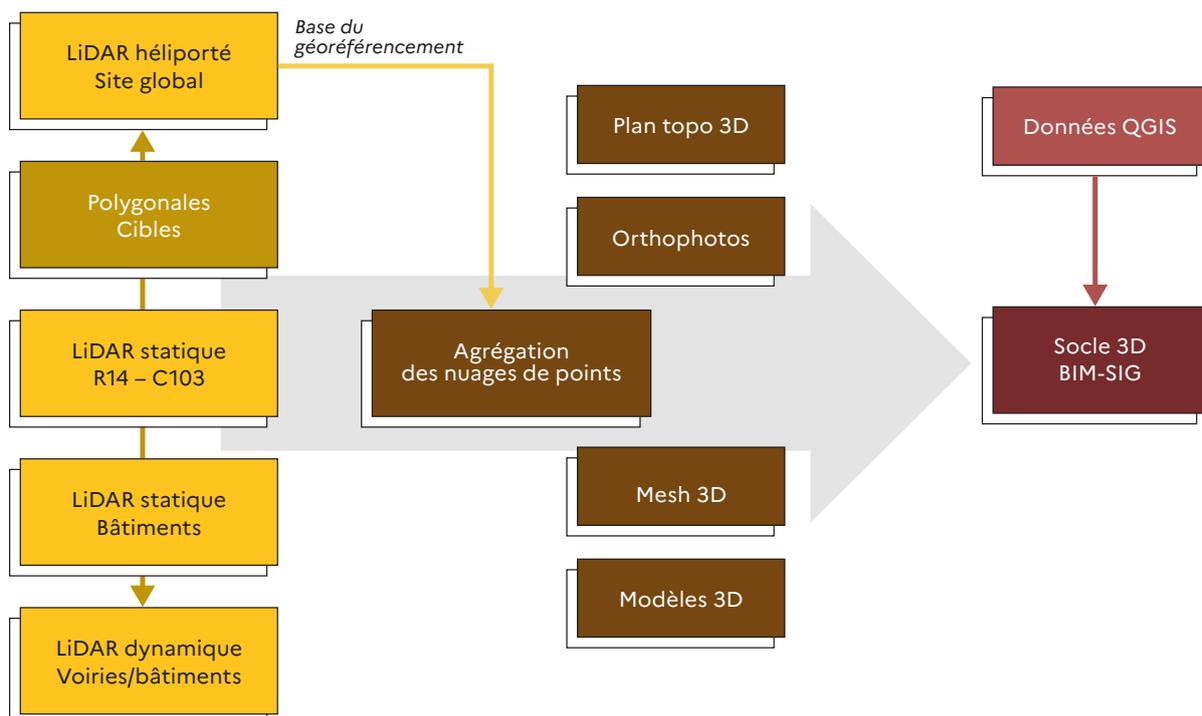
- Plusieurs levés sont envisagés pour répondre aux besoins:
  - un levé photogrammétrique par drone des bâtiments;
  - un levé LiDAR statique des bâtiments (ACD et services);
  - un levé LiDAR dynamique pour les voiries et bâtiments;
  - un levé LiDAR héliporté de l'ensemble du site.
- Un plan topographique du site au 1/200<sup>e</sup> et un MNT seront livrés en Lambert 93 CC48 au format .dwg.
- La modélisation simplifiée des bâtiments alimentera notamment les hyperviseurs.

## Facteurs de réussite

- Prise en compte des besoins du service EMT, notamment sur la charte graphique topo et l'analyse des documents existants.
- S'assurer de la coordination des levés et des interfaces entre les périmètres de chaque prestation.
- Structuration des données.

## Technologies

- LiDAR héliporté, statique et photogrammétrie, drone, viewer ATIS.cloud.



# Un hyperviseur pour le suivi des contrôles colis

Désilotage

Gestion  
des connaissances

Maîtrise  
des installations

Simulation

## Expression du besoin

- Le contrôle colis est essentiel dans la chaîne de production du CSA. Ce contrôle fait intervenir plusieurs services et alimente les informations des colis tout au long de ce processus.
- Plusieurs bases de données coexistent en parallèle en interface avec des outils existants. Les enjeux sont importants, notamment la connaissance du taux d'occupation des équipements et la capacité de prise en charge et de traitement des colis à contrôler.
- La centralisation et la fiabilisation des données et la création d'indicateurs spécifiques permettraient d'optimiser le cycle du contrôle colis.

## Livrables

- Interface utilisateur lié à une base de données consolidées, liens avec les outils existants.
- Représentation simplifiée en 3D du processus contrôle colis.
- Dématérialisation des formulaires sur tablette PC à destination de l'opérateur industriel.

## Facteurs de réussite

- Prise en compte des exigences du service contrôle colis.
- Identification des interfaces avec les services concernés, en amont et en aval.
- Interface utilisateur qui répond aux besoins (lisible, simple, indicateurs essentiels).
- Formation, accompagnement aux changements.

## Technologies

- LiDAR statique et photogrammétrie, solution Citadel.

05.

# Démonstrateur BIM-SIG d'accès à la donnée 3D

Désilotage

Gestion  
des connaissances

Maîtrise  
des installations

Simulation

## Expression du besoin

05.

- De nombreuses données géoréférencées coexistent sur le site du CSA, plan topographique, plan des réseaux, couches SIG, modèles 3D...
- Les opérations de maintenance et de réparation se basent sur ces données de l'existant.
- Pour les travaux neufs, ces données sont essentielles.
- Centraliser ces données permettrait donc de gagner du temps aux services et d'aider à la décision et à la concertation.

## Livrables

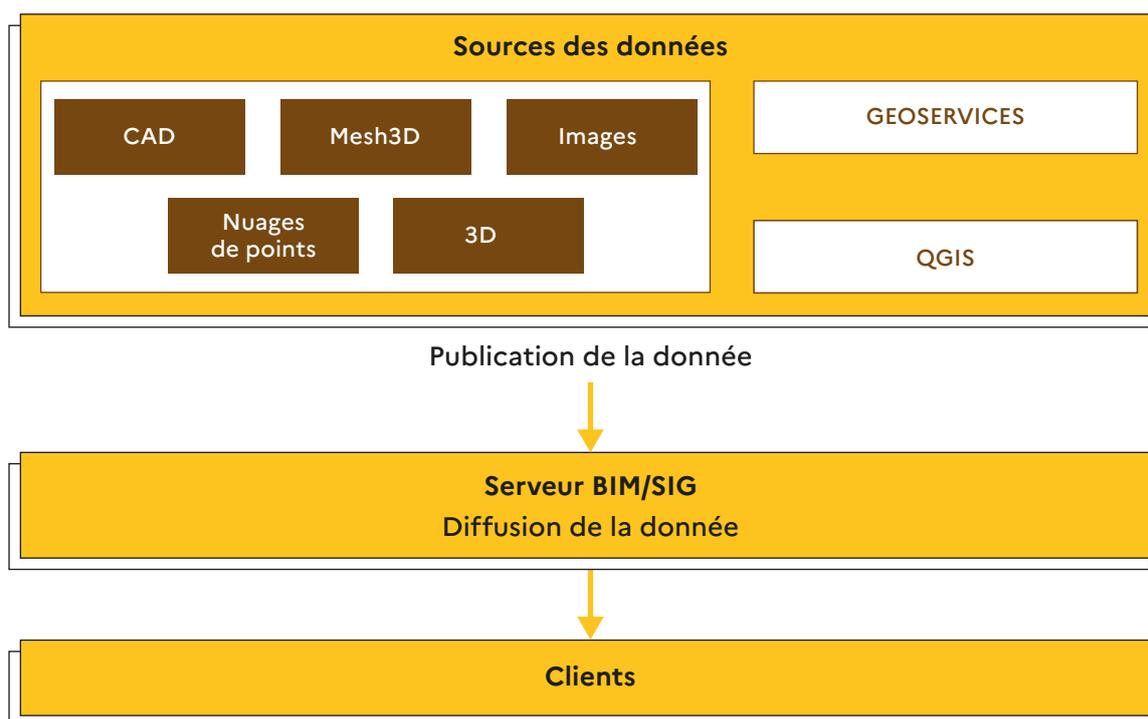
- Ce portail construit sur la base d'un viewer 3D devra permettre l'accès aux données géoréférencées des sites du CI2A disponibles sous QGIS.
- Un socle 3D du CSA est construit sur la base du LiDAR Hélicopté (MNT, orthos) et intégré dans le viewer 3D. Une connexion avec QGIS est mise en place pour charger les couches SIG existantes (foncier, BD Topo, environnement...). Les bâtiments sont intégrés au format Mesh 3D et IFC.
- Le viewer est installé sur les PC des collaborateurs et les données stockées sur un serveur de l'Andra.

## Facteurs de réussite

- Associer tous les services concernés par cette démarche, EXP, EMT, M2SI et SI.
- Anticiper en amont l'architecture informatique pour alimenter ce service SIG 3D.
- Accompagner ce déploiement en relation avec les services existants qui proposent déjà des services de données géoréférencées.

## Technologies

- SIG et streaming 3D.



# Conclusion 06. et perspectives



# Synthèse des résultats

Tous les cas d'usages principaux ont été réalisés dans les temps pour répondre au mieux à l'expression des besoins émis par l'exploitant mainteneur. Le projet a permis de constituer un socle solide, qui permettra à l'Andra de poursuivre la transformation digitale de ses centres de stockage dans l'Aube.

06.

Ce socle est constitué :

- **d'un patrimoine numérique 3D :**
  - les modèles 3D du local R14 du Cires (local boîte à gants de traitements des fioles de scintillation) et du local C103 (malaxeur) et de ses abords (couloirs, escaliers),
  - un socle BIM-SIG du site du centre de stockage de l'Aube (CSA) (nuages de points, plans topographiques 3D, couches cartographiques) et Les modèles 3D des bâtiments du CSA,
  - les nuages de points de tous les relevés LiDAR;
- **des plateformes logicielles ou technologiques de maturité industrielle :**
  - un module de formation en réalité augmentée pour former les opérateurs aux traitements des fioles de scintillations dans une boîte à gants du Cires,
  - un hyperviseur pour piloter le contrôle des colis du CSA,
  - un hyperviseur pour piloter les contrôles du laboratoire du CSA;
- **des méthodologies et de structurations des données intégrant les évolutions futures :**
  - le choix d'un référentiel géographique commun,
  - les PBS des sites (premiers niveaux) ainsi qu'une proposition de classification des modèles BIM en cohérence avec les règles déjà existantes,
  - la prise en compte de l'ensemble des témoignages des intervenants et des besoins exprimés.



## **Les conditions de réussite principales du projet**

- **Un tel projet n'a été possible qu'avec la participation active des futurs utilisateurs et l'organisation de nombreux ateliers d'échanges. La communication vers tous les acteurs du projet est aussi primordiale et la mise en place d'une comitologie adaptée est nécessaire.**
- **Le choix des partenaires qui composent le schéma industriel autour du projet, notamment dans leur maturité à comprendre et utiliser les technologies nécessaires, facilite les échanges techniques et la mise en œuvre des cas d'usage.**
- **Le pilotage du consortium est aussi clé pour réussir à tenir les délais. Un planning par tâche est nécessaire ainsi que l'identification des exigences clés du projet. Un plan de management du projet doit donc être établi, suivi et partagé.**

# Défis à relever et opportunités futures

De nombreux défis techniques et humains ont été relevés pour ce projet. Les partenaires ont dû s'adapter aux contraintes de planning des acteurs du projet, ainsi qu'au fonctionnement d'un consortium. La mise en place des outils numériques et leur intégration dans l'architecture de l'Andra ont été facilitées par une communication de qualité entre tous les services et les partenaires.

Cependant il reste encore un long chemin à parcourir pour finaliser les développements et surtout de maintenir les outils sur le long terme. De nouveaux besoins sont apparus tout au long du projet qui n'ont pas été intégrés dans le périmètre des études et des développements. Ainsi, des pistes de développement existent concernant les hyperviseurs et leur intégration dans un processus plus global de suivi des colis dans le site du CSA.

L'utilité de la réalité augmentée a été prouvée et mérite d'être déployée pour préparer, par exemple, des opérations de maintenance dans des locaux confinés en zone nucléaire.

Les modèles BIM constitués ont été pensés pour être enrichis pour alimenter le patrimoine 3D des sites en exploitation.

06.

---

« Le projet Ci2ANum est un très bel exemple de coopération entre acteurs qui ont répondu présent et apporté leurs connaissances pour livrer des outils et proposer des méthodes innovantes à un exploitant mainteneur.

*Les partenaires et l'Andra ont su travailler ensemble et saisir l'opportunité de participer à un projet soutenu par France relance et Bpifrance. Tout le travail réalisé contribue à faire avancer la filière vers l'ambition de l'entreprise 4.0 et d'accompagner les acteurs vers la transition numérique des métiers. »*

---

---

**Andra****Sylvain Guilloteau**

*Ingénieur Jumeaux Numériques  
Direction opérationnelle du Programme Cigéo  
Département intégration système  
Service maquette numérique, synthèse,  
infographie & système d'Information technique*

E-mail: [sylvain.guilloteau@andra.fr](mailto:sylvain.guilloteau@andra.fr)  
Mob: +33 (0)6 80 92 85 05

1-7, rue Jean-Monnet  
92298 Châtenay-Malabry Cedex

---

**Assystem****Brice Roffino**

*Chef de projet  
Leader Digital BU C2D*

E-mail: [broffino@assystem.com](mailto:broffino@assystem.com)  
Mob: +33 (0)6 73 08 98 41

2, rue du Pont Noir  
26700 Pierrelatte

---

**ATFF MESURES**

E-mail: [info@atff.fr](mailto:info@atff.fr)  
Tél.: +33 (0)4 80 48 82 84  
Mob.: +33 (0)7 61 74 80 28

---

**ATIS.cloud | CYDIS****Florian Fauconnet**

E-mail: [florian@cydis.fr](mailto:florian@cydis.fr)  
Tél.: +33 (0)4 11 92 04 00  
Mob: +33 (0)6 63 09 92 29  
5, avenue du Pré Félin  
74940 Annecy-le-Vieux - France

---

**Human Games****Deise Mikhail**

*Co-founder*  
E-mail: [deise.mikhail@humangames.tv](mailto:deise.mikhail@humangames.tv)  
Tél.: +33 (0)9 67 20 94 99  
Mob: +33 (0)6 80 51 30 64

16, rue de Regnieville  
54000 Nancy - France

---

**SPARTE****Benjamin Girard**

*CEO*  
E-mail: [contact@sparte.io](mailto:contact@sparte.io)  
Mob.: +33 (0)6 67 38 90 14  
51, rue Émile Decorps  
69100 Villeurbanne - France



**AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION  
DES DÉCHETS RADIOACTIFS**

1-7, rue Jean-Monnet  
92298 Châtenay-Malabry cedex  
[www.andra.fr](http://www.andra.fr)

