



Livre Blanc 2023

Enseigner avec des jumeaux numériques immersifs et interactifs



Cédric Facon, CESI LINEACT
& Solveig Fernagu, CESI LINEACT

Avec la contribution de :

Pour Arts et Métiers Sciences et Technologies :

Maëva Coffin
Sylvain Fleury
Saida Mraïhi
Simon Richir
Lionel Roucoules

Et leurs porteurs de projet : Amine Ammar,
Richard Béarée, Jérémie Bourgeois,
Emmanuelle Chavanne, Louis Denaud,
Guillaume Fromentin et Florent Ravelet

Pour CESI :

David Baudry
Lucie Cuvelier
Hugues Delalin
Sarah Guez

Et leurs porteurs de projet : Aline Becq,
Nicolas Briant, Hugues Delalin, David Garcia,
Ludovic Renaud et Lucas Reyes

Pour le CNAM :

Sandrine Dewez
Maité Sylla

Et leurs porteurs de projet : Nicolas Alferez,
Amélie Danlos, Emmanuelle Galichet,
Antoine Legay, Luc Laurent et Simon Marie

« Croyez-vous que le monde soit inerte, lourd, mécanique, substantiel et mort ? Croyez-vous que le monde soit réel ? Nous savons que la chauvesouris, la baleine et l'humain ne vivent pas tout à fait dans le même monde. Nous savons que cette chaise, cette feuille de papier, cet arbre, ce corps sont aussi des nuages électromagnétiques vibrant dans le vide et qu'ils n'ont la forme, la couleur et le sens que nous leur prêtons que pour nous. Nous savons que la moindre de nos pensées influence nos actes, que nos actes influencent nos perceptions, que nos perceptions influencent nos pensées et que notre vie impermanente s'engendre de cet instable tourbillon. Pour la conscience, ses sensations, ses désirs, son imagination, ses inférences, son discours perpétuel et pluriel, sa logique, son délire de signification, sa quête de sens, pour la conscience, dis-je, le monde est virtuel » (Lévy, 2000, p. 20).

INTRODUCTION	6
1. UN CONTEXTE ET DES ENVIRONNEMENTS PEDAGOGIQUES EN CONSTANTE EVOLUTION	9
1.1. Enjeux du projet	10
1.2. Origine et intention du projet	10
1.3. Le jumeau numérique by JENII	11
1.4. Les projets de jumeaux numériques de JENII.....	12
2. LES JUMEAUX NUMERIQUES (JN) DANS L'INDUSTRIE.....	13
2.1 La naissance du concept de jumeau numérique	14
2.1.1 "Houston, I believe we've had a twin here": balbutiements d'une conceptualisation	14
2.1.2 Au-delà du virtuel, une conceptualisation de plus en plus fine	15
2.1.3. Jumelage numérique, quelques incontournables	15
2.2 Des définitions multiples et évolutives	16
2.2.1. Une définition qui s'affirme	16
2.2.2. Une définition qui se stabilise	17
2.2.3. Des usages qui se développent	21
2.2.4. Des frontières qui se clarifient : Jumeau numérique et simulateur	21
2.3 Classer, nommer, structurer les JN : quelques typologies descriptives	23
2.3.1. À partir du niveau d'intégration et de maturité de la relation entre les entités physiques et virtuelles	23
2.3.2. À partir de leurs usages	25
2.3.3. À partir de la construction de gémellité: une typologie selon le cycle de vie du produit	26
2.3.4. À partir des fonctions de base	27
2.3.5. À partir des phases PLM	27
3. JUMEAU NUMERIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT (JNE)	29
3.1. Des Jumeaux Numérique pour/dans l'enseignement : revue de littérature	33
3.2. Apprendre avec des jumeaux numériques pour l'enseignement	38
3.2.1. L'apprendre avec les technologies ?	38
3.2.2. L'apprendre avec les JNE : <i>designer</i> l'expérience d'apprentissage	50
3.3. <i>Designer</i> l'expérience d'apprentissage avec les technologies, conditions de réussite	51
3.3.1. Apprendre avec le numérique, quelques principes pour la e-formation.....	51
3.3.2. Apprendre avec le numérique : quelques principes pour la formation immersive	52
3.3.3. Apprendre avec la réalité virtuelle : quelques principes.....	53

Ancrage situationnel.....	60
3.3.4. Apprendre avec la simulation.....	63
3.4.5. De la nécessaire évolution du didactique vers le pédagogique	66
3.3.6. Apprendre grâce à la scénarisation	66
Principe d'expérimentation	68
4. LA SCÉNARISATION PÉDAGOGIQUE POUR <i>DESIGNER</i> L'EXPÉRIENCE D'APPRENTISSAGE.....	70
4.1. La construction de scénarios pédagogiques.....	71
4.2. Une diversité de scénarios possibles.....	73
5. CONCLUSION, LES JUMEAUX NUMÉRIQUES D'ENSEIGNEMENT : LES DEFIS à RELEVER.....	79
LIVRET COMPLEMENTAIRE : Fiches Outils.....	82
FICHE OUTIL 1 : Dispositif pédagogique	83
Un dispositif pédagogique reflète des principes pédagogiques.....	83
Les principes pédagogiques.....	83
Un formateur a pour rôle et pour mission	83
Un dispositif pédagogique	83
Un dispositif pédagogique est porteur d'objectifs.....	84
Un dispositif pédagogique articule des méthodes pédagogiques	84
Un dispositif pédagogique est porteur de scénarios pédagogiques	87
Pour aller plus loin	88
FICHE OUTIL 2 : Les modes d'engagement dans l'apprentissage.....	89
Motivation intrinsèque et extrinsèque	89
Les motifs d'entrée en formation.....	90
La motivation vs engagement sociocognitif et socio-affectif.....	91
Pour aller plus loin	95
FICHE OUTIL 3 : les voies de l'immersion	96
La Réalité Virtuelle (VR).....	96
La Réalité Augmentée (AR).....	96
La Réalité mixte (MR)	96
La Réalité étendue (XR)	96
L'immersion pédagogique et ses enjeux.....	97
Pour aller plus loin	100
FICHE OUTIL 4 : ADDIE	101
La méthode ADDIE	101

La méthode MISA	107
LIVRET COMPLEMENTAIRE : Présentation des jumeaux numériques de JENII	109
ENSAM	110
CNAM	111
CESI	112
CEA LIST	113
Présentation des projets de jumeaux numériques de JENII.....	114
Présentation des 15 jumeaux de JENII	114
Les Jumeaux de l'ENSAM.....	115
Atelier de Bordeaux - Atelier Usine flexible Practice 4.0.....	115
Atelier de Lille – Usine Agile	118
Atelier d'Angers – Atelier fonderie.....	121
Atelier d'Aix-en-Provence – Atelier fonderie	124
Atelier Cluny – Atelier usinage haute performance	127
Atelier Cluny – Atelier de déroulage	131
Atelier Metz – Atelier forgeage VULCAIN.....	135
Atelier Paris – Atelier turbomachine	139
Les Jumeaux du CNAM	142
Paris – Laboratoire de Chimie.....	142
Paris – voiture électrique.....	145
Paris – Avion léger	148
Paris – Atelier démantèlement centrale nucléaire.....	155
Les Jumeaux de CESI	157
Rouen – Usine Flexible de Production.....	157
Nanterre – Unité de Fabrication Additive Métallique	163
LIVRET COMPLEMENTAIRE : Case Studies.....	170
Case study : Ligne d'assemblage flexible et reconfigurable avec intégration de solution cobotique et de robots mobiles : ENSAM - Le jumeau numérique pour mieux appréhender l'industrie.....	171
Case study : Projets Lean Manufacturing et Système industriel automatisé : CESI – Apprentissage expérientiel – Rouen – Usine Flexible de Production.....	179
Projet CESI.Bike – Lean Manufacturing	181
Projet système automatisé.....	189
Perspectives de nouveaux développements de modules	192

Actions de sensibilisation et de diffusion de la culture scientifique, technique et industrielle.....	193
Case study : Projet Laboratoire de chimie : CNAM - Le Jumeau numérique immersif	194
LIVRET COMPLEMENTAIRE : Metavers pour l’enseignement	202
Cas particuliers des jumeaux numériques de campus ou Campus Virtuels (CV)	203
La “seconde life” du Métavers ?.....	203
Pourquoi le Métavers revient sur le devant de la scène ?	205
Caractéristiques du Métavers.....	206
Campus virtuels et “métaversité”	208
Intérêts de l’utilisation pédagogique d’un campus virtuel.....	210
Quelle vision au sein de JENII ?	212
Appropriation par les étudiants et par les enseignants	214
Usages des campus virtuels, exemples	217
Exemples de Métavers	217
Scénario d’usage d’un campus virtuel, porte d’entrée vers des Jumeaux Numériques	219
BIBLIOGRAPHIE	222
GLOSSAIRE	235

INTRODUCTION

La e-formation et la e-éducation ont produit de nombreux savoirs ces dernières années sur “comment former et éduquer à distance et par la distance ?” Les nouveaux **Environnements numériques d'apprentissage** permettent aujourd'hui une prise de distance intéressante avec les conditions de l'apprentissage en ligne, et initient un mouvement sans précédent de digitalisation des processus et procédés d'apprentissage. Les expériences déployées pendant la pandémie, heureuses ou malheureuses, ont sans aucun doute accéléré le mouvement, même s'il faut reconnaître que le retour à la normale s'est combiné au désir de se retrouver physiquement.

Ce retour à la normale s'accompagne de ce fait d'une recrudescence des **dispositifs multimodaux et multicanaux** qui semblent offrir de nombreux avantages en matière **d'appropriation des apprentissages, d'individualisation, de différenciation pédagogique et d'inclusion scolaire**, dès lors qu'ils permettent de s'adapter à une variété de profils d'apprentissages et de savoirs à enseigner. Ces dispositifs tout à distance ou mixtes bouleversent, complètent et enrichissent les modalités d'apprentissage traditionnellement mises en œuvre dans les espaces d'apprentissage en transformant radicalement les procédés d'apprentissage tant sur le plan technique que sociocognitif. On voit ainsi toute une littérature se déployer autour des conditions de réussite de l'apprendre avec le numérique ou du numérique pour apprendre (Amadiou & Tricot, 2014; Blandin, 2020; Collin, Denouël, Guichon, & Schneider, 2021; Jézégou, 2019b; Lafleur & Samson, 2019) et ce notamment autour de concepts centraux tels que la **présence à distance**, la **distance transactionnelle**, le **soutien à l'autonomie**, etc.

Le déploiement de ces environnements numériques d'apprentissage combiné au développement des technologies s'ouvre aujourd'hui à de nouvelles potentialités autour d'**environnements virtuels et/ou immersifs**

d'apprentissage, dépassant ainsi la simple utilisation d'un ensemble d'applications et de logiciels soutenant les activités d'enseignement, de formation et d'apprentissage.

Ces environnements fortement technologisés (simulation, réalité augmentée, réalité virtuelle, etc.) répondent au besoin de se rapprocher du réel des situations professionnelles pour faciliter les apprentissages et leur transfert. Les milieux de la santé et de la sécurité en ont d'ailleurs été à la fois les premiers promoteurs et bénéficiaires. Ils se présentent comme une solution a priori pertinente pour développer des compétences au plus près des situations professionnelles (en termes de vécu ou de représentations). La simulation, la réalité virtuelle ou augmentée – qui figurent en tête de prou des usages – désignent les technologies émergentes des environnements numériques d'apprentissage ; émergentes parce qu'elles n'ont pas encore livré tous leurs mystères en matière d'intégration dans les processus d'apprentissage (et la manière dont elles les impactent ou les transforment). D'autres outils apparaissent actuellement sur le marché de la formation comme l'intelligence artificielle pour ne citer qu'elle (sous formes de fonctions : adaptative learning, agents virtuels, etc., sous formes de logiciel : chat GTP, Sparrow, etc.), mais aussi des technologies mixtes telles que les jumeaux numériques pour l'enseignement. Ces derniers, s'ils utilisent, entre autres, la réalité virtuelle ou augmentée, mais aussi la simulation, n'ont pas pour vocation première l'apprentissage, mais celle de modéliser des systèmes industriels pour faciliter des activités de recherche et développement, de conception ou de mise en production (Havard & Baudry, 2019;

Richard, Havard, Trigunayat, & Baudry, 2018)¹. Par exemple, l'utilisation de jumeaux numériques du bâtiment permet d'étudier des scénarios d'économie d'énergie ou les fonctionnalités à destination de ces économies d'énergie (Assila, Baudry, & Havard, 2019; Havard, Baudry, Jeanne, Louis, & Savatier, 2021; Richard, Havard, His, & Baudry, 2021).

Aujourd'hui le monde de la formation intègre cette technologie qui ouvre des possibles pédagogiques (en termes de scénarios pédagogiques, de gamification, d'individualisation des apprentissages, etc.) et de formation au plus près des conditions réelles du travail (Badets, Blandin, Havard, & Baudry, 2021; Badets, Havard, Richard, & Baudry, 2020). Leur utilisation offrirait de nombreuses opportunités telles que la démultiplication des équipements de formation, des espaces pédagogiques, etc. pour faire vivre des expériences immersives (voire interactives) formatives. Ces dernières permettent entre autres la découverte de produits ou de systèmes modélisés (une machine, un atelier, une fonctionnalité, etc.). Par exemple, la modélisation numérique d'un atelier de production qui permet de travailler sur la performance industrielle sans apport ou gaspillage de matières. Leur utilisation et diffusion peut être poussée à l'extrême en les intégrant dans des mondes virtuels (des métavers).

Néanmoins, l'introduction de ces technologies pour apprendre dans les processus d'enseignement et les apprentissages n'est pas sans poser de question. Si la ressource numérique est parfois incontournable pour réaliser une tâche, elle n'est pas en soi la **tâche d'apprentissage**, qui renvoie, elle, aux activités cognitives qui sont mises en œuvre pour apprendre (Amadiou, 2021). Il convient en ce sens de réfléchir à la manière dont l'introduction d'outils numériques dans un environnement d'apprentissage fait sens, et les

jumeaux numériques pour enseigner n'échappent pas à ce questionnement : comment permettent-ils d'accompagner l'activité d'apprentissage de manière à soutenir efficacement l'apprentissage que cela soit du côté des **dispositions à apprendre** ou des **prérequis d'apprentissage**, des contraintes imposées par l'environnement d'apprentissage (espace, lieu, matériel, pratiques pédagogiques, etc.), des caractéristiques de la ressource numérique (présentation des contenus, fonctions et modes d'interactions, nature et structuration des contenus, etc.), du niveau de complexité de la tâche d'apprentissage elle-même (objectifs, exigences cognitives et métacognitives, etc.), de la nature des connaissances à acquérir (procédurales, déclaratives, conditionnelles, etc.) ? C'est sur cette question que se penche notre livre blanc.

Nous verrons que les ressources technologiques (artefacts et instruments technologiques, etc.) sont à penser au regard de la manière dont elles permettent d'assister l'apprenant dans son activité d'apprentissage et sont à envisager de façon spécifique à l'apprentissage en cours ; sinon elles restent des « gadgets » coûteux et non indispensables qui finissent leur cycle de vie avant d'être usés ou dépassés (Badets, 2018; Blandin, 2010; Fernagu Oudet 2013; Mayen & Gagneur, 2017; Rabardel & Samurçay, 2006). S'il existe une production académique importante sur le numérique pour apprendre ou l'apprendre avec les technologies, les jumeaux numériques pour apprendre et enseigner ne sont que très peu documentés. L'objectif de ce livre blanc est d'apporter une contribution à cette connaissance des jumeaux numérique pour enseigner et apprendre, grâce à la mise en œuvre d'un ensemble de projets de conception et de déploiement de ces derniers au sein de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), du Conservatoire Nationale des Arts et Métiers

¹ Dans l'industrie, le jumeau numérique permet de modéliser et dupliquer des systèmes et des objets partiels ou entiers : un bâtiment, un avion, une ville, une chaîne de production logistique ou une usine, des produits, des processus, de manière à tester leur performance ou leur intégration dans des systèmes plus larges, les concevoir ou les évaluer, etc.

(CNAM), de CESI Ecoles d'Ingénieurs et du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA). Ces acteurs sont réunis pour l'occasion en équipe projet et en consortium sous le titre de Jumeaux Numériques Immersifs et Interactifs (JENII), projet financé pour partie par le programme d'investissement d'avenir (ANR – 21 – DMES – 00006). Parce que le consortium formé à cette occasion s'est donné pour objectif (1) de transformer le paradigme de la formation technologique par la mise à disposition des environnements réalistes de formation technologique, accessibles à distance et (2) de permettre le développement et la diffusion rapides des outils pédagogiques développés, toute une réflexion est engagée à la fois sur le concept de jumeau numérique pour enseigner et apprendre, et autour de l'idée de campus numérique ou de métavers.

Ce livre blanc sera donc l'occasion de définir ce qu'est un jumeau numérique pour enseigner et apprendre, de préciser des usages possibles et explorer les pistes de réflexion sur les conditions de leur **efficacité pédagogique**, de la multiplication de leurs usages et de leur diffusion au plus grand nombre d'utilisateurs. Pour cela nous avons analysé la littérature académique et scientifique concernant les technologies pour apprendre et/ou les environnements d'apprentissages médiés par les technologies (virtuels, immersifs, simulation), repéré et étudié des expérimentations d'apprentissage dans ces environnements afin de pouvoir formaliser un ensemble de principes pédagogiques permettant à ces environnements d'atteindre leurs objectifs d'apprentissage de la manière la plus efficace possible. Il s'agit notamment de comprendre comment ces environnements se distinguent d'autres environnements plus classiques d'apprentissage en termes de modalités, de moyens et d'effets sur les apprentissages, mais aussi en termes de contenus et de formes d'apprentissages.

Après avoir brossé le contexte, en constante évolution, des environnements pédagogiques

(partie 1) et avoir définis les jumeaux numériques et leurs apports dans l'industrie (partie 2), ce livre blanc avancera la notion novatrice de Jumeau Numérique d'Enseignement (JNE, partie 3). Une quatrième partie abordera ensuite la scénarisation pédagogique pour *designer* l'expérience d'apprentissage (partie 4.), avant de s'interroger, en conclusion sur les défis à relever autour des JNE. Au final, ce livre blanc va explorer :

- les conditions d'enseignement-apprentissage déployées dans ces nouveaux environnements de formation (apprentissage expérientiels, collaboratifs, hybrides, apprentissage par l'action, par la réflexion, par l'immersion, etc.),
- leurs spécificités et leurs ouvertures en termes de possibles pédagogiques (multimodalité, flexibilité, individualisation, inclusion, différenciation, etc.),

pour outiller un ensemble d'acteurs : les formateurs, les développeurs et les tuteurs, etc. (en termes de principes pédagogiques, d'indicateurs d'efficacité, de modalités pédagogiques : étayage, accompagnement, individualisation, transposition didactique, etc.), et s'adapter à de larges publics (scolaires, universitaires, empêchés, en insertion ou à la recherche d'emploi).

Il fera l'objet de différentes itérations avec les porteurs de projet JENII et les expérimentations mises en place et donnera lieu à une version 2 de ce document, complétée et complémentée d'ici à 2024.

1. UN CONTEXTE ET DES ENVIRONNEMENTS PEDAGOGIQUES EN CONSTANTE EVOLUTION



1.1. Enjeux du projet

Porté par Arts et Métiers, Cesi, le Cnam et le CEA Tech, le projet JENII (Jumeaux d'enseignement numériques immersifs et interactifs) est l'un des 17 lauréats de l'appel à manifestation d'intérêt « Demoes » 2021.

L'objectif de ce projet est de « *former des élèves ingénieurs grâce à des jumeaux numériques et donc de nouvelles méthodes d'apprentissage. C'est aussi les former pour utiliser ces outils, qu'ils seront amenés à rencontrer dans leur milieu de travail* » (Véronique Favier, ENSAM, responsable scientifique du projet JENII, News Tank, nov. 2022).

Les livrables du projet « *correspondent à une boîte à outils, qui comprend des démonstrateurs, sous la forme d'une plateforme de conception de jumeaux numériques, d'une plateforme de diffusion, d'un campus virtuel immersif et de jumeaux numériques pour tester cette boîte à outils* » (Véronique Favier, *ibid*). L'objectif est aussi de proposer des documents de référence et des guides pour créer des scénarii pédagogiques diffusables auprès de l'ensemble de la communauté académique au sens large.

1.2. Origine et intention du projet

L'évolution des pratiques numériques quotidiennes conduit à constater :

- en premier lieu, que l'industrie se transforme, utilise de plus en plus d'outils numériques et digitalise une partie de son système de production pour le piloter. Il est devenu nécessaire de préparer les étudiants à se saisir de ces transformations.
- En second lieu, que les étudiants sont de plus en plus à l'aise avec les écrans (et le numérique en général), un nombre

conséquent de jeunes à l'habitude de côtoyer des environnements virtuels (notamment au travers des jeux vidéo). Ces pratiques deviennent des opportunités pour créer des systèmes et des dispositifs de formation en phase avec leur appétence pour les technologies.

- En troisième lieu, la période de pandémie que nous venons de traverser a également contribué à multiplier ces usages et il semble important de les faire perdurer, car ils constituent de nouvelles manières de former (hybridation, individualisation, etc.) et de contribuer à l'efficacité pédagogique des dispositifs d'apprentissage.

L'intention de formation avec les jumeaux numériques est donc double :

- les étudiants rencontreront en entreprise des jumeaux numériques. Il s'agit d'apprendre à les utiliser, voire à les concevoir.
- Les jumeaux numériques constituent en tant que tels, des moyens d'apprentissage pour appréhender des environnements de travail et des procédures techniques. Il s'agit d'apprendre avec ces derniers par immersion dans des environnements reconstitués.

1.3. Le jumeau numérique by JENII

Au moment de la réponse à appel à projets, c'est la définition proposée par l'Alliance de l'industrie du futur (cf. QR code 1) qui a été retenue : « C'est une maquette virtuelle dynamique, qui vit en parallèle de l'usine réelle. Son intérêt est de représenter en permanence une usine existante, ou en devenir, et de suivre automatiquement ses évolutions. [...] C'est aussi un formidable outil de formation. Cette maquette peut être reliée à des capteurs installés sur les vraies machines de production afin de suivre son utilisation en temps réel (Alliance de l'industrie du futur²).



QR code 1 : Jumeau Numérique Levier majeur de la transformation digitale de l'industrie

Le projet JENII se focalise tout particulièrement sur des jumeaux numériques technologiques, c'est-à-dire des répliques de systèmes physiques dupliqués en systèmes immersifs et interactifs, tout en intégrant des questionnements autour de l'accessibilité (en termes d'outils, mais aussi d'inclusion).

Chacun des 14 jumeaux du projet disposera (Favier, *Ibid*) :

- **d'une représentation géométrique du système réel**, en réalisant une maquette numérique immersive.
- **de modèles physiques** intégrés dans cette maquette, comme pour l'ouverture d'une porte ou bien la représentation d'un phénomène lié à un modèle thermique.
- **d'interactions avec l'apprenant**, au travers d'un écran, d'une souris, de casques de réalité virtuelle ou de réalité augmentée.

- **de lien entre le système réel et le jumeau numérique** : à terme l'idée est que le jumeau numérique s'enrichisse des données mesurées sur le jumeau physique, mais aussi qu'il permette de piloter le système réel à distance.

120 personnes participent au projet, qui a été structuré en quatre groupes de travail (*workpackages*):

- l'un dédié à l'utilisation et aux usages des jumeaux numériques dans la formation, car il y a tout à construire. Il existe en effet peu de littérature sur ce sujet. Ce groupe est coordonné par Solveig Fernagu, directrice de recherche à Cesi. sfernagu@cesi.fr
- Le deuxième dédié à la façon de créer ces jumeaux numériques et comment les diffuser du point de vue technique. Ce groupe, porté par Claude Andriot, responsable au CEA-List, mobilise près de 60 personnes. Claude.andriot@cea.fr
- Le troisième, coordonné par Laure-Amélie Le Stang, coordinatrice de projet adjointe JENII du Cnam et par Thierry Koscielniak, directeur national du numérique du Cnam, se penche sur la manière d'expérimenter et d'évaluer l'utilisation de ces outils dans le processus d'apprentissage. thierry.koscielniak@lecnam.net
- Le dernier, coordonné par Ivan Iordanoff, directeur général adjoint recherche et innovation d'Arts et Métiers, porte sur la diffusion en allant notamment dans des salons et en prenant contact avec divers établissements du lycée au supérieur. Ivan.IORDANOFF@ensam.eu

Vous trouverez quatre livrets complémentaires présentant : Des fiches outils, la présentation des jumeaux numériques de JENII ainsi que des Case Studies et le dernier traite des Métavers d'enseignement

² <http://www.industrie-dufutur.org/famille-de-metier-production/>
http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2023/03/AIF_JumeauNumerique.pdf

1.4. Les projets de jumeaux numériques de JENII

Quatorze projets de JNE sont développés dans le cadre du projet JENII (cf. tableau 1).

Structure	Lieu	Nom du jumeau	Nom - Prénom	Fonction
ENSAM	Paris	Jumeau Numérique Turbomachine / Energétique	RAVELET Florent	Professeur des Universités - LIFSE - Arts et Métiers Science et Technologie
ENSAM	Angers	Atelier fonderie	AMMAR Amine	Professeur des universités
ENSAM	Aix en Provence	Atelier fonderie	BOURGEOIS Jérémie	Ingénieur d'étude en fonderie
ENSAM	Bordeaux	Atelier Usine flexible Practice 4.0	CHAVANNE Emmanuelle	Professeur
ENSAM	Cluny	Atelier usinage haute performance	FROMENTIN Guillaume	Professeur / Responsable de l'équipe de recherche UGV du LaBoMaP Activités de R&D industrielles fortes
ENSAM	Cluny	Atelier de déroulage	DENAUD Louis	Maître de conférence enseignement et recherche en fabrication appliqué au bois
ENSAM	Lille	Usine Agile	BEAREE Richard	Roboticien / Directeur laboratoire ingénierie numérique
CNAM	Paris	Voiture Electrique	DANLOS Amélie	Maître de conférences
CNAM	Paris	CAP'VR Chimie agro Pharma virtual reality	SYLLA Maité	Professeur des universités Chimie Moléculaire Thématiques de recherche : chimie médicinale, chimie organique, chimie verte
CNAM	Paris	Avion léger - Mécanique des structures	LAURENT Luc LEGAY Antoine	Maître de conférences Professeur des universités
CNAM	Paris	Avion léger - Aérodynamique	MARIE Simon ALFEREZ Nicolas	Maître de conférences Maître de conférences
CNAM	Paris	Atelier démantèlement centrale nucléaire	GALICHET Emmanuelle	Enseignante-Chercheuse en sciences et technologies nucléaires
CESI	Nanterre	Unité de Fabrication Additive Métallique	REYES Lucas BECQ Aline DELALIN Hugues	Ingénieur de recherche Ingénieur de recherche Ingénieur pédagogique
CESI	Rouen	Usine Flexible de Production	BRIANT Nicolas GARCIA David DELALIN Hugues RENAUD Ludovic	Ingénieur de recherche Enseignant Chercheur Ingénieur pédagogique Ingénieur pédagogique

Tableau 1 : Présentation des projet JENII et de leur porteur de projets

2. LES JUMEAUX NUMERIQUES (JN) DANS L'INDUSTRIE



Pour apprécier les apports de l'usage de jumeaux numériques dans l'enseignement, il convient de mieux se représenter ce qu'est un jumeau numérique et les possibles qu'il ouvre en termes d'enjeux et de réalisation. Nous pourrions ensuite faire un pas de côté pour comprendre l'intérêt de leur introduction dans les dispositifs d'enseignement et d'apprentissage.

Au départ, les entreprises créaient physiquement des objets pour leur faire subir un ensemble de tests, y apporter des modifications, etc. Avec le jumeau numérique, les données recueillies sur l'évolution de l'objet permettent d'en anticiper et d'en optimiser les performances. Petite révolution industrielle !!!

C'est avec la quatrième révolution industrielle, ou industrie du futur, que le concept de jumeau numérique a pris de l'ampleur. En 2017, il devient une forte tendance des investissements technologiques stratégiques aussi bien dans l'industrie que dans le bâtiment. Le marché étant de plus en plus compétitif et les technologies de plus en plus matures, la digitalisation dans les domaines de la fabrication (bâtiment comme industrie) est considérée comme une opportunité d'atteindre des niveaux de productivité plus élevés tout en proposant une personnalisation de masse des produits (Uhlemann, Lehmann, & Steinhilper, 2017).

2.1 La naissance du concept de jumeau numérique

2.1.1 "Houston, I believe we've had a twin here": balbutiements d'une conceptualisation

L'appellation de Jumeaux Numériques (JN) ou *Digital Twin* (DT) fut proposée en 2002 par Michael Grieves (Université du Michigan) dans le cadre d'une présentation concernant le cycle de vie des produits (PLM : *Product Lifecycle Management*) (Grieves & Vickers, 2017). Mais la paternité du concept de « technologie numérique jumelée »

revient aux missions aérospatiales et notamment au programme Apollo (cf. image 1). En effet, la NASA utilisa un système de jumelage de base et l'on trouvait au sol : une réplique physique du module Apollo. Ce jumeau permit notamment d'évaluer et de simuler les conditions de pilotage à bord (cf. image 1) et de sauver les astronautes.

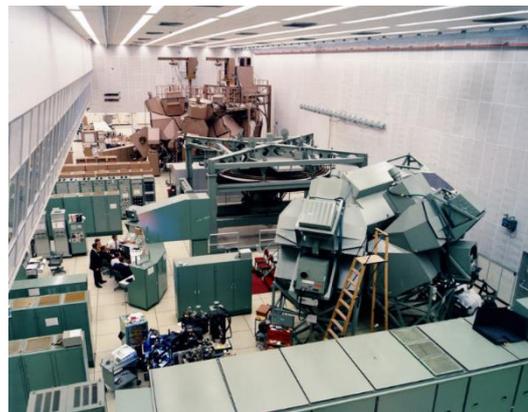


Image 1 : Simulateurs Apollo au contrôle de mission à Houston (Le simulateur de module lunaire est au premier plan en vert, le simulateur de module de commande est à l'arrière en marron) Crédit image :

<https://televue.com/televueopticalstalk/wp-content/uploads/SimulatorsAtNASA-768x582.png>

L'histoire chaotique du vol d'Apollo XIII a permis véritablement permis de démontrer l'intérêt du développement de telles technologies. Lorsque ce dernier fut mis en difficulté, le jumeau resté à terre permit aux ingénieurs de la NASA de ramener les astronautes sains et saufs sur terre en testant des solutions de sauvetage à plus de 320 000 km du module Apollo, lorsque ce dernier fut mis en difficulté. Ils ont pu notamment envisager différents scénarii de procédures de rentrée dans l'atmosphère en réussissant à conserver puissance et oxygène pour ramener en vie les trois astronautes ; par exemple, ils ont pu travailler sur la manière de redémarrer l'ordinateur du module de commande qui n'avait pas été conçu pour être éteint dans l'espace. Ce simulateur fut, au final, la technologie la plus complexe de tout le programme spatial. Si l'on y trouvait bien physiquement un poste de pilotage et des consoles de contrôle, tout le reste était simulé par une multitude d'ordinateurs et supporté par de nombreux techniciens et ingénieurs.

2.1.2 Au-delà du virtuel, une conceptualisation de plus en plus fine

Depuis, les jumeaux se sont développés (cf. image 2) et démocratisés, et se sont davantage numérisés, jusqu'à devenir, pour beaucoup, uniquement virtuels. Grieves (2022b) décrit le modèle numérique comme le miroir virtuel de ce qui existe dans le monde réel. Glaessgen et Stargel (2012) donneront plus tard une définition plus détaillée, mais aussi plus complexe, mais largement reconnue dans le domaine de la recherche : « *Le jumeau numérique est une simulation [...] multi-physique, multi-échelle intégrée d'un produit complexe et utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, les mises à jour des capteurs, etc., pour refléter la durée de vie de son jumeau correspondant.* »

Le jumeau numérique est donc la réplique d'un objet, d'un système, d'une implantation, d'un processus, etc. sous une forme numérique. Il est « une représentation virtuelle dynamique d'un objet (produit, process ou service) qui permet des analyses, des simulations ou des prédictions. Il s'agit en somme de représenter n'importe quel objet physique ou processus industriel (d'une raquette de tennis à une ville, en passant par une chaîne de production) sous forme numérique afin de l'améliorer, l'optimiser ou encore en assurer la maintenance. En agrégeant toutes les données utiles à la conception, la production et le fonctionnement d'un objet, le jumeau numérique permet de définir virtuellement de nouveaux produits, process et services en un temps réduit et à moindre coût, sans prototypage » (Julien & Martin, 2020)).

Un jumeau numérique est « une représentation numérique d'un système physique réel : caractéristiques physiques, fonctionnalités, état, comportements, historique des activités. Il est alimenté par des bases de données de référence et des capteurs installés sur l'infrastructure, qui lui permettent d'être mis à jour tout au long de son cycle de vie » (Glaessgen & Stargel, 2012, p. 57; Tchana De Tchana, 2021)

2.1.3. Jumelage numérique, quelques incontournables

Partant de l'étude d'un certain nombre de définitions, Rahore et AL. (2021) définissent le jumelage numérique comme « un processus qui implique la construction 1) d'un cyberjumeau qui projette numériquement une entité physique vivante ou non vivante ou un processus (un système) ; et 2) une connexion physique entre les jumeaux cyber et physiques pour partager des données (et des informations) entre eux visant à l'optimisation dynamique, la surveillance en temps réel, le diagnostic des pannes et la prédiction précoce, ou la surveillance de la santé de la contrepartie physique. Un jumeau physique peut

être un processus, un humain, un lieu, un appareil ou tout autre objet ayant un but particulier, et qui peut être reproduit dans le monde numérique soit comme un jumeau partiel avec des fonctionnalités limitées, soit comme un jumeau complet » (Rathore, Shah, Shukla, Bentafat, & Bakiras, 2021).

Un jumeau numérique peut donc reproduire partiellement une entité physique sous condition que ces derniers soient reliés ensemble.

2.2 Des définitions multiples et évolutives

Le terme jumeau numérique apparaît de plus en plus dans la littérature scientifique et les communications, car la technologie est maintenant suffisamment mature pour transformer les concepts en réalité. Cependant, le terme est loin d'être clair et univoque. Bien souvent, les auteurs d'articles scientifiques fournissent leurs propres définitions des jumeaux numériques et ces définitions apparaissent, pour certains chercheurs, comme restrictives, car elles sont, la plupart du temps, limitées à leurs domaines spécifiques d'application (Julien & Martin, 2020).

Al-Sehrawy, Kumar, and Watson (2021) décrivent le jumeau numérique comme « *le concept qui permet de **connecter un système physique à sa représentation virtuelle par une communication bidirectionnelle** (avec ou sans humain dans la boucle) ... permettant l'exploitation de l'intelligence artificielle et de l'analyse des BigData... pour générer de la valeur* ». Par extension, un jumeau numérique désigne une réplique numérique **d'entités potentielles ou réelles** que l'on nommera alors jumeau physique.

Dans l'industrie, le plus souvent, cette entité sera représentative de :

- **un produit** : la mise en fabrication de produits industrialisés étant de plus en plus complexes, il est intéressant d'avoir un jumeau numérique pour évaluer leurs propriétés et cycles de vie (durabilité, défauts, qualité, etc.) (cf. image 2)
- **un système de production et ses processus** : Le jumeau numérique d'un processus (ou d'un ensemble de processus) est utile pour mesurer la performance d'un atelier, le piloter, tester différentes configurations organisationnelles pour en optimiser le process... Le JN permet par exemple de transformer des données d'entrées (matière première par exemple) en données de sortie (produits finis ou semi-finis).

2.2.1. Une définition qui s'affirme

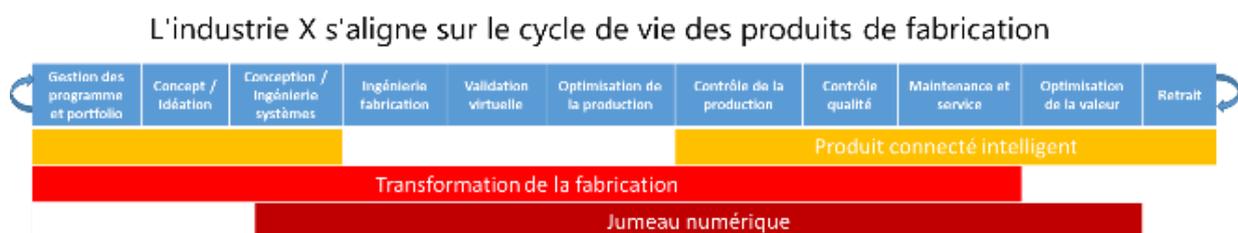


Image 2 : La production intelligente (adapté de Avanade, cabinet de conseil, 2022)³

³ https://www.avanade.com/fr-fr/solutions/industry-x?_bt=617286565332&_bk=jumeau%20num%C3%A9rique&_bm=e&_bn=g&_bg=135488866770&gclid=EAIaIQobChMIkM_6j7Hb-wIVhfftCh3jJQE6EAAYAAEgKovvD_BwE

En 2019, le cabinet d'analyse américain Gartner a placé les JN dans son Top 10 des « *Strategic Technology Trends* ». Ce dernier estime que d'ici 2029, 50% des systèmes de production bénéficieront des technologies du jumeau numérique. Il estime également que leur mise en œuvre permettra d'atteindre 10 % de rendement supplémentaire (*Les jumeaux numériques - MetalBlog*, s. d.). Les secteurs d'activités qui mobilisent les jumeaux numériques sont de plus en plus nombreux (cf. tableau 2)⁴.

Automobile	Urbanisme	Naval
Aérospatial	Construction	Energie
Santé	Fabrication	Agriculture

Tableau 2 : Différents domaines d'application des Jumeaux Numériques (Qi et al., 2021)

2.2.2. Une définition qui se stabilise

Dans leur revue systématique de la littérature 2002-2020 Jones, Snider, Nassehi, Yon, and Hicks (2020) recensent 16 définitions du concept de jumeaux numériques auxquelles nous pouvons en rajouter 5. (cf. tableau 3). Ce travail permet de totaliser 21 définitions. Il est à noter qu'il existe actuellement 3 déclinaisons du terme de jumeau numérique : jumeau virtuel, jumeau numérique et jumeau hybride (Chinesta et al. 2018). Les trois termes ne semblent pas recouvrir les mêmes réalités.

Année	Référence	Définition en anglais
2002	Grievies M. 2014.	"The digital twin is the virtual representation of an actual physical product" (Grievies, 2014)
2010-2012	Shafto M., et al. 2010 Shafto, M., et al. 2012	"An integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of a vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its flying twin. The digital twin is ultra-realistic and may consider one or more important and interdependent vehicle systems" (Shafto et al., 2012).
2012	Tuegel, E.I., 2012	"A cradle-to-grave model of an aircraft structure's ability to meet mission requirements, including submodels of the electronics, the flight controls, the propulsion system, and other subsystems" (Tuegel, 2012).
2012	Gockel, B.T. et al., 2012	"Ultra-realistic, cradle-to-grave computer model of an aircraft structure that is used to assess the aircraft's ability to meet mission requirements" (Gockel, Tudor, Brandyberry, Penmetsa, & Tuegel, 2012).
2012	Glaessgen E et Stargel D., 2012	"A Digital Twin is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin" (Glaessgen & Stargel, 2012) .
2013	Lee, J. et al., 2013	"Coupled model of the real machine that operates in the cloud platform and simulates the health condition with an integrated knowledge from both data driven analytical algorithms as well as other available physical knowledge" (Lee, Lapira, Bagheri, & Kao, 2013)
2013	Reifsnider, K, et al. 2013	"Ultra-high fidelity physical models of the materials and structures that control the life of a vehicle" (Reifsnider & Majumdar, 2013)

⁴ <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/what-is-a-digital-twin#:~:text=Un%20jumeau%20num%C3%A9rique%20est%20une,faciliter%20la%20prise%20de%20d%C3%A9cision.>

2013	Majumdar, P. et al., 2013	“Structural model which will include quantitative data of material level characteristics with high sensitivity” (Majumdar, FaisalHaider, & Reifsnider, 2013)
2015	Rosen, R. et al., 2015	“Very realistic models of the process current state and its behavior in interaction with the environment in the real world” (Rosen, Von Wichert, & Lo)
2015	Ríos, J. et al., 2015	“Product digital counterpart of a physical product” (Ríos, Hernandez, Oliva, & Mas, 2015)
2015	Bielefeldt B. et al., 2015	“Ultra-realistic multi-physical computational models associated with each unique aircraft and combined with known flight histories” (Bielefeldt, Hochhalter, & Hartl, 2015)
2015	Bazilevs Y. et al., 2015	“High- fidelity structural model that incorporates fatigue damage and presents a fairly complete digital counterpart of the actual structural system of interest” (Bazilevs et al., 2015)
2016	Schluse, M. et Rossmann, J., 2016	“Virtual substitutes of real world objects consisting of virtual representations and communication capabilities making up smart objects acting as intelligent nodes inside the internet of things and services” (Schluse & Rossmann, 2016)
2016	Canedo A., 2016	“Digital representation of a real world object with focus on the object itself” (Canedo, 2016)
2016	Gabor, T. et al., 2016	“The simulation of the physical object itself to predict future states of the system” (Gabor, Belzner, Kiermeier, Beck, & Neitz, 2016)
2016	Schroeder, G.N. et al., 2016	“Virtual representation of a real product in the context of Cyber-Physical Systems” (Schroeder, Steinmetz, Pereira, & Espindola, 2016)
2016	Kraft, E.M., 2016	“An integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of an as-built system, enabled by Digital Thread, that uses the best available models, sensor information, and input data to mirror and predict activities/performance over the life of its corresponding physical twin” (Kraft, 2016)
2016	Bajaj, M. et al., 2016	“A unified system model that can coordinate architecture, mechanical, electrical, software, verification, and other disciplinespecific models across the system lifecycle, federating models in multiple vendor tools and configuration-controlled repositories” (Bajaj, Cole, & Zwemer, 2016)
2016	Grieves, M., 2016	“The Digital Twin is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its Digital Twin” (Grieves, 2016).
2019	Bauer, T. et al., 2019	“Virtual executable models that [are] carefully consistent with selected properties of its corresponding physical entity or processes in the real world” (Bauer, Antonino, & Kuhn, 2019)
2020	American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020	“A set of virtual information constructs that mimics the structure, context and behavior of an individual / unique physical asset, or a group of physical assets, is dynamically updated with data from its physical twin throughout its life cycle and informs decisions that realize value” (AIAA Digital Engineering Integration Committee, 2020).

Tableau 3 : différentes définitions des jumeaux numériques (Jones et al., 2020 ; WP1 JENII en grisé)

Tableau 3 bis : traduction personnelle du tableau 3

Année	Référence	Définition en français
2002	Grievies M. 2014.	Le jumeau numérique est la représentation virtuelle d'un produit physique actuel
2010-2012	Shafto M., et al. 2010. Shafto, M., et al. 2012. Glaessgen, E.H., et al. 2012	Une simulation multi-physique, multi-échelle et probabiliste intégrée d'un véhicule ou d'un système qui utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, les mises à jour des capteurs, l'historique de la flotte, etc., pour refléter la vie de son jumeau volant. Le jumeau numérique est ultra-réaliste et peut considérer un ou plusieurs systèmes de véhicules importants et interdépendants.
2012	Tuegel, E.I., 2012	Un modèle du berceau à la tombe de la capacité d'une structure d'aéronef à répondre aux exigences de la mission, y compris des sous-modèles de l'électronique, des commandes de vol, du système de propulsion et d'autres sous-systèmes
2012	Gockel, B.T. et al., 2012	Modèle informatique ultra-réaliste du berceau à la tombe d'une structure d'aéronef utilisé pour évaluer la capacité de l'aéronef à répondre aux exigences de la mission
2012	Glaessgen E et Stargel D., 2012	Le jumeau numérique est une simulation probabiliste intégrée multi-physique et multi-échelle d'un produit complexe, utilisant les meilleurs modèles physiques disponibles, données capteurs, etc. pour refléter la vie de son jumeau correspondant
2013	Lee, J. et al., 2013	Modèle couplé de la machine réelle qui fonctionne dans la plate-forme cloud et simule l'état de santé avec une connaissance intégrée des algorithmes analytiques basés sur les données ainsi que d'autres connaissances physiques disponibles
2013	Reifsnider, K, et al. 2013	Modèles physiques ultra-haute fidélité des matériaux et des structures qui contrôlent la durée de vie d'un véhicule
2013	Majumdar, P. et al., 2013	Modèle structurel qui inclura des données quantitatives des caractéristiques au niveau du matériau avec une sensibilité élevée
2015	Rosen, R. et al., 2015	Modèles très réalistes de l'état actuel du processus et de son comportement en interaction avec l'environnement dans le monde réel
2015	Ríos, J. et al., 2015	Produit contrepartie numérique d'un produit physique
2015	Bielefeldt B. et al., 2015	Modèles informatiques multi-physiques ultra-réalistes associés à chaque avion unique et combinés avec des historiques de vol connus
2015	Bazilevs Y. et al., 2015	Modèle structurel haute fidélité qui intègre les dommages de fatigue et présente une contrepartie numérique assez complète du système structurel réel d'intérêt
2016	Schluse, M. et Rossmann, J., 2016	Substituts virtuels d'objets du monde réel constitués de représentations virtuelles et de capacités de communication constituant des objets intelligents agissant comme des nœuds intelligents à l'intérieur de l'internet des objets et des services
2016	Canedo A., 2016	Représentation numérique d'un objet du monde réel mettant l'accent sur l'objet lui-même
2016	Gabor, T. et al., 2016	La simulation de l'objet physique lui-même pour prédire les états futurs du système
2016	Schroeder, G.N. et al., 2016	Représentation virtuelle d'un produit réel dans le contexte des systèmes cyber-physiques

2016	Kraft, E.M., 2016	Une simulation multi-physique, multi-échelle et probabiliste intégrée d'un système tel que construit, activée par Digital Thread, qui utilise les meilleurs modèles disponibles, les informations des capteurs et les données d'entrée pour refléter et prédire les activités/performances sur la durée de vie de son correspondant jumeau physique
2016	Bajaj, M. et al., 2016	Un modèle de système unifié qui peut coordonner l'architecture, la mécanique, l'électricité, les logiciels, la vérification et d'autres modèles spécifiques à une discipline tout au long du cycle de vie du système, fédérant les modèles dans plusieurs outils de fournisseurs et référentiels contrôlés par la configuration
2016	Grieves, M., 2016	Ensemble des informations qui décrit un potentiel ou réel produit manufacturé physique du niveau microatomique au niveau niveau macro géométrique. À son optimum, toute information qui pourrait être obtenue à partir de l'inspection d'un produit fabriqué peut être obtenue à partir de son jumeau numérique.
2019	Bauer, T. et al., 2019	Modèles exécutables virtuels qui sont soigneusement compatibles avec les propriétés sélectionnées de son entité physique ou de ses processus correspondants dans le monde réel
2020	American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020	Un ensemble de constructions d'informations virtuelles qui imitent la structure, le contexte et le comportement d'un individu / un élément physique unique, ou un groupe d'éléments physiques, est mis à jour dynamiquement avec les données de son jumeau physique tout au long de son cycle de vie et éclaire les décisions qui génèrent de la valeur.

Tableau 3 bis : différentes définitions des jumeaux numériques (Jones et al., 2020 ; WP1 JENII en grisé)

Ce tableau récapitulatif montre que le concept de jumeau numérique s'est rapidement étendu. Si on ne parle au début que d'un produit, on évoque très vite des véhicules complexes, de machines, pour finalement parler de processus, puis de processus en interaction avec son environnement. L'accent est mis sur la « correspondance », la « **fidélité** », le « **réalisme** ». **Le jumeau numérique doit être capable d'imiter son double physique.** À cela viendra s'ajouter la notion de cycle de vie. Ainsi, le jumeau numérique doit permettre de simuler les différents moments de la vie du produit ou processus physique. La présence nécessaire du lien entre le jumeau numérique et le jumeau physique y est aujourd'hui omniprésente. On parle alors de « **modèle couplé** », de « **capteurs de données** », de « **refléter la vie du jumeau physique** », de « **mise à jour dynamique** ». Il serait donc indispensable de disposer de deux entités : physique et virtuelle, lorsque l'on veut faire appel à une technologie de jumeau numérique. Nous

verrons plus loin qu'il est possible de nuancer cet impératif.

Les finalités évoluent aussi dans ces définitions. Au départ, on évoque uniquement le fait d'avoir une représentation virtuelle de « quelque chose ». Mais très vite, il est fait mention de simulations probabilistes, de tests/évaluations de scénarios de mission, de prédictions d'états futurs du jumeau physique. L'objectif est alors d'avoir un outil d'aide à la décision (plus ou moins automatisé). Retenons à ce stade qu'un jumeau numérique repose sur l'existence :

- d'un **objet physique**
- d'un **objet virtuel**
- d'une **communication bidirectionnelle** entre les deux, qui sera manuelle ou automatique

Il peut donc être défini comme « une représentation virtuelle d'entités et de processus du monde réel, synchronisée à une fréquence et une fidélité spécifiques » (Digital Twin Consortium)⁵.

⁵ <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin.htm>

2.2.3. Des usages qui se développent

Le fait qu'un jumeau numérique soit connecté à une entité physique permet de l'alimenter, grâce à des données recueillies en temps réel par des capteurs, et de favoriser de la sorte, les échanges entre entités pour faciliter les usages envisagés.

Les usages les plus fréquents dans l'industrie ont pour finalité de (cf. encadré 1, exemple d'usage) :

- faciliter la conception en amont
- optimiser les opérations
- rendre possible la maintenance prédictive
- permettre de tester des scénarii
- détecter des anomalies
- superviser et piloter le jumeau physique, etc.

« Un jumeau numérique est un modèle virtuel conçu pour refléter fidèlement un objet physique. L'objet étudié - par exemple, une éolienne - est équipé de divers capteurs liés à des domaines vitaux de sa fonctionnalité. Ces capteurs produisent des données sur différents aspects des performances de l'objet physique, comme la production d'énergie, la température, les conditions météorologiques, etc. Ces données sont ensuite transmises à un système de traitement et appliquées à la copie numérique. Une fois renseigné avec ces données, le modèle virtuel peut être utilisé pour effectuer des simulations, étudier des problèmes de performance et générer des améliorations possibles, le tout dans le but de générer des informations précieuses — qui peuvent ensuite être appliquées à l'objet physique original »

Encadré 1 : un exemple d'usage (IBM, 2022)⁶.

La démocratisation des jumeaux numériques va de pair avec la démocratisation des IoT (Internet des Objets), de l'IA (Intelligence Artificielle) et de la Data Science (cf. image 3).

Au regard de ce qui décrit un JN, le JN d'Apollo était-il en définitive un jumeau ?

Oui et non :

- Oui, si l'on considère que le jumeau de la NASA était plus qu'un simulateur grâce à la façon dont les ingénieurs ont pu rapidement modifier les

paramètres de simulation pour les faire correspondre aux conditions du module Apollo en perdition dans l'espace. Ils ont pu rechercher, rejeter et perfectionner leurs hypothèses pour définir la meilleure procédure à suivre pour assurer un retour des astronautes.

- Non, si l'on considère que la NASA a construit un simulateur.

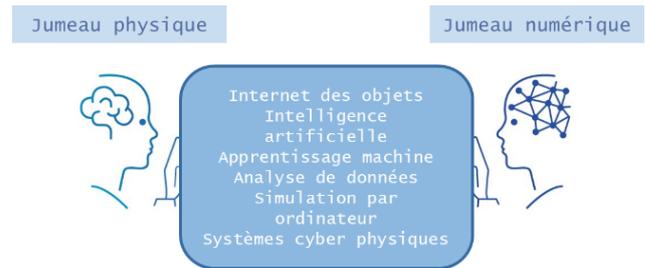


Image 3 : les technologies associées au jumelage numérique (adapté de Botton, 2018)

2.2.4. Des frontières qui se clarifient : Jumeau numérique et simulateur

Parce qu'ils n'échangent pas de données entre entités physiques et virtuelles, nombre de jumeaux numériques seraient de simples simulateurs. La simulation est une des techniques classiquement employées actuellement pour analyser les systèmes industriels, pour évaluer l'impact de changement de paramètres et aider des prises de décision à partir de multiples scénarii probables. C'est un processus qui repose sur l'**activité mimétique** (c'est-à-dire, pour faire simple, sur des activités qui consistent à « faire comme si » (Horcik & Durand, 2011; Leblanc, 2014) . Nombre de simulateurs sont exploités depuis plus de 20 ans dans les dispositifs de formation professionnelle afin d'accompagner le développement des compétences (Béguin & Weill-Fassina, 1997; Flandin, Vidal-Gomel, & Ortega, 2022; Pastré, 2005b) .

⁶ <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/what-is-a-digital-twin#:~:text=Un%20jumeau%20num%C3%A9rique%20est%20une,faciliter%20la%20prise%20de%20d%C3%A9cision.>

Les concepts de « simulation » et de « jumeau », sont très souvent confondus. Or, bien que complémentaires, les jumeaux numériques et les simulations sont deux choses très différentes même si elles sont imbriquées (Grieves, 2022a):

- un jumeau numérique utilise la simulation pour produire des informations (informations sur la façon dont un produit se comportera dans le monde physique dans une grande variété de conditions et/ou informations sur l'évolution de cette performance tout au long de sa vie).
- Les simulations peuvent être réalisées sur des jumeaux numériques (produits en cours de développement)

Ainsi, la simulation peut avoir une vie propre sans être intégrée dans un jumeau ou être intégrée dans

un jumeau sous des formes multiples (Grieves, 2022a; Schluse & Rossmann, 2016). « *La différence entre le jumeau numérique et la simulation est en grande partie une question d'échelle : alors qu'une simulation étudie généralement un processus particulier, un jumeau numérique peut lui-même exécuter toutes sortes de simulations afin d'étudier plusieurs processus [...]. Les simulations ne bénéficient généralement pas de données en temps réel. Mais les jumeaux numériques sont conçus autour d'un flux d'informations bidirectionnel qui se produit d'abord lorsque les capteurs de l'objet fournissent des données pertinentes au processeur du système, puis se reproduit lorsque les informations créées par le processeur sont partagées avec l'objet source original* » (IBM, 2022)⁷.

⁷ <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/what-is-a-digital-twin#:~:text=Un%20jumeau%20num%C3%A9rique%20est%20une,faciliter%20la%20prise%20de%20d%C3%A9cision.>

2.3 Classer, nommer, structurer les JN : quelques typologies descriptives

La recherche scientifique a permis aux chercheurs d'élaborer différentes typologies permettant de classer, nommer et structurer les JN.

2.3.1. À partir du niveau d'intégration et de maturité de la relation entre les entités physiques et virtuelles

Les relations entre l'environnement physique (ou l'objet physique) et l'environnement virtuel (ou l'objet virtuel) peuvent être étudiées de quatre manières différentes selon la nature des relations qui structurent leurs interactions (Kritzinger, Karner, Traar, Henjes, & Sihl, 2018; Tekinerdogan & Verdouw, 2020) (cf. images 4 et 5, cf. tableaux 4 et 5).

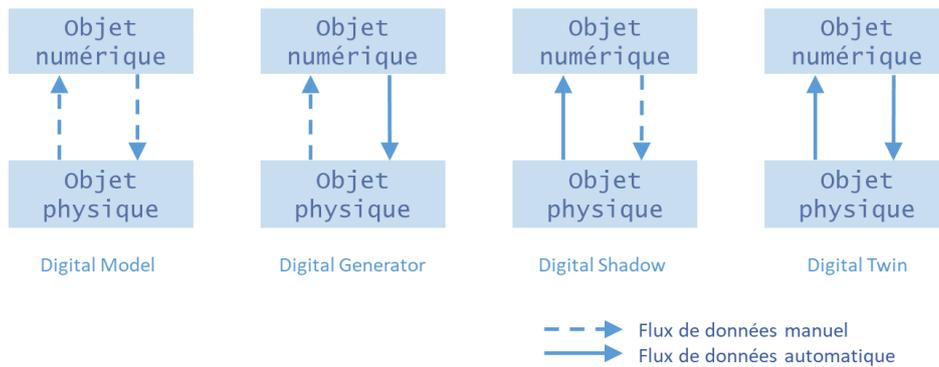


Image 4 : Relations identifiées entre objet numérique et objet physique (adapté de Tekinerdogan & Verdouw, 2020)

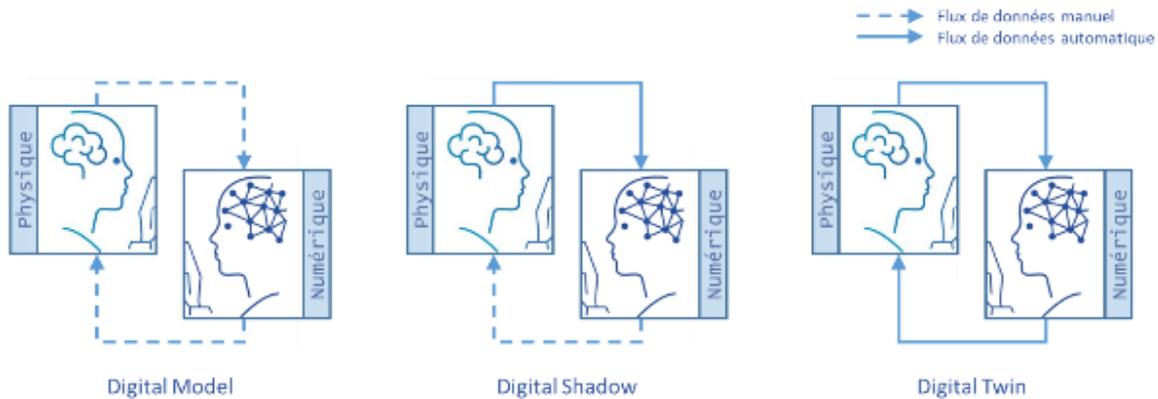


Image 5 : Relations identifiées entre objet numérique et objet physique (adapté de Kritzinger et al., 2018)

Nom du modèle		Définition des interactions
Modèle digital	Digital Model DM	L'objet physique et l'objet virtuel sont plus ou moins connectés ; la synchronisation ou le flux de données entre eux se produit par le biais d'une intervention humaine et donc manuelle.
Générateur digital	Digital Generator DG	Un modèle numérique (générateur) est utilisé pour améliorer voire générer automatiquement un modèle physique. En revanche, il n'y a pas de rétro action du physique vers le virtuel, ou alors elle est manuelle
Ombre digitale	Digital Shadow DS	Il existe une communication automatisée du physique vers le virtuel. On remontera notamment des données des capteurs physiques permettant ensuite de réaliser des tests ou simulations. En revanche, une fois l'analyse effectuée, il n'y a pas de communication du virtuel vers le réel, ou encore une fois, manuellement uniquement. Le flux de données est unidirectionnel.
Jumeau numérique	Digital Twin DT	L'objet numérique et l'objet physique sont causalement connectés et synchronisés. On pourra même les paramétrer pour être totalement interdépendants. On parle alors de systèmes cyber-physiques « Les données intégrées circulent dans les deux sens entre un objet physique existant et un objet numérique. Dans une telle combinaison, l'objet numérique peut également agir en tant qu'instance de contrôle de l'objet physique. Il peut aussi y avoir d'autres objets, physiques ou numériques, qui induisent des changements d'état dans l'objet numérique. Un changement d'état de l'objet physique conduit directement à un changement d'état de l'objet numérique et vice versa » (Tchana de Tchana, 2021, p58)

Tableau 4 : Relations entre objets numériques et physiques (Tekinerdogan & Verdouw, 2020)

Nom du modèle		Exemples de modèles développés dans JENII
Modèle digital	Digital Model , DM	Dans l'atelier de démantèlement de centrale nucléaire du CNAM, les données sont issues directement des sources terrain pour modéliser le comportement du jumeau. L'intérêt ici est l'entraînement et non le pilotage.
Générateur digital	Digital Generator , DG	Aucun des jumeaux du projet n'entre dans cette catégorie
Ombre digitale	Digital Shadow , DS	Dans l'atelier de Fabrication Additive Métallique de CESI, il y'a nécessité de consulter le jumeau numérique à tout instant pour vérifier l'ensemble des capteurs de la ligne (sans besoin de contrôle de celle-ci).
Jumeau numérique	Digital Twin , DT	Dans l'atelier de fonderie de l'ENSAM d'Aix en Provence, un certains nombres de capteurs remontent les informations en temps réel pour suivre l'état de fonctionnement, récupérer les alertes... Egalement, il sera possible à partir du jumeau numérique, de contrôler le jumeau physique et de faire quelques opérations de maintenance à distance

Tableau 5 : Exemples de modèles développés dans JENII

La littérature disponible sur ces modèles est bien plus conséquente pour les DM et DS que pour les DG, et encore plus rare pour les DT.

Par abus de langage, force est de constater qu'il n'est pas rare d'entendre le terme de jumeau numérique (Digital Twin) quelles que soient les caractéristiques des liens entre l'objet numérique et physique.

On retiendra des travaux sur cette typologie de JN, que ce sont les concepts de **dualité** et de **forte similitude** (Grieves, 2022c) qui permettent de qualifier un JN de jumeau numérique, et que c'est l'existence simultanée à un moment donné des deux entités (physique et virtuelle) qui détermine le qualificatif. Cela signifie que le jumeau numérique peut exister avant qu'il y ait une contrepartie physique et après que la contrepartie physique cesse d'exister.

À partir de là, on différenciera un modèle numérique d'un jumeau numérique. Si la contrepartie physique n'est jamais réalisée, alors le modèle numérique ne sera jamais jumeau numérique. « Un modèle numérique de tapis volant ne deviendra jamais un jumeau numérique, car il n'y a aucune intention, et encore moins la capacité, d'en faire un produit physique » (Grieves, 2022a, p. 45). Dans JENII, nos jumeaux sont alimentés à partir de données réelles avec certains d'entre eux qui ont également une connexion temps réel (cf. graphique 1). On se rendra compte par la suite que le niveau de gémellité ou de connectivité dépend des usages visés. A-t-on besoin du temps réel ? Souhaite-t-on former au concept de jumeau numérique ?

Le **Jumeau numérique cognitif** est capable d'apprendre à partir des données physiques et virtuelles pour **prédire des évènements**.

Le **Jumeau numérique autonome** : Etape ultime, s'il en est.

Le jumeau numérique prend seul des décisions et **pilote/contrôle** l'objet physique.

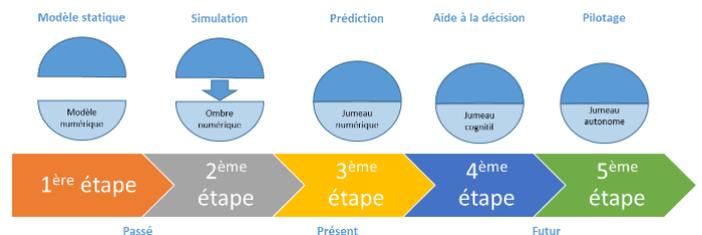
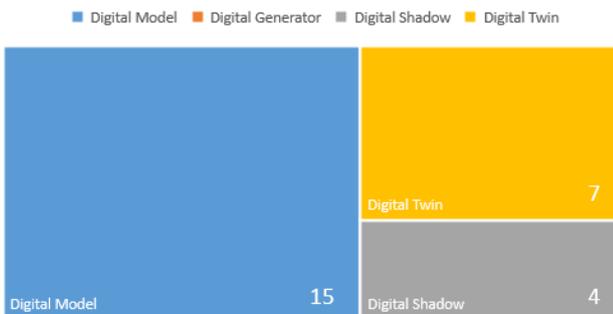


Image 6 : Du jumeau numérique au jumeau autonome : adapté de Julien and Martin (2020, p. 45)



Graphique 1 : Répartition des niveaux d'intégration des 26 scénarios pédagogiques identifiés dans le projet JENII (répertoriés en Mars 2023)

Nous utiliserons le terme de jumeau numérique dès lors que nous avons un environnement (physique ou virtuel) et l'objectif de développer son double (respectivement virtuel ou physique). Nous parlerons de **niveau de maturité** pour évoquer la relation entre les deux, comme le proposent Julien and Martin (2020, 2021).

2.3.2. À partir de leurs usages

Il y aurait des jumeaux numériques cognitifs, voire autonomes (cf. image 6) : le jumeau numérique est l'intermédiaire entre ces derniers et ce qui le précède : modèle et ombre numériques.

Les auteurs de cette typologie expliquent que :

« **Dans la première étape**, on retrouve un modèle ou un ensemble de modèles statiques qui permettent le contrôle et la supervision de l'objet sans évolution par rapport aux changements physiques qui se produisent. Ce jumeau passif reçoit les données et il surveille l'état de l'objet ; par le contrôle et l'analyse des données recueillies, on peut identifier les caractéristiques clés pour alerter si nécessaire en cas de dérive.

Dans la deuxième étape, les données sont recueillies de façon automatique en temps réel et permettent la simulation de différents scénarios à partir d'historiques des données opérationnelles, toujours à des fins de supervision ou d'optimisation des activités.

La troisième étape, avec la fusion des espaces physique et virtuel, propose un jumeau interactif, ce qui présuppose un certain degré de contrôle, partiel ou total, sur l'objet afin d'agir sur son état ou son comportement. Des premières techniques d'intelligence artificielle comme le machine learning permettent d'analyser une masse considérable de données afin d'en tirer des interprétations et des connaissances pour identifier des causes de dysfonctionnements ainsi que la prédiction d'événements ou de comportements.

Dans la quatrième étape, les techniques d'intelligence artificielle sont plus poussées afin d'obtenir un jumeau numérique capable d'apprendre à partir des données physiques et virtuelles et de fournir à l'utilisateur une aide à la décision élaborée ; c'est le jumeau numérique cognitif. Dans la cinquième et dernière étape, le jumeau numérique autonome prend lui-même les décisions et applique les contrôles à l'objet. Il évolue en fonction des nouveaux usages et structure ses modèles et données en conséquence » (Julien & Martin, 2020, p. 45).

2.3.3. À partir de la construction de gémellité: une typologie selon le cycle de vie du produit

Pour Grieves et Vickers (2022c; 2017), le jumeau numérique peut être (cf. image 7) :

- 1) un prototype de jumeau numérique (DTP)
- 2) une instance de jumeau numérique (DTI)
- 3) un agrégat de jumeaux numériques (DTA).

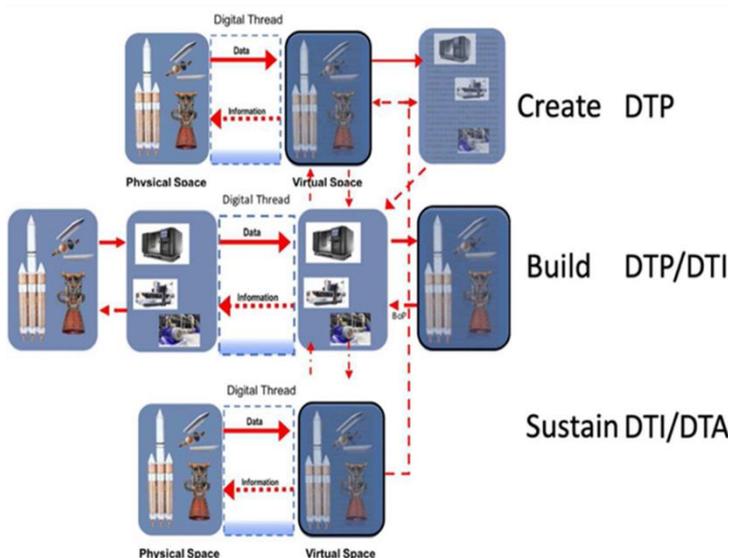


Image 7 : les types de jumeaux numériques (Grieves, 2019)

Crédit image : https://digitaltwin1.s3.ap-southeast-1.amazonaws.com/manuscripts/18853/1eb15a3f-de03-4f72-abf9-4b8b1fede68d_figure4.gif

« Un DTP est un modèle numérique construit d'un objet qui n'a pas encore été créé dans le monde physique, par exemple, la modélisation 3D d'un composant. L'objectif principal d'un DTP est de construire un produit idéal, couvrant toutes les exigences importantes du monde physique. D'autre part, un DTI est un jumeau virtuel d'un objet déjà existant, se concentrer sur un seul de ses aspects. Enfin, un DTA est un agrégat de plusieurs DTI qui peuvent être une copie numérique exacte du jumeau physique. Par exemple, les jumeaux numériques d'une structure d'engin spatial et d'un moteur d'engin spatial sont considérés comme des DTI qui peuvent être agrégés en un DTA » (Grieves & Vickers, 2017).

Le jumeau numérique en tant que référentiel d'informations est de trois types :

« Le prototype jumeau numérique (DTP), qui est l'ensemble des informations nécessaires à la création de produits physiques ; l'instance de jumeau numérique (DTI), qui est l'ensemble des informations sur les produits individuels qui ont été fabriqués ; et l'agrégat de jumeau numérique (DTA), qui est l'information composite sur tous les DTIs existants. Nous pouvons utiliser les informations du référentiel de ces jumeaux numériques pour réduire le gaspillage des ressources physiques et être beaucoup plus efficaces et efficaces." (Grieves, 2022a).

Autrement dit :

- Le **Digital Twin Prototype (DTP)** est une image du jumeau physique en phase de prototypage. Le jumeau virtuel est créé avant qu'un jumeau physique ne soit produit. Cela permet d'effectuer des tests et des simulations sur le jumeau virtuel jusqu'à ce que la conception soit optimale et se comporte comme souhaité tout au long de son cycle de vie. Le prototype physique peut alors être produit.

- Le **Digital Twin Instance (DTI)** est relatif à modèle numérique d'un produit réel. Un produit physique est attribué au jumeau virtuel. Il peut y avoir des variations entre les caractéristiques de la maquette numérique du produit et celles du jumeau physique. Ces variations sont prises en compte grâce à des capteurs et des enregistrements de datas et réinjectées dans le système.
- Le **Digital Twin Aggregate (DTA)** agrège plusieurs DTI. Le DTA collecte les données des DTI, afin de les regrouper et de les analyser, de manière à avoir une vue d'ensemble des performances. On peut ainsi se concentrer sur le comportement global, plutôt que sur un seul jumeau.

On parle de *Digital Twin Environment (DTE)* lorsque l'on évoque l'ensemble des DTP, DTI et DTA.

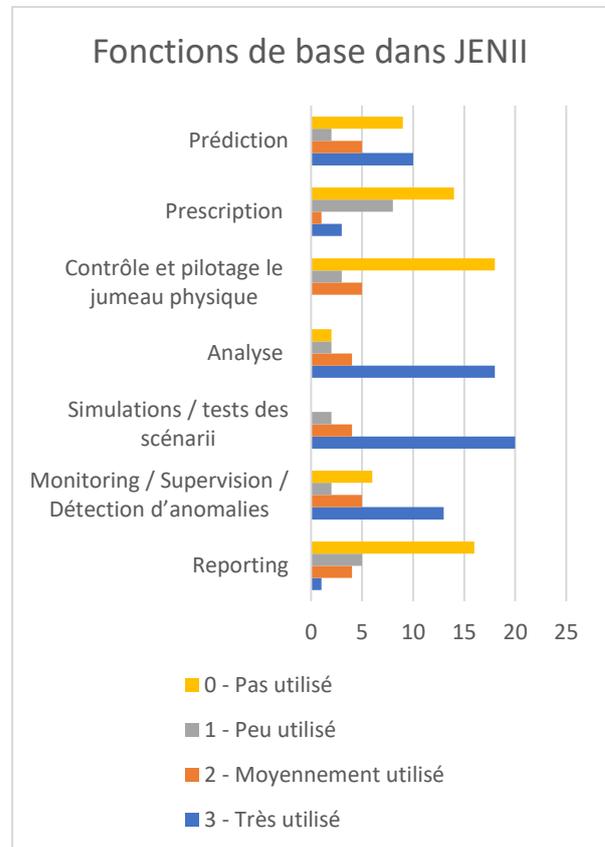
2.3.4. À partir des fonctions de base

Dans leur article « Digital Triplet Approach for Real-Time Monitoring and Control of an Elevator Security System », Gichane et al schématisent les principales fonctions que l'on peut attendre entre un jumeau physique et un jumeau numérique (Gichane et al., 2020).

- Reporting
- Monitoring / Supervision / Détection d'anomalies
- Simulation / test de scénarii
- Analyse
- Contrôle et pilotage du jumeau physique
- Prescription
- Prédiction

Les JNE et les scénarios élaboré dans le projets JENII ont été catégorisés avec cette grille d'analyse (cf. graphique 2). Les résultats obtenus à ce jour (13 mars 2023) montrent qu'à ce stade de développement, les principales fonctions

imaginées dans le cadre de JENII sont "l'analyse" (18 scénarios sur 26) et la "simulation/test de scénarii" (20 scénarios sur 26).



Graphique 2 : les fonctions de base dans JENII

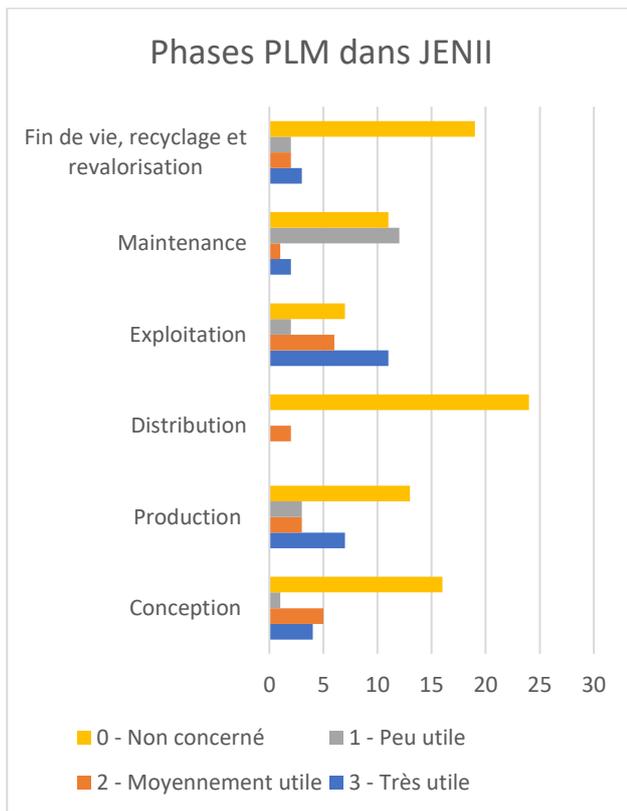
2.3.5. À partir des phases PLM

La gestion du cycle de vie des produits (PLM) représente l'ensemble des informations et des connaissances de la gestion du cycle de vie du produit. Le PLM regroupe les activités du cycle de vie, depuis la conception et la création du produit, en passant par la diffusion et les services après-vente, jusqu'au rejet et au recyclage du produit. Depuis bientôt 15 ans, une taxonomie, proposée par Guerra-Zubiaga et al., est couramment utilisée pour soutenir le processus de réalisation du produit ((Terzi et al, 2007 et Kiritsis et al., 2008 cité par(Guerra-Zubiaga, Ramòn-Raygoza, Rios-Soltero, Tomovic, & Molina, 2009) :

- Conception
- Production
- Distribution
- Exploitation
- Maintenance
- Recyclage/revalorisation

Lorsque l'on interroge les porteurs de projet sur cette classification, on peut observer qu'il n'est pas évident pour eux de positionner leur jumeau dans celle-ci (cf. graphique 3). On peut émettre l'hypothèse qu'il est difficile de se positionner sur cette typologie, qui reprend les grandes phases de vie d'un produit industriel. Tandis que dans l'enseignement, même si nous formons à ces cycles de vie et que nos processus industriels respectent ces phases ; nous nous inscrivons nécessairement dans une autre temporalité et notre objectif final n'est pas la bonne fabrication du produit.

Il existe donc de nombreuses manières de catégoriser les jumeaux numériques, selon les usages que l'on fait de ces derniers. Ces typologies permettent d'apprécier l'ensemble des possibles qu'ouvrent les JN pour l'industrie. Nous allons maintenant tenter d'apprécier comment l'utilisation et le développement de JN peuvent être appréhendés dans le cadre de dispositifs de formation et d'apprentissage.



Graphique 3 : les phases PLM dans JENII

3. JUMEAU NUMERIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT (JNE)



Enseigner « n'est pas seulement transmettre une information, c'est surtout provoquer ou encore organiser ou encore faciliter ou gérer un apprentissage » (Bienenseigner.com, 2022)⁸.

On peut lire sur le site du CEA, partenaire du projet, que « Les quatre partenaires de JENII (le CEA, l'ENSAM pour la coordination, le CESI et le CNAM) portent une **ambition de rupture** : développer des **offres de formation plus proches des contextes de travail réels**, ceux de l'Industrie du futur, grâce à des **environnements 3D immersifs et collaboratifs** construits autour des jumeaux numériques de systèmes industriels réels. Ces jumeaux numériques vont donc exploiter à la fois les **technologies immersives** – réalité virtuelle et étendue – et la **simulation physique temps réel** – afin d'introduire les lois de comportements réalistes des phénomènes à découvrir et apprendre. Pour certains scénarios pédagogiques, ils seront naturellement **connectés aux systèmes physiques associés** : un laboratoire de chimie, un atelier de fonderie, de fabrication additive ou encore un centre d'usinage.

Au total, une réelle diversité des sujets d'apprentissage sera couverte, avec 19 jumeaux numériques distincts, représentatifs des métiers de l'industrie du futur » (cf. image 8)(CEA, 2022)⁹.

Les défis technologiques des jumeaux numériques d'enseignement sont nombreux puisque la conception de chaque JNE cherche à atteindre plusieurs objectifs (cf. image 9) : « 1) la représentation des environnements et des équipements des différentes formations, 2) la simulation interactive des phénomènes physiques mis en jeu, selon les apprentissages, 3) les interactions entre les intervenants (professeurs et étudiants), pour différentes modalités ou configurations d'usages (à distance, ou en présentiel, et avec la machine réelle, ou son clone virtuel), 4) le lien et les échanges, en temps réel, entre l'équipement physique étudié et le monde du jumeau numérique » (CEA, 2022).

De ces défis, découlent des enjeux de taille sur le plan pédagogique, puisqu'il s'agit au final de favoriser, grâce aux JNE, une **expérience immersive apprenante** qui pose la question de la manière dont on peut mettre en capacité les apprenants d'apprendre dans ces « nouveaux » environnements et les formateurs d'enseigner dans ces derniers. Les **défis** ne sont donc pas que technologiques, mais également **pédagogiques**...

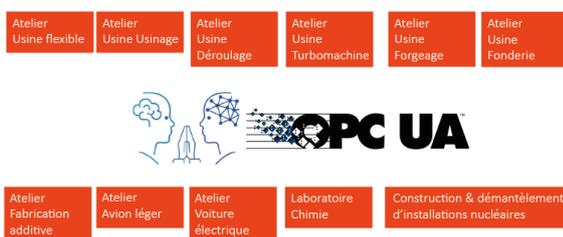


Image 8 : Exemples de projets JENII (CEA, 2022)¹⁰

⁸ <https://www.bienenseigner.com/pedagogie-definition/>

⁹ <https://list.cea.fr/fr/21-octobre-2022-apprentissage-immersif-avec-le-jumeau-numerique-jenii-la-formation-atteint-un-realisme-et-une-performance-inegales/>

¹⁰ <https://list.cea.fr/fr/21-octobre-2022-apprentissage-immersif-avec-le-jumeau-numerique-jenii-la-formation-atteint-un-realisme-et-une-performance-inegales/>

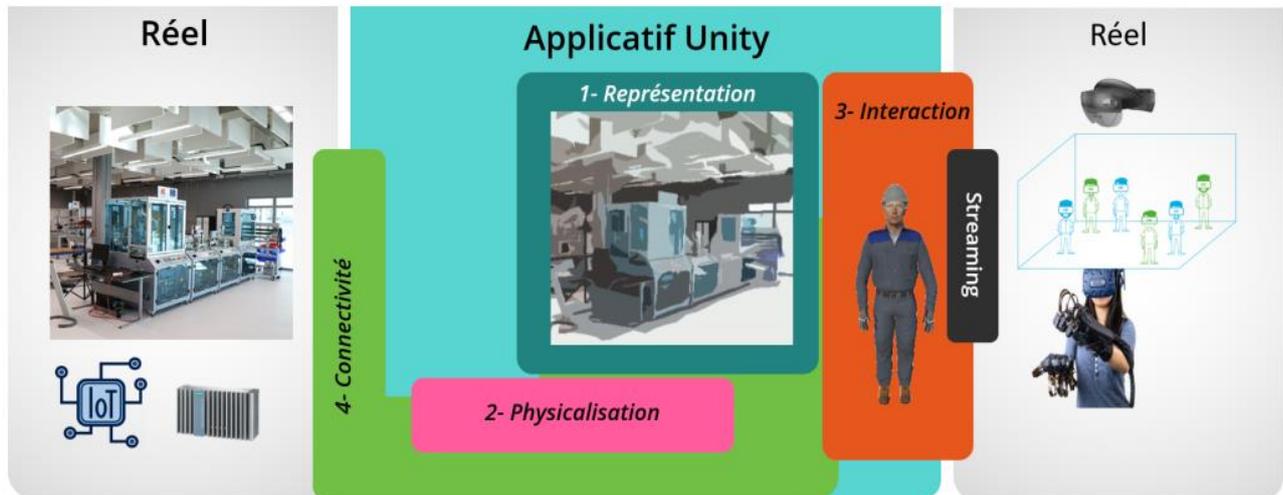


Image 9 : les défis des jumeaux numériques JENII (CEA, 2022)

Cette mise en capacité des apprenants à apprendre et des formateurs à enseigner avec les JNE repose sur une meilleure définition des JNE, une délimitation de leurs conditions d'usages dans des **processus d'enseignement-apprentissage**, et sur une réflexion concernant leurs **effets** et impacts sur ces derniers, autrement dit sur l'analyse des conditions de leur **efficacité et de leur efficacité pédagogique**.

Un effet est « la conséquence, le résultat d'une action, c'est ce qui est produit par quelque chose, par une cause. Un effet s'apprécie (s'estime, s'évalue, se juge) » (Clanet, 2012, p. 21)

L'efficacité concerne « la capacité à parvenir à ses fins, à atteindre ses objectifs, à produire un résultat. Les objectifs peuvent être nombreux, quantitatifs et/ou qualitatifs. L'efficacité se constate sous forme de contrôle binaire (objectif atteint ou pas) » (Clanet, 2012, p. 21).

L'efficacité relève de « la capacité à atteindre les objectifs au prix d'une consommation optimale des ressources. L'efficacité réclame que soient arrêtés les indicateurs permettant de pouvoir mesurer le degré d'efficacité » (Clanet, 2012, p. 21).

L'efficacité pédagogique peut se mesurer et être étudiée de différentes manières.

Elle peut l'être notamment au travers de trois dimensions distinctes : le **progrès**, la **réention** et le **transfert** (Bissonnette & Richard, 2005) grâce à l'analyse des **rapports entre ressources, moyens et produits** : ce que j'apprends durablement et peux réinvestir dans des pratiques ? Comment je l'apprends et pour quels résultats ? L'efficacité interroge donc directement le **processus d'enseignement-apprentissage** et la qualité des ressources à disposition pour apprendre (sont-elles pertinentes, adéquates, congruentes, discriminantes, accessibles, etc.) au regard des objectifs visés par leur mobilisation. Ces ressources peuvent être relatives aux méthodes, aux scénarios, aux outils pédagogiques, mais aussi aux interactions formateur-apprenants, entre apprenants, ou aux dispositifs techniques, etc. « L'évaluation des résultats atteints en fonction des ressources utilisées est importante parce qu'elle permet, en l'occurrence, de déterminer l'efficacité de la formation, c'est-à-dire d'apprécier les résultats atteints en fonction d'un rapport coût-résultats, et de mesurer l'adaptation du niveau d'enseignement et des méthodes » (Clanet, 2012, p32).

Parce qu'au final, que permet et produit le processus d'enseignement apprentissage convoqué ?

Un processus d'enseignement-apprentissage associe deux termes : enseignement et apprentissage, cette association dans la littérature didactique tente de « faire exister dans une même lexie deux logiques complémentaires, celle qui pense la question de la méthodologie et de la méthode d'enseignement, et celle qui envisage l'activité de l'apprenant et la démarche heuristique qui la sous-tend » (Valenzuela, 2010, p. 75) et rend compte de leur complémentarité.

Étudier un processus d'enseignement-apprentissage et questionner l'efficacité pédagogique d'un environnement d'apprentissage ou d'un dispositif de formation consistera à s'interroger sur :

- **Les objectifs d'apprentissage visés**
- **Les supports et les activités d'apprentissage au regard des moyens dont on dispose**
- **Les modalités de réalisation de ces activités, et leur organisation temporelle**
- **Les modalités d'évaluation des résultats attendus et atteints.**

Autrement dit sur le contenu et l'organisation des scénarios pédagogiques !

Avant d'aborder ces questions, il paraît nécessaire de repérer les atouts dont disposent les JNE et de se questionner sur la manière dont ils peuvent bouleverser les modalités d'enseignement et d'apprentissage. En effet, enseigner et apprendre avec les jumeaux numériques comportent-ils des différences avec les conditions de l'apprentissage sans jumeaux numériques ? Si oui, quelles sont ces différences ? Où se situent ces différences ? Sur le plan de l'ingénierie, des méthodes pédagogiques, des savoirs enseignés ou appris ?, etc. Comment maximiser l'expérience d'apprentissage lorsque l'on utilise les JNE ?

3.1. Des Jumeaux Numérique pour/dans l'enseignement : revue de littérature

La littérature scientifique sur les JNE est rare, c'est donc à partir de l'exploitation des expériences d'apprentissage issues de l'intégration des JN dans l'enseignement du projet JENII que ce livre blanc pourra être complété dans les mois à venir.

Il est difficile de définir et de circonscrire ce que pourrait être un jumeau numérique pour l'enseignement, car la plupart des textes scientifiques disponibles traitent majoritairement des apprentissages liés à l'utilisation des jumeaux dans des contextes de production et de la manière dont ils permettent de faire évoluer des systèmes physiques. Ainsi, lorsqu'il est question d'apprentissage, il s'agit des apprentissages que l'utilisation des JN permet au regard de ce qu'ils permettent de tester (évaluation de systèmes, de produits, de processus ...) dans les domaines de l'aéronautique, de l'industrie, de la santé, de l'aviation, du bâtiment, etc.

Si l'on s'intéresse à la littérature de vulgarisation, l'opération n'est guère plus simple puisque l'utilisation du terme n'est pas sans poser de question. Sur le site d'ARSKAN par exemple, on trouve un article intitulé : « Le jumeau numérique, pour une pédagogie innovante : la cathédrale de Peterborough numérisée »¹¹. À la lecture de cet article, il est possible de se demander s'il s'agit bien d'un JN(E). Ne serait-ce pas plutôt une simple maquette numérique permettant de modéliser le bâtiment à des fins de maintenance ou de conservation d'une part, et de visite de manière virtuelle d'autre part ? Ce n'est qu'un exemple parmi tant d'autres.

Dans d'autres cas, des projections se font autour de jumeaux numériques de l'humain et à partir desquels il serait possible de faire de l'*adaptive learning* et plus encore: « on peut envisager la création d'un jumeau numérique pour chaque apprenant. À partir de l'historique de l'éducation d'un individu, des données obtenues pour l'analyse de l'apprentissage, des résultats d'expériences de laboratoire et de test, le modèle virtuel de l'apprenant pourrait être utilisé pour prédire les chances de succès et d'échecs, identifier les éléments de connaissance à développer ou renforcer et proposer des activités adaptées aux besoins personnels de l'apprenant. Comme ce jumeau représente à la fois nos connaissances et nos compétences ou habiletés, il peut prendre en compte les connaissances que nous avons tendance à oublier et les habiletés que nous perdons par manque de pratique. Ce modèle devient donc le point de départ d'un programme proactif d'enseignement personnalisé. Mais pourquoi ne pas aller encore plus loin ? Si l'apprenant a besoin d'apprendre quelque chose de nouveau, il pourrait confier à son jumeau numérique le soin d'adapter ses outils d'apprentissage (téléchargement d'applications sur son téléphone intelligent, introduction d'un mode infrarouge pour sa caméra, nouveau moniteur pour sa montre intelligente) afin qu'il puisse acquérir et exercer ces nouvelles connaissances ? » (Guay, 2019)¹². Au final, il reste difficile de trouver une littérature scientifique (ou non) sur la question, car le terme de JNE est souvent utilisé sans être explicité, tel un *folk concept*, au risque d'induire en erreur les lecteurs non-initiés.

¹¹ <https://actu.arskan.com/jumeau-numerique-et-continuite-pedagogique>

¹² <https://www.innovation-pedagogique.fr/article5012.html>

3.1.1. Définir les JNE : état de l'art

Une recherche dans SCOPUS (2022) permet d'identifier 4994 documents traitant des JN, seuls 601 traitent de leur usage pour l'enseignement, et seulement 33 d'entre eux s'inscrivent en sciences sociales. Sur ces 33 textes, 23 traitent non pas de jumeaux numériques pour l'enseignement, mais de l'intelligence artificielle (sous couvert de Machine ou/et de *deep learning*). Il ne reste donc que 10 textes portant spécifiquement sur les JNE.

Ce n'est pas très étonnant. Dans une revue de littérature récente, Rathore et al. (2021) indiquent qu'« il n'y a pas eu beaucoup d'efforts de recherche sur l'utilisation de la DT dans le domaine de l'éducation ». Ils ne font référence qu'à l'une d'elles, celle de Sepasgozar (2020). Il s'agit de l'utilisation « des jumeaux numériques et des jeux virtuels pour l'éducation en ligne. Les auteurs ont créé un jumeau numérique d'une excavatrice ainsi qu'un jeu virtuel pour le cours de gestion de la construction et d'ingénierie » (Rathore et al., 2021).

On peut repérer néanmoins d'autres travaux qui peuvent s'avérer d'un grand intérêt pour comprendre ce que peut changer l'usage de jumeaux numériques pour l'enseignement. Ainsi les travaux de David, Lobov, and Lanz (2018) insistent sur le fait que les « *digital twins of manufacturing processes can play a significant role in delivering efficacious learning experiences. The highfidelity replication of the physical system aids with reflective observation of the entailed processes in the greatest possible detail, fostering concrete learning experiences* ». Ces chercheurs présentent un travail portant sur méthodologie didactique impliquant le jumeau numérique d'un système de fabrication flexible. Ils mettent en évidence l'intérêt de la prise de conscience des situations dans l'effectuation d'apprentissages durables. Pour eux, l'ensemble des théories de l'apprentissage – et les raisonnements mentaux

qu'elles impliquent - peut être mobilisé dans leurs aspects positifs pour comprendre comment l'apprentissage opère avec les jumeaux numériques : observation, expérimentation, évaluation, conceptualisation, mémorisation, projection...

Une autre recherche montre que les processus de transposition didactique et informatique sont nécessaires lorsque l'on cherche à utiliser des JN dans l'enseignement (Badets et al., 2021). Cette recherche met en évidence l'importance de faire corrélés objectifs pédagogiques et développement des usages pédagogiques, soulignant par-là que certaines fonctionnalités du monde physique peuvent ne pas avoir d'intérêt à être reproduites dans le monde virtuel.

On voit au travers de ces trois exemples, que la recherche a beaucoup à apporter pour mesurer l'intérêt de l'usage des JN dans l'enseignement, et mettre en évidence les conditions d'une utilisation optimale. Il importe de tenir compte des possibles qu'ouvrent les technologies mobilisées par les JNE (simulation et RV notamment) tout en arrimant ces possibles à des scénarisations pédagogiques efficaces et efficientes.

3.1.2. Les JNE : pour quelle efficacité pédagogique ?

Les mérites pédagogiques de l'utilisation des JN dans l'enseignement sont clairement affichés et vantés sur un certain nombre de sites vendeurs de solutions numériques. Par exemple :

« Avec l'arrivée de l'Internet des sens (permettant, grâce à la technologie haptique, d'expérimenter des touchers ou des odeurs en ligne), vous pouvez, de n'importe où dans le monde, visiter Pompéi et toucher les objets qui s'y trouvent. Vous pouvez vous promener dans les rues de Londres avant le grand incendie, voire même pendant. Vous pouvez vous balader avec des dinosaures. Ce n'est pas seulement incroyable, c'est aussi un outil puissant » (Ericsson, Gouk, Loy, & Hospedales, 2022).

Sur le plan scientifique, si l'on trouve peu de choses sur les JNE en tant que tels, la littérature disponible traite néanmoins de manière significative de l'utilisation dans l'enseignement des technologies immersives et interactives (telles que la RA, la VR, ou la simulation). Ce livre blanc traitera plus loin de ce qu'il faut en retenir.

Deux thèses développées dans le cadre de JENII devraient aider à une meilleure modélisation des effets et des usages des JNE dans l'enseignement. Leurs auteurs vont réfléchir aux conditions d'efficacité pédagogique de l'usage des JNE avec un ancrage en ergonomie cognitive pour l'une (cf. encadré 2), en sciences de l'éducation pour l'autre (cf. encadré 3). La première est présentée ci-dessous. Elle va s'intéresser plus particulièrement aux résultats de l'apprentissage. La seconde va interroger l'expérience apprenant et chercher à comprendre comment celle-ci peut venir réinterroger l'ingénierie des scénarios pédagogiques mobilisés (cf. § suivant) :

Les jumeaux numériques en proposant une interconnexion d'un système avec sa réplique numérique permettent de nombreuses actions (contrôle en temps réel, manipulation à distance, tests de scénarios multiples). Ils sont largement utilisés dans l'industrie 4.0 et sont même considérés comme l'une des 10 tendances stratégiques technologiques (CeArley, Burke, Searle, & Walker, 2016). Toutefois, nous observons qu'ils sont encore peu utilisés dans l'éducation, mais peuvent également jouer un rôle important dans le développement des environnements virtuels éducatifs (Mashaly, 2021). Ces dernières années ont été bouleversées par la pandémie Covid-19 qui a forcé le monde à se réorganiser dans tous les domaines d'activité. L'éducation ayant été particulièrement touchée, les enseignants et les élèves ont dû faire face à la contrainte de ne plus pouvoir être physiquement dans la même pièce. Cette expérience a entrouvert des paradigmes d'apprentissage avec la possibilité d'interagir avec les objets d'apprentissage à distance grâce aux technologies immersives (réalité virtuelle, Métavers,

réalité étendue). Les environnements virtuels immersifs permettant une collaboration synchrone de plusieurs utilisateurs, ce qui rend possible le co-apprentissage. Les études sur les environnements virtuels éducatifs montrent que les élèves peuvent interagir de manière plus intuitive avec les objets d'apprentissage et présentent une plus forte motivation et un plus fort engagement que lors d'un apprentissage classique (Parong & Mayer, 2018). Cependant, les résultats obtenus lors d'un apprentissage basé sur des technologies immersives restent dans certains cas moins bons que les résultats obtenus lors d'un apprentissage basé sur un support classique (Hamilton, McKechnie, Edgerton, & Wilson, 2021). La réalité virtuelle facilite les interactions avec les jumeaux numériques par une manipulation réaliste des équipements industriels par les utilisateurs. Cette association entre jumeaux numériques et technologies immersives présente des avantages dans le processus de production comme la réduction des risques et la réduction du délai et des coûts lors de modifications (Havard, Jeanne, Lacomblez, & Baudry, 2019). Les jumeaux numériques en réalité virtuelle constituent un intérêt particulier chez un public d'étudiants ingénieurs amenés à manipuler ces technologies dans leurs futures missions et offrent des potentialités de pédagogie active (Kister, 2021). Ainsi, concernant les apprentissages, les environnements virtuels immersifs et les jumeaux numériques révèlent de nouvelles potentialités, mais soulèvent aussi de nombreuses questions scientifiques concernant les interactions humain-machine. En adoptant une démarche de conception centrée utilisateur, cette thèse vise à évaluer l'efficacité pédagogique des jumeaux numériques dans des environnements virtuels immersifs destinés à l'apprentissage (objectif 1) et générer des préconisations ergonomiques pour la conception de jumeaux numériques en contexte d'apprentissage (objectif 2) ».

Encadré 3 : thèse JENII « Evaluation de l'efficacité pédagogique des jumeaux numériques en environnements virtuels immersifs » (Pierre Bondesan)

3.1.3. Les JNE : pour quelles expériences d'apprentissage ?

« Jeunes maîtres [...] Souvenez-vous qu'en toute chose vos leçons doivent être plus en actions qu'en discours ; car les enfants oublient aisément ce qu'ils ont dit et ce qu'on leur a dit, mais non pas ce qu'ils ont fait et ce qu'on leur a fait » J.J. Rousseau, 1966, in (Roiné, 2018)

« Apprendre étant d'une part un processus et d'autre part un produit, un apprenant peut décrire comment il a procédé dans une situation d'apprentissage et ce qu'il a le sentiment d'avoir appris » (Deschryver, 2008). En ce sens révéler l'expérience d'apprentissage permet au formateur de mieux comprendre les effets de ses choix pédagogiques et didactiques sur les apprentissages. Mais pas seulement, car l'expérience d'apprentissage varie d'un apprenant à l'autre en fonction de la manière dont il s'engage dans les activités d'apprentissage, de ses connaissances, des ressources à sa disposition, de son rapport aux autres et au milieu didactique dans lequel il est immergé, de ses représentations, de sa perception des exigences de la situation, etc.

L'expérience d'apprentissage résulte de la manière dont l'apprenant s'est engagé dans l'apprendre et des changements que cela a engendrés (ou non) pour lui.

En ce sens, un *apprentissage* peut se définir comme « une modification stable et durable du comportement de l'apprenant qui lui permet de résoudre des problèmes qu'il n'arrivait pas à solutionner auparavant » (Bisson, Drot, & Uhlrich, 2020), c'est donc :

- « *accueillir des contenus dont nous supposons qu'ils nous seront utiles pour résoudre certaines des questions que nous nous posons sur le monde et sur nous-mêmes* » (Sá, 2002).

- « *se placer du côté de celui qui se construit, se transforme au cours de toute démarche d'apprentissage, volontaire ou non* ». ¹³
- « *une action que le sujet exerce sur lui-même* » (Reboul, 2010)
- une « *expérience transformatrice* » (Demers, 2011; Demers & Éthier, 2013): « *On apprend que ... pour être informé. On apprend à ... pour savoir faire. On apprend ... pour comprendre, construire du sens. On apprend à être ... pour penser le monde* ».
- un processus, « *un phénomène d'adaptation en quatre dimensions : cognitive (traitement de l'information), affective (intentions), métacognitive et sociale (ce que l'on apprend dépend de notre environnement). Chacune de ses dimensions étant propre à chaque apprenant, l'apprendre l'est aussi* » (Giordan, 1998)).
- un traitement réussi d'une situation-problème (Jonnaert, Furtuna, Ayotte-Beaudet, & Sambote, 2015)

Les apprentissages qu'il est possible d'opérer avec les JNE sont-ils différents de ceux que l'on peut réaliser dans des situations d'enseignement-apprentissage classiques ? **Quelles expériences d'apprentissage en émergent ?** Les modalités pédagogiques permettant de soutenir les apprentissages et l'expérience d'apprentissage recouvrent-elles les mêmes contraintes et les mêmes opportunités ? C'est à ces questions que la seconde thèse sur JNE conduite en sciences de l'éducation cherchera à répondre dans le but de réinterroger l'ingénierie des scénarios pédagogiques mobilisés (cf. encart 3).

¹³ <https://sciences-cognitives.fr/wp-content/uploads/2020/10/AFSC-Fiches-Theoriques-Definir-apprendre.pdf>

Qu'il soit là pour enrichir un outil pédagogique physique, ou pour le rendre accessible de n'importe où, le jumeau numérique est un nouvel environnement virtuel pour l'apprentissage humain (EVAH). Cette thèse s'intéresse aux conditions pour améliorer l'expérience apprenant (Learner Experience – LX). L'expérience apprenant, c'est s'intéresser à l'apprenant, décoder ce qu'il vit, ressent, expérimente et pense, de manière à se saisir du sens et de la valeur d'usage de son expérience (Fernagu, 2020).

L'objectif de cette recherche doctorale est de mieux comprendre l'expérience apprenant, préciser ses caractéristiques/dimensions. De ce sujet découlent plusieurs questions : Comment améliorer l'engagement et la motivation des apprenants ? Comment personnaliser les apprentissages ? Comment scénariser un cours/TP ? Comment s'assurer d'une expérience apprenant efficace et plaisante de bon niveau avec ou sans technologie ? Ce dernier point est essentiel à l'heure de l'étudiant ultra connecté. Il apparaît également un besoin d'outiller et de former les concepteurs pédagogiques à scénariser les apprentissages et les ludiciser. Le game based learning (ou gamification) et les jeux sérieux (serious game) font partie des pédagogies interactives désignées par les chercheurs comme « (...) les dispositifs qui placent les étudiants dans la nécessité de se montrer visiblement actifs dans la manipulation des savoirs, des outils techniques, des supports d'information et dans les échanges avec leurs pairs ou avec des tiers » (Lemaître & Thépaut, 2015). L'apprentissage utilisant des jeux sérieux, tels que les outils de simulation - c'est-à-dire de mise en pratique dans un environnement fictif - doit respecter certains principes fondamentaux en terme d'animation interactive pour son efficacité. La mise en situation permettant à l'apprenant de créer et de tester son propre apprentissage, favorise l'autonomie, l'organisation, l'expérimentation et la créativité. Elle renforce tout d'abord la diversité des compétences visées en développant la collaboration spontanée, et, si on y intègre des situations réflexives et de feedback, augmente la motivation et la satisfaction des apprenants. Dans le cadre du game based learning, l'aspect ludique de mise en situation dans un environnement simulé par des outils digitalisés, favorise l'expérimentation et, donc, la reproduction ou l'utilisabilité de la démarche dans le cadre réel. Les aspects ludiques qui auraient des effets

positifs sur la motivation et l'estime de soi (Cerezo, 2012). Il s'agira donc de comprendre quelles sont les conditions de ludicisation à respecter/favoriser pour améliorer l'expérience apprenant

Encadré 4 : thèse JENII « expérience apprenant et ludicisation » (Cédric Facon)

Puisque la littérature concernant l'apprendre avec les JNE est rare, intéressons-nous à la manière dont les recherches sur le **numérique pour apprendre** peuvent alimenter l'usage des JNE et la compréhension de ses conditions d'utilisation (cf. image 10).

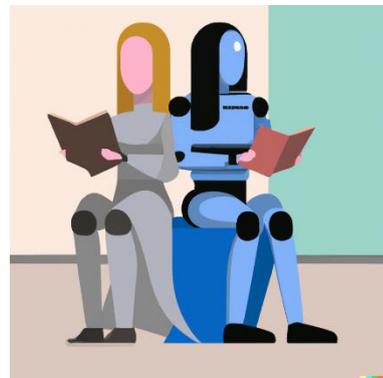


Image 10 : Crédit image : Cette image a été générée par DALL-E 2

3.2. Apprendre avec des jumeaux numériques pour l'enseignement

3.2.1. L'apprendre avec les technologies ?

Lorsque l'on traite des technologies pour apprendre, il est souvent question de e-formation.

La e-formation renvoie à « des environnements d'apprentissage en ligne dont une des principales propriétés est d'utiliser des technologies du multimédia et de l'internet pour faciliter l'accès à des ressources et des services éducatifs. Ces environnements intègrent des outils logiciels qui permettent la gestion et le suivi d'une formation en ligne, l'accès à des ressources pédagogiques médiatisées, des possibilités technologiques d'interactions synchrones et asynchrones, de travail et de collaboration à distance ou encore de production de partage de contenus » (Jézégou, 2019b, p. 9). Ils ont bouleversé nos manières d'appréhender l'organisation des apprentissages.

Dès les années 2000, l'intégration pédagogique des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans les milieux éducatifs et la formation professionnelle a suscité des espoirs, en particulier celui de résoudre des défis pédagogiques classiques comme l'augmentation de la motivation des apprenants ou la réduction des taux d'abandon et d'échec scolaire (Lameul, 2008).

Les travaux de Romero, Laferriere, and Power (2016) permettent de proposer un modèle à cinq niveaux d'engagement dans l'utilisation pédagogique de la technologie. Ils montrent que le modèle Passif-Participatif (P-P), qu'ils qualifient de socioconstructiviste, participatif et inclusif, permet aux enseignants d'intégrer les TIC dans leur propre contexte éducatif. Un élément central de leurs résultats est que les TIC ne constituent pas une révolution éducative en eux même : dans certaines situations, leur utilisation pédagogique conduit à des situations d'apprentissage véritablement

améliorées par la technologie, mais dans d'autres, les TIC pourraient reléguer l'apprenant au rang de spectateur passif ou d'utilisateur/consommateur peu actif de contenu multimédia. De telles approches sont même contre-productives : elles limitent la mise en œuvre des processus d'apprentissage (cf. image 11).

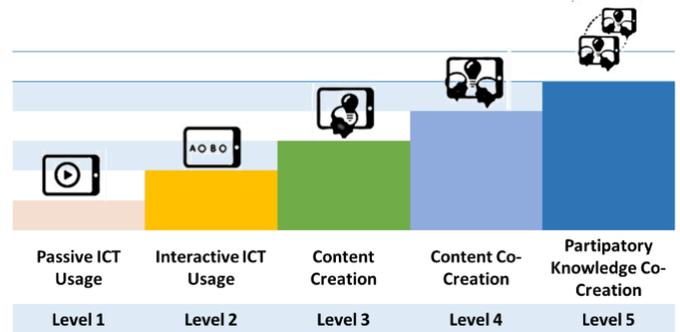


Image 11 : Type d'usage du numérique selon le niveau d'engagement (adapté de Romero et al., 2016)



**Cf. Fiche-outil n°2 :
les modes d'engagement dans
l'apprentissage**

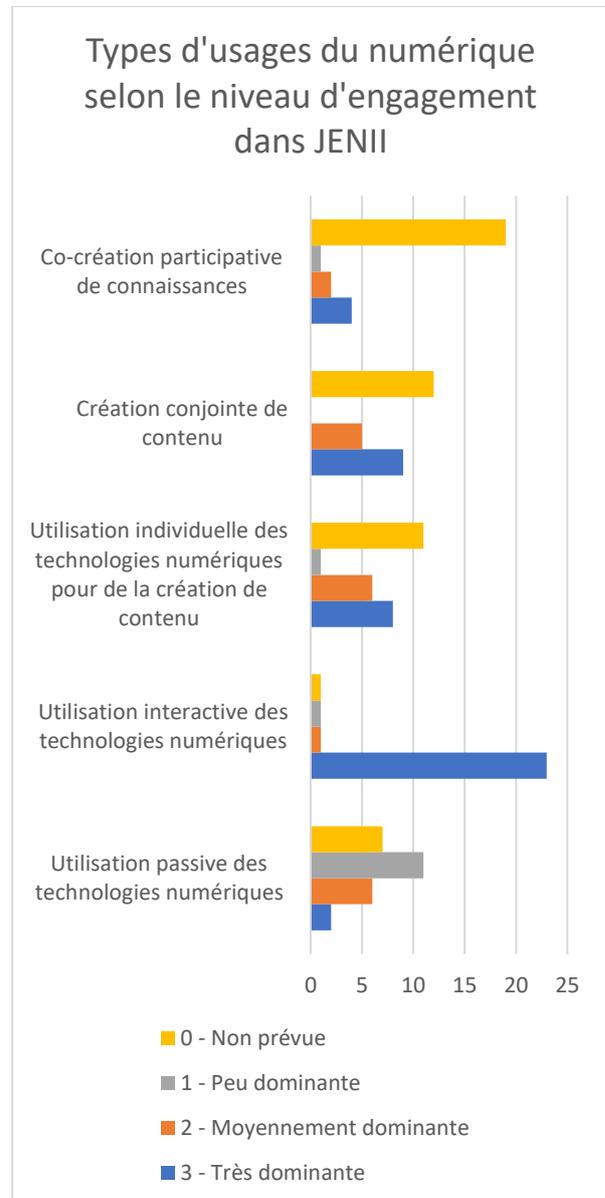
Ces résultats ont mis en cause les approches trop technocentrées qui ont tendance à postuler que la technologie produit automatiquement des avantages pédagogiques, sans tenir compte de toutes les composantes d'une situation d'apprentissage donnée : « l'apprentissage ne se fait pas dans le vide. Nous ne pouvons pas attendre des technologies numériques (ordinateurs portables, tableaux blancs interactifs, tablettes, etc.) qu'elles améliorent l'apprentissage indépendamment de la situation d'apprentissage et du contexte dans lequel elles sont utilisées, pas plus que nous ne pouvons attendre des outils analogiques antérieurs (craie, crayons, ...) qu'ils l'améliorent, en eux-mêmes et par eux-mêmes » (Romero et al., 2016). En d'autres termes, **la technologie n'est qu'une composante parmi d'autres dans une situation d'apprentissage donnée** et toute étude relative à l'utilisation pédagogique des TIC doit prendre en compte

toutes les composantes de la situation d'apprentissage (activité, compétences visées, ressources et systèmes d'instruments, acteurs et durée de l'activité). Sans cela les résultats des études sont difficilement interprétables. Des travaux de l'OCDE montrent par exemple des résultats contradictoires sur le rôle et l'impact des ordinateurs dans les classes : alors que de nombreuses études d'impact tendent à mettre en évidence une relation positive entre le nombre d'ordinateurs dans une classe et l'apprentissage des élèves, d'autres révèlent un effet négatif sur les résultats d'apprentissage directement lié à la quantité de matériel utilisé en classe (Romero, Lille, & Patiño, 2017). Des études plus fines montrent qu'en pratique, ce n'est pas le nombre d'ordinateurs présent dans une classe ni le temps passé à utiliser un ordinateur par les élèves ni même la nouveauté de son utilisation comme le type de technologies mises en œuvre qui sont significatifs, mais plutôt « les types d'usages pédagogiques auxquels les TIC sont appliquées qui ont le potentiel de favoriser l'apprentissage » (Romero et al., 2016).

Dans les différents scénarios du projet JENII, les porteurs de projets ont une vision quasi unanime d'utiliser la technologie de jumeau numérique avec une forte interactivité (cf graphique 4). On peut également observer qu'une moitié des scénarios demande de la création individuelle ou conjointe de contenu.

L'innovation technologique peut être motivante pendant une phase initiale. Mais cette motivation liée à la simple nouveauté technologique tend à disparaître rapidement. À long terme, c'est **le fait de s'engager dans des usages créatifs et co-créatifs des TIC qui augmentent les apprentissages**, et cela ne nécessite pas nécessairement un investissement technologique de haut niveau : logiciels ouverts, technologies gratuites (par exemple, les outils Google, Scratch, etc.) ; exécutables sur une variété d'appareils (anciens), combinaison de différents types de

technologies éducatives, réaffectation de technologies non éducatives, etc.



Graphique 4 : Types d'usages du numérique selon le niveau d'engagement dans JENII

Comment faire en sorte que l'intégration des JN dans l'enseignement évite le risque d'une surtechno-centration et s'ajuste aux besoins d'apprentissage?

La prédominance d'une approche « technocentrée » de la conception des technologies émergentes est une critique souvent adressée aux concepteurs et développeurs de celles-ci alors même que des outils et propositions méthodologiques visant à intégrer les usages dans les processus de conception sont proposés (Barcellini, 2017; Burkhardt, 2010; Nelson, Buisine, & Aoussat, 2012; Safin, 2021).

« Dans le domaine de la recherche technologique, l'objectif poursuivi en premier lieu concerne la mise au point technologique. Les systèmes conçus (démonstrateurs, maquettes et prototypes) ont la vocation de montrer l'intérêt voire de valider un concept ou une théorie, différant en cela fortement de l'objectif d'obtention d'outils fonctionnels, utiles et utilisables dans un contexte d'ingénierie classique » (Burkhardt, 2010).

Dans le domaine de l'éducation et de la formation en particulier, on observe que très peu de travaux s'appuient pour le moment sur des analyses réelles, tandis que des hypothèses floues ou génériques foisonnent sur les éventuels besoins et usages possibles. Burkhardt (2010) suggère un possible effet du degré de maturité de la technologie concernée : les concepteurs appartenant au domaine de la réalité virtuelle, discipline et domaine technologique jeune, seraient d'avantage centrés sur l'artéfact et concernés par l'interaction, l'immersion et les interfaces tandis que ceux travaillant dans le domaine beaucoup plus mature des simulateurs s'intéressent d'avantage aux tâches, aux scénarios et intègrent les avantages et les limites des simulateurs. Ce constat s'accompagne d'une appropriation parfois approximative de concepts et théories de l'apprentissage dans le champ de la

conception des technologies émergentes visant des situations d'apprentissage : des modèles (souvent implicites) faibles, tronqués, voire naïfs, de l'apprentissage et des sujets apprenants sont convoqués, ce qui a pour effet de renforcer l'orientation techno-centrée de la conception (Burkhardt, 2010; Kaptelinin, 2003; Rabardel & Pastré, 2005). La réciproque étant probablement vraie (l'appropriation de certaines notions techniques, par les psychologues ou des ergonomes est souvent difficile), il est par conséquent incontournable et très prometteur de travailler en pluridisciplinarité entre les communautés issues des disciplines technologiques et celles issues disciplines des Sciences Humaines (Psychologie, Ergonomie, Sciences de l'Éducation). Le projet JENII est porteur de cette complémentarité. Parmi les grandes questions qui se posent, au croisement de ces différentes disciplines se trouvent notamment celles de l'articulation des dimensions pratiques et théoriques de l'apprentissage, et celles de l'engagement de l'apprenant.

Panorama des bouleversements pédagogiques

Le numérique pour apprendre ouvre à de nouvelles fonctionnalités qui peuvent, sous conditions, être particulièrement intéressantes pour penser d'autres formes d'expériences d'apprentissage.

Enseigner et apprendre avec le numérique modifient en effet les conditions mêmes de l'apprentissage et de l'enseignement (cf. image 12) sur plusieurs plans :

- **Spatial :** *L'espace de l'apprentissage devient plus flexible, plus hybride, plus ouvert. Le lieu traditionnel de l'activité d'apprentissage (salles de classe, amphithéâtres universitaires, atelier, salles de TP, laboratoires, etc.) se transforme et s'articule désormais (pour tout ou partie) à d'autres espaces de formation tels que des plates-formes numériques (voire des*

campus ou des métavers) (Fleury et al., 2022). En faisant « *tomber les murs de la classe* », ces dernières offrent de nombreuses possibilités d'apprendre autrement (de manière synchrone ou asynchrone) grâce aux outils de présentation de contenus, de communication audio/vidéo, de rétroaction, d'interaction, de collaboration, d'organisation, etc. qu'elles proposent (Fleury et al., 2022; Koscielniak & N'Hari, 2015). Font également irruption dans les espaces de la formation, des technologies qui transforment la manière de conduire les activités d'apprentissage, puisqu'elles permettent de simuler le réel, voire de s'y immerger et d'y interagir, pour appréhender des réalités autrement (le cœur d'une machine, des phénomènes climatiques, la vie d'un atelier, etc.). Cet ensemble de nouveaux espaces et environnement d'apprentissage bouleversent profondément la manière de concevoir l'ingénierie pédagogique des enseignements (processus par lequel l'enseignant conçoit son intervention, en termes de contenus et d'organisation, la met en œuvre, évalue les connaissances acquises et les capacités développées par l'apprenant). Ils ont l'avantage de pouvoir faire varier les stratégies d'enseignement-apprentissage.

- **Technique** : le matériel (dit classique) support à l'activité d'apprentissage que nous avons tous utilisé pour réaliser une séquence pédagogique (par exemple une paillasse pour les TP de chimie ou une machine-outil pour l'apprentissage des procédés de fabrication, un photocopie, un diaporama, etc.) se combine aujourd'hui à l'utilisation de matériels numériques plus ou moins disruptifs. Ces combinaisons

offrent de nouvelles possibilités pour faciliter et orienter les apprentissages (Dewez & Fouché, 2016). Avec le numérique (par exemple la modélisation et la représentation en 2D ou 3D, l'immersion avec la réalité virtuelle ou augmentée, la simulation...), il devient possible par exemple de se confronter au réel reconstruit, d'augmenter la perception des objets utilisés dans les séquences d'apprentissage (ex : visualiser un système manufacturier, des molécules, voire des comportements d'objets qui ne sont pas visibles à l'œil nu, etc.), etc. Aujourd'hui c'est bien, de manière complémentaire, que ces matériels physiques et numériques sont utilisés (Fleury & Richir, 2023). Les modalités techniques d'enseignement deviennent **omnicanales, phygiales**.

- **Documentaire** : Les ressources documentaires traditionnellement support à l'activité d'apprentissage comme les livres que nous trouvons dans les bibliothèques, se sont digitalisées. Il est actuellement presque impensable de ne pas pouvoir donner accès à des livres ou quelque documentation dans un format numérique. Cela a permis de démocratiser la création de ressources (texte, images, vidéos, MOOC, podcast...) et leur diffusion (anywhere, everywhere, everytime) via les plateformes web (Learning Management System, bases de données, etc.) et l'ensemble des réseaux sociaux actuels.
- **Ingénierique** : le processus de conception des activités d'apprentissage qui structurent les « parcours / trajectoires » que suivent l'enseignant (pour enseigner) et les apprenants (pour apprendre) sont de

moins en moins formatés, communs et dirigés, et de plus en plus flexibles, individualisés et co-construits (ex : classe inversée, serious game, modules sur étagère, etc.). Cela permet de répondre à l'hétérogénéité croissante des populations d'apprenants. Le numérique a aussi apporté des environnements permettant de supporter cette agilité (e-learning, LMS...).

- **Didactique** : les enseignants voient également leur rôle évoluer. Ils passent d'une posture de « sachant/transmetteur » à celle d'animateur, de facilitateur, de tuteur, d'accompagnateur. Ce changement de posture implique d'enseigner autrement et de s'attacher aux besoins et aux attentes des apprenants, à la diversité des profils d'apprentissage, etc. Ce n'est plus eux (et leurs savoirs) qui sont au centre de la formation, mais le groupe d'apprenants.

De ce fait, de nouveaux besoins de formations de formateurs émergent (Fleury & Richir, 2022). La mobilisation des technologies numériques conduit également à l'apparition de nouveaux métiers support (ex : ingénieur accompagnateur des enseignants dans le développement et la mise en place des environnements numériques), etc.

Si le numérique dans l'enseignement (vs. *Technologies éducatives*) est désormais bien implanté, il existe encore de nombreuses disparités dans les usages qui ne cessent d'évoluer, surtout depuis la pandémie du Covid 19 (Blandin, 2020; Bonfils, 2020). Dans le domaine qui nous intéresse ici, les JNE, c'est encore plus le cas !

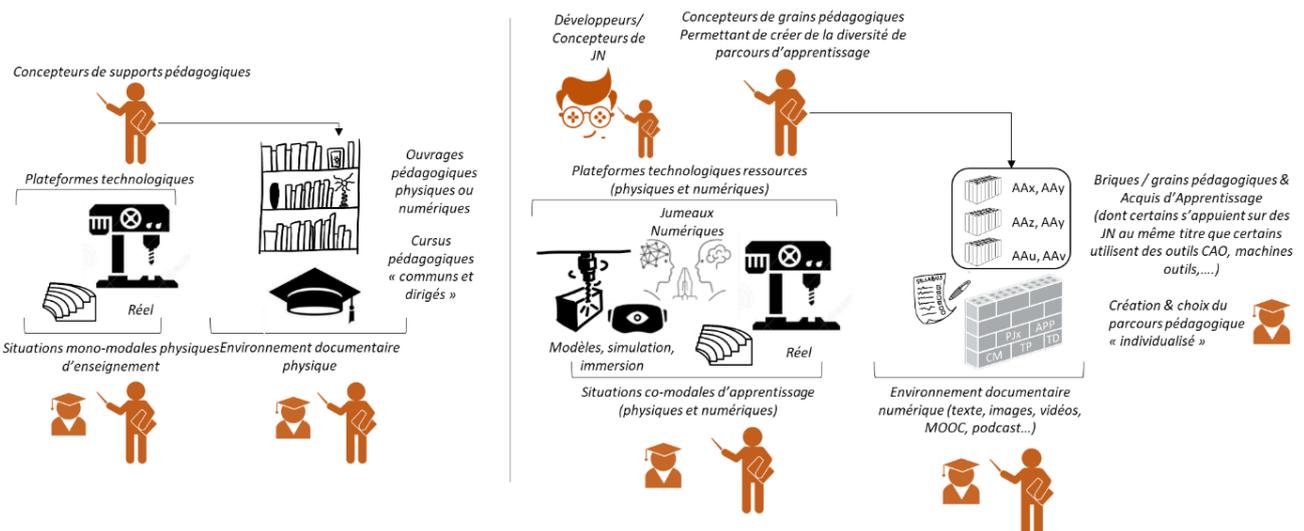


Image 12 : Eléments constitutifs et évolution des environnements d'apprentissage (Illustration Lionel Roucoules)

L'utilisation des technologies issues de l'industrie 4.0 dans l'enseignement permet **l'exposition à des problèmes réels et des problèmes du monde réel** (David et al., 2018) (Céci, De Lièvre, Paquelin, & Koscielniak, 2016; Koscielniak, 2021; Koscielniak & N'Hari, 2015). La simulation a, en ce sens, fait ses preuves, tout comme les *Learning manifactories*. Même si l'on sait que les « *Models are, by definition, simplifications of the real thing and in that sense, do not aim to replicate the original system in the same detail as that system* » (Batty, 2018) !

La simulation repose sur la capacité à « faire comme si » et est de ce fait très souvent exploité dans les dispositifs de formation afin de permettre de nouveaux apprentissages (Béguin & Weill-Fassina, 1997; Gaba, 2007; Rogalski, 1997). En didactique professionnelle par exemple, l'usage des simulateurs en formation est souvent approché comme un substitut du réel visant la fidélité aux situations de référence (Pastré, 2005b). Il est question de simulateur "haute-fidélité". Dans une approche classique, cette fidélité peut être objective (physique), perceptuelle ou fonctionnelle : « *Paige and Morin (2013) identifient trois pôles relatifs au critère de fidélité : 1/ fidélité objective ou physique : degré de ressemblance avec la situation de référence (équipement, environnement) ; 2/ fidélité perceptuelle ou psychologique : degré d'engagement du participant dans la situation ; 3/ fidélité fonctionnelle : degré relatif à la dimension interactive (réponses du simulateur). Ils ajoutent une fidélité qui est relative aux indices c'est-à-dire aux éléments ressources pour le participant à la simulation : ces indices sont soit réalistes soit fictionnels* » (Secheppet, 2020, p. 72).

Ce lien avec le réel pourrait faciliter les apprentissages et le transfert des apprentissages. Mais, comme nous le verrons au § 3.3.4. Apprendre avec la simulation, ce critère ne fait pas l'unanimité dans le monde de la recherche, en particulier du côté des spécialistes des théories de l'apprentissage, car simuler le réel n'est pas le réel (Horcik, Savoldelli, Poizat, & Durand, 2014; Leblanc, 2014; Nyssen, 2005; Secheppet, 2020).

Si la simulation est au cœur des textes traitant d'apprendre à partir du réel, il existe toute une littérature traitant d'autres dispositifs pédagogiques s'appuyant sur l'apprendre avec, à partir et du réel : les travaux sur la pédagogie de l'alternance (LINEACT, 2022), ceux issus de la recherche ou de la formation action, etc. par exemple. Tout le courant de pensée reliant formation et travail (ergonomie, didactique professionnelle, Clinique de l'activité, etc.) relève aussi de cette préoccupation.

Les pédagogies du réel permettraient plus qu'ailleurs de développer des "dispositions à agir" (Durand, 2008) et auraient des vertus "émancipatoires" (Rancière, 2014; Tomès, 2022), à condition qu'elles multiplient les moments d'apprentissage et ne se focalisent pas sur l'apprentissage d'une seule situation, ou la résolution d'un seul problème (Fernagu, 2018; Tardif, 1999) et qu'elles laissent une belle part à l'analyse de l'expérience vécue (Argyris & Schön, 2001; Guillaumin, 2009; Proulx et al., 2012).

Les porteurs de projet JENII font appel à ces « pédagogies du réel » (cf. tableau 6). En s'appuyant sur un réel simulé, recomposé, reconstruit, ils envisagent des apprentissages bien spécifiques (cf. tableau 7, graphique 5, images 13 et 14) qui recouvrent de nombreux champs de savoirs (cf. tableau 8), plus ou moins complexes.

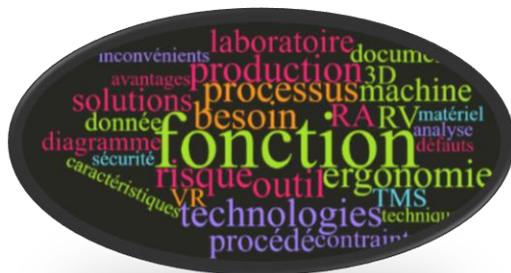
Fonction	Usages projetés (résultats des entretiens conduits auprès de 14 porteurs en 2022)
Créer	<ul style="list-style-type: none"> • Concevoir un produit • Préparer une expérimentation
Evaluer	<ul style="list-style-type: none"> • Tester et mesurer l'efficacité d'un produit conçu et fabriqué • Comparer les résultats obtenus par le calcul théorique et ceux obtenus par l'expérimentation
Analyser	<ul style="list-style-type: none"> • Détecter les risques d'un équipement pédagogique • Structurer l'apprentissage machine • Fouiller les données • Discriminer les facteurs importants • Schématiser le fonctionnement d'une machine
Appliquer	<ul style="list-style-type: none"> • Faire démarrer, voir comment ça démarre • Analyser des données recueillies (nécessité de faire tourner plus longtemps le système). Etude paramétrique • Expérimenter la fabrication d'un produit et la manipulation d'une machine • Utiliser un outil de simulation • Simuler des situations dangereuses ou à risque • Simuler une situation compliquée voire impossible à faire vivre en situation pédagogique
Comprendre	<ul style="list-style-type: none"> • Reconnaître des concepts vus en cours • Comprendre des phénomènes complexes • Différencier la notion de jumeau numérique de maquette numérique • Décrire les systèmes d'acquisition
Connaître	<ul style="list-style-type: none"> • Vulgarisation • Voir tous les éléments du système pour de « vrais »

Tableau 6 : le réel des situations d'apprentissage dans JENII (ce que l'on veut reproduire)

Acquis d'Apprentissage Visés
Identifier les différents éléments composants une machine
Lancer une simulation numérique et analyser les résultats obtenus
Repérer les différents procédés et matériaux, ainsi que leurs caractéristiques
Prédire/déterminer l'influence des paramètres opératoires
Mettre en route la ligne, configurer la machine et les différents paramètres de la machine
Réagir de manière pertinente face à une possible situation de danger
Acquérir les bons automatismes en termes de procédures
Utiliser de manière appropriée le matériel et les appareils dans le cadre d'une expérience pratique donnée
Expérimenter les phénomènes physiques associés à la mécanique des structures

Pratiquer les gestes pour s'équiper et se déséquiper dans le respect des procédures de sécurité en vigueur
Évaluer à chaque étape des décisions prises, les répercussions sur le coût, la durée
Repérer les différentes étapes de la chaîne de valeur
Se familiariser avec les technologies de RA/RV par leur mise en œuvre
Apprendre à donner et recevoir des instructions de maintenance
Améliorer la chaîne de valeur
Préconiser, choisir et utiliser les bons EPI et EPC (Equipements de Protection Individuels et Collectifs)
Mener un audit terrain simple (type gemba walk)
Analyser et coter une posture de travail
Repérer les sources de dysfonctionnement
Evaluer les difficultés à la manipulation d'une pièce par un bras robotisé

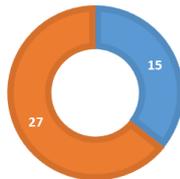
Tableau 7 : quelques exemples d'apprentissages visés dans JENII



Images 13 et 14 : Nuages de mots illustrant une synthèse des apprentissages visés dans JENII

LE JN DOIT PERMETTRE DE FORMER AU CONCEPT DE JUMEAU NUMÉRIQUE DANS L'ENTREPRISE

■ Oui ■ Non



Graphique n°5 : Dans le cadre de JENII, un tiers des jumeaux serviront également à former au concept de jumeau numérique (notamment dans l'industrie)

Savoirs théoriques	Savoir quoi
Savoirs procéduraux	Savoir comment opérer
Savoir-faire procéduraux	Savoir opérer
Savoirs expérientiels	Savoir y faire
Savoir-faire sociaux	Savoir se comporter
Savoirs cognitifs	Savoir traiter de l'information

Tableau 8 : les formes de savoirs (Fernagu Oudet 2007)

Dans le cadre du projet JENII, les deux principaux usages que les porteurs de projets voient à travers le jumeau numérique, c'est la capacité à vulgariser, faire comprendre et faire prendre conscience (du fonctionnement d'un objet ou dans notre cas souvent, d'un moyen de production) mais aussi de simuler des situations dangereuses ou avec une erreur ou un incident (que l'on ne voudrait donc pas faire vivre en vrai en formation). Pour eux, un jumeau numérique permet également de voir des choses que l'on ne peut pas voir dans la vraie vie.

Dans les points saillants de nos entretiens avec eux, on peut noter que pour les porteurs de projets, le jumeau numérique permettra si besoin, de faire du distanciel. Cette modalité permettra plusieurs usages selon eux. En premier lieu c'est la possibilité de préparer un TP de chez soi, ou de « rejouer » un TP pour s'entraîner. En deuxième lieu, c'est pour pouvoir accéder au jumeau numérique d'un moyen industriel (d'un autre campus) que l'on n'a pas sur le site. C'est également un point fort pour des publics qui ne peuvent pas se déplacer facilement ; c'est notamment le cas en formation continue. Enfin, plusieurs porteurs de projets évoquent le cas de potentiels futurs confinements. En effet, dans la discussion, il est souvent apparu que, lors des confinements, la plupart des cours ont pu se poursuivre, mais une majorité des TP n'a pas pu se faire. Dans le meilleur des cas, ils ont été rattrapés lors du retour en présentiel.

Le deuxième point saillant, c'est l'interactivité. Les porteurs de projets insistent sur le fait que leurs ingénieurs (public majoritairement visé) doivent connaître les moyens étudiés et doivent ainsi les manipuler. Un dernier item ressort : l'immersion. Celle-ci passe par l'outil immersif (jumeau physique, VR ou PC), mais aussi par « l'histoire » que le projet raconte. Ce que l'on pourrait appeler, le storytelling (narration).

Les porteurs de projet ont conscience qu'il y'aura des impacts sur la scénarisation pédagogique puisque les

temps seront différents, les tailles de groupes... Mais c'est une dimension à ce stade qui peut rester vague. C'est d'ailleurs pourquoi Maité Sylla qui porte le projet du laboratoire de chimie du CNAM, insiste sur ce point : « Il est essentiel d'acculturer les ingénieurs pédagogiques et enseignants à la réalité virtuelle. Il faut pratiquer, pratiquer, pratiquer pour savoir ce que l'on peut faire avec cette technologie. »

Ils évoquent également l'aspect ludique qu'ils voient à travers le jumeau numérique. Il est arrivé que des porteurs de projet, soulignent que la scénarisation autour d'un jumeau numérique devrait pouvoir se faire en utilisant les principes du game design (gamification). Beaucoup de questions tournent autour de la conception pédagogique.

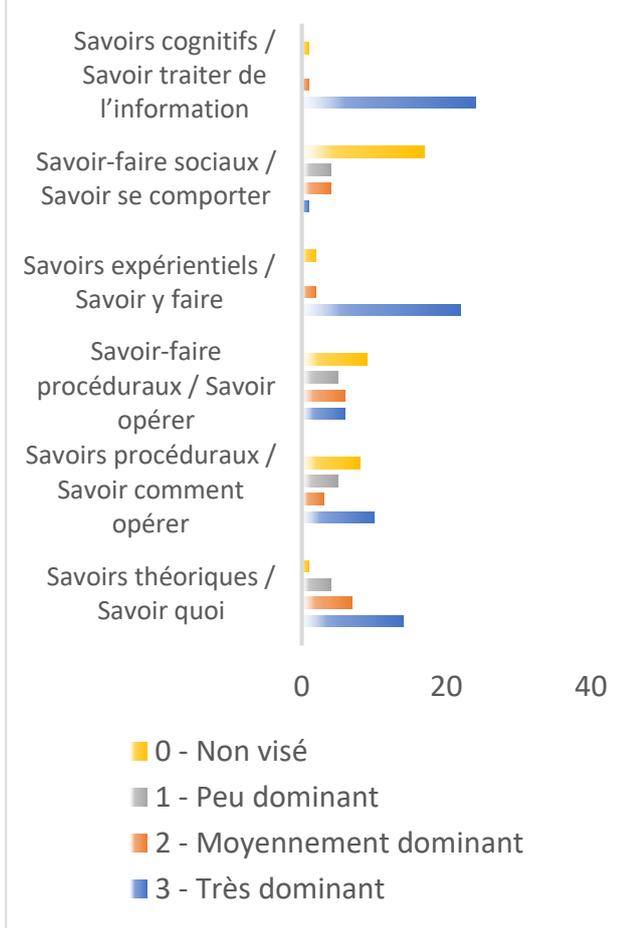
Enfin, les porteurs de projets voient à travers les jumeaux numériques, un outil qui leur permettra d'individualiser/personnaliser les apprentissages ; avec de la modularité, des niveaux de difficultés, des parcours à la carte (cf. tableau 9). En utilisant le jumeau numérique à la place du jumeau physique, chaque apprenant a la possibilité de s'exercer et progresser à son rythme. De son côté l'enseignant a un meilleur suivi du niveau et de la progression de chacun de ses apprenants et peut leur proposer des activités différenciées.

En synthèse, ces entretiens montrent un souhait d'engager et motiver les apprenants à travers un outil ludique, immersif et interactif permettant de personnaliser les apprentissages. Cependant, les porteurs de projets montrent un besoin de structure pour scénariser et gamifier les modules de formation ou TP pour réussir cette transformation pédagogique.

Verbatims sur personnalisation
Différents jeux apprenants, pré-séquençage
Chacun peut manipuler SA machine (alors qu'avant on avait pas forcément le temps)
Paramétrage possible par les enseignants
Plusieurs scénarios pré-définis
Préparer un TP en amont
Une approche d'apprentissage progressif est proposée avec 3 niveaux (débutant, avancé et expert). Sans prendre aucun risque, l'apprenant par exemple pourra assimiler le caractère à risque de certains produits et l'utilisation du matériel. Il sera possible de répéter à l'infini et de manière ludique l'expérience pour apprendre au mieux la manipulation et maîtriser le geste ensuite dans le monde réel.
Pouvoir leur laisser faire des choix dans les scénarios avec ou sans accompagnement
Navigation dite semi-directive
JN en Open Access pour pouvoir rejouer des scénarios, pour s'entraîner
Imaginer tous les scénarios d'erreur et les réactions en conséquence
Guidage en temps réel, laisser jusqu'à l'erreur fatale (reset ou repartir du moment où a été commis l'erreur
JN si vraiment abordable, permettrait d'aller à différents niveaux de profondeur. Il faudrait également pour cela instrumenter le parcours de l'élève.
Modularité prévue = pluralité + personnalisation

Tableau 9 : quelques exemples d'apprentissages visés dans JENII

LES FORMES DE SAVOIRS DANS JENII



Graphique 6 : Les formes de savoirs visés au sein de JENII
(Sur 26 scénarios analysés)

Il est intéressant de noter (cf. graphique 6) que les porteurs de projet ont pour objectif, à travers leur jumeau respectif, de travailler principalement les savoirs cognitifs (24 scénarios sur 26) et les savoirs expérimentiels (22 scénarios sur 26). En revanche, on peut noter qu'ils ne se projettent pas sur les aspects comportementaux et savoir-faire sociaux (17 scénarios sur 26 ne visent pas cet objectif).

Parce qu'ils permettent de plonger les apprenants dans des environnements réalistes tels qu'une chaîne d'assemblage ou un laboratoire de chimie, les

JNE offrirait des environnements d'apprentissage favorisant engagement et persévérance dans les apprentissages. Le WP3 du projet JENII est notamment dédié à la mesure de ces derniers.

Aparté Soft-skills :

Même si peu de porteurs de projet évoquent dans les formes de savoirs, que le jumeau numérique peut être un média par lequel travailler les compétences sociales ; dans les échanges avec eux, ils y voient un outil pour travailler les compétences comportementales (soft-skills) comme : autonomie, curiosité, flexibilité, motivation, empathie, esprit critique, résolution de problèmes complexes, sens de l'initiative ou encore sens de l'organisation...

On assiste aujourd'hui à l'apogée de ces « softs skills ». Ces compétences comportementales désignent le savoir-être de chacun et regroupent un ensemble de compétences sociales, communicationnelles, de traits de caractère et « savoir-être professionnels » en lien avec l'« intelligence émotionnelle ». C'est maintenant la « capacité d'un individu à agir (ou réagir) de manière adaptée à son environnement tout au long de son parcours professionnel qui l'emporte sur l'étendue de son savoir technique, celui-ci pouvant s'apprendre une fois en poste » (Gobin Mignot & Wolff, 2019). Apprendre à parler en public ou à communiquer dans une équipe, s'entraîner à la négociation commerciale, faire une annonce difficile, développer son leadership, etc. : autant de compétences qui font désormais objet de formations, éventuellement instrumentées (Ciccione et al., 2019; Ciccione, Cuvelier, & Decortis, 2018). Dans tous les cas, les nouveaux dispositifs offrent des possibilités de mettre en pratique les concepts, de s'exposer et faire des erreurs sans se n'exposer réellement ni générer de risques, de revenir et réfléchir sur son expérience et celles d'autrui, etc.

Avec la quatrième révolution industrielle et la numérisation progressive de diverses sphères de la vie humaine, de nouvelles aptitudes et compétences vont devenir nécessaires aussi bien pour les opérateurs du futur, cadres et employés, du monde industriel comme dans celui des services, que pour les consommateurs ordinaires, qui interagissent de plus en plus avec les producteurs (personnalisation des produits, marketing 4.0, développement dynamique du marché du commerce électronique, etc.) (Julien & Martin, 2020)

Les entreprises commencent à se préparer rapidement, notamment en ce qui concerne l'évolution des qualifications et des compétences des employés. Mais l'ensemble du système éducatif, et en particulier l'enseignement professionnel supérieur et les universités, doit aussi anticiper des changements majeurs en terme d'éducation (Saniuk, Grabowska, & Grebski, 2022).

Une seconde constante : la place de l'expérience – vs pratique - pour aider à apprendre

Cette constante repose sur l'idée qu'il faut reconnaître « au sein de l'expérience, la place qu'occupe la pratique dans le processus d'apprentissage » (Gosselin, Viau-Guay, & Bourassa, 2014; Mezirow, 2001)– vs l'apprentissage par l'action. Dewey (1967) (Vygotski, 1925/1930) et Piaget (1947/2012) furent les premiers pédagogues à analyser le rôle de l'expérience dans les apprentissages, et à en proposer la promotion dans les systèmes scolaires. On peut apprendre par tâtonnements, essais-erreurs, répétitions, imitations, observations, réflexion, accommodations, etc., et dans l'interaction avec l'environnement et les situations.

Pour aider à apprendre, rien de tel donc que l'adage « on retient mieux ce que l'on fait ! ». Rien

d'étonnant donc de voir se développer un nombre incalculable de dispositifs basés sur l'apprentissage par la pratique (exercisation, études de cas, jeu de rôle, pédagogies du projet, etc.) que l'on doit, en grande partie, aux théories de l'apprentissage issues du (socio)constructivisme... L'engouement pour l'usage de JNE va dans ce sens et se traduit par des investissements importants fondés sur un optimisme concernant les bénéfices espérés des formations les mobilisant. La valeur attendue est souvent celle d'un **apprentissage par la pratique** « à moindre cout » : « Faire pour apprendre, et apprendre en faisant » est d'ailleurs l'une des grandes promesses de la réalité virtuelle (Gobin Mignot & Wolff, 2019, p. 53). Face à cet engouement, le risque est grand de se concentrer sur les outils plutôt que sur la finalité des formations. Deux écueils sont à éviter : non seulement, il est malheureusement fréquent dans la littérature de voir se confondre les dispositifs avec les processus d'apprentissage (Gobin Mignot & Wolff, 2019). Mais en outre, le développement des possibilités techniques actuelles oriente souvent les recherches et les formations vers l'idée qu'il est possible de reproduire fidèlement les situations de travail ou de formation. L'objectif visé à la conception de dispositifs de formations devient alors celui de créer des situations et des expériences « aussi réelles que possible » ce qui mérite d'être questionné sur un plan pédagogique (Béguin & Weill-Fassina, 1997; Cuvelier, 2018; Horcik, 2014; Pastré, 2005b). Ces écueils peuvent être documenté de façon plus détaillée lorsque l'on analyse l'histoire du développement et de l'appropriation d'environnements d'apprentissage instrumentés plus anciens, telles les TIC et la simulation, dans le monde de l'éducation et de la formation.

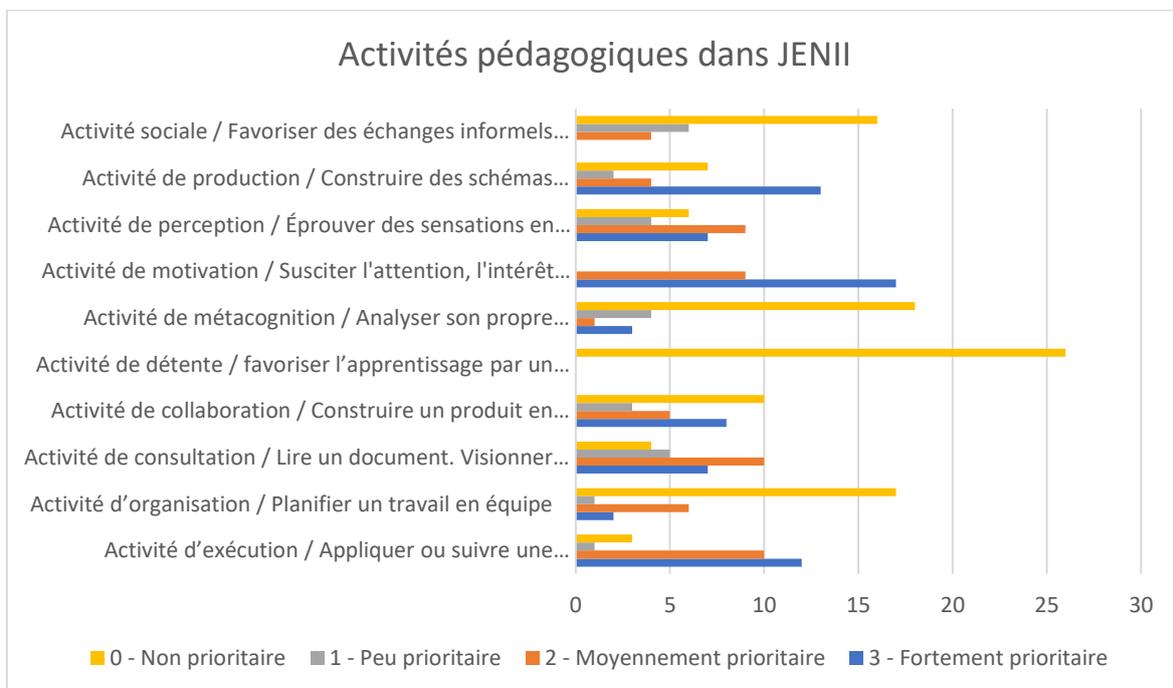
Apprendre de la pratique n'est pourtant pas chose facile, car toute expérience n'est pas apprenante et toute expérience vécue ne contient pas un potentiel d'analyse (Gosselin et al., 2014; Lainé & Mayen, 2019; Mayen & Gagneur, 2017), condition *sine qua non* pour qu'elle soit apprenante, à minima

signifiante » (Fernagu Oudet, 2018, p. 80). Néanmoins, on peut apprendre du fait même de vivre des expériences (faire des choses, rencontrer des problèmes, etc.), de les faire vivre socialement (collaborer, travailler avec autrui, etc.) ou en pensant l'expérience (réfléchir, prendre de la distance, etc.). Pour apprendre de l'expérience, il faut donc réunir des conditions essentielles à l'apprendre : vivre des expériences nouvelles, les réfléchir et les partager. Certaines activités pédagogiques (métacognitives par exemple) seront donc plus porteuses d'apprentissages signifiants au regard d'autres activités (d'exécution par exemple).

Les activités pédagogiques envisagées par les porteurs de projets pour favoriser le développement d'expériences d'apprentissage prennent différentes formes (cf. tableau 10), certaines étant plus ou moins mobilisées selon les scénarios construits (cf. graphique 7) et plus ou moins contributifs de la construction de l'expérience.

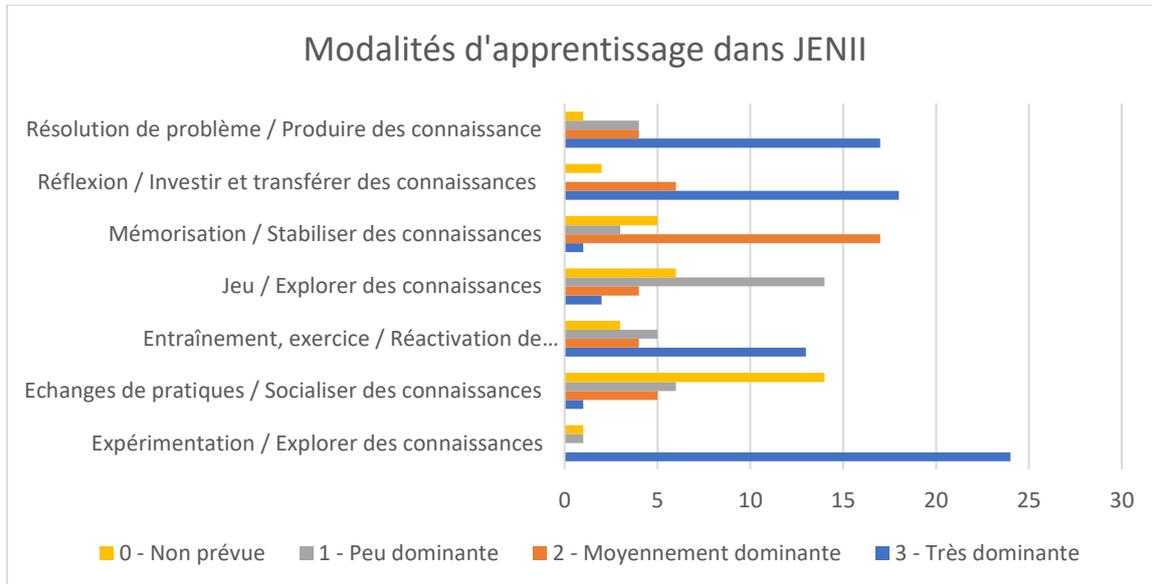
Activité d'exécution	Appliquer ou suivre une démarche prédéfinie
Activité d'organisation	Planifier un travail en équipe
Activité de consultation	Lire un document. Visionner un audiovisuel. Interroger une banque de données. Interagir avec un logiciel
Activité de collaboration	Construire un produit en groupe
Activité de détente	favoriser l'apprentissage par un temps d'arrêt entre deux activités
Activité de métacognition	Analyser son propre processus d'apprentissage et le gérer
Activité de motivation	Susciter l'attention, l'intérêt et le désir d'agir.
Activité de perception	Éprouver des sensations en étant réceptif à un agent extérieur
Activité de production	Construire des schémas d'informations ou des objets matériels
Activité sociale	Favoriser des échanges informels entre des participants

Tableau 10 : Les activités pédagogiques (Paquette, 2002a; Paquette & Léonard, 2013)



Graphique 7 : les activités pédagogiques dominantes dans JENII

L'activité pédagogique la plus représentée est l'activité de motivation (17 scénarios sur 26 l'indiquent comme fortement prioritaire), suivie des activités de production, d'exécution et de perception. Au fil de ces activités dominent des **scénarios d'usage** qui visent plus particulièrement des apprentissages par l'expérimentation, l'exploration, et l'exercice (cf. Graphique 8) dont nous aborderons les implications et conditions de mise en œuvre plus loin.



Graphique 8 : Les modalités d'apprentissage dans JENII

Une modalité fait la quasi-unanimité : l'expérimentation (24 scénarios sur 26 l'inscrivent comme très dominante).

Les JNE permettent de créer des activités d'apprentissage dans lesquelles l'apprenant est mis en situation d'acteur et non pas de simple consommateur/spectateur. Il a possibilité de s'exercer en procédant par essai-erreur, en manipulant des équipements, en testant et répétant des procédures, etc. Cet apprentissage par la pratique dans un environnement immersif rend l'expérience d'apprentissage plus concrète et objectivable, permettant une meilleure appropriation/consolidation et un ancrage optimisé des apprentissages visés.

3.2.2. L'apprendre avec les JNE : *designer* l'expérience d'apprentissage

Le design de l'expérience d'apprentissage s'organise au travers de scénarios pédagogiques dans lesquels sont mobilisées des technologies.

Parler de scénarisation pédagogique, c'est faire appel à une **conception de l'apprentissage centrée apprenant**, ou à une **ingénierie pédagogique centrée sur les activités d'apprentissage** que l'on va chercher à soutenir et à réguler pour atteindre les objectifs du dispositif de formation. La scénarisation pédagogique s'inscrit pour cette raison dans une culture de pédagogie active et de **learning design**¹⁴

¹⁴ Modélisation des systèmes d'apprentissage : « Le résultat de la pratique du design pédagogique est un ensemble de plans et de devis décrivant le déroulement des activités d'apprentissage et d'enseignement. Ces plans et devis regroupent un ensemble de prescriptions

(Baron, 2011; Henri & Maina, 2007; Paquette, 2002b), qui place l'activité de l'apprenant au centre de ses préoccupations. Les ressources d'apprentissage sont importantes, mais ne le sont qu'au regard des activités d'apprentissage qu'elles favorisent. Toute scénarisation visera donc à formaliser les interventions pédagogiques, structurer et organiser les activités d'apprentissage et rendra possible le partage et la réutilisation des activités ou des enchaînements d'activités d'apprentissage (Villiot-Leclercq, 2007; Villiot-Leclercq, Dessus, Mandin, Zampa, & Loiseau, 2011a). Les termes de ruban ou déroulé pédagogique, de story-board sont synonymiques.

« La scénarisation vise à décrire et à construire, à partir d'un **synopsis**, le déroulement d'une **situation pédagogique** de manière exhaustive. Elle détaille les connaissances et les compétences visées, la stratégie pédagogique retenue, les activités prévues, le rôle des enseignants, celui des apprenants, les médias utilisés. Elle découpe en séquences la formation et prévoit les thèmes qui seront traités, ainsi que les formes sous lesquelles ils seront abordés : texte, son, illustration, vidéo, animation... Il s'agit avant tout d'un travail de conception de contenus, d'organisation des ressources et de planification de l'activité » (Edutechwiki, 2021). (cf. tableau 11)

En ce sens « le scénario pédagogique est le produit d'un processus de scénarisation qui précise les différents moments de la situation d'enseignement et d'apprentissage pour définir les interactions entre les différents éléments ressources, activités, instruments, outils), les réguler, les observer, etc. » (Villiot-Leclercq et al., 2011a).

favorisant l'apprentissage plutôt qu'une description des processus d'apprentissage » (Paquette, 2002). Cette méthode invite les concepteurs « à penser le système d'apprentissage en fonction de l'apprenant et des activités d'apprentissage plutôt que de se centrer sur la transmission de contenu » (Henri, 2007). Dans le domaine de la formation dans des EIAH, « cette méthode amène à une perméabilité entre les rôles du concepteur pédagogique, de l'expert du contenu, du spécialiste média et du producteur informatique » (Baron, 2011).

1. Objectifs d'apprentissage : pourquoi ?
2. Contenus d'apprentissage : quoi ?
3. Activités d'apprentissage : comment ?
4. Activités d'évaluation

Tableau 11 : les grandes étapes de la scénarisation

3.3. Designer l'expérience d'apprentissage avec les technologies, conditions de réussite

L'efficacité pédagogique des environnements d'apprentissage structurés dans JENII repose sur une bonne prise en compte d'un ensemble de principes pédagogiques qui aident les apprenants à s'engager dans les processus d'apprentissage et à s'y maintenir. Ce sont les incontournables de toute conception pédagogique.

3.3.1. Apprendre avec le numérique, quelques principes pour la e-formation

Principe d'ouverture

« L'ouverture est caractérisée par le degré de liberté et de choix accordée à l'apprenant pour qu'il puisse exercer son autodirection, à la fois au plan motivationnel et métacognitif (autorégulation) » (Androwkha, 2020; Jézégou, 2020).

Principe de présence

La présence en e-Formation « résulte d'une dynamique relationnelle médiatisée entre les apprenants, entre les apprenants et l'enseignant (ou le formateur) au sein d'un espace numérique de communication. Trois points méritent d'être précisés » (Jézégou, 2019b).

« La présence permet de réduire la distance qui sépare et de générer une proximité entre les

interlocuteurs. La distance qui sépare n'est pas que géographique. Elle peut être sociale, culturelle, linguistique, interpersonnelle, etc. La présence est bien réelle et non virtuelle. Elle est à la fois ressentie (dimension subjective) et tangible (dimension objective) » (Jézégou, 2020).

Toute présence active repose sur l'envie des apprenants d'interagir et de maintenir leurs efforts d'interaction et de faire en sorte que ces interactions soient riches et donc apprenantes.

Principe de présence socio-affective

Elle « résulte des interactions sociales de symétrie de la relation et d'aménité existantes entre les apprenants au sein d'un espace numérique de communication » (Jézégou, 2010, 2019a)

Principe de présence socio-cognitive

Elle « résulte des transactions existantes entre les apprenants qui, éloignés géographiquement, ont à résoudre de façon conjointe et commune une situation problématique. Les transactions sont des interactions sociales de confrontation de points de vue, d'ajustement mutuel, de négociation et de délibération qui témoignent d'une collaboration à distance entre les apprenants au sein d'un espace numérique de communication » (Jézégou, 2019b) .

Principe de présence pédagogique

Elle « résulte des interactions sociales de coordination, d'animation et de modération que le formateur entretient à distance avec les apprenants lorsque ces derniers, éloignés géographiquement, ont à résoudre de façon commune et conjointe une situation problématique en utilisant un espace numérique de communication » (Jézégou, 2019b). La présence pédagogique stimule les autres formes de présence.

3.3.2. Apprendre avec le numérique : quelques principes pour la formation immersive



Fiche outil n°3 : Les voies de l'immersion

L'immersion peut revêtir des aspects négatifs auxquels il est nécessaire de se rendre attentif. Le WP3 lié au projet JENII en a identifié au moins deux :

Principe de cohérence

« Le plus souvent, apprendre à partir d'un contenu visuel nécessite de concentrer son attention sur certains éléments visuels en particulier, qui constituent en fait le contenu de l'apprentissage. En réalité virtuelle, les apprenants ont un environnement virtuel autour d'eux qu'ils sont susceptibles d'explorer, ce qui constitue une activité inutile pour l'apprentissage, mais qui vient en concurrence avec celui-ci. Dans certains cas, l'environnement constitue un contexte nécessaire à mettre en perspective avec le contenu, mais dans d'autres cas, le temps passé à explorer l'environnement est utilisé au détriment de l'apprentissage. C'est la version immersive d'un principe bien connu dans le domaine de la conception de documents pédagogiques : le principe de cohérence, selon lequel tout élément affiché qui n'est pas du contenu d'apprentissage va consommer des ressources attentionnelles et mnésiques des apprenants et potentiellement interférer avec leur activité d'apprentissage (Mayer & Fiorella, 2014) » (WP3 JENII, 2022).

Principe de segmentation

« Dans une expérimentation de Parong and Mayer (2018), les participants devaient apprendre le contenu d'un cours de biologie, soit sous la forme d'une série de diapositives d'un document PowerPoint, soit en vivant une expérience en réalité virtuelle consistant à voyager dans le corps humain. Si les participants ont globalement trouvé la condition immersive plus agréable, la performance d'apprentissage est significativement meilleure avec le PowerPoint. Les auteurs expliquent notamment ce résultat par le

principe de segmentation. L'apprentissage d'un cours nécessite que les apprenants organisent les informations en mémoire, constituant une structure cohérente. Le principe de segmentation consiste à présenter les informations de manière segmentée, en séparant les parties les unes des autres, de manière à faciliter ce travail d'organisation des informations. Les diapositives sont un type de média qui conduit de manière naturelle à une segmentation du contenu. À l'inverse, les concepteurs d'applications en réalité virtuelle ont tendance à vouloir créer des expériences continues et scénarisées avec une intégration des éléments de contenus dans cette scénarisation. Cette manière de procéder rend moins évidente la structuration des informations à apprendre et nécessite donc plus d'efforts mentaux pour l'étape d'organisation » (WP3 JENII, 2022).



QR code 2 : ENSAM : L'usage de la réalité virtuelle dans la formation (<https://www.youtube.com/watch?v=Tnj6CBaB4H8>)

3.3.3. Apprendre avec la réalité virtuelle : quelques principes

La **réalité virtuelle** se définit comme « un système multimédia complexe qui englobe une configuration pour l'immersion sensorielle ainsi qu'un moyen de représentation de contenu sophistiqué qui est capable de simuler ou d'imiter des mondes réels ou imaginaires » (Mikropoulos & Natsis, 2011). Elle se caractérise par trois dimensions caractéristiques qui sont la **présence**, l'**immersion** et le **réalisme** (Burkhardt, 2003). La présence renvoie à l'impression de l'utilisateur que l'environnement dans lequel il se trouve est réel, et l'immersion, c'est le sentiment de présence induit par la technologie utilisée (Mestre, 2006).

La réalité virtuelle peut être immersive (avec un casque de RV) ou non immersive (environnement 3D face à un écran plat : tablette, téléphone, ordinateur). L'expérience de réalité virtuelle est dite interactive lorsque l'on peut agir sur l'environnement proposé.

Globalement la recherche sur la Réalité virtuelle immersive montre que « parfois la réalité virtuelle semble être une plus-value pour l'apprentissage (Liu, Fang, Dong, & Xu, 2021; Makransky, Terkildsen, & Mayer, 2019a; Saputro & Setyawan, 2020), parfois elle n'offre aucun bénéfice (Araiza-Alba, 2017; Araiza-Alba et al., 2021; Pulijala, Ma, Pears, Peebles, & Ayoub, 2018). D'autres études montrent qu'au contraire, la réalité virtuelle entraverait l'apprentissage comparé aux supports traditionnels (Makransky, Terkildsen, & Mayer, 2019b; Parong & Mayer, 2020) (Porte, 2021).

En formation, la réalité virtuelle permet de mettre en action les apprenants et de les immerger totalement dans une situation et un environnement d'apprentissage réaliste : ceci a pour effet d'augmenter l'ancrage de l'information. Le côté immersif permet de toucher au domaine des émotions. Les usages en formation sont nombreux : réalisation de gestes métier difficilement ou non réalisables autrement, simulation de situations dangereuses ou d'urgence, visite et exercices de sites difficiles d'accès, immersion dans des époques passées ou futures, etc.

Principe de présence

La réalité virtuelle permet d'engager des activités sensori-motrices et cognitives, c'est-à-dire qu'elle peut générer des réactions physiques, physiologiques et émotionnelles au travers l'interaction avec l'environnement immersif. Le **sentiment de présence**¹⁵ est déterminant, c'est lui qui permet à l'utilisateur de se projeter dans son expérience d'apprentissage avec la RV. La crédibilité de l'environnement et de l'expérience sont

¹⁵ Sensation d'être présent physiquement dans un monde qui n'est pas physique

déterminantes (Bouvier, 2017). La crédibilité ne s'improvise pas dans l'œil de l'utilisateur. Elle repose sur sa capacité à admettre et à accepter de percevoir l'environnement virtuel comme réel, quelle que soit sa configuration (degré de réalisme ou de similitude). « L'agencement de l'expérience et le parcours utilisateur priment sur le niveau de perfection des graphismes » (Bouvier, 2017). Ce n'est donc pas l'**utilisabilité** qui prime, mais l'**acceptabilité**, au profit d'une nécessaire intégration de l'expérience utilisateur dans la conception des dispositifs de formation intégrant de la réalité virtuelle, sa réalité perçue. Aujourd'hui la réalité virtuelle permet de plus en plus de générer un sentiment de présence en mobilisant quasi l'ensemble des sens de l'apprenant : la vue, l'ouïe, le toucher. Au final, elle permet « une construction subjective de l'expérience » (Cahagne & Fuzet, 2022). L'immersion quant à elle désigne les outils permettant cette expérience subjective. Faire appel au jumeau numérique en formation permet de rendre l'environnement physique d'apprentissage accessible, dans sa version virtuelle, à des étudiants éloignés géographiquement de leur lieu de formation. L'usage du jumeau numérique dans une situation pédagogique à distance favorise le développement du sentiment de présence à distance, un vecteur d'engagement de l'apprenant quand il est en formation à distance.

Principe d'immersion

L'immersion peut être décrite comme le degré d'objectivité avec lequel le système de réalité virtuelle contrôle les récepteurs sensoriels de l'utilisateur ; quand la présence peut être définie comme l'état psychologique où l'utilisateur perçoit l'environnement qui l'entoure comme réel, en

oubliant le rôle de la technologie (Cahagne & Fuzet, 2022). « L'apprentissage immersif consiste à placer les individus dans un environnement d'apprentissage interactif (physique ou virtuel), dans le but de reproduire des scénarios existants, ou d'enseigner de nouvelles compétences. Il ne se limite pas à la réalité virtuelle : les simulations et les jeux de rôle peuvent être considérés comme un apprentissage immersif. L'apprentissage immersif crée les conditions de l'acquisition de nouveaux savoirs ou de nouvelles compétences par l'expérience. Dans ce processus, l'interactivité permise entre l'apprenant et son environnement est cruciale, car elle est garante de l'ancrage efficace de nouvelles connaissances.

L'un des objectifs principaux de l'apprentissage immersif est à ce titre de créer des situations ou des expériences aussi réelles que possible » (Barabel, Meier, Perret, & Teboul, 2019). L'impact de l'expérience serait en ce sens supérieur à l'impact d'autres médias d'apprentissage, à condition que « l'environnement crée autour de l'apprenant soit saisissant, réaliste et engageant » (Barabel et al., 2019). Elle ne sera néanmoins pas suffisante puisque la recherche montre aujourd'hui que la multimodalité est sans doute la voie la plus efficace en formation. Différents types de dispositifs techniques permettent l'immersion (cf. images 15), ils sont basés basés sur l'intégration d'éléments numériques virtuels dans le monde réel (cf. [fiche outil 3](#)). On distingue la réalité virtuelle, de la réalité augmentée, de la réalité mixte, de la réalité étendue. On parle également de « en surimpression (AR), en interaction avec des éléments de cet environnement réel (MR), ou en totale immersion de l'utilisateur dans un univers virtuel coupé du monde réel (VR) »¹⁶.

¹⁶ <https://www.anivaa.fr/guide/vr-ar/vr-ar-mr-guide-ultime/>

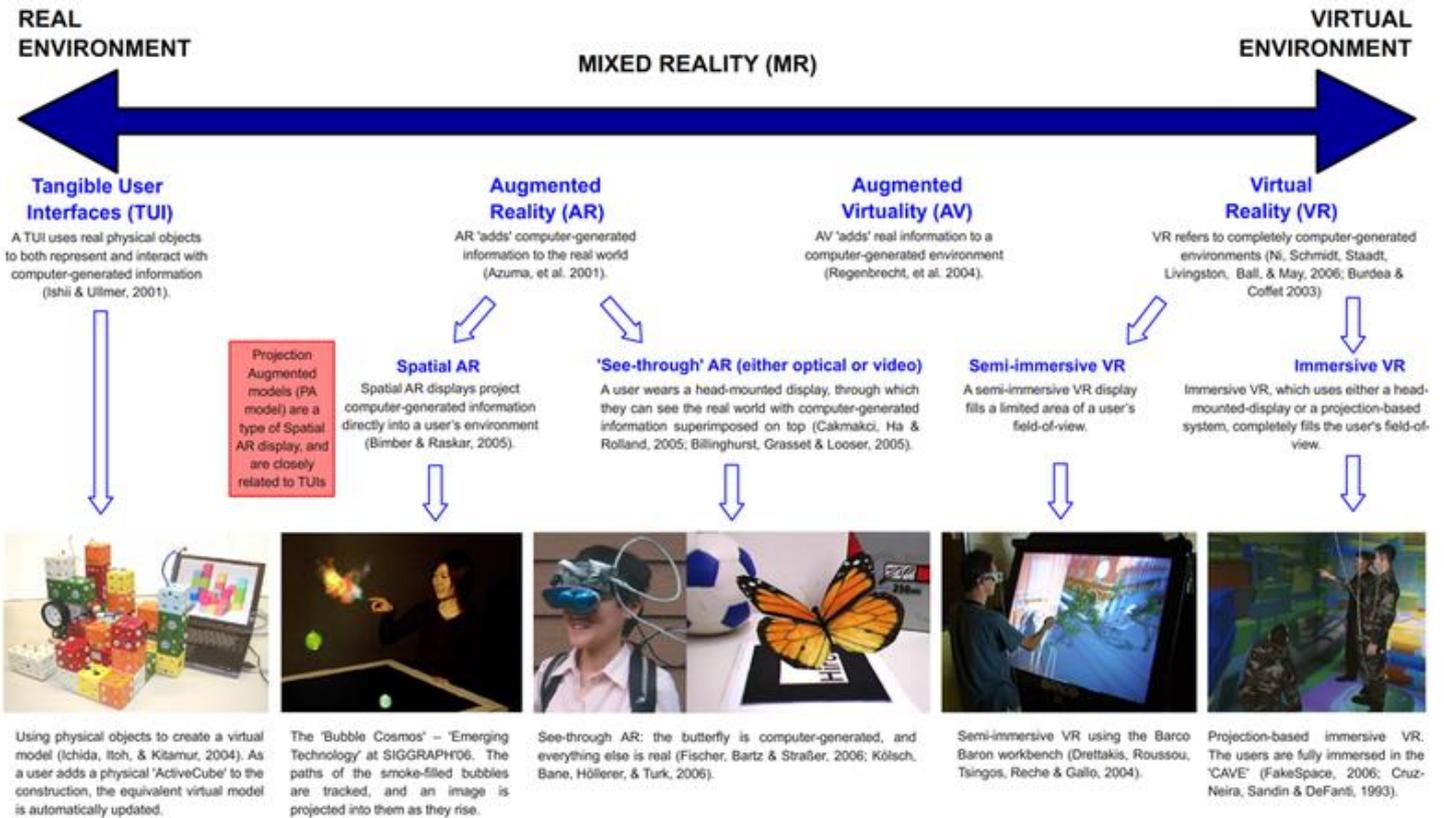
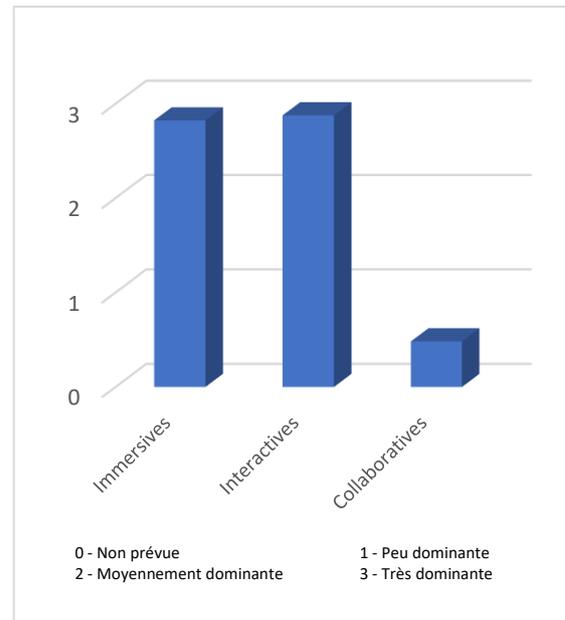


Image 15 : Continuum des interfaces numériques avancées (adapté de Milgram and Kishino, 1994)

Crédit image : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Adapted_milgrams_VR-AR_continuum.png

Le graphique 9 montre que l'ensemble des scénarios de JENII prévoit des pratiques interactives moyennement dominantes ou très dominantes. On peut noter que l'on a un résultat quasi similaire pour les pratiques immersives, avec cependant le scénario d'un jumeau pour lequel les pratiques immersives sont peu dominantes, mais nécessite en revanche une forte interactivité.



Graphique 9 : Pratiques pédagogiques

Lorsqu'on les interroge spécifiquement sur ce point, les porteurs de projet se projettent peu sur les pratiques collaboratives. Pourtant, lorsqu'ils décrivent leurs différents scénarios pédagogiques, il est fréquemment questions de pratiques collaboratives : principalement lors de séquences en dehors de l'immersion dans les casques VR, mais de plus en plus, il est imaginé une forme de collaboration entre un étudiant en immersion dans la VR et d'autres étudiants autour. Ceux-ci le guident, prennent des notes et lui posent des questions ou l'invitent à faire telle ou telle action, entrant à leur tout en interactivité avec le jumeau par l'intermédiaire de l'étudiant immergé. L'immersion permet donc des mises en situation, expérientielles, multi-environnements, avec, dans notre cas, un souhait de fort réalisme (ancré davantage dans le réel grâce à l'existence du jumeau physique), permettant également la visualisation de phénomènes réels et un sentiment de présence.

Immersion, interactivité, sentiment de présence, collaboration, c'est la promesse d'un métaverse pour l'enseignement (voir livret complémentaire : Metavers). Un métaverse désigne un ensemble de mondes virtuels dans lesquels chacun peut évoluer au travers d'un avatar, et au sein desquels les avatars peuvent échanger les uns avec les autres : des expériences d'apprentissage immersives totalement inédites, complémentaires des cours en présentiel et des plateformes en ligne (cf image 16 et QR code 3).



Image 16 : Pourquoi utiliser la technologie immersive pour enseigner au Cnam ? Emmanuelle Galichet, Christian Cousquer, Maité Sylla et Thierry Koscielnkak Carrefour numérique, Cité de sciences. Mercredi 14 septembre 2022



QR code 3 : (<https://www.cite-sciences.fr/fr/au-programme/lieux-ressources/carrefour-numerique2/evenements/metavers/metavers-et-education>)

Principe d'agence

Si la présence et le sentiment de présence sont importants, d'autres chercheurs mettent en évidence que l'**agence** est également déterminante (Makransky & Petersen, 2019). La présence renvoie au sentiment d'être là et l'agence, au sentiment de générer et de contrôler des actions. Les facteurs qui vont favoriser le sentiment de présence sont le degré d'immersion, le degré de contrôle alloué à l'apprenant et la fidélité représentationnelle de l'environnement proposé. Présence et agence « découlent du sentiment d'immersion, du fait de pouvoir contrôler le dispositif et de la fidélité de la représentation par rapport à la réalité. Ils vont à leur tour entraîner chez l'apprenant des sentiments plus ou moins (in)dépendants que sont : l'intérêt, la motivation, l'auto efficacité, l'incarnation, la charge cognitive et l'auto régulation. Cet ensemble de facteurs va avoir des répercussions plus ou moins importantes sur l'acquisition de connaissances factuelles, conceptuelles, procédurales, ainsi que sur le transfert de connaissances » (Porte, 2021).

Dans leur ouvrage, Clément Cahagne et Benjamin Fuzet, donnent des conseils de conceptions pour une expérience de formation immersive (Cahagne & Fuzet, 2022, p 50). Ils décrivent notamment différents degrés de contrôle. Ils appellent cette agence : modalité d'interaction. Ils définissent alors le fonctionnement global de l'expérience d'apprentissage selon quatre type de modalités d'interaction :

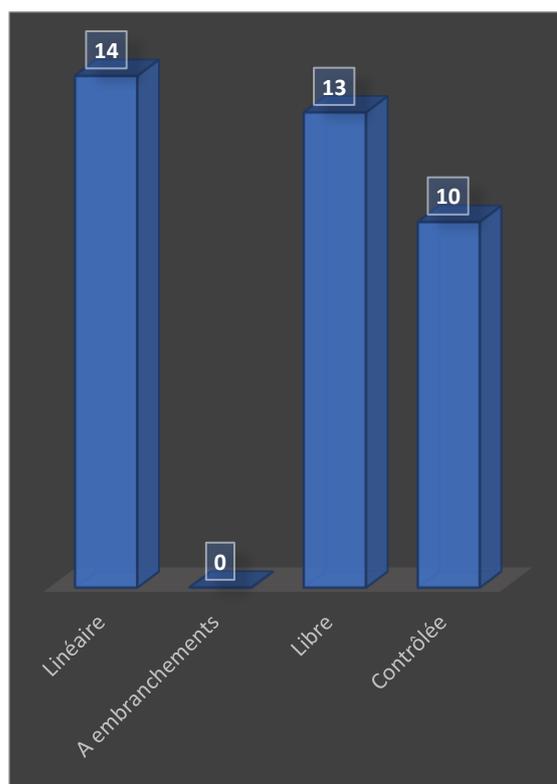
« **Interaction linéaire** : L'expérience se fait à sens unique, les interactions s'enchaînent les unes après les autres de façon naturelle pour l'utilisateur.

Interaction à embranchements : L'utilisateur fait des choix qui influence le contenu « consommé ». Dans un modèle d'interaction à embranchements, l'utilisateur laisse de côté un contenu pour en « consommer » un autre.

Interaction libre : Le contenu de l'expérience est libre d'accès dès le début de l'expérience, ainsi c'est à l'utilisateur de faire des choix.

Interaction contrôlée : L'utilisateur doit réaliser et compléter certains objectifs avant de pouvoir passer aux étapes suivantes. »

Dans le cadre du projet JENII, le graphique 10 montre à ce jour les types de modalités d'interactivité/agence imaginés par les porteurs de projet. On peut noter qu'il est globalement imaginé un scénario très guidé (14 scénarios sur 37 sont linéaires et 10 sur 37 sont contrôlés) où à l'inverse totalement libre (13/37). Les porteurs n'envisagent donc pas une interaction par embranchement. Certainement pour éviter que l'apprenant ne se « perde » dans des informations inutiles à son apprentissage.



Graphique 10 : Modalités d'interaction

Principe d'interactivité

Dans le cadre du projet JENII, les quatre acteurs ont un parti pris fort sur le rôle de l'apprenant : Dans la totalité des jumeaux numériques du projet, l'apprenant n'est pas passif. Aussi son immersion, va au-delà du sentiment de présence, et est accentuée par une forte interactivité avec l'environnement dans lequel il est immergé : Manipulation d'objets, d'actuateurs, échanges avec l'enseignant, avec les autres étudiants, réflexions sur les interfaces utilisateurs (UI)... En lui permettant d'agir (ou d'avoir un degré de contrôle) sur le jumeau numérique comme environnement d'apprentissage, l'apprenant développe ses capacités à raisonner (cf QR code 4).



QR code 4 : Vidéo interaction en VR/RA et systèmes interactifs (<https://drive.google.com/file/d/1ff5mGZYtmcl7GSWSWBvsphiXJuXaCDyt/view>)

« L'interactivité est vue comme une technique qui permet à la machine de répondre à une commande de l'utilisateur, alors que l'interaction est humaine et de nature psychosociale » (Paquelin, 2002)

Paquelin (2012) définit l'interactivité « dans le sens homme/machine, le comportement de l'utilisateur par ses choix modifie le comportement du logiciel, et dans le sens machine/homme, le comportement de ce dernier modifie le comportement de l'homme. », elle est liée à la notion de rétroaction qui exerce une certaine guidance sur l'activité de l'utilisateur en lui permettant de prendre conscience de la validité de ses actions et l'aidant à surmonter les obstacles. Paquelin (ibid) fait référence aux travaux de Cartier (1989) qui distinguent trois types d'interactivité :

« **Interactivité réactive** : lorsque l'utilisateur n'intervient que sur proposition du programme.

Interactivité sélective : lorsque les relations actions-conséquences sont toutes prévues par le programme en un nombre déterminé à l'avance. L'utilisateur subit la situation.

Interactivité active : qui intègre l'action de l'utilisateur à l'ensemble des données et définit un nouveau contexte. Celui-ci est analysé par le programme qui détermine une situation résultante pouvant à son tour modifier le contexte précédent. L'initiative est laissée à l'utilisateur ».

Principe d'interaction / Interface

Pour qu'il y ait interactivité, il faut une interface avec laquelle entrer en interaction. Dans sa thèse « Réalité Virtuelle et Formation : Conception d'Environnements Virtuels Pédagogiques », Domitile Lourdeaux propose en se basant sur le schéma triadique de l'approche instrumentale de l'interfaçage de Rabardel (Rabardel, 1995), trois types d'interactions (cf image 16) :

- L'activité directe que l'utilisateur souhaite avoir avec le système (**utilisation désirée**).
- Son **utilisation effective** à travers l'interface.
- **L'utilisation programmée** par les concepteurs entre le système et l'interface (Lourdeaux, 2001)

Tout l'enjeu est alors d'atteindre l'utilisation désirée par le sujet, malgré l'utilisation de l'interface qui peut entraîner des biais et l'utilisateur lui-même qui a ses propres schèmes mentaux pour utiliser cette interface.

L'**utilisation effective** ne correspond pas toujours à l'**utilisation désiré** ; et elle n'est pas toujours l'**utilisation programmée**. En effet, il peut arriver que les concepteurs imaginent et programment des comportements en pensant qu'ils seront interprétés de la même manière par les utilisateurs.

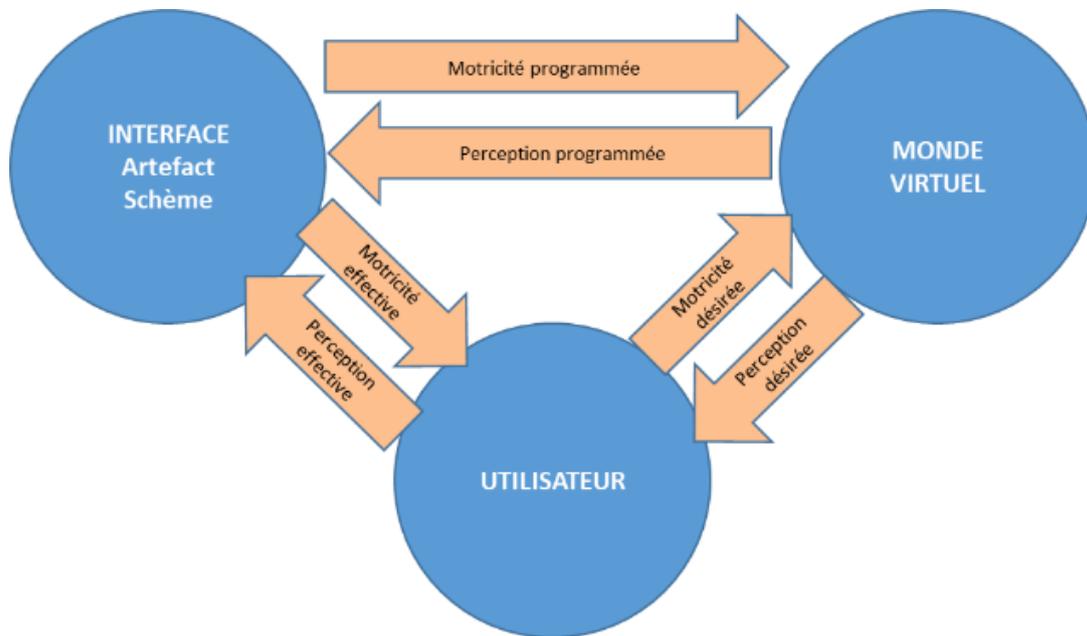


Image 16 : Interfaçage comportemental entre utilisateur et environnement virtuel (adapté de Fuchs, 1996)

Lourdeaux propose également trois niveaux d'immersion et interaction :

- Immersion et interaction sensori-motrices
- Immersion et interaction cognitives
- Immersion et interaction fonctionnelles.

On pourrait résumer **l'immersion l'interaction sensori-motrices** par les moyens techniques avec lesquels l'utilisateur va interagir avec l'environnement virtuel. C'est souvent un axe qui fait défaut dans la conception d'un environnement, puisque nous ne sommes pas encore capables de reproduire parfaitement les cinq sens. Certaines caractéristiques tendent à s'améliorer, comme la précision, la sensibilité et le temps de réponse. Mais, elles ne correspondent pas toujours à ce que l'on souhaite ; ce qui peut provoquer des incohérences sensori-motrices, des problèmes de cinétose (cf chapitre suivant), mais aussi des problèmes de compréhension du système.

L'immersion et l'interaction cognitives correspondent, quant à elles, aux processus cognitifs de l'utilisateur. C'est l'expérience perceptive et cognitive de celui-ci. Elle est notamment fonction de l'utilisation des interfaces et des représentations mentales de l'utilisateur (correspondance entre utilisation désirée et effective).

Enfin l'immersion et l'interaction fonctionnelles correspondent à l'objectif global désiré de l'application. Il s'agit de s'attacher plus à l'immersion de l'homme dans la tâche qu'à l'immersion de l'homme dans le monde virtuel (Fréjus, 1996 & Fuchs, 1996). Ainsi, la conception d'un environnement virtuel, et donc dans notre cas, d'un jumeau numérique ne doit pas seulement considérer l'immersion et l'interaction sensori-motrices mais aussi l'immersion et l'interaction cognitives et fonctionnelles. L'atteinte du résultat (axe fonctionnel) n'est possible que si ses buts et intentions sont le plus naturellement « guidés » par des axes sensori-moteurs et cognitifs pertinents.

« With real-time performance, strong interactive operation, strong expandability, and high fidelity, Digital Twin technology can easily create an integrated learning space in ubiquitous learning (L'apprentissage omniprésent peut être défini comme un environnement d'apprentissage quotidien soutenu par des périphériques mobiles et aux réseaux sans fil), realize the high-efficiency integration of physical and virtual learning spaces comprehensively, effectively facilitate changes in teaching mode, and develop new learning habits of ubiquitous learners » (Zhang et al., 2022)

Cinétose : Les effets du casques VR sur l'utilisateur

Les casques de réalité virtuelle nuisent parfois à leurs utilisateurs. En effet, l'usage du casque VR peut devenir néfaste pour une certaine partie de la population. Des vertiges et nausées et maux de tête ont pu être causées chez les individus nommés « cybersickness ».

Une étude française a été réalisée par Ubisoft (éditeur français de jeux vidéo) auprès de 400 personnes confrontées à la réalité virtuelle. Le constat de l'étude est que plus de 45 pourcents d'entre elles se déclaraient sensibles à la cinétose, et 6% y étaient très sensibles. Ces résultats ont été divulgué lors de la conférence #GamesUR, à Londres. Ainsi, des chercheurs industriels tiennent en main des pistes d'amélioration pour ce public cible. En effet, une solution technique serait de réduire le délai entre le mouvement de la tête et l'image affichée à moins de 20 ms sous peine d'inconfort de l'utilisateur.

Ancrage situationnel

Les recherches sur l'efficacité des apprentissages en réalité virtuelle sont encore peu nombreuses. Une grande partie d'entre elles porte sur des études courtes et de petits échantillons d'apprenants (Porte, 2021). Les résultats sont peu probants lorsqu'il s'agit de comparer un enseignement réalisé sous format classique et le même enseignement sous format virtuel (Teranishi et Yamagishi, 2017 ; Saputro &

Setyawan, 2020 ; Grassini et al., 2020 ; Parong et Meyer, 2020). Néanmoins, l'autre partie de ces études témoigne d'effets significatifs sur la rétention et le transfert des apprentissages dès lors où il y a un véritable intérêt pour les connaissances à développer (Hamilton et al., 2021). Certaines études montrent que les bénéfiques touchent également les dispositions des apprenants. Dans la santé par exemple, la confiance en soi peut être impactée (Pulijala et al., 2017) dès lors où la réalité virtuelle permet des manipulations qui permettent de mieux prendre conscience de ses gestes et de leurs effets. D'autres recherches montrent que l'immersion et la possibilité de pouvoir observer « naturellement » les alentours d'une situation dans l'environnement virtuel a un impact positif sur les apprentissages (Krassmann & al., 2020 in Porte, 2021). Il faut néanmoins se méfier de l'apprentissage en milieu virtuel, car le caractère motivationnel de la présentation en RV peut prendre le pas sur l'efficacité de l'apprentissage (Makransky & Petersen, 2021) et l'altérer.

Principe de précaution vis-à-vis de la charge cognitive

En Réalité virtuelle immersive (RVI), on peut aussi observer une augmentation de la charge cognitive (cf. théorie de la charge cognitive, (Tricot, 1998); théorie cognitive de l'apprentissage multimédia, Mayer, 2014). Quand la quantité d'informations à traiter surcharge la mémoire de travail, l'apprentissage peut être mis à mal. Les auteurs précisent qu'en RVI, le champ visuel est plus étendu que dans les présentations traditionnelles ce qui peut entraver la recherche d'informations pertinentes au profit de possibles distracteurs (détails attrayants). En ce sens, certaines recherches portant sur les effets de la forme de narration sur les apprentissages (texte incrusté, audio, etc.) montrent

qu'il est nécessaire de ne pas « envahir » l'environnement virtuel d'apprentissage si l'on ne veut pas que l'attention se disperse (Baceviciute et al., 2020 ; Albus et al., 2020 ; Porte, 2021 ; cf. théorie cognitive de l'apprentissage multimédia, (Mayer & Fiorella, 2014) et que le niveau de charge cognitive augmente de manière délétère : l'attention se trouve détournée des tâches de compréhension et de transfert. La narration est une forme de guidage dit sémantique, on parle de cohérence sémantique (Mayer & Fiorella, 2014) pour spécifier l'équilibre de la narration et des tâches d'apprentissage.

Plus globalement, la réalité virtuelle comporte de nombreuses visualisations dynamiques (voire à 360 degré), qui de surcroît sont souvent « hyper-réalistes », ce qui peut augmenter à la fois le nombre, la diversité et la complexité des informations présentées ; il est donc important de s'y rendre attentif (Porte, 2021). On peut faire l'hypothèse que les habiletés visuospatiales chez les apprenants diffèrent d'un apprenant à l'autre et qu'ils ne sont donc pas tous susceptibles de s'orienter facilement dans les visualisations dynamiques.

Principe d'inclusion

En France, selon les chiffres de l'INSEE, 12 millions de personnes sont touchées par un handicap. La réalité virtuelle permet d'aider des personnes en situation de handicap de surmonter partiellement leurs handicaps.

Accessibilité numérique en XR :

- L'accessibilité, **c'est permettre aux personnes handicapées de jouir pleinement de leurs droits et de leurs libertés fondamentales** en levant les barrières qu'elles peuvent rencontrer.
- L'accessibilité numérique s'inscrit dans cette démarche d'égalité et constitue un enjeu politique et social essentiel afin de garantir à tous, sans discrimination, le même accès à l'information, la formation et aux services en ligne.

- **Loi de 2005 « sur l'égalité des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées »** (mise à jour en 2016 et en 2018).
- Sur le volet numérique :
 - Obligation d'accessibilité pour les sites et applications, uniquement pour le secteur public initialement et désormais étendue aux délégataires de service public et à partie des sociétés privées ;
 - **Sanctions financières (25 000 € par applicatif)**, mise en place d'un moyen de signalement à destination des utilisateurs.

Accessibilité numérique en XR est un champ de recherche (Combinaison de l'accessibilité web et l'accessibilité des jeux vidéo) :

- Prise en compte du daltonisme, contraste renforcé et différencié
- Possibilité de se téléporter
- Donner un temps de réalisation des actions suffisants (possibilité de parcours/modules personnalisés via le LMS)
- Chaque élément vocalisé ou sonore est repris par écrit sur la tablette au poignet
- Faire des gestes complexes de manière métaphorique simplement (exemple transférer des contenants ou des liquides avec une spatule)
- Zones interactives en surbrillance et suffisamment large pour être activées
- Permettre la personnalisation de toutes les actions par l'utilisateur final à ses propres contrôleurs / technologies d'assistance (mapping des actions ouvert)
- Etc.

La VR en faveur des PMR

La réalité virtuelle peut être utile pour les personnes handicapées, comme en témoigne "Walkin VR un appareil, qui peut aider les **personnes à mobilité réduite**. Le principal avantage de la réalité virtuelle pour les personnes handicapées est émotionnel. La capacité à percevoir certaines sensations stimulera les sens compétents de l'utilisateur ce qui créera de nouvelles sensations et favorisera un apprentissage

plus réaliste et motivé² (Réalité Virtuelle et Handicap: Expériences Uniques | Sunrise Medical). De plus, en France, une association française en faveur de la participation sociale et le handicap a mené un partenariat avec l'agence Kindai, une initiative appelée HandiDrone. Ce dernier permet aux personnes en situation de handicap physique de vivre une expérience de pilotage d'avion grâce à un drone et aux lunettes de réalité augmentée. ³(Réalité Virtuelle et Handicap: Expériences Uniques | Sunrise Medical). Il permet de ressentir ce qu'il ressent "avec" son propre corps ou l'utilisateur apprend à contrôler le drone. Un autre logiciel de réalité virtuelle, nommé AccesSim conceptualisé en France, est un simulateur de réalité virtuelle qui vise à recréer la conduite en fauteuil roulant en milieu urbain. ⁴(Réalité Virtuelle et Handicap: Expériences Uniques | Sunrise Medical)

La VR en faveur des sourds et muets

Par ailleurs, un projet de VR d'étudiants ingénieurs de l'école ECE PARIS nommé Kophosight a été développé pour les **sourds et muets**. Ce projet a pour vocation de promouvoir la communication des sourds. Pour concrétiser ce projet, les étudiants se sont appuyés sur les préconisations d'Institut National des Jeunes Sourds de Paris. Les acteurs de cet institut ont permis d'identifier avec précision les besoins des sourds et de comprendre les enjeux de la solution numérique. Au sein de ce projet, les casques VR fourniront en temps réel une langue française parlée complète en temps réel afin d'aider les personnes sourdes et muettes à comprendre ce qui sera énoncé au sein du casque.⁵(Kophosight: la réalité virtuelle pour favoriser la communication des sourds (talentéo.fr))

La VR en faveur des malvoyants

Enfin, un casque VR nommé HoloLens a été créé pour aider les **personnes aveugles**. Par le biais d'un casque de réalité augmentée créé par Microsoft, des chercheurs ont créé une application capable de guider une personne aveugle. En effet, l'appareil est équipé d'un capteur infrarouge qui permet au porteur de rester dans l'espace pour calculer la position exacte et la perspective de l'objet

qui sera affiché sur la visière du casque. ⁶(La cartographie 3D de l'HoloLens au service des aveugles - Sciences et Avenir)

La VR pour les dyslexiques

Un professionnel issu du paramédical (orthoptiste) à Rouen utilise une solution VR qui donne des résultats probants pour lutter notamment contre la **dyslexie**. La solution VR propose des exercices spécifiques utilisant des lunettes 3D. Pour cela, l'orthoptiste propose tout un tas de choses comme des écrans, des lunettes 3D, et des capteurs de mouvement, similaires à ceux utilisés sur les consoles de jeux. Par exemple, dans un de ses exercices, l'apprenant se déplace pour sauter dans les boucles des "p" ou des "b", car ce sont des lettres qui se rapprochent visuellement, cela a pour but de mieux apprendre à appréhender ces lettres qui peuvent poser problème aux apprenants dyslexiques. Elle indique que par ce moyen de remédiation, "l'attention visuelle est meilleure".

Les parents décrivent des résolutions de la lecture avec leurs enfants.

Par cette solution, les enfants dyslexiques se mettent à lire spontanément. (Les orthoptistes utilisent la réalité virtuelle pour soigner la dyslexie (francebleu.fr))

Principe d'expérimentation

La RV offre de nombreux avantages pratiques tels que la possibilité de répéter des gestes à l'infini, s'entraîner, s'exercer par essais et erreurs, donner le droit à l'erreur, dans tous les domaines d'activités. Les applications sont nombreuses dans les domaines de la santé et de l'industrie, et même dans celui des ressources humaines (*onboarding*, tests, etc.). Ses effets sont également mesurables s'ils ont été pensés au cours de la scénarisation et de la gamification.

L'avantage majeur consiste à recréer les conditions d'un apprentissage expérientiel dès lors où l'ensemble des sens peut être mobilisé y compris le toucher (fonction tactile, de retour de force). Ce n'est donc pas que l'imagination qui est sollicitée

pour se projeter dans un monde virtuel, mais également les capacités cognitives et sensorielles (**simulation haptique**) qui rapproche le participant du monde réel.

Grâce à la VR, « L'apprentissage par la pratique, la découverte, par l'exploration, combinée à la manipulation d'outils virtuels aussi réalistes et tangibles que des vrais, aboutit à une capacité de mémorisation supérieure » (Barabel et al., 2019).

Enfin, la VR est de plus en plus utilisée pour acquérir des compétences douces, comportementales et sociales que les modalités du dispositif mettent l'apprenant en face de pairs virtuels ou réels. On voit ainsi se développer des expériences pour travailler la prise de parole en public, l'empathie, le leadership, le management, etc.

3.3.4. Apprendre avec la simulation

Dans un cadre pédagogique, la simulation a pour objectif de développer les compétences des apprenants, en les positionnant comme opérateur d'un « simulateur » ou d'un « environnement de simulation » (Gaba, 2007; Pastré, 2005b). Les apprenants sont alors incités à reproduire une activité supposée proche de celle qu'ils seront amenés à pratiquer dans des situations réelles (Béguin & Weill-Fassina, 1997; Rogalski, 1997). Ces simulations pédagogiques donnent la possibilité de représenter de façon simplifiée de plus en plus de situations du monde réel, d'agir sur elles et de montrer les conséquences de ces actions. Les premiers exemples d'utilisation de simulations remontent aux années 50 avec l'entraînement des pilotes. Désormais, l'utilisation de la simulation pour l'enseignement est classique dans des domaines comme la médecine, la physique, l'électronique, la conduite ou encore l'économie (Flandin et al., 2022). Le développement massif de ces formations depuis les années 2000 repose sur l'idée que la reproduction de situation d'activités (en particulier

de travail, mais aussi de vie quotidienne par exemple l'activité de conduite) dans des conditions recréées artificiellement permet d'apprendre cette activité et de transférer cet apprentissage vers des situations réelles (Ciccone, Cuvelier, Bationo - Tillon, Baugnon, & Decortis, 2022; Horcik, 2012; Horcik & Durand, 2011; Vidal-Gomel, 2005).

La simulation s'est étendue bien avant l'arrivée de la RV, mais elle est riche d'enseignement dans la mesure où elle permet l'apprentissage immersif : celui-ci consiste à placer des individus dans un environnement d'apprentissage interactif (qu'il soit physique ou virtuel), dans le but de reproduire des scénarios existants, ou d'enseigner de nouvelles compétences (voire des techniques très particulières et complexes). Elle met l'accent sur l'importance de distinguer :

- l'immersion, une caractéristique que portent les nouveaux EIAH tels que la RV et les JN : s'immerger, c'est être plongé dans une pseudo-réalité, dans un milieu étranger, en dehors de son milieu d'origine
- de l'apprentissage immersif. L'apprentissage immersif crée les conditions de l'acquisition de nouveaux savoirs ou de nouvelles compétences par l'expérience. Dans ce processus, l'interactivité permise entre l'apprenant et son environnement est cruciale, voire même considérée comme garante de l'ancrage des nouvelles connaissances.

L'apprentissage immersif **n'est donc pas limité à la réalité virtuelle : des formats en présentiel comme les simulations (haute ou « basse » fidélité) ou les jeux de rôle sont également considérés comme un apprentissage immersif** (Cuvelier, 2011; Gobin Mignot & Wolff, 2019; Nyssen & De Keyser, 1998).

Principe de fidélité

La plupart des travaux réalisés en ergonomie, en sciences de l'éducation et en didactiques professionnelles argumentent la nécessité de

dépasser les approches dites « figuratives » ou « réalistes » qui mettent en avant la fidélité des dispositifs (simulateurs par exemple) et les notions de validité écologique pour privilégier des « approches opératives » (Béguin & Weill-Fassina, 1997; Daniellou, 2007; Leplat, 1997) : il est illusoire de concevoir la simulation comme une copie conforme de situations de référence et de voir les situations simulées comme des « miroirs de la réalité ». Schématiquement, ces travaux décrivent deux manières d'envisager l'apprentissage de la pratique et de concevoir les dispositifs de formation sur simulateur (Béguin & Pastré, 2002; Cuvelier, 2018).

La première perspective vise la fidélité physique des dispositifs de formation. Elle se rattache à un courant que nous pourrions qualifier de réaliste. Le postulat pédagogique qui sous-tend cette approche est le suivant : « on apprend la pratique par l'exercice de la pratique. Autrement dit, il faut faire pour savoir-faire » (Pastré, 2005b) . L'objectif de ces simulations est de chercher à reproduire les caractéristiques principales de l'activité cible dans des visées d'entraînement (Béguin & Weill-Fassina, 1997): manipulations techniques spécifiques, reproduction d'environnements dynamiques globaux. C'est donc cette activité cible qui structure la construction des environnements et la conception des scénarios, avec la mise en place de séquences issues de cas réels ou comportant des degrés de difficulté divers (procédures standards, procédures d'urgence) (Horcik, 2012, 2014). Les simulations permettent alors de pallier des difficultés et obstacles de l'apprentissage en situation réelle (cout, risques, soutenabilité, accessibilités, etc.). Les enjeux de sécurité sont des obstacles classiques qui ont motivé le développement de nombreux dispositifs de formations par la simulation : l'apprentissage pratique peut conduire à des erreurs qui ne sont pas acceptables, car générant de réels risques d'accident (conducteurs de centrales nucléaires, pilotes d'avion, médecine, etc.) (Boucheix, 2015). Dans

cette approche, les simulateurs utilisés sont souvent des simulateurs dit pleine échelle (*fullscale*), dont la principale propriété est leur fidélité technique. « On pense que plus le simulateur est conforme au réel, plus facile et efficient sera l'apprentissage pratique. On est donc dans une philosophie réaliste de la simulation : le simulateur a pour fonction d'être un substitut du réel. Et on va chercher à lui faire jouer le même rôle que joue l'apprentissage sur le tas : regarder faire et reproduire » (Pastre, 2005; Pastré, 2006, 2007) .

La deuxième façon de concevoir des simulateurs pour la formation est profondément différente. Elle est issue de la didactique professionnelle et de l'ergonomie et vise cette fois une fidélité fonctionnelle ou opérative : en s'appuyant sur des théories de l'apprentissage, ces disciplines postulent qu'on apprend dans l'activité en résolvant les problèmes contenus dans le travail (Dewey, 1967; Piaget, 1947/2012; Vergnaud, 1996; Vygotskiï, 2014). En conséquence, dans cette deuxième approche, on va construire des simulateurs qui mettent en scène un ensemble de situations liées à un ensemble de problèmes. Les contenus de formation sont élaborés par les formateurs sur la base d'une analyse préalable de l'activité réelle, qui permet l'identification de *concepts pragmatiques c'est-à-dire de concepts permettant l'action : ils forment la structure conceptuelle l'activité et constituent les éléments à « transmettre » au professionnel*. Les dispositifs de formation ne sont alors pas nécessairement numériques ni même forcément liés à un artefact technique très élaboré: ils recouvrent aussi d'autres techniques comme les jeux de rôle ou les études de cas « papier », et ne sont pas. « Ici l'apprentissage ne consiste pas à reproduire une procédure ou un geste. Il consiste à inventer une solution, une procédure, une démarche, une méthode, à partir certes de matériaux dont il dispose, mais en leur donnant une forme nouvelle » (Pastré, 2005a).

L'intérêt des simulateurs est alors de proposer des situations problèmes adaptées, dans un contexte industriel qui tend à procéduraliser et automatiser tout ce qui est susceptible de l'être, générant des effets « boîtes noires » et des paradoxes (Bainbridge, 1983; Cuvelier, 2022; fadier, 2009; Rabardel, 1995). L'intérêt de la simulation, qui peut intégrer des dispositifs immersifs, est de permettre un maximum d'interactivité. C'est d'ailleurs là l'apport essentiel des TIC comme des dispositifs les plus avancés : elles encouragent le passage de problèmes statiques, tel que le proposaient les études de cas par exemple, vers des mises en dynamique, durant lesquelles la situation « répond » aux apprenants, acteurs.

Ces divergences de « fidélité » envisagées par les concepteurs permettent de questionner les usages et les enjeux de JN pour l'enseignement comme des EIAH au sens large et de mettre en perspectives leurs apports possibles en termes d'apprentissage. Pour illustrer ce propos, on peut citer des travaux récemment menés dans l'industrie nucléaire qui développe l'idée contre-intuitive que, d'un point de vue pédagogique, l'immersion intensifiée des formateurs, permise par l'environnement virtuel semble moins influente que les expériences d'apprentissage émergentes basées sur la pratique (Drakos, 2021; Drakos et al., 2021). Dans un autre domaine, des études plus anciennes, telles celles menées en anesthésie, ont également montré que des dispositifs moins fidèles (des simulateurs-écrans par exemple) donnaient d'aussi bons résultats que des simulateurs réalistes « pleine échelle » en ce qui concerne l'apprentissage des actions à réaliser en situation de crise (actions de diagnostics et actions thérapeutiques) (Ciccone, Cuvelier, Bationo-Tillon, & Decortis, 2019; Nyssen, 2005; Nyssen, Larbuisson, Janssens, Pendeville, & Mayne, 2002).

Principe de débriefing

Dans les dispositifs de formations via la simulation, le débriefing a lieu immédiatement après la simulation. Il est conduit par des formateurs sur la

base de ce qui se passe en situation de simulation et selon des modalités qui peuvent être très diverses (Kolbe, Grande, & Spahn, 2015; Jenny W Rudolph, Simon, Dufresne, & Raemer, 2006; Sawyer, Eppich, Brett-Fleegler, Grant, & Cheng, 2016). Le débriefing est défini selon (Pastré, 2005b) comme « toutes les séquences qui ont pour but, après l'action, d'amener les apprenants à une analyse réflexive (et rétrospective) de leur propre activité ». Le rôle du débriefing est « d'aider les participants à comprendre, analyser et synthétiser leur raisonnement, leurs émotions et leurs actions survenus durant la simulation dans le but d'améliorer leurs performances futures dans des situations similaires » (J.W. Rudolph, Simon, Rivard, Dufresne, & Raemer, 2007). De façon générale, l'objectif est de permettre une généralisation et une abstraction des contenus à partir de l'expérience des participants (Ciccone, Cuvelier, & Decortis, 2018; Horcik, 2014; Pastré, 2005b). De nombreux travaux montrent combien ces débriefings sont essentiels : le débriefing, longtemps oublié, est un élément absolument essentiel de la formation par simulation. De la qualité de sa réalisation dépend la qualité de la session de simulation proposée.

Ces auteurs insistent sur le rôle de la réflexivité lors de cette étape : « sans réflexivité, un débriefing peut se réduire à un apport de connaissances, qui ne seront pas assimilées ». « Nous avons constaté que ce débriefing (au sens large) était un moment essentiel pour l'apprentissage : analyser son activité après coup devient un instrument incomparable pour apprendre. De plus, on n'apprend pas les mêmes choses pendant l'action et au moment du débriefing, en sorte que les deux formes d'apprentissage, apprentissage pendant l'action et apprentissage par l'analyse de l'action, en viennent à se combiner et à s'épauler l'une l'autre » (Samurçay & Pastré, 2004).

3.4.5. De la nécessaire évolution du didactique vers le pédagogique

La mise en œuvre de l'ensemble de ces principes conduit à faire évoluer le rôle des formateurs et des enseignants. Accompagnant ces évolutions, le rôle de l'enseignant et les postures professionnelles qu'ils déploient dans les dispositifs éducatifs intégrant les technologies numériques évolue aussi (Loisy & Lameul, 2014). Les analyses montrent un glissement progressif sur 15 ans depuis des préoccupations très techniques vers des approches plus intégrées, qui incluent des missions didactiques et pédagogiques (Pernin & Lejeune, 2004): auteurs, médiateurs, concepteurs et/ou prescripteurs de contenu, prospecteurs, référenceurs et organisateurs de ressources, scénaristes d'activités, animateurs de situations d'apprentissage ... Plusieurs travaux en sciences de l'éducation décrivent un « recentrage vers le pédagogique » qui nous laisse penser que, dans les années à venir, « *les métiers de l'enseignement connaîtront de profondes mutations, en particulier en termes de spécialisation des tâches, d'explicitation des connaissances et de prise en compte des interactions sociales dans les processus d'apprentissage* » (Pernin & Lejeune, 2004). Ces évolutions supposent une adaptation constante de leur activité et questionne l'acceptabilité et les besoins, très variables selon les types d'enseignement. À titre d'exemple, des études montrent que les enseignants en école primaire attendent plus de performance de la technologie impliquant IA, mais principalement pour une utilisation de génération de contenus (par exemple, cours, contenu, exercices) tandis que les enseignants du secondaire envisagent la technologie impliquant l'IA pour des tâches plus complexes telles que l'aide à l'écriture ou le diagnostic des difficultés de l'apprentissage (Cojean & Martin, 2022).

3.3.6. Apprendre grâce à la scénarisation

Toute scénarisation permet de réfléchir à la manière dont on va pouvoir soutenir les apprentissages. Les technologies offrent deux voies majeures : celles de l'individualisation et de la différenciation pédagogique, et qui reposent sur la gamification et l'expérimentation.

La différenciation et l'individualisation renvoient à des modes d'organisations pédagogiques qui favorisent les apprentissages individuels, jusqu'à parfois les personnaliser. La personnalisation des apprentissages renvoie aux méthodes qui permettent la construction personnelle de l'apprenant (personnalité, identité, autonomie, rapport aux autres...). C'est un processus d'individuation (estime de soi, sentiment de compétence ou d'accomplissement...) et de socialisation (solidarité, coopération...).

Principe de différenciation

La différenciation « met en œuvre un cadre souple où les apprentissages sont suffisamment explicités et diversifiés pour que les élèves puissent travailler selon leurs propres itinéraires d'appropriation tout en restant dans une démarche collective d'enseignement des savoirs et savoir-faire communs exigés » (Przesmycki & Peretti André, 2004). Différencier, c'est « ajuster l'enseignement aux différents besoins des élèves » (Forget, 2018), prendre en compte les différences entre les élèves (motivations, savoirs, engagement...). Les objectifs d'apprentissage restent communs à l'ensemble des apprenants, c'est la manière de les atteindre qui peut être différente d'un apprenant à l'autre.

Il existe 4 niveaux de différenciation (Connac, 2021; Forget, 2018) :

- « sur les contenus (avec le risque de cautionner une inégalité des acquis),
- sur les processus (par une diversification des entrées et des formes de guidages différentes),

- sur les productions (par un traitement des résultats des élèves, à partir d'une évaluation formative et dans la manière de permettre à l'élève des choix pour témoigner de ses apprentissages)
- et sur les structures (concernant les modalités sociales et matérielles du travail) ».

La différenciation pédagogique est au final, une manière de penser qui ramène le formateur à ses conceptions de l'enseignement et de l'apprentissage, à son attitude face à l'hétérogénéité des apprenants, et à sa capacité de mobiliser l'ensemble des ressources disponibles pour favoriser les apprentissages (Groupe de travail en Outaouais, 2005). C'est un acte d'ingénierie pédagogique.

La différenciation pédagogique conduit à proposer des ressources (voire une diversité de ressources) pour aider à apprendre et à se rendre attentifs à la diversité des besoins et modalités d'apprentissage. L'individualisation consiste à introduire des états facilitant l'appropriation

Principe d'individualisation

L'individualisation est donc une conséquence de la différenciation. Elle permet de mettre à disposition des apprenants un ensemble de ressources dans lesquelles ils puisent en fonction de leurs besoins d'apprentissage et de la manière dont ils apprennent. En ce sens, l'individualisation organise et structure des parcours d'apprentissage en fonction des acquis et des besoins d'apprentissage de l'apprenant.

Plus précisément, une formation individualisée, c'est « une formation qui reconnaît et prend en compte la singularité du sujet : ses besoins, son parcours, son expérience, ses acquis, ses contraintes, ses ressources, ses capacités d'autodirection, ses stratégies ; une formation qui prend en compte la dimension sociale des apprentissages dans une perspective autonomisante et de construction identitaire ; une formation co-construite, négociée

entre les parties prenantes qui concrétise l'interaction entre un projet de formation institué et des projets de formation individuels. Cette formation co-construite a un impact sur le rôle des acteurs et sur l'organisation, elle est régulée et évolue au cours du temps » (Masson, 2009; Trollat & Masson, 2009). Précisons que dans cette définition « l'accent est mis sur le sujet apprenant, le dispositif de formation et l'interaction entre les différents protagonistes, acteurs (formés, formateurs, ingénieurs de formation, etc.) et actants (dispositif lui-même, outils formatifs, méthodes d'apprentissage, etc.). [...] L'objectif est de pointer l'importance de prendre en compte les éléments de contexte, les dynamiques personnelles et les formes de partenariat pédagogique qu'appelle la formation individualisée » (Frétigné & Trollat, 2009).

Il est possible d'individualiser toutes les dimensions de l'acte d'apprendre :

- « les situations (qui peuvent être individuelles, interactives, collectives),
- les outils (écrit, oral, informatique, etc.),
- les types d'insertion (alternance, pédagogie du projet, situation-problème, etc.). » (Frétigné & Trollat, 2009; Meirieu, 1994),
- mais aussi les parcours de formation (module, unités de compétences ou d'enseignement, etc.),
- les contenus (en fonction des programmes, curricula, référentiels, etc.),
- et les méthodes pédagogiques (étude de cas, jeu de rôle, autoformation, etc.).

Pour un certain nombre de pédagogues, il ne peut y avoir individualisation que lorsque « le sujet est associé à la recherche de la méthode la plus efficace pour lui, quand il est amené à s'interroger lui-même sur ses propres processus d'apprentissage » (Meirieu, 1994)

Au final, il est possible de distinguer différenciation et individualisation pédagogique à partir de leurs finalités. La différenciation porte sur l'action pédagogique par projection (en tant que formateur, j'imagine des parcours), la seconde sur la prise en compte au fil de l'eau du cheminement des apprenants (le parcours se fait trajectoire). Le but et le moyen en d'autres mots et respectivement !

Principe de gamification

Aujourd'hui on parle beaucoup plus de gamification que de ludopédagogie. Plus précisément, le vocable gamification, ou sa traduction française « ludification », sont désormais retenus pour décrire le processus qui conduit à intégrer des ressorts ludiques dans une situation a priori non ludique (Sánchez-Rodríguez, Perier, Callahan, & Séjourné, 2019), à user de l'état d'esprit et de la mécanique du jeu pour résoudre des problèmes et faire participer les usagers (Zichermann et Cunningham, 2011).

Les technologies numériques et l'univers du jeu vidéo ne sont pas étrangers (Brassier et Ralet, 2021) à l'essor de la gamification, et c'est même antérieurement dans le monde de la conception des interfaces web que ce terme a d'abord fait florès (Sanchez et al., 2015) ; mais aussi celui du marketing pour fidéliser les consommateurs (Bonenfant & Genvo, 2014). C'est une approche qui permet de capter l'attention de l'utilisateur voire du consommateur.

La gamification s'érige aujourd'hui en discipline complexe puisqu'elle combine quatre types d'approches (Duarte & Bru, 2021)(cf. image 17) :

- les approches centrées sur l'utilisateur (User eXperience design, design thinking...),
- l'univers et les principes utilisés dans les jeux (gamedesign et progression, guildes...),
- le marketing (vision stratégique)
- et les sciences comportementales (neurosciences, psychologie sociale, etc.).

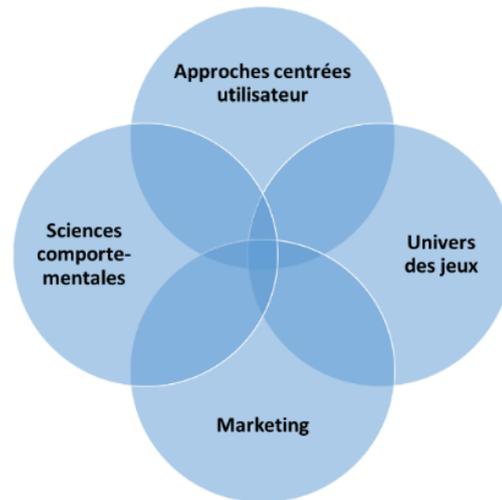


Image 17 : la gamification, une convergence de 4 approches (adapté de Duarte & Bru, 2021)

Le terme de gamification est souvent lié aux technologies (immersives, interactives, ou autres), c'est un abus de langage. On peut gamifier sans les technologies ; avec la narration par exemple et les mécanique de jeu.

Mais gamifier devient de plus en plus technique lorsqu'il s'agit de jouer pour apprendre et d'aider à apprendre !

Principe d'expérimentation

En formation des adultes, l'expérience est valorisée en tant que processus d'apprentissage et de développement autonome de l'apprenant (Zeitler, 2012). Dans l'enseignement supérieur l'expérience est construite et développée à travers les stages, l'alternance en entreprise et plus largement dans le cadre des activités d'apprentissage basées sur les mises en situation, la résolution de problème, la gestion de projet, des activités authentiques qui se rapprochent du monde professionnel. Le jumeau numérique comme ressource et support à l'apprentissage permet de plonger l'apprenant dans un environnement reproduisant des situations réelles en opérant sur des équipements industriels que l'apprenant sera amené à exploiter dans le monde professionnel.

L'importance de l'expérience dans l'apprentissage s'appuie sur le paradigme de l'apprentissage expérientiel, une démarche qui place l'apprenant

dans une situation d'apprentissage reflétant des situations authentiques afin de l'impliquer pleinement dans son processus d'apprentissage.

« L'apprentissage expérientiel est un modèle d'apprentissage préconisant la participation à des activités se situant dans des contextes les plus rapprochés possible des connaissances à acquérir, des habiletés à développer et des attitudes à former ou à changer. » (Legendre, 2007, cité par Béchard, Béchard (2020)). En adoptant ce type de stratégie, l'enseignant met en place des activités authentiques basées sur des situations de la vie professionnelle.

Les travaux de Dewey sont fondamentaux pour théoriser le rôle de l'expérience dans l'apprentissage. Son école expérimentale « l'école laboratoire » qui articule l'apprentissage à la pratique vise à relier en un même lieu recherche et application (Rozier, 2010). Selon Dewey (1968/2018), l'expérience est un processus de construction de sens autour de l'action et du vécu du sujet au niveau cognitif, corporel et émotionnel. Il considère qu'il n'y a pas de construction de connaissance sans une action, sans le vécu qui l'accompagne (l'éprouvé) et sans l'élaboration de lien entre les deux (la pensée). Toute expérience comprend une dimension cognitive (interprétation mentale de la situation), affective (vécu émotionnel), conative (engagement dans une action particulière) et corporelle (sensations et comportements) (Dewey, 1967).

4. LA SCÉNARISATION PÉDAGOGIQUE POUR *DESIGNER* L'EXPÉRIENCE D'APPRENTISSAGE



4.1. La construction de scénarios pédagogiques

L'écriture de scénarios organise le chemin d'apprentissage en donnant à voir **où l'on va, comment on y va, et de quelle manière**. Elle agence les contenus de formation, les choix d'animation, et de navigation lorsqu'elle cherche à inclure des modalités numériques d'apprentissage (cf. tableau 12). Savoir où l'on va, comment on y va, et pourquoi on y va facilite tout à la fois le travail du formateur et celui de l'apprenant (donner du sens à ses apprentissages et s'engager dans ceux-ci).

Tout scénario pédagogique, quelles que soient les modalités de formation (distance, présence, comodalité), obéit aux mêmes règles de construction.

Besoin exprimé	Objectif de la formation	Objectifs pédagogiques (correspondant aux séquences)
Faire des économies en élevage caprin	Améliorer ses pratiques d'alimentation des chèvres dans un objectif de diminution des charges.	<ul style="list-style-type: none"> - Analyser ses coûts et son système d'alimentation - Identifier les solutions existantes et savoir les mettre en œuvre - Choisir une ou des solutions applicables pour mon exploitation et planifier leurs mises en œuvre

Tableau 12 : exemple d'objectifs (adapté de guide pratique de la scénarisation, ADPSA)¹⁷

Le scénario pédagogique décrit de manière détaillée les différentes étapes de l'action ou de la séquence de formation, il organise son **séquençage** : **objectif général**, **objectifs pédagogiques** (cognitif, socioaffectif, psychomoteur, etc.) (cf. image 15), méthodes (actives, interrogatives, immersives, etc.), outils (synchrones, asynchrones), exercices, durée, **modalités d'évaluation**, planification des activités d'apprentissage, description des tâches à réaliser, etc. (exemple, cf. image 18).

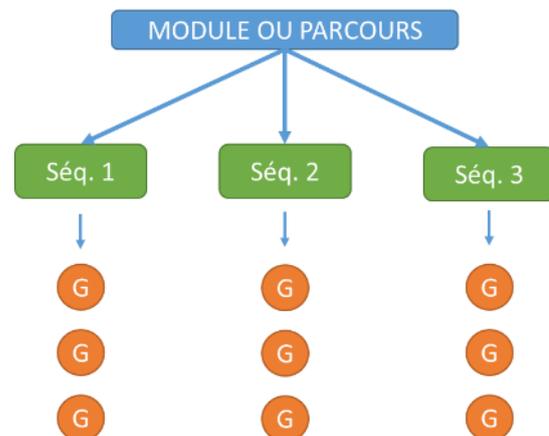


Image 18 : la scénarisation ou l'art du découpage en grains (adapté de learning Fab Ensna, 2022)

¹⁷ https://didac-ressources.eu/wp-content/uploads/2017/09/DI_Guide_Pratique_scenario_pedagogique.pdf

Dans le cas des formations à distance, le scénario pédagogique met en évidence les **modes de médiatisation** retenus : texte, son, illustration, vidéo, animation...

Plus la scénarisation est travaillée et détaillée, plus elle rend possible le transfert d'animation à un autre formateur. Ce qui peut être très utile dans le cadre du projet JENII et de la démultiplication des usages des JNE chez chacun des partenaires impliqués voire le métavers qui pourrait être proposé à l'issue du projet (cf. Livret complémentaire : Metavers).

La première étape consiste donc à structurer les objectifs pédagogiques en éléments de contenus : quels thèmes aborder et dans quel ordre ? Ce séquençement facilite la formulation de sous-objectifs, tel un **escalier pédagogique**.

Une fois le contenu défini vient le choix des outils les plus adaptés pour atteindre les objectifs visés. Ce choix repose sur leur possibilité d'intégration au regard du type de public accueilli en formation, des objectifs visés et des possibilités d'hybridation des environnements d'apprentissage disponibles : le jumeau numérique et ses espaces périphériques (le jumeau physique, la salle de cours, ...), et de leurs possibles (présentiel, distanciel, comodal).

Le jumeau numérique, comme toutes les **technologies d'immersive learning**¹⁸, n'intervient pas comme une priorité dans le séquençement du processus d'apprentissage, il en un outil permettant d'atteindre certains objectifs (ou briques d'apprentissage) qu'il peut être difficile d'atteindre

autrement (absence des équipements physiques, invisibilités ou dangers des phénomènes étudiés, etc.). Les JNE permettent ainsi de placer l'apprenant dans un environnement virtuel pour lui faire vivre des situations réelles ou au plus près de celles-ci.

Rappel : Un outil est choisi et utilisé pour sa pertinence pédagogique, non parce qu'il existe !

Les questions à se poser :

Quels publics ? et particularités de ces publics ?

Quelle(s) compétence(s) - et quel niveau - attendue(s) ? Quels apprentissages ?

Quels thèmes et contenus didactiques ?

Quelle place dans le scénario global ? Quelle articulation à d'autres apports didactiques ?

Quelle organisation technique et temporelle ?

Quel matériel à disposition ?

Quelles modalités d'évaluation spécifique ?



Cf. **fiche-outil n°1 : dispositif pédagogique**

Cf. **fiche-outil n°4 : méthode ADDIE**

¹⁸ Trois technologies : la **réalité virtuelle** (VR). Utilisation d'un casque pour une immersion dans un espace numérique à 360°, la **réalité augmentée** (AR). Des informations numériques sont superposées à une image réelle sur un écran. Exemple : affichage d'instruction (ou de Pokemon !). Ne nécessitant pas de casque (juste une tablette), la **réalité mixte** (MR). Mélange entre réalité virtuelle et augmentée. Elle utilise un casque capable de prendre en compte l'espace réel. <https://www.hop3team.com/nouveaux-concepts-pedagogiques-des-annees-2020/>

4.2. Une diversité de scénarios possibles

Le scénario pédagogique mobilisant le jumeau numérique pourra combiner l'immersion avec à d'autres modalités pédagogiques complémentaires telles que la **pédagogie inversée** ou **renversée**, les **learning'lab**, les **creativ'room**, les **pédagogies du projet**, etc. dont l'ensemble structure un ensemble de briques d'apprentissage, participant chacune à l'atteinte de l'objectif de formation.

Certains auteurs (Quintin, Depover, & Degache, 2005) distinguent deux types de scénarios dans le processus de scénarisation : les scénarios d'apprentissage et les scénarios d'encadrement (ou scénario d'assistance (Paquette, Crevier, & Aubin, 1997), ou scénario de formation, (Paquette, 2002b)).

- Le **scénario d'apprentissage** revient à décrire les activités d'apprentissage qui seront proposées et de définir leur articulation dans le dispositif pédagogique, ainsi que les productions qui sont attendues de la part des apprenants.
- Le **scénario d'encadrement** précise le rôle des enseignants (notamment en matière de tutorat) et les modalités des interventions destinées à soutenir le scénario d'apprentissage.

L'existence de ces deux scénarios permet tout à la fois de mettre en évidence les interventions de soutien des formateurs au cours du

processus d'apprentissage, et d'en faciliter le transfert à d'autres formateurs.

On trouve également à la périphérie de ces scénarios, des **scénarios d'évaluation, d'observation des traces d'activités d'apprentissage** (progression dans les tâches, temps de réalisation, etc.), et **de suivi et de régulation de l'apprentissage** dont les fonctions vont se distinguer les unes des autres (Villiot-Leclercq, Dessus, Mandin, Zampa, & Loiseau, 2011b) : fonctions de prescription, de régulation, d'organisation, d'observation, d'aide et de soutien des apprentissages. (cf. image 19).

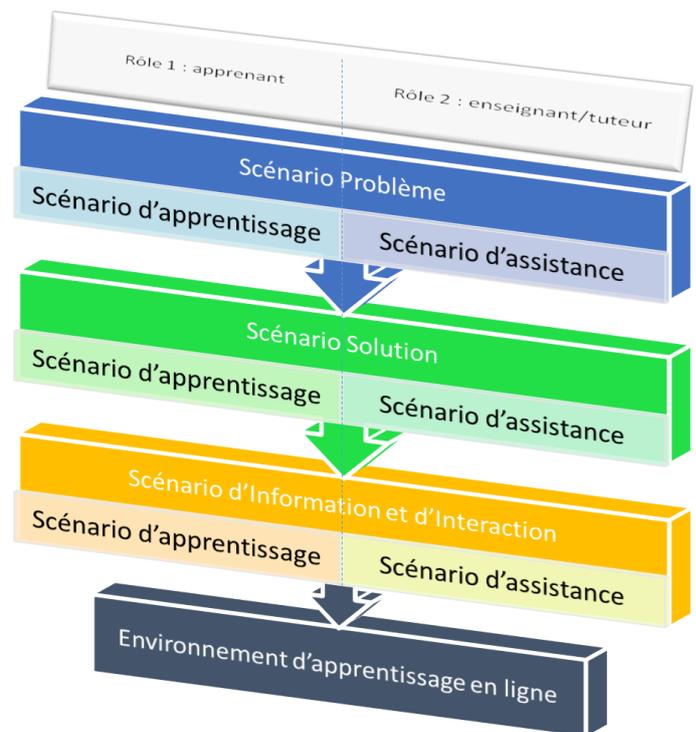


Image 19 : L'approche par scénarios (adapté de Villiot-Leclercq et al., 2011b)

Le scénario d'évaluation est essentiel, car il permet l'**alignement pédagogique** (Biggs & Tang, 2011), de pouvoir faire correspondre acquis d'apprentissage visés et apprentissages effectivement réalisés au travers les activités proposées (cf. images 20, 21 et 22).

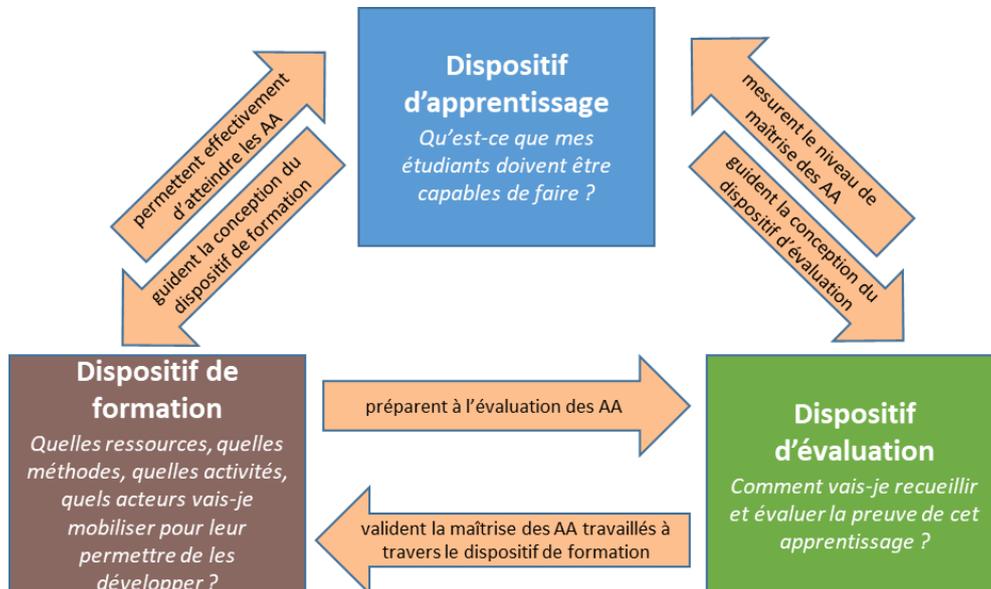


Image 20 : L'alignement pédagogique (adapté de Biggs & Tang, 2011)

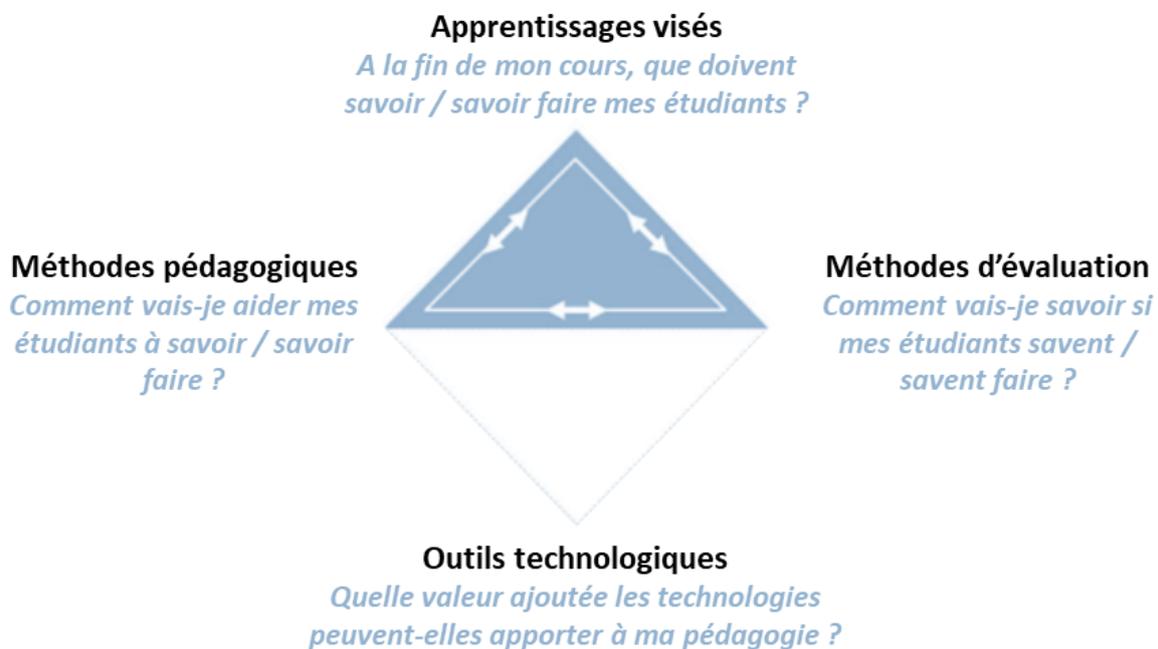


Image 21 : L'alignement pédagogique (adapté de Université de Clermont Auvergne, 2016)

Dans le schéma illustratif n°1, l'alignement pédagogique n'est pas respecté : si l'enseignant veut développer l'esprit critique de ses étudiants, en utilisant notamment des études de cas pour évaluer leur capacité à analyser des situations professionnelles, il ne doit pas faire reposer son enseignement uniquement sur un cours magistral.

Schéma n°1

Méthodes pédagogiques
Exposé magistral

Apprentissages visés
Analyse critique



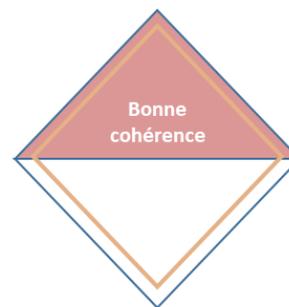
Méthodes d'évaluation
Etude de cas

Le schéma n°2 illustre un alignement cohérent : l'analyse critique sera travaillée activement en pratiquant des mises en situation, des études de cas et de textes, des discussions, des échanges, des simulations... La méthode d'évaluation choisie, qui est une étude de cas, est en adéquation avec ce à quoi les étudiants se seront préparés. Les outils technologiques utilisés leur permettront le travail en groupe et les échanges.

Schéma n°2

Méthodes pédagogiques
Etudes de cas
Etudes de textes
Discussions / Echanges...

Apprentissages visés
Analyse critique



Méthodes d'évaluation
Etude de cas

Outils technologiques
Outil de travail collaboratif

Image 22 : L'alignement pédagogique (adapté de Université de Clermont Auvergne, 2016)

Dans le domaine des technologies pour apprendre, l'intelligence artificielle sous couvert de l'**adaptative learning** ou du **machine learning**, selon leur degré de supervision, ouvre des perspectives de travail intéressantes pour faire vivre ces scénarios et individualiser les

processus d'apprentissage (cf. tableau 13). Ces technologies permettraient tout particulièrement d'envisager l'adaptation automatique des parcours d'apprentissage en fonction des interactions de l'apprenant (Digital learning Academy, 2022 ; Banon, 2018).

Fonctions	Plan cognitif	Plan Socio-affectif	Plan motivationnel	Plan metacognitif
Accueil et orientation	Informier sur le dispositif de formation	Initier la construction d'un sentiment d'appartenance	Faire émerger les objectifs personnels de l'apprenant	Inciter l'apprenant à faire le point sur ses stratégies cognitives
Organisation	Présenter les méthodologies appropriées	Réguler la dynamique de groupe	Accompagner le processus d'autonomie	Faciliter la planification de l'apprentissage
Pédagogie	Apporter Des réponses ou les susciter Remédier	Faciliter la collaboration des apprenants	Proposer des activités significatives	Susciter L'expression critique sur le dispositif
Socio-affectif Motivation	Personnaliser le soutien à l'apprentissage	Rompres l'isolement de l'apprenant	Lutter contre l'abandon	Faire prendre conscience de ses habiletés à collaborer
Technique	Aider à maîtriser l'environnement d'apprentissage	Susciter l'entraide technique entre apprenants	Encourager l'utilisation des outils	Susciter la prise de distance réflexive sur les usages des outils
Métacognition	Faire conscientiser ses préférences cognitives	Faciliter la prise de conscience des états affectifs / tâches	Faire identifier les motivations intrinsèques	Inciter l'apprenant à apprendre à apprendre
Evaluation	Annoncer clairement les critères d'évaluation	Produire des rétroactions à portée formative	Encourager et féliciter	Aider à s'autoévaluer

Tableau 13 : Applications potentielles de l'IA dans la formation (Image de Ezratty, 2020 issu du site : <http://www.magrh.reconquete-rh.org/index.php/articles/formation/455-les-applications-de-l-intelligence-artificielle-dans-l-education>)

Il est difficile de dénombrer le nombre d'activités d'apprentissage (Exemples, cf. tableau 14 et 15) qu'il est possible de structurer lorsque l'on organise les activités d'enseignement.

On pourra structurer les activités autour de grands pôles tels que :

- Créer (un objet, un exposé, un croquis, une vidéo...)
- Evaluer (dispositif, solution...)
- Organiser (planning, échéancier...)
- Communiquer (exposé,
- Collaborer (un projet collectif...)
- Contribuer (alimenter un blog, un wiki, un forum...)
- S'entraîner (exercices, didacticiels...)
- S'informer (lire, écouter...)
- Explorer (tester, expérimenter...)
- Résoudre (solutionner...)

- Analyser (Bilan, debriefing...) etc.

Cours : Méthodologie de la recherche						
OA	Sous objectifs	Séances	Contenu	Activités d'apprentissage	Evaluation	Matériel/Support
Objectif n°4 : Elaborer un outil de recherche qualitative	Définir les termes clés	4	- Définition des termes clés : méthodologie, échantillon, passation, une variable dépendante et indépendante, etc.	- Quizz avec vote cartons de couleur sur les différents termes - Exposé magistral	Test de connaissance, questions ouvertes	- Cartons de couleur
	Distinguer la différence entre recherche qualitative et quantitative		- Différence entre recherche quantitative et recherche qualitative	- Travail en binôme : à partir d'exemples de recherches menées, il s'agira de retrouver celle qui est qualitative et d'identifier les différences avec la recherche quantitative - Exposé magistral		- Polycopie des exemples de recherche
	Décrire Les étapes de la démarche de recherche		- Les étapes de la démarche de recherche	- Travail en binôme : remettre les étapes dans l'ordre - Exposé magistral		- Etiquettes avec les étapes de la démarche de recherche
	Construire un outil de recherche	5	- Les outils de la recherche qualitative : questionnaire, entretien, observation	- Travail en groupe : à partir de leur problématique de recherche, élaboration de leur outil méthodologique - Evaluation de l'outil par les pairs	Dossier de recherche	- La grille d'évaluation pour l'évaluation par les pairs - Feuilles A3

Tableau 14 : ingénierie et scénarisation pédagogique (adapté de Bédard & Gérard, 2015),

Séquence Modalité Durée	Acquis d'apprentissage visés	Que font les étudiants ?	Que fait l'enseignant ?	Ressources, outils à préparer
Séquence 2- Module « Faire ou faire faire » En ligne Ou 30/01 au 20/02 (soit 3 semaines) pour une charge de travail Estimée à 6- 9 heures	A la fin du module, les étudiants seront capables de : <ul style="list-style-type: none"> • Expliquer les avantages et les limites des choix « faire » ou « faire faire » pour une entreprise * Argumenter le choix de l'une ou l'autre stratégie face à un cas particulier 	1. Découvrir la théorie : <ul style="list-style-type: none"> • Regardent vidéo qui introduit le questionnement sur le module « faire » ou « faire faire » • Lisent les chapitres 2 et 3 du livre de référence • Réalisent le quiz de vérification de leur compréhension • Lisent les cas General Motors Fisher Body et Bouygues Telecom (= illustration de la théorie) • Posent leurs questions sur le module « faire » ou « faire faire » dans le forum adéquat 2. Réaliser un cas par groupe : <ul style="list-style-type: none"> • Par groupes de 4, analysent le cas 'Outsourcing à l'hôpital en vue d'une présentation orale lors de la séance en présentiel de fin février • Participent à une séance de suivi du travail de groupe avec l'enseignant (classe virtuelle) 3. Appliquer dans son travail personnel : <ul style="list-style-type: none"> • Mène une analyse « faire » ou « faire faire » pour une dimension de leur entreprise de stage 	<ul style="list-style-type: none"> • Envoie les emails de soutien en début de chaque semaine • Répond aux questions sur le forum • Veille à ce que les travaux de groupe démarrent bien • Planifie et anime des séances de suivi des travaux de groupe sur Teams (au moins 1 séance par groupe) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vidéo d'introduction du module <ul style="list-style-type: none"> • livre de référence • « Quiz sur les contenus des chapitres 2 et 3 du livre • Cas General Motors Fisher Body <ul style="list-style-type: none"> • Cas Bouygues Telecom • Cas Outsourcing à l'hôpital • Espace Teams pour le suivi des travaux de groupe • Forum pour les questions sur le module <ul style="list-style-type: none"> • Consignes pour le travail personnel

Tableau 15 : exemple de scénario (adapté de Louvain learning Lab, 2020)¹⁹

Derrière ces activités, les pratiques d'apprentissage et d'enseignement incarnent des principes pédagogiques forts, issus des théories de l'apprentissage issues du **socio-constructivisme** et du **socio-cognitivism**:

- *Personne n'apprend à la place de l'apprenant, il est acteur*
- *L'apprenant apprend seul, mais jamais sans les autres, en interagissant*
- *L'apprenant apprend pour faire, en faisant, en regardant faire*
- *L'apprenant apprend en réfléchissant*

Ils se traduisent par des activités pédagogiques qui favorisent l'apprentissage par la découverte, par projets, par problèmes, expérientiel, coopératif, etc. et peuvent se combiner et s'articuler entre eux.

Plus les activités d'apprentissages seront variées, plus elles s'adapteront au plus grand nombre (Joyce, Weil, & Calhoun, 1986; Tremblay-Wragg, 2018) et embrasseront une pluralité de stratégies d'apprentissage, de manières d'apprendre, et d'opportunités d'apprentissage.

¹⁹ <https://www.louvainlearninglab.blog/scenariser-un-enseignement-hybride/>



5. CONCLUSION

LES JUMEAUX NUMERIQUES
D'ENSEIGNEMENT :

LES DEFIS A
RELEVER

L'environnement pédagogique tel qu'il se dessine aujourd'hui dans le cadre du projet JENII peut être défini comme un **écosystème d'apprentissage hybride** constitué de réel et de numérique. Il répond à un problème particulier de formation et dépend, dans son organisation et sa gestion, des problèmes à résoudre. Il participe, au même titre que la motivation et les compétences acquises, à la performance des apprentissages.

Une des finalités de JENII est d'apporter des éléments de réponse relatifs à l'efficacité de ces nouveaux environnements d'apprentissage enrichi via le numérique : comment permettent-ils d'accompagner la tâche d'apprentissage de manière à soutenir efficacement l'apprentissage que cela soit du côté des dispositions à apprendre ou des prérequis d'apprentissage, des contraintes imposées par l'environnement d'apprentissage (espace, lieu, matériel, pratiques pédagogiques, etc.), etc.

Un rapide tour d'horizon des projets JENII permet d'entrevoir que les JNE ouvrent :

- à l'**hybridation des dispositifs** de formation et constitue en tant que tels l'un des environnements d'apprentissage de ces derniers
- à la **comodalité** lorsqu'il y a alternance d'environnements virtuels et physiques dans ces dispositifs au regard des scénarios pédagogiques construits
- à la **pédagogie active**, puisque l'idée est de placer l'apprenant au centre de ses processus

d'apprentissage (individualisation, différenciation pédagogique, etc.), de le rendre actif de sa formation (formation action, expérimentation, etc.).

Il reste néanmoins un certain nombre de questions en suspens. Le travail d'expérimentation pédagogique avec les JNE permettra de répondre à une bonne partie d'entre elles :

- Les JNE permettent-ils des apprentissages spécifiques, impossibles à réaliser autrement ? Dans quels domaines (cognitif, opératoire, social, etc.)
- À quelles conditions, le JNE permet des apprentissages plus efficaces, voire plus efficaces, que dans des environnements physiques d'apprentissage ?
- Comment les JNE permettent de mieux individualiser, personnaliser, voire différencier les parcours d'apprentissage ?
- La construction de scénarios pédagogiques avec les JNE conduit-elle à l'émergence de nouvelles formes de professionnalités pour ceux qui les utilisent pédagogiquement ?
- Le formateur utilisant des JNE doit-il se doter de compétences particulières en matière d'animation et de développement de leur usage ? etc.

Ce livre blanc fera ainsi l'objet d'itérations avec les expérimentations JENII et donnera lieu à une V2.

LIVRET COMPLEMENTAIRE : FICHES OUTILS





FICHE OUTIL 1 : Dispositif pédagogique

Un dispositif pédagogique reflète des principes pédagogiques

Les principes pédagogiques

orientent l'action du formateur. Ils sont le reflet de ses convictions pédagogiques. Voici quelques exemples de principes (Develay, 2004²⁰ ; Giordan, 2016²¹):

- ***pour apprendre, l'apprenant a besoin d'être mis en situation d'action, de s'entraîner***
- ***pour apprendre, l'apprenant a besoin de comprendre et de donner du sens aux situations qui lui sont proposées, pour devenir acteur***
- ***pour apprendre, les allers et retours entre théorie et pratiques sont essentiels***
- ***pour apprendre, l'apprenant a besoin de feedback***
- ***pour apprendre, l'apprenant a besoin de confronter ses représentations***

Ainsi, un formateur convaincu par les bienfaits de sa mise en action organisera des activités très concrètes pour aider à apprendre (étude de cas, simulation, jeu de rôle, etc.). S'il croit plus en la nécessité d'impliquer les apprenants en amont de leur apprentissage, il proposera des activités préparatoires (enquêtes, pédagogie inversée, etc.).

Un formateur a pour rôle et pour mission

de faciliter l'appropriation des apprentissages, il est une ressource, un facilitateur. Au regard des théories de l'apprentissage, il est de moins en moins positionné en expert d'un contenu qu'il délivre en mode frontal. L'exercisation, l'implication et le retour sur soi sont trois facteurs qui déterminent la qualité des apprentissages, leur appropriation et leur transférabilité dans un environnement d'apprentissage impliquant des jumeaux numériques pour l'enseignement (et pas seulement bien entendu), il sera nécessaire de réfléchir à la manière dont on peut intégrer ces préoccupations.

Un dispositif pédagogique

organise des situations pédagogiques. Une *situation pédagogique* correspond à ce que vit l'apprenant. La situation résulte du rapport dynamique entre le sujet et les conditions de son action. Elle est « *donnée de l'extérieur en même temps qu'elle est créée par le sujet* » (Pastré, 2002), elle est en ce sens expérimentée (Dewey, 1963). Elle est mouvante (dynamique), nœud à défaire, intrigue à résoudre, en fonction de ce que l'on est et de ce dont on dispose en termes de moyens (Fernagu, 2018). Les situations sont utilisées, en

²⁰ Develay, M. (2004), *De l'apprentissage à l'enseignement*, ESF

²¹ Giordan, A. (2016), rééd., *Apprendre*, Belin

formation comme « *un moyen, une finalité, ou une origine* » pour apprendre (munoz, Métral & Tourmen, 2010) et s'articulent autour d'objectifs.

Un dispositif pédagogique est porteur d'objectifs

Les *objectifs* sont stratégiques (ce à quoi doit aboutir la formation), opérationnels (résultats concrets attendus) et pédagogiques (ce que l'apprenant sera capable de faire)

NB : Les objectifs pédagogiques sont formulés du point de vue de l'apprenant : « à l'issue de cette formation, l'apprenant sera capable de... ». Ils sont formulés avec des verbes d'action et précisent le niveau de performance attendu et les conditions de réalisation de l'objectif.

Un dispositif pédagogique articule des méthodes pédagogiques

Elles sont fonction des objectifs à atteindre (image 2, 3 et 4) et peuvent être :

- **Magistrale, transmissive** : le formateur sait, l'apprenant doit apprendre (l'exposé)
« *L'enseignant maîtrise un contenu structuré et transmet ses connaissances sous forme d'exposé : c'est le cours magistral qui laisse peu de place à l'interactivité avec l'apprenant. Dans le triangle de Jean Houssaye, cela correspond à la relation privilégiée enseignant-savoir où l'enseignant est un expert du contenu, un détenteur de vérité qui transmet l'information de façon univoque* » (Eduscol, 2022)²².
- **Découverte, heuristique** : le formateur ne sait pas tout, il guide (brainstorming, étude de cas). Cette méthode argumente que les connaissances se construisent, à partir d'une action.
« *L'enseignant crée un scénario pédagogique avec du matériel qui permet d'utiliser les essais, les erreurs et le tâtonnement pour apprendre. Il mobilise l'expérience personnelle de l'étudiant ou celle d'un groupe d'étudiants pour apprécier la situation et résoudre le problème avec leurs moyens* » (Eduscol, 2022).
- **Démonstrative, affirmative** : Le formateur montre et démontre (démonstrations)
« *L'enseignant détermine un chemin pédagogique : il montre, fait faire ensuite et fait formuler l'étudiant pour évaluer le degré de compréhension. Cette méthode suit l'enchaînement suivant : montrer (démonstration), faire faire (expérimentation) et faire dire (reformulation). Cette méthode est souvent utilisée dans les TD où l'étudiant acquiert un savoir-faire par simple imitation* » (Eduscol, 2022).
- **Interrogative** : le formateur sait et pose des questions aux apprenants (questions)
« *L'étudiant est reconnu comme possédant des éléments de connaissance ou des représentations du contenu à acquérir. À l'aide d'un questionnement approprié, l'enseignant permet à l'étudiant de construire ses connaissances par lui-même ou de faire des liens et de donner du sens à ces éléments épars. L'étudiant ou un groupe d'étudiant est incité à formuler ce qu'il sait, ce qu'il pense, ce qu'il se représente* » (Eduscol, 2022)
- **Situation problème, expérimentale, expérimentale, essais et erreurs** : l'apprentissage repose sur la mise en situation, sur la recherche de solutions (études de cas, jeux de rôle, simulation...)
- **Participative** : le formateur invite à la discussion, sollicite les témoignages (debriefing, travaux de groupe, mimes ...)

²² <https://eduscol.education.fr/bd/competice/superieur/competice/libre/qualification/q3b.php>

Ces méthodes se traduisent par des **modalités d'apprentissage** ou des **activités pédagogiques** (expérimentation, échanges de pratiques, entraînement, etc.) (tableau A et B) et permettent de favoriser certains types d'apprentissages (savoirs théoriques, procéduraux, expérientiels, sociaux, cognitifs, etc.) (tableau 3), et surtout des **engagements sociocognitifs et socio-affectifs** variables.

Expérimentation	Explorer des connaissances (*)
Echanges de pratiques	Socialiser des connaissances
Entraînement, exercice	Réactivation de connaissances
Jeu	Explorer des connaissances
Mémorisation	Stabiliser des connaissances
Réflexion	Investir et transférer des connaissances
Résolution de problème	Produire des connaissances

Tableau A : les modalités d'apprentissage
 (*) les connaissances peuvent être implicites, explicites ou tacites

Activité d'exécution	Appliquer ou suivre une démarche prédéfinie
Activité d'organisation	Planifier un travail en équipe
Activité de consultation	Lire un document. Visionner un audiovisuel. Interroger une banque de données. Interagir avec un logiciel
Activité de collaboration	Construire un produit en groupe
Activité de détente	favoriser l'apprentissage par un temps d'arrêt entre deux activités
Activité de métacognition	Analyser son propre processus d'apprentissage et le gérer
Activité de motivation	Susciter l'attention, l'intérêt et le désir d'agir.
Activité de perception	Éprouver des sensations en étant réceptif à un agent extérieur
Activité de production	Construire des schémas d'informations ou des objets matériels
Activité sociale	Favoriser des échanges informels entre des participants

Tableau B : Les activités pédagogiques (Paquette, 2002 ; Paquette et Léonard, 2013)²³

Savoirs théoriques	Savoir quoi
Savoirs procéduraux	Savoir comment opérer
Savoir-faire procéduraux	Savoir opérer
Savoirs expérientiels	Savoir y faire
Savoir-faire sociaux	Savoir se comporter
Savoirs cognitifs	Savoir traiter de l'information

Tableau C : les formes de savoirs (Fernagu, 2006)

La méthode active est souvent considérée comme la plus efficace (image A et tableau D), néanmoins le choix de la méthode dépend de ce que l'on cherche à atteindre.

²³ Paquette, G. (2002), *L'ingénierie pédagogique, pour construire l'apprentissage en réseau*, PUQ
<https://eduq.info/xmlui/bitstream/handle/11515/34500/033875-paquette-leonard-modeles-metadonnees-scenarios-pedagogiques-gtn-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Démarches déductives			Démarches inductives	
Expositive	Démonstrative	Interrogative	Expérimentale	Active
Le formateur dispense son cours magistral	Le formateur montre le geste professionnel à acquérir	Le formateur pose des questions pour faire émerger ou construire le savoir	Le formateur aide à la réflexion puis valide en dernier lieu	Le formateur donne des consignes précises et aide à la prise de conscience. Il valide en dernier lieu
L'apprenant est passif, prend des notes, mémorise	L'apprenant est passif, il observe pour reproduire le geste	L'apprenant est plus ou moins actif selon que la question interroge sur la conscientisation ou non	L'apprenant réalise des expériences pour en extraire une connaissance	L'apprenant réalise les tâches données qui l'aide à construire du savoir



Image A: Les méthodes pédagogiques et leur efficacité (adapté de Masson, 2023)²⁴

Avantages de la pédagogie active

- plus d'autonomie de l'élève grâce à une coopération facilitée
- mémorisation facilitée du fait d'une découverte personnelle
- motivation et intérêt plus grand des élèves
- respect du rythme de l'élève
- meilleure réussite du collectif
- développer la socialisation
- démarche qui permet l'évolution, l'adaptation et la généralisation
- acquisition d'une méthode et non d'un savoir
- le maître n'est qu'un catalyseur et intervient sur la forme et non sur le fond

Tableau D : la pédagogie active (adapté de IFCS Laxou, 2008)²⁵

²⁴ <http://formerdemain.over-blog.com/2019/01/le-choix-d-une-methode-pedagogique.html>

²⁵ <https://slideplayer.fr/slide/442490/>



QR Code A : vers les différentes méthodes pédagogiques (Ccampus, 2016)²⁶

Un dispositif pédagogique est porteur de scénarios pédagogiques

Également appelé ruban pédagogique, déroulé pédagogique ou *story-board*, le scénario pédagogique organise le déroulement d'une activité d'apprentissage, la définition des objectifs, la planification des tâches, la description des tâches des apprenants et des modalités d'évaluation. Sont précisés les rôles, les activités ainsi que les ressources et outils associés à la mise en œuvre des activités. Le scénario a donc un triple rôle : il définit précisément l'activité, il spécifie le contrôle qui sera fait de la progression de l'apprenant durant cette activité et détermine enfin l'assistance pédagogique qui lui sera fournie automatiquement en fonction de sa progression.

Il organise le pourquoi (objectifs), le quoi (les contenus), le comment (méthodes, activités) et le pour quoi (évaluation) Il peut prendre la forme d'un escalier pédagogique (image 25).

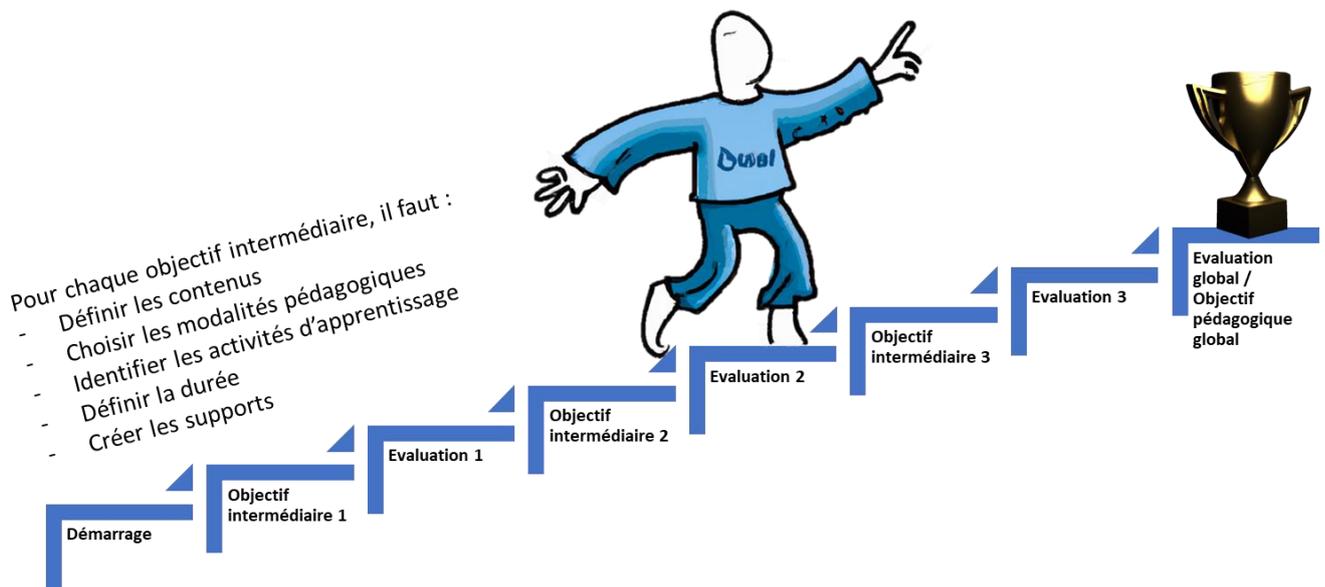


Image 25 : L'escalier pédagogique (adapté de creetaformation.com)

Crédit image : Cette image a été créée avec l'aide de DALL-E 2

²⁶ <https://www.blog-formation-entreprise.fr/pedagogie-participative-active-co-active-inversee-quelles-differences/>

Le story-board raconte le récit du cours (c'est l'histoire qui va être racontée) dans ses moindres détails. Il structure le cours, l'UE, la séquence, le module ou le dispositif de formation. Les Québécois parlent de **scénarimage**.

Il va permettre d'identifier l'ensemble des ressources à mobiliser, les moyens de les mobiliser, le séquençage des objectifs d'apprentissage et leur évaluation, la nature des interactions envisagées, etc.

Le dispositif pédagogique impacte directement l'engagement sociocognitif et socioaffectif des apprenants.

Au final, il importe de se saisir de la spécificité des dispositifs pédagogiques mobilisant des jumeaux numériques en matière de principes et objectifs pédagogiques, situations pédagogiques, méthodes pédagogiques, scénarisation, etc. et de modes d'engagement dans l'apprendre.

Pour aller plus loin

Le story-board de modules e-learning

https://edutechwiki.unige.ch/fr/Storyboard_de_modules_e-learning

Méthodologie de conception de dispositifs FOAD

https://ics.utc.fr/portail_linios/Linios/LINIO_mcfoad/co/mc-foad_web/mc-foad_web.pdf

Le story-board comme modalité pédagogique

<https://www.pedagoform-formation-professionnelle.com/2022/06/utiliser-un-storyboard-comme-modalite-pedagogique-en-formation.html>



FICHE OUTIL 2 : Les modes d'engagement dans l'apprentissage

Les chercheurs qui se sont penchés sur l'engagement en apprentissage s'entendent pour dire qu'il s'agit d'un état et d'un processus où plusieurs dimensions — cognitive (voire sociocognitive), comportementale, émotionnelle et sociale (ou socio-affective) — interagissent entre elles.

Motivation intrinsèque et extrinsèque

L'engagement est relatif à la motivation, elle peut être extrinsèque ou intrinsèque. « En simplifiant, on peut dire que les facteurs de motivation intrinsèques sont propres à l'individu, qu'ils se rapportent à la représentation qu'il se fait de lui-même et de la situation, au plaisir et à la satisfaction qu'il tire d'une activité, alors que les facteurs de motivation extrinsèques se réfèrent au contexte d'apprentissage, aux moyens qui peuvent l'inciter à atteindre un but. Si certains avancent que le moteur de l'engagement et de la réussite de l'apprentissage se trouve dans la motivation intrinsèque, d'autres voient la motivation extrinsèque comme étant tout aussi importantes pour stimuler et soutenir la participation, en particulier en formation en ligne. » (Meilleur, 2022)²⁷. Les travaux sur l'autodétermination (TAD) montrent que ces deux formes de motivation sont extrêmement liées et s'enracinent dans un continuum. Plus l'apprenant se sentira autonome, en lien avec les autres et conscient de ses compétences, plus son sentiment d'autodétermination, de faire des choix par lui-même, sera important (Deci et Ryan, 2012). Ce sentiment d'autodétermination impacte la persévérance dans les parcours d'apprentissage.

Parrish et Wilson (Parrish, 2008) soulignent l'importance de l'acquisition par les étudiants de l'expérience d'apprentissage (LX). Ils ont déclaré que des facteurs internes et externes ont une incidence sur l'acquisition de LX par les étudiants et ont défini six niveaux (Kawamoto et al., 2022) :

- Niveau 1 – un état de non intérêt (pas d'expérience) ;
- Niveau 2 – un état de non concentration sur objectifs (routine insensée);
- Niveau 3 – un état de demi-mesure engagement (activité épars/incomplète);
- Niveau 4 – état des efforts continus dans une direction vers l'avant (routine agréable);
- Niveau 5 – état de planification, de défi efforts (efforts stimulants);
- et niveau 6 – fort intérêt et engagement proactif (esthétique expérience).

La motivation intrinsèque

peut être évaluée au travers d'un ensemble de facteurs tels que la valeur qu'accorde l'apprenant à la tâche, le contrôle qu'il peut exercer sur celle-ci et ses conséquences, son sentiment d'efficacité personnelle, sa perception concernant ses chances de réussite et la qualité du défi que représente pour lui la tâche (Molinari et al., 2016)²⁸.

²⁷ <https://knowledgeone.ca/8-cles-pour-lengagement-en-apprentissage/?lang=fr>

²⁸ Gaëlle Molinari, Bruno Poellhuber, Jean Heutte, Elise Lavoué, Denise Sutter Widmer et Pierre-André Caron, « L'engagement et la persistance dans les dispositifs de formation en ligne : regards croisés », *Distances*

La motivation extrinsèque

peut être soutenue au travers un ensemble d'éléments tels que le processus d'enseignement apprentissage, le rôle du formateur, la qualité de l'expérience et l'environnement pédagogique (Levesque et al., 2006).

Les motifs d'entrée en formation

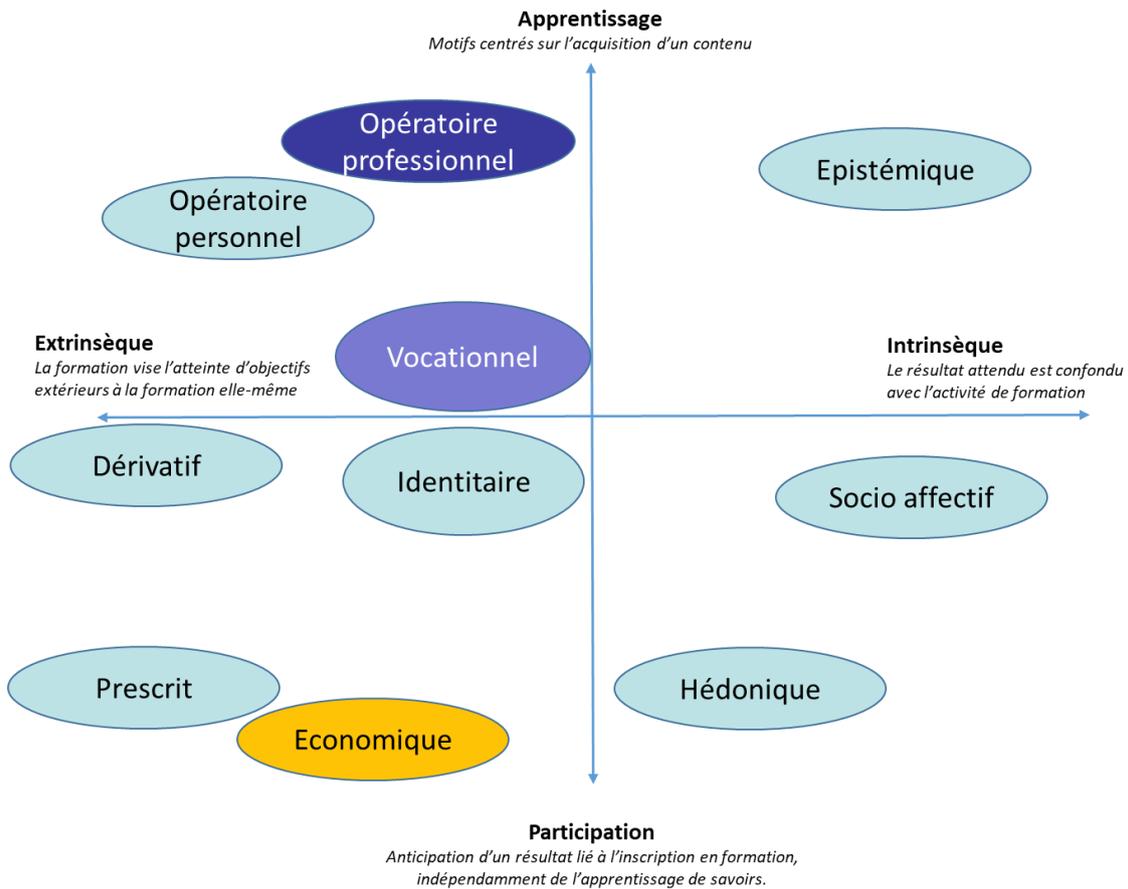


Image A : les motifs d'entrée en formation (adapté de Carré, 2012)

et médiations des savoirs [En ligne], 13 | mars 2016, mis en ligne le 28 mars 2016, consulté le 17 octobre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/dms/1332> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/dms.1332>

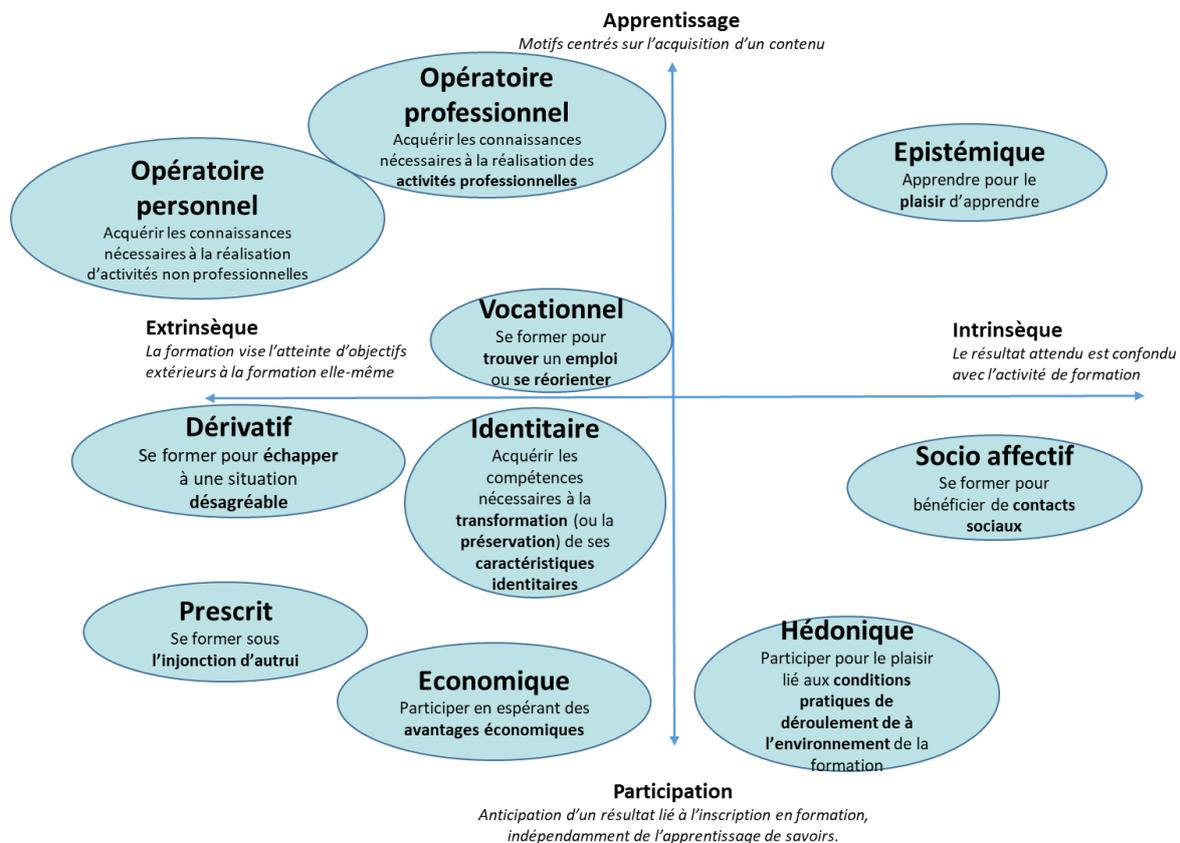


Image B : les motifs d'engagement en formation (adapté de Carré, 2012)

La motivation vs engagement sociocognitif et socio-affectif

Engagement sociocognitif

En éducation et formation, il existe de nombreux neuromythes tels que nous n'utiliserions que 10% de notre cerveau, nous serions plutôt cerveau gauche ou cerveau droit, nous aurions des styles ou des préférences d'apprentissage (visuel, auditif, etc.), etc.

Ce dernier neuromythe hiérarchise l'efficacité des modalités d'apprentissage: on apprendrait 10% de ce que l'on lit, 20% de ce que l'on fait, 30% de ce que l'on voit, etc. Il est nécessaire de tordre le cou à ces croyances pour mesurer à quel point ce n'est pas tant la nature de l'activité qui favorise un résultat d'apprentissage, mais la manière dont on s'engage dans celle-ci : cognitivement et socialement.

L'engagement cognitif et social des apprenants varie d'une situation à l'autre, à la fois dans son intensité et dans son orientation.

Dans leur ouvrage « Usages créatifs du numérique pour l'apprentissage au XXI^e siècle (Romero et al., 2018), Margarida Romero, Benjamin Lille et Azeneth Patiño expliquent que « nous devons distinguer les usages du numérique qui permettent de soutenir la créativité des apprenants des usages du numérique qui placent l'apprenant dans une situation de consommation passive (comme consulter des vidéos éducatives) ou de

consommation interactive (comme des jeux-questionnaires) » (Romero et al., 2016) (cf. image 28). À partir du modèle de Chi et Wylie (2014), on distingue cinq types d'usage du numérique dans l'enseignement, selon l'engagement de l'apprenant : de la consommation passive, la cocréation participative de connaissances orientée vers la compréhension ou la résolution de problèmes partagée par la classe, conçue comme une communauté d'apprentissage (Chi et Wylie, 2014).

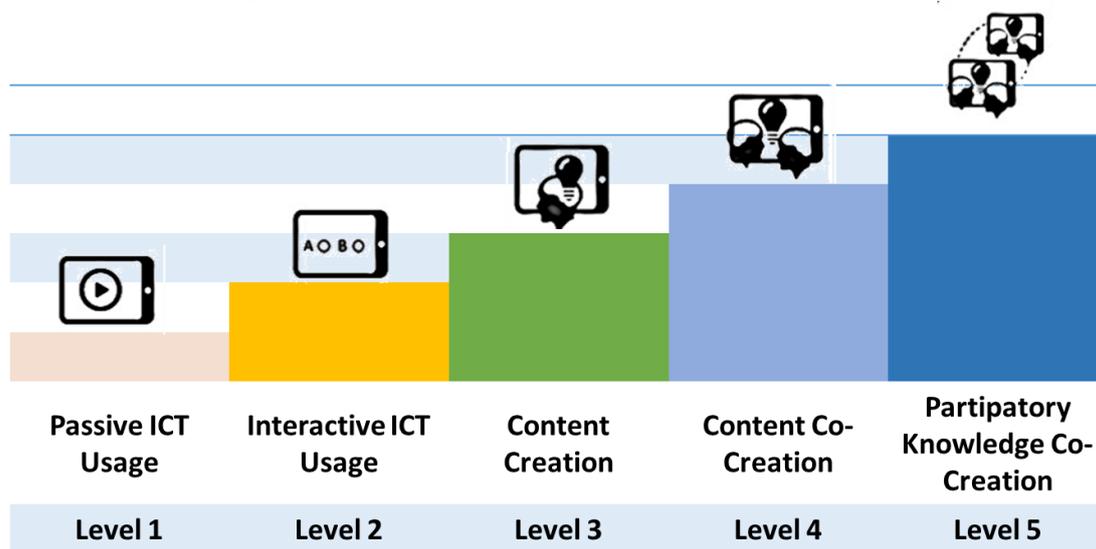


Image C : Type d'usage du numérique selon le niveau d'engagement (adapté de Romero et al., 2016)

On distingue un continuum d'engagement (Chi et Wylie, 2014²⁹ ; Chi et al., 2019³⁰) :

- Passifs : réception et encodage des informations
- Actifs : manipulation des connaissances
- Constructifs : transformer et produire des connaissances
- Interactifs : co-inférence de nouvelles connaissances par le dialogue

Les modes passif et actif facilitent les **apprentissages de surface**, les modes constructif et interactif, les **apprentissages en profondeur** (Kyndt et al., 2009)³¹.

La motivation du point de vue de la théorie sociocognitive

L'implication cognitive et le travail avec autrui tiennent un rôle important dans les processus d'apprentissage.

²⁹ <https://www.louvainlearninglab.blog/apprentissage-actif-engagement-cognitif-icap-michelene-chi/>

³⁰ Chi, M.T.H., Adams, J., Bogusch, E.B., Bruchok, C., Kang, S., Lancaster, M., Levy, R., Li, N., McEldoon, K.L., Stump, G.S., Wylie, R., Xu, D. & Yaghmourian, D.L. (2018). Translating the ICAP theory of cognitive engagement into practice. *Cognitive Science*, 42(6), 1777-1832. <https://doi.org/10.1111/cogs.12626>

³¹ Kyndt, Dochy, Stwruyven, Castellar, 2011

La **théorie sociocognitive**³² est « une psychologie sociale par l'importance accordée aux interactions réciproques qui relient la personne, son comportement et son environnement (...) et une psychologie cognitive, car elle accorde un rôle central aux processus cognitifs, vicariants, autorégulateurs et autoréflexifs dans l'adaptation et le changement humain » (Guerrin, 2012)³³.

En ce sens cette théorie s'appuie sur le **modèle de la causalité triadique** que l'on peut définir comme le résultat de l'interaction dynamique et permanente entre des cognitions, des comportements et des circonstances environnementales (cf. encadré A).

Cette conception de l'apprentissage permet de penser en terme d'apprenant acteur, d'apprenant agentique. La notion d'**agentivité** désigne « cette capacité humaine à influencer intentionnellement sur le cours de sa vie et de ses actions » (Carré, 2004)³⁴.

Encadré A : le modèle de la causalité triadique (Guerrin, 2012):

- Les facteurs internes à la personne (P) concernent les événements vécus aux plans cognitif, affectif, biologique et leurs perceptions par le sujet ; en particulier les conceptions d'efficacité ou de compétence, les buts cognitifs, le type d'analyse et les réactions affectives vis-à-vis de soi-même.
- Les déterminants du comportement (C) décrivent les patterns d'action effectivement réalisée et les schémas comportementaux.
- Le déterminant environnemental (E) représente les propriétés de l'environnement social et organisationnel, les contraintes qu'il impose, les stimulations qu'il offre et les réactions qu'il entraîne sur les comportements.

Plus l'agentivité sera grande, plus le sentiment d'efficacité personnel (SEP) sera important, c'est-à-dire la croyance en soi et en ses capacités d'action. « *L'efficacité personnelle perçue concerne la croyance des gens dans leurs capacités à agir de façon à maîtriser les événements qui affectent leurs existences. Les croyances d'efficacité forment le fondement de l'agentivité humaine* » (Bandura, 2003³⁵). Le SEP résulte du regard porté sur soi au regard de l'environnement (physique, humain) dans lequel on se trouve. « *Si les gens ne sont pas convaincus qu'ils peuvent obtenir les résultats qu'ils souhaitent grâce à leur propre action, ils auront peu de raison d'agir ou de persévérer face aux difficultés et donc peu de chance d'atteindre le but qu'ils s'étaient fixés. Inversement, si les gens ont une perception élevée de leur capacité à réaliser l'objectif visé, ils vont tout mettre en œuvre pour y arriver. Et de fait, leur SEP va contribuer fortement à leurs performances même si leurs aptitudes initiales jouent un rôle indéniable* » (Alfonso, 2019)³⁶. Le rôle des expériences vécues et observées, qu'elles soient cognitives ou/et émotionnelles, participe à la construction du SEP.

³² BANDURA A., « L'apprentissage social » Mardaga, 1985 p 37, 122-123, 149-150

³³ Guerrin, B. (2012). Albert Bandura et son œuvre. *Recherche en soins infirmiers*, 108, 106-116. <https://doi.org/10.3917/rsi.108.0106>

³⁴ Carré, P (2004), Bandura : une psychologie pour le XXIe siècle ? », SAVOIRS n°5, Hors-série

³⁵ Bandura, A. (1985) **Auto-efficacité. Le sentiment d'efficacité personnelle**, Éditions De Boeck Université, 2003

³⁶ <http://memorandum-ipfa13.wifeo.com/documents/A.Bandura-synthese.pdf>

Les actions du formateur en matière d'étayage, d'encouragement, sont ici déterminantes, car le SEP influence la manière dont on réfléchit et dont on prend des décisions, impacte la dépense et la persistance des efforts face aux difficultés, sa capacité de résilience face aux situations de stress, et sa motivation (attentes de réussite, buts, etc.). On peut également parler de SEC : sentiment d'efficacité collective³⁷, notion incontournable face à l'explosion des pédagogies mobilisant les travaux de groupes.

Ainsi, le sociocognitivism s'intéresse aux phénomènes mentaux et aux processus cognitifs (et affectifs à connotation cognitive) à l'aide desquels une personne interagit avec son environnement et qui facilitent son apprentissage. « *Sans nier la dimension personnelle de l'apprentissage, il (le sociocognitivism) manifeste un intérêt particulier pour le caractère éminemment social et contextualisé de l'apprentissage et de la cognition* » (Jonnaert et M'Batika, 2004)³⁸. Ces interactions facilitent la mémorisation, l'appropriation et le transfert des apprentissages.

Au final, il importe de mieux se saisir de la spécificité des interactions environnement-individus et de la manière dont elles influencent les expériences d'apprentissage avec les jumeaux numériques. Il importe de se saisir des conditions favorables à ces interactions, à leur nature et à leurs effets.

Engagement socioaffectif, socio-émotionnel : émotions et apprentissage

Dans tout processus d'apprentissage, surgissent des émotions à la fois positives et négatives qui peuvent être des leviers ou des freins pour l'apprentissage qui conduisent, ou non, l'apprenant à persister dans ses apprentissages. « *Dans l'histoire, les définitions (des émotions) ont été nombreuses et elles ont mis l'accent sur les différents aspects de l'émotion comme ses dimensions corporelle, personnelle, sociale et cognitive. Ces définitions ont lié nos émotions à notre bien-être, nos ressentis, nos interactions sociales, nos réactions physiologiques, nos décisions, nos pensées ou nos actions* » (Denervaud et al., 2017)³⁹. Nos émotions façonnent « *un prisme modulant notre perception du monde et conditionnent directement notre compréhension et nos interactions avec l'environnement* » (Gobin, 2021)⁴⁰. En ce sens notre **intelligence émotionnelle** reflète notre capacité à s'adapter au monde.

L'ensemble des recherches sur les émotions dans l'apprentissage (intérêt, surprise, plaisir, joie, espoir, fierté, soulagement, frustration, ennui, anxiété, découragement, etc.) témoigne du fait que les émotions soutiennent l'attention, la mémoire de travail, l'encodage, la consolidation en mémoire ou encore les processus liés au contrôle exécutif, et peuvent donc tout à la fois faciliter ou inhiber le processus

³⁷ « Le sentiment d'efficacité collective de l'organisation collective concerne la capacité de performance d'une organisation sociale perçue comme un tout, elle va affecter le sentiment de mission et de projet d'une organisation, l'intensité d'implication collective dans ce qui est nécessaire pour réussir, le niveau de qualité du travail en commun pour produire des résultats et la résilience du groupe face aux difficultés. » (Hodges et Carron, 1992). HODGES & CARRON., "Collective efficacy and group performance" International journal of Sport Psychology, 1992

³⁸

https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=UCdnLjWkstgC&oi=fnd&pg=PA13&dq=sociocognitivism+d%C3%A9finition&ots=-CLhe6quiO&sig=17KA21NgRdBXsU243gyw8sl_NJO&redir_esc=y#v=onepage&q=sociocognitivism%20d%C3%A9finition&f=false

³⁹ https://csp.ch/bausteine.net/f/51752/Denervaud_Franchini_Gentaz_Sander_170420.pdf

⁴⁰ Gobin, P. (2021), Développement des compétences émotionnelles, in Gobin et al., *Emotions et apprentissage*, Paris : Dunod

d'apprentissage (Sander, 2013)⁴¹. Une émotion négative ne représente pas de manière systématique un frein à l'apprentissage (l'anxiété peut conduire à redoubler d'efforts), tout comme une émotion positive ne représente pas de manière systématique un levier à l'apprentissage (trop d'assurance peut affecter l'attention). Il reste important pour les formateurs de déceler ces émotions pour fournir les états indispensables à la poursuite des apprentissages (tutorat, réassurance, guidage, étayage, etc.) et à se rendre attentifs à leurs propres états émotionnels (phénomène de contagion).

Pour aller plus loin :

Denervaud, S., Franchini, M., Gentaz, E., Sander, D. (2017), *Les émotions au cœur des processus d'apprentissage*, Revue Suisse de pédagogie spécialisée, n°4

https://csps.ch/bausteine.net/f/51752/Denervaud_Franchini_Gentaz_Sander_170420.pdf

L'environnement pédagogique peut donc sous certaines conditions favoriser le développement de « **compétences émotionnelles** » favorables aux apprentissages et vont conduire l'apprenant à s'adapter du mieux qu'il peut aux environnements qu'il traverse (physiques, virtuels ou mixte).

Travailler sur l'apparition des émotions, et sur la manière dont elles peuvent contribuer efficacement au processus d'apprentissage est important (Gobin et al., 2021)⁴²: stimuler l'intérêt et le plaisir pour les tâches à réaliser, rebondir sur les erreurs comme source d'apprentissage et non de sanction, proposer des activités concrètes pour favoriser l'engagement, susciter les échanges, varier les outils et méthodes pédagogiques, stimuler l'entraînement et les renforcements positifs... Pour cela, il importe de repérer dans les comportements des apprenants des états physiques qui se modifient, des expressions faciales qui ne sont pas forcément verbales (grimace, froncement de sourcils, regard inquiet, etc.) ou prosodiques (intonation, débit, timbre de la voix par exemple).

La mémorisation, l'appropriation et le transfert des apprentissages sont en partie déterminés par nos émotions.

Au final, il importe de mieux se saisir de la spécificité des émotions liés à l'usage des jumeaux numériques et à la manière dont elles conditionnent l'apprentissage et l'expérience d'apprentissage.

Pour aller plus loin

Motivation et formation des adultes

<https://www.cairn.info/revue-savoirs-2011-1-page-9.htm>

https://edutechwiki.unige.ch/fr/Motivation_en_formation_d%27adultes

Carré, P., Fenouillet, F. (2019), *Traité de psychologie de la motivation*, Dunod

⁴¹ Sander, D. (2013). Models of emotion: the affective neuroscience approach. In J. L. Armony & P. Vuilleumier (Eds.), *The Cambridge Handbook of Human Affective Neuroscience* (pp. 5-53). Cambridge: Cambridge University Press

⁴² <https://www.dunod.com/sciences-humaines-et-sociales/emotions-et-apprentissages>



FICHE OUTIL 3 : les voies de l'immersion

La Réalité Virtuelle (VR)

Elle permet d'être immergé dans un environnement virtuel créé de toute pièce en 3D ou à partir de prises de vues réelles à 360°. Il est nécessaire d'être équipé d'un casque de Réalité Virtuelle ou d'un smartphone équipé d'un adaptateur VR de type carboard pour être en immersion. Il est possible de tourner la tête à 360° autour de soi, de se déplacer dans l'espace et d'interagir avec l'environnement grâce à des manettes. « La réalité virtuelle permet d'être complètement immergé dans un nouveau monde dans lequel on ne voit plus du tout la réalité, les repères n'existent plus, l'utilisateur est complètement immergé dans une autre réalité et son sens de la vision est altéré. Avec ce type de **réalité alternative**, vous êtes capable d'effectuer des actions impossibles dans la réalité. Les lois de la physique peuvent ne plus s'appliquer ou inversement, être complètement réalistes. Vous pouvez voyager dans un monde qui n'existe pas. Visualiser des objets ou explorer des bâtiments qui vont exister dans le futur. Vous pouvez visiter des endroits détruits par le cours de l'histoire ou qui sont complètement imaginaires ! »⁴³.

La Réalité Augmentée (AR)

Elle superpose des éléments virtuels 3D ou 2D sur un environnement réel. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'une interface digitale : smartphone, tablette. La Réalité Augmentée perçue grâce à des lunettes de Réalité Augmentée est plutôt appelée MR ou Réalité Mixte. L'utilisateur voit toujours le monde réel.

La Réalité mixte (MR)

Elle englobe les dispositifs qui permettent une interaction entre le monde virtuel et le monde réel, entre Réalité Virtuelle et Réalité Augmentée. Pour expérimenter la MR, il est nécessaire de disposer d'un casque de Réalité Augmentée de type HoloLens ou Magic Leap. Avec ces dispositifs, la position de l'utilisateur est calculée en temps réel et il est possible d'interagir physiquement avec les éléments virtuels par des gestes ou des manettes. L'utilisateur n'est pas coupé du monde réel. « La différence majeure entre la **réalité mixte (MR ou Mixed Reality)** et la réalité augmentée est le fait que la réalité mixte comprend l'environnement dans lequel on travaille. Ainsi, dans la réalité mixte il est tout à fait possible d'incruster des **éléments virtuels dans le réel**. Vous pouvez donc poser sur une table votre prochain achat, un vase par exemple, ou quelque chose de moins terre à terre comme un Pokémon. Par abus de langage les gens parlent de la réalité mixte comme étant de la réalité augmentée »⁴⁴.

La Réalité étendue (XR)

Elle regroupe les diverses formes de réalité immersives, comme la réalité augmentée (AR), la réalité mixte (MR) ou la réalité virtuelle (VR).

⁴³ <https://positivethinking.tech/fr/insights-fr/xr-vr-ar-mr-definition-of-these-different-terms-and-how-to-use-them/>

⁴⁴ <https://positivethinking.tech/fr/insights-fr/xr-vr-ar-mr-definition-of-these-different-terms-and-how-to-use-them/>

La réalité virtuelle, augmentée et mixte présentent des différences fondamentales. Le nombre de produits disponibles augmente sans cesse et les avancées technologiques permettent une forte croissance des usages et applications dans des secteurs de plus en plus nombreux.

On retient⁴⁵ que pour la :

- Réalité virtuelle (VR) : le contenu 100% numérique est consommé en immersion totale via un casque de réalité virtuelle.
- Réalité augmentée (AR) : la réalité augmentée superpose du contenu numérique au monde réel (objets ou éléments virtuels, informations, ...).
- Réalité mixte (MR) : la réalité mixte incorpore du contenu numérique (objets ou éléments virtuels) au monde réel en permettant à ces éléments d'interagir avec l'environnement.

La Vidéo 360° est un format vidéo immersif où l'utilisateur choisi l'endroit où il regarde dans l'espace, définis par une sphère autour de lui. Pour filmer l'environnement à 360°, il faut utiliser une caméra spécifique appelée caméra 360

L'immersion pédagogique et ses enjeux

Apprentissage des risques et comportements de sécurité

La réalité virtuelle est souvent utilisée pour réaliser des apprentissages de comportements de sécurité (Grassini & Laumann, 2020) (cf. image A). De manière évidente, réaliser ces apprentissages avec un simulateur numérique plutôt qu'en situation réelle permet de laisser les apprenants aller jusqu'à l'accident sans prendre de risque. La réalité virtuelle permet de vivre l'accident de manière plus réaliste qu'un dispositif non immersif, ce qui va laisser une trace mnésique plus robuste, du fait de la suractivation de la mémoire épisodique associée aux émotions (Cadet & Chainay, 2020). Les utilisateurs disent souvent que l'expérience est plus « marquante », plus « impactante », ce qui renvoie précisément au fonctionnement de la mémoire épisodique.

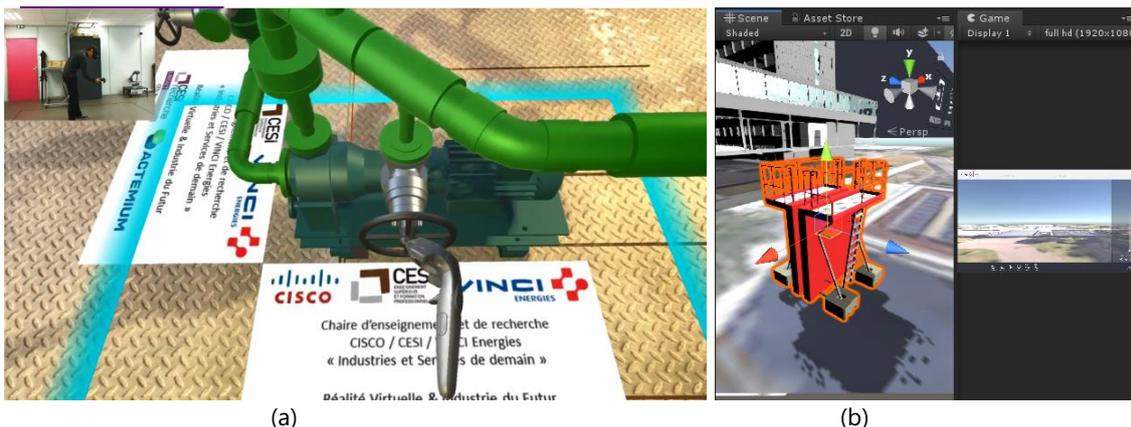


Image A : Sécurité et découverte d'environnement industriel (a) Chaire CISCO/CESI/Vinci Energies (b) (Schiavi et al., 2022)

⁴⁵ <https://www.aniwaa.fr/guide/vr-ar/vr-ar-mr-guide-ultime/>

La représentation d'agents virtuels

Dans une étude de George, Spitzer et Hussmann (2018), les participants devaient mémoriser des séquences d'allumage de formes disposées devant eux, soit sans enseignant représenté, soit avec un avatar pointant les formes, soit avec un enseignant visible à la webcam. Les résultats indiquent que la webcam et l'avatar augmentent le sentiment de présence sociale des participants, tout en diminuant leur performance de mémorisation des séquences. En effet, dans ce cas de figure, la représentation visuelle de l'enseignant constitue une interférence, une information concurrente, inutile à la tâche et donc potentiellement gênante. Lors de la conception d'un outil de simulation immersif, le choix de faire apparaître l'enseignant dans la scène (par exemple sous la forme d'un avatar) devrait être arbitrée en fonction de la tâche précise. Si la tâche nécessite de la présence sociale (apprendre à parler en public, à conduire une réunion, etc), alors il est préférable de représenter les personnages de manière réaliste. À l'inverse, si la tâche nécessite de la concentration, mais pas de présence sociale (appliquer une procédure de montage d'un dispositif technique, etc), alors il est préférable de ne pas représenter de personnage pour ne pas interférer avec le fonctionnement cognitif de l'apprenant. Ainsi, l'apprentissage de postures en réalité virtuelle est par exemple mieux réalisé à partir d'un schéma simplifié du corps qu'avec un agent virtuel réaliste comme modèle, tout comme l'apprentissage d'un labyrinthe, plus facile en suivant un objet simple et abstrait qu'un personnage réaliste (Lee et al., 2019). Il semble donc que pour des apprentissages de procédures techniques, la représentation d'agents virtuels réalistes soit plutôt à éviter, car cela viendrait interférer avec l'apprentissage.

La précision de la simulation des actions motrices

L'apprentissage de procédures techniques peut être réalisé en réalité virtuelle parce que ce média permet l'utilisation de gestes relativement réalistes comme moyen d'interactions. Le sous-entendu est que l'on apprendrait mieux une procédure technique si on la réalise avec les vrais gestes que si on la réalise avec une interface qui modifie complètement le geste, comme un clavier et une souris par exemple. Ce point doit tout de même être nuancé. Dans de nombreux cas, les apprentissages techniques sont mis en œuvres à travers des gestes, mais ce qui doit être appris n'est pas le geste en lui-même, mais l'ordre des actions à réaliser, sans qu'il n'y ait la moindre difficulté dans la mise en œuvre des gestes. Par exemple, si une des étapes de la procédure est d'enlever des vis sur une pièce mécanique, l'objectif n'est vraisemblablement pas d'apprendre à utiliser un tournevis, mais de retenir qu'à ce moment-là de la procédure, il faut enlever les vis. Dans d'autres cas, l'apprentissage porte véritable sur le geste, comme lorsqu'on apprend à jouer d'un instrument de musique, ou pour une formation en chirurgie par exemple. Une application de réalité virtuelle basée uniquement sur un casque et des manettes ne permettrait alors pas d'avoir la finesse requise pour le geste. Dans ce cas de figure, il est important de retranscrire la matérialité de l'objet en retranscrivant les sensations tactiles à l'utilisateur, le poids de l'objet et/ou sa résistance (Lelevé, McDaniel & Rossa, 2020). (cf. image B).

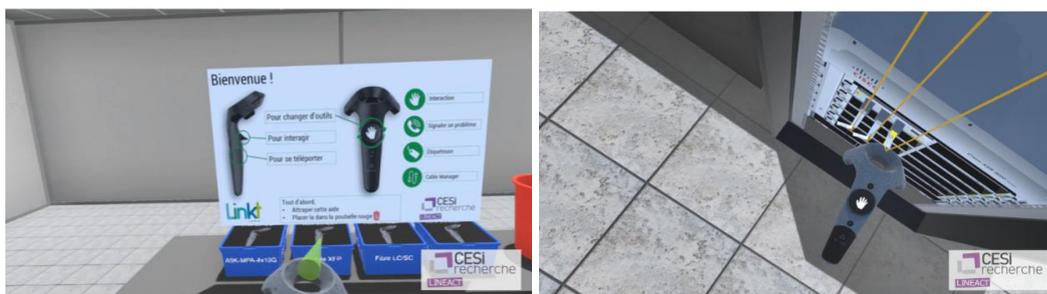


Image B ! Formation des opérateurs aux bonnes pratiques de câblage réseaux en réalité virtuelle (Richard et al., 2018)

Apprentissage de soft-skills

L'apprentissage de *soft-skills* nécessite souvent des mises en situation. Par exemple, si un enseignant peut expliquer à des élèves des techniques pour bien s'exprimer en public, l'entraînement nécessite un public qui aura les réactions appropriées par rapport aux situations réelles auxquelles on souhaite s'entraîner. Des mises en situation réelles, avec des vrais individus, des comédiens, peuvent être extrêmement coûteuses en temps et en argent.

L'usage de l'outil numérique permet de paramétrer une séquence comme l'enseignant ou l'apprenant le souhaite, mais cela permet aussi potentiellement aux apprenants de s'entraîner autant qu'ils le souhaitent puisqu'ils ne mobilisent personne pendant ce temps. Enfin, l'outil numérique permet de standardiser les mises en situation si on le souhaite, par exemple pour déployer une même formation sur plusieurs sites. Pour toutes ces raisons, de nombreux logiciels ont été développés pour l'entraînement des *soft-skills* des étudiants (Tadimetri, 2014 ; Garcia, Pacheco, Méndez & Calvo-Manzano, 2020). Toutefois, les entraînements ayant une dimension relationnelle reposent en partie sur des réactions émotionnelles ressenties par l'apprenant. Par exemple, dans une situation d'entretien d'embauche, un participant peut-être intimidé par son interlocuteur et cela a un impact sur son comportement. S'entraîner sur un logiciel devant un écran ne permet pas de restituer cet aspect émotionnel, car la situation est vécue comme étant artificiel.

Face à des avatars en réalité virtuelle, les réponses émotionnelles des individus, notamment en termes d'anxiété, sont similaires à celles mesurées en situations réelles, notamment les réponses à des feedbacks négatifs de l'audience (Pertaub, Slater & Barker, 2001). Du fait de cette propriété liée à l'immersion, la réalité virtuelle est un média efficace pour former à s'exprimer en public ou pour différentes activités en lien avec les relations interpersonnelles. De nombreuses applications existent pour ces usages, permettant de paramétrer différents contextes (réunion, conférence, etc) et réactions de l'audience (e.g. Harris & Kemmerling ; Takac et al., 2019).

Apprentissage de concepts et de savoirs déclaratifs

L'intérêt des technologies immersives pour l'apprentissage de contenus déclaratifs et de concepts apparaît moins évident que pour les autres catégories d'apprentissage mentionnées juste avant. Les technologies immersives sont utiles là où donner un sentiment de présence à l'utilisateur est utile. Lorsque ce n'est pas le cas, on trouve souvent des effets très mitigés de la réalité virtuelle sur l'apprentissage.

Parong et Mayer (2018) ont comparé un cours de biologie concernant le système sanguin en réalité virtuelle à un cours contrôle sous la forme d'un simple diaporama. Dans ce cas, la présence, donc le fait de donner l'impression aux apprenants qu'ils voyagent dans le système veineux et se trouvent par exemple devant une mitochondrie géante pendant des explications sonores sur son fonctionnement. Cette étude montre des effets négatifs de la réalité virtuelle sur l'apprentissage dans ce cas. Une autre expérience de Parong et Mayer (2021) portant cette fois sur un cours d'histoire montre là encore des résultats négatifs de la réalité virtuelle sur l'apprentissage en comparaison à une vidéo non immersive montrant un contenu équivalent. Makransky, Andreasen, Baceviciute et Mayer (2020) trouve des résultats à peu près similaires dans un cours portant sur du contenu déclaratif concernant l'ADN, en comparaison avec une vidéo. Les auteurs concluent que dans ce type d'apprentissage, la réalité virtuelle permet d'augmenter l'attractivité du cours (ce résultat est présent dans la plupart des études), mais n'augmente pas, voire souvent diminue la mémorisation et la compréhension des contenus. Une des raisons évoquée est que le caractère ludique de la réalité virtuelle peut être contre-productive pour l'apprentissage, en distrayant les apprenants des processus cognitifs indispensables à l'apprentissage de contenus déclaratifs (sélection des informations, organisation, intégration aux connaissances préalables). L'apprentissage déclaratif est une activité en elle-même et un média adapté à cet apprentissage est celui qui permet de présenter le contenu d'une manière qui permet le mieux de sélectionner les informations (donc avec le moins d'interférence possible, et une forme de guidage

attentionnel) et d'en faciliter l'organisation en mémoire. La réalité virtuelle, telle qu'elle est utilisée habituellement, n'est pas la plus adaptée pour éviter les interférences parce que l'utilisateur peut explorer l'environnement à 360° alors que le contenu « à apprendre » est généralement localisé à un endroit précis. Dans ce cas, un écran qui focalise sur le contenu de l'apprentissage réduit les interférences cognitives. De même, l'apprentissage est favorisé par une segmentation cohérente et marquée du contenu pour faciliter l'organisation en mémoire des informations. C'est ce que les enseignants font le plus souvent avec les diaporamas structurés en parties et sous-parties explicitement représentées. Les concepteurs d'applications en réalité virtuelle ont tendance au contraire à réaliser des expériences réalistes et continues, ressemblant aux situations réelles, mais qui demandent plus d'efforts aux apprenants pour l'organisation des informations. Ainsi, on peut imaginer des applications de réalité virtuelle qui respecteraient totalement les principes de « design instructionnel » pour l'apprentissage de contenus déclaratifs. Dans ce cas, on peut s'attendre à une efficacité pédagogique de bon niveau, mais ce point n'est pas complètement clair dans la littérature scientifique à ce jour. Aussi, il apparaît que les apprentissages déclaratifs ne sont pas ceux pour lesquels nous préconisons l'usage des technologies immersives à ce jour. Cette conclusion peut toutefois être nuancée. Dans certains cas, l'attractivité d'un cours est si faible que l'augmenter peut constituer en soi un objectif légitime, même si cela ne constitue pas nécessairement un levier d'amélioration de la compréhension des contenus. Par exemple, les cours d'anatomie dans les formations médicales sont souvent considérés comme un prérequis indispensable par les professeurs et comme un contenu comme très ennuyeux par les étudiants parce que cela consiste à mémoriser des masses importantes d'informations (noms d'organes, d'os, de muscles, etc). Dans ce cas de figure, augmenter l'attractivité par de la réalité virtuelle ne réduirait pas forcément le temps d'apprentissage nécessaire (notion d'efficacité pédagogique), mais pourrait générer plus de persévérance dans les révisions des étudiants (Stephan et al., 2017).

Pour aller plus loin

- Burkhardt, J. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le travail humain*, 66, 65-91. <https://doi.org/10.3917/th.661.0065>
- Peraya, D. (2018). Technologies, innovations et niveaux de changement : Les technologies peuvent-elles modifier la forme universitaire ? *Distances et Médiations des savoirs*, 21, 1-19.
- Zahabi, M., Abdul Razak, A. M. (2020). Adaptative virtual reality-based training : A systematic literature review and framework. *Virtual Reality*, 24, 725-752. <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00434-w>
- Zhou, H., Fujimoto, Y., Kanbara, M., Kato, H. (2021). Virtual Reality as a Reflection Technique for Public Speaking Training. *Applied Sciences*, 11(3899), 1-18. <https://doi.org/10.3390/app11093988>



FICHE OUTIL 4 : ADDIE

Quelles méthodes pour construire des scénarios pédagogiques ?

Deux méthodes sont particulièrement utilisées dans le domaine de l'ingénierie pédagogique :
les méthodes ADDIE et MISA.

La méthode **ADDIE**

(Analysis-Design-Development-Implementation-Evaluation) (QR code A et image A)

C'est la méthode la plus couramment utilisée. Elle permet d'orchestrer le processus de mise en place d'un design pédagogique ou de conception pédagogique (Basque, 2004).



QR code A : vers la méthode ADDIE (Edutechwiki, 2023)⁴⁶



Image A : le modèle ADDIE (adapté de Orey, Jones et Branch, 2012, in Lepage et al., 2015)⁴⁷

⁴⁶ <https://edutechwiki.unige.ch/fr/ADDIE>

⁴⁷ Mario Lepage, Louise Sauvé, Patrick Plante et Lise Renaud (2015), Analyse des besoins sur l'utilisation des outils Web 2.0., *Nouveaux c@hiers de la recherche en éducation*, vol. 18, n° 1, p. 87-113

Le modèle ADDIE se décompose en plusieurs phases⁴⁸ :

Analyse

Cette phase consiste à analyser un certain nombre de composantes qui servent à orienter le projet de développement du système d'apprentissage : les besoins de formation, les caractéristiques de la clientèle cible, le contexte dans lequel s'insérera la formation, les ressources existantes pouvant être utilisées ou adaptées pour le système d'apprentissage, etc.

Il s'agit :

- d'analyser les besoins de formation (cf. image 3)
- de formuler les objectifs généraux du dispositif de formation. Exemple : *à la fin de ce cours, l'apprenant sera en mesure de ... pourra... : c'est l'objectif de changement attendu*
- de repérer les caractéristiques des apprenants (ex : les connaissances, l'âge, l'accès aux technologies, etc.)

L'analyse des besoins peut se définir comme une étape qui « consiste donc à cueillir, à analyser et à comparer des données concrètes (mesurables) représentant, d'une part, le rendement actuel d'un système (objectifs, extrants ou variables d'action) et, d'autre part, son «rendement» désirable, tel que souhaité à l'interne ou à l'externe, et dans le but de cerner avec le maximum de précision les besoins spécifiques des clientèles touchées par les activités d'un système d'enseignement ou de formation ». (Lapointe, 1995 in Lepage et al., 2015). Il s'agit au final de mesurer l'écart entre l'état actuel des connaissances ou compétences des apprenants et l'état visé de celles-ci (cf. image B).



Image B : le but de l'analyse des besoins

Design (ou Conception)

Cette phase vise à spécifier les objectifs d'apprentissage, à développer la stratégie pédagogique et à sélectionner les médias d'apprentissage, et, le cas échéant, à élaborer des devis médiatiques (pouvant prendre la forme, dans certains cas, de maquettes ou de prototypes) des différents éléments composant le matériel pédagogique inclus dans le système d'apprentissage. Au cours de cette phase, on distingue deux niveaux d'intervention : d'une part, le macro-design, qui consiste à faire le design de l'architecture globale du système d'apprentissage, puis le micro-design, qui consiste à faire le design de chacune des différentes composantes du système d'apprentissage.

- de formuler les objectifs d'apprentissage qui vont permettre d'atteindre l'objectif général (cf. image C)
- de séquencer le dispositifs en fonction des objectifs à atteindre
- de sélectionner les outils, les méthodes, le matériel nécessaires à l'atteinte des objectifs : on pourra réaliser un **escalier pédagogique**

⁴⁸ <https://edutechwiki.unige.ch/fr/ADDIE>

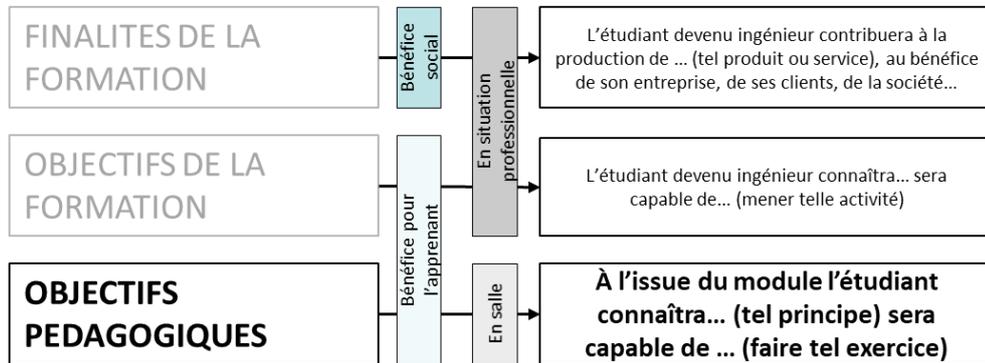


Image C : Formuler des objectifs pédagogiques (ou d'apprentissage)
(adapté de Pédagothèque des ponts, 2023)⁴⁹

Tout objectif pédagogique se formule à partir de verbes d'action (énumérer, identifier, classer, organiser, réaliser, etc.) à l'infinitif et fait référence à un comportement observable et donc évaluable. Il intègre une cohérence d'ensemble (cf. image D et encadré A).

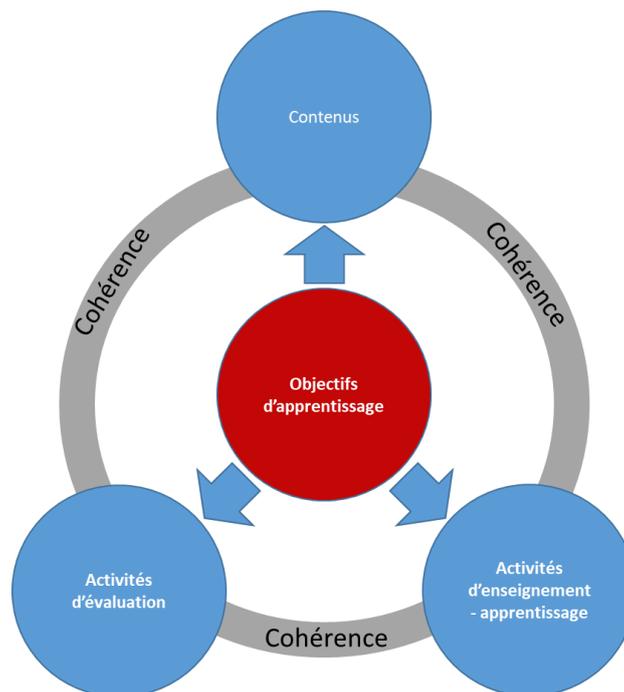


Image D : la cohérence d'un objectif d'apprentissage (adapté de Université de Laval, 2023)⁵⁰

⁴⁹ <https://pedagotheque.enpc.fr/2016/04/07/formuler-son-objectif-pedagogique/>

⁵⁰ <https://www.enseigner.ulaval.ca/ressources-pedagogiques/les-objectifs-d-apprentissage>

Exemple :

Dans le cadre d'un cours de 1er cycle en physique (Astronomie) :

Obj. gén. - L'étudiante ou l'étudiant sera en mesure de comprendre le fonctionnement et l'évolution des étoiles.

Obj. spéc. - L'étudiante ou l'étudiant sera en mesure d'expliquer la nucléosynthèse des éléments dans les étoiles

Encadré A : exemple de formulation d'objectifs (Université de Laval, 2023)

On peut trouver des objectifs d'apprentissage cognitif, psychomoteur ou socioaffectif.

Les verbes utilisés dans la rédaction des objectifs pédagogiques ou spécifiques sont des verbes d'action qui permettent d'observer (directement ou indirectement) et d'évaluer la performance en cause avec un plus grand niveau de précision.

Développement (ou Production ou Réalisation)

Cette phase consiste à mettre en forme le système d'apprentissage, à l'aide de divers outils (papier, crayon, appareil photographique, caméscope, caméra télé, traitement de texte, éditeur graphique, logiciel de programmation, etc.). (exemple, cf. tableau A)

Il s'agit :

- d'organiser la cohérence d'ensemble
- de développer les supports et de les intégrer dans le système de formation

N° de cours / date	Objectifs d'apprentissage généraux	Objectifs d'apprentissage spécifiques	Activités pédagogiques : individuelles (I), en équipe (E), classe (C)	Evaluation
3 10 sept.	Utiliser des méthodes d'autoapprentissage facilitant le renouvellement continu de connaissances et de compétences	3.1 Choisir divers moyens de mettre en relation les principaux concepts, d'un objet d'étude, par exemple un organisateur graphique.	Schématisation (atelier théorique) (E et I)	CLIC (17 octobre) Déposer les quatre schémas de groupe dans la boîte à dépôt en indiquant celui qui doit être corrigé (7 points)
4 15 sept.			Présentation du contenu associé (C)	
			Pratique examen sur CLIC (I)	Examen (final)
			Vérification accès modules SAEE	

Tableau A : exemple de développement (Université Laval, 2023)

Implantation (ou Diffusion)

Cette phase consiste à rendre le système d'apprentissage disponible aux étudiants, ce qui nécessite la mise en place d'une infrastructure organisationnelle et technologique. Dans le cas d'un cours donné en classe, c'est le moment où le professeur fait sa prestation.

Évaluation

Cette phase consiste à évaluer le système d'apprentissage afin de porter un jugement sur sa qualité et son efficacité et, dans le cas d'une évaluation sommative, sur le maintien ou non de la diffusion du système d'apprentissage. Des évaluations formatives des différentes composantes du système d'apprentissage peuvent également être faites à différentes phases du processus de design pédagogique, et non uniquement à la fin du processus.

Il s'agit :

- d'organiser et de choisir les modalités d'évaluation en lien avec les objectifs d'apprentissage
- de sélectionner une ou plusieurs modalités d'apprentissage : sommative, formative, certificative, etc (cf image E).

Parfois, on rencontre ce modèle ADDIE augmenté d'une ou deux phases. Il s'appelle alors ADDIEM ou PADDIE+M. Le "M" ajouté correspond à une phase de maintenance, qui cherche notamment à améliorer les outils et les ressources qui ont été utilisés pendant la formation. Le "P" placé en début du PADDIE+M est quant à lui une phase de planning, qui permet de fixer un cadre temporel bien défini au projet (Openclassroom, 2022)⁵¹.

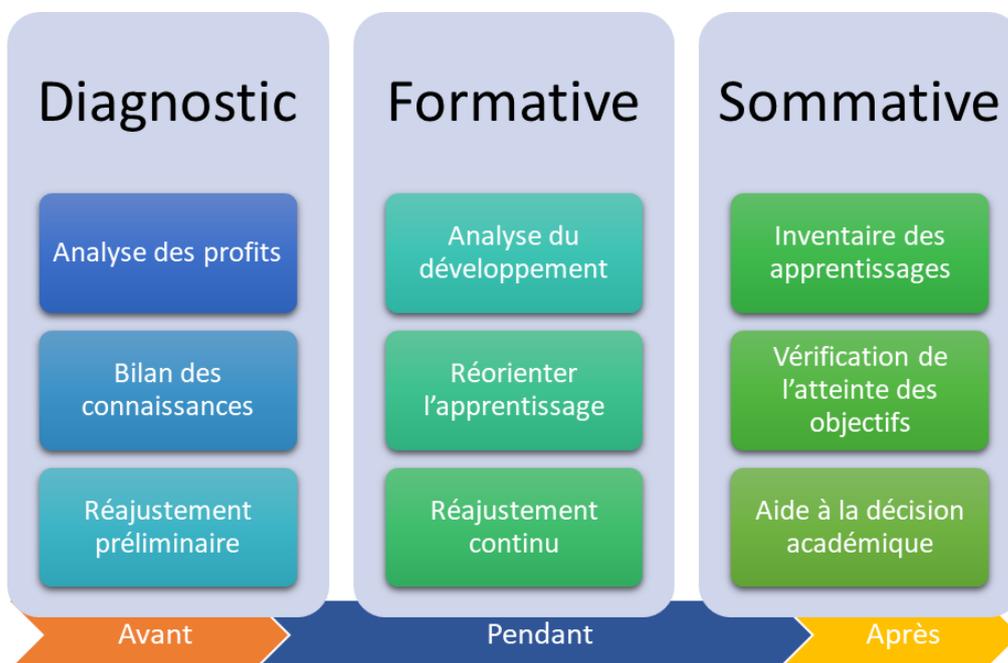


Image E : les formes d'évaluation (adapté de UQAM, 2023)⁵²

⁵¹ <https://openclassrooms.com/fr/courses/5140556-gerez-un-projet-dingenierie-pedagogique/5234176-decouvrez-le-modele-addie>

⁵² <https://enseigner.uqam.ca/evaluer/fonctions/>

L'évaluation diagnostique cherche à faire le point sur les acquis des apprenants (voire les prérequis) pour apporter des remédiations, si nécessaire. L'évaluation formative est mise en œuvre tout au long du processus d'apprentissage de manière à soutenir, accompagner, réguler les apprentissages vs accompagner les apprenants. L'évaluation sommative mesure les acquis de fin de formation.

En ingénierie de la formation comme en ingénierie pédagogique, il est possible de trouver d'autres formes d'évaluation qui mobilise souvent le modèle proposé par Kirkpatrick. (cf. image F) :

- *L'évaluation de satisfaction mesure les réactions des participants à une formation, mais elle ne mesure en rien l'acquisition des connaissances*
- *L'évaluation des apprentissages cherche à mesurer les acquisitions, elle vise à tester les acquis et s'assurer de leur appropriation (évaluation à chaud)*
- *L'évaluation des niveaux de transfert cherche à repérer si les acquis de la formation sont transférés en situation de formation ou de travail (évaluation à froid)*
- *L'évaluation résultat est relative au ROI (retour sur investissement) et vise à mesurer l'impact de la formation sur le comportement de l'apprenant (mesure les changements).*
-

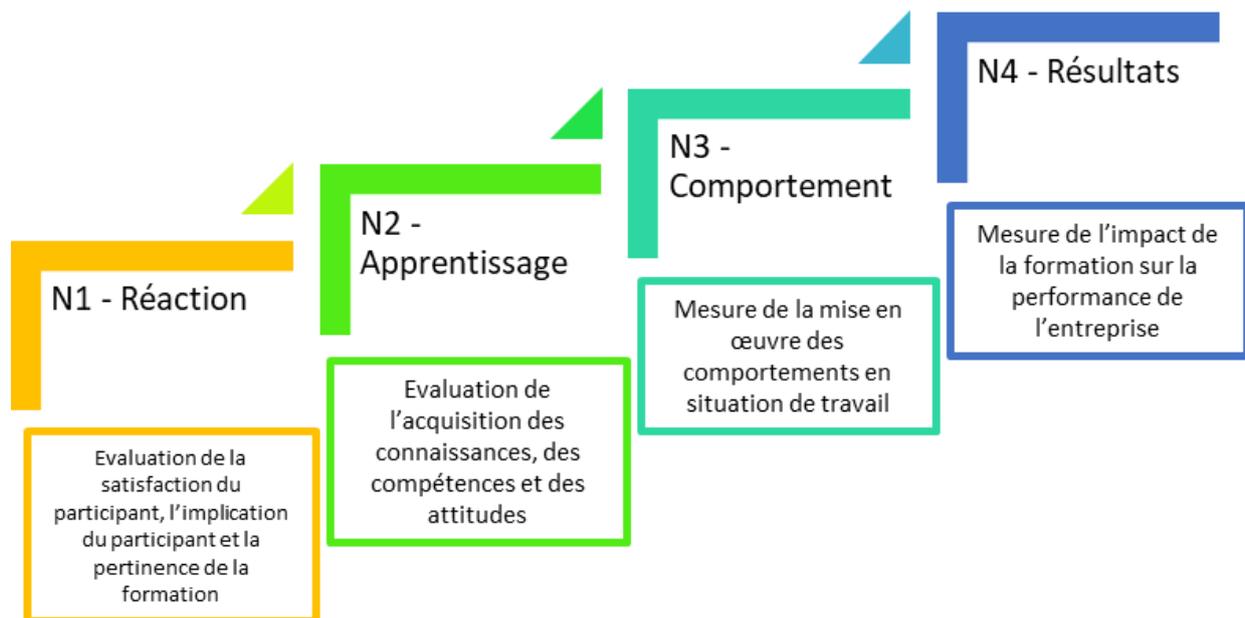


Image F : le modèle de Kirkpatrick (Université de Strasbourg, 2023)⁵³

⁵³ <https://sfc.unistra.fr/formation-continue-de-luniversite-de-strasbourg/notre-offre/kirkpatrick/>

La méthode MISA

(Méthode d'Ingénierie d'un Système d'Apprentissage) (image 4)

Conçue par Gilbert Paquette (2002), cette méthode tend à appliquer les principes des sciences cognitives au design pédagogique. Elle est basée sur quatre modèles:

Un **modèle de connaissances** qui est basé sur une modélisation des connaissances visées sous la forme de graphique mettant en évidence les différents types de connaissances (cognitives, affectives, procédurales, sociales, ...)

Un **modèle pédagogique** qui est composé de deux scénarios pédagogiques: le scénario d'apprentissage et de formation (i.e. scénario d'encadrement). Le premier comprend les activités liées à l'apprentissage (productions écrites des étudiants par exemple) ainsi que les instruments nécessaires. Le deuxième comprend les activités du formateur (par exemple les productions sous forme de présentation PowerPoint).

Un **modèle médiatique** décrit les outils et les technologies utilisées pour supporter le modèle pédagogique. La **planification** qui expose le plan de mise en place du système d'apprentissage.



QR code B : La méthode MISA https://edutechwiki.unige.ch/fr/Sc%C3%A9nario_p%C3%A9dagogique

LIVRET
COMPLEMENTAIRE :
PRESENTATION
DES JUMEAUX
NUMERIQUES DE
JENII



ENSAM



L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, grande école d'ingénieurs créée en 1780, incarne, la culture de l'industrie du futur et contribue à la compétitivité et à l'innovation industrielle en France et à l'étranger. Arts et Métiers est aujourd'hui le leader pour la formation de cadres et de cadres intermédiaires pour l'industrie avec mise en action sur des plateformes technologiques (6000 apprenants inscrits par an). Transmetteur de connaissances et d'innovations, Arts et Métiers contribue également à leur production, grâce à 15 laboratoires de recherche et une école doctorale dont les thématiques couvrent un large spectre lié aux technologies de l'industrie du futur sur tout le cycle de vie des produits et des systèmes. Avec une chaire sur les jumeaux numériques hybride et une chaire sur le développement d'environnement virtuels, l'ENSAM a une activité de recherche reconnue autour de la Réalité Augmentée/Réalité Virtuelle (RA/RV). L'établissement a pour stratégie d'ancrer ses liens et sa proximité avec l'industrie à travers ses 8 campus et 3 instituts répartis sur le territoire français. Ce positionnement et ancrage territorial lui permettent d'aligner, au plus près du terrain, le contenu de ses programmes de formation avec les besoins exprimés des entreprises.

Pour faire évoluer son modèle de formation et de recherche, Arts et Métiers a pour projet stratégique de développer des Evolutive Learning Factories 4.0 (ELF) à travers l'implantation dans chacun de ses campus, de lignes de production représentatives de l'industrie du futur, de véritables espaces de formation et d'apprentissage qui traduisent l'évolution des salles pédagogique. Chaque ligne de production correspond aux savoir-faire des laboratoires et des enseignants du campus et entièrement digitalisée. Le déploiement des Evolutive Learning Factories 4.0 se décline en trois volets 1) Faciliter l'accès interactif aux ressources expérimentales à travers l'investissement dans des serveurs de calculs et la création de ressources éducatives libres, 2) former les enseignants à la pédagogie du numérique et 3) concevoir des démonstrateurs numériques dédiés à l'enseignement, qui est le cœur du projet JENII.

L'originalité de la formation Arts et Métiers est de mettre les apprenants au plus près du monde industriel réel en s'appuyant sur des ateliers équipés de machines industrielles. Dans le même temps, il est nécessaire de former les élèves ingénieurs à la transformation numérique de l'industrie. A travers des mises en situation pédagogiques sur des technologies physiques et numériques actualisées, les futurs ingénieurs identifient le potentiel d'innovation et les enjeux autour des jumeaux numériques. Ils expérimentent et comprennent leur impact sur l'agilité de la production, la maintenance préventive, l'optimisation des flux et de la consommation d'énergie dans de nouvelles modalités de travail et face aux enjeux environnementaux. Le coût des machines industrielles et la difficulté de réaliser certaines expérimentations pour des raisons de sécurité font également des « jumeaux numériques » un outil de travail, d'enseignement et d'apprentissage incontournable pour une école comme Arts et Métiers et un levier pour développer des dispositifs de formations basés sur la flexibilisation et l'individualisation des parcours en mettant l'apprenant au centre de la formation.

CNAM

le cnam

Dédié à la formation professionnelle tout au long de la vie Le CNAM, établissement d'enseignement supérieur, accueille un public de salariés, artisans, profession libérale ou demandeur d'emploi en recherche de formation et/ou de diplôme complémentaire. Avec 20 centres Cnam en régions et 200 centres d'enseignements, l'offre de formation permet à chacune où qu'il soit de moduler son parcours selon son projet personnel et professionnel. En 2021, le Cnam comptait 52 000 inscrits et l'école d'ingénieurs du Cnam – Eicnam, quant à elle, diplômait 1150 ingénieurs dans une quinzaine de spécialités. Accompagnés par un corps enseignants issus de l'université et de l'industrie, les diplômés du Cnam sont reconnus pour leurs compétences, leur connaissance du milieu professionnel et leur volonté d'évoluer avec les nouvelles technologies.

L'établissement a toujours su relever les défis de son temps : intégrer les auditeurs à toutes les étapes de leur professionnalisation quand la valorisation des acquis de l'expérience (VAE) n'existait pas encore ; créer un cursus Hors Temps de Travail (HTT) pour s'adapter à l'évolution des contraintes professionnelles ; innover depuis 30 ans en matière d'ingénierie pédagogique avec notamment une offre de formation ouverte et à distance (647 unités d'enseignement) et hybride (912 unités d'enseignements). En 2021, 49% des inscrits suivaient au moins un enseignement totalement à distance. Lorsque survint la crise sanitaire en mars 2020, les infrastructures du Cnam ont permis à 95% des cours assurés en présentiels de basculer en distanciel. La continuité pédagogique était assurée avec notamment, 900 classes virtuelles quotidiennes.

Résolu à s'engager dans une politique d'innovation pédagogique avec les technologies immersives, le Cnam est membre fondateur, en 2018, de France Immersive Learning Lab (pôle de compétences XR dédié aux usages pédagogiques), aux côtés de Défi Métiers, de grandes entreprises (Orange, Natixis) et d'acteurs institutionnels et universitaires (Agefip, Université Paris Créteil). Depuis cette date, France Immersive Learning est pleinement intégré dans la filière française portée par France Immersive Learning Lab (plus de 70 entreprises), et en région PACA avec l'Immersive Learning Lab Sud en lien avec le campus des métiers et des qualifications « métiers de la Mer » et le Plan d'Investissement d'Avenir 4med.

Aujourd'hui, les premiers projets nés de cette volonté sont utilisés pour former en présentiel et ils ont vocation à former à distance, en auto-formation et en collectif. En effet, dès octobre 2019, le projet « Apprentis 360 », lauréat des trophées franciliens, expérimente l'utilisation des technologies immersives avec des contenus 360° créés par les élèves de l'École Vaucanson, en partenariat avec Impact Campus et sous la coordination de France Immersive Learning Lab. Au même moment le projet CAP'VR est lauréat d'un appel à projet d'innovation pédagogique interne. Initier les auditrices et auditeurs en formation dans les domaines des industries chimiques, pharmaceutiques et agroalimentaires aux gestes techniques en toute sécurité et à moindre coût : tel est l'objectif du projet. Plusieurs modules de formation sont aujourd'hui opérationnels, d'autres sont en phase de tests, d'autres encore en phase de conception. D'ores et déjà les apprenants équipés de casques virtuels s'exercent en présence de leurs enseignants lors de séances de travaux pratiques – TP - immersifs qui leur permettent de progresser via différents scénarii d'apprentissage.

La contribution du Cnam au projet JENII s'inscrit dans la continuité de ces premières initiatives pour la mise en œuvre de jumeaux immersifs de séances de TP immersifs en réalité virtuelle.

CESI



CESI Ecole d'Ingénieurs créée en 1956, réseau de 25 campus d'enseignement supérieur et de formation professionnelle, poursuit sa mission sociétale en permettant à des apprentis, salariés et étudiants de devenir acteurs des transformations des entreprises et de la société, grâce à ses programmes "Grande Ecole", "Professionnel Supérieur", "Grade Licence", "Mastères Spécialisés" et "Executive".

Pionnière en France dans le développement de l'apprentissage et des méthodes de pédagogie active, tournée vers l'innovation et les technologies, CESI opère dans tous les secteurs d'activités afin de répondre aux enjeux d'employabilité et aux besoins en compétences des entreprises. Notamment, CESI forme aux métiers et compétences de demain dans l'industrie en mobilisant, d'une part, les sciences fondamentales et les sciences humaines et, d'autre part, des dispositifs d'accompagnement professionnel. Elle mène, par ailleurs, des activités de recherche dans son Laboratoire d'Innovation Numérique (CESI LINEACT). CESI LINEACT anticipe et accompagne les mutations technologiques des secteurs et des services liés à l'industrie et au BTP. CESI LINEACT est organisé autour de deux thèmes scientifiques interdisciplinaires et deux domaines applicatifs. Les thèmes « Apprendre et Innover » et « Ingénierie et Outils Numériques » développent et croisent leurs recherches notamment dans les domaines applicatifs de l'Industrie du Futur, travaillant tout à la fois les aspects technologiques et pédagogiques en lien avec les formations dispensées. CESI à travers des projets structurants tel que le PIA DEFI&Co a enrichi ces 5 dernières années ses cursus avec les technologies et pratiques de l'industrie du futur. Ainsi, chaque élève ingénieur.e CESI aura par exemple, dans son cursus :

- Manipulé des outils de prototypage rapide (Fabrication additive, découpe laser),
- Observé et analysé les impacts de la mise en place de cobot dans un processus industriel,
- Découvert les atouts des technologies de réalité augmentée et de réalité virtuelle,
- Été sensibilisé sur les leviers permettant de faire face à l'urgence climatique,
- Utilisé un logiciel de simulation de flux, etc.

CESI dispose actuellement de prototypes de jumeaux numériques, de retours d'expérience et d'études sur l'intégration pédagogique de ces derniers dans les formations et de compétences en recherche (développement, ergonomie, architecture des JNs, RA/RV, environnement d'apprentissages instrumentés). JENII va permettre à CESI de poursuivre ces travaux et l'implémentation de ces technologies dans ses programmes afin de :

- former ses élèves sur la technologie de jumeau numérique dans l'industrie : les forces, les faiblesses, le coût d'investissement, les risques et enjeux.

développer et pérenniser les équipements de ses deux plateformes industries du futur (Atelier flexible de production et atelier de fabrication additive), et les rendre, grâce aux JNs, accessibles à tous les étudiants de tous les campus, où qu'ils soient. Chacun pourra ainsi manipuler via un PC ou en réalité virtuelle ces installations et potentiellement développer les mêmes connaissances et compétences

- personnaliser plus finement certaines parties de ses cursus et ainsi favoriser l'individualisation des parcours de formation.

CEA LIST



Le CEA-List rassemble près de 1000 ingénieurs-chercheurs et techniciens autour d'un de leur domaine d'excellence : les systèmes numériques intelligents. Ensemble, ils se mobilisent pour développer des innovations à haute valeur ajoutée en mesure de répondre aux grands défis socio-économiques actuels.

Le CEA LIST accompagne chaque année 200 entreprises françaises et étrangères sur des projets de recherche appliquée, dans plusieurs domaines. Les programmes de R&D du CEA-List, centrés sur l'industrie du futur, le jumeau numérique holistique, l'intelligence artificielle et la confiance numérique, contribuent à la compétitivité industrielle de ses partenaires par l'innovation et le transfert technologique. Basé à Paris-Saclay et à Grenoble, le CEA-List est l'un des trois instituts de recherche technologique de la direction de la recherche technologique du CEA.

Au sein du CEA LIST, le Laboratoire de Simulation Interactive (LSI) développe une plateforme dédiée aux jumeaux numériques et immersifs. Elle permet notamment de faire de la simulation multi-physique interactive mettant en jeu un ou plusieurs utilisateurs en exploitant les technologies de Réalité Virtuelle (RV) et de Réalité Mixte (RM). Cette plateforme, dénommée XDE Physics, permet de simuler en temps interactif des systèmes complexes en interaction avec des opérateurs comme par exemple des lignes d'assemblage ou d'emballage, le montage ou la maintenance d'éoliennes en mer, des réacteurs nucléaires dédiés à la formation ou des machines spéciales. Centrées sur les noyaux de simulation interactive, les activités du laboratoire vont jusqu'à la mise au point d'applicatifs, répondant aux contextes d'usage de ses partenaires industriels (production automobile et aéronautique, énergie, santé).

Grâce au projet JENII, le CEA LIST souhaite poursuivre ces travaux et cette évolution de ses programmes autour du jumeau numérique immersif via les axes suivants :

- Réaliser des simulations de plus en plus complexes en hybridant des techniques basées IA et modèles,
- Rendre ces jumeaux numériques accessibles via le cloud afin de faciliter leurs déploiements,
- Permettre l'interaction et la collaboration autour de jumeaux numériques via des avatars de plus en plus réalistes,
- Développer des solutions No Code pour programmer et mettre à jour les jumeaux numériques afin de faciliter leurs usages,
- Faciliter la connexion aux machines réelles en utilisant des protocoles standards et ouverts,
- Contribuer à la standardisation des jumeaux numériques via des formats ouverts et interopérables.

Présentation des projets de jumeaux numériques de JENII

Présentation des 15 jumeaux de JENII

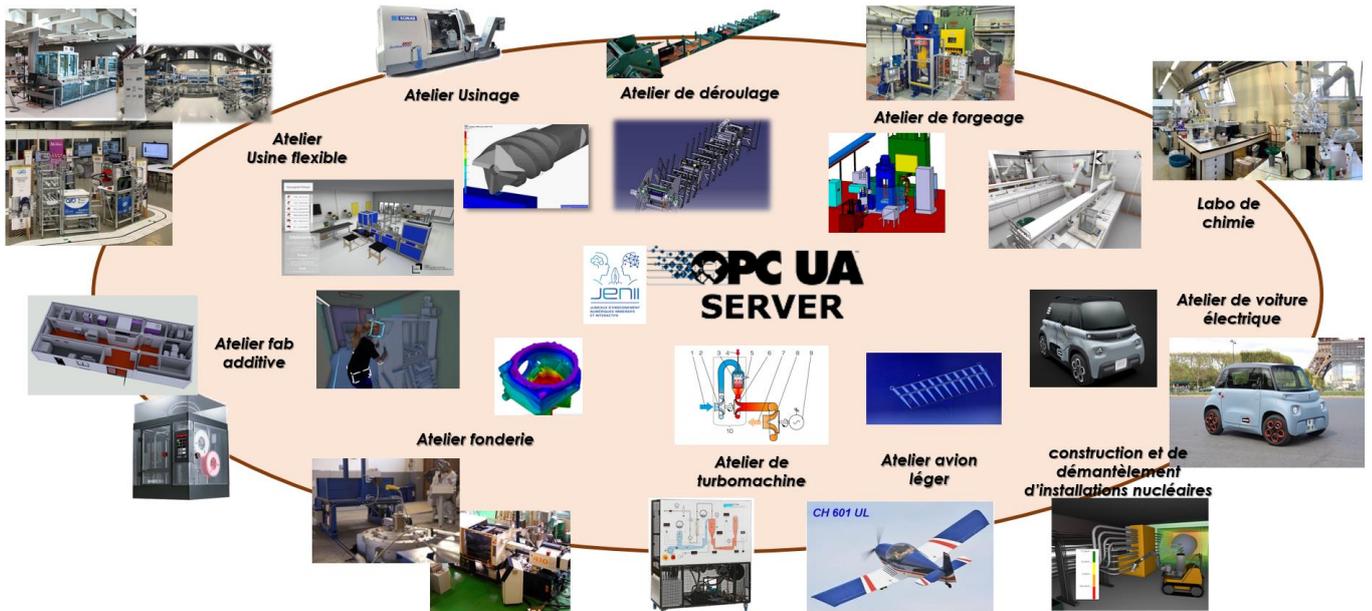


Figure A : Ensemble des jumeaux JENII

Les Jumeaux de l'ENSAM

Atelier de Bordeaux - Atelier Usine flexible Practice 4.0



Figure A : Plate-forme Practice 4.0

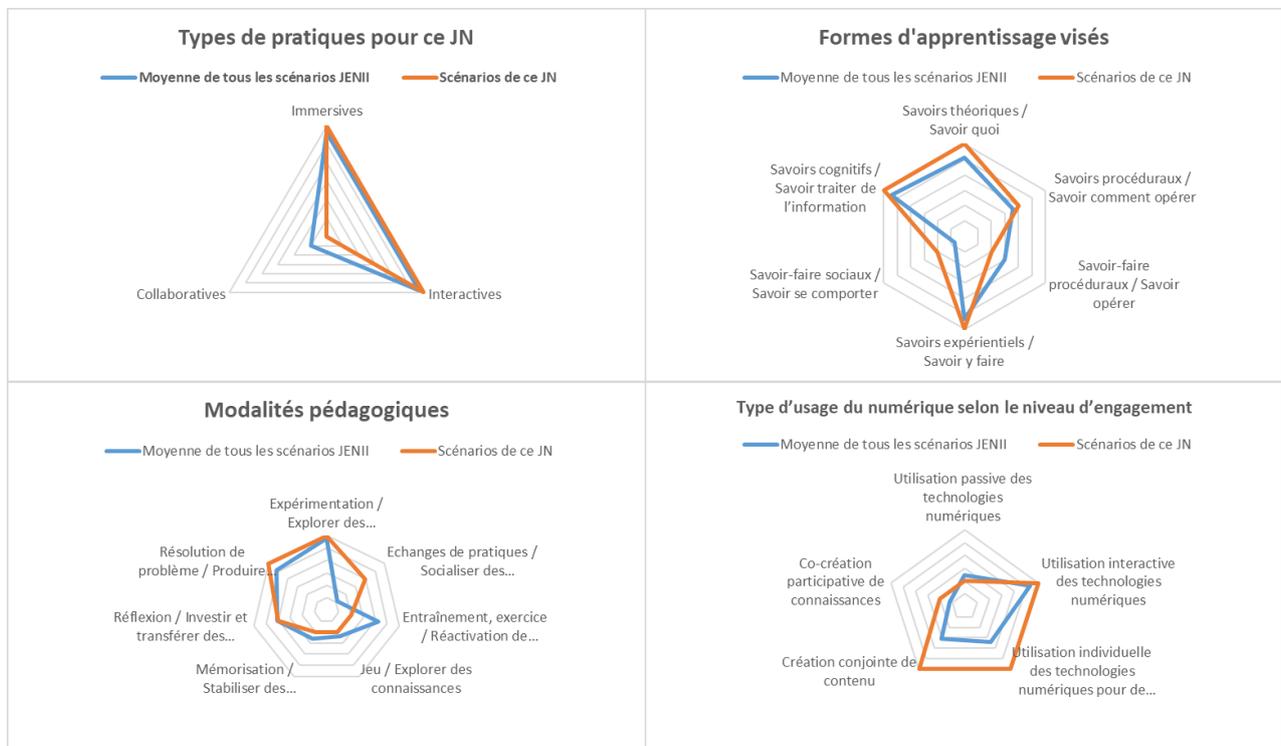


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

Le campus de Arts et Métiers Bordeaux-Talence s'est doté d'un démonstrateur de l'usine du futur au sein de ses ateliers, à l'interface avec le lycée technique Alfred Kastler, véritable vitrine pour le campus des métiers et qualification monté entre les deux établissements.

C'est une plateforme physique représentative de l'écosystème régional (offreurs et académiques de la région), accessible gratuitement :

- Aux industriels pour tester/expérimenter des technos/scénarios, pour proposer des études de faisabilité, se former...
- Aux offreurs comme un véritable showroom avec un flux important d'étudiants/industriels/académiques, pour développer des POC en synergie avec d'autres offreurs, des projets collaboratifs académiques/industriels...19 structures participent actuellement (en constante évolution) : AIO, DIOTA, ACPI, AERSOPLINE, AGENCE SMART INDUSTRY, WEVIZ, LYNXTER, VLM ROBOTICS, TAMAPLACE, AIRUDIT, ALGO'TECH, ITECA, THINKDEEP, 7SHAPES, UBLEAM, IIDRE, AQMO, CETIM, AKEROS.
- Aux académiques, pour s'acculturer, se former, se fédérer autour de projets collaboratifs, bénéficier des technologies mises à dispositions par les offreurs mais aussi sensibiliser les plus jeunes au monde industriel de demain.

Construit autour d'une chaîne d'assemblage flexible et reconfigurable, PRACTICE 4.0 est une des plateformes charismatiques permettant de concrétiser le projet d'Evolutive Learning Factory du campus de Bordeaux-Talence. Il s'agit d'y assembler un système multi-physique innovant, un propulseur nautique de la start-up Adv-Tech présente sur le campus.



Figure C : RV pour revue de conception de poste

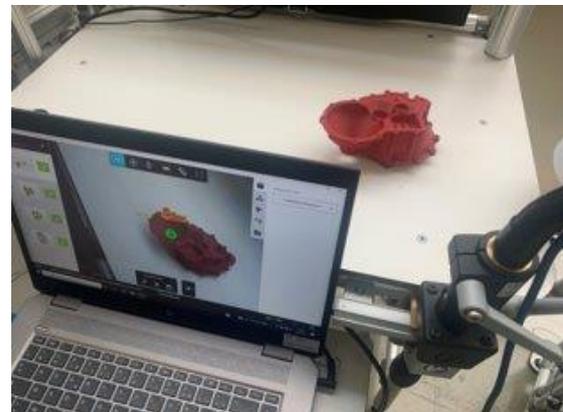


Figure D : RA pour assistance à assemblage

Afin de finaliser cette plateforme d'assemblage en cohérence avec les autres plateformes de fabrication représentatives de l'atelier, il s'agit d'en un premier temps de fournir une solution rapide et efficace pour le parachèvement et le contrôle des pièces réalisées en partie dans l'atelier. Pour cela, des solutions cobotiques seront mises en œuvre en collaboration avec les académiques du pôle d'ingénierie Bordelais et les offreurs du consortium.



Figure E : Picking

Ensuite, cela consiste à ajouter une couche pilotage avec une solution ERP/MES. Au-delà des données classiques de gestion de stocks, de suivi d'en cours, de commandes, de ressources disponibles etc...il faut également maîtriser ses approvisionnements/flux gérés par une flotte d'AGV, capable de s'adapter à tout moment à un changement de configuration de ligne. Il est ainsi nécessaire de géolocaliser en temps réel l'ensemble des postes de montage mobiles et AGV. Ces données supplémentaires couplées aux données stockées dans l'ERP/MES permettront d'alimenter le futur jumeau numérique, ayant pour objectif de prédire au plus juste la production.



Figure F : AGV chargement/déchargement
Picking dynamique

Ce premier volet réalisé, il s'agit de s'appuyer sur ce jumeau numérique pour en donner une version immersive, synchronisée par rapport à la configuration réelle, pour pouvoir en donner une visibilité à distance. Ce second volet sera un véritable catalyseur pour sensibiliser tout le monde académique du territoire néo-aquitain à ces nouvelles approches de production.

Ces actions doivent permettre de finaliser la chaîne de valeur « conception, fabrication organisation » au sein du campus avec un aspect Jumeau physique/numérique à toutes les étapes. Il permettra de fournir un véritable terrain de jeu aux activités d'organisation industrielles (pilotage des flux, amélioration continue, maintenance, planification, Supply Chain, etc..). Scénario possible : tous les postes sont disposées au fond de l'espace, les étudiants doivent aménager la chaîne de montage en organisant les postes et les ressources pour répondre à un objectif de production, s'en suit une évaluation de la pertinence de la configuration par l'utilisation du jumeau numérique. Avec le jumeau, il sera également possible de visualiser à distance la chaîne d'assemblage en vue immersive dans l'objectif de réaliser une revue de conception et d'aménagement du système de production dans le but de prédire le comportement de la production à l'aide du jumeau numérique.



Figure G : Management visuel numérique



Figure H : MES

Atelier de Lille – Usine Agile

L’atelier Usine Agile de l’ENSAM Lille repose sur 2 pôles principaux représentant des systèmes de production :



Figure A : Ligne de production manuelle flexible et reconfigurable + QR code vidéo de présentation (<https://www.youtube.com/watch?v=smWojZrKAo>)

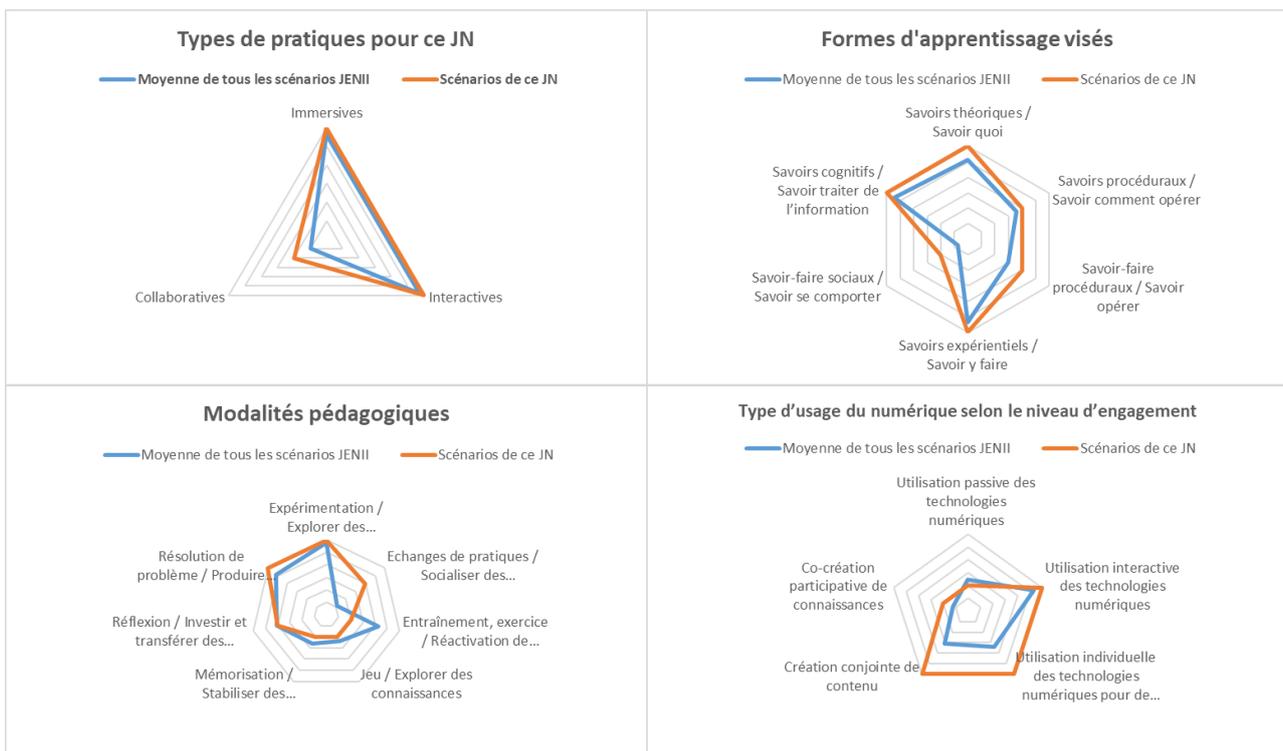


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)



Figure C : Convoyeur automatisé

Cette usine agile met en application plusieurs solutions robotisées :



Figure D : Des robots mobiles : Kuka KMR, Tecdron TC200



Figure E : Des robots et cobots : 3 Kuka iiwa 14kg, 1 Kuka KR300, 1 UR10e, 1 URS et 1 Doosan M0609

Les thèmes supports envisagés pour le développement de ce jumeau numérique (plusieurs granulométries « physiques » en fonction des besoins applicatifs) sont :

- **Robotique collaborative** : sensibilisation aux fonctionnalités / sensibilisation et formation à la sécurité / formation aux opérations de type picking ou assemblage.



Figure F : Cobots

- **Ligne d'assemblage 4.0** (cobot et IOT) : formation à l'équilibrage de ligne / mise en situation de production (gestion aléas) / intégration d'un cobot dans le flux.



Figure G : Moyens technologiques supports pour le développement des jumeaux numériques et séquences pédagogiques associées (gauche : robotique collaborative mobile/manipulation ; droite ligne d'assemblage flexible en ratio d'automatisation).

Atelier d'Angers – Atelier fonderie



Figure A : Atelier de fonderie d'Angers

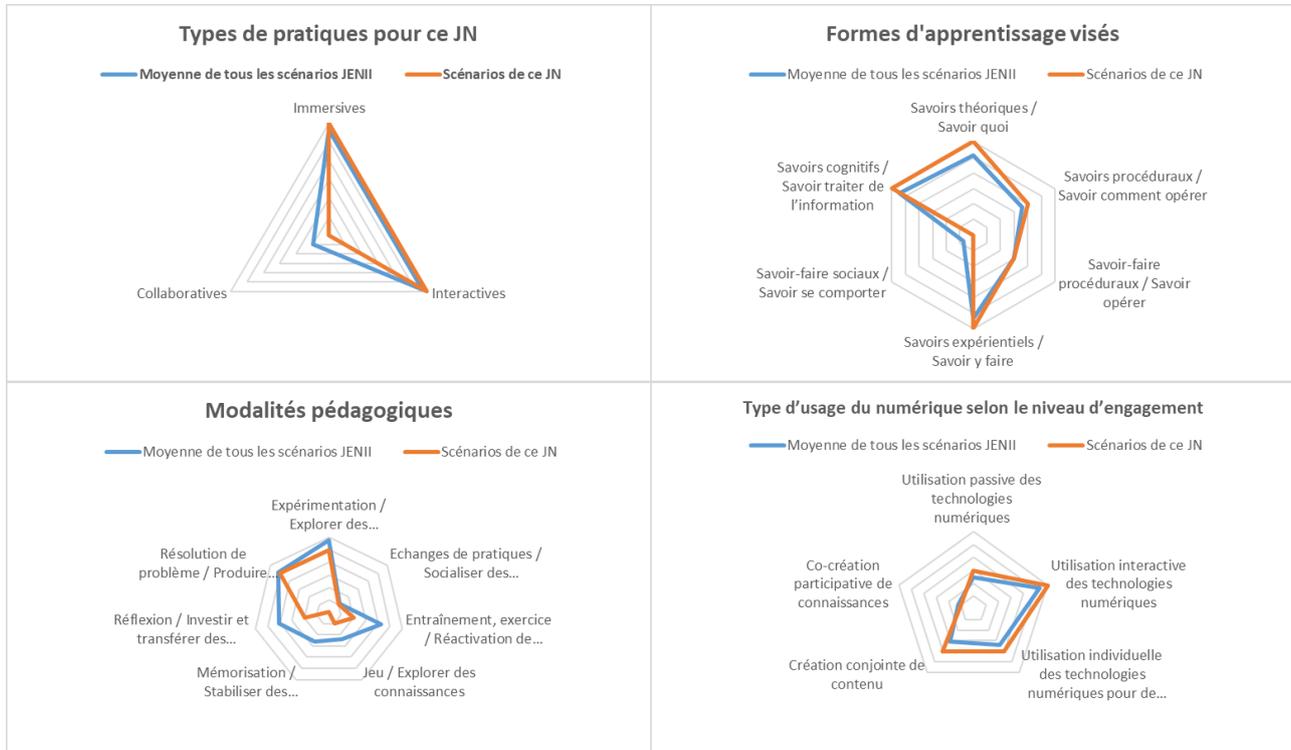


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

Le contexte de ce projet s’inscrit dans une démarche pédagogique qui vise à donner aux élèves un outil de réalité virtuelle permettant l’optimisation de la qualité des produits obtenus par fonderie et par injection de thermoplastiques. L’objectif est de développer un outil numérique basé sur des méta-modèles (alimentée de façon hybrides par les résultats de simulations et/ou l’expérimentation) capable de donner une réponse en temps réel sur l’estimation de la qualité d’une pièce suite à une dérive des paramètres d’entrée du processus. La démarche consiste à construire cet outil en alliant une réduction de modèle de type a posteriori et une approche basée sur les données (non-intrusive).

Le projet se découpe en 3 parties successives :

- La première porte sur l’utilisation de la réduction de modèle pour réaliser l’analyse de sensibilité des résultats aux paramètres d’entrées de l’opération. En effet, les techniques de réduction de modèle pourraient permettre d’identifier clairement les paramètres de 1er ordre avec un investissement en temps de calcul limité. Ce modèle peut alors permettre, en y injectant les paramètres procédés relevés dans le processus de fabrication, de prédire quel résultat sera obtenu sur la pièce.
- La seconde porte sur l’utilisation de résultats expérimentaux pour hybrider le modèle et améliorer la prédiction des résultats, minimisant ainsi les étapes de recalage

nécessaires sur chaque opération. Sur ce point, il est important de mentionner que l’on se base sur des techniques avancées utilisant l’Intelligence Artificielle pour l’enrichissement de modèles. Nous pouvons alors retrouver ici les méthodes d’apprentissage basées sur les régressions non linéaires, les réseaux de neurones ... mais aussi d’autres stratégies que l’ENSAM Angers a développé elle-même telles que la sPGD (sparse Proper Generalized Decomposition). En effet, les équations modélisant les procédés de fonderie et/ou injection TP ne peuvent jamais inclure tous les couplages multiphysiques entre les différents phénomènes (hydrauliques, mécaniques, thermiques, chimiques, changement de phase ...). Il en découle alors que certaines quantités observables soient alors mal modélisées. Dans ce cas, l’utilisation des outils de l’IA devient alors incontournable.

- La troisième partie porte sur la mise en place d’un démonstrateur permettant de visualiser les résultats issus de la réduction de modèle et d’enrichir des expériences dans un environnement virtuel RV. Ce démonstrateur pourrait permettre la manipulation des données et la visualisation dans un espace 3D du produit fini.

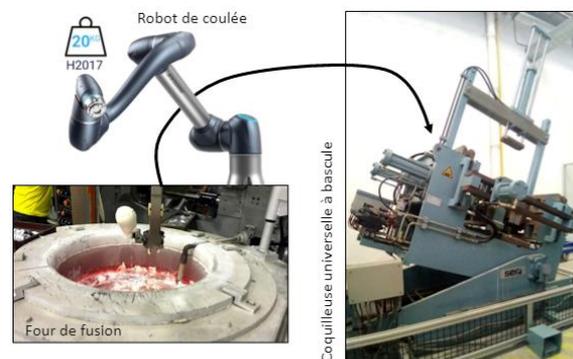


Figure C : Cobots

Scénario pédagogique imaginé :

Séance 1 : visite virtuelle de la presse (RV 360°) manipulation des commande et lancement virtuel d'une production (avec vidéos)

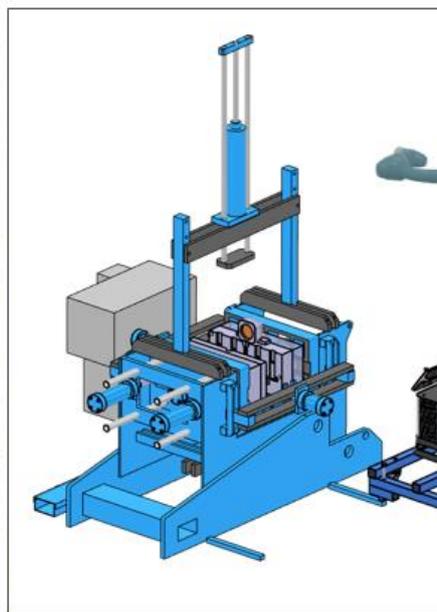
Séance 2 : manipulation de moldflow par les élèves, mise en place d'un mini métamodèle pour imaginer comment sont faites les simulations qui on généré le méta-modèle stocké sur la tablette

Séance 3 : Le méta-modèle est déjà construit et est installé sur tablette. Les élèves le manipulent pour voir l'influence des paramètres procédés sur la déformée. Les élèves choisissent un plan d'expérience à réaliser sur la presse. Ils réalisent la

production de quelques pièces selon les conditions de procédé définis par le plan d'expérience. On réalise ensuite une mesure des déformées des pièces obtenues sur le numériseur. Un choix est effectué sur une dimension 'observable' et on détermine le modèle d'ignorance sur cet observable en comparant le JN aux mesures expérimentales. On suppose qu'il y a une valeur cible pour cet observable. Les élèves combinent le JN et le modèle d'ignorance pour estimer par optimisation les paramètres du procédé qui permettent d'obtenir la valeur cible de l'observable. On procède enfin à une réalisation d'une production de pièce avec les paramètres issus de l'optimisation et on vérifie la valeur de l'observable.



Réel



CAO



Modèle 3D temps réel

Figure D : Du réel au virtuel

Atelier d'Aix-en-Provence – Atelier fonderie

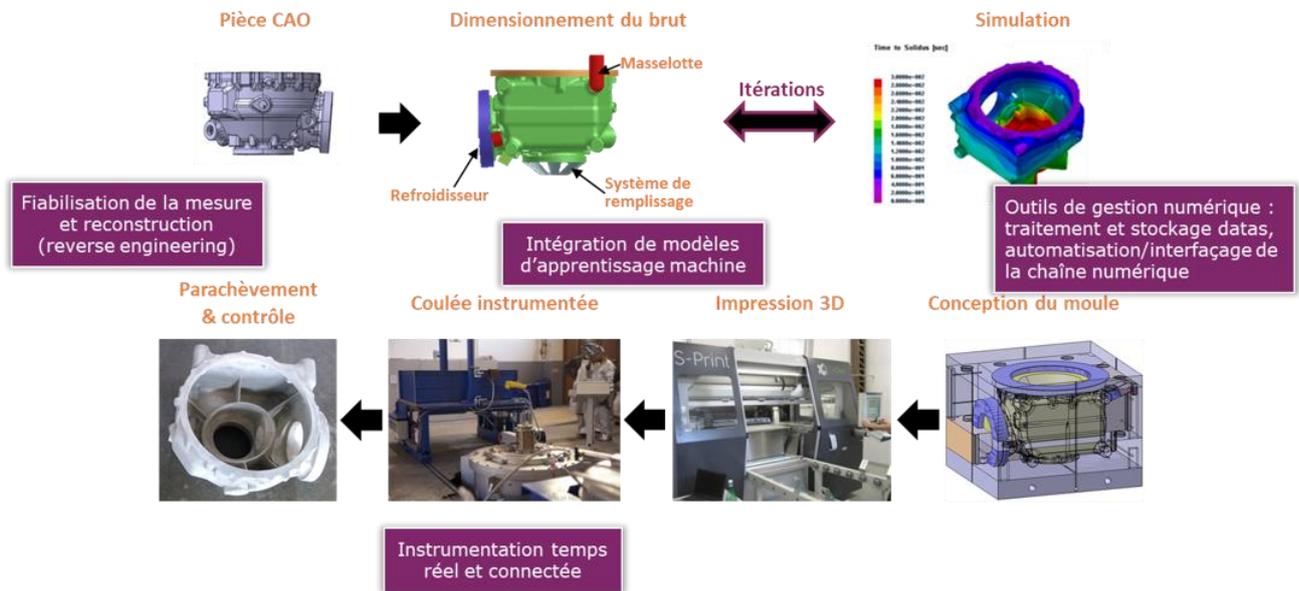


Figure A : Atelier de fonderie d'Aix-en-Provence

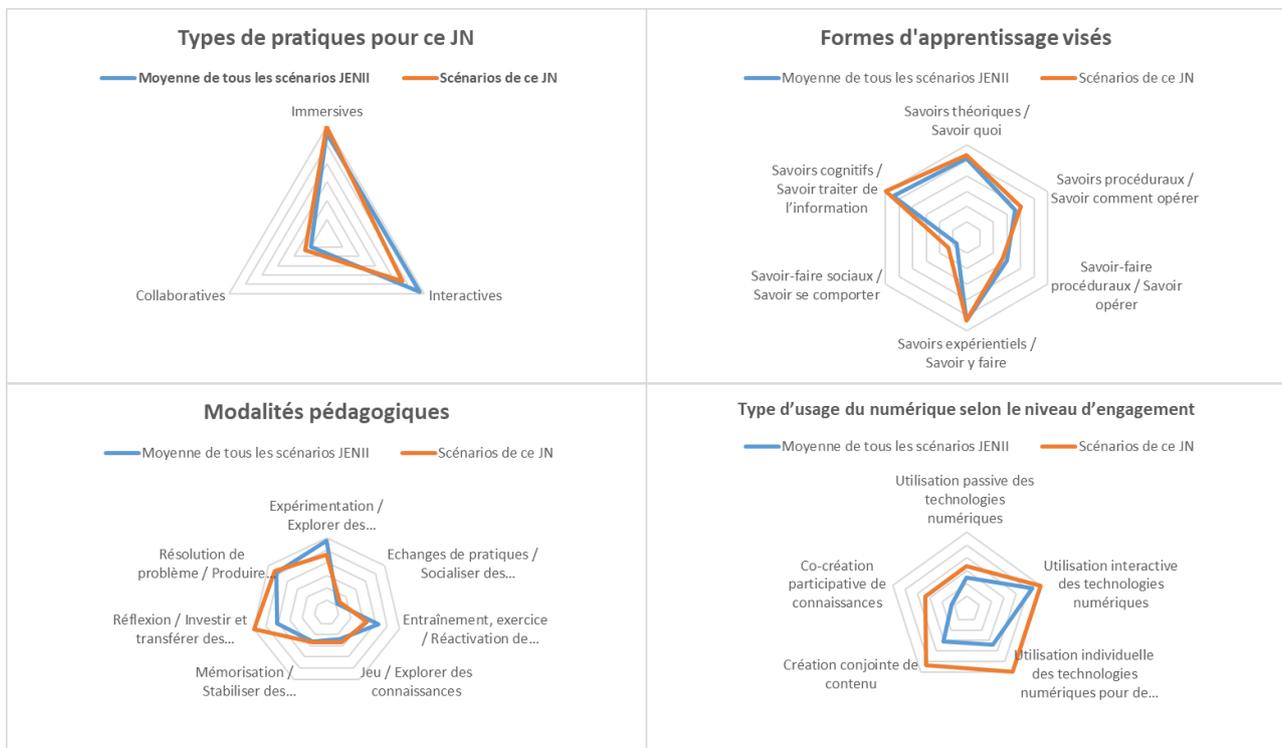


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

La fonderie du campus Arts et Métiers d'Aix en Provence est en activité depuis plus de cent ans ; elle a permis à des dizaines de milliers d'élèves ingénieurs de se former à ce procédé millénaire de formage des métaux, et à ces techniques variées : modelage, moulage, fusion, coulée, parachèvements... La volonté de l'école et en particulier du laboratoire MSMP est de moderniser l'outil pédagogique et de renforcer les interactions entre la recherche et les industries du territoire. Pour ce faire, elle a continuellement adapté ses locaux et équipements en interne ou via des projets structurants lorsqu'elle ne pouvait supporter les coûts. En 2015, elle a par exemple investi 2,4 M€ pour créer la plateforme de fonderie rapide disposant d'une impression 3D de moules en sable à résine et d'un four basse pression à échelle industrielle, et créé 3 emplois.

La chaîne numérique CAO/simulation/FAO/moulage3D/coulée est actuellement fragmentée et incomplète, chaque équipement et logiciel utilisant son propre langage ; l'équipe a trop souvent recours à des itérations essais/erreurs coûteuses dus à la faiblesse de l'outil de modélisation ; les moyens de contrôle sont limités et peu précis ; la gestion (archivage, apprentissage...) manuelle des données génère des pertes de temps et d'informations.



Figure C : Environnement à échelle industrielle

L'industrie 4.0 demande aujourd'hui de développer la digitalisation des procédés, l'apprentissage et l'analyse de données automatisés afin d'assurer la qualité par le suivi et le contrôle, de réduire les coûts par une meilleure prédictivité de la simulation et une plus grande réactivité, et d'optimiser les acquis (intelligence artificielle). Par conséquent, ce projet s'oriente selon trois axes majeurs :

- Fiabilisation de la mesure et reconstruction (reverse engineering)
- Outils de gestion numérique et automatisation de la chaîne numérique
- Instrumentation en temps réel et connectée pour la collecte in-situ des données physiques

L'objectif est d'augmenter la robustesse de l'ensemble du processus en le rendant plus précis, efficace et rapide, de mettre en place sa réplique numérique fidèle au chainage physique du processus de fonderie qui permettra d'optimiser son fonctionnement (gestion des données, apprentissage automatique, maintenance prédictive...), de limiter son impact environnemental par le suivi d'indicateurs de consommation/rejets en temps réel, et d'établir le terreau propice à l'innovation et ainsi de coller au mieux aux besoins des utilisateurs que nous souhaitons les plus nombreux : élèves, industriels, chercheurs...dans et hors plateforme.

Voici les principaux TP envisagés :

TP 1 : Impression moules 3D sable environné :

Equipements :

- Machine d'impression par jet de liant sur sable (ExOne SPrint)
- Containers de sable pour alimentation machine
- Bidons de résine, nettoyant et activateur pour alimentation machine

- Aspirateur et séparateur de sable
- Table de dépoudrage des moules
- Alimentation de secours
- Machines de caractérisation: perméamètre, flexion 3 points, balance...
- Armoire EPI, armoire stockage pièces

- Armoires de stockage matériel et lingots et armoire EPI
- Instrumentation

Procédé: fabrication additive de moules en sable :

- Choix de la recette (%résine, granulo sable, vitesse de compaction)
- FAO à partir de la CAO (NetFabb slicing)
- Dépôt et serrage de couches de sable
- Projection de liant sur les zones concernées
- Descente du plateau de construction
- Sortie et dépoudrage de la JobBox

Procédé : fusion et coulée d'alliages légers sous basse pression

- Chargement des lingots et choix de la température
- Fusion du métal
- Fixation du couvercle hermétique
- Programmation de la rampe de pression
- Positionnement du moule et de la table au-dessus du four
- Remplissage du moule et contrôle température
- Fin de l'essai: relâche pression, sortie de la table et du moule, décochage de la pièce coulée
- Contrôles et parachèvements pièce

TP 2 : Four de fusion et coulée basse pression d'alliages légers environné

Equipements :

- Four de fusion et coulée basse pression d'alliages légers (Kurtz Ersa Al 12-15 SC Mg)
- Automate de contrôle Siemens S7
- Table de coulée sur rails et vérins
- Armoire de mélange de gaz d'inertage (Mg)
- Système de régulation de débit des gaz d'inertage
- Cuves de gaz (air comprimé et mélange gaz inertage)

TP 3 : Numérisation tridimensionnelle

Equipements :

- Scan 3D
- Plateau tournant

Procédé: lumière structurée captée par caméra stéréo



Figure D : Atelier

Atelier Cluny – Atelier usinage haute performance



Figure A : Atelier d'usinage de Cluny

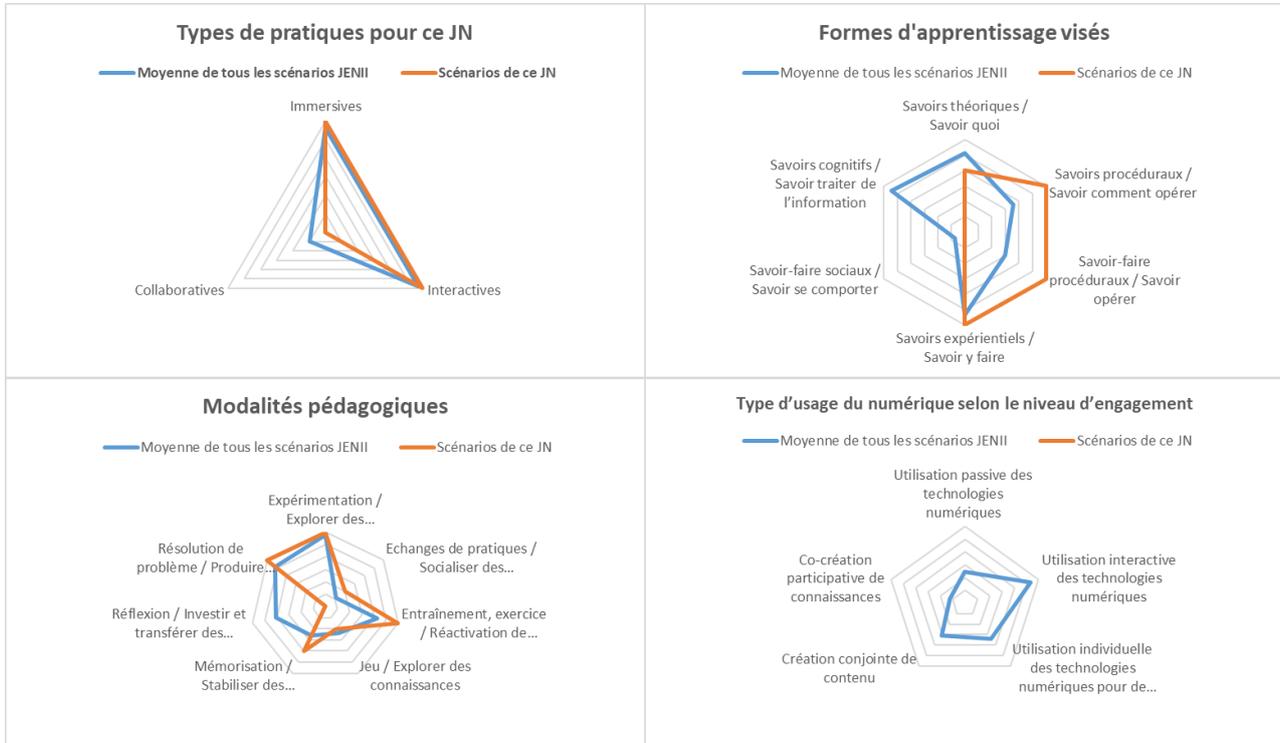


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

L'usinage est un procédé multi-physique complexe et il n'est pas évident de l'aborder suivant toutes ces dimensions et d'en avoir une maîtrise complète. Pour autant, les moyens d'ingénierie à disposition permettent déjà la gestion de problématiques géométriques et de la programmation des trajectoires (logiciel de CFAO). D'autres solutions logicielles, telles que NCSIMUL ou VERICUT, permettent la simulation des parcours et éventuellement le suivi de l'évolution des efforts, mais de manière assez dissociée des moyens de fabrication (machines et outils) et de leur comportement. De plus, ces outils font complètement ou partiellement abstraction de diverses problématiques physiques essentielles à la compréhension et la maîtrise du processus d'usinage d'une pièce, notamment : la dynamique et le temps des trajectoires, les variations d'engagement,

l'évolution des efforts et l'usure, les collisions, les vibrations de pièce ou d'outil, l'influence des paramètres opératoires, les déflexions pièces.

Actuellement, l'ensemble de ces différentes notions mécaniques est abordé séquentiellement et avec une observation limitée des grandeurs physiques caractéristiques du processus d'usinage. Ainsi, le recours à un jumeau numérique en usinage s'avère triplement utile à la formation de technicien et d'ingénieur pour sa compréhension et sa maîtrise en permettant :

- L'observation des multiples grandeurs in-situ
- La compréhension de l'effet de paramètre
- La simulation du comportement du procédé



Figure C : Atelier

Le projet de jumeau numérique en usinage a pour objectif de retranscrire le processus d'usinage suivant un maximum d'aspects, dans divers modes de fonctionnement : suivi du réel et simulation.

La machine cible est un nouveau tour fraiseur, tout juste installé à Cluny, qui est déjà et sera encore plus largement instrumenté (capteur position, palpeur outil, palpeur pièce, système de surveillance, sortie machine, mesure de puissance et d'effort...). Le jumeau numérique permettra le rendu réel de ce qui est en cours sur la machine, et intégrera autant de modèles physiques que possible pour être capable de simuler un fonctionnement vraisemblable. Pour certains phénomènes ne pouvant être simulés facilement en temps réel, des modèles phénoménologiques, ou des apprentissages valides dans les zones d'étude définies seront utilisés. Des techniques de réductions de modèle seront notamment mises en œuvre pour obtenir, à partir de simulations basées sur la physique mais longues, des modèles approchés pertinents et rapides.

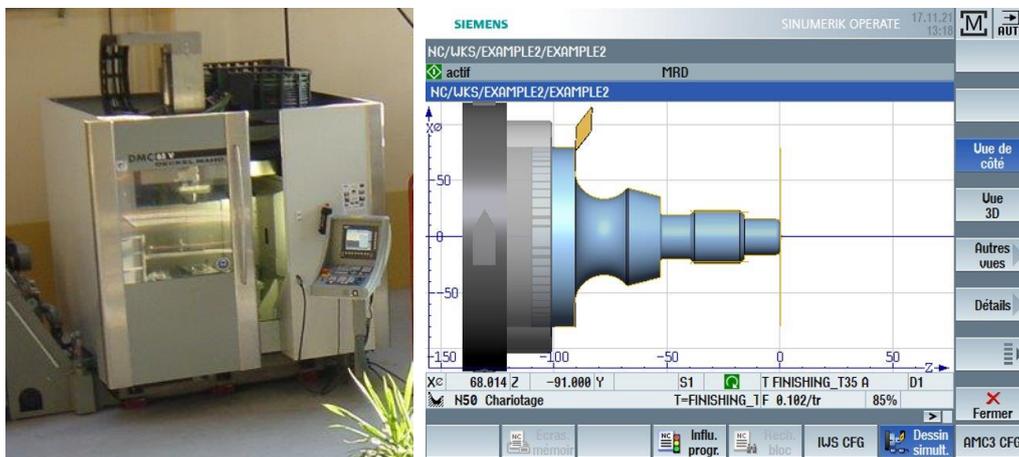


Figure D : Illustration TP

D'une part le jumeau numérique retranscrira par des méthodes et outils de l'immersion virtuelle (réalité virtuelle et/ou augmentée) l'ensemble des mesures possibles sur la machine permettant la caractérisation la maîtrise du processus d'usinage. Cette phase permettra aussi la calibration du jumeau numérique en tant que tel. Cette configuration est amenée à être utilisée durant des phases pédagogiques en présentiel.

D'autre part, le jumeau numérique suite à des apprentissages et calibrations, disposera d'un niveau assez élevé de capacité à simuler divers aspects du process (efforts, temps, vibrations, déflexions, état de surface...). Il pourra ainsi être utilisé de manière autonome pour comprendre l'effet de paramètres procédés et permettre des apprentissages par des étudiants en distanciel et en autonomie ou non.

Par ailleurs, les problématiques du jumeau numérique seront explicitées à travers son utilisation pédagogique, combinée aussi avec l'usage courant des outils de simulation d'ingénieur disponible pour l'usinage.

Enfin, il s'agira de développer des modalités d'interactions permettant à l'apprenant une interaction la plus aisée possible avec le jumeau numérique.

L'équipe constituée associe toutes les compétences requises pour mener à bien ce projet de jumeau numérique, à savoir, maîtrise du procédé, sa simulation, et son interaction par l'immersion virtuelle. Les enseignants chercheurs impliqués possèdent déjà des méthodes, des avant-projets et des briques de solution pour réaliser ce projet. Des enseignants de 1er et 2ème année seront partie prenante du projet.



Figure D : Illustration du scénario pédagogique imaginé

Atelier Cluny – Atelier de déroulage



Figure A : Atelier de déroulage de Cluny

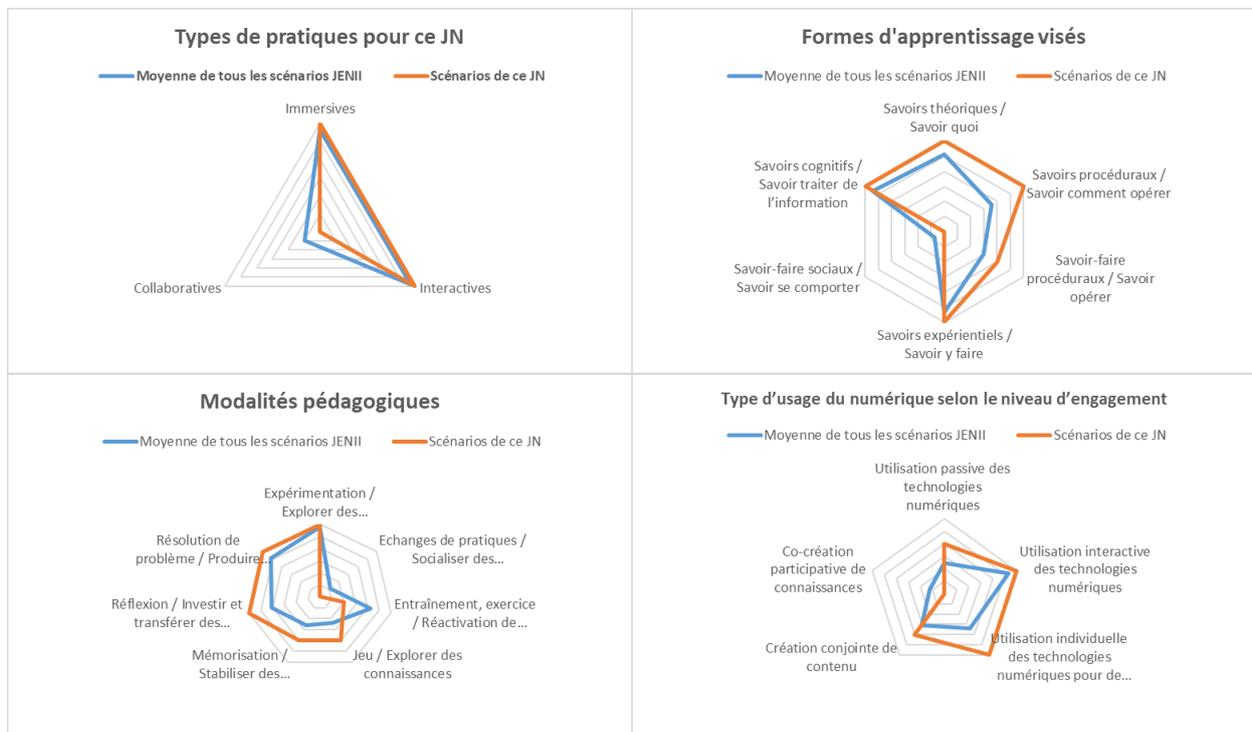


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

La fin programmée des plastiques à usage unique largement utilisés dans les emballages (Loi anti-gaspillage n°2020-105 du 10 février 2020 pour une économie circulaire) et les objectifs de neutralité carbone d'ici 2050 annoncés des filières fortement émettrices de CO2 telles que le bâtiment vont nécessiter l'emploi de matériaux d'origine locale, renouvelables et performants mécaniquement. Le bois est largement mis en avant dans les études prospectives pour atteindre ces objectifs qui sont en phase avec la stratégie d'Arts et Métiers tournée vers une industrie durable et performante. Le déroulage est l'un des deux principaux procédés de transformation du bois (170 millions de m3 de placages et de contreplaqués en 2016 d'après Food and Agriculture Organization of United Union). Parmi tous les procédés de fabrication par usinage, il est l'un des rares où l'objectif principal réside dans la maîtrise de la fabrication du copeau. En offrant la possibilité de sécher en continu les feuilles, le déroulage se prête bien à une industrialisation poussée basée sur des mesures fines à chaque étape du procédé en phase avec l'industrie 4.0. Mais si la cinématique des dérouleuses est plutôt simple, la

maîtrise de la qualité des placages reste un objectif difficile à atteindre et à maintenir essentiellement du fait de la ressource. Le bois est un matériau composite naturel, hétérogène et complexe dont les propriétés et le comportement à l'échelle macroscopique dépendent directement de sa microstructure à l'échelle micrométrique voire nanométrique. Mais l'architecte de la fabrication additive du bois années après années est aussi l'arbre, individu souvent unique d'un point de vue génétique qui s'exprime dans un environnement physique et climatique qui lui est propre. Ceci induit une grande variabilité qui nécessite une adaptation en temps réel des conditions opératoires pour obtenir un produit fini présentant les qualités requises. Cette adaptation repose presque exclusivement sur la réaction de la personne pilotant la chaîne de production, le dérouleur, qui utilise son expérience pour choisir des paramètres qu'il juge optimaux à partir de ce qu'il peut percevoir avec ses différents sens lors du déroulage de chaque billon (ouïe, vue, ...). Ces profils sont rares, les formations inexistantes et le potentiel de ce secteur est pourtant considérable.

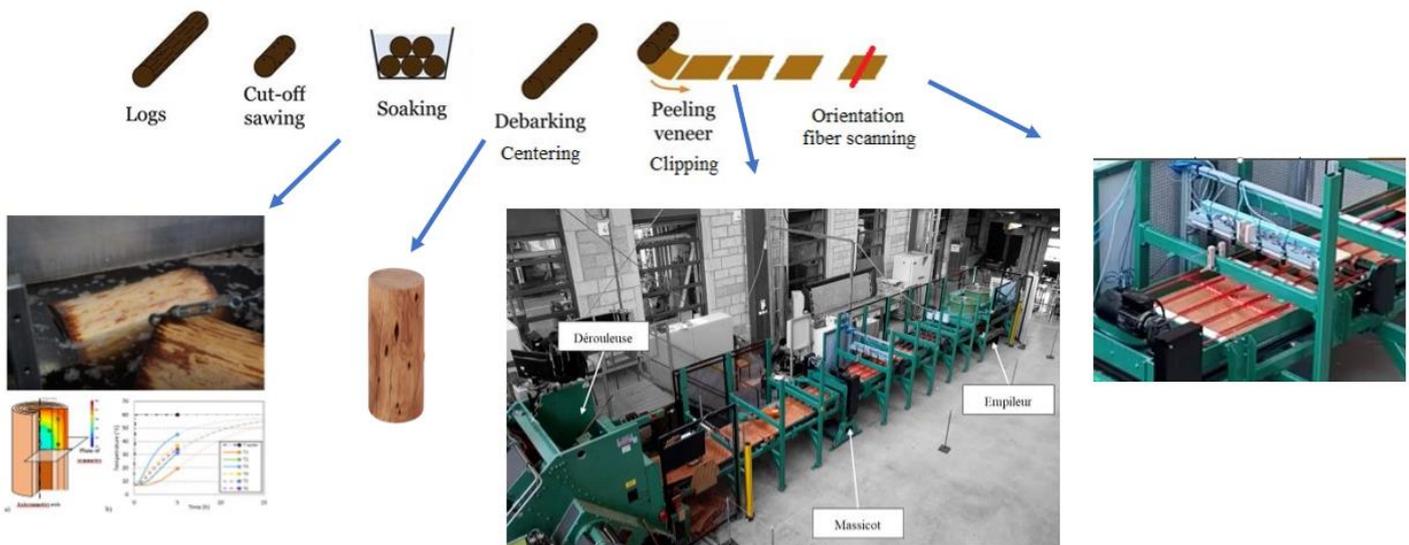


Figure C : Présentation du process de déroulage

La plupart des fabricants (Raute, Cremona, ...) dotent leurs lignes de nombreux capteurs sensés aider l'opérateur dans cette adaptation permanente mais aucun ne permet à l'opérateur d'observer et de comprendre les conséquences de ses choix. La complexité et la diversité des phénomènes physiques mis en jeu lors de l'usinage (approches dynamiques de la coupe, matériau hyper élastique, anisotrope, hétérogène, fortement variable) rendent très difficile leur modélisation. Un JN du procédé pourrait donc permettre :

- D'identifier les paramètres clefs du procédé qui diffèrent singulièrement en fonction de l'application visée (domaines alimentaire, de la construction ou de l'agencement)
- De donner accès à la compréhension des phénomènes physiques en cours et donc aux réponses à adopter pour corriger le procédé
- De simuler le procédé pour orienter des stratégies de valorisation de ressource pour des applications ciblées

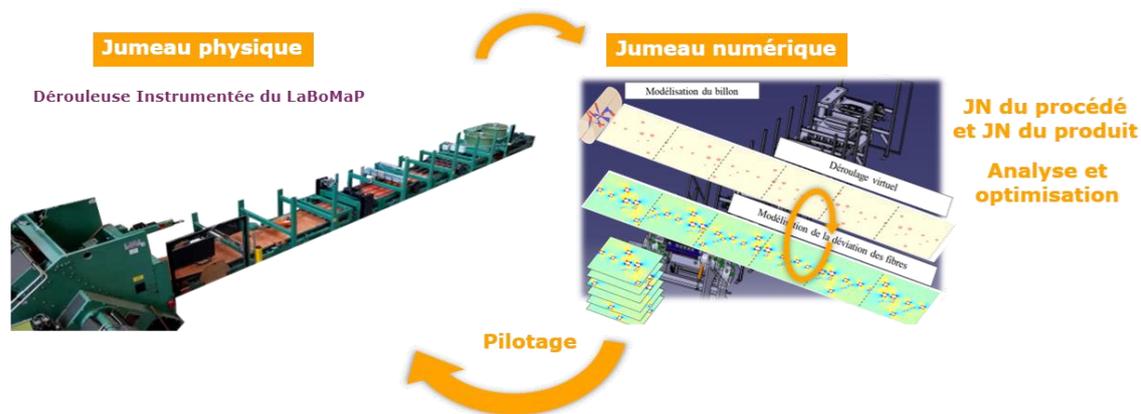


Figure D : Fonctionnement jumeau physique et jumeau numérique

Un tel JN pourra proposer aux élèves ingénieurs, aux ingénieurs, aux designers, aux techniciens en formation initiale ou continue de comprendre les grands principes de ce procédé, ses atouts et ses limites dans la conception et la réalisation de produits techniques à partir de placages bois. La démarche de traitement spécifique de la variabilité d'une ressource récoltée (et donc non maîtrisable) est très originale dans le cursus Arts et Métiers et peut-être généralisable à d'autres matériaux naturels à fort potentiels (chanvre, lin, ...).

Quel JN pour le déroulage du bois et la fabrication de placages ?

Le LaBoMaP a construit une plateforme technique instrumentée dédiée au déroulage unique au niveau international (figure 1). Elle se distingue par son échelle industrielle, par la richesse et la diversité des données qui sont tirées du procédé en temps réels (efforts de coupe, température couteau, épaisseur des placages, profil local des placages, données automate dérouleuse et massicot, cartographie de l'orientation locale des placages comprenant angle des fibres et humidité) et intégrées dans un seul logiciel évolutif développé par le LaBoMaP, Xylomat©, dans le cadre de l'Equipex Xyloforest.

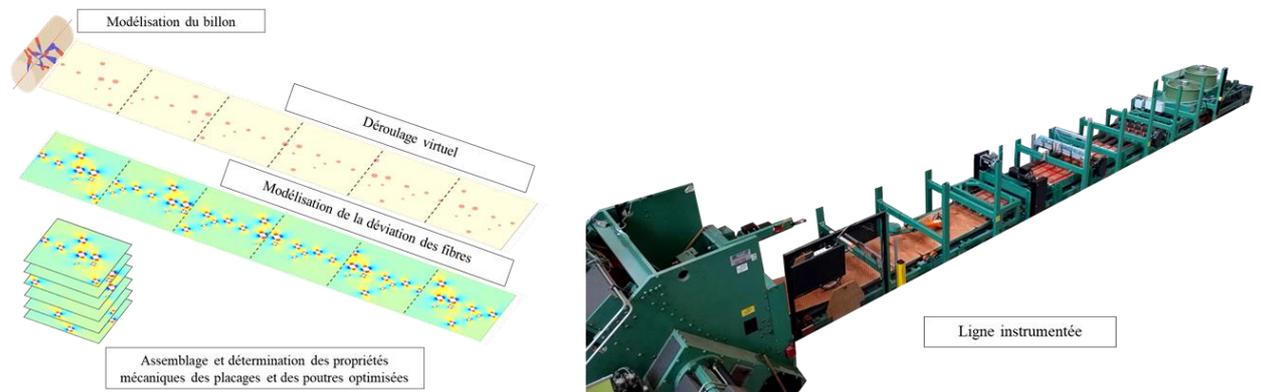


Figure E : Modèle numérique simplifié de placages déroulés (à gauche) et ligne de déroulage Equipex du LaBoMaP (à droite)

Etant donné la complexité des phénomènes physiques mis en jeu, c'est sur la base de ces données (via des modèles phénoménologiques ou par apprentissage, agrémentées de modèles physiques simples lorsque ce sera possible) que le JN pourra être construit dans un délai de 12 à 24 mois. Il devra permettre de reproduire les phénomènes de base observés lors du déroulage et propres aux machines tournantes en produisant un rendu réaliste des placages intégrant la texture du bois par des méthodes et outils de l'immersion virtuelle (réalité virtuelle et/ou augmentée). En particulier, le jumeau pourra simuler les différents phénomènes intervenants lors du déroulage et leurs manifestations (efforts, vibrations, épaisseur du placage, bourrelets locaux, flexion du billon) permettant la caractérisation de la maîtrise du procédé, la compréhension des phénomènes physiques en cours et la simulation des propriétés des placages fabriqués. Il sera développé et calibré

lors d'une première phase à partir de mesures existantes et à venir destinée à la formation des apprenants en présentiel. Cette première étape validée, le JN pourra ensuite être utilisé aussi en distanciel ou en autonomie afin de simuler des cas simples ou plus particuliers (intégrant ressource et application) tout en touchant un plus large public d'apprenants. Des méthodes et outils de l'interaction avec le jumeau numérique par des technologies de réalité virtuelle et réalité augmentée seront mises en œuvre pour permettre une appréhension optimale des phénomènes physiques intervenant dans le procédé. Des métaphores de représentation et d'interaction pourront également être étudiées afin d'adapter les niveaux de détails de la complexité des phénomènes au niveau d'expertise de l'apprenant.

Atelier Metz – Atelier forgeage VULCAIN



Figure A : Atelier de forgeage de Metz

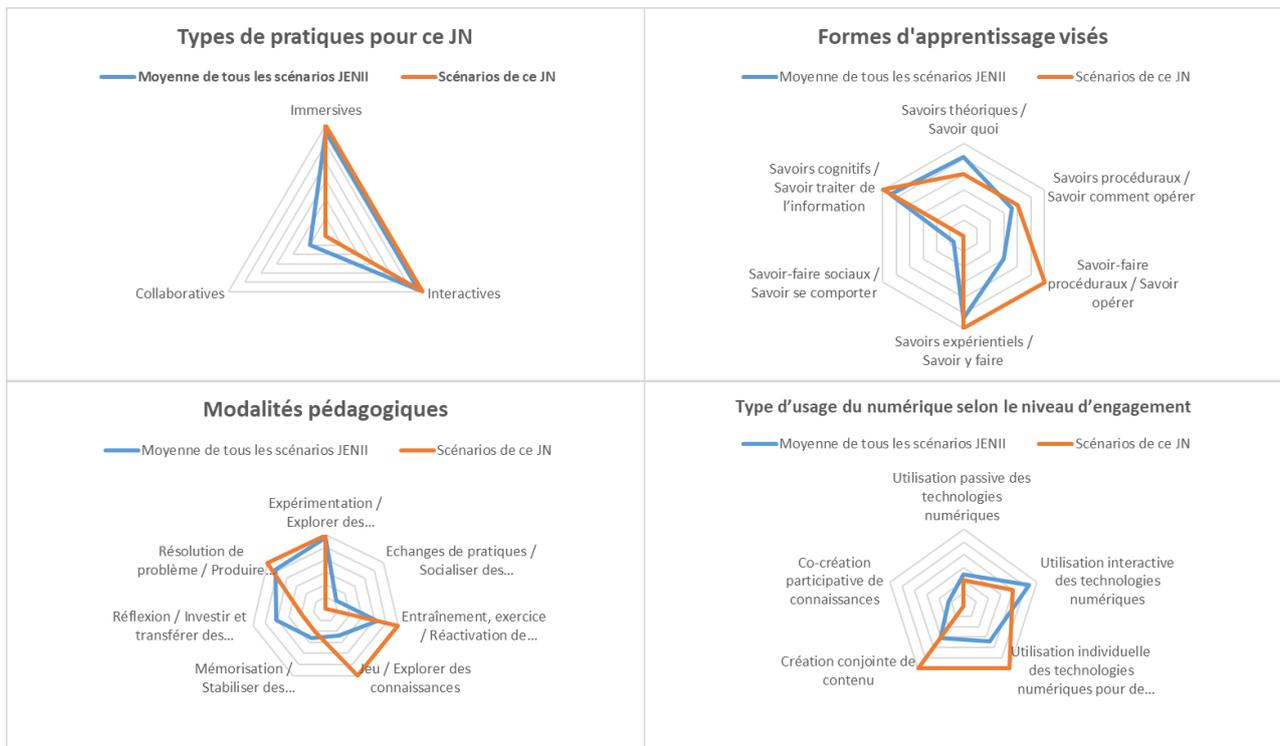


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

La plateforme Vulcain du campus Arts et Métiers de Metz est un îlot de forgeage robotisé, avec plusieurs technologies de presses pour la mise en forme des matériaux, et leur environnement de préparation comme les fours pour la mise en température des lopins par exemple. Les différents moyens sont

représentatifs du milieu industriel. La plateforme est instrumentée, et l'acquisition des données des capteurs est centralisée. Récemment, un service web sur le serveur d'acquisition centralisée a été installé ce qui permet de disposer des informations en temps réel sur téléphone ou tablette au pied de la machine.



Figure C : Atelier modélisé

Les enjeux pédagogiques :

Les objectifs d'un jumeau numérique pédagogique pour cette plateforme sont multiples et s'organiseront en différentes « briques » plus ou moins indépendantes les unes des autres :

1. Découvrir le procédé de forgeage en réalité virtuelle : A l'aide d'une représentation de la plateforme en réalité virtuelle immersive, des élèves pourraient devenir opérateur sur une installation industrielle de forge, sans risques ni pour eux, ni pour les installations. Dans cet environnement, ils pourraient y découvrir :
 - a. Une gamme de forgeage : il est possible d'envisager un débit de lopin, un chauffage (four), une préparation (préforme sur la presse hydraulique), un estampage (mise en forme en matrices fermées) un ébavurage (presse mécanique), en conditions de production industrielle, c'est-à-dire à paramètres opératoires prédéfinis. L'opérateur n'intervient que pour déclencher un cycle.
 - b. Le vocabulaire des opérations typique de forge et emboutissage : en utilisant tel ou tel moyen, il serait possible d'illustrer les opérations typiques de forgeage pour que les élèves enrichissent leur vocabulaire technique propre à ce métier (refoulement, bigornage, calibrage, étirage, filage inverse, filage direct,

- cambrage, enfonçage, débouchage, poinçonnage,)
- c. D'autres machines que celles disponibles physiquement sur le campus de Metz : dans l'environnement virtuel, il serait possible d'étendre l'usine de forgeage à d'autres îlots qui mettraient en œuvre d'autres technologies de machines de mise en forme (pilons, laminoirs à retour, laminoir circulaire, ...) que nous ne possédons pas encore.
 - d. les applications du procédé de forgeage : dans l'environnement virtuel, il pourrait être consacré un espace dédié à un showroom qui présenterait différentes pièces forgées, dans les différents secteurs économiques, en expliquant les raisons qui ont conduit au procédé de forgeage pour leur réalisation. Cet espace pourrait aussi mettre en valeur les travaux de recherche du LCFC autour de cette thématique.
2. Comprendre la technologie des machines : Dans la réalité virtuelle immersive, il faut envisager de pouvoir décomposer chaque machine, d'y montrer les éléments qui constitue le principe même de fonctionnement d'une presse hydraulique (vérin), d'une presse mécanique (système bielle manivelle), d'une presse à vis (accélération d'une masse par liaison hélicoïdale), etc. Il y sera associé les paramètres de commande de la machine et les principes physiques pour comprendre que tantôt on travaille en pression, tantôt à la course imposée, ou encoure à l'énergie délivrée.
 3. Comprendre le fonctionnement d'un outillage : Monter ou démonter un outillage de forgeage est complexe à mettre en œuvre lors d'une séance de travaux pratiques, d'une part à cause du temps que cela nécessite, et d'autre part à cause du poids des éléments qui nécessite le recours à des engins de levage qui nécessitent des habilitations. Avec l'environnement virtuel immersif, on pourrait envisager de procéder au montage / démontage et au réglage d'un outillage sans risque pour l'étudiant. Cela permettrait de faire comprendre certaines cinématiques d'outillages complexes, le rôle de la bavure de forgeage, etc.
 4. Comprendre le comportement des machines : les machines, si imposantes soient-elles, réagissent aux mêmes lois de la physique que n'importe quel mécanisme. C'est pourquoi lorsque ces machines sont en fonctionnement, leur structure subit des déformations élastiques (ce qu'on appelle cé dage de la machine en forgeage), ou doivent supporter des vibrations. A l'aide de la réalité virtuelle, mais également de la réalité augmentée, le jumeau numérique permettra de mettre en évidence ces phénomènes qui ne sont pas toujours perceptibles à l'œil nu mais qui sont importants à prendre en compte lors de la conception d'une gamme de forge.
 5. Réaliser un essai de refoulement et l'analyser : Inspiré d'un TP réalisé en présentiel sur la plateforme, il sera envisageable de construire un scénario de TP virtuel pour des élèves qui ne peuvent pas accéder à ce type d'installations. Le TP consiste à réaliser un refoulement de lopin (écrasement uniaxial d'un cylindre sur tas plans) en acier à chaud puis d'analyser le résultat pour déterminer la contrainte d'écoulement du matériau et le coefficient de frottement à l'interface lopin / outil. Le TP dans l'environnement virtuel immersif pourrait être réalisé :

- a. hors ligne : sans solliciter la plateforme, à l'aide de modèles réduits, il serait envisageable de demander à l'étudiant de régler quelques paramètres (influence de la température, du temps de maintien dans le four, de l'effort de consigne, ...) de son expérience pour que le jumeau numérique retourne des courbes d'effort et de déplacement en plus d'une visualisation du refoulement. L'élève pourrait ensuite exploiter les résultats.
- b. en ligne : en sollicitant cette fois ci la plateforme, l'étudiant réglerait toujours ses paramètres et pourrait commander l'installation à distance (avec une validation d'un opérateur sur place pour s'assurer de la sécurité). Les courbes d'effort et de déplacement ne seraient alors plus obtenues par modèles réduits mais directement par l'acquisition centralisée déjà installée in situ. Les

données acquises en temps réel pourraient être utilisées en réalité augmentée pour que l'opérateur ou un étudiant sur place puisse visualiser les courbes dans des lunettes RA ou visualiser le cépage de la presse de manière amplifiée.



Figure D : Vis sans fin de la presse

Atelier Paris – Atelier turbomachine



Figure A : Turbomachine

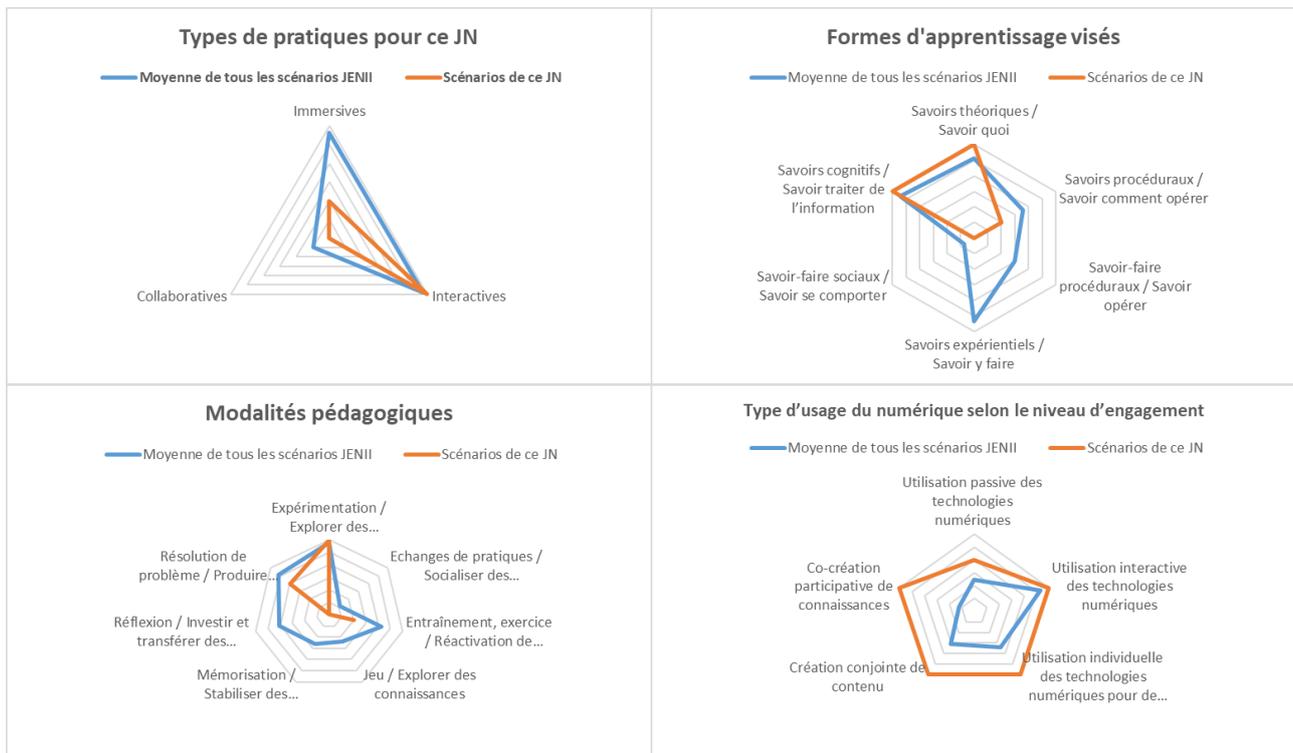


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

Les turbomachines sont omniprésentes dans les systèmes énergétiques. Leur fonctionnement et leur contrôle dans le système conditionnent les performances de ce dernier. La caractérisation de leurs performances est indispensable pour connaître leurs plages et limites de fonctionnement, quelle que soit l'application visée. Les instruments de mesure ainsi que l'ensemble de la chaîne d'acquisition sont choisis en fonction de la nature de l'application visée et des niveaux des grandeurs mesurées (pressions, températures, débits, ...). Dépendant de l'application et donc de la dimension de la turbomachine, la taille d'un banc d'essais de caractérisation peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres.

Dans le cadre de ce projet, il s'agira de mettre en place un jumeau numérique d'un réseau de banc de caractérisation de turbomachines mimant le fonctionnement réel de trois configurations de bancs existants au LIFSE. Les bancs en question sont destinés, en grande partie, à des actions de formation en énergétique et systèmes fluides. Les jumeaux numériques concerneront les configurations suivantes :

- Banc de turbine à gaz pédagogique instrumenté.
- Banc de stockage d'énergie hydropneumatique instrumenté.

Caractérisation d'éoliennes en soufflerie - deux échelles (l :1.0 x L :2.0 x H :0.8 m) et (l :8.4 x L :22.5 x H :5.5 m) – pour micro-récupération d'énergie et pour éoliennes de taille intermédiaire, respectivement.

Les dispositifs expérimentaux permettront une génération massive de données. Associées à des modèles réduits d'analyse et de caractérisation des turbomachines développés au sein du laboratoire et de l'apprentissage machine, ces données permettront de modéliser l'ensemble du banc incluant tous les autres composants (vannes, actionneurs, variateurs...), dans des problèmes multiphysiques concrets.

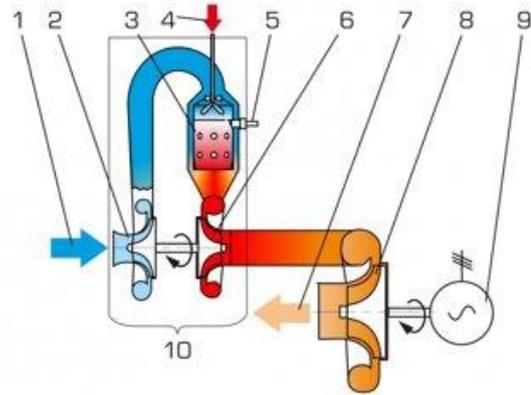


Figure C : Schéma fonctionnel du système (Scénario débutant, premier niveau de modélisation) :

1 air froid, 2 compresseur, 3 chambre de combustion, 4 combustible, 5 bougies, 6 turbine à haute pression, 7 échappement, 8 turbine de puissance, 9 générateur

Ainsi, la première installation est une turbine à gaz constituée d'un compresseur, d'une chambre de combustion, d'une turbine entraînant le compresseur et une turbine de puissance entraînant une génératrice électrique. Les paramètres de contrôle sont le débit de carburant et la vitesse de la génératrice électrique. Le dispositif est instrumenté en température, pression et débit. La mesure de débit est analogique. Elle pourrait être remplacée par un capteur numérique. L'ajout d'un échangeur de chaleur récupérateur permettrait aussi d'améliorer le rendement de l'installation. Les turbines à gaz sont un des moyens pilotables pour assurer l'équilibre du réseau électrique nécessaire lors du raccordement de sources d'énergie renouvelables fluctuantes. Le deuxième dispositif est constitué d'un réservoir d'eau, d'une pompe et d'un accumulateur initialement rempli d'air à pression atmosphérique. Lors de la mise en route de la pompe, l'eau puisée dans le réservoir est dirigée vers l'accumulateur où elle comprime l'air, réalisant ainsi un stockage de l'énergie. Ce problème couple des aspects hydrauliques et thermiques, rendant sa modélisation riche d'un point de vue pédagogique. L'action en soufflerie consiste à coupler une éolienne à une génératrice courant-continu, dans le but de

charger des piles rechargeables. L'adaptation du point de fonctionnement se fait via un convertisseur DC-DC piloté par un régulateur. Les dimensions réduites du problème (éolienne de 200mm, puissance de 10W, tensions de 5V) permettent notamment d'utiliser des éoliennes imprimées en 3D par dépôt de fil par les étudiants, et de minimiser les risques. La modélisation de ce système permet de coupler les acquis d'Énergétique et d'EEA.

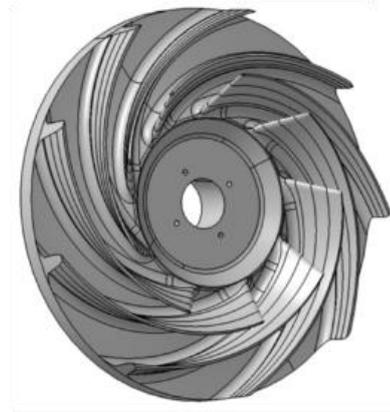


Figure D : CAO éolienne

Les Jumeaux du CNAM

Paris – Laboratoire de Chimie



Figure A : Laboratoire de Chimie

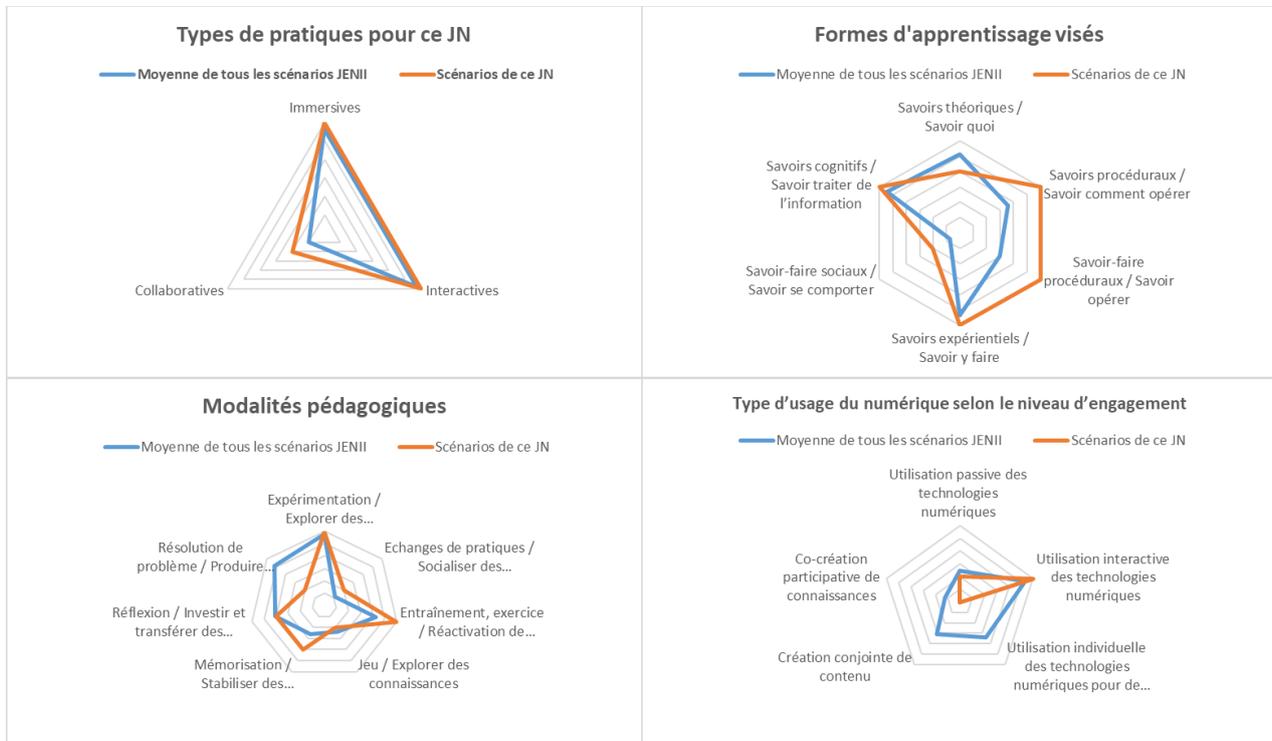


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

Contexte

Le besoin concerne le développement de simulations interactives pour entraîner les élèves, en toute sécurité, aux gestes techniques nécessaires pour la réalisation d'expériences et l'utilisation d'appareils de laboratoire dans le cadre des travaux pratiques, niveaux bac+1, RNCP 5 / Licence et ingénieur. Le besoin concerne le développement de la suite d'un outil pédagogique immersif d'aide à la formation en chimie pour les métiers des industries chimiques, pharmaceutiques et agroalimentaires permettant aux apprenants d'assimiler et de maîtriser plus rapidement les compétences clés et les bons automatismes en termes de procédures de sécurité permettant de réduire l'appréhension de l'apprenant lors du passage à la phase d'apprentissage en condition réelle. Constitué de plusieurs exercices, il permettra par une mise en situation virtuelle, d'acquérir les bons réflexes face aux dangers de coupures, d'inhalation de produits chimiques, de projections, de feu et d'électricité présents dans un laboratoire. Une approche d'apprentissage progressif est proposée avec 3 niveaux (débutant, avancé et expert). Sans prendre aucun risque, l'apprenant par exemple pourra assimiler le caractère à risque de certains produits et l'utilisation du matériel. Il sera possible de répéter à l'infini et de manière ludique l'expérience pour apprendre au mieux la manipulation et maîtriser le geste ensuite dans le monde réel. Cette approche sera pour les apprenants un outil d'aide à la décision dans le cadre du travail en laboratoire. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la numérisation des enseignements au Cnam, portée notamment par le projet CAP'VR "Enseignement en immersion pour les métiers des industries chimiques, pharmaceutiques et agroalimentaires : vers la réalité virtuelle et la simulation expérimentale interactive". Le projet CAPVR fortement soutenu par l'établissement a été engagé depuis juin 2020. Il concerne un consortium de disciplines scientifiques du Cnam (enseignants chercheurs, ingénieurs et

techniciens pédagogiques) et du monde socioéconomique. Ces jumeaux numériques seront une opportunité de poursuivre et d'approfondir cet investissement, par le développement de trois modules avec plusieurs exercices :

Le premier consacré à la sécurité renforcée en laboratoire.

Le second relatif aux expériences en chimie analytique et notamment la chromatographie et la distillation

Le dernier plus complexe puisqu'il nécessitera la modélisation d'un clone virtuel d'un laboratoire de Génie des procédés en lien avec les opérations unitaires principalement utilisées dans les industries de transformation de la matière.

Les compétences acquises dans ces modules pédagogiques seront évaluées via la plateforme VULCAN (produit de MIMBUS) qui permet de piloter les simulateurs dédiés à l'apprentissage du geste professionnel. Cette plateforme servira à la fois d'outil d'évaluation et d'analyse en temps réel des performances de nos élèves permettant in fine d'adapter les formations en fonction des besoins de chacun.

Un dispositif de Virtualité augmentée sur fond vert sera utilisé en cours.

Expression des exigences : les livrables

Les livrables du projet du jumeau numérique de laboratoires d'analyse et de Génie des Procédés de Chimie

Développements de :

1.a Module de sécurité : 2 exercices - explosion/implosion et Danger au feu

Ce premier module de sécurité concerne le développement d'un outil pédagogique immersif

d'aide à la formation en chimie pour les métiers des industries chimiques, pharmaceutiques et agroalimentaires. Il permet aux apprenants d'assimiler et de maîtriser plus rapidement les compétences clés et les bons automatismes en termes de procédures de sécurité permettant de réduire l'appréhension de l'apprenant lors du passage à la phase d'apprentissage en condition réelle. Constitué de plusieurs exercices, il permettra par une mise en situation virtuelle, d'acquérir les bons réflexes face aux dangers de coupures, d'inhalation de produits chimiques, de projections, de feu et d'électricité présents dans un laboratoire. Une approche d'apprentissage progressif sera proposée avec 3 niveaux (débutant, avancé et expert). Sans prendre aucun risque, l'apprenant par exemple pourra assimiler le caractère à risque de certains produits et l'utilisation du matériel. Il sera possible de répéter à l'infini et de manière ludique l'expérience pour apprendre au mieux la manipulation et maîtriser le geste ensuite dans le monde réel.

1.b Module de manipulation : 2 exercices chromatographie analytique - distillation

Ce second module concernera la finalisation d'un jumeau numérique d'un laboratoire d'analyse, ainsi que des exercices d'entraînement aux gestes complexes associés aux techniques analytiques, permettant une compréhension fine des phénomènes physico-chimiques associés à la chromatographie et de la distillation

1.c Module du batch au pilote (bioprocédés - génie des procédés) échanges de jeux de données

L'objectif de ce troisième module est de concevoir un jumeau numérique d'un laboratoire de génie des procédés. Les équipements consacrés aux opérations unitaires du génie chimique telles que, par exemple, l'extraction liquide-liquide ou la distillation y seront modélisés. Ces dispositifs seront développés pour apporter la plus-value pédagogique attendue tant sur les aspects théoriques que les aspects pratiques ce que seul permet le numérique. Les apprenants se familiariseront avec les concepts de base (modélisation des équilibres), la virtualisation (équipement en fonctionnement), la modélisation/simulation (interaction pour un dimensionnement de l'installation) et ainsi avoir une compréhension optimale des phénomènes mis en jeu.

1.c.1 Jumeau immersif d'un pilote d'extraction liquide liquide

1.c.2 Jumeau immersif de réacteurs/ bioréacteurs : 2 exercices

L'intégration et la connexion systématique des modules à la plateforme Vulcan et au système de virtualité augmentée

Paris – voiture électrique



Figure A : Citroën AMI

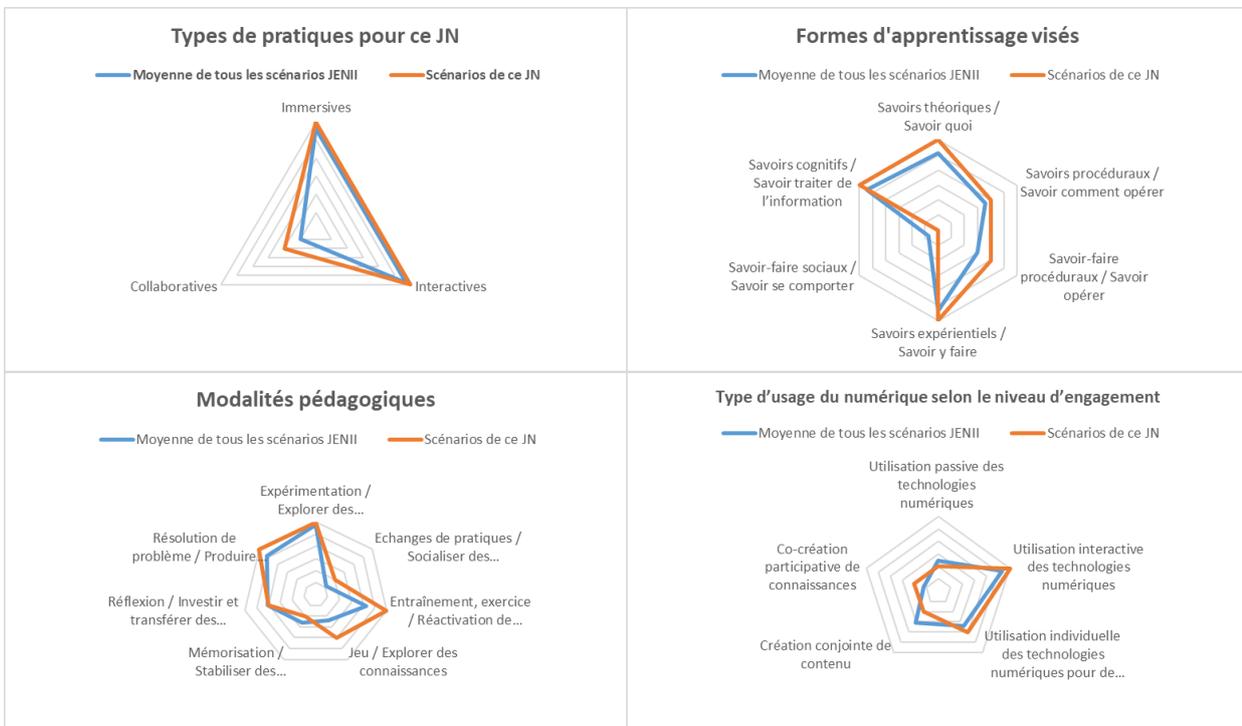


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

Contexte du projet

Les élèves ingénieurs spécialités énergétiques ou matériaux étudient les enjeux propres aux multi-systèmes complexes de l'industrie.

Le véhicule électrique urbain commercialisé par Stellantis, l'AMI, offre un tel exemple de système industriel complexe dont les problématiques multiples sont exemplaires pour ces disciplines.

Qu'en est-il des données fabricants dans différentes conditions de conduite, de climat, d'environnement urbain ? Peut-on procéder à des modifications de l'équipement du véhicule pour améliorer le confort thermique et/ou l'autonomie ? Peut-on remplacer certains composants ? Pour quels effets ?

Telles sont quelques-unes des questions qui se posent à l'apprenant ingénieur, iel les étudiera dans un environnement immersif au plus près des pratiques émergentes dans les ateliers de conception de l'industrie automobile.

Expression des besoins

Acquérir un véhicule AMI de Stellantis, l'équiper de capteurs et recueillir les données de ces capteurs sur banc d'essai de plateau technique ainsi que dans toutes sortes de conditions de circulation urbaine et enfin, permettre aux apprenant·es de concevoir de tels essais et pour en extraire des données d'intérêt.

Effectuer le calcul des données de simulation de l'air, sous code Saturne, un CFD open source développé par EDF pour simuler et visualiser la circulation de fluides et les échanges thermiques dans l'habitacle. Ces données se présentent sous la forme de coordonnées spatiales auxquelles sont associées en chaque point des données de température, de pression, de vitesse et de masse volumique.

Acquérir un logiciel de simulation de circulation d'un véhicule électrique pour la mise en œuvre du lot 3 détaillé ci-dessous

Les compétences acquises dans ces modules pédagogiques seront évaluées via la plateforme VULCAN (produit de MIMBUS) qui permet de piloter les simulateurs dédiés à l'apprentissage du geste professionnel. Cette plateforme servira à la fois d'outil d'évaluation et d'analyse en temps réel des performances de nos élèves permettant in fine d'adapter les formations en fonction des besoins de chacun.

Un dispositif de Virtualité augmentée sur fond vert sera utilisé en cours.

Expression des exigences : les livrables

Les livrables du projet

3.a Module d'apprentissage des contraintes d'un multi-système complexe de type véhicule électrique grand public

- AMI
- Environnement général
- Mise en œuvre des scénarii associés à ce module :
- Visualisation des données de simulation en immersion avec possibilité de faire varier les conditions d'observation (circulation, type de route, atmosphère, jour/nuit etc.)
- Visualisation des données des capteurs de l'AMI équipée (autonomie de la batterie ; puissance du moteur etc.)

3.b Module d'apprentissage d'amélioration du confort thermique

- Buses de ventilation
- Jeu de mannequins 3D humains.
- Matériau opaque plafonnier du véhicule
- Mise en œuvre des scénarii associés à ce module :

- Ajout dans différents emplacements, de buses de ventilation paramétrables (diamètres, température, vitesse d'aération).
- Placement des mannequins dans l'habitacle ; affichage par fausses couleurs des données d'intérêt sélectionnées (température, air en circulation);
- Remplacement de la vitre du toit par un matériau opaque ;
- Visualisation des données de simulation en immersion avec possibilité de faire varier les conditions d'observation (circulation, type de route, atmosphère, jour/nuit etc.) ;
- Visualisation des données des capteurs de l'AMI équipée (autonomie de la batterie ; puissance du moteur etc.)
- Création d'un environnement 3D constructible et paramétrable pour créer un circuit et reproduire différentes conditions climatiques afin d'y faire circuler virtuellement l'AMI à l'échelle 1
- Mise en œuvre des scénarii associés à ce module :
- Choix de composants alternatif à expérimenter sur un circuit d'intérêt
- Création d'un circuit et détermination des conditions extérieures
- Visualisation temps réel de l'évolution des données utiles des composants retenus (autonomie de la batterie, consommation électrique, température de la batterie etc.) en fonction du déplacement de l'AMI sur le circuit assemblé.

Traitement des données :

Appel des données de simulation correspondantes aux choix de l'apprenant, pré-calculées par CFD et paramétrées avec les données du véhicule réel en référence.

3.c Module d'apprentissage composants alternatifs et matériaux biosourcés

- Les composants sous le capot, vue générale ;
- Briques d'environnement à assembler pour construire un circuit (portions de routes – pentes, côtes, plat, virages ; Feux rouges, stop, embouteillages ; conditions climatiques (grand froid, forte chaleur, vent violent), nuit/jour etc.) ;

Traitement des données :

Coupler les données de simulation issues du choix de composants de la bibliothèque Open-Modelica et celles du véhicule électrique sur le circuit assemblé ;

Couplage des données de simulation avec les données issues des capteurs

3.d L'intégration et la connexion systématique des modules à la plateforme Vulcan et au système de virtualité augmentée

Paris – Avion léger



Figure A : Avion léger Zenair CH601 UL (voilure = 9m)

Contexte du projet

Acquisition d'un avion léger Zenair CH601 UL pour les besoins des différentes disciplines que couvre le domaine de l'enseignement aéronautique du Cnam.

1. Mécanique des structures

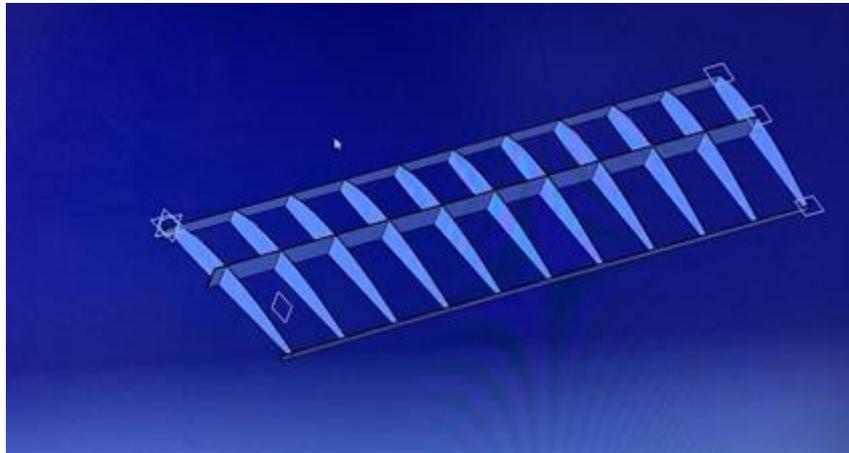


Figure B : Aile

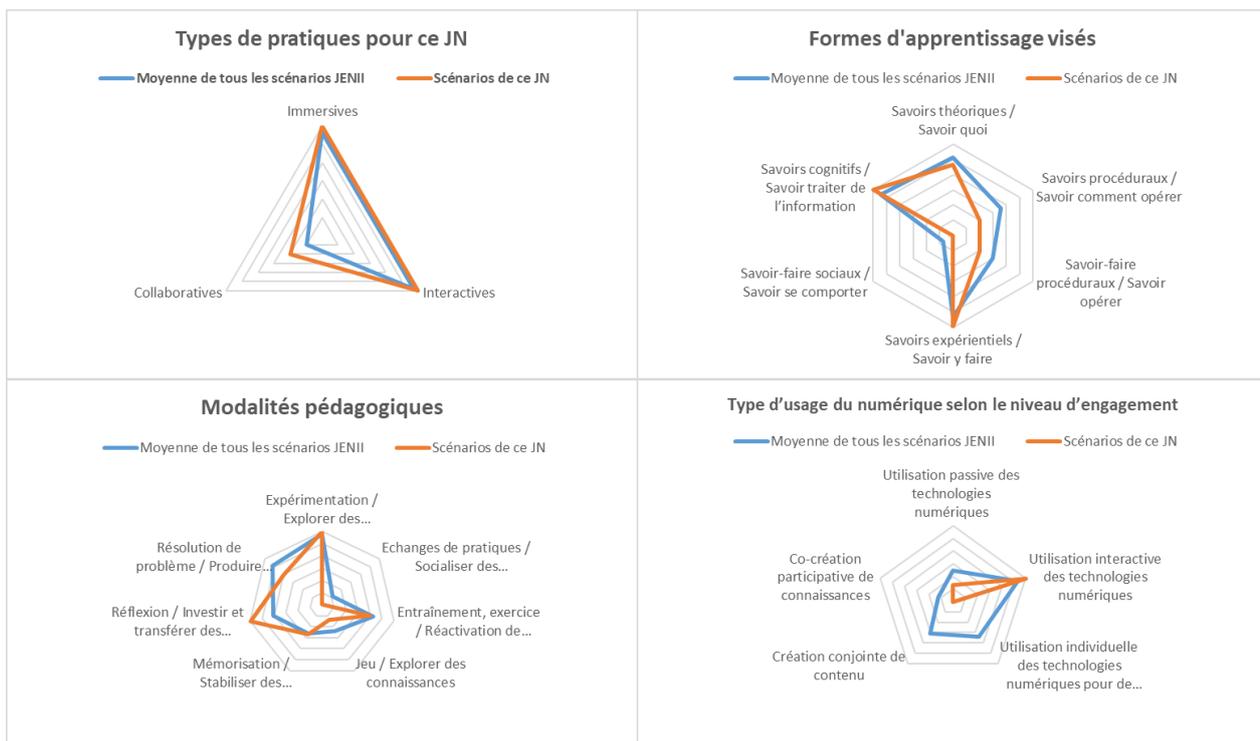


Figure C : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

Le contexte

L'objectif pour les élèves ingénieur-es aéronautiques en mécanique des structures est d'être mis en situation de bureau d'étude afin de dimensionner un avion réel c'est à dire s'assurer qu'il est conforme au cahier des charges réglementaires et donc, apte à voler.

Pour cela, l'apprenant-e doit savoir effectuer toute une batterie d'essais mécaniques avec une variété de matériel expérimental. Dans sa vie professionnelle il mettra au point ces essais via un simulateur du marché avant de conduire les essais sur l'avion réel. De tels simulateurs ne reproduisent qu'imparfaitement la physique des structures, il est donc crucial de former les futurs ingénieur-es à prendre la pleine mesure des approximations liées au simulations et de savoir apporter les correctifs nécessaires à leur modèle.

Offrir aux élèves ingénieur-es de cette discipline la possibilité d'apprendre à manier le matériel expérimental et maîtriser les gestes associés à des essais mécaniques probants sur un jumeau numérique dont la physique des structures est mathématiquement modélisée de manière à être conforme à celle de l'avion réel : tel est l'objectif de ce volet du jumeau immersif de l'avion léger.

La conception d'un tel modèle mathématique (sans équivalent dans le monde industriel) nécessite de lever trois principales problématiques scientifiques :

Le laboratoire de Mécanique des Structures et des Systèmes Couplés du Cnam se propose de lever deux problématiques via un sujet de thèse qui visera à modéliser mathématiquement la mécanique de l'avion. Un tel modèle produira une grande richesse de données expérimentales répondant en temps réel aux sollicitations mécaniques du matériel expérimental mis en œuvre par l'apprenant-e. Ce modèle ambitionne de reproduire les mesures expérimentales avec les erreurs associées, qu'elles soient liées aux

maladresses de l'apprenant, aux incertitudes des appareils de mesures ou encore aux variations de l'environnement (température par exemple).

Première problématique :

Construction d'un modèle mathématique complet de la physique statique de l'avion, mêlant une grande quantité de mesures expérimentales réalisées une fois pour toute à un modèle numérique réduit. La réalisation de ce modèle fera probablement appel à de l'apprentissage automatique ("machine learning").

Seconde problématique :

Enrichissement de ce modèle mathématique complet de la physique statique de l'avion par de la physique dynamique (en données expérimentales et numériques) nécessitant la manipulation d'une quantité de données beaucoup plus importante ("Big data").

Troisième problématique :

La dernière problématique réside dans la visualisation en temps réel des données expérimentales du modèle produites en réaction à la mise en œuvre par l'apprenant du matériel expérimental dans un cadre immersif et interactif. En effet, les données générées par le modèle mathématique devront être traduites rapidement en données interprétables par l'environnement virtuel ce qui suppose un traitement spécifique des données, au sein de l'environnement numérique.

Avec pour finalité de développer plusieurs modules de formation visant la mise en œuvre d'essais statiques et dynamique sur une structure d'avion en réalité virtuelle.

Les acquis d'apprentissages seront évalués via la plateforme VULCAN (produit de MIMBUS) qui

permet de piloter les simulateurs dédiés à l'apprentissage du geste professionnel. Cette plateforme servira à la fois d'outil d'évaluation et d'analyse en temps réel des performances des apprenant-es permettant in fine d'individualiser les formations.

Un dispositif de Virtualité augmentée sur fond vert sera utilisé en cours.

Expression des exigences : les livrables

Les livrables du sous-projet

2.a Module d'apprentissage d'essais mécaniques statiques sur jumeau immersif

CAO et infographie de l'aile de l'avion léger Zenair CH601 UL ;
Jauges de déformation et emplacements associés ;
Pont d'extensométrie ;
Jauge de déplacement ;
Environnement général ;

Mise en œuvre des scénarii associés à ce module :

Placements des jauges de déformation et mise en œuvre de la chaîne d'acquisition des mesures via un Pont de Wheastone (pont d'extensométrie) ; Recueil des mesures ;
Placement de la jauge de déplacement et recueil des mesures ;
Traitement des données :
Couplage des données du simulateur de pont d'extensométrie au modèle mathématique statique ;
Couplage des données du modèle mathématique statique au pont d'extensométrie ;
Couplage des données du modèle mathématique statique à la visualisation

des déformations et déplacements en vue immersive

2.b Module d'apprentissage d'essais mécaniques dynamiques sur jumeau immersif

- Marteau de choc
- Pot vibrant
- Accéléromètre ;
- Environnement général ;
- Mise en œuvre des scénarii associés à ce module :
- Mise en œuvre des gestes et de la chaîne d'acquisition des mesures liée aux essais avec marteau de choc ; Recueil des mesures ;
- Mise en œuvre des gestes et de la chaîne d'acquisition des mesures liée aux essais avec pot vibrant et accéléromètre ; Recueil des mesures.

Traitement des données :

- Couplage des données du simulateur de marteau de choc au modèle mathématique dynamique ;
- Couplage des données du simulateur de pot vibrant au modèle mathématique dynamique ;
- Couplage des données du simulateur d'accéléromètre au modèle mathématique dynamique ;
- Couplage des données du modèle mathématique dynamique à la vue immersive ;

2.c L'intégration et la connexion systématique des modules à la plateforme Vulcan et au système de virtualité augmentée

2. Aérodynamique

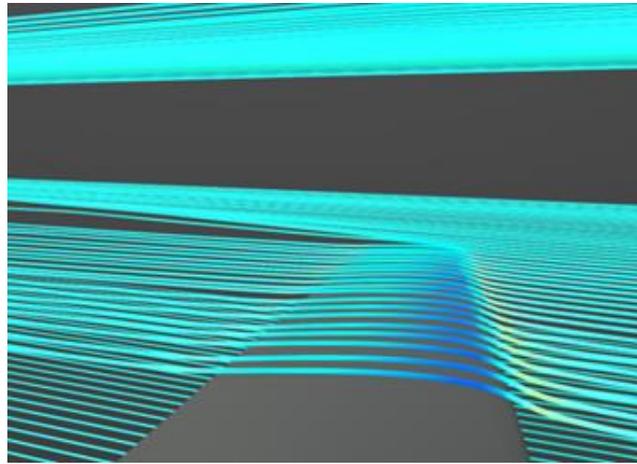


Figure D : Phénomènes aérodynamiques

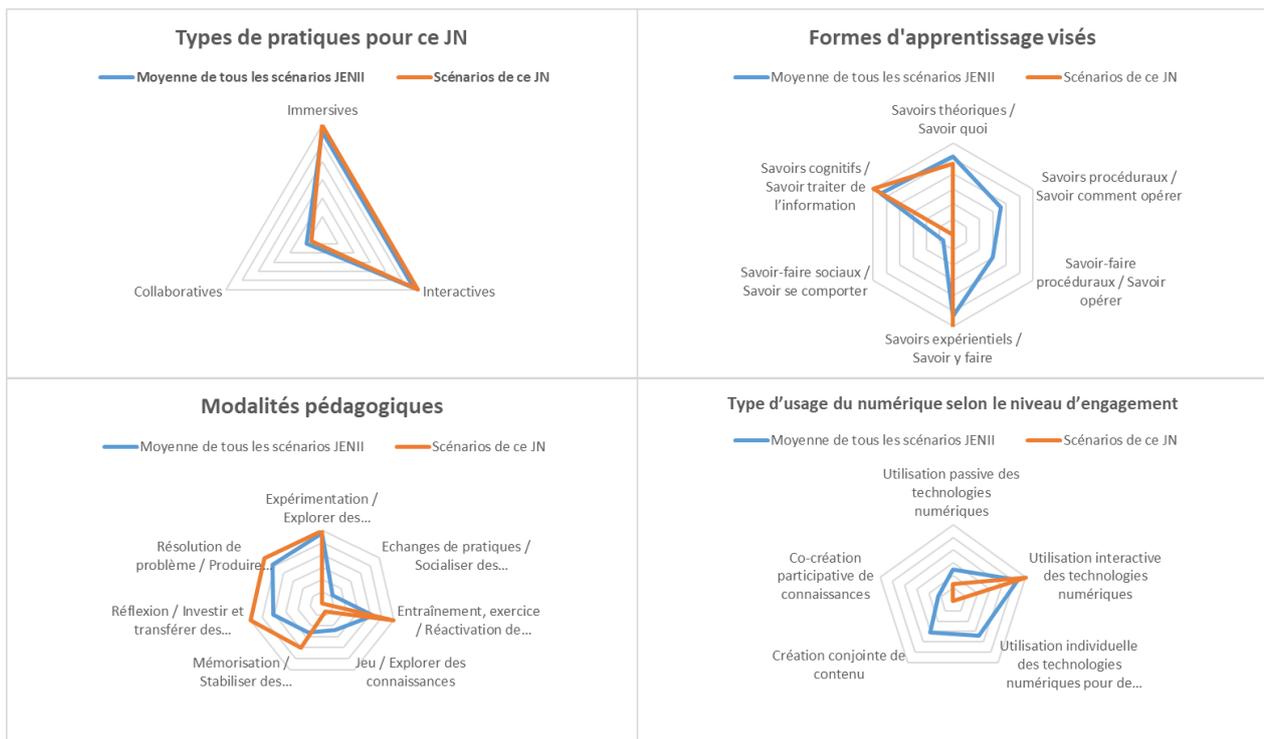


Figure E : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

Expression des besoins : le contexte

Les outils pédagogiques actuellement utilisés dans les formations en aérodynamique sont principalement de deux types. Les outils expérimentaux (type souffleries et banc d'essai) permettent la mise en évidence rapide des phénomènes aérodynamiques importants à travers l'exploitation de données issues de capteurs, mais leur utilisation pédagogique peut s'avérer lourde à mettre en place et les moyens de visualisation directe des écoulements sont très imparfaits voire inexistant. D'autre part, les outils numériques utilisant des logiciels de simulation permettent une visualisation plus complète des écoulements, mais les temps de restitution et la prise en main des logiciels nécessitent souvent de nombreuses itérations entre l'apprenant et l'enseignant. Ces délais contribuent souvent à brouiller le discours pédagogique voulant se focaliser sur l'identification et la compréhension des phénomènes importants. Dès lors il devient intéressant de vouloir associer les aspects de visualisation directe apportés par la simulation aux aspects interactifs et rapides apportés par l'expérimentale. Ainsi la création d'un laboratoire virtuel de mécanique des fluides consiste à combiner l'environnement immersif et interactif de la réalité virtuelle (VR) avec des outils de simulation numérique précis et rapides permettant la simulation et l'interaction avec un écoulement d'air virtuel autour d'un avion virtuel. Il devient alors possible de visualiser et donc de comprendre en interagissant en temps réel avec l'écoulement responsable des phénomènes aérodynamiques intervenant dans la conception d'un avion.

Il sera par exemple envisageable pour les apprenants de pouvoir librement tester, en temps réel, les effets de modifications de formes aérodynamiques sur les quantités d'intérêt pour l'ingénieur et ainsi de mieux comprendre les solutions technologiques appliquées dans l'industrie. Une telle flexibilité n'est possible ni en

soufflerie (les modèles d'essais sont prédéfinis) ni en simulation numérique « traditionnelles » (où les temps de mise en œuvre dépassent le cadre d'un cours). Par ailleurs, la capacité à concevoir, tester et valider rapidement un prototype grâce à la VR est un axe de développement envisagé dans l'industrie du futur.

La conception d'un tel noyau de calcul nécessite de lever 3 principales problématiques scientifiques :

Le Laboratoire DynFluid se propose de lever 2 verrous en développant en interne via un sujet de thèse deux solveurs de calcul un lagrangien et un autre Eulérien LBM, On pourrait ensuite connecter le solveur lagrangien soit au solveur Eulérien LBM soit à directement lui demander l'intégration des mouvements de particules lagrangiennes dans un champ de vitesse arbitraire pour expliquer les mathématiques avant la physique, ce qui difficile à faire en cours classique.

La première problématique réside dans le développement d'algorithmes de calcul combinant vitesse d'exécution et précision des résultats. En effet les techniques actuelles utilisées dans le rendu 3D d'environnement fluide utilisent des méthodes de calcul trop peu précises pour être physiquement acceptables et restent donc pédagogiquement inexploitable.

La seconde problématique réside dans la prise en compte de géométrie complexe et évolutive nécessaire dans l'interactivité imposé par un laboratoire virtuel. En effet l'inclusion d'une géométrie quelconque pouvant être modifiée par l'utilisateur, dans le calcul numérique nécessite des algorithmes adaptés permettant de garder une bonne précision au voisinage de la paroi.

La dernière problématique réside dans la visualisation en temps réel des résultats dans un

cadre immersif et interactif en connexion avec les solveurs. En effet, les données générées par le noyau de calcul devront être traduites rapidement en données interprétables par l'environnement virtuel et donc un traitement spécifique des données au sein de l'environnement numérique.

Avec pour finalité de développer plusieurs modules de formation en réalité virtuelle.

Les compétences acquises dans ces modules pédagogiques seront évaluées via la plateforme VULCAN (produit de MIMBUS) qui permet de piloter les simulateurs dédiés à l'apprentissage du geste professionnel. Cette plateforme servira à la fois d'outil d'évaluation et d'analyse en temps réel des performances de nos élèves permettant in fine d'adapter les formations en fonction des besoins de chacun.

Un dispositif de Virtualité augmentée sur fond vert sera utilisé en cours.

Expression des exigences : les livrables

Les livrables du sous-projet

2.d Module 1 pour le développement d'un module d'apprentissage pour observer les déplacements de particules lagrangiennes dans un champ de vecteur issus du solveur lagrangien.

2.e Module 2 pour le développement d'un module pour observer et étudier les champs de données issues du solveur Eulérien (4 exercices)

2.f Module 0 de démonstration basé sur la modélisation des équipements et environnements d'une soufflerie, liés aux 2 modules d'apprentissage ci-dessus et permettant à l'utilisateur de faire des manipulations d'objets renseignés visuellement dans un mode immersif.

2.g L'intégration et la connexion systématique des modules à la plateforme Vulcan et au système de virtualité augmentée

Paris – Atelier démantèlement centrale nucléaire



Figure A : Illustration démantèlement © CEA

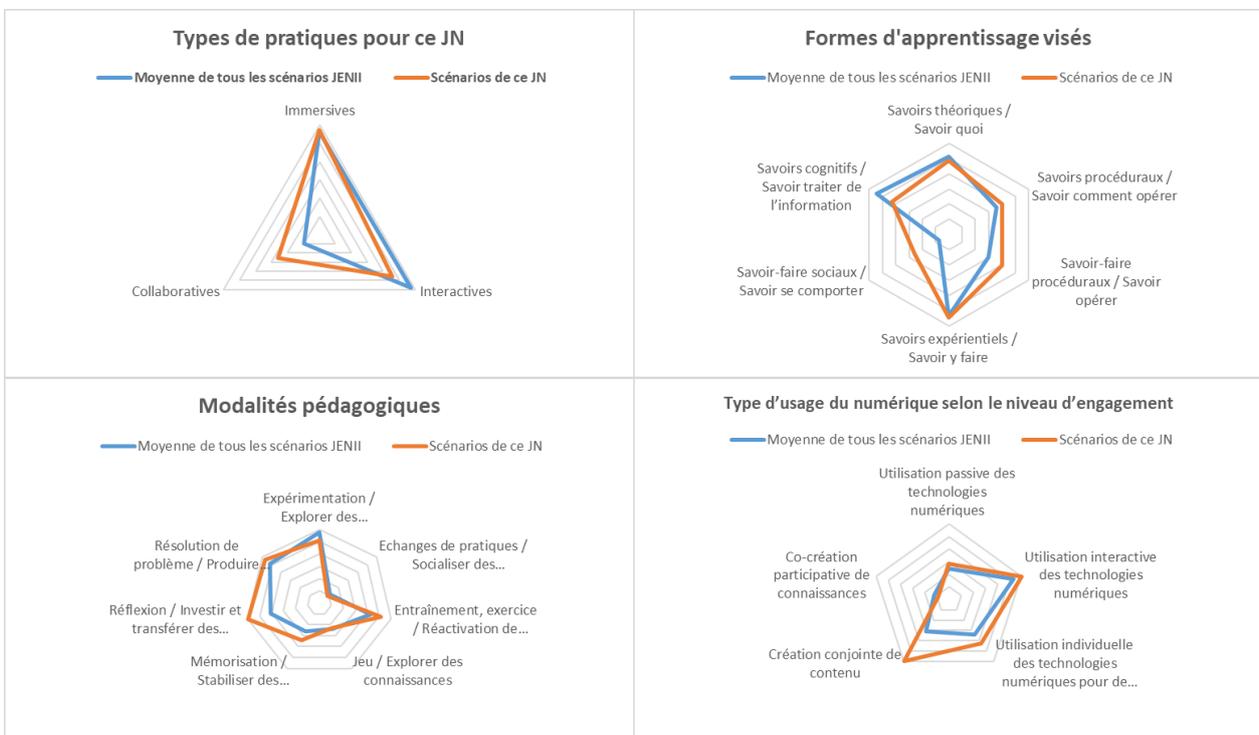


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

Contexte du projet

Les besoins en formation dans le domaine de l'ingénierie d'intervention en milieu ionisant sont énormes et les contraintes métiers y sont très spécifiques. Pour la sécurité des travailleurs, pour celle de nos concitoyens et pour les générations futures qui hériteront des déchets liés au démantèlement notamment, il est impératif de former les futurs ingénieurs à ce type d'intervention. Outre le nucléaire, plusieurs branches métiers sont concernés par ces chantiers, ce projet s'attachera à associer les compétences du génie civil, de la mécanique et de l'électricité.

Expression des besoins

Besoin de former les futurs ingénieurs à l'organisation d'un chantier de démantèlement en milieu radioactif dans le respect des normes en vigueur en prenant en compte les contraintes de coût et de temps. Besoin également de sensibiliser les jeunes aux débouchés professionnels de cette branche d'activité.

L'idée est d'immerger les apprenants dans le contexte d'un chantier en milieu radioactif réaliste et de les amener à en optimiser la gestion. Le projet doit intégrer des étapes de génie civil, de gestion de flux de déchets, de réglementation et des obstacles techniques incluant des problématiques de contamination et d'équipements de sécurité appropriés. Une évaluation doit être incluse.

Exigences du produit final :

Des applications de RV pour réaliser des interventions virtuelles ayant pour finalité l'entraînement des apprenants aux contraintes de ce type de chantier.

Les compétences acquises dans ces modules pédagogiques seront évaluées via la plateforme VULCAN (produit de MIMBUS) qui permet de piloter les simulateurs dédiés à l'apprentissage du geste professionnel. Cette plateforme servira à la fois d'outil d'évaluation et d'analyse en temps réel des performances de nos apprenants permettant in fine d'adapter les formations en fonction des besoins de chacun.

Expression des exigences : les livrables

Les livrables du projet

Module 1 : Choisir les équipements de sécurité adapté au risque radiologique de la salle à démanteler;

Module 2 : Procéder à la détection des rayonnements et cartographier la salle à démanteler ;

Module 3 : dimensionner le chantier et l'équiper de sas ;

Module 4 : concevoir l'installation électrique du chantier de démantèlement ;

Module 5 : Concevoir et Installer un échafaudage adapté ;

Module 6 : Découper de façon approprié les structures en présence ;

Module 7 : Procéder à l'entreposage des fûts et sacs de déchets en vue de son évacuation vers le lieu de stockage ;

L'intégration et la connexion systématique des modules à la plateforme Vulcan et au système de virtualité augmentée

Les Jumeaux de CESI

Rouen – Usine Flexible de Production



Figure A : Atelier CESI Rouen jumeau physique et jumeau numérique

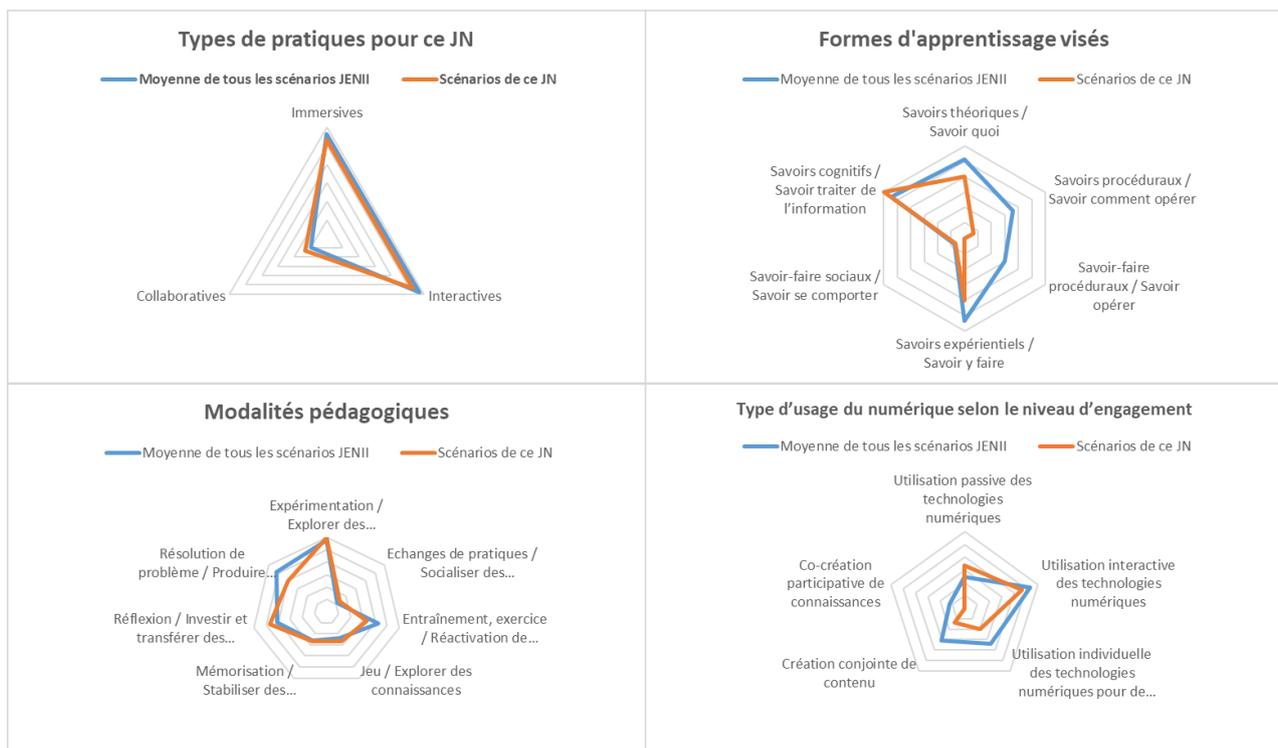


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

La plateforme Usine Flexible de Production est installée sur le campus CESI de Rouen. Celle-ci reproduit un atelier de production modulaire intégrant une ligne de production automatisée, des postes manuels industriels pour des opérations

d'assemblages et de contrôles qualité, des AGVs (robots mobiles) pour le transports des pièces et produits, des robots manipulateurs, des cobots pour des tâches d'assemblages collaboratives, des IIoT pour l'échange de données, ou encore des

interfaces Humain-machine basées sur de la réalité augmentée ou de la réalité virtuelle pour assister ou former aux opérations d'assemblages ou de maintenances. Le jumeau numérique et l'échange de données avec le jumeau physique s'appuient sur différents outils et technologies : OPC UA, simulation robotique avec ROS/Gazebo ou Webots, Unity 3D, simulation de flux avec Flexsim, ... Les applications pédagogiques sont dans les domaines de l'organisation et de la performance industrielle, de la maintenance, du numérique, de l'IA, de la cyber-sécurité et bien sûr des usages des technologies dites de l'industrie du futur telles que la robotique/cobotique, les jumeaux numériques ou encore la RA/RV. Les différents sous-systèmes de cette usine flexible de production associés aux jumeaux numériques en cours de développement sont présentés ci-après. Ces développements

s'appuient sur les travaux de R&D réalisés par CESI LINEACT et portant notamment sur l'architecture d'échange de données entre le Jumeau Numérique et les composants physiques du système de production et sur les architectures permettant la conception d'environnements virtuels collaboratifs et intégrés au Jumeau Numérique de notre plateforme industrie du futur (Havard et al., 2017, 2019a, 2019b, 2020). Une partie des développements est réalisée en collaboration avec Oreka Ingénierie et ils s'appuient sur le framework INTERVALES (INTERactive Virtual and Augmented framework for industrial Environment and Scenarios), issue de la R&D entre Oreka Ingénierie et CESI LINEACT, framework permettant la conception et la scénarisation d'Environnements Virtuels ou Augmentés dans un contexte industriel (Richard et al., 2021a, 2021b).

Chaîne de production didactique

La chaîne de production didactique FESTO est composée de 6 modules reconfigurables permettant de simuler l'assemblage de téléphones portables.

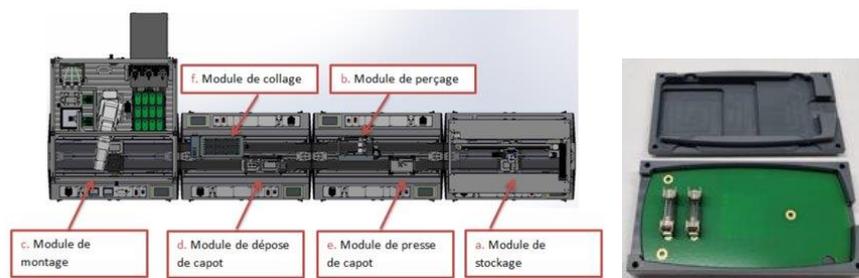
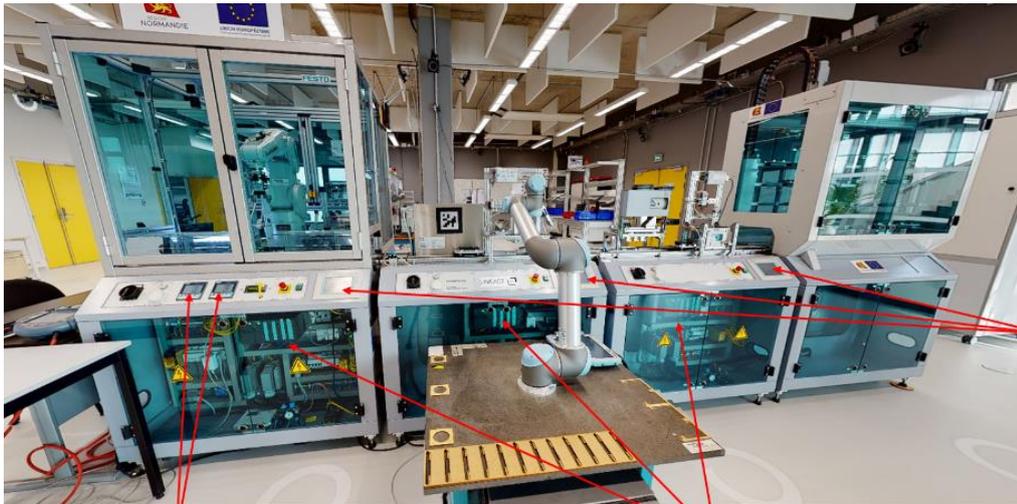


Figure C : Présentation ligne automatisée FESTO et produit



Affichage de la consommation électrique instantanée

Automate SIEMENS

- Écran de retour
- Contrôle MES et mode circuit fermé
 - Affichage du produit et de l'opération en cours
 - Programmation de la puce RFID en local
 - Mise en loop du process
 - Programmation du changement d'étape du produit

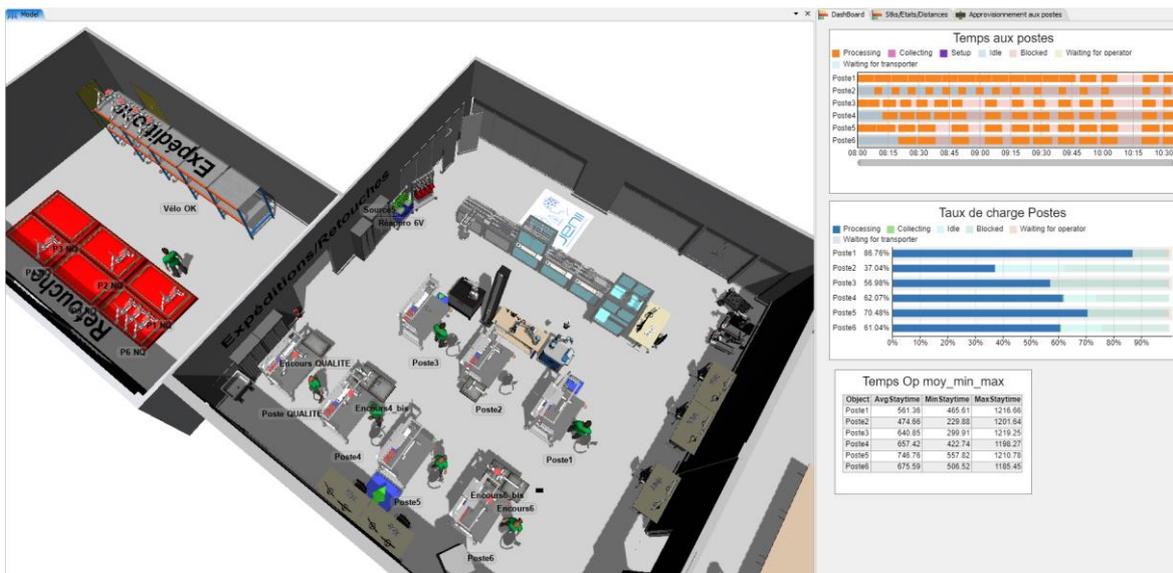
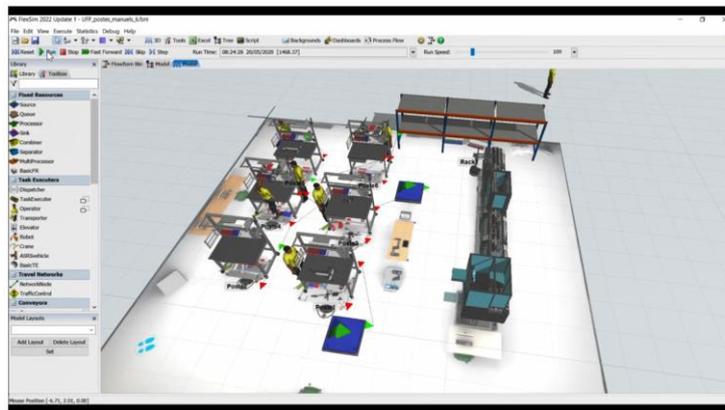


Figure D : Chaîne de production automatisée et son jumeau numérique en cours de développement

Exemples d'activités :

- Analyse du processus de fabrication et de maintenance
- Proposition d'amélioration des différents éléments de la chaîne de fabrication
- Intégration de robots mobiles à la chaîne de production
- Analyse de la connectivité et transfert de produit entre la chaîne automatisée et les postes manuels

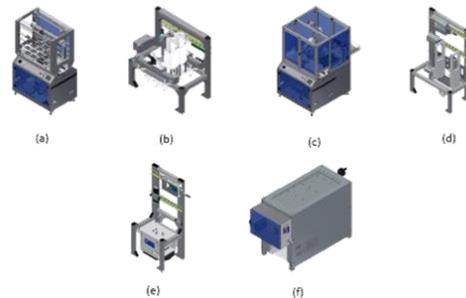


Figure E : Illustrations des 6 modules de la ligne de production (a) stockage, (b) perçage, (c) assemblage, (d) dépose de capot, (e) presse de capot pour la fermeture, (f) collage du boîtier fini

Postes manuels industriels

Une seconde partie de l'usine flexible est composée de 6 postes manuels industriels permettant l'assemblage d'un produit (Vélo INFENTO).

Exemples d'activités :

- Analyse du processus de fabrication
- Mise en avant des problématiques rencontrées
- Mise en place des outils de performance industrielle
- Intégration d'un poste cobotique
- Essais et présentation des améliorations utilisées
- Intégration de la RA pour assister l'opérateur



Figure F : Postes manuels physiques et virtuels



Figure G : Postes manuels et jumeau numérique en cours de développement.

Robots, cobots et AGV

L'atelier de production intègre également différents robots pour les tâches de logistique internes, d'assemblage ou d'assistance.

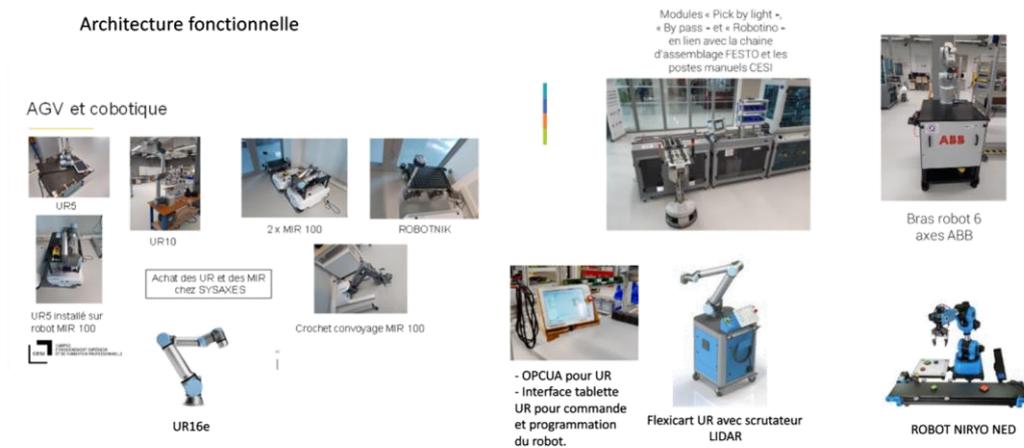


Figure H : Cobots



Figure I : Robotique et jumeau numérique

Interactions Humains-Machine et Jumeau numérique (RA, RV et desktop)

Le jumeau numérique interfacé en RA ou RV se décompose en briques modulaires (simulations 3D, RV, robotique, de flux, maquettes numériques, vidéos, données et documentations, ...) associées à des ressources pédagogiques. Exemples d'activités :

- RA sur le système réel, sur un poster ou sur un système à échelle réduite imprimé en 3D pour la visualisation d'une gamme de maintenance ou d'assemblage
- RV pour l'implantation de l'atelier de production, l'étude des postes dont l'ergonomie du poste cobotique, la simulation des assemblages, la découverte des 7 gaspillages, l'interaction avec les robots mobiles, ...
- 3D PC à travers le datalab CESI (VMs) : simulation de flux, découverte de l'atelier,

simulation robotique, découverte des 7 gaspillages, ...

- Programmation des équipements via clavier souris ou écran tactile (UR, modules chaîne de production) pour certaines formations (ex: formation en informatique/robotique sur ROS)



Figure J : Réalité augmentée



Applicatif en Réalité Virtuelle (PC+casque sur campus)



Applicatif 3D PC (Via Digitalab CESI)



Figure K : Jumeau numérique interfacé en RA ou RV

Nanterre – Unité de Fabrication Additive Métallique



Figure A : Unité Autonome de Fabrication Additive Métallique de Nanterre

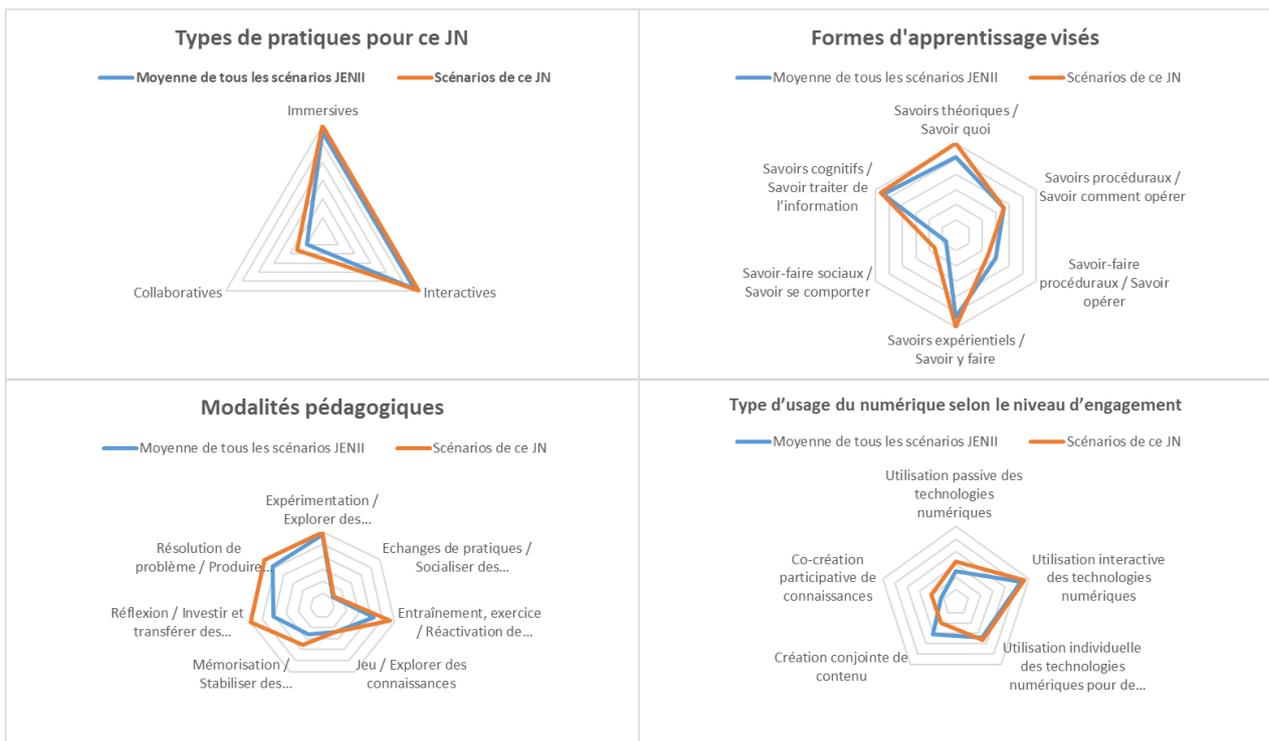


Figure B : Cartographie pédagogique (3 - Très dominante / 2 - Moyennement dominante / 1 - Peu dominante / 0 - Non prévue)

La plateforme **Unité Autonome de Fabrication Additive Métallique** est installée sur le campus CESI de Nanterre. Celle-ci est dédiée à l'impression 3D de pièces métalliques en procédé de fusion de poudre par laser. Concept innovant d'usine modulaire et transportable, développé et breveté par CESI en 2019 et 2020, cette plateforme permet une exploitation pédagogique dans les domaines de la fabrication additive, du génie industriel, de la maintenance, ou encore de la qualité et des risques industriels.

Cette unité dédiée à l'enseignement et à la recherche en FAM, de 120 m² et conçue de manière modulaire, respecte les normes ATEX et CMR afférentes à l'utilisation des poudres métalliques et fait donc l'objet d'une déclaration ICPE.

Malgré les contraintes d'accès HSE de l'unité, plusieurs exploitations pédagogiques gravitent autour de cet équipement :

- Option Fabrication Additive Métallique de 210 heures (dernière année du cycle ingénieur généraliste), incluant des travaux pratiques sur machine.
- Scénarios pédagogiques en présentiel à Nanterre sur :
 - o Innovation et créativité (conception innovante pour la FAM)
 - o Maintenance industrielle : processus, étude de maintenabilité, sensibilisation à l'utilisation de la RA-RV comme appui à la maintenance.
 - o Organisation et optimisation de la performance industrielle : étude de procédés industriels 4.0, flux de production...
 - o Qualité, sécurité, environnement et risques industriels : étude et gestion des installations à risque.

L'accès à l'unité de fabrication additive est donc restreint à quelques personnes simultanément, en

raison des risques ATEX et HSE associés, et limité au campus de Nanterre. Le jumeau numérique associé à l'usage de la réalité virtuelle permet de considérablement accroître le potentiel pédagogique du démonstrateur physique grâce à une diffusion large, multisite et multi-diplômes. Reposant sur l'expérience acquise du développement du jumeau numérique du SMART Building, l'UAFAM a d'ores et déjà été modélisée en 3D au format Revit d'autodesk (BIM) :

- Lots électriques, CTA, CVC (SSI, fluides à venir)
- Prête à permettre la collecte des données de production et de fonctionnement de l'unité.

Ce double numérique a validé la preuve de concept et permet actuellement grâce à la réalité virtuelle de :

- Réaliser des visites virtuelles simples de l'unité,
- S'approprier les espaces (études des processus, de la sûreté de fonctionnement, de la maintenabilité),
- Etre sensibilisé à la fabrication additive métallique.

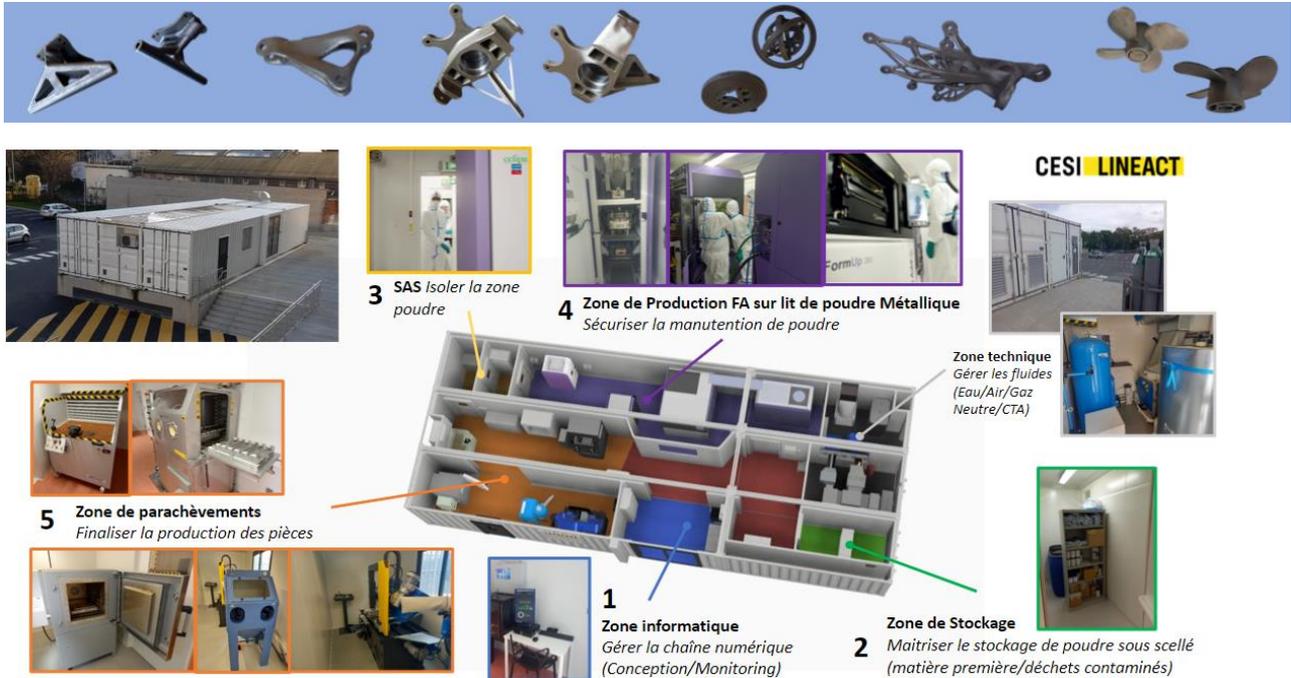


Figure C : Présentation de l'atelier et exemple de produits

La Fabrication Additive Métallique technologie de fusion laser sur lit de poudre

1 - Conception numérique :

Les pièces à produire sont **modélisées** et virtuellement **positionnées** sur le plateau de fabrication. Sur la base du fichier 3D, le logiciel propriétaire génère **les trajectoires** machines, **couche par couche**.



Figure D : Illustrations CAO

2 – Production additive :

La matière première est approvisionnée sous forme de **poudre de métal**. Elle est étalée sur la zone de fabrication (plateau 350 mm x 350mm) à l'aide d'un rouleau. Un faisceau **LASER** guidé par des miroirs impact le lit de poudre pour fondre localement la poudre et générer de fins cordons métalliques juxtaposés, ils vont composer une couche ($\sim 50\mu\text{m}$). La **répétition** du cycle et la **superposition des couches** permettent d'obtenir les pièces.



Figure E : En-cours de fabrication

3 - Parachèvements :

Les étapes de parachèvements permettent de **finaliser** la production des pièces de FA. Bien que le choix exact du processus de parachèvement dépende de la pièce considérée, on identifie des **étapes clés** quasi-systématiques :

- Nettoyage des **résidus de poudre**
- **Traitement thermique** pour stabilisation de l'état de la matière
- **Séparation** des pièces du plateau
- Retrait des **supports**
- Traitements des **surfaces fonctionnelles**



Figure F : Parachèvement

L'UAFAM et la collecte des données :

Les données collectées (en cours de développement) :

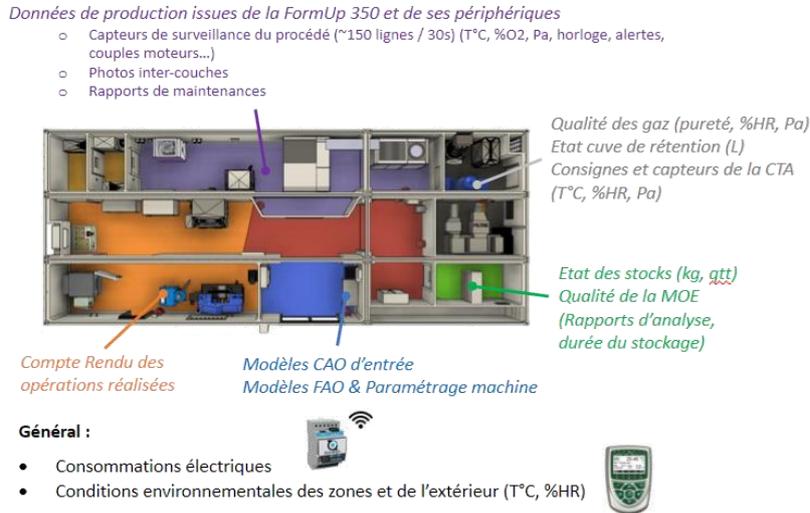


Figure G : Datas

Moyen de collecte et de communication

- Création de serveurs virtualisés pour la collecte et le stockage des données des équipements connectés
- Traitement et fusion des données collectées
- Intégration du protocole OPC-UA

Usages de la collecte des données

- Maitriser la **qualité** de la production en maitrisant la **chaîne complète**
- Remonter les informations clés en **temps réel**
- Analyser les données pour anticiper des **actions correctives**
- Application en **maintenance préventive**



Thème du scénario :
Un opérateur réalise pour la première fois une opération de maintenance sensible [le changement des filtres]. Il est assisté à distance.

- Objectifs pédagogiques:**
- Se familiariser avec les technologies de RA/RV par leur mise en œuvre
 - Apprendre à donner et à recevoir des instructions de maintenance
 - Utiliser la technologie dans un environnement contraignant (zone ATEX)
 - Identifier les avantages et les limites de la technologie

Scénario proposé par Vincent Le Roux

Observation et interaction avec le jumeau numérique en RV ou depuis un **poste informatique**



Utilisateur 1
(Ingénieur maintenance)

L'apprenant 1 doit assister l'opérateur de maintenance (apprenant 2). Il pourra entendre/ voir /conseiller le technicien à distance à l'aide de documentation technique, d'indication visuelle.

Informations orales

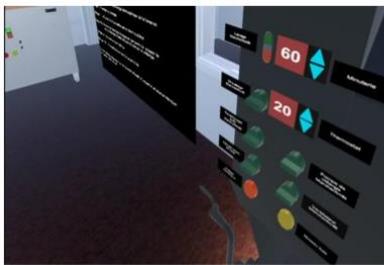
Partage de documentations techniques et de signaux visuels

Retour visuel en direct

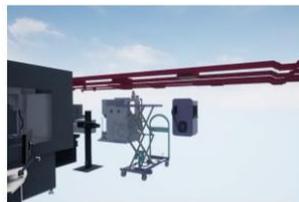
Immersion dans le jumeau numérique et interaction directe avec l'**environnement réel**

Utilisateur 2
(Opérateur polyvalent)

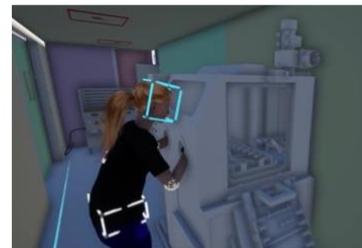
L'apprenant 2 doit réaliser une tâche nouvelle. Il s'appuie sur des outils de **réalités augmentée ou virtuelle** pour mener à bien sa tâche dans les meilleures conditions et délais possibles



Prise en main des équipements



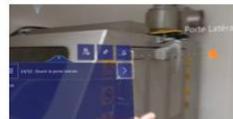
Affichage équipement/ CVC/ bâtiment



Aménagement/Positionnement d'opérateurs



Maquette augmentée



Assistance augmentée

Figure H : Exemple d'un scénario pédagogique :

LIVRET COMPLEMENTAIRE : CASE STUDIES



Case study : Ligne d'assemblage flexible et reconfigurable avec intégration de solution cobotique et de robots mobiles : ENSAM - Le jumeau numérique pour mieux appréhender l'industrie

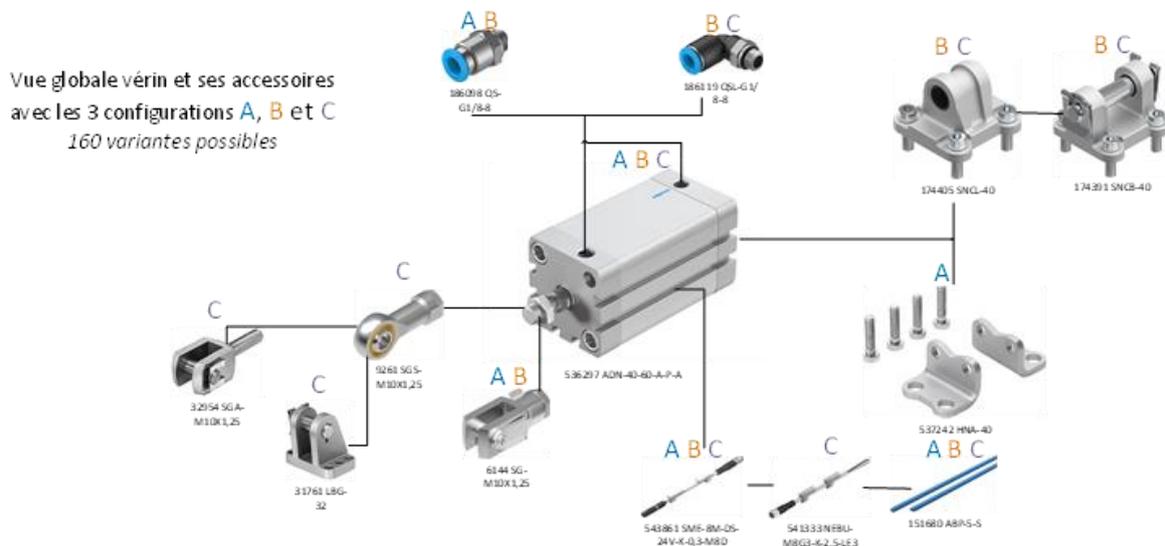


Figure A : Vérins FESTO multi-configuration

Afin d'illustrer de façon concrète certains enseignements autour du génie industriel, les campus des Arts et Métiers de Lille et Bordeaux se sont chacun dotés d'une nouvelle plateforme industrielle comparable à celle présentée ci-dessous (Figure B). L'objectif principal est de former les apprenants de formation initiale et continue à l'organisation industrielle et à l'excellence opérationnelle sur une plateforme d'assemblage reconfigurable à l'échelle industrielle.

Le premier cas d'usage commun aux deux campus est de s'intéresser à l'assemblage d'un vérin FESTO. Plusieurs variantes peuvent être produites à l'aide de multiples accessoires et permettent ainsi d'imaginer une multitude de scénarios de production mêlant plusieurs configurations de produits différents (Figure A).

Description de la plate-forme physique de Lille et de son jumeau numérique :

La plateforme se compose de 6 postes de travail reconfigurables (voir Figure B et C), dont un poste cobotisé sur lequel les étudiants peuvent travailler en vis-à-vis, en interaction avec un robot collaboratif (Cobot) pour réaliser les opérations d'assemblage qu'ils auront décidé d'automatiser partiellement. Ce type de configuration permet d'améliorer par exemple le temps de cycle du poste ciblé (prise en charge de certaines opérations par le cobot), tout en améliorant l'ergonomie générale des opérations. Dans le but de faciliter la création de ces processus collaboratifs, un environnement de réalité virtuelle permet de tester dans des conditions réalistes les solutions initialement conçues sur modèle numérique (voir Figure C).



Figure B : Représentations de la plateforme industrielle



Figure C : Interaction avec le Cobot

Description de la plate-forme physique de Bordeaux et son jumeau numérique :

Les postes de travail et magasins sont quasiment identiques entre les deux campus de Lille et de Bordeaux. Le choix fait à Bordeaux est de ne pas utiliser dans un premier temps de cobot pour l'assemblage. En revanche, l'accent est mis sur la configuration de la ligne et la gestion des flux physiques entre les magasins stockant les pièces standards et les postes de montage pour gérer les approvisionnements et le déstockage de caisse vides à l'aide de robots mobiles autonomes (Autonomous Mobile Robots ou AMR).

Le jumeau physique est constitué de 8 postes de montage mobiles (poste + sac à dos à 6 voies d'approvisionnement), de 4 magasins de stockage mobiles (avec 5 voies chacun) et de 2 AMRs sur lesquelles une structure mobile pour le chargement/déchargement de pièces au poste peut être adaptée.

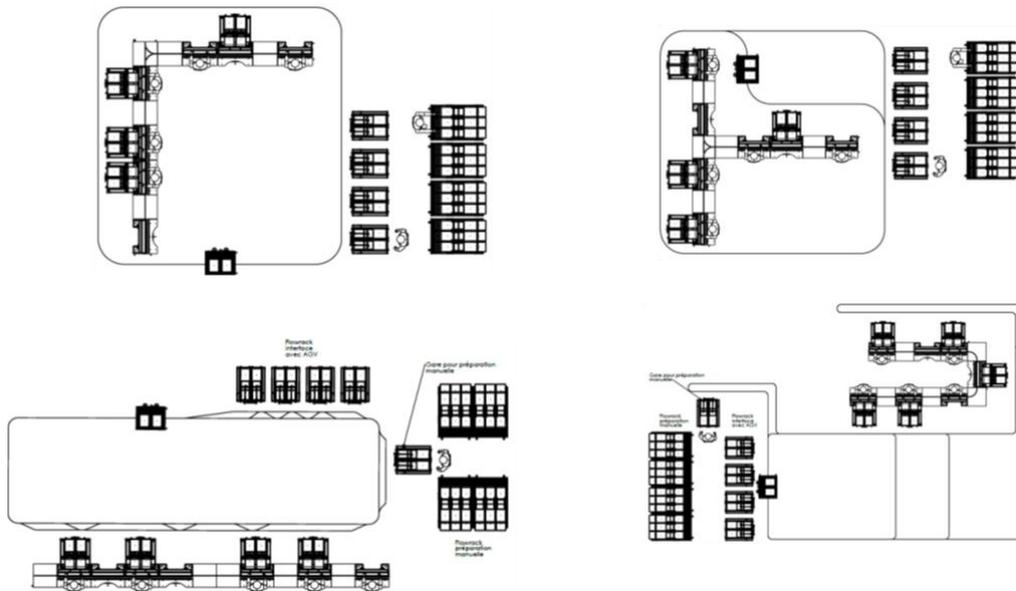


Figure D : Différentes configurations de ligne



Figure E : AMR (Autonomous Mobile Robots) allant récupérer une caisse vide

Selon le type et la quantité de produits à fabriquer, plusieurs configurations de lignes peuvent être envisagées. Dans un environnement réel, le choix des configurations sera contraint par la dimension de l'atelier de production, la présence ou non d'équipements, le besoin de circulation, etc. Dans ce contexte, le premier objectif du jumeau numérique est de pouvoir anticiper l'implantation de la ligne d'assemblage en modélisation et simulant à la fois les espaces et les flux.

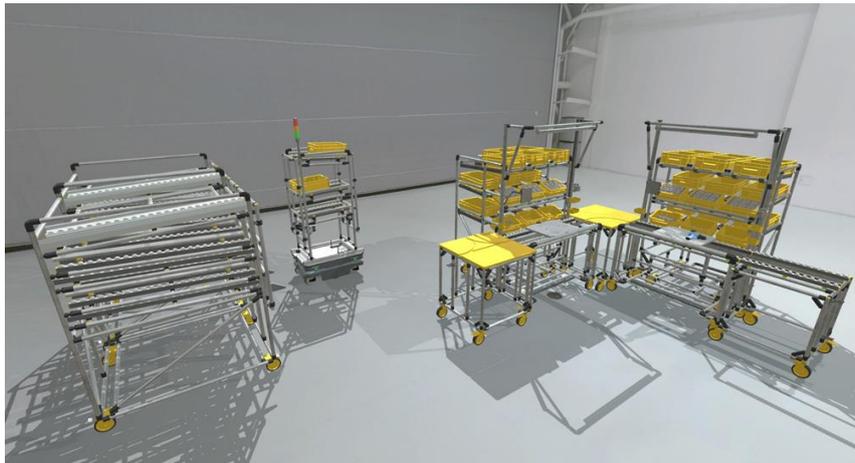


Figure F : Vue globale d'une configuration de ligne dans le jumeau numérique

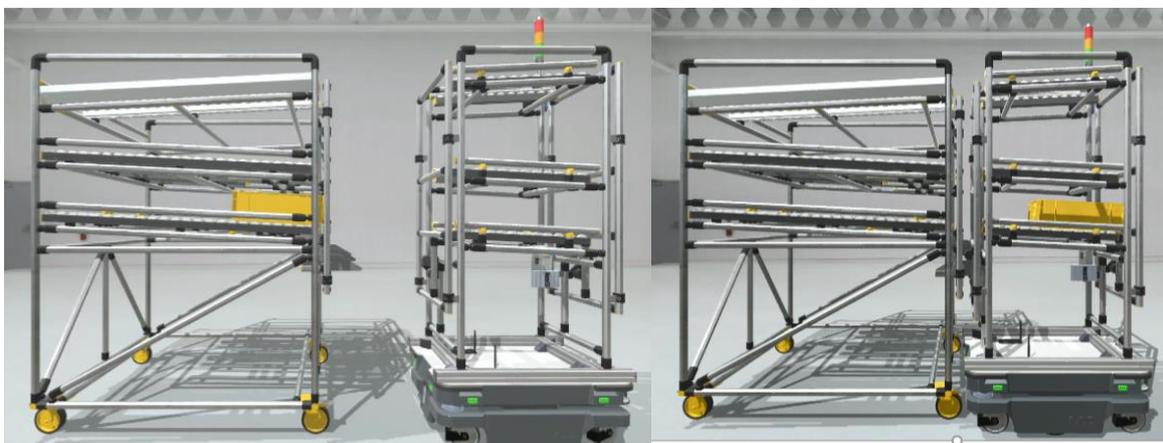


Figure G : Process de récupération de caisse au magasin à livrer ensuite au poste

Objectifs communs des deux jumeaux numériques des campus Arts et Métiers de Lille et Bordeaux

L'intégration de ces deux jumeaux numériques dans la formation a pour objectif de faire travailler les étudiants sur les thématiques suivantes :

- Génie industriel : i.e. gestion de production, gestion des flux physiques (pièces/produits...) (flux tiré/flux poussé), aménagement d'atelier, logistique d'approvisionnement, logistique de distribution gestion des stocks, etc.

- Modélisation et simulation des flux
- Utilisation et paramétrage de solutions logicielles de suivi et ou pilotage de processus industriels de type ERP (Enterprise Resource planning) et/ou de type MES (Manufacturing Execution System),
- Excellence opérationnelle.

L'intégration de ces jumeaux a également pour but d'étudier la pertinence d'intégrer une solution cobotique dans un processus d'assemblage manuel et d'analyser les plus-values de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle dans un process industriel.

Complémentarité des jumeaux numériques de Lille/Bordeaux

Le campus de Lille s'intéresse plus particulièrement à l'intégration de cobots au sein des processus d'assemblage afin d'étudier les modalités de l'interaction entre le cobot et l'opérateur de production et d'identifier les bénéfices et freins de cette collaboration. Le campus de Bordeaux s'intéresse pour sa part plus particulièrement à la gestion des flux entre les postes d'assemblage et à l'automatisation des approvisionnements des magasins de ces postes. A terme, les deux environnements seront interopérables et les développements en cours des deux campus pourront être intégrés dans un même jumeau numérique, permettant ainsi de voir l'impact de différents types de solutions d'automatisation sur la productivité de la ligne.

Public cible

Les apprenants cible sont les étudiants de formation initiale du Programme Grande Ecole des Arts et métiers (1A, 2A et 3A), les étudiants du Bachelor Arts et métiers de Bordeaux et du Bachelor en territoire, ainsi que les apprenants du Programme Ingénieur de Spécialité Génie Mécanique et Production Maintenance.

Plus-value pour l'enseignement

Lors des phases de conception, notamment pour les process homme-robot (collaboratifs), la notion essayer-erreur est centrale pour atteindre un niveau d'implication élevé des étudiants. L'évaluation rapide des solutions grâce à l'environnement numérique garantit cet aspect exploratoire qui est recherché dans nos pratiques pédagogiques. En outre, pouvoir disposer d'autant de postes ou d'environnement virtuels que désiré permet de créer des groupes d'étudiants de petite taille, permettant

ainsi une meilleure différenciation pédagogique. Ces différents environnements virtuels peuvent être aussi interconnectés (plutôt que répliqués), pour proposer des scénarios pédagogiques plus complexes et atteindre ainsi des notions nouvelles. L'aller-retour entre numérique et physique permet aux étudiants de mettre en œuvre les solutions qu'ils ont imaginées, comme le feraient les utilisateurs (i.e. des opérateurs). Cette démarche apporte deux intérêts : 1) se rendre compte tout d'abord de l'écart possible entre une solution théorique et son application. 2) saisir l'intérêt d'expérimenter ces solutions (présumées sans problème) pour le bien être des collaborateurs, dans une démarche managériale prévenante et bienveillante.

Enfin, pour tous les étudiants ne bénéficiant pas des moyens physiques (ou pour des personnes empêchées), l'accès à distance permettra d'avoir accès à une partie substantielle des éléments mis en œuvre, et d'en retirer des connaissances et compétences plus élevées que celles qu'ils auraient acquises en ne travaillant que sur des études de cas théoriques

Plusieurs objectifs d'apprentissage sont définis dans les scénarios pédagogiques :

- Identifier l'intérêt des cellules flexibles pour la performance industrielle
- Connaître les principaux indicateurs de performance des systèmes de production
- Manipuler les outils de construction de process (Yamazumi, table de combinaison, VSM)
- Evaluer la performance d'un process lors de son exécution en condition réelle et décider des pistes d'amélioration
- Concevoir une cellule flexible en production variée (équilibre, ordonnancement) en accord avec la performance recherchée
- Implémenter les processus d'assemblage au sein de la cellule flexible

Exemple d'une séquence pédagogique (campus de Bordeaux)

Scénario 1 : jumeau physique et numérique disponibles

Cette première séquence implique un groupe de 24 étudiants séparés en deux groupes distincts répartis dans deux espaces différents. Le scénario amène à utiliser à la fois le jumeau physique et le jumeau numérique. Quel que soit le groupe, l'objectif est d'être capable d'organiser la ligne permettant de produire un carnet de commande composé de plusieurs produits demandés en quantité différentes.

Le 1er groupe travaillera dans un premier temps dans une salle informatique où il pourra utiliser à souhait le jumeau numérique couplé à un outil de simulation puis dans un deuxième temps il implémentera sa configuration sur la plateforme physique. **Le 2ème groupe** travaillera dans l'ordre inverse. Il sera directement en activité sur la plateforme physique avant de retourner en salle informatique pour tester la configuration choisie en simulation et proposer d'autres solutions afin d'optimiser la production.

Activités à faire pour le premier groupe :

1) Modéliser la ligne d'assemblage et ses différents postes en vue de l'implantation puis analyser des configurations de ligne qui permettent de réaliser le carnet de commande

- Utilisation du jumeau numérique afin d'organiser la ligne de production, implanter les postes dans un espace contraint

2) Paramétrer les différentes simulations en utilisant le jumeau numérique pour déterminer les différents temps opératoires et visualiser la circulation des flux physique en vue de choisir la configuration à implanter physiquement

- Utilisation du jumeau numérique pour réaliser la gamme de montage en virtuel et

tester les solutions d'approvisionnements de postes (casque de réalité virtuelle nécessaire)

3) Mettre en œuvre et analyser les écarts entre la simulation et la mise en œuvre physique

- Utilisation du jumeau numérique pour implanter réellement la ligne imaginée précédemment afin de pouvoir comparer de façon pertinente les écarts entre simulation/réel

Ce scénario permettra aux étudiants de tester toutes les configurations qu'ils pourraient imaginer en amont sans les contraintes "physiques" et ainsi leur permettra d'appréhender plusieurs solutions différentes avec une approche par l'essai/erreur. Un tel "Apprentissage par le jumeau numérique", permet de faciliter le paramétrage des simulations en donnant une vraie perspective d'une implantation de chaîne de montage et d'évaluation de temps d'opérations/montage/approvisionnement. Plusieurs équipements pourront être utilisés pour réaliser cette simulation : casque de réalité virtuelle, tablette avec solution réalité augmentée, etc.

Activités à faire pour le second groupe : Mise en œuvre réelle de la production puis optimisation de la production à l'aide de simulations.

1) Organiser la ligne de manière intuitive, lancer la production puis analyser les résultats

2) Proposer une nouvelle organisation sur la base des résultats obtenus puis la mettre en œuvre

3) Analyser les résultats afin de construire une démarche méthodologique

4) Construire une nouvelle organisation en s'appuyant sur cette démarche

5) Mettre en œuvre cette nouvelle organisation et la tester

6) Modéliser la ligne d'assemblage afin de simuler la production

- Synchroniser le jumeau numérique avec le jumeau physique construit au préalable pour faciliter le paramétrage de la première simulation (positions des postes, temps d'opérations, etc...)

- 7) Réaliser des simulations avec d'autres configurations en vue d'optimiser la production
- 8) Synthétiser l'ensemble des résultats

Cette fois ci, les étudiants sont plutôt sensibilisés à un "Apprentissage au jumeau numérique", afin de se rendre compte des écarts entre le réel et le numérique, identifier la limite des hypothèses et des modèles utilisés qui sont derrière le jumeau et qui le "sépare" de la vie réelle.

Scénario 2 : uniquement avec le jumeau numérique

Activités à faire : Simuler le scénario de production (choix d'implantation / temps de prod)

1) Modéliser la ligne d'assemblage et ses différents postes en vue de l'implantation puis analyser des configurations de ligne qui permettent de réaliser le carnet de commande

- Utilisation du jumeau afin d'organiser la ligne de production, implanter les postes dans un espace contraint (casque de réalité virtuelle nécessaire)

2) Paramétrer les différentes simulations en utilisant le jumeau pour déterminer les différents temps d'opérations et de flux physique en vue de choisir la configuration à implanter physiquement (définition des critères de choix, ...)

- Utilisation du jumeau pour réaliser la gamme de montage en virtuel et tester les solutions d'approvisionnements de postes (casque de réalité virtuelle nécessaire)

Dans les 2 scénarios, l'évaluation du travail effectué par les étudiants porte sur leur capacité à résoudre tout ou partie d'une tâche complexe. Le jumeau numérique est vu comme un outil facilitant la résolution du problème industriel proposé.

Scénario 3 : uniquement avec le jumeau numérique

Ce scénario est un scénario de découverte permettant d'appréhender une chaîne d'assemblage industrielle dans un objectif de première approche de l'outil industriel. Il permettra d'observer les différents postes, les opérations de montage, la gestion des flux physiques...

Il s'agira alors pour l'apprenant de s'immerger dans le jumeau numérique, en configuration de production stabilisée et de découvrir l'activité des opérateurs, les contraintes de production, l'importance des informations de production remontées aux opérateurs, etc. L'apprenant pourra ainsi découvrir un environnement de production industrielle sans adresser les contraintes de sécurité et d'intrusion dans l'activité des opérateurs.

La visite peut être collaborative avec un ensemble d'étudiants et un responsable de la visite. Les opérateurs de production sont représentés par un avatar. Chaque apprenant a son propre avatar également, les apprenants peuvent interagir pour engager des discussions autour de la visite mais ils ne peuvent pas entrer en interaction avec les opérateurs.

Scénario 4 : avec jumeau physique et numérique sur Lille

A- amélioration de la performance économique

- 1) Organiser et équilibrer la ligne d'assemblage par rapport à un ensemble de commandes client (équipe complète)
- 2) Exécuter la séquence de production dans le jumeau physique (fig. 2), relever les indicateurs de performance associés (la construction de la séquence mettra en évidence un des postes comme le poste "bouchon", qui empêche l'atteinte des objectifs fixés).

- 3) Définir un objectif de réduction de temps de cycle sur le poste bouchon qui permettra d'atteindre la performance attendue pour l'ensemble de la ligne.
- 4) L'équipe se divise en binômes qui, en travaillant dans l'environnement numérique travaillent en parallèle sur une solution cobotisée qui permettra d'augmenter la performance du poste bouchon (réduction du temps de cycle).
- 5) Les binômes peuvent à tour de rôle pre-tester leur solution numérique dans l'environnement de réalité virtuelle (intégration des possibles collision, faisabilité des opérations).
- 6) L'ensemble de l'équipe sélectionne la solution testée virtuellement qui paraît avoir le meilleur potentiel de performance sur le jumeau physique (intégration des facteurs de faisabilité, robustesse, ...).
- 7) Implémentation de la solution cobotisée dans le réel, sur le poste bouchon, puis exécution d'une nouvelle campagne de production dans les nouvelles conditions pour validation.
- 8) Evaluation de la nouvelle performance obtenue en condition réelle.

B- Diminution du risque ergonomique

- 1) Organiser et équilibrer la ligne d'assemblage par rapport à un ensemble de commandes client (équipe complète)
- 2) Exécuter la séquence de production, relever les indicateurs de performance associés (la construction de la séquence mettra en évidence un des postes comme le poste "bouchon", qui empêche l'atteinte des objectifs fixés). La performance ne peut être atteinte que si la phase 1 est réalisée correctement
- 3) Un événement survient : un opérateur est déclaré "avec restriction physique", et ses actions sont contraintes (utilisation d'un seul membre supérieur, postures coudes / poignées interdites, etc...). L'objectif est de maintenir la performance de son poste tout en incorporant ses contraintes.
- 4) En binôme, les étudiants apportent une solution pour le poste mis en évidence. Le jumeau numérique permet d'affecter la même

- configuration de poste à tous les binômes ou une configuration différente pour chaque binôme
- 5) Les binômes peuvent à tour de rôle pre-tester leur solution dans l'environnement de réalité virtuelle (intégration des possibles collision, faisabilité des opérations).
 - 6) Selon l'alternative choisie en 4), soit l'équipe choisit la solution apparaissant comme la meilleure (première alternative), ou (deuxième alternative), un tableau d'affectation des opérateurs sur les postes contraint l'équipe à implémenter la solution cobotique sur le poste identifié sur le tableau d'affectation.
 - 7) Implémentation de la solution cobotisée sur le poste bouchon et exécution d'une nouvelle campagne de production dans les nouvelles conditions.
 - 8) Evaluation de la nouvelle performance obtenue en condition réelle.

Limites

Le jumeau numérique permet de se projeter, d'évaluer de façon quasi sensorielle une solution numérique en vue de son implémentation physique. Pourtant, il y a encore certains verrous techniques à lever, notamment concernant la précision de certaines manipulations fines, dont le rendu peut demeurer approximatif au regard de la réalité physique. Cet environnement peut aussi se révéler d'accès difficile pour certains publics, par exemples ceux particulièrement sensibles aux incohérences sensorimotrices, ou touchés par une dyspraxie (Trouble du Développement de la Coordination, de la planification et de la coordination des gestes), rendant complexe l'utilisation de joysticks.

L'usage du casque VR peut également devenir néfaste pour une certaine partie de la population. En effet, les casques de réalité virtuelle nuisent parfois à des utilisateurs nommés «cybersickness».1. Ces derniers ont des vertiges et nausées et maux de tête ont pu être causées par le port du casque VR.

Case study : Projets Lean Manufacturing et Système industriel automatisé : CESI – Apprentissage expérientiel – Rouen – Usine Flexible de Production



Figure A : Atelier manuel et ligne automatisée campus CESI Rouen

La plateforme Usine Flexible de Production (UFP) installée sur le campus CESI de Rouen reproduit un atelier de production modulaire intégrant une ligne de production automatisée, des postes manuels, des AGVs (robots mobiles), robots et cobots, des IIoT, ou encore des interfaces Humain-machine basées sur de la réalité augmentée ou de la réalité virtuelle. Les applications pédagogiques sont dans les domaines de l'organisation et de la performance industrielle, de la maintenance, du numérique, de l'IA et bien sûr des usages des technologies dites de l'industrie du futur. En terme d'équipements de protection individuelle, les « opérateurs » ont à leur disposition des blouses et des gants. Cette plate-forme est utilisée dans le cadre de projets pédagogiques prônant l'apprentissage expérientiel. La plate-forme est présentée plus en détails dans la section



Figure B : Poste Manuel



Figure C : Cave immersif

L'apprentissage expérientiel est un modèle d'apprentissage préconisant la participation à des activités se situant dans des contextes les plus rapprochés possibles des connaissances à acquérir, des habiletés à développer et des attitudes à former ou à changer. (Legendre, 2007).

Nous présentons ci-après des projets pédagogiques dont les développements initiés avant le projet JENII ont notamment été réalisés dans le cadre du projet PIA DEFI&Co.

Projet CESI.Bike – Lean Manufacturing

L'atelier CESI.Bike respecte ce qui caractérise un apprentissage expérientiel :

- **Pertinence professionnelle** : Les activités se rapprochent le plus possibles des activités terrain tout en proposant un contexte social simulant la culture professionnelle.
- **Problème mal défini** : les activités sont volontairement mal définies. Les apprenants doivent identifier par eux-mêmes les tâches et sous-tâches à mettre en œuvre pour atteindre le but.
- **Demande d'investigation soutenue** : Les problèmes rencontrés ne peuvent pas être résolus en quelques minutes. Il y'a des études et analyses nécessitant du temps et des ressources intellectuelles.
- **Plusieurs sources d'information et de perspectives** : Les apprenants n'ont pas une liste de ressources déjà préparée. Il est nécessaire pour eux de faire du tri dans les informations pour distinguer celles qui sont utiles de celles qui ne le sont pas.
- **Souci de collaboration** : Pour atteindre le but, un étudiant seul ne suffit pas. La collaboration est nécessaire.
- **Exigence de réflexion** : Les apprenants doivent faire des choix (individuellement ou en équipe).
- **Perspectives interdisciplinaires** : Le projet CESI.Bike est rattaché à plusieurs modules d'un bloc de compétences (commun pour deux métiers) :
 - o ISO 9001
 - o Mode opératoire
 - o AMDEC
 - o Lean et Ergonomie
 - o Maîtrise Statistique des procédés
 - o Kaizen.

Mais ce projet fait aussi appel à d'autres disciplines :

- o Gestion de projet
- o Résolution de problèmes
- o Bureautique (Word, Excel, Powerpoint)
- **Production finale soignée** : Ponctué de livrables intermédiaires, ce projet se conclue par la présentation orale de la démarche globale, de la synthèse des analyses, mais surtout de la proposition d'une solution optimisée de l'atelier d'assemblage.
- **Multiplés interprétations et résultats d'apprentissage** : Pour ce projet, il n'existe pas une seule bonne réponse. L'observation et l'analyse peuvent aboutir à de multiples interprétations et donc solutions.
- **Evaluation intégrée** : Il ne s'agit pas simplement d'une évaluation sommative (addition des notes de chaque livrable), mais d'un processus d'évaluation intégrée dans la situation elle-même.



Figure D : Poste robotique

Le Jumeau numérique interfacé en réalité virtuelle (VR) de l'atelier a été conçu par une équipe pluridisciplinaire interne à CESI et CESI LINEACT (enseignants-chercheurs, ingénieurs de recherche, ingénieurs pédagogiques de la direction des études) (Badets et al., 2021, 2020). Cette équipe collabore à la conception des scénarii d'apprentissage et d'interactions, à la rédaction du cahier des charges et au suivi du projet. Désormais, l'équipe travaille avec Oreka Ingénierie qui est en charge de développer un nouvel environnement plus immersif et plus interactif.

Objectifs d'apprentissage généraux :

L'apprenant sera capable : (1) d'organiser des chantiers d'amélioration continue, (2) de mettre en et animer les plans d'amélioration.

Objectifs d'apprentissage spécifiques :

(1) passer en revue de façon détaillée les exigences du référentiel ISO 9001, (2) d'utiliser à bon escient le vocabulaire associé à l'approche processus, (3) décrire les processus, (4) de faire évoluer la documentation qualité de l'entreprise en respectant les étapes de validation, (5) de créer des documents respectant les exigences des documentations qualité (versioning, formalisme...), (6) d'utiliser les statistiques appliquées, (7) de participer à la mise en œuvre d'une démarche MSP d'un processus de fabrication, (8) d'analyser et coter une posture de travail, (9) de proposer des solutions d'amélioration, (10) d'interpréter et de renseigner une AMDEC, (11) de repérer les sources de dysfonctionnement, (12) de mener un chantier d'amélioration Kaizen.

Domaine d'application :

L'Usine Flexible de Production est un outil d'aide à la formation dans le domaine de l'industrie principalement.

Le jumeau numérique interfacé réalité virtuelle de l'UFP est utilisé soit conjointement avec le jumeau physique de l'atelier réel soit exclusivement via PC ou casque VR pour les campus distants.

Intérêt du jumeau UFP pour l'enseignement :

Ce jumeau est un outil qui permet d'(1) adopter un regard critique sur un processus industriel (2) Evaluer plusieurs compétences techniques et transverses (3) Découvrir le fonctionnement d'un atelier d'assemblage.

Déploiement du jumeau Atelier Flexible à CESI :

En 2021, à travers le projet PIA DEFI&Co, le jumeau numérique de l'UFP a été déployé, à travers le projet CESI.Bike, sur 18 campus : C'est donc presque 200 apprenants qui ont été amenés à utiliser cet environnement. Les publics concernés étaient des premières années de parcours professionnalisants (Bac+2) en organisation industrielle ou en qualité-sécurité-environnement.

Exemple d'une séquence d'apprentissage réalisée en 2022 : Public première année bac+2 en organisation industrielle et qualité-sécurité-environnement

Modalité : Projet expérientiel collaboratif sur PC et en réalité virtuelle

Objectifs de la séquence : être capable de détecter des dysfonctionnements et gaspillages et proposer une solution pour intégrer une modification dans la production.

Les deux premières séances se font sans utiliser le jumeau numérique.

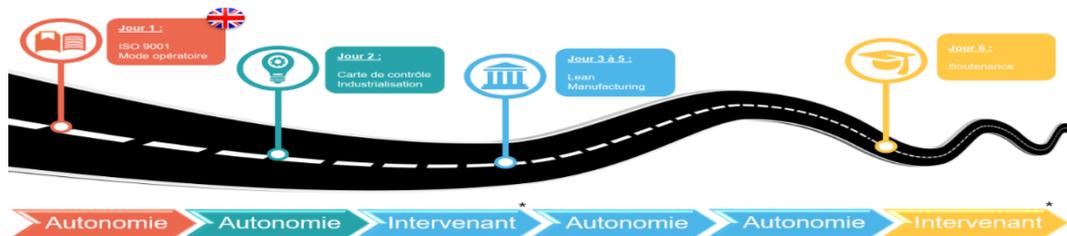


Figure E : Déroulé du projet collaboratif



Figure F : Etudiants en séance de debriefing après utilisation du jumeau numérique

Séance 1 – Jour 1

Découverte du projet, des attendus et de l'entreprise CESI.Bike.

Storytelling du projet CESI.Bike :

Identité entreprise :

CESI.Bike – Constructeur de vélo pour enfant
 Activité : Commerce de gros (commerce interentreprises) non spécialisé (4690Z)
 Capital de 200 000 €
 Adresse : 14 r Sakharov, 76130 Mont-Saint Aignan
 Numéro Siret : 34270750200445
 Effectif : 10 salariés au 1er octobre
 Date de création de l'établissement : 24/03/1984

« Longtemps leader sur le marché mondial des vélos de luxe pour enfant et n'ayant pas de réel concurrent, nous n'avons jamais eu à remettre en doute nos pratiques de travail. Mais un concurrent

vient d'arriver sur le marché, nous faisant perdre notre première place...

Nous avons engagé un cabinet de conseil marketing pour nous aider à reprendre notre position de leader.

Le cabinet nous a dessiné 3 grandes lignes stratégiques. Pour y arriver, nous allons devoir faire preuve de créativité, et mettre au placard nos mauvaises habitudes ! » Joël Louart (Fondateur)

Préconisation n°1 :

Gagner en légitimité auprès des revendeurs nationaux et internationaux en obtenant la certification ISO 9001.

Préconisation n°2 :

La grande mode chez les enfants est au panier à l'avant des vélos.

Etape 2 :

- Les apprenants doivent créer des modes opératoires pour le panier. Ils devront être adaptés aux opérateurs avec une version en Français et une version en Anglais. Pour cela, ils ont à leur disposition, le mode opératoire qui vient du bureau d'études externe.

Livrable : modes opératoires simples et synthétiques pour le panier : une version en français et une version en anglais, s'inscrivant dans le système de management de la qualité.



Figure K : Panier à industrialiser

Séance 2 – Jour 2

Etape 3 :

Les apprenants doivent mettre en place des cartes de contrôles sur un processus. Le processus à surveiller est le contrôle de la régularité des bandes en papier (Etape 1 : 29,7 x 3 cm). Chaque bande est contrôlée sur 4 points différents, dans un seul sens, aux mesures indiquées sur le schéma ci-dessus.

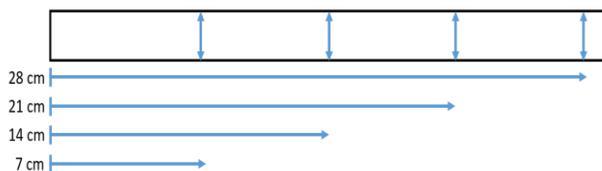


Figure L : Contrôle qualité

Les apprenants compareront leurs résultats avec ceux des bandelettes fournisseur. Ainsi, avec leurs cartes de contrôle \bar{X} -R (moyenne-étendue), ils seront capables de prendre une décision de « make or buy ». Pour anticiper d'éventuelles dérives, ils réaliseront une AMDEC processus et mettrons en

place les solutions adaptées afin de fiabiliser le processus.

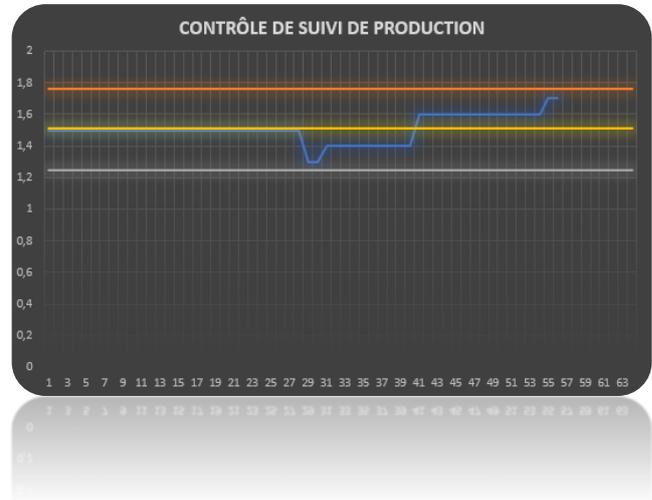


Figure M : Carte de contrôle

Séance 3 – Jour 3 & 4

A partir d'ici, les apprenants utiliseront le jumeau numérique. Sous forme de deux outils :

Lean Manufacturing Visite Virtuelle (LMVV) : Utilisation sur PC avec clavier/souris déplacement dans l'environnement 3D pour découvrir l'atelier + lancement de vidéos pour observer les opérateurs en train de travailler et pouvoir réaliser des chronométrages.



Figure N : Application LMVV

Lean Manufacturing Réalité Virtuelle (LMVR) : Dans l'atelier, en VR, les apprenants peuvent modifier la gamme de fabrication, reconfigurer l'implantation de l'atelier, configurer l'agencement de chaque

poste de travail et simuler la fabrication en assemblant chaque pièce.

Ainsi, pour ces deux derniers jours, les apprenants travaillent sur la réorganisation de la ligne de vélo et l'intégration systématique des paniers sur nos vélos.

Leurs objectifs :

- Répondre aux prévisions de vente : 42 vélos/jour (7h) et donc 42 paniers/jour (7h)
- Produire des vélos bons du premier coup : actuellement 6 vélos sur 10 font l'objet d'une reprise sur le poste de contrôle client. L'objectif est de passer à 15% !
- Ne pas augmenter la main d'œuvre.
 - Ishikawa + analyse
 - Equilibrage de la ligne (Vélo + panier)
 - Proposition de solutions



Figure P : Opérateur consultant son mode opératoire

Fiche d'instructions visuelles				
Modèle		Poste 1		
MOO0018		5		
Process		Opération		
Assemblage		10		
Outils				
Revue	Article	Description	Utilité	Qté
1	ECRIS	Ecran M8		1
2	FIXAG	Façon éponge 0		1
3	PALCOS	Bloc de Panser 40x40d		1
4	MEC	Boues M8 12		1
5	LAGAN	Limiteur d'angle 40°		1

Figure Q : Fiche d'instructions visuelles (mode opératoire)

A partir de ces premières observations, ils peuvent renseigner les différentes causes de dysfonctionnements sur un diagramme d'Ishikawa :

Etape 4 :

Découverte de l'atelier et prise de chrono :

En évoluant dans l'atelier virtuel, les apprenants découvrent des vidéos où l'on voit les opérateurs fabriquer 6 vélos. Suite à un incident de café, on leur demande de reprendre les chronos pour la fabrication des 3 premiers vélos.

BILAN Première Production						
	Vélo 1	Vélo 2	Vélo 3	Vélo 4	Vélo 5	Vélo 6
Conformité (C ou NC)	NC	NC	NC	C	C	NC
Temps Traversée (en sec)				784	941	1039
			Picking	VA	VA	VA
Poste 1	05	304	314	277		
Poste 2	5	348	290	284		
Poste 3	10	190	218	195		
Poste 4	2	200	192	216		
Poste 5	5	180	527	448	510	
Poste 6	4	162	416	126	416	457

Figure O : Chronométrage

Pour bien comprendre les étapes d'assemblage, les apprenants ont à leur disposition l'ensemble des modes opératoires qui sont présents sur chaque poste de travail.

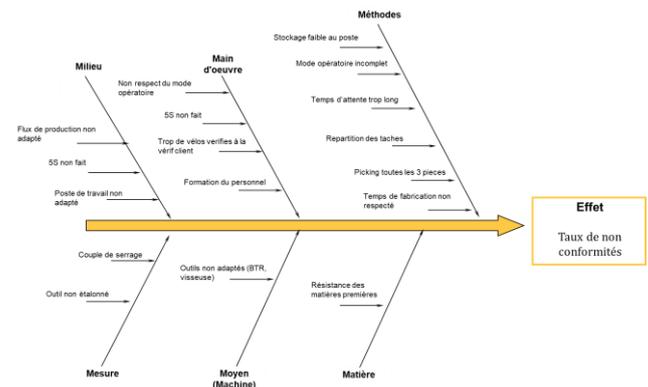


Figure R : Diagramme d'Ishikawa (Causes-Effets)

A partir des vidéos et de la cartographie des processus, les apprenants peuvent également réaliser un diagramme spaghetti pour représenter

les différents déplacements effectués par chaque opérateur.

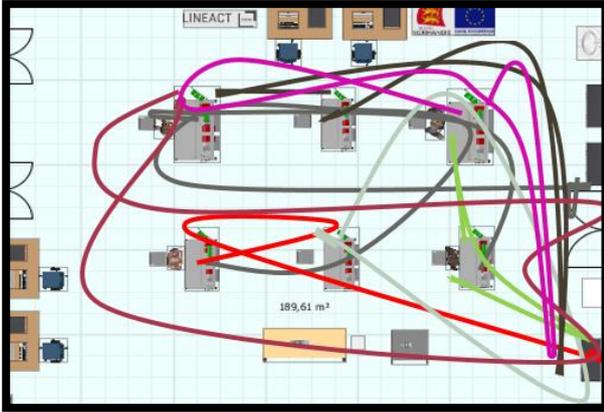


Figure S : Diagramme spaghetti

Etape 5 :

Les apprenants prennent en main le jumeau numérique en réalité virtuelle :

- **Menu** : découverte de l'application et paramétrage
- **Simulation** : Pour tester la configuration initiale
- **Configuration Fiche** : Pour définir la nouvelle gamme de fabrication
- **Conception Atelier** : Pour implanter la nouvelle ligne
- **Conception Poste** : Pour agencer chacun des postes de travail



Figure T : Menu application LMVR

Pour cette étape, ils n'ont besoin que de la fonction « **simulation** ».

LMVR peut être installé sur plusieurs PC en même temps afin d'utiliser le mode collaboratif.

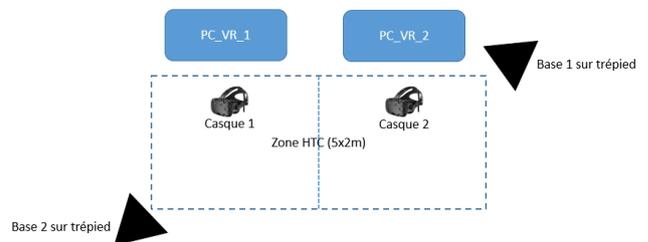


Figure U : Mode collaboratif

Installation de LMVR sur deux PCs distincts.

Ici, ils vont pouvoir tester le montage de chaque sous-ensemble, sur chacun des postes de travail en VR. Ils pourront ainsi mieux comprendre les difficultés rencontrées, notamment sur l'ergonomie au poste de travail. Ils pourront alors compléter leur diagramme d'Ishikawa.



Figure V : Application Nawo Smart



Figure W : Calque d'un rapporteur

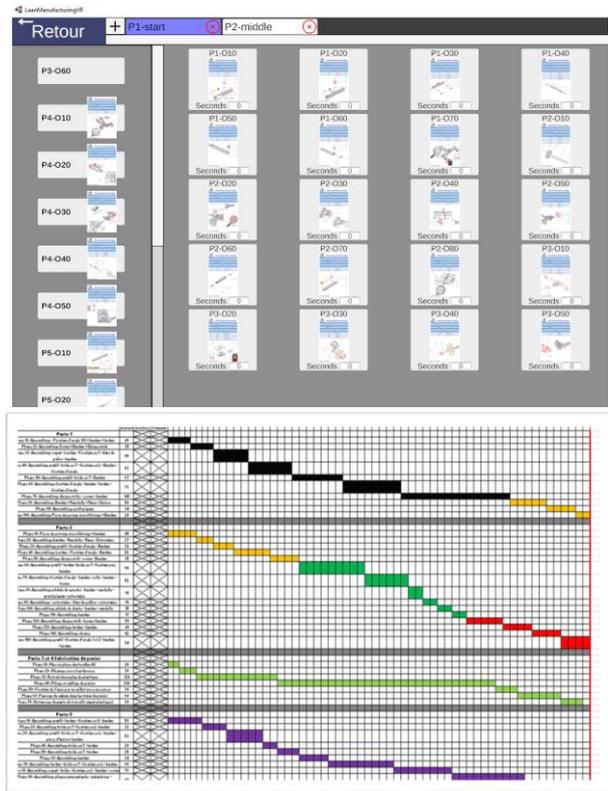


Figure X : Configuration fiche (équilibrage / Simogramme)

Etape 6 :

En analysant les précédentes données récoltées et en réalisant l'équilibrage de l'atelier, les apprenant vont pouvoir paramétrer l'application VR pour définir leur nouvelle solution. Ils commencent par redéfinir l'ordre des étapes pour la gamme de fabrication. Dans l'application, ils utilisent alors la fonction « **configuration fiche** ».

Etape 7 :

Ensuite, ils vont réimplanter l'atelier via la fonction « Conception Atelier » :



Figure Z : Agencement poste de travail en VR

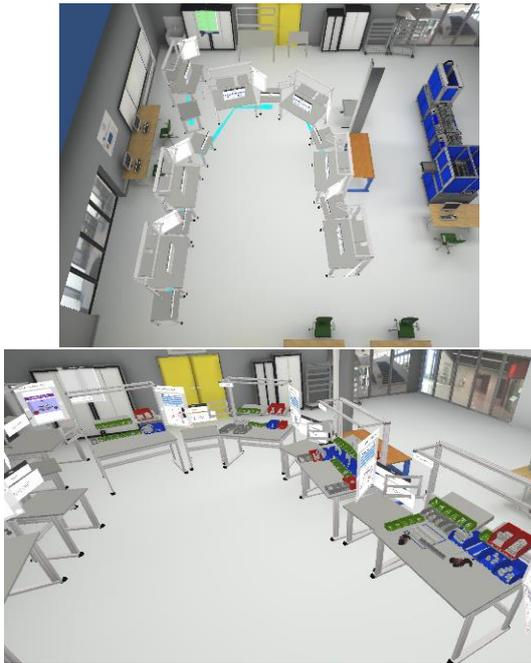


Figure Y : Implantation en VR

- Les cartes de contrôle (Comparaison et conclusions)
- Résultats de la production initiale avec les dysfonctionnements et non-valeurs ajoutées rencontrés, outils d'analyses (Ishikawa, 5P, diagramme spaghetti, ...)
- La mise en œuvre des solutions :
 - o Calcul du Takt Time et du nombre de postes
 - o Equilibrage en fonction de la demande client
 - o Le plan d'actions
 - o Présentation de la nouvelle implantation et du panier (Avantages et inconvénients de la nouvelle implantation et ergonomie des postes de travail)
- Ils présenteront également deux moyens 4.0 qui permettraient de réduire encore plus les non valeurs-ajoutées.

Etape 8 :

Enfin, ils vont travailler l'agencement d'au moins un poste de travail avec la fonction « **Conception Poste** » : Dans cette étape, ils vérifieront que l'encombrement des pièces sur le nouveau poste est envisageable (car ils ont pu mettre par exemple sur un seul nouveau poste, les opérations et donc les composants de deux anciens postes). Ils proposeront aussi une ergonomie améliorée sur le poste de travail.

Etape 9 :

Le groupe présente ces résultats et propositions d'amélioration lors d'une soutenance. L'intervenant pourra alors jouer le rôle d'un décideur qui testera un des postes de travail avec la fonction « **Simulation** ». L'exposé, présentera entre autre :

- La démarche mise en œuvre.
 - o Les fiches processus répondant aux exigences ISO 9001
- Les fiches de poste du panier (Version Française et Anglaise)

Projet système automatisé

Une autre séquence pédagogique a déjà été développée autour de ce jumeau Usine Flexible : Projet systèmes automatisés en pédagogie active par projet. Ce projet pédagogique a intégré en 2022 les nouveaux développements du jumeau numérique de l'usine flexible de production réalisés dans le cadre du projet JENII. Ce projet couvre un champ de compétences assez large qui va de l'automatique à l'ergonomie en passant par l'électromagnétisme et l'analyse fonctionnelle technique. Ce projet est déployé sur 13 campus CESI dans toute la France et est organisé sur 5 semaines pour des élèves ingénieurs en 4ème année post-bac spécialité généraliste ou informatique en statut apprenti ou étudiant ce qui représente 1100 étudiants.



Figure AA : Planning pour session synchronisée au national

En parallèle du jumeau numérique, quelques équipements sont nécessaires sur chaque campus :

- 1 imprimante 3D modifiée
- 1 raspberry pi + caméra
- 1 casque de VR (+ PC associé avec Webcam pour enregistrement des manipulations)
- 1 tablette (RA) pour 36 élèves.

Il est demandé aux apprenants de transformer un prototype (imprimante 3D transformée en encolleuse) en outil de production intégré à une chaîne de production existante. L'objectif est, à partir d'une chaîne de production existante intégrant un poste manuel, de valider un prototype permettant de soulager l'opérateur à ce poste pour proposer son industrialisation en modifiant le prototype et en tenant compte de l'évolution du poste de l'opérateur.



Figure AB : Séquence d'immersion dans le JN - JENII

L'intérêt principal recherché est le réalisme industriel. Le jumeau numérique est l'image de l'existant ce qui permet une immersion dans le contexte du projet. On donne ainsi accès à un équipement de haute technologie, complexe et nécessitant des investissements et moyens humains importants pour l'ensemble des campus (l'ensemble des élèves peuvent en profiter même si l'équipement n'est que sur un seul campus).



Figure AC : Découverte de la ligne en VR

Avec ce jumeau numérique, il est possible d'expérimenter différents scénarii. Les élèves peuvent expérimenter plusieurs agencements pour l'intégration de leur prototype à la chaîne existante pour visualiser la meilleure approche.

Ils ont également la possibilité de rejouer plusieurs fois les scènes lors de la découverte du fonctionnement de la chaîne.

Cette configuration permet d'assurer une continuité pédagogique lors d'un éventuel confinement ou si nécessité de former à distance.

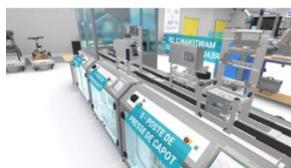
Pour la partie ergonomie, ils ont la possibilité de voir en direct les indices RULA pour rendre visuel les postures à risque de trouble musculo squelettique (TMS) dans la phase de découverte du poste et après intégration du système automatisé.

Le jumeau numérique est utilisé dans 3 séquences pédagogiques durant le projet qui s'étale sur 5 semaines:

- Séquence découverte : Visite en réalité virtuelle si la logistique du centre le permet ou clavier-souris de la chaîne de production décrite dans le projet (vidéo 360°)
- Appropriation du poste manuel : Découverte de la réalité virtuelle et la réalité augmentée à travers une vidéoconférence nationale et un TP de découverte et prise en main des outils (Applications RA et RV développées par CESI LINEACT). Ensuite, prise en main de l'outil utilisé pour le projet et l'enregistrement des actions réalisées. Les élèves peuvent donc expérimenter le poste manuel en réalité virtuelle.



Figure AD : Réalité augmentée



Applicatif en Réalité Virtuelle (PC+casque sur campus)



Applicatif 3D PC (Via Digitalab CESI)



Ressource pédagogique sur la ligne de production (Moodle)

Simulation du process vidéo (Moodle) ou logiciel métier (via datacenter)



Figure AE : Ensemble des outils numériques pour cette séquence

- Intégration du système automatisé pour améliorer la production et impact sur le poste de l'opérateur en termes d'ergonomie :
 - Vidéo sur l'Ergonomie diffusée en centre à l'issue de laquelle les élèves préparent leurs questions pour une séance de question/réponse avec l'expert le lendemain.
 - Conférence nationale sur la robotique et la cobotique.
 - Travail des élèves sur le poste d'encollage des capots en VR pour identifier les risques de TMS.
 - Puis intégration de leur prototype d'encolleuse et d'un bras cobotique à la chaîne existante pour améliorer la performance industrielle en prenant compte de l'ergonomie des actions manuelles restantes (alimentation de la ligne en capots).



Figure AF: Implantation dans JN - JENII

Perspectives de nouveaux développements de modules

D'autres séquences d'apprentissage seront développés dans le cadre de JENII autour de cette plate-forme, notamment :

- Analyse des risques sécurité
- Etude de la variabilité (6 Sigma)
- Juste à temps
- Simulation évolutive des opérations d'assemblage sur les postes manuels
- Diagnostic et cartographie des flux
- Etude et simulation d'une maintenance
- Performance énergétique d'une installation industrielle

Parallèlement, nous mettons en place une connexion entre le jumeau physique et le jumeau numérique pour illustrer le concept de Digital Twin, notamment pour les formations où l'on forme au concept d'industrie 4.0. Sur les postes de travail, les opérateurs ont des boutons pour actionner les andons. En actionnant ces boutons, chaque opérateur peut indiquer si son poste est en train de produire, s'il est à l'arrêt, s'il est manqué de composants...



AG : Andons

Figure

En récupérant ces informations, on peut en déduire :

- L'état de chaque poste
- Le temps de fabrication d'un sous-ensemble et donc d'un produit
- Le nombre de sous-ensemble réalisé par chaque poste

A ce stade, une promotion de bachelor en Intelligence artificielle a testé la mise en place de cette relation via une maquette pour représenter le jumeau physique et un serveur simulant le jumeau numérique (programme python en interface avec des arduinos pour récupérer les appuis boutons et piloter les andons.



Figure AH : Maquette pilotage andons via JN

Ainsi, lorsque le jumeau numérique détecte un poste en retard (ne livre pas assez vite ses sous-ensembles), il inspecte les autres postes pour voir si un poste au contraire, lui, est en avance. Le jumeau numérique indique alors en activant les lumières quel poste a besoin d'aide et quel poste doit s'arrêter de produire pour venir lui prêter main forte.

Une fois que le poste a rattrapé son retard ou que le poste qui avait de l'avance n'en a plus (car son stock de sous-ensembles fabriqués a été quasiment entièrement consommé, le système met à jour les andons.

Grâce à ce système, le jumeau équilibre la fabrication. On peut alors parler de « Jumeau autonome ». En effet, non seulement, il y'a un échange de données dans les deux sens, mais le système peut prédire et anticiper les retards ou ruptures et surtout, il prend seul des décisions et « contrôle » le jumeau physique.

Actions de sensibilisation et de diffusion de la culture scientifique, technique et industrielle

- Ma Métropole Connectée
- Club Ecosystem Cléon 4.0

Les principales actions de sensibilisation aux JNs et de diffusion de la CSTI sur la première année du projet JENII sont :

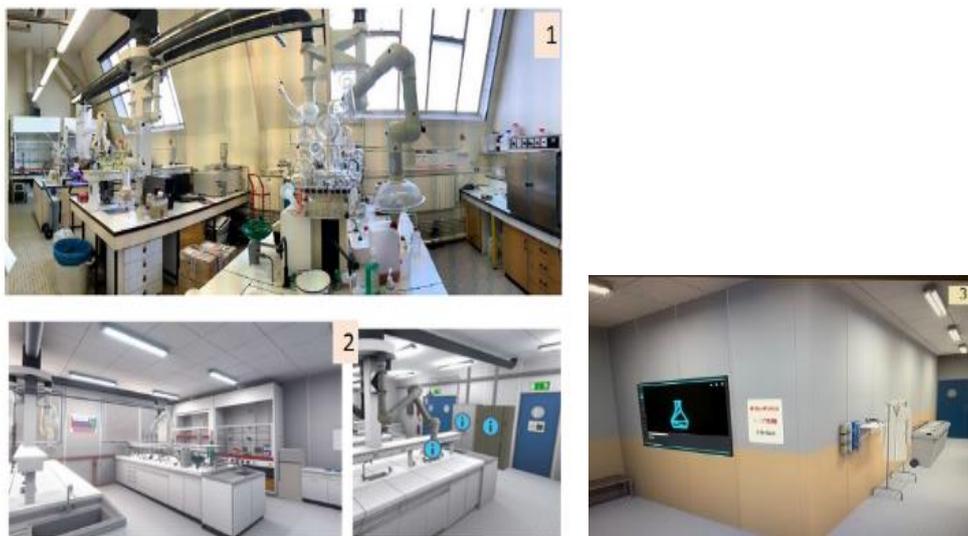
- La participation de plus de 80 personnes regroupant des acteurs du secondaire et des acteurs académiques, industriels et institutionnels lors d'évènements et démonstrations sur les jumeaux numériques, la simulation numérique ou encore sur la digitalisation et l'industrie 5.0. :
 - Journée scientifique : les environnements de simulation numérique et leurs apports à la pédagogie universitaire

- La participation aux développements et aux expérimentations d'une dizaine de stagiaires M2, alternants et doctorants
- L'utilisation par près de 1000 élèves CESI en 2022 du JN de la plateforme industrie du futur de CESI à travers des projets pédagogiques sur le lean manufacturing, les systèmes automatisés et la robotique.

Références :

- Badets, A., Blandin, B., Havard, V., Baudry, D., 2021. Conception de situations instrumentées : étude de cas d'une situation d'apprentissage des concepts du Lean Manufacturing. Presented at the NeoSAI, p. 17.
- Badets, A., Havard, V., Richard, K., Baudry, D., 2020. Using collaborative VR technology for Lean Manufacturing Training: a case study, in: Proc. VRIC. Presented at the VRIC ConVRgence 2020: 22nd Virtual Reality International Conference - Laval Virtual, Laval, France, pp. 118–127.
- Havard, V., Jeanne, B., Lacomblez, M., Baudry, D., 2019a. Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations. *Production & Manufacturing Research* 7, 472–489. <https://doi.org/10.1080/21693277.2019.1660283>
- Havard, V., Jeanne, B., Savatier, X., Baudry, D., 2017. Inoovas—Industrial ontology for operation in virtual and augmented scene: The architecture, in: 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE, pp. 0300–0305.
- Havard, V., Sahnoun, M., Bettayeb, B., Duval, F., Baudry, D., 2020. Data architecture and model design for Industry 4.0 components integration in cyber-physical production systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 0954405420979463. <https://doi.org/10.1177/0954405420979463>
- Havard, V., Trigunayat, A., Richard, K., Baudry, D., 2019b. Collaborative Virtual Reality Decision Tool for Planning Industrial Shop Floor Layouts, in: *Procedia CIRP*. Elsevier, pp. 1295–1300.
- Richard, K., Havard, V., Baudry, D., 2021a. Authoring-By-Doing: An Event-Based Interaction Module for Virtual Reality Scenario Authoring Framework, in: De Paolis, L.T., Arpaia, P., Bourdot, P. (Eds.), *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics, Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing, Cham, pp. 519–527. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_38
- Richard, K., Havard, V., His, J., Baudry, D., 2021b. INTERVALES: INTERActive Virtual and Augmented framework for industrial Environment and Scenarios. *Advanced Engineering Informatics* 50, 101425. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101425>

Case study : Projet Laboratoire de chimie : CNAM - Le Jumeau numérique immersif



Fiche descriptive Figure: A) Laboratoire jumeau physique réel situé au 2 rue Conté, Paris 75003 ; A bis) Laboratoire jumeau numérique en VR ; 3) Espace annexe du laboratoire du jumeau numérique en VR

Le Jumeau d'enseignement numérique, immersif et interactif est un laboratoire de 50 m² comprenant 4 sorbonnes aspirantes, 4 paillasse sèches, des équipements de protection collective, des équipements, de la verrerie de laboratoire et des réactifs chimiques. En outre un espace annexe au laboratoire de 20 m² comprend un espace d'accueil ; un espace dédié aux équipements de protection individuelle (blouses, gants et lunettes de protection) ainsi qu'un poste de récupération de matériel usagé du laboratoire.

Le Jumeau numérique en réalité virtuelle (VR) du laboratoire de chimie est conçu par une équipe pluridisciplinaire interne au Cnam et acculturée à la VR (15 enseignants-chercheurs, 3 techniciens de laboratoires, 3 ingénieurs pédagogiques de la direction nationale des Usages du Numérique - DN1 du Cnam). Cette équipe collabore à la conception des

scenarii d'apprentissage et d'interactions, à la rédaction du cahier des charges et au suivi du projet. L'équipe travaille en lien avec la société Mimbus en charge du développement de l'environnement 3D du jumeau numérique en VR et des interactions qui s'y déroulent, ainsi qu'avec le pôle de compétences *Immersive Learning Lab* - i2I.

Objectifs d'apprentissage généraux :

L'apprenant sera capable : (1) d'évoluer en toute sécurité dans un laboratoire de chimie, (2) d'identifier le matériel du laboratoire et les usages associés, (3) d'acquérir les bons automatismes en termes des procédures de laboratoire, (4) d'utiliser de manière appropriée le matériel et les appareils de laboratoire dans le cadre d'une expérience pratique donnée.

Objectifs d'apprentissage spécifiques :

L'apprenant sera capable de : (1) réagir de manière pertinente face à une possible situation de danger au laboratoire ; (2) organiser son poste de travail et choisir le matériel adéquat pour réaliser une expérience ; (3) peser avec une balance de précision ; (4) effectuer une extraction liquide-liquide avec le matériel adapté ; (5) réaliser le montage à reflux ; (6) réaliser une évaporation sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif ; (7) réaliser et analyser une chromatographie sur couche mince.

Domaine d'application : Le jumeau numérique en réalité virtuelle du laboratoire de chimie ci-dessous abrégé JN-VR chimie, utilisé conjointement avec le jumeau physique laboratoire réel, est un outil d'aide à la formation dans les domaines des industries chimiques, pharmaceutiques et agroalimentaires.

Intérêt du jumeau laboratoire de chimie pour l'enseignement :

Ce jumeau est un outil qui permet (1) Optimiser l'apprentissage de la pratique en laboratoire de chimie (2) Evaluer finement un large panel des compétences (3) Enrichir le recueil des traces d'apprentissage pour mettre en œuvre un meilleur suivi pédagogique (4) Concevoir des parcours individualisés d'apprentissage, (5) Diversifier les séquences d'apprentissage (6) Déployer des formations multimodales et inclusives.

Déploiement du jumeau chimie au Cnam :

En 2021-2022, le JN-VR chimie a été déployé en Ile de France : 10 UE de travaux pratiques de 6 spécialités (chimie générale, chimie moléculaire et formulation, analyse chimique et bioanalyse, biochimie et agroalimentaire, chimie des matériaux et génie des procédés), 90 élèves (du bac +1 au bac +3).

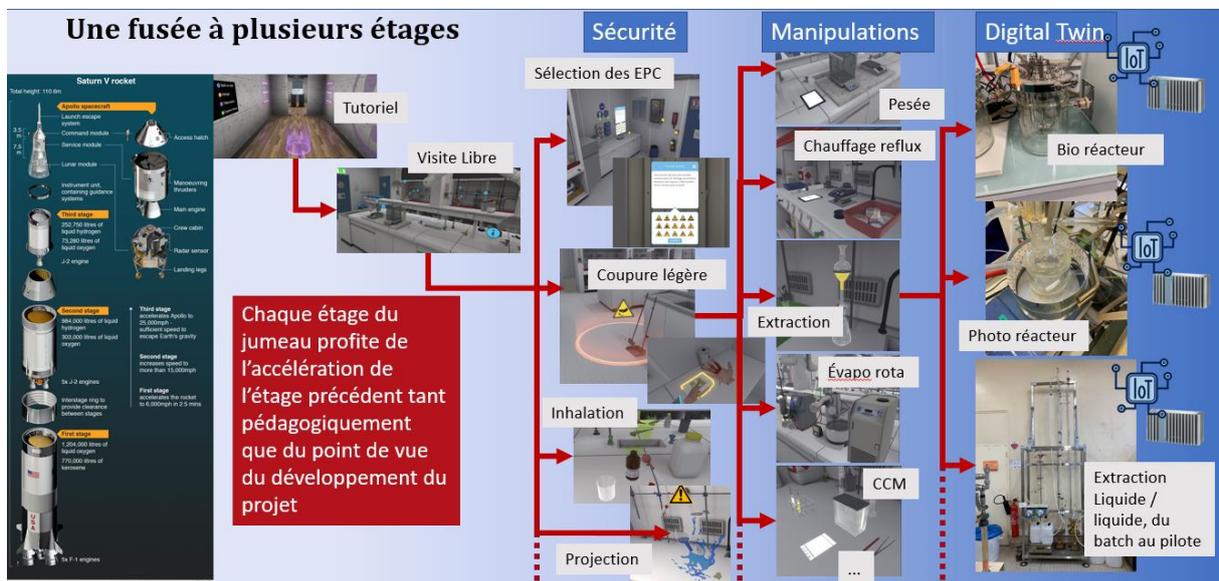


Figure B : utilisation du dispositif de réalité augmentée sur fond vert

Actions de sensibilisation et diffusion de la culture scientifique et technique :

Grand public (100 personnes environ) dans le cadre de l'exposition du JN-VR laboratoire de chimie dans différents salons (VIVA Tech Paris, Virtuality Paris 2022, Carrefour numérique à la Cité de sciences) ;

Collégiens : 15 élèves du collège Alphonse Allais de Val de Rueil, Rouen et 3 élèves du collège American MoreHouse ;

3 Stagiaires niveau Master et 3 Doctorants ;

Partenaires industriels : 3 membres de la Société Corning.

En 2022-2023 un dispositif de virtualité augmentée sur fond vert sera expérimenté auprès de groupes classe d'une quinzaine d'apprenants en présence de leur enseignant. Une personne du groupe classe est équipée du casque VR et immergé dans le jumeau numérique. Son image filmée sur fond vert est incrustée en temps réel dans l'environnement en 3D.



Figure C : utilisation du dispositif de réalité augmentée sur fond vert

Le groupe classe voit évoluer son pair apprenant sur grand écran (photo de gauche), en contexte dans le jumeau numérique. En médaillon en haut à droite de cet écran (photo de droite), le groupe classe voit la vue subjective des manipulations effectuées par ce pair apprenant.

Dans un tel dispositif et selon les expériences des uns et des autres, un tutorat entre pairs est susceptible de se mettre en place pour accompagner la progression de celui ou celle qui « passe au tableau ».

En 2023-2024, les apprenants du Cnam accèderont à distance au JN-VR chimie via le Campus virtuel ce qui leur permettra de pratiquer en autonomie.

Utilité du jumeau laboratoire de chimie du Cnam pour l'apprentissage de travaux pratiques (TP) en laboratoire

Le jumeau laboratoire de chimie est conçu pour mettre en œuvre en toute flexibilité des séquences d'apprentissage qui alternent des séances immersives :

En réalité virtuelle (VR) dans le jumeau numérique laboratoire de chimie ;

En situation réelle dans le jumeau physique laboratoire de chimie.

Son utilisation permet une approche à la fois conjuguée des jumeaux et progressive selon 3 niveaux (débutant, avancé et expert). Ainsi, il peut être proposé à un public allant du niveau bac+1 au niveau ingénieur, en passant par le niveau licence.

En utilisation seul, le JN-VR s'adresse également à un public néophyte pour une découverte ludique et sans risque d'un laboratoire de chimie.

Le jumeau laboratoire de chimie permet de concevoir des parcours pédagogiques flexibles et selon différentes modalités. Ainsi, une séance peut se dérouler en présence de l'enseignant, en demi-groupes répartis entre les jumeaux ou en autonomie,

sous réserve qu'une salle dédiée équipée soit mise à disposition des apprenants.

Selon les objectifs que fixe l'enseignant, l'apprenant pourra par exemple :

Assimiler le caractère dangereux de certains produits et apprendre le maniement du matériel adapté, sans prendre aucun risque. ;

Répéter à l'infini et de manière ludique telle expérience pour apprendre à mieux maîtriser la manipulation et être préparé pour l'exécuter sans erreur dans le jumeau physique (ie dans le laboratoire réel).

Se référer à son expérience en immersion dans le jumeau numérique en tant qu'outil d'aide à la décision pour le travail pratique à effectuer en laboratoire.

Exemple d'une séquence d'apprentissage réalisée en 2021-2022 : Public (Bac +1 à Bac +3)

Modalité : Travaux pratiques en réalité virtuelle en amont des travaux pratiques en laboratoire physique.

Objectifs de la séquence : être capable d'évoluer en toute sécurité dans un laboratoire de chimie ; d'identifier le matériel du laboratoire et les usages associés puis de réaliser un montage à reflux

Sélection des modules parmi la liste suivante des modules disponibles :

Visite découverte du laboratoire ;

Sécurité en Laboratoire :

Identification des équipements de protection collective (EPC) ;

Gestion des risques et dangers en laboratoire ;

Coupure légère ;

Inhalation de produits toxiques ;

Projection.

Manipulations courantes au laboratoire :

Pesée sur la balance de précision ;

Extraction liquide/liquide ;

Montage à reflux ;

Filtration ;

Évaporation sous vide avec un évaporateur rotatif ;

Chromatographie sur couche mince.

L'enseignant choisit les modules 2a), 2e) et 3c) et organise sa séquence comme suit :

En immersion VR via le jumeau numérique laboratoire de chimie :

Séance 1 : acculturation à la VR et apprentissage des interactions en immersion dans le jumeau numérique ;

Séance 2 : apprentissage des équipements de sécurité individuels et collectifs ; gestion des risques en laboratoire avec mise en situation pour contrer un danger via l'exemple de la projection.

Séance 3 : montage à reflux

En salle de TP du jumeau physique laboratoire réel :

Séance 4 : montage à reflux dans le jumeau physique

Séance 1 : jumeau numérique - laboratoire de chimie VR

Étape 1

Les élèves reçoivent *via* l'interface Moodle les documents de préparation aux travaux pratiques, à savoir :

Un fascicule de TP avec le descriptif de manipulations qui seront effectuées au laboratoire.

Un document contenant les notions de sécurité à appréhender avant la séance de TP.

Un document de spécification contenant tous les éléments nécessaires pour appréhender la séance immersive (utilisation du casque de RV, l'utilisation des manettes, les codes couleur..etc..)

Étape 2

Préparation d'une salle équipée avec 3 ou 4 postes (Casque VR et ordinateur), un routeur Wifi, une *cleanbox* pour la désinfection et séchage des casques de réalité virtuelle.

Étape 3

Équipement des apprenants avec casque VR et manettes. Exercices en immersion de maniement des manettes pour interagir avec l'environnement : se déplacer, actionner, saisir, ouvrir etc. (5-10 minutes en fonction de l'apprenant).

Étape 4

L'apprenant maintenant équipé avec un casque de réalité virtuelle et des manettes. Il entre dans la séance immersive et se munit des équipements de protection individuelle (EPI) (gants, lunettes et blouse). Tout au long de l'exercice l'apprenant sera accompagné d'une tablette consultable au niveau du poignet gauche, afin de le guider par différentes fonctionnalités.

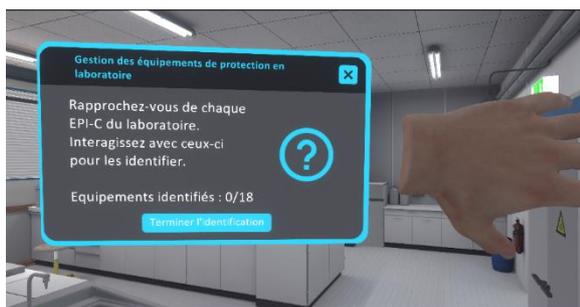


Figure D : Tablette interactive pour guider les apprenants lors des séances immersives

Séance 2 : jumeau numérique - laboratoire de chimie VR

Étape 5 : Module 2a) Identification des Equipements de protection collective (EPC)

Lors de cette séance, l'apprenant identifie d'abord les équipements de protection collective dans le laboratoire de chimie. En fonction du niveau de difficulté choisi, les objectifs et les aides diffèrent.



Figure E : EPC 1 à 7 à identifier

Étape 6 : Module 2e) Gestion des risques et dangers en laboratoire : Projection

L'apprenant doit ensuite effectuer une extraction liquide/liquide quand malencontreusement, il fait tomber du produit chimique dans la sorbonne et sur lui-même. Il devra réagir en conséquence pour éliminer le danger en toute sécurité. En fonction du niveau de difficulté choisi, les objectifs et le guidage des gestes à effectuer diffèrent.

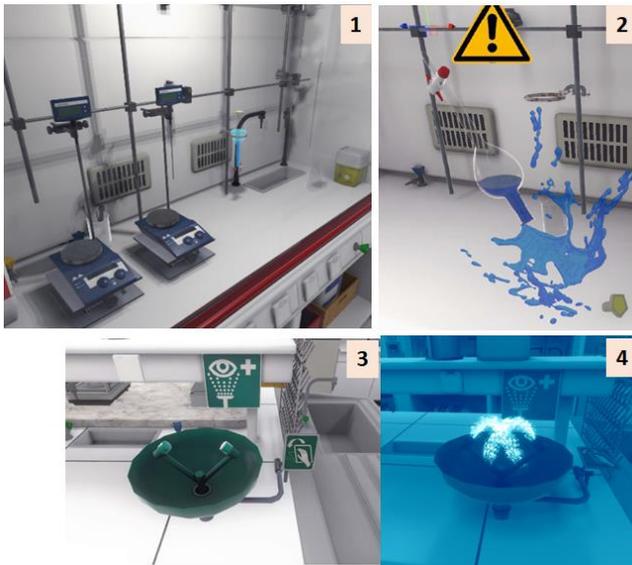
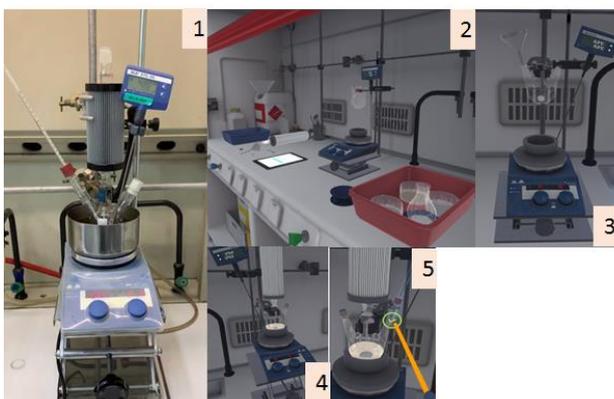


Figure G : Etapes du déroulé d'un scenarii pédagogique pour réaliser un montage à reflux
 1) Poste de travail réel d'un montage à reflux au laboratoire ; 2) Matériel disponible sur la sorbonne en VR 3) Installation du réacteur (tricol) avant les transferts des réactifs ; 4) Installation avant de donner les paramètres de température et agitation 5) Confirmation de la température du thermomètre.

Figure F : Etapes du déroulé d'un scenarii pédagogique pour la gestion du danger projection ;
 1) Poste de travail pour réaliser l'extraction liquide-liquide ; 2) l'ampoule à décanter tombe et le liquide est projeté alentour ; 3) Rince-œil disponible au laboratoire ; 4) Rince-œil actionné - le filtre bleu indique à l'apprenant qu'il a reçu une projection de produit chimique dans les yeux.

Séance 3 : jumeau numérique - laboratoire de chimie VR

Étape 7 : Module 3c) Manipulations courantes au laboratoire : montage à reflux



Lors de cette séance, l'apprenant va mélanger et chauffer différents produits dans un réacteur (tricol) afin de les fusionner à l'aide d'un montage à reflux avec agitateur magnétique. En fonction du niveau de difficulté choisi, les objectifs et le guidage des gestes à effectuer diffèrent.

Étape 8

L'exercice est terminé, l'apprenant est téléporté dans le hall d'accueil face à un écran de score affichant son bilan de l'exercice. L'écran de score affiche la validation ou non de l'exercice. Les résultats pour chaque objectif d'apprentissage visés sont affichés en pourcentage de réussite, les critères d'évaluation de l'exercice, les évènements indiquant l'ensemble des actions validées par l'utilisateur depuis le démarrage de l'exercice.



Figure H : Ecran de score

Étape 9

Après 35 min d'expérience immersive dans le JN-VR, l'enseignant sollicite immédiatement un retour d'expérience du déroulement du TP. Cette étape est primordiale pour l'ancrage des connaissances.

Étape 10

En dehors de la séance, l'enseignant évalue la réussite et les compétences acquises par les apprenants via la plateforme Analytics VULCAN qui facilite le suivi pédagogique en proposant un tableau de bord des traces d'apprentissage. Sur cette base, l'enseignant a alors la possibilité de créer des parcours personnalisés de remédiation pour ses apprenants.

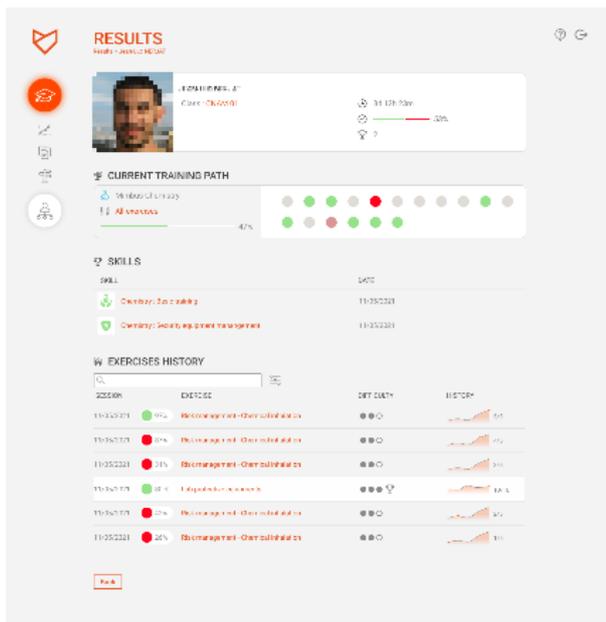


Figure I : Exemple de retour visuel de la plateforme *Analytics Vulcan*

Séance 4 : jumeau physique – laboratoire de chimie réel

Les apprenants ont pu s'exercer et corriger leurs erreurs grâce aux parcours personnalisés défini pour chacun par l'enseignant. Leurs acquis d'apprentissage via le jumeau numérique leur permettent de transposer leur expérience vécue à la réalité du laboratoire. Ils complètent alors leurs apprentissages en effectuant les gestes du montage d'un chauffage à reflux en laboratoire réel, en toute sécurité.

Lors de cette séance, l'enseignant encadre et accompagne ses apprenants en la salle de TP, il les guide dans l'acquisition des gestes fins de manipulation du matériel et des appareils. Le temps de laboratoire est optimisé (gain de temps ~ 30%) et cela permet d'aller à l'essentiel et/ou d'approfondir.

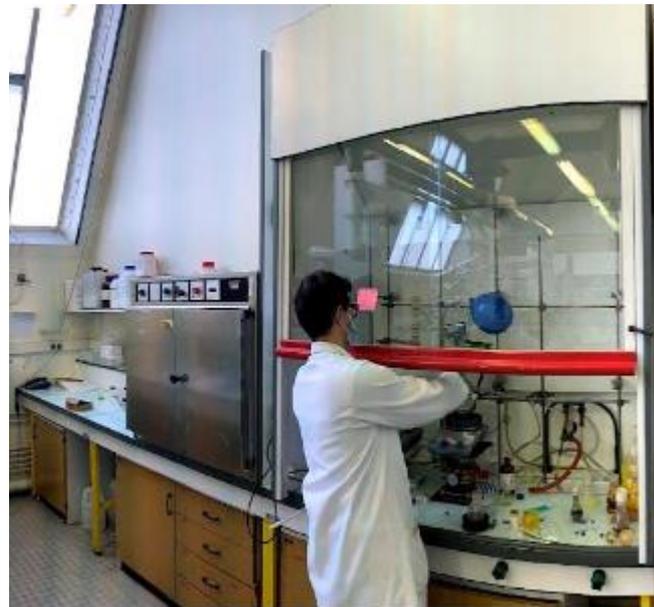


Figure J : Apprenant réalisant un montage à reflux pendant la séance de travaux pratiques

Perspectives de nouveaux développements de modules

Séquences d'apprentissages connectées aux données réelles d'expérience

En 2023, des modules immersifs dédiés au génie des procédés et bioprocédés seront développés. De nouveaux appareils seront modélisés et les modules utiliseront des données physico-chimiques recueillies par diverses mesures : de température, de pression, de vitesse d'extraction et/ou d'agitation, de couleurs, valeurs de pH, de solubilités des mélanges, etc. Les modules du jumeau numérique mettront en œuvre des appareils connectés à ces données afin d'enrichir l'expérience apprenante en VR d'une multitude de scénarios utilisateurs.



Figure K : A gauche bioréacteur des procédés, à droite un appareil d'extraction liquide-liquide dans une colonne garnie pulsée

METAVERS POUR L'ENSEIGNEMENT



Cas particuliers des jumeaux numériques de campus ou Campus Virtuels (CV)

La “seconde life” du Métavers ?

Il est de ces dates qui marquent l’histoire. Est-ce que le Jeudi 28 Octobre 2021 en fera partie ? L’avenir nous le dira.

Lors d’une conférence virtuelle, le patron de Facebook, Mark Zuckerberg dévoile le nouveau nom de sa société, Meta, qui englobe Facebook, Instagram, WhatsApp et Oculus. Il explique que l’entreprise se tourne vers l’avenir et le « Métavers », un univers mélangeant réalités virtuelle et augmentée, considéré par Zuckerberg comme « le futur de l’Internet mobile.

Dionisio et al. (2013) expliquent que le Métavers constitué du préfixe "meta" qui signifie "au-delà" et "verse" qui est une abréviation de "univers, désigne littéralement un univers situé au-delà du monde physique. Le métavers résulte du mariage de deux notions :

- La réalité virtuelle, qui permet de s’immerger dans un univers en 3D et d’y évoluer ;
- Les réseaux, qui permettent aux individus d’interagir à distance.

Un métavers est un univers virtuel dans lequel il est possible de se promener sous la forme d’un avatar numérique et d’y rencontrer d’autres avatars, correspondant à des personnes réelles.

L’immersion peut être plus ou moins totale selon que l’accès se fait via un casque de réalité virtuelle ou une simple interface PC ou mobile.

A l’image d’Internet, un métavers est ouvert 24h sur 24, chacun pouvant s’y connecter quand il le souhaite et croiser ceux qui sont connectés au même moment.

Le mot Métavers a été inventé par Neal Stephenson en 1992 dans son roman *Snow Crash*. Dans l’imaginaire du romancier, Les humains interagissent en tant qu’avatars (Tasa, 2009), avec des agents intelligents dans un monde virtuel immersif. Mais le concept avait déjà été imaginé dans d’autres

œuvres : *Simulacres* de Philip K. Dick en 1964 et *Simulacron 3* de Daniel F. Galouye, en 1964.



Figure A : *Snow Crash* de Neal Stephenson

Pour Lepage et Mettrie, c’est un « monde virtuel où des espaces, persistants et partagés, sont accessibles via une interface immersive » (Lepage & Mettrie, 2022).

Les applications du Métavers sont multiples : Simulation, jeu, travail, social, marketing, éducation...

Métavers permet aux individus d’interagir dans un environnement tridimensionnel et permet l’utilisation efficace du langage corporel grâce à la communication visuelle et au clavardage vidéo entre avatars et gestes (Owens, 2012). Tout en exprimant le concept du Métavers comme une réalité cyber-sociale, Kuş (2022) le définit comme une nouvelle réalité dans laquelle différentes technologies sont partagées. Selon Gökçe Narin (2021), le Métavers est une simulation du monde naturel.

Bien que le Métavers se réfère à un monde 3D immersif, les concepts concernant la nature et l’organisation du Métavers ont changé au fil du temps. Selon la tendance générale, le Métavers est un réseau de mondes virtuels interconnectés plutôt qu’une version plus forte d’un seul monde virtuel (Dionisio et al., 2013). Par conséquent, pour mieux comprendre le Métavers, il est d’abord nécessaire de comprendre le concept de mondes virtuels. Les mondes virtuels sont des environnements qui

contiennent des mondes graphiques tridimensionnels et sont une sorte de simulation de la réalité physique (Metcalfe et al., 2011). Selon Dickey (2005), les mondes virtuels sont des applications de bureau en ligne dans lesquelles les utilisateurs peuvent interagir et se déplacer dans des environnements simulés en trois dimensions. Selon une autre définition, les mondes virtuels sont des environnements dans lesquels des utilisateurs indépendants peuvent interagir en ligne (Dionisio et al., 2013).



Figure B : *Seconde Life*

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Second-life-enterprise.jpg>

En 2003, surgit de nulle part Second Life, créé par Linden Lab. Ce logiciel gratuit et en version beta permet d'accéder à un monde virtuel via internet. Il connaîtra ses heures de gloire entre 2006 et 2010, avec un succès surtout médiatique. Second life suscite en effet beaucoup de curiosité, d'interrogation et de fantasmes.

De la curiosité d'abord, en effet on pense avoir à faire à un nouveau jeu vidéo ou à un nouveau réseau social, beaucoup testent à cette époque Second Life pour mieux comprendre ce phénomène médiatique. Très vite, on comprend que c'est bien plus qu'un jeu vidéo, car il offre certes des fonctionnalités ludiques mais aussi des fonctionnalités sociales, économiques et commerciales.

De l'interrogation, car beaucoup s'interrogent (utilisateurs comme non utilisateurs) de quelle est la finalité de cette application. Qu'est-il réellement possible de faire dans ce monde virtuel ?

De fantasmes ensuite, que ce soit sur les possibilités futurs de cet outil ou des objectifs de Linden Lab.

A sa sortie, Seconde Life était présenté comme un espace de rencontre ; mais en 2006 apparaissent plusieurs nouvelles fonctionnalités et l'introduction d'une monnaie : le Linden Dollar. Seconde Life s'ouvre alors sur un public plus large et pas que « geek » et devient un espace de rencontre, mais aussi de collaboration, de marketing, de commerce...).

Les résidents (nom donné aux « joueurs » de seconde life) pouvaient ainsi dépenser des Linden Dollars (achetés avec de l'argent réel) pour s'acheter des vêtements à leur avatar, construire et décorer leur habitat virtuel... Si vous étiez invité à un mariage dans Seconde Life ou si vous vous rendiez à un concert, il fallait choisir une tenue de rigueur. Certains événements ont par exemple été organisés pour la campagne présidentielle française de 2007. Ainsi, beaucoup de marques se sont installées dans Seconde Life et certains ont tenté l'aventure de l'entrepreneuriat : en créant une boutique, en embauchant un constructeur pour la construire.

Cependant, les entreprises ont souvent fait l'erreur d'aller dans Seconde Life comme pour juste acheter un espace publicitaire. En effet, elles ne proposaient que rarement des services et contenus pour les avatars. De plus, la crise de 2008 aura été fatale à ce premier printemps des métavers, trop précoce par rapport à l'état des technologies et des réseaux (source : La formation dans le métavers : pour ou contre ? - RHEXIS (managementdelaformation.fr)).

Second Life se fait très discret depuis une dizaine d'années, même si on peut compter jusqu'à 40 000 utilisateurs connectés en même temps ; là où dans le même temps les nouveaux acteurs du métavers ont un nombre de connectés, en même temps, moindre : VRChat, 20 000 utilisateurs, Decentraland, 7000 utilisateurs ou encore The Sandbox, 520 utilisateurs

Néanmoins, il faut noter que pour ces derniers, il faut investir dans un matériel spécifique : les casques de réalité virtuelle.

Pourquoi le Métavers revient sur le devant de la scène ?

Outre des succès de science-fiction, comme Ready Player One (2018), Free Guy (2021) ou le dernier Matrix (2021), sans oublier plusieurs épisodes de Black Mirror, on peut expliquer le « renouveau » du Métavers par plusieurs phénomènes :

- Cryptomonnaie
- Microtransactions
- Succès de jeux ouverts : Fortnite, Roblox, Minecraft
- Maturité des technologies
- Mais aussi (et peut-être surtout), les expériences d'interactions limitées lors des confinements de la crise sanitaire

Mark Zuckerberg y voit alors un alignement de planètes : « Nous sommes convaincus que le métavers succédera à l'Internet mobile. Nous pourrions nous sentir présents, comme si nous étions physiquement ensemble, peu importe la distance qui nous sépare [...]. L'histoire de la technologie dans nos vies peut se résumer à la façon dont elle nous a permis de nous exprimer et de découvrir le monde avec encore plus de richesse. [...] Nous sommes passés de l'ordinateur au web, puis aux téléphones portables. Des textos aux photos et aux vidéos. Et ce n'est pas fini. La prochaine plate-forme et le prochain média seront encore plus immersifs : une personnalisation d'Internet où vous ne vous contenterez pas de regarder l'expérience, mais en ferez partie. C'est ce que nous appelons le métavers.

Et vous pourrez faire presque tout ce que vous imaginez : passer du temps avec des amis et votre famille, travailler, apprendre, jouer, acheter, créer, et bien d'autres nouvelles catégories d'activités qui diffèrent de la façon dont nous concevons les ordinateurs ou les smartphones de nos jours [...]. Il ne s'agit pas de passer plus de temps sur les écrans. Il s'agit de donner plus de sens au temps que nous y passons déjà. »

Ainsi, ces mondes virtuels sont **persistants**, **sociaux** (on peut interagir avec d'autres gens), **connectés** (accès via le web), **immersifs** (utilisables avec un casque de RV ou de RA). Il en existe plus de 300 actuellement qui ne sont pas encore reliés. Le métavers existera (dans 10 ans ?) quand on pourra se créer un avatar **persistant** et passer d'un monde à l'autre : les mondes virtuels seront en réseau et auront adopté un standard technique commun.

« Que crois-tu donc qu'il répondra si quelqu'un lui vient dire qu'il n'a vu jusqu'alors que de vains fantômes, mais qu'à présent, plus près de la réalité et tourné vers des objets plus réels, il voit plus juste ? si, enfin, en lui montrant chacune des choses qui passent, on l'oblige, à force de questions, à dire ce que c'est ? Ne penses-tu pas qu'il sera embarrassé, et que les ombres qu'il voyait tout à l'heure lui paraîtront plus vraies que les objets qu'on lui montre maintenant ? »

Platon, l'Allégorie de la caverne

Le métavers a le potentiel d'étendre le monde physique en utilisant les technologies de réalité augmentée et virtuelle permettant aux utilisateurs d'interagir de manière transparente dans des environnements réels et simulés à l'aide d'avatars et d'hologrammes (Dwivedi et al., 2022).

Caractéristiques du Métavers

Chaque génération réapprend le monde et renégocie son rapport au réel en utilisant les dispositifs techniques dont elle dispose dans le contexte socioculturel qui est le sien ».
Stéphane Vial, 2013

Dans le cas spécifique des dispositifs de formation en ligne, ce lieu social d'interactions et de coopération, recouvre différentes dimensions (technologiques, sociales et relationnelles, symboliques et sémiotiques) qui en font sa richesse et sa complexité (Peraya, 1999). Il peut s'agir de dispositifs aussi variés que des environnements numériques de travail, des applications ludiques de formation à distance type serious games, des outils collaboratifs, des applications immersives de simulation, bref un ensemble important de dispositifs scéniques, physiques et numériques.

Dans cette acceptation, l'immersion engendre de nouveaux effets de présence, de nouvelles formes de représentations du sujet dans les environnements numériques, la reconfiguration des relations sociales par l'image et le son spatialisés, et entre autres la possibilité de s'évader du monde physique pour occuper de nouveaux espaces numériques peuplés de mondes imaginaires.

Certains critères permettent de déterminer si un environnement est un monde virtuel ou un Métavers (Dionisio et coll., 2013) :

1. **Réalisme** : Ce critère signifie que les utilisateurs sentent qu'ils participent émotionnellement et psychologiquement à un autre espace. Dans le contexte de la réalité immersive, le comportement des utilisateurs proches de la réalité physique est l'un des critères de Métavers.
2. **Ubiquité** : L'une des caractéristiques du Métavers est qu'il est accessible via différents appareils tels que les appareils mobiles, les ordinateurs de bureau ou les tablettes. Ce critère signifie également que

- l'utilisateur est reconnu dans l'environnement Métavers, semblable à la reconnaissance de la vie réelle, avec ses caractéristiques personnelles uniques telles que ses attributs physiques et les informations d'identité. L'identité définie de l'utilisateur peut-elle être maintenue à travers diverses transitions entre l'environnement Métavers et la vie réelle ?
3. **Interopérabilité** : Elle s'exprime par la capacité de différents systèmes et plateformes à échanger des informations, ainsi que des compétences en communication. Les différents environnements Métavers, comme la structure d'Internet qui permet différents réseaux et sous-réseaux, ont-ils des normes communes pour l'échange et le transport d'objets, d'avatars et de comportements ?
4. **Évolutivité** : Le problème d'évolutivité est lié au nombre d'avatars simultanés dans le Métavers, au nombre et à la complexité des objets, et aux dimensions de l'interaction entre les utilisateurs simultanés. L'architecture du serveur permet-elle l'existence simultanée de plusieurs personnes ?

Sources : Talan et Kalinkara (2022)

Le métavers a été reconnu comme étant la prochaine génération de connexion sociale. Il fait référence à un monde créé, dans lequel les gens peuvent « vivre » selon les règles définies par le créateur (Farjami et coll., 2011; Kye et coll., 2021). Un métavers pourrait être entièrement ou partiellement virtuel; par exemple, il pourrait s'agir d'un monde entièrement virtuel comme un système de réalité virtuelle (RV) ou d'un monde partiellement virtuel comme l'utilisation de la réalité augmentée (RA) dans des contextes réels (Avila, 2017). Dans l'espace Métavers, les gens peuvent participer à des activités sociales comme discuter d'un problème, collaborer à un projet, jouer à des jeux et apprendre de l'expérience ou de la résolution de certains problèmes (Bourlakis et coll., 2009; Jovanović et Milosavljević, 2022; Park et Kim, 2022). Ses partenaires ou amis dans le métavers pourraient être des personnes réelles ou des personnages virtuels (Diaz et coll., 2020; Kye et coll., 2021). De plus, il peut y avoir différents types d'activités ou d'événements dans le métavers, tout comme dans le monde réel, comme les activités économiques, les événements politiques et les catastrophes naturelles (Davis et coll., 2009; Diaz et coll., 2020). Dans un tel monde virtuel, la seule limitation est l'imagination des gens. De plus, grâce à la fonction de consignation de vie (lifelogging function), les détails de la vie dans le métavers peuvent être entièrement enregistrés (Thawonmas et Fukumoto, 2011).

Certaines personnes pourraient considérer le métavers comme simplement un nouveau terme pour RV ou RA; cependant, il est beaucoup plus que RA ou RV (Park & Kim, 2022). Il y a trois caractéristiques du métavers qui le rendent très différent du RV ou du RA conventionnel : « partagé », « persistant » et « décentralisé ». De plus, l'intelligence artificielle (IA) est une technologie nécessaire pour permettre au monde du métavers de fonctionner selon les règles définies par le créateur. À partir de ce cadre, on peut voir qu'un système AR ou VR pourrait faire partie du métavers pour présenter le contenu virtuel; d'autre part, le Métavers pourrait contenir des éléments AR ou VR plus d'autres éléments requis. En ce qui concerne la

caractéristique du « partagé », l'apprentissage d'un élève avec un système de formation en réalité virtuelle ne peut pas être considéré comme un exemple du métavers dans l'éducation. Dans un système de RV multi-utilisateurs, comme Second Life, les gens peuvent interagir avec d'autres en utilisant une nouvelle identité; toutefois, si le système est incapable de fournir un monde persistant permettant aux utilisateurs de « vivre », comme le travail, la propriété, l'apprentissage, l'interaction, la création et le divertissement, ce n'est pas un Métavers du point de vue de la « persistance ». De plus, des technologies décentralisées (p. ex., chaînes de blocs) sont nécessaires pour garantir que les activités économiques peuvent être menées en toute sécurité et que les biens personnels et les registres dans le métavers ne seront pas modifiés par d'autres (Min et Cai, 2022).

Campus virtuels et “métaversité”

La COVID et les limites de la visioconférence



Figure C : « Visio »conférence

Les enquêtes menées durant les périodes de confinement dû au COVID-19 font souvent état de l'insatisfaction des enseignants et des apprenants des modalités de **formation à distance** mise en place dans l'urgence et la contrainte. L'analyse faite par Plateau (2020) des données collectées auprès d'apprenants français et belges du primaire au supérieur et de leurs enseignants ou formateurs (5000 réponses) soulignent l'insatisfaction de la moitié des deux publics (50 % des apprenants et 49,6 % des enseignants) vis à vis de la formation à distance mise en place durant la première période de confinement. Les raisons d'insatisfaction des apprenants portent sur le manque ou besoin de contacts humains, la nostalgie des interactions vécues en présentiel, des difficultés de concentration et de motivation liées à l'environnement de travail avec ses contraintes et distractions.

Dans une étude réalisée au niveau national par Martin et al. (2021) sur le vécu des étudiants français de leurs conditions d'étude durant le deuxième confinement (11 516 répondants), 91,2% des étudiants déclarent avoir suivi des cours par visioconférence au rythme de 8 cours par semaine pour 50,6% des répondants. Les étudiants répondant relèvent plusieurs difficultés et insatisfactions :

- 60% disent ne pas réussir à se concentrer plus d'une heure face à l'écran (21,6% moins d'une heure et 41% 1h, 5,5% disent 3h et seulement 3,6% 4h et plus).
- 37,7% estiment que leur participation pendant le cours en visioconférence est moindre par rapport à l'enseignement en présentiel
- 72,3% estiment avoir beaucoup moins d'interaction avec les autres étudiants que pendant les cours en présentiel.

Dans une enquête menée auprès des étudiants à l'école de médecine dentaire de Harvard (Chen et al., 2021) qui a fait le choix de l'enseignement synchrone, les étudiants déclarent que leur apprentissage s'est détérioré (44 % "quelque peu détérioré" et 26 % "considérablement détérioré"). Les résultats de l'enquête indiquent que l'épuisement professionnel a augmenté, la perception de l'assiduité des étudiants est restée la même mais l'engagement et la rétention ont diminué. Questionnés sur le format qu'ils préfèrent, les étudiants considèrent que des classes virtuelles avec des sessions de questions-réponses et des discussions en petits groupes basées sur des cas concrets pourraient améliorer l'engagement et réduire l'épuisement.

Côté enseignant, Faller (2020) constate que la visioconférence rend difficiles les échanges informels de l'enseignant avec ses étudiants avant ou après le cours et lors des pauses alors qu'ils apportent une forme d'humanisation. De même, l'enseignant ne peut pas réagir aux signaux qu'il peut repérer à travers les expressions des visages des étudiants car dans la plupart du temps il n'a pas accès à leur image ; sans parler des astuces des étudiants pour avoir l'air connecté alors qu'ils font autre chose. Dubruc (2021) souligne que la communauté « ne peut plus interagir à partir d'éléments physiques, en se regroupant côte à côte. Les apartés sont moins évidents et se font seulement par clavardage ou par un deuxième moyen. Les pauses se font chacun chez soi et non plus autour d'un café » (p.227)

Le supérieur s'en empare

Depuis le COVID, l'enseignement supérieur s'est penché sérieusement sur les solutions d'immersion de type campus virtuel. En Europe, on peut notamment citer l'exemple de NEOMA qui a réalisé en Septembre 2020, une rentrée dans « son 4^{ème} campus 100% virtuel ».



Figure D : Le supérieur s'en empare

Le campus virtuel est alors un espace virtuel persistant permettant le travail à distance et les échanges sociaux des différents usagers du campus physique (élèves, corps professoral, personnel technique et administratif). Il peut servir de point d'entrée vers d'autres espaces virtuels comme les jumeaux numériques.



Figure E : Un mot valise a alors fait son apparition : la métaversité (Rejoins la métaversité ! Comment les mondes virtuels immersifs révolutionnent la formation. Stéphanie Buisine, Emmanuelle Galichet, Simon Richir, Maité Sylla, Thierry Koscielinkak. Laval Virtual Europe, 14 avril 2022 <https://mediaserver.cnam.fr/videos/rejoins-la-Métaversité/>).

Des évènements autour du Métavers dans la formation



Figure F : Evènements autour du Métavers

Intérêts de l'utilisation pédagogique d'un campus virtuel

Les intérêts

Ce sous-chapitre vise à faire la liste non exhaustive des atouts de l'utilisation d'un campus virtuel lors d'une séquence d'apprentissage :

- Favorise les interactions sociales, améliore le relationnel (les lieux et rencontres informels)
- Renforce la cohésion du groupe classe
- Développe l'entraide
- L'aspect ludique favorise la curiosité et l'exploration
- Renforce le sentiment de présence dans un espace commun
- Accessible de n'importe quel appareil



Figure G : Du lieu hybride au lieu virtuel : comment la réalité immersive et le métavers vont-ils bousculer la pédagogie ? (<https://edtechfrance.ubicast.tv/videos/du-lieu-hybride-au-lieu-virtuel-comment-la-realite-immersive-et-le-Métavers-vont-ils-bousculer-la-pedagogie/>)

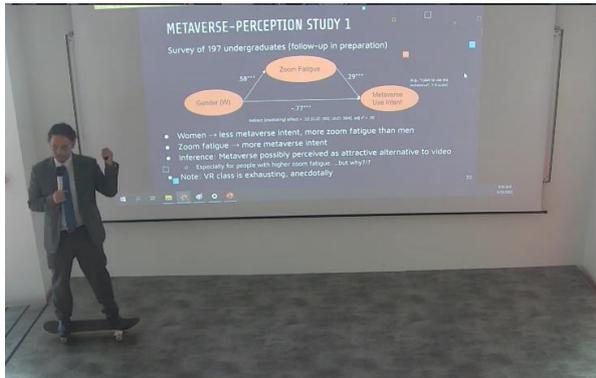


Figure H : Le métavers - Conférence du
Professeur Robby Ratan à CESI
<https://www.youtube.com/watch?v=fAqFq67qvn8>

Les limites

La technologie et l'infrastructure n'existent pas encore pour permettre le développement de nouveaux mondes virtuels immersifs à grande échelle (Dwivedi et coll.)

On peut noter aussi des expériences disparates et des vécus différents :

- Moins de contact humain (regard, mimique, gestuelle)

- Difficulté d'interaction (ex : s'adresser à quelqu'un)
- Réduit les interactions sociales
- Nécessite un équipement

Une étude menée par Bonfils (2008) sur l'utilisation de mondes persistants dans un cadre pédagogique souligne l'intérêt accordé par les étudiants à l'ergonomie du dispositif qui peut être, selon l'auteur, rédhibitoire chez un public aguerri aux nouvelles technologies.

Limites du Métavers mentionnées par les étudiants dans une enquête étudiant menée par Talan et Kalinkara (2022)

- Dépendance aux écrans et à la technologie, interférence avec la vie sociale, déconnexion de la vie réelle
- Un usage inconscient et malveillant du Métavers rendrait l'apprentissage difficile et empêcherait un apprentissage permanent.
- Quand c'est utilisé dans des salles de classe bondées, le Métavers peut causer des problèmes de désordre et de bruit, d'incapacité à maintenir la discipline dans la classe et la distraction de l'attention des élèves peuvent survenir.

Les craintes

On peut aussi craindre un effet réseaux sociaux, une perte de contrôle, des débordements. En effet, ce type d'outils peut engendrer des comportements nouveaux pour l'enseignants.

Quelle vision au sein de JENII ?

L'objectif premier de JENII est la création de jumeaux numériques, mais le projet vise aussi à mettre en œuvre un campus virtuel avec comme finalité d'apporter des preuves de concepts sur plusieurs fonctionnalités. Nous nous sommes interrogés sur celles-ci. Est-ce que ce campus virtuel est un environnement d'apprentissage ou un espace de diffusion des jumeaux numériques, ou les deux ?

Transcription de l'interview de Thierry Koscielniak avec Cécile Dejoux (professeure au Cnam) :

« La différence entre le web 2 et le Web 3 qui est aussi un synonyme de Métavers, c'est le fait qu'on puisse faire du **travail collaboratif immersif** dans des espaces immersifs. Immersif : le mot qu'il faut absolument retenir. L'immersion ce n'est pas seulement avec un casque VR : le joueur de jeu vidéo multijoueurs dans un espace tridimensionnel est immergé dans son jeu avec d'autres.

Imaginer l'enseignement supérieur dans un métaverse c'est dépasser la dimension des cours en visioconférence. C'est avoir la possibilité d'aller dans des espaces immersifs pour participer à un cours, le préparer et y enseigner. C'est le sens du projet JENII qui va créer un campus virtuel. **Le projet JENII posera la première pierre virtuelle d'un Métavers universitaire, un campus virtuel inclus dans le concept de Métaversité.**

En France, il y a un écosystème de plus en plus intéressant avec des acteurs comme les Edtechs, des sociétés qui proposent ces espaces immersifs, ces mondes collaboratifs.

Il va nous falloir associer à ces espaces immersifs émergeant notre ADN académique : l'Open Source pour réellement faire vivre concept de la Métaversité ».



Figure 1 : Exemples de réunion avec immersion 3D via un avatar



Figure J : A Gauche : Expérience de monde virtuel récente durant la période de confinement (conférence, Journée portes ouverte). A droite, une expérience plus ancienne type découverte d'environnement Second Life

En quelques mots, la vision du campus par JENII c'est : Un espace persistant 3D accessible (web écran, WebVR, multiplateforme), l'intégration aux systèmes des établissements (authentification, LMS, Teams...), un espace de socialisation (jeux, interactions...), un accès aux Jumeaux Numériques, accessible en autonomie, seul ou en groupe ou en classe suivant un scénario configuré, des avatars type ReadyPlayer.me avec tenues au choix ou imposées



Figure K : Amphi virtuel

Une plateforme mutualisée sera donc construite (cloud) et des campus numériques permettront un accès ergonomique aux différents espaces de formation digitaux avec un sentiment de présence immersif permettant d'augmenter l'implication de l'apprenant et son interaction avec les autres membres de sa communauté éducative (autres apprenants, formateurs, personnels d'appui aux formations). Ainsi, le campus virtuel JENII fera la jonction entre les jumeaux, telle une bibliothèque.

Ce « hub » (sasse) avant les jumeaux permettra notamment de :

- Créer des liens avec une communauté d'apprentissage
- Permettre un tutorat
- Offrir un environnement persistant
- Créer de l'entraides
- Récupérer des datas Analytics pour les communiquer
- Savoir qui est connecté

Appropriation par les étudiants et par les enseignants

Lorsque nous avons rencontrés les porteurs de projets concernant les jumeaux numériques, nous les avons aussi interrogés sur leur vision à propos des campus virtuels. Deux réponses sont revenues très régulièrement. La première c'est que plus de la moitié des porteurs de projets ne voient pas la plus-value de l'outil et sont encore en attente de preuve de concept. Néanmoins, un tiers des porteurs dit se remettre en question depuis la période COVID. Ils pensent alors que l'outil de visioconférence montre ses limites, en terme d'engagement, de motivation et de concentration.



Figure L : Verbatims de porteurs de projet JENII

Dans l'enquête menée par Talan et kalinkara (2022) auprès d'étudiants (computer engineering) dans une université turque, les auteurs soulignent une perception positive des étudiants vis à vis du Métavers, ils considèrent qu'il facilite l'apprentissage et la compréhension, rend la classe amusante (fun) et les apprenants actifs en permettant leur participation en classe. Le Métavers rend le contenu pédagogique attractif et le cours interactif ce qui augmente l'intérêt et la motivation des étudiants. Le Métavers peut être également un support à l'apprentissage à distance en offrant une flexibilité dans le temps et l'espace.

Ainsi, les grandes orientations du campus immersif JENII sont :

1. **Utilité** : éviter de tomber dans du simple gadget
2. **Bac à sable pédagogique** : Permettre les expérimentations pédagogiques innovantes
3. **Un monde auto-construit** : Donner du pouvoir de création et d'appropriation du monde virtuel
4. **Technologie accessible** : Baser les choix techniques sur l'accessibilité de l'outil plutôt que les performances

Pour faire de ce campus virtuel, un outil réellement utile et non un simple gadget, il doit, à nos yeux, se reposer sur les éléments suivants :

- **Entraide** : Créer un environnement permettant l'entraide à l'aide d'outils modernes : FAQ, documents, vidéos, modèles 3D, jumeaux simplifiés
- **Socialisation** : Permettre aux étudiants des différents campus physiques et aux individuels (CNAM) de créer des liens, grâce par exemple à des activités ludiques (fléchettes, billard, bateaux...)
- **Attractivité** : Apporter une touche de fun et de modernité aux cours réputés ennuyeux
- **Accessibilité** : Le Campus Immersif doit être accessible de partout, de tout appareil, sans installation. Il ne doit pas y avoir de frein à son utilisation.



Figure M : Quelques mises en situation

Le Campus Immersif sera un lieu d'expérimentation de nouvelles fonctionnalités pédagogiques

- Personnalisation des salles de cours : médias, documents, zones de conversation isolées
- Modes d'expression : animations, bulles d'information
- Webcam et partage d'écran
- Utilisation de modèles 3D, images et vidéos 360°

A contrario, les Jumeaux Numériques, fonctionnant sur une application dédiée, suivront les scénarios pédagogiques enregistrés, et n'auront initialement pas accès à ces nouvelles fonctionnalités pédagogiques. L'expérience Campus Immersif permettra de déterminer lesquelles sont indispensables à un enseignement virtuel, et contribuera donc à l'amélioration des Jumeaux.

Le Campus Immersif sera aussi un monde auto-construit afin de répondre aux attentes de chaque utilisateur. En effet, nous laisserons la possibilité aux utilisateurs de créer leur propre monde :

- Chaque campus sera responsable de la création de son propre « jumeau numérique de campus »
 - En autonomie avec des blocs de base (salles, extérieurs, 360°...)

- Avec l'assistance de Laval et/ou d'étudiants compétents pour créer des environnements sur mesure
 - Un système de droits permettra de déléguer la création des différents espaces à différents niveaux (campus, bâtiment, salle...). On pourra envisager de donner aux étudiants la possibilité de participer à cette création, en complétant des FAQ ou des documents, en important des modèles 3D...
 - La possibilité de visiter les autres campus créera une stimulation et une inspiration pour les améliorer tous
- derniers sont engagés dans une démarche de collaboration à distance au sein d'un espace numérique de communication. Ces interactions sociales sont à la fois :
 - Des transactions entre les apprenants, c'est-à-dire des interactions sociales de confrontation de leurs points de vue, d'ajustements mutuels, de négociations et de délibérations pour résoudre de façon commune et conjointe une situation problématique,
 - Des interactions qui permettent de créer un climat socio-affectif favorable aux transactions entre les apprenants, c'est-à-dire des interactions sociales basées sur la symétrie de la relation et sur l'aménité,
 - Des interactions que le formateur entretient à distance avec les apprenants pour soutenir les transactions entre les apprenants tout en contribuant à un climat socio-affectif favorable. »

La téléprésence

Petit et al. (2020) fait la distinction entre présence à distance et téléprésence. Les dispositifs de téléprésence comme les salles de visioconférence immersives, robots de téléprésence, réalité virtuelle ou hologrammes permettent de basculer du monde réel vers un environnement en ligne (immersion) en donnant l'illusion d'être ailleurs (réalisme). Il retient deux définitions :

La téléprésence peut être considérée comme « a sense of transportation to a space created by technology that occurs when a user perceives that he or she is physically present in a remote environment » (Lee, 2004, p. 29)

La téléprésence correspond aux outils technologiques permettant de créer l'état psychologique où l'utilisateur se sent physiquement présent dans un environnement virtuel (Smith et Louwagie, 2017).

Définition de la présence en e-learning par Jézégou (2010, p. 261) :

« la présence en e-learning résulte de certaines formes d'interactions sociales entre les apprenants, entre le formateur et les apprenants lorsque ces

Dans une étude menée par Bonfils (2008) sur l'utilisation de mondes persistants dans un cadre pédagogique, les étudiants perçoivent ces environnements comme des moteurs de construction d'identité et de lien social en raison du caractère ludique et convivial des situations de communication qui s'y opèrent. L'auteur souligne également la forte présence d'échanges socio-affectifs qui illustrent une dynamique relationnelle caractéristique des communautés virtuelles dans un contexte d'apprentissage collaboratif. En revanche, bien que ces environnements libèrent l'expression et désinhibent certains étudiants, ils génèrent chez d'autres une difficulté à appréhender le caractère mi-formel, mi-informel de la situation.

Usages des campus virtuels, exemples

Il existe aujourd'hui, en 2022, plus de 300 mondes virtuels qu'on peut qualifier de « métavers ready », même s'ils ne sont pas encore vraiment compatibles entre eux, faute d'un standard commun. L'accord sur ce standard commun entre les « très grands » opérateurs du WEB, les GAFAM (Google, Amazon, Facebook-Meta, Apple, Microsoft), vu les enjeux financiers, ne nous semble pas prêt de se réaliser, sauf si ces mastodontes conviennent qu'il n'y aura pas « un seul métavers » mais un ensemble de métavers compatibles, tous interconnectés et accessibles à travers un même navigateur et avec un seul et même avatar pour chaque utilisateur.

Ci-dessous, vous trouverez quelques exemples de « Métavers », disons plutôt de « mondes virtuels persistants » qui répondent aux caractéristiques suivantes : **accessibles** 7j/7 et 24h/24 (persistants), **sociaux** (tout le monde peut potentiellement y accéder), **connectés** (on peut y accéder via Internet), **Immersifs** (on peut utiliser un casque de Réalité Virtuelle pour bénéficier d'une expérience immersive dans ces mondes virtuels).

Exemples de Métavers

Le « Knowledge Métavers » d'EON Reality

EON Reality est un acteur international des technologies immersives qui produit de nombreux contenus pédagogiques disponibles sur le web. L'engouement pour le métavers a amené l'entreprise à créer une « Métavers des connaissances » qui pourrait devenir une sorte de Musée du Louvres interactif et immersif dans lequel on pourrait manipuler tous les objets exposés.

Voici comment EON Reality présente son Métavers :

« Construit pour aider et inspirer [...] créé par un réseau d'utilisateurs répartis sur des milliers de sites, le métavers des connaissances est un mouvement numérique de base. Il est conçu pour injecter les

connaissances et les possibilités de l'internet et de la XR (eXtended Reality) dans des environnements réels de formation et d'éducation. [...] Avec le métavers du savoir, EON Reality supprime les contraintes physiques et logistiques qui accompagnent souvent l'apprentissage, l'entraînement et les performances professionnelles au plus haut niveau. Grâce au métavers de la connaissance, les utilisateurs du monde entier peuvent accéder, étudier et interagir avec des informations et des activités créées par le savoir collectif de l'humanité. [...] Des informations détaillées, des vidéos, des histoires, des objets connexes et bien d'autres choses encore sont disponibles simplement en touchant un objet dans la vie réelle [...] Le métavers de la connaissance est ce vers quoi EON Reality tend depuis deux décennies, son réseau mondial en constante expansion constituant la base parfaite pour développer l'une des entreprises les plus impressionnantes et les plus influentes de l'histoire moderne. [...]

AMÉLIORER L'APPRENTISSAGE, LA FORMATION ET LA VIE QUOTIDIENNE

[...] à condition de disposer d'une connexion Internet sans fil stable [...] les étudiants peuvent transformer leur chambre en laboratoire, tandis que les travailleurs industriels peuvent étiqueter, définir et expliquer des machines complexes dans une multitude de langues, où qu'ils se trouvent dans le monde. Les galeries peuvent afficher les biographies et les œuvres similaires de leurs artistes résidents, ou amener l'exposition entière au domicile de l'utilisateur. Les seules limites aux possibilités du métavers de la connaissance viennent de ce que l'utilisateur peut imaginer. [...]

PARTAGEZ VOS CONNAISSANCES POUR AIDER LES AUTRES

Comme pour toute éducation sociétale, le métavers des connaissances est une rue à double sens. Grâce aux outils simplifiés de création de contenu d'EON Reality, les utilisateurs du monde entier sont en mesure de créer leurs propres entrées et d'étendre le métavers afin de contribuer à l'éducation des autres

*utilisateurs de manière pratique et immédiate. Avec des milliers d'experts en la matière agréés qui apportent déjà leurs spécialités et leurs connaissances dans le monde entier, la croissance exponentielle du métavers de la connaissance ne montre aucun signe de ralentissement. **Une personne ne peut pas tout savoir, mais collectivement, nous pouvons tout apprendre.** »*

En résumé, EON REALITY nous propose la création d'un Wikipédia 3D immersif et interactif !

Ce que nous en retenons dans le domaine qui nous intéresse aujourd'hui : quand on parle de « métavers », il se peut qu'on ne parle finalement « que » d'un nouvel internet 3D immersif accessible depuis n'importe quel écran ou n'importe quel casque de réalité virtuelle, mixte ou augmentée. La question d'un campus virtuel ne se posera peut-être même plus d'ici à quelques années, il s'agira juste d'un accès à l'Internet de demain.

Le "Entreprise Métavers" de VIRBELA

Le métavers d'entreprise est là, c'est Virbela qui le dit. Pendant la période pandémique récente, cette entreprise a permis de rassembler des gens pour travailler, apprendre, se rencontrer et se former dans un monde virtuel immersif et depuis n'importe quel point du monde.

Le salon international de la réalité virtuelle, Laval Virtual, a bénéficié de la plateforme Virbela pour organiser sa première édition totalement virtuelle. Près de 7000 avatars du monde entier se sont côtoyés pendant 3 jours au sein de ce salon virtuel. L'expérience a été tellement concluante et si enthousiasmante par rapport à toutes les visioconférences qui occupaient nos journées pendant cette période qu'une nouvelle entreprise est née. Komodal, spin-off de Laval Virtual, est devenue le premier français d'évènements dans les mondes virtuels.

Des écoles comme Néoma business school ou les Arts et Métiers, ont saisi cette opportunité pour créer leur premier campus virtuel et y organiser des

formations, des rencontres et des évènements, on peut noter en particulier les premières journées portes ouvertes nationales pour l'Ecole des Arts et Métiers.

Comme l'écrit Virbela sur son site web : « *Le travail à distance est censé être libérateur, pas épuisant. Le chat vidéo et d'autres outils nous laissent déconnectés et en manque d'interaction sociale. Virbela est la première plateforme de monde virtuel construite spécifiquement pour résoudre les défis de la collaboration à distance. Rencontrez, organisez des événements, donnez des cours et fournissez des services à l'ensemble de votre personnel à distance, le tout dans un monde 3D immersif et attrayant. Découvrez comment Virbela redéfinit l'avenir du travail. [...] Tout ce dont votre entreprise a besoin pour fonctionner entièrement à distance.* »

Glenn Sanford, Fondateur d'eXp Realty, confirme ces propos : "*Les bureaux virtuels de Virbela favorisent la croissance des entreprises et encouragent la collaboration dans un environnement distant qui est idéal pour nos ambitions mondiales.*"

Ce que nous en retenons dans le domaine qui nous intéresse aujourd'hui : leur succès commercial démontre que les mondes virtuels, en particulier dans le domaine de la formation, apportent quelque chose de plus et semblent plus efficaces que les outils de visioconférence standards. L'effet « waouh » et l'aspect ludique de ces mondes virtuels ne suffisent pas à expliquer leur succès. Le sentiment de présence induit chez les utilisateurs qui interagissent avec d'autres personnes via leur avatar semble de nature à leur procurer une expérience convaincante, même si elle n'égalera jamais l'impact d'une rencontre IRL (In Real Life) !

Tous les autres mondes...

Les nouveaux mondes virtuels persistants, dans leur quête vers la construction de « l'expérience métaversique ultime », apportent des spécificités ou des nouveautés qui trouveront, ou pas, leur marché. Appuyés sur des technologies de plus en plus matures (casques de réalité virtuelle ou augmentée)

et des réseaux de communication de plus en plus rapides, ils élaborent les futures briques d'un métavers unique et fédérateur.

Fortnite ; Minecraft ; Roblox ; Decentraland ; Axie infinity ; Sandbox ; Token Efinity ; VRChat ; Sorare ; Illuvium ; Metahero ; Upland ; My Neighbour Alice ; Bloktopia ; Ertha ; Star Atlas ; Somnium Space ; Ultra ; Mines of Dalarnia... la liste des mondes virtuels persistants s'allonge de jour en jour. Parmi eux, nombreux sont ceux qui revendiquent intégrer des lieux de formation ou même des campus virtuels. Le futur web3D version métavers n'est-il pas le lieu de formation par excellence ? Après avoir découvert qu'Internet, accessible au moyen d'un smartphone dans la main d'un utilisateur est une extension de la mémoire, voire de l'intelligence de celui-ci, allons-nous découvrir que le métavers, accessible au moyen d'un casque de réalité virtuelle ou de lunettes de réalité augmentée, est une extension de l'intelligence des utilisateurs ? On entre dans l'ère de l'AI, l'Amplification d'Intelligence.

Scénario d'usage d'un campus virtuel, porte d'entrée vers des Jumeaux Numériques

Nous avons choisi de vous raconter une « user story » afin de vous expliquer comment nous imaginons l'utilisation d'un campus virtuel (monde virtuel persistant, social, connecté et immersif) et d'un jumeau numérique lors d'une séquence pédagogique à distance (mode 100% distanciel, l'enseignant et les apprenants sont tous à distance). Nous pensons que l'utilisation d'un campus virtuel favorise la création de communautés d'apprentissage (ci-dessous le binôme constitué par Léa et Hugo) au sein d'un collectif de travail (la classe, le groupe d'apprenants réunis par l'enseignant).

Le contexte : Julien, l'enseignant, est à distance, il dispose d'un ordinateur connecté (ou d'une tablette) et d'un casque de Réalité Virtuelle (ou de Réalité Mixte).

Les apprenants, dont font partie Hugo et Léa, sont aussi à distance, ils disposent chacun d'un ordinateur connecté (ou tablette ou smartphone) et d'un casque de Réalité Virtuelle.

L'enseignement va porter sur la compréhension et l'optimisation d'un process industriel, les étudiants devront pouvoir visualiser en 3D le process et pouvoir interagir avec son jumeau numérique.

Le déroulement de la séquence pédagogique : Hugo et Léa ont cours à 9h sur l'optimisation d'un process industriel, il se connectent à TEAMS. Ils sont automatiquement authentifiés sur MOODLE comme participants à la séquence pédagogique de Julien, l'enseignant.

Avant le cours, réalisé en mode « classe inversée », Julien a demandé aux apprenants d'étudier du contenu pédagogique afin d'acquérir les connaissances de base sur le process industriel qui va être étudié aujourd'hui. Léa a bien fait son travail, Hugo n'a pas pris le temps d'étudier les contenus proposés par Julien.

Julien accueille Hugo, Léa et leurs collègues sur TEAMS. Il leur propose de se téléporter dans la salle de cours du campus virtuel. Julien clique sur le bouton « VIRTUAL CAMPUS » de Teams, ce qui déclenche la « téléportation virtuelle » de tous les apprenants sur le campus virtuel. Les apprenants se retrouvent avec Julien, sous forme d'avatars, dans une salle du campus virtuel. Ils peuvent utiliser un casque de Réalité Virtuelle ou rester devant leur écran d'ordinateur (ou tablette ou smartphone).

Julien, via son avatar, présente en 3D l'installation industrielle qu'ils vont étudier aujourd'hui. Hugo et Léa suivent l'avatar de Julien autour de l'installation 3D. Julien demande aux apprenants de lui expliquer le fonctionnement de l'équipement industriel qu'ils sont en train d'observer sous toutes ses coutures. Il leur pose des questions précises et apporte des explications complémentaires quand les réponses ne sont pas celles attendues.

A la fin de la séquence de questions, les apprenants reviennent sur TEAMS et doivent réaliser une évaluation formative notée proposée par Julien via Moodle. Ce quiz noté (série de questions/affirmations simples) a surtout pour but

de motiver les étudiants à étudier le contenu pédagogique avant les cours afin de rendre la séquence pédagogique plus efficace et attrayante.

On passe ensuite à la séquence « Travaux Pratiques » (TP) via le Jumeau Numérique du process industriel. Julien dévoile l'objectif de la séquence pédagogique : en binômes, optimiser le réglage de l'installation industrielle puis présenter, lors d'un exposé, la démarche et les résultats obtenus. La présentation sera notée.

Julien clique sur le bouton « TP JN » sur TEAMS. Les apprenants se retrouvent groupés par binômes dans des salles virtuelles distinctes où ils se retrouvent face à des JN "dérégés" de l'installation industrielle (une dérive a été observée sur l'installation et ils doivent résoudre le problème et expliquer ce qu'il se passait et comment ils ont trouvé la solution). Ils peuvent utiliser les casques VR quand ils le souhaitent ou rester devant leur écran.

Hugo et Léa communiquent oralement et via un chat, ils peuvent appeler à l'aide Julien ou faire appel à des contenus multimédias. Julien passe voir chaque binôme de temps en temps pour partager son expérience, débloquer les élèves ou vérifier l'avancement du travail.

Quand le binôme d'apprenants Léa et Hugo a résolu le problème de dérive du process industriel et a trouvé un réglage qui semble pertinent, Julien peut leur proposer de tester leur travail sur le jumeau physique (JP) à distance. Il transfère les réglages du jumeau numérique au jumeau physique et les apprenants, via une caméra 360° installée près du JP, peuvent constater l'effet que les réglages du process qu'ils ont élaborés produisent sur le jumeau physique. Ils peuvent enregistrer une vidéo du JP en action.

A la fin de la séquence « TP », Hugo et Léa présentent à leurs camarades leurs résultats et la démarche qu'ils ont utilisée en partageant leurs webcams et leur présentation sur des écrans d'une salle du Campus virtuel (ou sur TEAMS).

Interaction sociale et co-présence : du collectif de travail à la communauté d'apprentissage

Cette user story a montré comment nous imaginons que le recours à un campus virtuel favorise la création de communautés d'apprentissage au sein d'un collectif de travail. Ce phénomène trouve selon nous son explication à travers 2 phénomènes observés lors des expérimentations utilisant les technologies immersives (XR) : le sentiment de co-présence et les interactions sociales rendues possibles par l'utilisation des avatars dans un monde virtuel.

Pour améliorer les interactions en formation à distance, le campus virtuel constitue une solution prometteuse pour augmenter le sentiment de présence à distance, un partage commun de « l'ici et maintenant » où l'échange ne se limite pas à des signes verbaux et non verbaux mais également des gestes, des contacts corporels concrets ou potentiels et des manipulations conjointes d'objet. L'enjeu n'est pas uniquement communicationnel de transmission d'information mais aussi relationnel pour créer les conditions d'un partage mutuel d'un univers. (Weissberg, 2000).

Pour conclure, je vous propose de laisser la parole à une autre technologie qui vient s'inviter sur les bancs de nos écoles :



Écrire la conclusion d'un livre blanc sur le metavers dans l'enseignement supérieur



En conclusion, le metavers offre un potentiel énorme pour l'enseignement supérieur. Il peut aider à créer des environnements d'apprentissage virtuels immersifs, à connecter les étudiants du monde entier, à faciliter la collaboration et à offrir des expériences d'apprentissage personnalisées. Cependant, il est important de comprendre que le metavers ne remplacera jamais complètement les méthodes d'enseignement traditionnelles, mais plutôt qu'il peut compléter et améliorer ces méthodes existantes. Les universités devraient donc explorer les différentes façons dont elles peuvent intégrer le metavers dans leurs programmes et leur infrastructure existante, en veillant à ce que cela soit fait de manière responsable, éthique et inclusive. En outre, il est essentiel que les enseignants soient formés à l'utilisation du metavers pour l'enseignement et qu'ils disposent des ressources nécessaires pour le faire efficacement. Avec une utilisation appropriée et réfléchie, le metavers a le potentiel de transformer l'enseignement supérieur en offrant des possibilités d'apprentissage innovantes et excitantes pour les étudiants du monde entier.

Plus sérieusement, notre monde est en constante évolution, et l'on voit bien dans le monde de la formation et de l'enseignement que ces nouvelles technologies arrivent de plus en plus vite. Ce livre blanc et ses livrets complémentaires sont une invitation à imaginer les usages de ces nouvelles technologies et à partager nos bonnes pratiques sur la mise en œuvre de celles-ci

BIBLIOGRAPHIE



- AIAA Digital Engineering Integration Committee. (2020). *Digital Twin: Definition & Value—An AIAA and AIA Position Paper*. Reston, VA, USA.
- Al-Sehrawy, R., Kumar, B., & Watson, R. (2021). *Digital Twin Uses Classification System for Urban Planning & Infrastructure Program Management*. Paper presented at the Enabling The Development and Implementation of Digital Twins. Proceedings of the 20th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality. Teesside University Press, UK.
- Amadiou, F. (2021). Vers une meilleure pédagogie pour un numérique plus utile. Vidéo de la journée du 25 mars 2021. *Alsic. Apprentissage des Langues et Systèmes d'Information et de Communication*, 24(2).
- Amadiou, F., & Tricot, A. (2014). *Apprendre avec le numérique: mythes et réalités*: Retz.
- Androwkha, S. (2020). La présence à distance en e-Formation: entretien avec Annie Jézégou. *Médiations et médiatisations*(3), 59-67.
- Araiza-Alba, P. (2017). Immersive virtual reality technology as a tool to enhance children's cognition and learning.
- Araiza-Alba, P., Keane, T., Matthews, B., Simpson, K., Strugnell, G., Chen, W. S., & Kaufman, J. (2021). The potential of 360-degree virtual reality videos to teach water-safety skills to children. *Computers & education*, 163, 104096.
- Argyris, C., & Schön, D. (2001). Apprentissage organisationnel: théorie, méthode, pratique, Bruxelles, De Boeck Supérieur. *Management*.
- Assila, A., Baudry, D., & Havard, V. (2019). Quand les réalités virtuelle et augmentée s'invitent dans l'industrie et la construction. *The Conversation*, oct, 10.
- Avila, S. (2017). Implementing augmented reality in academic libraries. *Public Services Quarterly*, 13(3), 190-199.
- Badets, A. (2018). *Médiations et obstacles transitionnels dans les interactions dispositions/dispositifs étayant la construction des identités professionnelles: le cas des apprentis ingénieurs CESI en Apprentissage Actif Par Projets*. Normandie,
- Badets, A., Blandin, B., Havard, V., & Baudry, D. (2021). *Conception de situations instrumentées : étude de cas d'une situation d'apprentissage des concepts du Lean Manufacturing* Paper presented at the colloque NEO SAI 2021: Comprendre et construire les nouvelles situations d'apprentissage instrumentées, en ligne 31 mars et 1er avril 2021.
- Badets, A., Havard, V., Richard, K., & Baudry, D. (2020). *Using collaborative VR technology for Lean Manufacturing Training: a case study*. Paper presented at the Proc. VRIC.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775-779.
- Bajaj, M., Cole, B., & Zwemer, D. (2016). Architecture to geometry-integrating system models with mechanical design. In *AIAA SPACE 2016* (pp. 5470).
- Barabel, M., Meier, O., Perret, A., & Teboul, T. (2019). *Formation: la nouvelle donne: Tout ce qui change avec la loi "Avenir"*: Dunod.
- Barcellini, F. (2017). Intervention Ergonomique Capacitante: bilan des connaissances actuelles et perspectives de développement. *Activités*, 14(14-2).
- Baron, G.-L. (2011). Learning design. *Recherche et Formation*(68), 109-120.
- Batty, M. (2018). Digital twins. In (Vol. 45, pp. 817-820): SAGE Publications Sage UK: London, England.
- Bauer, T., Antonino, P. O., & Kuhn, T. (2019). *Towards architecting digital twin-pervaded systems*. Paper presented at the 2019 IEEE/ACM 7th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems (SESoS) and 13th Workshop on Distributed Software Development, Software Ecosystems and Systems-of-Systems (WDES).

- Bazilevs, Y., Deng, X., Korobenko, A., Lanza di Scalea, F., Todd, M., & Taylor, S. (2015). Isogeometric fatigue damage prediction in large-scale composite structures driven by dynamic sensor data. *Journal of Applied Mechanics*, 82(9).
- Bécard, J.-P. (2020). *Conversation pédagogiques en management*: Les Presses De l'Universite De Montreal.
- Bédard, D., & Gérard, L. (2015). La professionnalisation du métier d'enseignant-chercheur: Apprendre à devenir un «praticien-chercheur». *L'apprentissage informel du métier d'enseignant: Problématiques émergentes en Sciences de l'éducation*, 191-202.
- Béguin, P., & Pastré, P. (2002). Working, learning and designing through simulation. In S. Bagnara, S. Pozzi, A. Rizzo, & R. Wright (Eds.), *11th European Conference on Cognitive Ergonomics : cognition, culture and design*, (pp. 5-13). Catania, Italy.
- Béguin, P., & Weill-Fassina, A. (1997). *La simulation en ergonomie : connaître, agir, interagir*. Toulouse: Octarès.
- Bielefeldt, B., Hochhalter, J., & Hartl, D. (2015). *Computationally efficient analysis of SMA sensory particles embedded in complex aerostructures using a substructure approach*. Paper presented at the Smart materials, adaptive structures and intelligent systems.
- Biggs, J., & Tang, K. (2011). Teaching for Quality Learning at University. 4th 382 ed. In: Maidenhead: Oxford University Press.
- Bisson, J., Drot, R., & Uhrich, G. (2020). *L'innovation pédagogique en 20 concepts. Petit lexique à l'usage des débutants*: Université paris saclay.
- Bissonnette, S., & Richard, M. (2005). Les trois phases du processus d'apprentissage. *Montreal, QC: Gaëtan Morin éditeur, Chenelière Éducation*.
- Blandin, B. (2010). Dispositifs techniques pour l'éducation, la formation et l'apprentissage. Point de vue des industriels sur les évolutions. *Distances et savoirs*, 8(2), 223-234. Retrieved from <https://www.cairn.info/revue-distances-et-savoirs-2010-2-page-223.htm>
- Blandin, B. (2020). Les pédagogies actives par problèmes et par projets à l'épreuve de la distance: questions à l'ingénierie. *Distances et médiations des savoirs. Distance and Mediation of Knowledge*.
- Bonenfant, M., & Genvo, S. (2014). Une approche située et critique du concept de gamification. *Sciences du jeu*(2).
- Bonfils, P. E. H. (2008). Dispositifs socio-techniques et mondes persistants: quel cadre théorique pour une étude de la communication?. In XVII Congrès de la SFSIC.
- Bonfils, P. (2020). Repenser les dispositifs de formation à l'aune de la pandémie? *Distances et médiations des savoirs. Distance and Mediation of Knowledge*(31).
- Boton, C. (2018). Supporting constructability analysis meetings with Immersive Virtual Reality-based collaborative BIM 4D simulation. *Automation in Construction*, 96, 1-15.
- Boucheix, J.-M. (2015). Chapitre 30. Apprendre du réel sans les risques du réel ? L'apprentissage sur simulateur comme prévention. In *Vulnérabilité psychique et clinique de l'extrême en réanimation* (pp. 251-261). Paris: Dunod.
- Bourlakis, M., Papagiannidis, S., & Li, F. (2009). Retail spatial evolution: paving the way from traditional to metaverse retailing. *Electronic Commerce Research*, 9, 135-148.
- Burkhardt, J.-M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie : quelques apports réciproques. *Le Travail Humain*, 66(1), 65-91. doi:10.3917/th.661.0065
- Burkhardt, J.-M. (2010). Conception, utilisation et formation: trois perspectives sur l'apprentissage en ergonomie des technologies émergentes. *Habilitation à diriger des recherches, Université de Provence*.
- Cahagne, C., & Fuzet, B. (2022). *Concevoir et diffuser une expérience de formation immersive*: GERESO.

- Canedo, A. (2016). *Industrial IoT lifecycle via digital twins*. Paper presented at the Proceedings of the Eleventh IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis.
- CeArley, D., Burke, B., Searle, S., & Walker, M. J. (2016). Top 10 strategic technology trends for 2018. *The Top, 10*, 1-246.
- Céci, J.-F., De Lièvre, B., Paquelin, D., & Koscielniak, T. (2016). *Mettre en oeuvre les différentes formes de mobilité dans les apprentissages (p. 20 à 33)*.
- Chen, E., Kaczmarek, K., & Ohyama, H. (2021). Student perceptions of distance learning strategies during COVID-19. *Journal of dental education, 85*(Suppl 1), 1190.
- Ciccone, E., Cuvelier, L., Bationo-Tillon, A., & Decortis, F. (2019). *Simuler pour apprendre à communiquer ? Intégrer les dimensions sensibles de l'activité dans les formations par la simulation en médecine*. Paper presented at the Colloque international de Didactique Professionnelle, Longueuil (Québec).
- Ciccone, E., Cuvelier, L., Bationo - Tillon, A., Bagnon, T., & Decortis, F. (2022). On Care and the Sensitive Experience of Caregiver Activity in Simulation Situations: A Possible Model for Encounters Between Health Practitioners and Their Patients to Enhance Communication Training. In S. Flandin, C. Vidal-Gomel, & O. Raquel Becerril (Eds.), *Simulation Training through the Lens of Experience and Activity Analysis: Healthcare, Victim Rescue and Population Protection* (Vol. Professional and Practice-based Learning Vol. 30, pp. 320). Switzerland AG: Springer Nature.
- Ciccone, E., Cuvelier, L., & Decortis, F. (2018). *Rôle de la simulation dans le développement des compétences en communication : le cas d'une formation en anesthésie réanimation*. Paper presented at the Congrès international EARLI SIG, Genève.
- Clanet, J. (2012). L'efficacité enseignante, quelle modélisation pour servir cette ambition? *Questions Vives. Recherches en éducation, 6*(18), 15-37.
- Cojean, S., & Martin, N. (2022). *Acceptability of technology involving artificial intelligence among future teachers*. Paper presented at the Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society.
- Collin, S., Denouël, J., Guichon, N., & Schneider, É. (2021). Le numérique en éducation et formation. *Approches critiques. Presse des Mines*.
- Connac, S. (2021). Pour différencier: individualiser ou personnaliser? *Éducation et socialisation. Les Cahiers du CERFEE*(59).
- Cuvelier, L. (2011). *De la gestion des risques à la gestion des ressources de l'activité. Etude de la résilience en anesthésie pédiatrique*. Thèse de doctorat en ergonomie, Cnam, Paris.
- Cuvelier, L. (2018). "Never the first time on a patient": the stakes of high-fidelity simulation for safety training. *Development and Learning in Organizations: An International Journal, 32*(5), 23-25. doi:<https://doi.org/10.1108/DLO-09-2018-131>
- Cuvelier, L. (2022). Risk-seeking and the Paradox of Variability in Healthcare: Resonance with R.L. Wears' chapter. In G. Boy & E. Quillerou (Eds.), *Risk-taking, Prevention and Design: a Cross-Fertilization Approach*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Taylor & Francis.
- Daniellou, F. (2007). Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. *Activités, 4*(2), 77-83, <http://www.activites.org/v74n72/v74n72.pdf>.
- David, J., Lobov, A., & Lanz, M. (2018). *Learning experiences involving digital twins*. Paper presented at the IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- Davis, A., Murphy, J., Owens, D., Khazanchi, D., & Zigurs, I. (2009). Avatars, people, and virtual worlds: Foundations for research in metaverses. *Journal of the Association for Information Systems, 10*(2), 1.
- Demers, S. (2011). *Relations entre les dimensions téléologique, épistémologique et praxéologique des pratiques d'enseignants d'histoire et éducation à la citoyenneté*. Université du Québec en Outaouais,

- Demers, S., & Éthier, M.-A. (2013). Rapprochement entre curriculum, savoirs savants et pratiques enseignantes en enseignement de l'histoire: l'influence de l'épistémologie pratique. *Éducation et didactique*, 7(7-2), 95-113.
- Deschryver, N. (2008). *Interaction sociale et expérience d'apprentissage en formation hybride*. University of Geneva,
- Dewey, J. (1967). *Logique: la théorie de enquête [Logic, the theory of inquiry]*. Présentation et traduction de Gérard Deledalle: Presses universitaires de France.
- Dewez, S., & Fouché, O. (2016). *What opportunities offer digital tools to train and graduate hydrogeologist engineers?*
- Díaz, J., Saldaña, C., & Avila, C. (2020). Virtual world as a resource for hybrid education. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 15(15), 94-109.
- Dickey, M. D. (2005). Three-dimensional virtual worlds and distance learning: two case studies of Active Worlds as a medium for distance education. *British journal of educational technology*, 36(3), 439-451.
- Dionisio, J. D. N., III, W. G. B., & Gilbert, R. (2013). 3D Virtual worlds and the metaverse : Current status and future possibilities. *ACM Computing Surveys*, 45(3), 34:1-34:38. <https://doi.org/10.1145/2480741.2480751>
- Drakos, A. (2021). Ergonomie des situations de formation professionnelle et environnements virtuels : le cas de la formation des agents de terrain. University of Geneva,
- Drakos, A., Flandin, S., Filippi, G., Palaci, F., Veyrunes, P., & Poizat, G. (2021). From exploration to re-enactment: Instructional uses of a desktop virtual environment for training nuclear plant field operators. *Vocations and Learning*, 14(2), 327-352.
- Duarte, A., & Bru, S. (2021). La boîte à outils de la gamification: Dunod.
- Dubruc, N. (2021). Leçons et questions de la continuité pédagogique dans une formation française d'ingénieurs. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire*, 18(1), 221-232.
- Durand, M. (2008). Un programme de recherche technologique en formation des adultes. Une approche enactive de l'activité humaine et l'accompagnement de son apprentissage/développement. *Éducation et didactique*, 2(3), 97-121.
- Elias, M. J., & Weissberg, R. P. (2000). Primary prevention: Educational approaches to enhance social and emotional learning. *Journal of School Health*, 70(5), 186-190.
- Dwivedi, Y. K., Hughes, L., Baabdullah, A. M., Ribeiro-Navarrete, S., Giannakis, M., Al-Debei, M. M., ... & Wamba, S. F. (2022). Metaverse beyond the hype: Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy. *International Journal of Information Management*, 66, 102542.
- Ericsson, L., Gouk, H., Loy, C. C., & Hospedales, T. M. (2022). Self-supervised representation learning: Introduction, advances, and challenges. *IEEE Signal Processing Magazine*, 39(3), 42-62.
- Fadier, E. (2009). Automatisation et sécurité. *Techniques de l'ingénieur. L'Entreprise industrielle*(AG3530).
- Faller, C. (2020). COVID-19 et continuité pédagogique en licence 3, quelles leçons pour demain?. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire*, 17(2), 51-60.
- Farjami, S., Taguchi, R., Nakahira, K. T., Fukumura, Y., & Kanematsu, H. (2011). W-02 problem based learning for materials science education in metaverse. In *JSEE annual conference international session proceedings 2011 JSEE annual conference* (pp. 20-23). Japanese Society for Engineering Education.
- Fernagu Oudet, S. (2007). *Organisation du travail et développement des compétences*: Editions L'Harmattan.
- Fernagu Oudet, S. (2013). *Organisation et apprentissages: construire des environnements capacitants*. Paper presented at the Congrès international d'Actualité de la Recherche en Éducation et en Formation, AREF 2013, Montpellier.

- Fernagu Oudet, S. (2018). *Organisation et apprentissage: des compétences aux capacités*. (HDR). Université Bourgogne Franche-Comté,
- Fernagu, S. (2018). Les capacités au prisme de la capacité à s' autodéterminer: les Clubs de dirigeants de PME. *Formation emploi. Revue française de sciences sociales*(142), 231-254.
- Flandin, S., Vidal-Gomel, C., & Ortega, R. B. (2022). *Simulation Training through the Lens of Experience and Activity Analysis: Healthcare, Victim Rescue and Population Protection* (Vol. 30): Springer Nature.
- Fleury, S., Nollet, A., Chaniaud, N., Poussard, B., Blanchard, P., & Richir, S. (2022). *Virtual Reality as a tool for furniture design*. Paper presented at the 2022 International Conference on Cyberworlds (CW).
- Fleury, S., & Richir, S. (2022). *Les technologies immersives: La réalité virtuelle et augmentée pour la co-création de concepts innovants* (Vol. 36): ISTE Group.
- Fleury, S., & Richir, S. (2023). The End of the Digital Generation Gap.
- Forget, A. (2018). *Penser la différenciation pédagogique*: Université de Genève, Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation.
- Fréjus, M (1996). Réalité virtuelle et processus cognitifs : Etat de l'art et perspectives en formation. Rapport EDF-GDF HI-52/96/020.
- Frégné, C., & Trollat, A.-F. (2009). La formation individualisée: un objet de recherche? *Savoirs*(3), 009-040.
- Fuchs, P. (1996). Les interfaces de la réalité virtuelle . Edition Interfaces, les journées de Montpellier
- Gaba, D. M. (2007). The future vision of simulation in healthcare. *Simulation in Healthcare, 2*(2), 126-135.
- Gabor, T., Belzner, L., Kiermeier, M., Beck, M. T., & Neitz, A. (2016). *A simulation-based architecture for smart cyber-physical systems*. Paper presented at the 2016 IEEE international conference on autonomic computing (ICAC).
- Giordan, A. (1998). *Apprendre!* (Vol. 2): Belin Paris.
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). *The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles*. Paper presented at the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA.
- Gobin Mignot, É., & Wolff, B. (2019). *Former avec la réalité virtuelle. Comment les techniques immersives bouleversent l'apprentissage*. Paris: Dunod.
- Gockel, B., Tudor, A., Brandyberry, M., Penmetsa, R., & Tuegel, E. (2012). *Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles*. Paper presented at the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA.
- Gökçe Narin, N. (2021). A Content Analysis of the Metaverse Articles . *Journal of Metaverse , 1* (1) , 17-24 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/jmv/issue/67581/1051382>
- Gosselin, M., Viau-Guay, A., & Bourassa, B. (2014). Le développement professionnel dans une perspective constructiviste ou socioconstructiviste : une compréhension conceptuelle pour des implications pratiques. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé [En ligne], 16*(3), mis en ligne le 05 juin 2014, consulté le 2012 octobre 2016. . doi:10.4000/pistes.4009
- Grievés, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper, 1*(2014), 1-7.
- Grievés, M. (2016). *Origins of the Digital Twin Concept*.
- Grievés, M. (2019). Virtually intelligent product systems: Digital and physical twins. In.
- Grievés, M. (2022a). Don't 'Twin' Digital Twins and Simulations. *Design Lines. Internet Of Things : Opinion*. Retrieved from <https://www.eetimes.com/dont-twin-digital-twins-and-simulations/> le 15/12/22
- Grievés, M. (2022b). Intelligent digital twins and the development and management of complex systems. *Digital Twin, 2*(8), 8.
- Grievés, M. (2022c). Physical Twins, Digital Twins, and the Apollo Myth.

- Grievess, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*, 85-113.
- Groupe de travail en Outaouais. (2005). La différenciation pédagogique: Théories et applications. In: Gatineau (Québec): Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport
- Guerra-Zubiaga, D., Ramòn-Raygoza, E., Rios-Soltero, E., Tomovic, M., & Molina, A. (2009). A PLM tools taxonomy to support product realization process: A solar racing car case study. *Product Realization: A Comprehensive Approach*, 1-26.
- Guillaumin, C. (2009). La réflexivité comme compétence: Enjeu des nouvelles ingénieries de la formation. *Cahiers de sociolinguistique*(1), 85-101.
- Hamilton, D., McKechnie, J., Edgerton, E., & Wilson, C. (2021). Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: a systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design. *Journal of Computers in Education*, 8(1), 1-32.
- Havard, V., & Baudry, D. (2019). Réalité augmentée dans un contexte industriel. *Techniques de l'ingénieur*, oct. 2019, [En ligne], Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/innovation-th10/industrie-du-futur-outils-technologiques-42668210/realite-augmentee-dans-un-contexte-industriel-sf42668610/>.
- Havard, V., Baudry, D., Jeanne, B., Louis, A., & Savatier, X. (2021). A use case study comparing augmented reality (AR) and electronic document-based maintenance instructions considering tasks complexity and operator competency level. *Virtual Reality*, 1-16.
- Havard, V., Jeanne, B., Lacomblez, M., & Baudry, D. (2019). Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations. *Production & Manufacturing Research*, 7(1), 472-489.
- Henri, F., & Maina, M. (2007). Pratique de design pédagogique et instrumentation du concepteur. *Environnements informatisés et ressources numériques pour l'apprentissage: conception et usages, regards croisés*, 229-254.
- Horcik, Z. (2012). Chapitre 8. Apprendre et travailler dans les environnements simulés. In *Apprendre au travail* (pp. 129-139). Paris cedex 14: Presses Universitaires de France.
- Horcik, Z. (2014). Former des professionnels via la simulation: confrontation des principes pédagogiques issus de la littérature et des pratiques de terrain. *Activités*, 11(11-2).
- Horcik, Z., & Durand, M. (2011). Une démarche d'ergonomie de la formation : Un projet pilote en formation par simulation d'infirmiers anesthésistes. *Activités*, 8(2), 173-188.
- Horcik, Z., Savoldelli, G., Poizat, G., & Durand, M. (2014). A phenomenological approach to novice nurse anesthetists' experience during simulation-based training sessions. *Simulation in Healthcare*, 9(2), 94-101.
- Jézégou, A. (2010). Créer de la présence à distance en e-learning. *Distances et savoirs*, 8(2), 257-274.
- Jézégou, A. (2019a). Chapitre 8. L'agentivité humaine en e-ormation des adultes. In *Traité de la e-Formation des adultes* (pp. 191-211). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Jézégou, A. (2019b). *Traité de la e-Formation des adultes*. Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.
- Jézégou, A. (2020). *Les dispositifs hybrides au prisme de l'apprentissage autodirigé et de la présence à distance*. *Conférence*. Paper presented at the Cycle de conférences sur les formations hybrides, Sorbonne Université, Paris, France.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52.
- Jonnaert, P., Furtuna, D., Ayotte-Beaudet, J.-P., & Sambote, J. (2015). Vers une re-problématisation de la notion de compétence. *Cell*, 514, 451-0013.

- Jovanović, A., & Milosavljević, A. (2022). VoRtex Metaverse platform for gamified collaborative learning. *Electronics*, 11(3), 317.
- Joyce, B. R., Weil, M., & Calhoun, E. (1986). *Models of teaching* (Vol. 499): Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Julien, N., & Martin, E. (2020). *Le jumeau numérique. De l'intelligence artificielle à l'industrie agile* (Dunod Ed.): Dunod.
- Julien, N., & Martin, E. (2021). How to characterize a digital twin: a usage-driven classification. *IFAC-PapersOnLine*, 54(1), 894-899.
- Kaptelinin, V. (2003). Learning with artefacts: integrating technologies into activities. *Interacting with Computers*, 15(6), 831-836. doi:10.1016/j.intcom.2003.09.006
- Kister, M. (2021). *Apprentissage Actif combiné problèmes/projets*. Paper presented at the QPES 2021, Questions de Pédagogies dans l'Enseignement Supérieur,, La Rochelle, France Mashaly,.
- Kolbe, M., Grande, B., & Spahn, D. R. (2015). Briefing and debriefing during simulation-based training and beyond: Content, structure, attitude and setting. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 29(1), 87-96. doi:10.1016/j.bpa.2015.01.002
- Koscielniak, T. (2021). Les technologies immersives n'attendent plus que leur appropriation par les apprenants. *Formation Emploi*, n°1021, du 1er au 14/12/21.
- Koscielniak, T., & N'Hari, I. (2015). *Digital Night 2015 at Paris Descartes University*.
- Kraft, E. M. (2016). *The air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge*. Paper presented at the 54th AIAA aerospace sciences meeting.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 51, 1016–1022 (2018). In.
- Kuş, O. (2021). Metaverse: 'Dijital Büyük Patlamada' Fırsatlar ve Endişelere Yönelik Algılar . *Intermedia International E-journal* , 8 (15) , 245-266 . DOI: 10.21645/intermedia.2021.109
- Kye, B., Han, N., Kim, E., Park, Y., & Jo, S. (2021). Educational applications of metaverse: possibilities and limitations. *Journal of educational evaluation for health professions*, 18.
- Lafleur, F., & Samson, G. (2019). *Formation et apprentissage en ligne*: PUQ.
- Lainé, A., & Mayen, P. (2019). Chapitre 1. – Apprendre à partir de l'expérience. In *Valoriser le potentiel d'apprentissage des expériences professionnelles* (pp. 15-25). Dijon cedex: Éducagri éditions.
- Lameul, G. (2008). Les effets de l'usage des technologies d'information et de communication en formation d'enseignants, sur la construction des postures professionnelles. *Savoirs*, 17(2), 71-94.
- Leblanc, S. (2014). Expériences mimétiques en vidéoformation et transformations de l'activité professionnelle. *Recherche et Formation*, 75, 37-50.
- Lee, K. M. (2004). Presence, explicated. *Communication theory*, 14(1), 27-50.
- Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., & Kao, H. (2013). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manuf Lett* 1: 38–41. In.
- Lepage, X. & Mettrie, A. (2022). Métavers : enjeux, perspectives... et risques. *Servir*, 515, 46-48. <https://www.cairn.info/revue--2022-5-page-46.htm>.
- Leplat, J. (1997). *Regards sur l'activité en situation de travail. Contribution à la psychologie ergonomique*. Paris: PUF.
- Lévy, P. (2000). La montée vers la noosphère. *Sociologie et sociétés*, 32(2), 19-30.
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361.
- Loisy, C., & Lameul, G. (2014). Introduction. La pédagogie universitaire numérique : émergence d'une problématique. In *La pédagogie universitaire à l'heure du numérique* (pp. 13-24). Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur.

- Lourdeaux, D. (2001) *Réalité virtuelle et formation : conception d'environnements virtuels pédagogiques. Interface homme-machine*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris
- Majumdar, P. K., FaisalHaider, M., & Reifsnider, K. (2013). *Multi-physics response of structural composites and framework for modeling using material geometry*. Paper presented at the 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- Makransky, G., & Petersen, G. B. (2019). Investigating the process of learning with desktop virtual reality: A structural equation modeling approach. *Computers & education, 134*, 15-30.
- Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E. (2019a). Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction, 60*, 225-236.
- Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E. (2019b). Role of subjective and objective measures of cognitive processing during learning in explaining the spatial contiguity effect. *Learning and Instruction, 61*, 23-34.
- Martin 1, P., Gebeil 2, S., Filippi 1, P. A., & Félix 1, C. (2021). Impact des usages numériques préexistants des enseignants du supérieur face à l'impératif de l'enseignement à distance en période de confinement. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire, 18(1)*, 170-183.
- Mashaly, M. (2021). Connecting the twins: A review on digital twin technology & its networking requirements. *Procedia Computer Science, 184*, 299-305.
- Masson, C. (2009). *La formation individualisée: conférence de consensus*: Educagri Editions.
- Mayen, P., & Gagneur, C.-A. (2017). Le potentiel d'apprentissage des situations: une perspective pour la conception de formations en situations de travail. *Recherches en Education(28)*.
- Mayer, R. E., & Fiorella, L. (2014). 12 principes for reducing extraneous processing in multimedia learning: Coherence, signaling, redundancy, spatial contiguity, and temporal contiguity principles. *The Cambridge handbook of multimedia learning, 279*.
- Meirieu, P. (1994). Individualisation et métacognition: vers une éthique de la formation. *L'individualisation en questions, 98-104*.
- Metcalf, L. (2021). *Counseling toward solutions: A practical, solution-focused program for working with students, teachers, and parents*. Routledge.
- Mestre, D. (2006). Interactions entre Réalité Virtuelle et Sciences du Comportement. *Traité de la Réalité Virtuelle, 1*, 363-380.
- Mezirow, J. (2001). Penser son expérience: développer l'autoformation. *Lyon, Chronique Sociale*.
- Mikropoulos, T. A., & Natsis, A. (2011). Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & education, 56(3)*, 769-780.
- Min, T. and Cai, W. (2022). "Portrait of decentralized application users: An overview based on large-scale Ethereum data", *CCF Trans. Pervasive Comput. Interact.*, vol. 4, pp. 124-141.
- Nelson, J., Buisine, S., & Aoussat, A. (2012). A methodological proposal to assist scenario-based design in the early stages of innovation projects. *Le Travail Humain, 75(3)*, 279-305.
- Nyssen, A. S. (2005). Simulateurs dans le domaine de l'anesthésie. Etudes et réflexions sur les notions de validité et de fidélité. In P. Pastré (Ed.), *Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. (pp. 269-283). Toulouse: Octares.
- Nyssen, A. S., & De Keyser, V. (1998). Improving Training in Problem Solving Skills : Analysis of Anesthetist's Performance in Simulated Problem Situations. *Le Travail Humain, 61(4)*.
- Nyssen, A. S., Larbuisson, R., Janssens, M., Pendeville, P., & Mayne, A. (2002). A Comparison of the Training Value of Two Types of Anesthesia Simulators: Computer Screen-Based and Mannequin-Based Simulators. *Anesthesia and Analgesia, 94(6)*, 1560-1565. Retrieved from <http://www.anesthesia-analgesia.org/cgi/content/abstract/94/6/1560>

- Paige, J. B., & Morin, K. H. (2013). Simulation fidelity and cueing: A systematic review of the literature. *Clinical Simulation in Nursing*, 9(11), e481-e489.
- Paquelin, D. (2002). Analyse d'applications multimédias pour un usage pédagogique. À la recherche de l'intentionnalité partagée. *Alsic. Apprentissage des Langues et Systèmes d'Information et de Communication*, 5(1), Art. Vol. 5, n°1. <https://doi.org/10.4000/alsic.1917>
- Paquette, G. (2002a). *L'ingénierie pédagogique: Pour construire l'apprentissage en réseau*: Québec, PUQ.
- Paquette, G. (2002b). *La recherche appliquée en pédagogie: des modèles pour l'enseignement*. Bruxelles: De Boeck & Larcier.
- Paquette, G., Crevier, F., & Aubin, C. (1997). Méthode d'ingénierie d'un système d'apprentissage (MISA). *Revue informations in cognito*, 8, 37-52.
- Paquette, G., & Léonard, M. (2013). *Modèles et métadonnées pour les scénarios pédagogiques*: GTN-Québec.
- Parong, J., & Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, 110(6), 785.
- Parong, J., & Mayer, R. E. (2020). Cognitive consequences of playing brain-training games in immersive virtual reality. *Applied Cognitive Psychology*, 34(1), 29-38.
- Park, S. M., & Kim, Y. G. (2022). A metaverse: taxonomy, components, applications, and open challenges. *IEEE access*, 10, 4209-4251.
- Pastre, P. (2005). Analyse d'un apprentissage sur simulateur : des jeunes ingénieurs aux prises avec la conduite de centrales nucléaires. In P. Pastré (Ed.), *Apprendre par la simulation* (pp. 241-268). Toulouse Octares.
- Pastré, P. (2005a). Apprendre par la résolution de problèmes : le rôle de la simulation. In P. Pastré (Ed.), *Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. (pp. 17-40). Toulouse: Octares.
- Pastré, P. (2005b). *Apprendre par la simulation : de l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*. Toulouse: Octarès.
- Pastré, P. (2006). Apprendre à faire. *Apprendre et faire apprendre*, 109-121.
- Pastré, P. (2007). Analyse du travail et formation. *Cahier du CREN - Recherche en Education*, 4, 23-26.
- Péquignot, J., & Roussel, F.-G. (2015). Les métavers: dispositifs, usages et représentations. Paris L'Harmattan.
- Peraya, D. (1999). Médiation et médiatisation: le campus virtuel. *Hermès*, 25(2), 153-167.
- Pernin, J.-P., & Lejeune, A. (2004). Nouveaux dispositifs instrumentés et mutations du métier de l'enseignant. *7ème biennale de l'Education*.
- Petit, M., Lameul, G., & Taschereau, J. (2020). La téléprésence en formation. *Médiations et médiatisations*, (3), 7-20.
- Piaget, J. (1947/2012). *La Psychologie de l'intelligence*: Armand Colin.
- Plateau, J. F. (2020, November). Pourquoi a-t-on aimé ou non la formation à distance durant le confinement sanitaire?. In Colloque international «Pédagogie universitaire numérique: quelles perspectives à l'ère des usages multiformes des réseaux sociaux pour apprendre?».
- Proulx, A. G., Ruest-Paquette, A.-S., Simões Forte, L. A., Cotnam-Kappel, M., Fallu, C., & Bartosova, L. (2012). La réflexivité: exercice pédagogique et outil d'accompagnement aux cycles supérieurs. *Revue internationale de pédagogie de l'enseignement supérieur*, 28(28 (2)).
- Przesmycki, H., & Peretti André, d. (2004). *La pédagogie différenciée / Halina Przesmycki ; préface d'André de Peretti* ([Nouvelle édition] ed.). Paris: Hachette éducation.
- Pulijala, Y., Ma, M., Pears, M., Peebles, D., & Ayoub, A. (2018). Effectiveness of immersive virtual reality in surgical training—a randomized control trial. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 76(5), 1065-1072.

- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., . . . Nee, A. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
- Quintin, J.-J., Depover, C., & Degache, C. (2005). *Le rôle du scénario pédagogique dans l'analyse d'une formation à distance*. Paper presented at the Analyse d'un scénario pédagogique à partir d'éléments de caractérisation définis, actes du colloque EIAH, Montpellier.
- Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies. Approche cognitive des instruments contemporains*. Paris: Armand Colin.
- Rabardel, P., & Pastré, P. (2005). *Modèles du sujet pour la conception. Dialectiques activités développement*. Toulouse: Octarès.
- Rabardel, P., & Samurçay, R. (2006). De l'apprentissage par les artefacts à l'apprentissage médiatisé par les instruments. In M. Durand & J.-M. Barbier (Eds.), *Sujets, activités, environnements* (pp. 31-60): Presses Universitaires de France.
- Rancière, J. (2014). *Le maître ignorant: cinq leçons sur l'émancipation intellectuelle*: Fayard.
- Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E., & Bakiras, S. (2021). The role of ai, machine learning, and big data in digital twinning: A systematic literature review, challenges, and opportunities. *IEEE Access*, 9, 32030-32052.
- Reboul, O. (2010). Qu'est-ce que l'éducation? *Que sais-je?*, 10(2441), 15-26.
- Reifsnider, K., & Majumdar, P. (2013). *Multiphysics stimulated simulation digital twin methods for fleet management*. Paper presented at the 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- Richard, K., Havard, V., His, J., & Baudry, D. (2021). INTERVALES: INTERActive Virtual and Augmented framework for industrial Environment and Scenarios. *Advanced Engineering Informatics*, 50, 101425. doi:10.1016/j.aei.2021.101425
- Richard, K., Havard, V., Trigunayat, A., & Baudry, D. (2018). Modèle de données pour la création d'environnement interactif en réalité virtuelle et augmentée. *AFRV18*.
- Ríos, J., Hernandez, J. C., Oliva, M., & Mas, F. (2015). Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: Literature review and implications in an aircraft. *Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems*, 657-666.
- Rogalski, J. (1997). Simulations : fonctionnalités ? Validités ? Approche dans le cas de la gestion d'environnements dynamiques ouverts. In P. Béguin & A. Weill-Fassina (Eds.), *La simulation en ergonomie : connaître, agir, interagir* (pp. 55-74). Toulouse: Octarès.
- Roiné, C. (2018). Expérience, enseignement et apprentissage: Une étude de cas pour l'analyse de leur rapport dans le contexte de l'adaptation scolaire. *Éducation et didactique*, 1, 101-118.
- Romero, M., Laferriere, T., & Power, T. M. (2016). The Move is On! From the Passive Multimedia Learner to the Engaged Co-creator. *eLearn*, 2016(3), Article 1. doi:10.1145/2904374.2893358
- Romero, M., Lille, B., & Patiño, A. (2017). *Usages créatifs du numérique pour l'apprentissage au XXIe siècle*: PUQ.
- Rosen, R., Von Wichert, G., & Lo, G. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. IFAC-PapersOnLine (2015). In.
- Rozier, E. (2010). John Dewey, une pédagogie de l'expérience. *La lettre de l'enfance et de l'adolescence*, 80-81(2), 23-30. doi:10.3917/lett.080.0023
- Rudolph, J. W., Simon, R., Dufresne, R. L., & Raemer, D. B. (2006). There's no such thing as "nonjudgmental" debriefing: a theory and method for debriefing with good judgment. *Simulation in Healthcare*, 1(1), 49-55.

- Rudolph, J. W., Simon, R., Rivard, P., Dufresne, R. L., & Raemer, D. B. (2007). Debriefing with Good Judgment: Combining Rigorous Feedback with Genuine Inquiry. *Anesthesiology clinics*, 25(2), 361-376. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1932227507000237>
- Sá, M. T. (2002). Enseigner et apprendre: Espaces de croissance. *enfances PSY*(3), 146-150.
- Safin, S. (2021). Design Centré Utilisateurs. In.
- Samurçay, R., & Pastré, P. (2004). *Recherches en didactique professionnelle*. Toulouse: Octarès.
- Sánchez-Rodríguez, R., Perier, S., Callahan, S., & Séjourné, N. (2019). Revue de la littérature relative au burnout parental. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, 60(2), 77.
- Saputro, S. D., & Setyawan, A. (2020). The Effectiveness Use of Virtual Reality Media in Physics Education of Solar System Towards Cognitive Learning Outcomes. *JPI (Jurnal Pendidikan Indonesia)*, 9(3), 389-400.
- Sawyer, T., Eppich, W., Brett-Fleegler, M., Grant, V., & Cheng, A. (2016). More than one way to debrief: a critical review of healthcare simulation debriefing methods. *Simulation in Healthcare*, 11(3), 209-217.
- Schluse, M., & Rossmann, J. (2016, 3-5 Oct. 2016). *From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems*. Paper presented at the 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE).
- Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C. E., & Espindola, D. B. (2016). DT data modeling with automation and a communication methodology for data exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30), 12-17.
- Secheppet, M. I. (2020). *Apprendre dans un environnement de formation réel et simulé: articulations d'expérience dans l'activité des cochers-meneurs d'attelage*. Université Montpellier,
- Sepasgozar, S. M. (2020). Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences*, 10(13), 4678.
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., & Wang, L. (2012). Modeling, simulation, information technology & processing roadmap. *National Aeronautics and Space Administration*, 32(2012), 1-38.
- Smith, D., & Louwagie, N. (2017). Delivering advanced technical education using online, immersive classroom technology. *Community College Journal of Research and Practice*, 41(6), 359-362.
- Talan, T., & Kalinkara, Y. (2022). Students' opinions about the educational use of the metaverse. *International Journal of Technology in Education and Science (IJTES)*, 6(2), 333-346.
- Tardif, J. (1999). *Le transfert des apprentissages, éditions logiques*. Montréal, Québec.
- Tchana De Tchana, Y. (2021). *Proposition d'un jumeau numérique pour soutenir la gestion de l'exploitation d'une infrastructure linéaire*. Troyes,
- Tekinerdogan, B., & Verdouw, C. (2020). Systems architecture design pattern catalog for developing digital twins. *Sensors*, 20(18), 5103.
- Thawonmas, R., & Fukumoto, A. (2011). Frame extraction based on displacement amount for automatic comic generation from metaverse museum visit log. In *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services: Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services (IIMSS 2011)* (pp. 153-162). Springer Berlin Heidelberg.
- Tomès, A. (2022). Émancipation et universel chez Jacques Rancière. *Le Portique. Revue de philosophie et de sciences humaines*(Cahiers du Portique n° 20), 41-65.
- Tremblay-Wragg, É. (2018). Utilisation de stratégies pédagogiques diversifiées par quatre formateurs universitaires: quelle participation à la motivation à apprendre de leurs étudiants?
- Tricot, A. (1998). Charge cognitive et apprentissage. Une présentation des travaux de John Sweller. *Revue de Psychologie de l'Éducation*, 3, 37-64.
- Trollat, A.-F., & Masson, C. (2009). *La formation individualisée: conférence de consensus collectif de Gilly-lès-Cîteaux*: Educagri Ed.

- Tuegel, E. (2012). *The airframe digital twin: some challenges to realization*. Paper presented at the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA.
- Uhlemann, T. H.-J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia Cirp*, 61, 335-340.
- Valenzuela, O. (2010). La didactique des langues étrangères et les processus d'enseignement/apprentissage. *Synergies Chili*(6), 71-86.
- Vergnaud, G. (1996). Au fond de l'action, la conceptualisation. In J.-M. Barbier (Ed.), *Savoirs théoriques et savoirs d'action* (pp. 275-292). Paris: PUF.
- Vidal-Gomel, C. (2005). Situation de simulation pour la recherche : quels apports pour la formation professionnelle ? Un exemple dans le domaine de la maintenance des systèmes électriques. In P. Pastré (Ed.), *Apprentissage par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels* (pp. 156-180). Toulouse: Octarès.
- Villiot-Leclercq, E. (2007). Model for supporting the learning scenario design and reuse.
- Villiot-Leclercq, E., Dessus, P., Mandin, S., Zampa, V., & Loiseau, M. (2011a). Une approche par scénarios pour la conception d'un dispositif d'accompagnement en ligne. *Recherche & Formation*, 68(3), 47-62. doi:10.4000/rechercheformation.1507
- Villiot-Leclercq, E., Dessus, P., Mandin, S., Zampa, V., & Loiseau, M. (2011b). Une approche par scénarios pour la conception d'un dispositif d'accompagnement en ligne? *Recherche & Formation*, 68, 47-62.
- Vygotski, L. S. (1925/1930). La conscience comme problème de la psychologie du comportement. *Société Française*, 50 (2 trimestre), Disponible sur Internet : http://revuesshs.u-bourgogne.fr/societe_francaise/document.php?id=.
- Vygotskiï, L. S. (2014). *Histoire du développement des fonctions psychiques supérieures (trad. F. Sève)*. Paris: La Dispute.
- Yu, X., Owens, D., Khazanchi, D. (2012). Building Socioemotional Environments in Metaverses for Virtual Teams in Healthcare: A Conceptual Exploration. In: He, J., Liu, X., Krupinski, E.A., Xu, G. (eds) Health Information Science. HIS 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7231. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29361-0_3
- Zhang, Y., Pang, L., Wang, D. & Liu, S. (2022). Influences of Digital Twin Technology on Learning Effect.
- Zeitler, A. (2012). Apprentissages interprétatifs et construction de l'expérience. *Recherche et Formation*, 70, 31-46.

GLOSSAIRE



Acceptabilité

Relève schématiquement d'un pronostic d'usage dans lequel l'utilisateur est invité à établir une intention d'usage (Dubois et Bobillier Chaumon, 2019).

Dubois, M. & Bobillier-Chaumon, M. (2019). Acceptabilité. Dans : Gérard Valléry éd., *Psychologie du Travail et des Organisations : 110 notions clés* (pp. 19-22). Paris: Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.valle.2019.01.0019>

Acceptation

Relève d'une analyse concrète des incidences de l'usage des innovations sur diverses dimensions de l'activité (Dubois et Bobillier Chaumon, 2019).

Dubois, M. & Bobillier-Chaumon, M. (2019). Acceptabilité. Dans : Gérard Valléry éd., *Psychologie du Travail et des Organisations : 110 notions clés* (pp. 19-22). Paris: Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.valle.2019.01.0019>

Adaptative learning

« L'apprentissage adaptatif est une méthode éducative qui utilise la technologie comme dispositif d'enseignement interactif. Ainsi, la technologie adapte la présentation du matériel éducatif en fonction des besoins d'apprentissage des apprenants, en fonction des réponses à des questions ou suite à l'exécution de tâches. L'apprentissage adaptatif a aussi été connu dans le passé sous différentes appellations : hypermédias adaptatifs, enseignement assisté par ordinateur, systèmes tutoriels intelligents ou bien agents pédagogiques informatiques » (Ginon, 2012 in Djoudi et al., 2018).

https://media.eduscol.education.fr/file/GTnum/29/7/GTnum2-Mars_2018_terminologie_1092297.pdf

Alignement pédagogique

« Mettre en cohérence : 1. Le choix d'objectifs d'apprentissage, ou compétences, d'une formation/d'un enseignement, à acquérir par les étudiants, 2. Lors d'activités pédagogiques mises en œuvre par l'enseignant pour leur permettre d'y parvenir, 3. Et dont les acquisitions des étudiants sont validées par des stratégies d'évaluation adaptées aux objectifs et activités » (Maillard, 2022).

Maillard, D., (2022), L'alignement pédagogique, AMA CONTACTS n° 121
<https://www.louvainmedical.be/sites/default/files/content/article/pdf/amac121-maillard.pdf>
Biggs, J. (1996). Enhancing teaching through constructive alignment. *Higher education*, 32,3 pp347-364.

Capacités

« Elles peuvent désigner les résultats des acquis des apprentissages. La pédagogie par objectifs (ppo) utilise comme principal concept celui de capacité, sous sa forme : « Être capable de ». Dans cette perspective, on peut considérer que la capacité, dans sa formulation « Être capable de », est une aide à l'évaluation plus qu'une contribution à la définition d'objectifs pédagogiques » (Maubant, 2004). « En tant qu'objectif éducatif, une capacité est une visée de formation générale, commune à plusieurs situations ; une compétence, au contraire, est une visée de formation globale, qui met en jeu plusieurs capacités dans une même situation » (Cardinet, 1988).

Maubant, P. (2004). Lexique. Dans : , P. Maubant, *Pédagogues et pédagogies en formation d'adultes* (pp. 257-261). Paris cedex 14: Presses Universitaires de France.
Cardinet J., (1988), Évaluation scolaire et pratique, De Bœck

Classe inversée

« L'enseignant produit un cours qu'il met à la disposition des élèves ou des étudiants (souvent par voie électronique) avant que la rencontre n'ait lieu. Il peut s'agir de capsules vidéo ou de ressources en ligne plus traditionnelles (texte, images). Les élèves les regardent et les écoutent à la maison, dans le bus, sur Internet, en DVD, sur leur smartphone selon les technologies qu'ils possèdent ou maîtrisent. De retour en classe, les élèves commentent les notions et concepts visionnés et demandent des précisions éventuelles à leur enseignant » (Trestini, 2016).

Trestini, M., (2016), Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Thèse de doctorat. Université de Strasbourg <https://hal.science/tel-01432687/>

Développement professionnel

Désigne le « double processus caractérisé, d'une part, par un processus d'apprentissage professionnel, c'est-à-dire par une construction des savoirs professionnels à partir des savoirs théoriques et pratiques (Raisky, 1999) acquis dans les situations de la vie quotidienne et dans les activités professionnelles (Alheit et Dausien, 2005). [...] Un autre processus a cours simultanément à l'acquisition des savoirs, celui de la construction de l'identité. [...] Processus par lequel la personne développe un ensemble de représentations et de sentiments à propos d'elle-même en rapport avec les autres, sa pratique et son contexte à partir de son appréciation de sa réalisation de l'activité » (Gosselin et al., 2014).

Gosselin, M., Viau-Guay, A., Bourassa, B., (2014), Le développement professionnel dans une perspective constructiviste ou socioconstructiviste : une compréhension conceptuelle pour des implications pratiques, *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, <http://journals.openedition.org/pistes/4009> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/pistes.4009>

Différenciation pédagogique

« La différenciation pédagogique (DP) consiste, dans ses grandes lignes, à ajuster l'enseignement aux différents besoins des élèves » (Forget, 2018)

Forget, A. (2018), Penser la différenciation pédagogique, *Carnets des sciences de l'éducation* <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:111580>

Dispositif

« Un lieu social d'interactions et de coopération possédant ses intentions, son fonctionnement matériel et symbolique, enfin ses modes d'interactions propres » (Pera, 1999, p. 153). Un dispositif articule donc, à travers une « organisation structurée, des moyens matériels, technologiques, symboliques, cognitifs et relationnels ». Ceux-ci peuvent contribuer à influencer les comportements et les conduites sociales (affectives et relationnelles), cognitives, communicatives des sujets (ibidem). Un dispositif, aux moments de sa conception et de son instanciation, crée donc les conditions d'émergence de certains de ces comportements et conduites qui seront, à des degrés divers, (ré)-actualisés par les acteurs en fonction de leur expérience de celui-ci (Peeters et Charlier, 1999) » (Pera et al., 2014).

Pera, D., Chartier, B., Deschryver, N. (2014). Une première approche de l'hybridation. In: *Education et formation*, n° 301, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:37049>
Lebrun, M., Smidts, D., Bricoult, G., (2023), *Construire un dispositif de formation*, De Boeck

Dispositif hybride / hybridation

« Le terme de dispositif hybride de formation désigne aujourd'hui des dispositifs de formation qui articulent, à des degrés divers, des phases de formation en présentiel et d'autres organisées à distance » (Pera et al., 2014). L'hybridation en formation se caractérise par cinq dimensions principales : « (1) la mise à distance et les modalités d'articulation des phases présentes et distantes, (2) l'accompagnement humain, les formes particulières (3) de médiatisation et (4) de médiation liées à l'utilisation d'un environnement technopédagogique et, enfin, (5) le degré d'ouverture du dispositif » (Deschryver et al., 2011).

Pera, D., Chartier, B., Deschryver, N. (2014). Une première approche de l'hybridation. In: *Education et formation*, n° 301, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:37049>
Peltier, C., Séguin, C., (2021), Hybridation et dispositifs hybrides de formation dans l'enseignement supérieur : revue de la littérature 2012-2020 », *Distances et médiations des savoirs* n°35 <http://journals.openedition.org/dms/6414>

Dispositif multimodal / multicanal

« Une formation multimodale associe plusieurs modalités au profit des apprenants en s'appuyant notamment sur des outils et ressources numériques. Elle combine séquences d'apprentissage en présentiel et à distance, en mode transmissif et collaboratif, dirigés et auto-dirigés, formels et informels... (synonymes : formation mixte/hybride/blended learning)». (Norme AFNOR X50-750 in ffod, 2019).

https://travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/formations_multimodales.pdf

Derycke, A., Chevrin, V., Rouillard, J., (2005). Inter médiations multicanales et multimodales pour l'e-formation: l'architecture du projet ubi-learn. *Actes de la Conférence EIAH*. 2005. http://jose.rouillard.free.fr/perso/publi/2005_Derycke_Chevrin_Rouillard_EIAH.pdf

Dispositions à apprendre

« Un ensemble durable de dispositions favorables à l'action d'apprendre dans toutes les situations formelles et informelles, de façon expérientielle ou didactique, auto-dirigée ou non, intentionnelle ou fortuite » (Carré, 2005, in Jézégou et al. 2018).

Jézégou, A., Lameul, G., Bataille, O., Frégné, C., Nagels, M. (2008), « Dispositif de formation et Dispositions des apprenants : une interface à prendre en compte pour l'efficacité en formation ». Colloque international : Efficacité et Equité en formation. <https://shs.hal.science/halshs-01820080/document>

Carré, P. 2005. L'apprenance, vers un nouveau rapport au savoir. Paris, Dunod

Distance transactionnelle

Résulte « d'une dynamique relationnelle médiatisée entre apprenants, entre les apprenants et l'enseignant (ou le formateur) au sein d'un espace numérique de communication. (Androwkha, 2020, p. 61) [...]. La présence transactionnelle comme le degré auquel un étudiant en FAD perçoit la disponibilité des enseignants, de ses pairs ou de l'établissement d'enseignement et sa perception de sa propre disponibilité envers eux (Shin, 2001 » (Lanoix et al., 2021).

Lanoix, A., Gérin-Lajoie, S., Éthier, M.A., Poellhuber B., et Roy, N., (2021), Présence transactionnelle et dimensions du soutien aux apprenants dans la formation à distance au secteur des jeunes. Retour sur une première année d'expérimentation, *Questions Vives* N° 36, <http://journals.openedition.org/questionsvives/6140>

Annie Jézégou, A., (2019) La distance, la proximité et la présence en e-Formation. In Jézégou, A. (2019). (dir). *Traité de la e-Formation des adultes*. Bruxelles : De Boeck., <https://shs.hal.science/halshs-01951530/document>

Effets d'apprentissage

L'effet est « la conséquence, le résultat d'une action, c'est ce qui est produit par quelque chose, par une cause. Un effet s'apprécie (s'estime, s'évalue, se juge) » (Clanet, 2012).

L'apprentissage décrit « le processus psychologique, *interne au sujet* bien que toujours socialement situé, qui mène à la transformation durable de représentations, d'habiletés et d'attitudes, en milieu éducatif formel ou ailleurs. La notion de *formation*, quant à elle, décrit une intervention sur autrui, en milieu généralement formel, visant le développement des compétences ; en ce sens elle ne recouvre qu'une *intention de transformation d'autrui* » (Carré, 2015).

Carré, P., (2015), De l'apprentissage à la formation. Pour une nouvelle psychopédagogie des adultes, *Revue française de pédagogie* 190 | janvier-février-mars 2015, <http://journals.openedition.org/rfp/4688>

Clanet, J., (2012), L'efficacité enseignante, quelle modélisation pour servir cette ambition ?, *Questions Vives* Vol.6 n°18, <http://journals.openedition.org/questionsvives/1121>

Efficacité pédagogique, efficacité pédagogique

« Degré de réalisation des objectifs d'un programme ou degré d'atteinte d'un objectif » et « degré d'atteinte d'un objectif, tout en considérant des variables d'efficience et d'impact » (Legendre, 1993).

https://fastef.ucad.sn/revuefastef/memthes/sall/t1_ch4.pdf

<https://www.erudit.org/en/journals/mee/1900-v1-n1-mee07192/1091397ar.pdf>

Engagement

« Capacité d'investir du temps et des efforts sur la durée du programme de formation (Bédard et al., 2012). L'engagement implique le déclenchement de l'action et la participation active (Parent, 2014). Il existe trois types d'engagement : affectif, comportemental et cognitif » (Bédard, 2020).

Bedard, D., (2020), Motivation et engagement des étudiants : quelques incidences pédagogiques, Le Tableau, Vol9, n°4, <https://pedagogie.uquebec.ca/le-tableau/motivation-et-engagement-des-etudiants-quelques-incidences-pedagogiques>
Louvain Learning lab : <https://www.louvainlearninglab.blog/apprentissage-actif-engagement-cognitif-icap-michelene-chi/>

Environnement immersif d'apprentissage

« Tout dispositif d'information et de communication numérique proposant un niveau d'immersion sensorielle, visuelle voire psychique du sujet. Une mobilisation d'images (réelles ou synthèse), de sons, mais aussi d'activités sollicitant les usagers. Un ensemble très vaste de dispositifs plus ou moins numériques: environnements numériques de travail, applications ludiques de formation en présentiel ou à distance type serious games, outils collaboratifs, applications de simulation (réalité virtuelle et réalité augmentée), jeux vidéo, installations muséographiques et scéniques. Dans cette acceptation, ce concept permet de construire un objet qui : n'est pas réduit à un outil, ou un instrument, se situe dans un périmètre moins large qu'un dispositif, échappe à d'éventuels effets de mode, n'est pas associé à une technologie ou un matériel spécifique. » (Bonfils, 2012).

https://edutechwiki.unige.ch/fr/Environnement_virtuel_immersif_d'apprentissage_et_interactions_au_regard_de_Assemblive
<https://www.videolearning.fr/glossary/apprentissage-immersif-immersive-learning/>

Environnement virtuel d'apprentissage

« Un dispositif, une scène ou un monde artificiel interactif créé par ordinateur et dans lequel l'utilisateur peut s'immerger recréer les états et les milieux favorisant les conditions d'apprentissage, pour offrir les milieux qui semblent être les plus favorables à l'exercice des facultés cognitives, aux facultés d'imitation et à l'exercice de la pensée analogique, adductive, [...] avec] de nouvelles conditions perceptives et sensorielles [...] » (Noyer, 2012 in edutechwiki, 2023).

https://edutechwiki.unige.ch/fr/Environnement_virtuel_immersif_d'apprentissage_et_interactions_au_regard_de_Assemblive
Noyer, JM, (2012) Les espaces immersifs : le plissement numérique du monde, anthropocène et immunopolitique, *Entretiens scientifiques Neptune*, Toulon, https://archivesic.ccsd.cnrs.fr/file/index/docid/702765/filename/Les_espaces_immersifsVf2.pdf

Environnement numérique d'apprentissage

« Englobe tout à la fois l'idée de la présence de ressources informatiques pour soutenir la démarche des apprenants, l'idée d'une vision cognitiviste et constructiviste de l'apprentissage et l'idée d'un lieu réel ou virtuel qui loge des "systèmes" en interaction. Et lorsque le lieu est virtuel, on parle communément d'environnement virtuel d'apprentissage ou d'environnement numérique » d'apprentissage » (Basque et Doré, 1998 in Trestini, 2016, p42).
« Système d'apprentissage ouvert intégrant les acteurs et leurs instruments numériques et non numériques. Ce système constitue potentiellement le milieu de l'apprentissage émergent. La conception et la régulation de l'ENA peuvent être plus ou moins contrôlées : totalement par l'apprenant, négociées ou complètement contrôlées par l'institution » (Charlier, 2019, p58).

Trestini, M., (2016), Théorie des systèmes complexes appliquée à la modélisation d'environnements numériques d'apprentissage de nouvelle génération. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Thèse de doctorat. Université de Strasbourg <https://hal.science/tel-01432687/>

Charlier, B., (2019), Les environnements numériques d'apprentissage : quelques éléments d'intelligibilité, in Jezegou, A., *Traité de la formation des adultes*, Dunod

Escalier pédagogique

Il structure la formation en étapes. Il « permet à l'apprenant de monter de marche en marche. C'est à dire d'acquérir des connaissances les unes après les autres. L'ordre et l'importance sont indispensables pour progresser » (Davi, 2019).

<https://frederic-davi.fr/lescalier-pedagogique>
Bouchut, F., Cuisiniez, F., Cauden, I., Tronchet, J., (Dir), (2020), *La boîte à outils des formateurs*. Paris: Dunod.

Inclusion scolaire

« L'éducation inclusive implique de réfléchir aux changements à apporter aux systèmes éducatifs pour qu'ils répondent à la diversité des apprenants. L'inclusion scolaire : ses fondements, ses acteurs et ses pratiques diversité qui doit être considérée comme une ressource plutôt que comme un problème à résoudre » (Prud'homme et al., 2016). « Adapter le système et le fonctionnement scolaires ordinaires à la diversité des besoins d'apprentissage des élèves » (Canopé, 2023).

Guirimand, N. & Mazereau, P. (2016). Inclusion scolaire et professionnalités enseignantes entre attentes et contradictions. *Carrefours de l'éducation*, 42, 47-60. <https://doi.org/10.3917/cdle.042.0047>
Prud'homme, L., Duchesne, H., Bonvin, P., Vienneau, R., (2016), *L'inclusion scolaire*, De boeck
<https://www.versunecoleinclusive.fr/definitions/>

Individualisation

« Un mode d'organisation de la formation visant la mise en œuvre d'une démarche personnalisée de formation. Elle met à disposition de l'apprenant l'ensemble des ressources et des moyens pédagogiques nécessaires à son parcours de formation et à ses situations d'apprentissage. Elle prend en compte ses acquis, ses objectifs, son rythme. » (Ouaknine, 2005 in Fretigné et Trollat, 2009).

Volpe, Y., (2017) Individualisation, personnalisation, pédagogie différenciée ou différenciation: quelques clarifications conceptuelles. In: *Educateur* n° 2, p. 32-34. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:95580>
Connac, S., (2021), Pour différencier : individualiser ou personnaliser ?, *Éducation et socialisation* 59, <http://journals.openedition.org/edso/13683> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/edso.13683>
Frétigné, C. & Trollat, A. (2009). La formation individualisée : un objet de recherche ?. *Savoirs*, 21, 9-40.

Intelligence émotionnelle

« Capacité des individus à gérer leurs sentiments et ceux d'autres personnes, à discriminer entre différents types d'émotions et à utiliser ces informations pour guider la pensée et l'action » (Salovey et Mayer, 1990 in Ennakra et Alaoui, 2021).

Goleman, D. (1997). *L'intelligence émotionnelle*, Robert Laffont
Ennakra, M., Alaoui, M., (2021), L'intelligence émotionnelle : une revue de littérature, *Akofena* n°004, Vol.2, <https://www.revue-akofena.com/wp-content/uploads/2021/09/32-T04-48-Mouad-ENNAKRA-pp.419-428.pdf>

Jumeau Numérique

C'est une maquette virtuelle dynamique, qui vit en parallèle de l'usine réelle. Son intérêt est de représenter en permanence une usine existante, ou en devenir, et de suivre automatiquement ses évolutions. Ainsi, toute modification peut être testée au préalable sur la maquette virtuelle. C'est aussi un formidable outil de formation. Cette maquette peut être reliée à des capteurs installés sur les vraies machines de production afin de suivre son utilisation en temps réel.

Alliance Industrie du futur <http://www.industrie-dufutur.org/famille-de-metier-production/>
Alliance Industrie du futur http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2023/03/AIF_JumeauNumerique.pdf

Machine learning

Le Machine Learning (apprentissage automatique) est une branche de l'informatique qui permet aux ordinateurs d'apprendre sans avoir été programmés explicitement à cet effet.

https://media.eduscol.education.fr/file/GTnum/29/7/GTnum2-Mars_2018_terminologie_1092297.pdf

Médiation

« Ensemble des aides ou des supports qu'une personne peut offrir à une autre personne en vue de lui *rendre plus accessible* un savoir quelconque. [...] Le langage, l'affectivité, les produits culturels, les relations ou les normes sociales sont des *médiations*. [...] L'enseignant est un médiateur » (Raynal et Reunier, 1990 in Rézeau, 2002).

Rézeau, J., (2002), Médiation, médiatisation et instruments d'enseignement : du triangle au « carré pédagogique », <http://journals.openedition.org/asp/1656>
Peraya, D., (2006), La formation à distance: un dispositif de formation et de communication médiatisées. Une approche des processus de médiatisation et de médiation *Calidoscópico*, vol. 4, núm. 3, <https://www.redalyc.org/pdf/5715/571561916008.pdf>

Métaverse

« Généralement, le métaverse est considéré comme un espace virtuel partagé entièrement immersif, hyper spatio-temporel et autonome, mélangeant les mondes ternaires physique, humain et numérique » (Wang et al., 2022 in Weinberger, 2022).

Weinberger, M., (2022), Qu'est-ce que le métaverse ? Une définition basée sur une méta-synthèse qualitative, *Future Internet* 14, no. 11 : 310. <https://doi.org/10.3390/fi14110310>
Péquinot, J., Roussel, F.G.,(2015), *Les métavers. Dispositifs, usages et représentations*, L'Harmattan

Objectif pédagogique

« Si l'on s'entend pour appeler « objectifs pédagogiques » les énoncés qui décrivent les effets obtenus chez les élèves par l'enseignement, on ne s'entend pas nécessairement sur la nature de ces effets. C'est pourquoi on retrouve diverses façons d'aborder les objectifs utilisés par les enseignants : les objectifs de type comportemental, ceux de type cognitif, les éléments fondamentaux de la formation, les compétences à développer » (Saint Onge, 1993).

Saint Onge, M. (1993), Les objectifs pédagogiques : pour ou contre ?, *Pédagogie collegiale*, vol. 6, n°2 https://eduq.info/xmlui/bitstream/handle/11515/21324/saint_ong_06_2.pdf?sequence=1
Mager, R. F. (2020). *Comment définir des objectifs pédagogiques*. Dunod.

Pédagogie active

« Un type de pratiques pédagogiques permettant à l'étudiant de faire évoluer ses connaissances et ses compétences existantes en interagissant activement (avec l'enseignant et ses pairs) sur une matière sur laquelle il devra poser un regard critique, réflexif et analytique. Ces pratiques étant ancrées dans une conception socioconstructiviste de l'apprentissage » (De Clercq et al., 2019).

Amégan, S. (2011). *Pour une pédagogie active et créative: 2e édition*. PUQ.
Bachy, S., Lebrun, M., Smidts, D., (2010), Un modèle-outil pour fonder l'évaluation en pédagogie active : impact d'une formation sur le développement professionnel des enseignants, *Revue internationale de pédagogie de l'enseignement supérieur*, <http://journals.openedition.org/ripes/307>

Prérequis d'apprentissage

« Il s'agit des connaissances, des savoirs, des compétences maîtrisés par l'apprenant. Ces acquis sont issus de l'expérience scolaire, sociale et/ou professionnelle. Ils constituent le « déjà-là » » (Maubant, 2004).

Maubant, P. (2004). Lexique. Dans : P. Maubant, *Pédagogues et pédagogies en formation d'adultes*, PUF

Présence à distance

« La présence en e-learning résulte de certaines formes d'interactions sociales entre les apprenants, entre le formateur et les apprenants lorsque ces derniers sont engagés dans une démarche de collaboration à distance au sein d'un espace numérique de communication. Ces interactions sociales sont à la fois : 1. des transactions entre les apprenants, 2. des interactions qui permettent de créer un climat socio-affectif favorable aux transactions entre les apprenants, 3. des interactions que le formateur entretient à distance avec les apprenants pour soutenir les transactions entre les apprenants tout en contribuant à un climat socio-affectif favorable » (Jézégou, 2010).

Jézégou, A. (2010). Créer de la présence à distance en e-learning: Cadre théorique, définition, et dimensions clés. *Distances et savoirs*, 8, 257-274. <https://www.cairn.info/revue--2010-2-page-257.htm>.
Charlier, B., Deschryver, N. & Peraya, D. (2006). Apprendre en présence et à distance: Une définition des dispositifs hybrides. *Distances et savoirs*, 4, 469-496. <https://www.cairn.info/revue--2006-4-page-469.htm>.

Processus d'enseignement-apprentissage

« [...] faire exister dans une même lexiex deux logiques complémentaires, celle qui pense la question de la méthodologie et de la méthode d'enseignement, et celle qui envisage l'activité de l'apprenant et la démarche heuristique qui la sous-tend » (Valenzuela, 2010). « En classe, un élève, pour apprendre le savoir enseigné, est amené à réaliser des tâches d'apprentissage prescrites par son enseignant-e. Ces tâches sont censées être porteuses du savoir enseigné et sont soutenues par un ou plusieurs dispositifs didactiques. Dans la salle de classe, un-e élève n'est pas seul-e, il-elle est parmi d'autres élèves. L'ensemble de ces conditions de réalisation de la tâche par l'élève correspond au contexte de la tâche d'apprentissage (Bastien et Bastien-Toniazzo, 2004), et en reprenant la proposition de Musial, Pradère et Tricot (2011), ce contexte de mise en oeuvre de la tâche d'apprentissage élaborée par l'enseignant-e correspond à la situation d'enseignement-apprentissage » (Héroid, 2018).

Valenzuela, O., (2010), La didactique des langues étrangères et les processus d'enseignement-apprentissage, *Synergies* n°6
Héroid, J.-F. (2019). Un modèle de la situation d'enseignement-apprentissage pour mieux comprendre l'activité de l'élève en classe. *Revue des sciences de l'éducation*, 45(1), 82-107. <https://doi.org/10.7202/1064607ar>

Phygitale

Contraction des mots « physique » et « digital » pour désigner l'utilisation d'outils numériques dans des espaces physiques. L'expression est empruntée au marketing. « Le Phygitale Learning, quant à lui, associe l'univers de l'animation présentielle et du numérique lors d'une session de formation » (Blog Lalamedia, 2020).

Blog : <https://lalamedia.fr/2020/03/11/phygital-learning-nouvelle-approche-formation/#:~:text=Le%20terme%20Phygitale%20est%20une,%20action%20d'un%20m%C3%A9dicament>

Scénario pédagogique

Désigne le « résultat du processus de conception d'une activité d'apprentissage [...]. La conception d'un scénario pédagogique apparaît comme un processus systématique permettant d'assurer une certaine qualité de l'enseignement en tenant compte des différents facteurs agissant sur l'apprentissage » (Brassard et Daele, 2003). « Un scénario pédagogique décrit une séquence d'apprentissage, des objectifs pédagogiques et des moyens à mettre en oeuvre pour atteindre les objectifs définis. Généralement, le scénario pédagogique donne lieu à un projet, une activité particulière d'apprentissage, dont la réalisation permettra à l'enseignant de vérifier l'acquisition des connaissances et/ou compétences recherchées chez l'élève » (Académie de Paris, 2019).

Brassard, C., Amaury Daele, A., (2003). « Un outil réflexif pour concevoir un scénario pédagogique intégrant les TIC ». Colloque Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Strasbourg, <https://edutice.archives-ouvertes.fr/edutice-00000159/file/n042-72.pdf>
Académie de Paris, Construire une séquence sur un scénario pédagogique https://pia.ac-paris.fr/portail/jcms/p1_1886350/construire-une-sequence-sur-un-scenario-pedagogique

Situation pédagogique

Désigne « une situation contextuelle où se déroulent les processus d'enseignement et d'apprentissage » (Legendre, 1993 in Boudreault, 2009).

Boudreault, H. (2009), la situation pédagogique en formation professionnelle, Blog Didapro <https://didapro.me/2009/08/08/la-situation-pedagogique-en-formation-professionnelle/#:~:text=La%20situation%20p%C3%A9dagogique%20en%20enseignement,enseignement%20et%20d'apprentissage%20%C2%BB.>

Saleur, C. (2014), Situation d'apprentissage et séquence pédagogique, Université de Lorraine

Situation d'apprentissage

Désigne « un ensemble de conditions et de circonstances susceptibles d'amener une personne à construire des connaissances. Une telle situation peut être "spontanée", non prévisible, et agir sur l'apprenant, interpellé par une observation, une rencontre, un événement qui pose problème et remet en question ses représentations » (Faerber, 2004 in Saleur, 2014). « Le choix de situations d'apprentissage, la préparation de ces activités, leur régulation en classe, font que l'enseignement et, au-delà, les apprentissages scolaires, s'organisent en fonction des hypothèses que l'enseignant fait sur la manière dont l'élève apprend » (Develay, 1992).

Saleur, C. (2014), Situation d'apprentissage et séquence pédagogique, Université de Lorraine

Develay, M. (1992), *De l'apprentissage à l'enseignement*, ESF

Socioconstructivisme

« Le socioconstructivisme est une théorie de l'apprentissage qui souligne l'importance des interactions sociales et le rôle de la culture dans la création de connaissances » (Bien enseigner, 2022). L'apprentissage est considéré comme un processus actif, l'apprenant est acteur de ses apprentissages.

Le modèle de Jonassen (2008) présente cinq caractéristiques requises pour que l'apprentissage soit qualifié de socioconstructiviste : « Ainsi, l'apprentissage doit être : 1) actif (l'apprenant a l'occasion d'expérimenter des concepts et d'observer le résultat de ses expérimentations); 2) constructif (il intègre de nouvelles connaissances à ses connaissances antérieures); 3) intentionnel (il se fixe des objectifs d'apprentissage personnels et évalue son cheminement); 4) authentique (il aborde un concept sous ses multiples dimensions et ses divers contextes); et 5) coopératif (il collabore avec les autres pour construire ses connaissances et contribuer à la construction d'un produit collectif) » (Jonassen, 2008 in Lemay et Mottey, 2009).

<https://www.bienenseigner.com/socioconstructivisme-definition-principes-methodes/>

Legendre, ME., (2004), Cognitivism et socio-constructivisme, in Jonnaert, P. et M'Batika, A., *Les réformes curriculaires*, Presses de l'Université du Québec

Lemay, R. & Mottet, M. (2009). Les méthodes pédagogiques utilisées pour construire un environnement d'apprentissage socioconstructiviste dans un cours en ligne en mode hybride. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire* n°6(2-3), <https://doi.org/10.7202/1000011ar>

(Socio)cognitivism

« On peut considérer les sciences cognitives comme une alliance de disciplines visant à constituer une *science naturelle de l'esprit*. Par « esprit », on entend simplement ici l'ensemble des capacités mentales propres au système nerveux central. Plus précisément, les sciences cognitives sont des *sciences de la cognition* : il s'agit d'étudier les capacités et processus mentaux – mais néanmoins naturels – qui, au moyen d'un traitement (aussi bien sélectif que productif) de l'information, engendrent, transmettent, modifient, utilisent, conservent ou consistent en de la connaissance : sensorimotricité, perception, mémoire, compréhension et production langagière (et plus largement symbolique), représentation des connaissances, ou encore raisonnement » (Steiner, 2005).

Steiner, P. (2005), Introduction cognitivism et sciences cognitives », *Labyrinthe* n°20, <http://journals.openedition.org/labyrinthe/754>

Rocheleau, J., (2009) "Les théories cognitivistes de l'apprentissage repéré à https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/docs/GSC332/F766183874_Approche_cognitiviste_apprentissage2009_10_05.pdf

Soutien à l'autonomie

« L'autonomie englobe à la fois les possibilités qui sont offertes de piloter son propre apprentissage (les conditions) et la capacité de l'étudiant à agir sur le processus afin de conduire son propre parcours d'enseignement-apprentissage, en vue d'atteindre les objectifs qu'il se fixe (Moore, 1997 ; Paquette, 2001 ; Quintin, 2008) » (Quintin, 2013).

Quintin, J.J., (2013). L'autonomie en question(s). *Les Langues Modernes* n°4, <https://hal.science/hal-00922977v1/document>
Cappellini, M., Antonietta, M., Impedovo, A., Sanchez, E., (2022). « Pour une professionnalisation des enseignants utilisant le numérique pour un soutien à l'autonomie et à la citoyenneté : Etat de l'art sur les formations à la citoyenneté numérique ». [Rapport de recherche] Aix Marseille Université (AMU). <https://shs.hal.science/halshs-03546656/>

Soutien aux apprenants

« Le soutien aux apprenants en formation à distance est un processus complexe, car il mobilise de nombreuses dimensions. Pour Deschênes et Lebel (1994), quatre plans existent : cognitif, affectif, motivationnel et métacognitif. Le plan cognitif est en lien avec les différentes stratégies associées aux études (apprentissages, méthodologies) et à l'établissement (administratifs). Le plan affectif s'intéresse davantage aux aspects liés aux émotions de l'apprenant. Proche du cognitif, le plan motivationnel concerne les éléments associés à la réussite académique. Enfin, le plan métacognitif s'intéresse aux moyens mis en place pour permettre à l'apprenant de prendre conscience de ses propres stratégies (cognitives et motivationnelles) » (Lanoix et al., 2021) auxquels on pourra ajouter le plan technologique (Gérin-Lajoie, 2021 in Lanoix et al., 2021).

Lanoix, A., Gérin-Lajoie, S., Éthier, MA., Poellhuber, B., et Roy, N., (2021), Présence transactionnelle et dimensions du soutien aux apprenants dans la formation à distance au secteur des jeunes. Retour sur une première année d'expérimentation, *Questions Vives* N° 36, <http://journals.openedition.org/questionsvives/6140>

Story-board

Il décrit « la trame des modules de formation dans ses moindres détails » (Mediabox, consulté en 2023). Dans le monde du e-learning, il désigne « une maquette du module e-learning, une description de tous les écrans d'un contenu interactif. Il précise les objectifs de l'écran, ce qu'il va se passer pour l'apprenant et les indications nécessaires pour la production du contenu interactif avec le logiciel auteur de votre choix (Storyline, Captivate, Lectora, etc.) » (Blog Bruno Tison, consulté en 2023).

Médiabox <https://www.foad-spirit.net/mooc/formation-formateur/elearning-design-storyboard.php>
Marty, S., Thomas Vasquez, K., (2021). Dispositifs pédagogiques numériques et représentations technophiles/technophobes. Le cas du Projet Up, dispositif pédagogique hybride innovant en contexte de crise sanitaire. *Interfaces numériques*, 10(2). <https://doi.org/10.25965/interfaces-numeriques.4624>
Vidéo : <https://soundcloud.com/pedagoform-pedagoform/utiliser-le-storyboard-en-formation>
Tisson B. : <http://elearnaucarrebrunotison.blogspot.com/2014/04/storyboard-ou-scenarimage-trame-pour.html>

Synopsis

« Un synopsis est un document rédigé qui présente le cadre de votre formation, son idée générale, les temps forts ainsi que les modalités d'apprentissage » (Janty, 2021). Il est un analyseur des logiques d'enseignement et de formation » (Ronveaux et al., 2013).

Janty, 2021, Learnbox : <https://learnbox.com/blog/comment-creer-un-bon-synopsis-de-formation/#.Y-UEnHbMKUk>
Ronveaux, C., Gagnon, R., Aeby Daghe, S., et Dolz, J. (2013). Les objets d'enseignement et de formation en français: les séquences, les dispositifs et leurs synopsis. Dans J.-L. Dorier, F. Leutenegger et B. Schneuwly (Eds.), *Didactique en construction. Construction des didactiques*. (Vol. 17, pp. 210-224). Bruxelles, Belgique: De Boeck Supérieur. <http://hdl.handle.net/20.500.12162/5266>

Système cyberphysique

« Un système cyber-physique (ou CPS pour Cyber-Physical Systems) est un ensemble d'éléments informatiques qui collaborent pour le contrôle d'entités physiques. L'objectif ultime des CPS est la création d'espaces intelligents : smart

transport, smart health, smart grid, etc. Les réseaux électriques intelligents (ou SG pour Smart Grids) sont des exemples de CPSs complexes et à grande échelle. Un Smart Grid est un réseau de transmission d'électricité et d'informations permettant la collecte et la distribution d'énergie de manière maîtrisée, fiable et sécurisée, garantissant un fonctionnement optimal des éléments du réseau et répondant aux besoins des parties prenantes. » (Bibliothèque municipale de Genève, 2019) ou plus simplement : « systèmes physiques desquels les opérations sont surveillées, contrôlées, coordonnées et intégrées par un cœur centres de calculs et de communications » (Rajkumar et al., 2010 in Cardin, 2016).

<http://institutions.ville-geneve.ch/fr/bm/interroge/archives-questions-reponses/detail/question/quest-ce-quun-systeme-cyber-physique/>
Cardin, C. (2016) Contribution à la conception, l'évaluation et l'implémentation de systèmes de production cyber-physiques. Habilitation à diriger des recherches en Automatique / Robotique. Université de Nantes, <https://theses.hal.science/tel-01443318>

Tâche d'apprentissage

Unité d'analyse qui prend la forme d'un outil pour faire passer un message signifiant. Elle est différente de l'exercice qui donne l'occasion de manipuler un objet d'apprentissage (Guichon et Nicolaev, 2009) La dimension organisationnelle d'une tâche d'apprentissage peut être subdivisée en quatre parties : contenus, objectifs, procédures et résultats. En ergonomie, la tâche est ce qui est à faire.

Guichon, N., Nicolaev, V., (2009), Caractériser des tâches d'apprentissage et évaluer leur impact sur la production orale en L2. EPAL - Echanger Pour Apprendre en Ligne, Juin 2009, Grenoble, France, <https://hal.science/hal-02017635/>
Tourmen, C. (2007). Activité, tâche, poste, métier, profession : quelques pistes de clarification et de réflexion. *Santé Publique*, 19, 15-20. <https://doi.org/10.3917/spub.070.0015>

Technologie immersive

L'apprentissage immersif se caractérise par « l'immersion de l'apprenant dans un univers virtuel afin de lui faire vivre une expérience la plus réaliste possible [...]. La simple immersion sensorielle et visuelle cherche à faire entrer le spectateur dans un monde fictif [...]. L'immersion narrative renvoie au développement du récit, de l'histoire elle-même et de son potentiel à faire en sorte que l'utilisateur veuille progresser » (Martin, 2022).

Martin, J. (2022), L'apprentissage immersif par les technologies des langues et cultures étrangères dans les recherches scientifiques, in Duée, C., Martin, J. (2022), Enseignement immersif des langues étrangères au moyen des technologies virtuelles, Editions de la Universidad de Castilla la Mancha, https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=lang_fr&id=wb-ZEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA23&dq=technologies+immersives+d%C3%A9finition&ots=-KTS_s_r70&sig=Afc_Pf_XouSWxnduL1kAAz3gtBE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Utilisabilité (et expérience utilisateur)

« Degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficacité et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié » (Norme ISO 9241-11). Est souvent confondue avec l'expérience utilisateur qui se préoccupe de l'ensemble des « aspects de l'expérience utilisateur lors de l'interaction avec le produit, service, environnement ou d'établissement » (ISO 9241-210). L'utilisabilité relève d'une capacité à utiliser, l'expérience utilisateur concerne les sentiments à l'égard d'une utilisation pour en rendre compte de cette dernière.

Blog : <https://www.testapic.com/informations-pratiques/actualites/design-conception/utilisabilite-vs-experience-utilisateur/>
Barcenilla, J. & Brangier, É. (2016). Usage, utilisabilité et expérience utilisateur. Dans : Gérard Valléry éd., *Psychologie du Travail et des Organisations: 110 notions clés* (pp. 429-432). Paris: Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.valle.2016.01.0429>

Le projet JENII (JENII – ANR-21-DMES-0006) financé par l'ANR (Agence nationale de la recherche) dans le cadre de l'appel à projet DemoES du PIA4 a débuté le 2 Novembre 2021 pour une durée de 3 ans.

Ce projet coordonné par Arts et Métiers Sciences et Technologies – École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers réunit le CESI, le CNAM et le CEA.



[linkedin.com/company/jenii](https://www.linkedin.com/company/jenii)



[@jenii_ensam](https://twitter.com/jenii_ensam)



[@jenii6721](https://www.youtube.com/channel/UC6721)

