Continuité phygitale des activités collaboratives hybrides de fabrication dans les FacLabs

Phygital Continuity of Hybrid Collaborative Fabrication Activities in FacLabs

Nathalie BORGOGNON[1]; Laurent MOCCOZET[1]; Gaëlle MOLINARI[2]

[1]*RISIS, Centre Universitaire Informatique (CUI), Université de Genève*
[2]*TECFA, Université de Genève*

Résumé. Notre contribution s'inscrit dans le cadre des FacLabs, espaces académiques inspirés des FabLabs, dédiés à la co-création et à la fabrication numérique en milieu universitaire. Ces espaces se caractérisent par une hybridité multidimensionnelle, où les étudiants évoluent entre des environnements physiques et numériques, produisent des artefacts tangibles et intangibles, et travaillent en groupe ou individuellement, en présentiel ou à distance, de manière synchrone ou asynchrone. L'étude explore la continuité phygitale, un concept qui vise à intégrer de manière fluide les espaces physiques et numériques en surmontant les discontinuités propres à l'hybridité. La métaphore de l'écotone, empruntée à l'écologie, est utilisée pour décrire les transitions complexes entre les dimensions de cette hybridité et analyser les interactions qu'elles génèrent. Ce cadre conceptuel a conduit à l'identification de technologies-passerelles capables de réduire les discontinuités, inspirées des métaverses mais éloignées de leur logique hyperréaliste. Ces technologies incluent la réalité augmentée, les interfaces tangibles, le retour haptique et l'Internet des objets, toutes coordonnées par un Scene Graph Phygital. Cette structure de données hiérarchique centralise et gère les traces numériques issues des différentes dimensions d'hybridité.

Mots-clés : FacLab, Fabrication Numérique, Collaboration orientée Objets, Environnement d'Apprentissage Hybride, Hybridité, Continuité, Écotone.

Abstract. *Our contribution is situated in the context of FacLabs, academic spaces inspired by FabLabs and dedicated to co-creation and digital fabrication in university environments. These spaces are characterized by a multidimensional hybridity that spans the interplay between physical and digital environments, tangible and intangible artifacts, and various forms of collaboration—whether in groups or individually, in person or remotely, synchronously or asynchronously. The study examines the concept of phygital continuity, aiming to create a seamless integration of physical and digital spaces by addressing the discontinuities inherent in hybridity. The ecotone metaphor, drawn from ecology, is employed to illustrate and analyze the complex transitions between these dimensions and the interactions they generate. This conceptual framework identifies bridging technologies, inspired by metaverses but distinct from their hyper-realistic approach, including augmented reality, tangible interfaces, haptic feedback, and the Internet of Things. These technologies are coordinated by a phygital scene graph, a hierarchical data structure designed to centralize and manage digital traces across hybrid dimensions.*

Keywords : *FacLab, Digital Fabrication, Object-Oriented Collaboration, Hybrid Learning Environment, Hybridity, Continuity, Ecotone.*

1. Introduction et contexte

Cette rubrique résulte de la combinaison de plusieurs points de vue disciplinaires – les technologies éducatives, l'informatique et l'interaction humain-machine – sur l'hybridité dans les FacLabs, les discontinuités en termes d'actions et d'interactions qu'elle peut introduire, et la manière dont des technologies peuvent être conçues pour assurer la continuité de l'activité.

Les FacLabs sont des espaces collaboratifs dédiés à la fabrication numérique. De par leur inscription physique et institutionnelle au sein de l'université, ils représentent un hybride des FabLabs, ces tiers-lieux informels conçus pour démocratiser l'accès aux idées et aux outils permettant à chacun de devenir producteur plutôt que consommateur, offrant à tous l'opportunité d'apprendre en créant et encourageant une participation productive à la société de connaissances (Mersand, 2021).

Les FacLabs se distinguent par une hybridité que nous qualifierons de multiple ou multidimensionnelle, où plusieurs dimensions s'entremêlent de manière complexe. Les étudiants naviguent entre espaces physiques et numériques (physique/numérique), tout en produisant des artefacts tangibles, comme des prototypes physiques, et intangibles, tels que des idées, des processus ou du contenu numérique (tangible/intangible). Ces artefacts, qu'ils soient matériels ou immatériels, constituent des leviers essentiels pour la réflexion et la création, y compris dans le contexte pédagogique des FacLabs (Morin et Moccozet, 2021). Par ailleurs, ils travaillent soit en groupe, soit individuellement (individuel/groupe), en présence ou à distance (présence/distance), et de manière synchrone ou asynchrone (synchrone/asynchrone). Enfin, leur activité peut être encadrée par un dispositif pédagogique prescrit ou émerger de manière autodéterminée (formel/informel).

La présente contribution est le fruit d'une activité commune de « fabrication » visant à élaborer un cadre conceptuel et méthodologique destiné à orienter la conception et le développement de technologies facilitant les transitions entre les différentes dimensions d'hybridité dans un environnement d'apprentissage comme les FacLabs. Nous avons ainsi choisi d'ancrer ce dernier dans une approche transdisciplinaire, qui dépasse la simple opposition entre le numérique et l'analogique en soulignant son intégration indissociable avec de nombreux aspects de la vie quotidienne. Nous avons également décidé d'utiliser le concept d'écotone, emprunté à l'écologie, comme autre perspective pour étudier l'hybridité en nous plaçant dans le contexte des FacLabs, qui, comme nous le verrons dans la section suivante, se présentent comme l'exemple type d'environnements hyper-hybridite. Nous avons également développé le concept de (dis-)continuité phygitale pour décrire les « va-et-vient » que les étudiants font entre les différentes dimensions d'hybridité, et l'avons associé à des propositions de technologies-passerelles pour favoriser la continuité des actions et interactions dans une collaboration orientée objets. Nous vous invitons à explorer ces différentes notions et à découvrir comment nous les avons mobilisées tout au long de cet exposé.

2. Le Faclab, une variante academique de FabLab

Selon une définition très pragmatique, « les FabLabs mettent à disposition de leurs utilisateurs des lieux équipés, notamment de machines à commande numérique (découpeuse à laser, découpeuse de vinyle, fraiseuse, etc.) » (Lhoste et Barbier, 2015). Ces espaces présentent une valeur pédagogique significative pour l'enseignement supérieur, de par la nature et le fonctionnement des communautés qui les utilisent et la façon dont l'apprentissage s'y joue.

2.1. Du FabLab au FacLab

Le terme FacLab désigne une variante académique du FabLab, et fait référence à un mouvement plus large qui vise à intégrer les pratiques de fabrication numérique dans le monde académique (Galan et Musiani, 2019). Le premier FacLab Suisse a été installé à l'Université de Genève (faclab.unige.ch), dans l'ancien local d'une cafétéria du campus Battelle. D'autres FacLabs sont en projet avec l'objectif de créer un réseau qui permettra d'étendre les capacités et les ressources de chaque FacLab à l'ensemble.

L'installation de FacLabs à l'université peut aller de la simple offre d'espaces pour fabriquer à l'exploitation de leur rôle d'intermédiaires ou de catalyseurs dans l'atteinte d'objectifs qui peuvent être significatifs pour le monde professionnel. Par exemple, les FacLabs peuvent être utilisés pour développer l'esprit entrepreneurial académique (Angrisani, Arpaia, Bonavolonta et Lo Moriello, 2018 ; Angrisani, Arpaia, Capaldo *et al*., 2018 ; Secundo *et al*., 2020) ou pour promouvoir l'enseignement des Sciences, Technologie, Ingénierie et Mathématiques (STIM) (Lorenzo, 2017 ; Pernia-Espinoza *et al*., 2017).

Dans le contexte de la transformation de l'enseignement supérieur, plusieurs auteurs soulignent les défis et les difficultés que peut représenter l'intégration des FacLabs (Archieri et Jaouen, 2020 ; Stickel *et al*., 2019). L'enjeu est notamment d'intégrer dans le fonctionnement des Faclabs les principes fondamentaux auxquels les Fablabs adhèrent : la liberté, au sens de l'autonomie ainsi que le libre accès et la libre circulation de l'information ; la méfiance à l'égard de l'autorité, c'est-à-dire l'opposition au style d'organisation traditionnel descendant ; l'adoption de l'apprentissage par la pratique ainsi que des méthodes d'apprentissage entre pairs, par opposition aux approches traditionnelles d'enseignement formel ; le partage, la solidarité et la coopération (Kostakis *et al*., 2015). Il est nécessaire que ces principes se maintiennent dans leur application académique pour garantir l'intégrité et l'efficacité de ces espaces.

2.2. Un environnement d'apprentissage hybride

Dans sa démarche, le FacLab élargit le champ de la fabrication au-delà des artefacts tangibles pour inclure également des artefacts intangibles, grâce à l'introduction d'outils numériques spécifiques qui rendent cela possible. De plus, il consolide la démarche de terrain d'innovation en intégrant des méthodes de conduite de projet comme le Design Thinking (Plattner *et al*., 2013). Ces méthodes s'inscrivent dans une approche de conception centrée sur l'utilisateur final, itérative et basée sur une collaboration multidisciplinaire. Cette même approche est utilisée pour accompagner et soutenir de nombreuses implémentations de FabLabs dans le domaine de l'éducation (Pitkänen et Andersen, 2018 ; Smith *et al*., 2015).

Le FacLab est, par définition, organisé autour d'un espace physique. L'ouverture de son accès à l'ensemble des membres de l'Université et à la cité, ainsi que le développement de ses activités, se heurtent à des contraintes pratiques telles que les horaires d'ouverture et l'espace disponible. Ces contraintes peuvent, bien entendu, se dépasser techniquement, sous réserve de moyens disponibles, en augmentant la superficie disponible ou en élargissant les horaires d'ouverture. Cependant, ces limites se poseront à nouveau dès qu'elles seront atteintes. A titre d'illustration, en 2020, la population étudiante rattachée à l'Université de Genève s'élevait à 19 000, pour une superficie actuelle du FacLab de 320 m^2. Il devient ainsi nécessaire de réfléchir à l'extension des activités du FacLab en dehors de ses murs physiques, à distance, tout en préservant les caractéristiques et le fonctionnement qui en font sa singularité.

La cohabitation des espaces physiques et numériques, la production d'objets tangibles et intangibles, ainsi que l'expansion des activités de fabrication au-delà des murs, à distance,

font du FacLab un environnement d'apprentissage résolument hybride. Le potentiel innovant et pédagogique du FacLab réside dans l'opportunité qu'il offre aux étudiants de naviguer entre plusieurs dimensions d'hybridité. Dans ce contexte, cette hybridité multidimensionnelle peut également être comprise comme une hyperhybridité, au sens de Nørgård et Hilli (2022), où ces dimensions hybrides ne se contentent pas de coexister, mais s'entrelacent simultanément. Cet entrelacement génère des interactions dynamiques entre le physique et le numérique, le tangible et l'intangible, le collectif et l'individuel, redéfinissant les frontières traditionnelles de l'apprentissage. Cette complexité exige une conception pédagogique et technologique adaptée pour fluidifier les transitions entre ces dimensions et garantir leur intégration harmonieuse.

Dans la section suivante de cet article, nous examinons l'hybridité en éducation à travers la métaphore de l'écotone, qui nous invite à explorer les zones de transition et d'interaction entre différentes dimensions d'hybridité dans un environnement d'apprentissage. Nous abordons également les défis liés à ces transitions, notamment les discontinuités dans les actions et interactions que les étudiants peuvent rencontrer dans un FacLab en raison de cette hybridité. Nous discutons ensuite de la manière dont les technologies numériques peuvent soutenir la continuité dite « phygitale » des activités.

3. De l'hybridite en education a la continuite phygitale en FacLab

3.1. De l'hybridite comme melange a l'hybridite comme fluide

L'hybridation en éducation constitue désormais un axe de recherche et de pratique en plein essor, intégrant divers contextes de formation. L'urgence éducative engendrée par la pandémie de COVID-19 a non seulement amplifié l'intérêt pour les modèles hybrides, mais a également élargi le champ d'investigation pour inclure des aspects souvent négligés, tels que la continuité pédagogique et les dimensions motivationnelles et émotionnelles de l'apprentissage (Molinari *et al*., 2022).

Eyal et Gil (2022) explorent la façon dont la notion d'hybridité en éducation a évolué au cours de ces deux dernières décennies. Les chercheuses identifient trois perspectives qui se sont successivement développées. La première (années 2000 ; *hybrid as blended*) considère l'hybridité comme un mélange, une combinaison de lieux d'apprentissage, qu'ils soient en ligne ou en présentiel. Dans cette perspective, les environnements physiques et numériques se combinent ou se substituent mutuellement. La visée est de déplacer des activités d'apprentissage vers des plateformes en ligne tout en réduisant, sans l'éliminer, le temps passé en classe. L'accent est mis sur la transformation technique des méthodes d'enseignement-apprentissage. La seconde perspective (*hybrid as a space of merging interactions*) est inspirée de la biologie, et voit l'hybridité comme une fusion d'éléments d'origines diverses pour créer quelque chose de nouveau et d'unique. Concomitante à l'évolution des technologies mobiles et des réseaux sociaux dans les années 2010, cette perspective renvoie à la mobilité constante des personnes, perpétuellement connectées à Internet et aux autres via leurs téléphones mobiles. Le physique et le numérique se fondent ainsi en un écosystème techno-social en constante évolution en raison de ce nomadisme. L'accent est mis sur la dimension sociale de l'apprentissage, et sur le fait que les barrières entre les interactions en face-à-face et celles médiatisées par ordinateur deviennent floues. La dernière perspective (années 2020 et au-delà ; *hybrid as fluid*) associe l'hybridité à la notion de fluidité et la positionne comme un vecteur créatif de transition entre les traditionnelles dichotomies telles que le formel versus l'informel ou l'usage de la technologie versus son absence. Dans cette

perspective, l'accent est mis sur l'autonomie des apprenants, leur motivation personnelle, et leur capacité à organiser eux-mêmes leur environnement personnel d'apprentissage (Felder, 2019) sans être contraints par des règles ou des normes scolaires ou académiques préétablies. L'apprentissage est ainsi perçu comme un processus continu et personnalisé, tout au long de la vie, sans limites fixes en termes de temps, d'espace ou de méthodes.

Ces deux dernières perspectives font écho à la façon dont le courant postnumérique (*post-digital*) aborde l'hybridation en éducation (Carvalho et Lamb, 2023). Apparu publiquement en 2000, ce courant se déploie à travers une grande variété de domaines tels que la philosophie, l'éducation et les arts. La recherche postnumérique vise à dépasser les binarismes et dualismes comme structures fondamentales. Elle prône une approche transdisciplinaire, et soutient l'indivisibilité du numérique avec de nombreux aspects de la vie contemporaine. Dans cette optique, le terme « numérique » cède la place à « postnumérique » pour qualifier quelque chose de « difficile à définir ; désordonné ; imprévisible ; numérique et analogique ; technologique et non-technologique ; biologique et informationnel » (Jandric´ *et al*., 2018). Le courant postnumérique envisage les technologies numériques comme faisant partie d'un « enchevêtrement » (*entanglement*) d'éléments humains et non-humains interconnectés, qui s'influencent mutuellement (Fawns, 2022). Cette vision met en lumière la nature politique de la technologie qui, loin d'être « neutre », reflète les hypothèses et visions du monde de ses concepteurs et s'inscrit dans des structures d'autorité et de pouvoir. Ainsi, les technologies numériques peuvent soit perpétuer et renforcer des inégalités existantes, soit servir d'outils d'émancipation. Par ailleurs, ce courant critique le discours dominant d'une approche instrumentaliste qui traite la technologie comme un moyen (par exemple, pour « amplifier l'humanité » comme le souhaite Altman au sujet de ChatGPT (Altman, 2023)), simplifiant à l'excès les relations complexes entre la technologie, ses utilisateurs et les contextes dans lesquels elles s'inscrivent. Cette façon de penser et d'appréhender les technologies peut trouver écho dans le paradigme constructiviste de la modélisation systémique de la complexité, tel que décrit par Trestini (2019) dans le cadre des environnements numériques d'apprentissage.

Plusieurs chercheurs ont proposé des définitions variées de l'enseignement hybride, et Paquelin et Lachapelle-Bégin (2022) en recensent plus d'une vingtaine. Dans la littérature francophone, la définition de Charlier *et al*. (2006) est souvent citée ; elle met le focus sur la mise à distance des activités d'apprentissage, s'alignant ainsi sur la perspective de l'hybridité en tant que mélange. Cependant, pour Paquelin et Lachapelle-Bégin (2022), l'hybridation transcende la simple alternance entre présence et distance. Précisons ici que nous parlons d'hybridation pour faire référence au processus de conception pédagogique qui consiste en la combinaison « cohérente et fertile » (p. 9) de multiples dimensions du processus d'enseignement-apprentissage, incluant l'espace, le temps, la dynamique sociale, les outils et ressources, la pédagogie, les objectifs et l'évaluation. L'hybridité est le résultat ou l'état de cette combinaison, ce qui est le cas lorsque : les activités d'enseignement-apprentissage ont lieu dans des espaces physique (e.g., une salle de cours) et numérique (e.g., une plateforme d'apprentissage), académique (e.g, une université) et non-académique (e.g., un FabLab) ; elles sont réalisées en synchrone et en asynchrone ; en individuel et en groupe ; en autonomie et sous la supervision d'un enseignant ; elles font intervenir non seulement des enseignants mais aussi des personnes externes, qu'elles mêlent des élèves de différentes classes, de différents niveaux ; elles s'appuient sur une multitude de ressources dans plusieurs formats médiatisés (e.g., textes, vidéos, jeux) et sollicitent une variété d'outils remplissant différentes fonctions (e.g., information, collaboration, production) ; elles visent l'acquisition de connaissances (e.g., cours) et la mise en application des compétences (e.g., projets collaboratifs) ; elles sont associées à des types (e.g., diagnostique, formative, sommative) et des méthodes d'évaluation (e.g., questionnaires, productions, évaluation par les pairs) diversifiés.

Dans ce contexte complexe, les technologies numériques peuvent jouer un rôle déterminant en élargissant l'éventail des possibilités de métissage entre ces différentes dimensions.

3.2. L'ECOTONE : UNE METAPHORE POUR PENSER AUTREMENT L'HYBRIDITE EN EDUCATION

L'hybridation en éducation donne naissance à quelque chose de nouveau et encore difficilement identifiable. La métaphore de l'écotone, issue de la biologie et de l'écologie, offre un cadre utile pour comprendre ce « nouveau » qui émerge des dispositifs hybrides d'enseignement-apprentissage. Ces écotones, en tant que zones de transition, englobent des dimensions affectives, conceptuelles, spatiales et matérielles, caractérisées par des tensions et des contradictions qui coexistent dans la pratique (Ryberg *et al*., 2021). Ils permettent de dépasser les dichotomies traditionnelles, comme le numérique versus l'analogique, et de mettre en lumière la coexistence et la juxtaposition des éléments physiques et numériques, tout en intégrant les notions de chevauchement, de gradient et de fluidité. Pour mieux comprendre comment ces dynamiques se traduisent dans les environnements éducatifs, il est utile de revenir à la définition biologique de l'écotone et aux caractéristiques qui en font un cadre pertinent pour analyser l'apprentissage hybride.

L'écotone désigne une zone de transition, plus ou moins étendue, permettant le contact entre deux écosystèmes distincts. Par exemple, l'écotone entre une forêt et un sommet de montagne inclut des broussailles puis des pâturages (voir Figure 1). Au sein de cette zone frontière, une interaction dynamique se produit, impliquant les organismes, les matériaux, l'énergie, et le flux d'informations entre les écosystèmes adjacents. Ces interactions dynamiques catalysent la formation de nouvelles niches écologiques et contribuent à une augmentation significative de la biodiversité (Svenkerud *et al*., 2020). Ainsi, l'écotone se distingue par une diversité spécifique supérieure à celle des écosystèmes qu'il sépare.



Figure 1 : De l'écotone forêt-montagne à l'écotone présence-distance

Il n'est pas rare que les recherches en sciences de l'éducation mobilisent des concepts écologiques, en particulier lorsqu'il s'agit de saisir un phénomène de manière globale et contextuelle. Cette démarche permet de faire contrepoids à des perspectives causales et réductionnistes (Svenkerud *et al*., 2020). Le concept de frontières, proche de celui d'écotone, est notamment sollicité pour rendre compte des différences socioculturelles entre communautés de pratique. Pour illustrer ce concept, Akkerman et Bakker (2011) donnent l'exemple des enseignants stagiaires qui doivent composer avec les divergences en termes de valeurs pédagogiques pouvant exister entre le programme de formation auquel ils sont soumis en tant qu'apprenants, et les écoles dans lesquelles ils enseignent. Ces différences peuvent créer des discontinuités en termes d'action et d'interaction. Pour Engeström *et al*. (1995), ces frontières constituent autant d'opportunités à apprendre, car elles mettent les individus au défi de les « franchir » (boundary crossing), en négociant et combinant « *des éléments issus de contextes différents pour parvenir à des situations hybrides* » (p. 319). Non seulement les

individus, mais aussi les objets peuvent jouer un rôle essentiel dans le franchissement de frontières. Les objets frontières sont des artefacts qui remplissent une fonction de liaison. Ils permettent une continuité des actions et interactions entre deux contextes en offrant une structure commune, adaptable aux besoins locaux, tout en maintenant une identité partagée. Par exemple, les portfolios des enseignants stagiaires servent de moyens par lesquels leurs mentors et superviseurs académiques peuvent conjointement suivre et évaluer la progression de leurs apprentissages (Akkerman et Bakker, 2011).

Dans le contexte de l'hybridité en éducation, Ryberg *et al*. (2018) utilisent la notion d'écotone pour rendre compte de l'interaction complexe entre le physique et le numérique à travers deux exemples tirés d'une recherche sur l'apprentissage par problèmes chez des étudiants en architecture et design. Le premier exemple montre comment des ressources numériques peuvent être matérialisées dans un espace physique de travail : des croquis dessinés à la main côtoient des impressions de dessins informatiques et des images issues de Pinterest. Dans le second exemple, un groupe d'étudiants discute de la conception d'un immeuble de bureaux, et alterne entre l'utilisation de modèles en polystyrène, de croquis sur iPad, et de modèles 3D sur ordinateur. Dans ces deux exemples, les artefacts comme l'activité sont composites (*digitanalog*). Les étudiants naviguent continuellement entre le travail analogique et le travail numérique. Comme le « franchissement de frontières » décrit par Engeström *et al*. (1995) dans les situations de polycontextualité, ce va-et-vient, que nous pourrions également qualifier de « nomadisme » (Rossitto et Eklundh, 2007), peut représenter une source de potentialités et permettre aux étudiants de développer de nouvelles compétences. En contrepartie, il peut également engendrer des tensions liées aux discontinuités qu'il introduit. Par exemple, dans le contexte des études en architecture et design, un tel aller-retour entre le physique et le numérique peut être associé à des tensions identitaires auxquelles les étudiants sont confrontés, tiraillés entre l'approche artistique de l'architecte et l'approche scientifique de l'ingénieur.

Tout comme Ryberg *et al*. (2018), nous proposons la notion d'écotone comme une nouvelle perspective pour analyser et enrichir notre compréhension des environnements d'apprentissage hybrides. Ce concept nous invite à questionner les maillages particuliers formés par l'interconnexion des différentes dimensions d'hybridité mobilisées dans l'environnement (physique/numérique, en ligne/hors-ligne, synchrone/asynchrone, individu/collectif, formel/informel, université/monde du travail, processus/produit, etc.), leurs caractéristiques spatiales, matérielles, physiques mais également pédagogiques et psychologiques, ainsi que les discontinuités qu'ils peuvent introduire. Il s'agit ainsi de mieux comprendre ce que ces maillages peuvent produire en termes d'activité, comment ils sont vécus par les apprenants et les enseignants, ou encore ce qui peut faire « passerelle » entre les différents contextes au sein desquels les étudiants apprennent. Par exemple, nous pouvons envisager l'écotone présence/distance (Figure 1) comme les éléments pédagogiques que l'enseignant mobilise dans un cours en présence pour préparer les étudiants au travail autonome pendant la période à distance. Il peut également inclure les éléments de l'expérience cognitive, émotionnelle et sociale que les étudiants ont eu de ce cours (la compréhension qu'ils ont eu des concepts abordés, les émotions qu'ils ont ressenties, les échanges qu'ils ont pu avoir avec leurs enseignant(s) et pairs, etc.) et qu'ils réactivent en mémoire lorsqu'ils se mettent à travailler à la maison. Enfin, l'écotone peut contenir des traces plus « objectives » de ce qui s'est passé en présence, comme les productions d'apprenants réalisées en groupe, qui doivent faire l'objet de modifications pendant une période de travail individuel asynchrone ultérieure.

Dans l'approche dispositionnelle - au sens de Foucault cité par Raffnsøe (2008), la notion d'écotone peut faire sens puisqu'elle réfère à une entité relationnelle hétérogène et dynamique qui peut devenir un « *intermédiaire pour d'autres dispositifs* » (p. 16). Cependant,

cette perspective ne saisit pas pleinement l'essence de l'hybridité en éducation telle que nous la concevons. En effet, contrairement aux dispositifs qui, par définition, visent à imposer une manière d'agir en « disciplinant » les relations et les comportements pour atteindre des objectifs précis, l'écotone nous permet d'envisager les environnements d'apprentissage hybrides comme des entités qui « émergent » telle une « matière vivante » (Raffnsøe, 2008) (p. 88) et qui peuvent être le lieu de nouvelles formes d'apprentissage et de relations entre les apprenants et les enseignants. Les recherches inscrites dans une perspective dispositionnelle visent régulièrement à construire une typologie des dispositifs hybrides de formation (Peltier et Séguin, 2021). Bien que ces recherches aient principalement une visée compréhensive, une telle typologie peut involontairement induire un cadre normatif pour les actions et interactions (Borruat *et al*., 2012). Notre perspective d'analyse se distingue d'une telle approche puisqu'il s'agit de mieux saisir l'émergence, la complexité et la richesse des interactions dans les environnements hybrides. Cela implique le développement d'un cadre méthodologique spécifique capable de saisir pleinement ces dynamiques.

3.3. Discontinuite phygitale dans les activites collaboratives en FacLab

Comme précédemment évoqué, le FacLab constitue un environnement d'apprentissage hybride, organisé autour de plusieurs axes de discontinuité, notamment ceux qui séparent le physique et le numérique, le tangible et l'intangible, l'individuel et le collectif, le formel et l'informel ainsi que la présence et la distance. Les activités au sein du FacLab naviguent continuellement entre ces différentes dimensions. Le terme « phygital » est utilisé pour qualifier l'ensemble de ces discontinuités. Ce néologisme, fusion des mots « physique » et « digital », a été proposé par Paquelin et Tendeng (2020) pour exprimer le double ancrage socio-spatial de l'apprentissage, à la fois physique et numérique. De cette double spatialité découle la possibilité de varier les modalités temporelles de l'activité, cette dernière pouvant avoir lieu en temps réel (synchrone) ou en différé (asynchrone). Ainsi, la phygitalité englobe à la fois les espaces et les temps, et réfère à la diversité des configurations spatio-temporelles dans lesquelles les activités d'apprentissage peuvent se réaliser.

Différents types de discontinuité phygitale sont présents dans les activités de fabrication numérique qui amènent les étudiants à créer des versions aussi bien physiques (tangibles) que numériques (intangibles) d'un objet donné. Ces discontinuités peuvent se manifester lorsque les activités se déroulent à la fois dans un espace physique et dans un espace virtuel. Cela peut être le cas lorsqu'une partie des étudiants travaille à modéliser des objets intangibles dans un ou plusieurs environnements numériques, tandis que l'autre partie est responsable de la production de leur version matérielle tangible. C'est également le cas en situation de collaboration hybride synchrone (ou co-modalité) lorsque certains membres du groupe travaillent au sein du FacLab, tandis que d'autres participent à distance. Par ailleurs, la nature à long-terme de certains projets nécessite une alternance entre présence et distance, obligeant les étudiants à poursuivre leurs travaux en dehors du FacLab. Cela peut les amener à diviser les tâches pour un travail individuel asynchrone à distance, ou à planifier des sessions de travail collaboratif synchrones, que ce soit à distance ou dans un autre lieu physique que le FacLab.

À notre connaissance, peu de recherches documentent le vécu des discontinuités phygitales dans des environnements d'apprentissage collaboratif comme les FacLabs (Rossitto *et al*., 2014 ; Ryberg *et al*., 2018). Plusieurs questions se posent néanmoins qui concernent les différentes configurations de discontinuité auxquelles les étudiants peuvent être confrontés, et la manière dont ces configurations affectent différemment le travail de groupe et l'apprentissage. Ryberg *et al*. (2018) et Rossitto *et al*. (2014) décrivent les pratiques que les étudiants

mettent en place pour combler les discontinuités dans des environnements d'apprentissage collaboratif hybrides. Ces pratiques sont comparées à des écotones (Ryberg *et al*., 2021), dont les dimensions sont non seulement spatio-temporelles et matérielles mais également cognitives et affectives, ces enchevêtrements complexes d'espaces, de temps, d'activités et de technologies créant des « façons de penser et d'être ensemble » (*togetherness*) multiples et différentes. Ces travaux nous invitent à comprendre comment favoriser et soutenir l'émergence d'écotones qui permettent la continuité phygitale des activités de collaboration.

La collaboration au sein des Faclabs est orientée objets (Paavola et Hakkarainen, 2021) : elle se concentre sur la construction et l'invention d'artefacts épistémiques, culturels et matériels, tels que des concepts, pratiques, projets, modèles, documents et autres objets physiques. L'apprentissage dans ce type de collaboration est qualifié de « trialogique » (Paavola *et al*., 2011) : l'accent n'est pas mis uniquement sur les apprenants, ni sur les interactions sociales entre les apprenants, mais également sur les objets élaborés en commun. Ces artefacts ont la particularité de connaître plusieurs versions intermédiaires : ils évoluent dans le temps selon un processus itératif de conception, et à travers l'interaction et la contribution de chaque membre du groupe. L'apprentissage collaboratif par la fabrication implique la participation à différents modes d'invention, tels que la génération de questions, l'élaboration d'hypothèses de travail, la résolution de problèmes complexes, la formulation et le développement d'idées innovantes, l'esquisse, le prototypage et la fabrication.

Nous supposons que les discontinuités phygitales posent un défi à la fluidité et la continuité des activités de collaboration orientée objets. Une collaboration « fluide » sous-entend une dynamique d'interaction où les membres d'un groupe travaillent comme un « ensemble », et arrivent à se coordonner, anticiper et compléter les actions des autres sans recourir constamment à des échanges verbaux (Ruvalcaba et Rogoff, 2022). Par ailleurs, il y a continuité lorsque les actions sont centrées sur la production des artefacts, que le travail individuel est articulé au travail collectif, que le suivi de l'évolution des artefacts en cours de développement est régulier, et que la réflexivité accompagne chaque étape de création (Paavola *et al*., 2011).

Il est fort probable que les discontinuités phygitales dans les FacLabs engendrent des conflits, et ce à différents niveaux. Par exemple, des tensions peuvent émerger lorsque le retard dans l'exécution des tâches individuelles compromet la progression du projet. La difficulté à établir des horaires de travail communs et à coordonner les actions en raison de la multiplication des espaces numériques et physiques peut également susciter des conflits. En situation de co-modalité, les membres participant en ligne peuvent être frustrés de ne pouvoir contribuer qu'à la conception des objets intangibles. Ils peuvent également se percevoir comme moins impliqués ou être perçus comme tels par les personnes présentes physiquement dans le FacLab, renforçant ainsi la perception d'une inégalité de participation (Guillon et Molinari, 2023). En outre, le partage des machines exige fréquemment des compromis entre différents groupes, ce qui peut aussi générer des tensions.

Dans ce contexte, une perspective de recherche intéressante serait de comprendre comment réduire ces différentes discontinuités, notamment à travers la conception de technologies qui joueraient le rôle de passerelles entre les dimensions d'hybridité et favoriseraient la continuité « phygitale » des actions et interactions. L'observation des stratégies élaborées par les étudiants pour surmonter les défis liés aux discontinuités pourrait informer la conception de ces technologies-passerelles. La section suivante est une projection sur les technologies qui pourraient assurer cette continuité.

4. PHYGITALITE ET TECHNOLOGIES

4.1. LE CONTEXTE DES FACLABS

Il est important de souligner que certaines dimensions d'hybridité comme l'organisation verticale/horizontale, l'enseignement académique/non académique et l'apprentissage formel/informel, sont intrinsèques au fonctionnement du FacLab, et ne nécessitent pas forcément un support technologique dédié. Par ailleurs, le FacLab peut être lui-même conceptualisé comme un FabLab enrichi par un écotone qui le relie à l'université. En revanche, les dimensions pouvant faire l'objet d'un support technologique spécifique pour faire passerelle incluent le tangible/l'intangible, le groupe/l'individuel, le physique/le numérique, la présence/la distance.

Ceci précisé, les FabLabs et, dans leur continuité, les FacLabs, sont des espaces qui utilisent déjà largement les technologies. Celles-ci fournissent indéniablement des passerelles entre certaines dimensions d'hybridité. Par exemple, une imprimante 3D permet de créer une version tangible d'un objet à partir d'une version numérique. Inversement, une caméra de profondeur permet de produire une version numérique d'un objet physique. En introduisant la dimension présence/distance, la difficulté d'assurer la continuité augmente : par exemple, comment permettre l'accès à une version tangible d'un objet imprimé en 3D à des participants qui se trouvent à distance ? Ces participants pourraient imprimer leur propre version de l'objet, mais seulement s'ils ont une imprimante 3D à leur disposition. En outre, l'accès à cette instance tangible dépend fortement du contexte et n'a de sens que s'il permet la réalisation de l'activité en cours. En l'occurrence, imprimer un objet est coûteux en temps et en ressources, et ces contraintes doivent être prises en compte. Il peut alors suffire de transmettre l'instance intangible, c'est-à-dire le modèle 3D qui a permis d'imprimer l'instance tangible, ou une vue vidéo de cette instance tangible. On voit que la richesse de l'hybridité tangible-intangible et des technologies qui la supportent peuvent permettre de répondre aux besoins d'autres dimensions d'hybridité, comme la distance-présence. On constate que la multiplicité des dimensions d'hybridité introduit la nécessité de gérer une forme de continuité entre elles, en plus de celle à gérer à l'intérieur de chaque dimension.

Dans la section 2, nous mettons en avant que le FacLab s'inscrit dans la continuité des principes fondateurs des FabLabs, notamment en ce qui concerne les dimensions du bricolage (Bouvier-Patron, 2021), du « Do it Yourself » (DiY) et, dans une certaine mesure, des approches low-tech et frugales (Corsini *et al*., 2021). Bien que les notions de low-tech et de frugalité puissent varier d'un FabLab à l'autre, il est généralement admis que ces espaces militent pour un usage raisonné et raisonnable des technologies. De plus, la majorité des FabLabs intègrent les principes de durabilité et de soutenabilité dans leurs pratiques de fabrication (Meyer, 2022). Parallèlement, il est important de rappeler que le FacLab se veut inclusif et vise à démocratiser l'accès à la fabrication numérique. Ainsi, il est impératif que l'environnement technologique soit accessible à un large public. Notre choix se posera donc aussi sur des technologies qui peuvent être déployées à des niveaux low-tech et qui pourront se « bricoler » avec les ressources d'un FacLab.

Nous verrons plus loin que nous nous basons sur les métaverses (Kshetri, 2022) pour répertorier les technologies qui pourraient être mobilisées pour assurer la continuité entre les différentes dimensions d'hybridité pertinentes dans notre contexte. Ce choix, qui fait la part belle à l'opulence technologique, pourrait apparaître en tension avec le contexte frugal et raisonné que nous avons précédemment établi. Il est important de clarifier ici que cette démarche a pour unique objectif de partir d'un spectre technologique aussi large que possible, afin de pouvoir ensuite le restreindre en fonction des contraintes et des besoins spécifiques de notre contexte. Les métaverses se présentent comme l'évolution ultime des environnements

numériques de collaboration et leurs objectifs, très ambitieux, impliquent une profusion de technologies nécessaires pour les atteindre.

4.2. Proposition d'un ecotone phygital pour les FacLabs

Nous parvenons ainsi à esquisser le concept d'un écotone phygital multi-niveaux, qui intègre les diverses dimensions d'hybridité évoquées précédemment et leurs interactions dynamiques dans le temps. Comme représenté dans les Figures 2 et 3, la combinaison des dimensions d'hybridité activées évoluent dynamiquement au cours du temps en fonction du contexte des différentes activités qui composent une tâche collaborative de fabrication à accomplir. Le contexte (groupe, physique, tangible) correspond principalement à l'espace physique du FacLab. À l'opposé, le contexte (individuel, numérique, intangible) correspond plutôt au contexte des interactions à distance. Cette distinction n'est pas stricte, car des interactions numériques et physiques peuvent avoir lieu conjointement dans le site du FacLab. Ce modèle d'écotone phygital vise à capturer la complexité et la fluidité des espaces et interactions dans un espace hybride d'apprentissage.

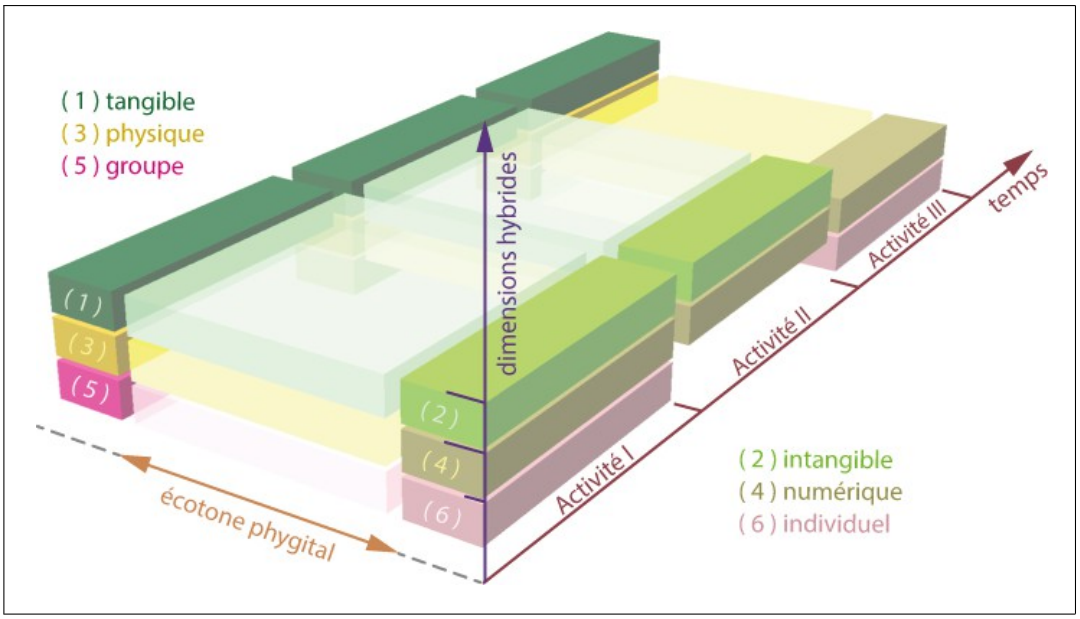


Figure 2 : L'écotone phygital, zones de transitions multi-niveaux entre différentes hybridités et espaces-temps

Dans le cadre d'une tâche collaborative, différentes activités se succèdent chronologiquement, chacune avec son propre contexte phygital, défini par les dimensions d'hybridité qui sont activées et qui nécessitent de maintenir la continuité à l'aide d'un écotone. Dans l'exemple de la tâche représentée dans la Figure 2, les trois dimensions d'hybridité sont activées pour la première activité. Cela signifie que l'activité implique à la fois des ressources et des productions tangibles et intangibles, des participants en groupe et d'autres en posture individuelle, ainsi que des interactions numériques et physiques. Dans ce cas, l'écotone doit garantir la continuité à travers ces trois niveaux d'hybridité. En revanche, pour la dernière activité, la dimension tangible/intangible n'est pas activée, car seules des ressources et productions intangibles sont en jeu. La continuité doit donc être assurée uniquement pour les dimensions de groupe/individuel et physique/numérique.

L'écotone phygital assume une double responsabilité : gérer les transitions entre les discontinuités inhérentes aux différentes dimensions de l'hybridité et coordonner ces dimen-

sions entre elles (voir Figure 3). Le processus d'impression 3D illustre bien cette dynamique, combinant des éléments tangibles et intangibles ainsi que des interactions physiques et numériques. Par ailleurs, la structure de l'écotone est dynamiquement modifiée lors du passage d'une activité à une autre (voir Figure 2). Par exemple, la transition d'une activité de groupe impliquant une impression 3D physique à une tâche individuelle nécessitant une modélisation numérique exige une gestion agile pour préserver une continuité fluide. Cette gestion repose sur la coordination des dimensions de l'hybridité, telles que le physique-numérique et le matériel-immatériel, afin de maintenir un flux de travail cohérent. Une telle approche est cruciale pour s'adapter à l'évolution des contextes et des exigences des activités, tout en garantissant une continuité temporelle au sein de l'écotone.

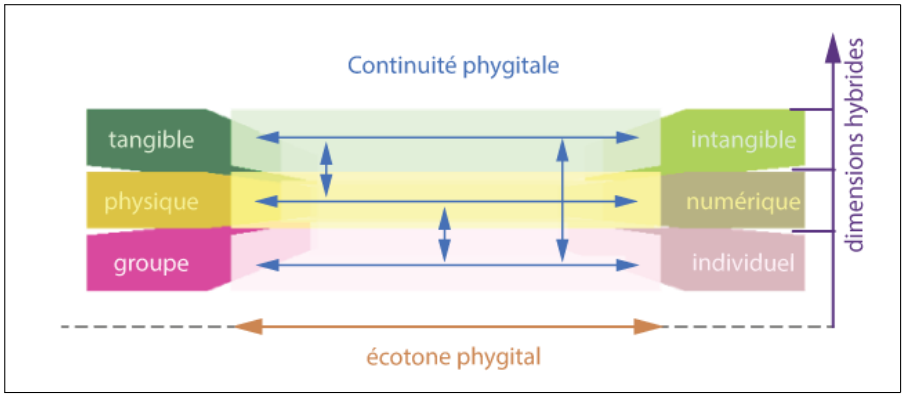


Figure 3 : L'écotone phygital, une continuité intra- et inter-dimensions

4.3. Quelles technologies pour assurer la continuite ?

Il est essentiel d'examiner de manière systématique comment les technologies peuvent agir comme passerelles pour assurer la continuité dans le contexte élargi des FacLabs à distance. Pour ce faire, nous suggérons de prendre comme point de départ les technologies déjà en usage dans les environnements virtuels collaboratifs (Correia *et al.*, 2016), y compris leur incarnation la plus récente : les métaverses (Kshetri, 2022). Un métavers peut être soit entièrement virtuel, comme dans le cas des dispositifs de réalité virtuelle (RV), soit partiellement virtuel, comme lorsque la réalité augmentée (RA) est intégrée dans des contextes réels. Hwang et Chien (2022) identifient trois caractéristiques clés des métaverses : partagées, persistantes et décentralisées. La caractéristique « partagées » met en avant l'importance de l'interaction sociale et de la collaboration. La caractéristique « persistante » indique que les actions, objets et événements ont une longévité qui dépasse les sessions individuelles. Enfin, la caractéristique « décentralisée » permet une propriété et un contrôle distribués, souvent sécurisés par des technologies telles que la blockchain.

Nous n'avançons pas l'idée selon laquelle les métaverses sont la solution numérique pour favoriser la continuité phygitale. Au contraire, nous les considérons comme un ensemble riche de technologies parmi lesquelles des solutions pertinentes peuvent être sélectionnées en fonction de nos objectifs spécifiques. En plus de leur diversité technologique, les métaverses offrent également un niveau élevé de sociabilisation entre les utilisateurs et une hyper-spatiotemporalité, créant un espace immersif qui transcende divers contextes temporels et spatiaux (Ning *et al.*, 2021). Ces caractéristiques sont en harmonie avec les ambitions de l'écotone phygital, en particulier en ce qui concerne la continuité relationnelle et spatio-temporelle dans les activités collaboratives de fabrication numérique.

Les métaverses opèrent souvent sous l'hypothèse que la profusion technologique et sa combinaison judicieuse peuvent pallier la discontinuité entre la présence physique et la distance, en visant une forme d'hyper-réalisme. Cependant, cette abondance technologique n'est pas toujours accessible, ni même nécessairement efficace pour atteindre cet objectif (Cheng *et al*., 2022 ; Cummings et Bailenson, 2016 ; van Gisbergen *et al*., 2019). Comme le soulignent Abich *et al*. (2021) et Yoon *et al*. (2019), une approche plus frugale et accessible serait de se concentrer uniquement sur les technologies qui comblent les lacunes spécifiques à notre contexte. Dans notre cas, cela signifie prioriser la continuité des différentes dimensions d'hybridité indispensables aux activités collaboratives de fabrication. Ainsi, notre démarche consiste à restreindre la palette de technologies utilisées et à privilégier celles qui peuvent être déployées de manière frugale. Les technologies retenues sont celles qui assurent une continuité entre les dimensions d'hybridité et qui, comme la Réalité Mixte, peuvent être adaptées à divers niveaux d'échelle et de ressources selon les besoins (Barba et MacIntyre, 2011).

Notre objectif est de mettre en correspondance les états et données provenant des objets et des participants présents dans le FacLab au format digital pour assurer la continuité de l'expérience utilisateur alors que les Métaverses tentent d'être un monde miroir virtuel d'un espace physique réel qui fournirait des sensations tangibles médiatisées et une immersion virtuelle en donnant un accès uniquement virtuel depuis n'importe quel lieu et en tout temps (K. Li *et al*., 2022). Ce qui nous amène bien à fournir un espace d'hyper-hybridité spatio-temporelle comme le suggère aussi les Métaverses mais, dont l'objectif serait d'augmenter l'expérience utilisateur à distance des participants autant en synchrone qu'en asynchrone, sans pour autant qu'il y ait la nécessité aux personnes en présence dans le FacLab de changer leur modalité de travail physique, ni de les forcer à accéder à un monde virtuel commun.

Il nous paraît donc nécessaire de répondre à l'hybridité en combinant plusieurs technologies remplissant les besoins du terrain exposé et qui correspondent à celles que l'on peut retrouver impliquées dans les Metaverses, telles que la 5G, la blockchain, l'*edge computing*, la RA, la RV, la reconstruction 3D, l'intelligence artificielle (IA), l'Internet des Objets (IoT) et l'Interaction Humain - Machine (IHM) (Al-Ghaili *et al*., 2022 ; Cheng *et al*., 2022). Parmi toutes ces technologies, un premier ensemble qui peut être écarté concerne celles qui assurent l'infrastructure de base et qui regroupe la 5G, la blockchain, l'edge computing et l'IA. Les autres se retrouvent effectivement à l'interface des discontinuités des dimensions d'hybridité de l'écotone phygital. Par exemple, la RA permet d'hybrider le tangible et l'intangible en superposant le réel et le virtuel. La RV et l'IHM sont des domaines larges qui recouvrent différentes technologies, qu'il nous semble nécessaire de réduire, toujours par souci de frugalité et de disponibilité. Nous proposons de retenir le feedback haptique pour la RV et les interfaces tangibles pour l'IHM. La première permet de traiter la dimension groupe/individu en suscitant l'awareness (Rodriguez *et al*., 2022) et la seconde la dimension physique/numérique en permettant des interactions physiques avec le numérique (Baldwin *et al*., 2019).

A ce stade de notre réflexion, nous sommes maintenant en mesure de proposer une première piste pour la conception d'un environnement numérique qui permettrait d'assurer la continuité phygitale. Le Tableau 1 présente ainsi un exemple de technologies qui pourraient être mobilisées pour assurer la continuité des différentes hybridités que nous ciblons.

La proposition faite ici permet de couvrir chaque dimension d'hybridité avec deux technologies qui peuvent ainsi se renforcer ou se compenser. Ces différentes technologies peuvent aussi se mobiliser à différents niveaux de moyens et de disponibilité. Par exemple pour la RA, qui peut se déployer avec un casque mais aussi avec un simple smartphone. De même, des interfaces tangibles peuvent se « bricoler » avec un Makey Makey (Collective et Shaw,

Tableau 1 : Exemples de technologies passerelles permettant d'assurer les transitions pour les différentes dimensions de discontinuités

	Physique/numérique	**Groupe/individuel**	**Tangible/intangible**
Réalité Augmentée	Permet d'augmenter le physique avec du numérique	Permet de combiner les points de vue individuels pour en faire une vue collective	
Interfaces tangibles			Permet de donner une représentation tangible à l'abstraction, l'imagination et la compréhension
Feedback tactile		Permet d'établir une compréhension mutuelle (*mutual awareness*) en communiquant aux membres du groupe y compris ceux à distance des informations de forme et de volume à partir de patterns tactiles (p.e. vibrations à la surface de la peau)	
Internet des Objets	Permet de « numériser le physique », de garder des traces numériques d'actions et d'évènements à l'aide de capteurs connectés		Permet de mesurer numériquement le tangible pour alimenter une représentation intangible

2012) . Il est important d'envisager un environnement qui puisse fonctionner dans différentes configurations, y compris des situations qui seraient technologiquement dégradées. En effet, à partir du moment où on introduit la distance, il n'est pas possible d'anticiper systématiquement la configuration matérielle des participants qui se trouvent dans ce contexte.

4.4. Le Scene Graph Phygital comme moteur de l'ecotone

Il nous semble essentiel d'accréditer la faisabilité technique de la continuité phygitale et de sa réalisation. Dans cette optique, il apparaît que l'élément principal ne réside pas tant dans les technologies utilisées que la capacité à collecter, tenir à jour et coordonner les traces numériques des différentes dimensions de discontinuités : tangible/intangible, distance/présence... Ceci de façon à permettre aux technologies mises en jeu de pouvoir mettre ses traces à jour et à les utiliser pour assurer la mise en oeuvre de l'écotone phygital. Dans cette optique, nous plaidons pour l'extension du Scene Graph (SG). Le SG est une structure de données largement utilisées dans les moteurs de jeux (Cheah et Ng, 2005), 3D (Agenjo *et al*., 2013) et de réalité mixte (Jung et Vitzthum, 2022 ; Tahara *et al*., 2020) et qui est une

composante inhérente aux métaverses (Armeni *et al*., 2019 ; Chang *et al*., 2023). Il permet de représenter l'organisation, la spatialisation et la sémantique d'un environnement virtuel. De nombreux travaux d'extension montrent qu'il est aussi en capacité de représenter des environnements réels (Bae *et al*., 2023 ; Wald *et al*., 2020) mais aussi des scénarios qui représentent des activités réalisées par des personnes dans un espace (C. Li *et al*., 2022). Par ailleurs, le SG est compatible avec les technologies identifiées précédemment. On pressent ainsi que le SG peut être étendu sous une forme que nous dénommerons SG Phygital (SGP), pour devenir le cœur de la continuité phygitale par sa capacité à maintenir des traces numériques des différentes dimensions de discontinuités et de les interconnecter pour permettre d'assurer la transition, l'écotone, en fonction du contexte de chaque intervenant.

Le SG est une structure de données arborescente qui sert à organiser et à annoter, tant spatialement que sémantiquement, les divers éléments constitutifs d'une scène virtuelle en 3D. Nous proposons d'étendre cette structure, selon une approche similaire à celle proposée par Li et al. avec le Story Graph (2022), pour y incorporer l'ensemble des éléments d'un projet réalisé au FacLab incluant les espaces physiques et virtuels, les productions tangibles et intangibles, ainsi que les participants et leurs activités (voir Figure 4). Le principe proposé dans le Story Graph peut être réutilisé pour conserver l'historique des activités au sein d'une tâche collaborative, ce qui est particulièrement utile pour gérer les phases asynchrones du projet.

Une généralisation du mécanisme des niveaux de Détails (NdD) (Heok et Daman, 2004) au sein du SGP est également envisageable. Les NdD sont un mécanisme d'optimisation qui associent plusieurs instances de représentations géométriques à un même objet. Ces instances représentent l'objet avec différents niveaux de détails de forme. En fonction de la position de la caméra virtuelle qui représente le point de vue de l'observateur de la scène, l'instance la plus optimisée entre détails et quantité de données est automatiquement déterminée et sélectionnée pour être affichée. Une extension de ce mécanisme permettrait de rassembler toutes les instances, tangibles et intangibles, d'un même objet et de choisir la meilleure instance à procurer à chaque participant lors d'une activité en fonction de son contexte. Par exemple, le résultat d'un objet imprimé en 3D pourrait être représenté par plusieurs instances évoluant au cours des activités de la tâche collaborative : une description textuelle ; un schéma papier ; un schéma numérique 2D, plusieurs versions de modèles 3D ; une impression 3D physique ; une vidéo de l'objet imprimé. Chaque instance représente l'objet à différents stades de l'avancée du projet. Lors d'une activité de groupe qui utilise l'objet, un-e participant-e présent-e pourra se voir proposer l'accès à l'instance imprimée en 3D alors qu'un-e participant-e à distance aura accès à l'instance du dernier modèle 3D ou à la vidéo de l'impression 3D. Le SGP permettra de conserver et de coordonner des traces temporelles, spatiales et d'activité, contribuant à aligner les différentes dimensions d'hybridité.

5. Conclusion et perspectives

Le FacLab, homologue académique du FabLab, est un environnement multi-hybride de co-création où les machines-outils et les technologies numériques s'associent pour permettre la modélisation et la production d'objets sous des formes à la fois tangibles et intangibles. Outre les dimensions physique/numérique, tangible/intangible, les dimensions présence/distance et synchrone/asynchrone entrent en jeu lorsque certains membres du groupe travaillent dans le FacLab tandis que d'autres sont à distance, ou lorsque les activités se prolongent et contraignent les membres à travailler seuls, ailleurs que dans le FacLab.

Dans cette rubrique, nous recourons à la métaphore de l'écotone pour rendre compte de la façon dont les différentes dimensions d'hybridité peuvent interagir de manière complexe

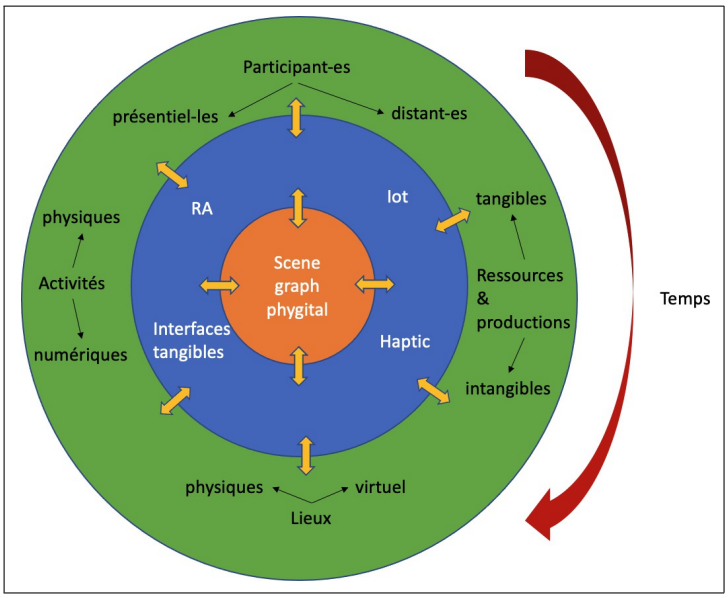


Figure 4 : Le SGP comme socle de l'écotone phygital des activités collaboratives de fabrication

et induire des discontinuités en termes d'actions et d'interactions. Cette métaphore nous invite à examiner les transitions entre ces dimensions d'hybridité, en observant notamment les stratégies spontanées ou délibérées que les apprenants mettent en place pour surmonter les défis associés à ces discontinuités. Un tel objectif de recherche soulève des questions méthodologiques et analytiques. L'étude de ce que nous appelons l'écotone phygital nécessite une collecte exhaustive de données multimodales. Cela inclut des données d'interaction, comme les enregistrements vidéo des sessions de groupe au FacLab et les communications en ligne, mais aussi des traces du travail individuel hors FacLab, telles que des grilles d'auto-observation et d'auto-évaluation. S'ajoutent à cela les différentes versions des objets créés voire des données physiologiques. Pour ce faire, Davidsen *et al*. (2023) recommandent de s'inspirer de l'approche ethnométhodologique, et proposent de développer des environnements de recherche qualitative immersifs, qu'ils qualifient de « scénographies interactionnelles et volumétriques », pour permettre d'étudier le travail interactionnel situé, multimodal et incarné des étudiants.

Du point de vue informatique, la notion d'écotone phygital nous guide vers l'identification et la conception de technologies-passerelles. Contrairement aux métaverses, qui aspirent à une hyper-réalité saturée de technologies, ces technologies-passerelles visent à faciliter les transitions entre les multiples discontinuités au sein des FacLabs. Elles ont le potentiel de maintenir une continuité dans les activités collaboratives et de fournir des opportunités créatives. Cela met en exergue l'importance de documenter et de comprendre à la fois les aspects continus et les dynamiques génératives de ces espaces de transition. Pour orchestrer ces technologies-passerelles, nous proposons l'implémentation d'un Scene-Graph Phygital (SGP). Cette démarche présente des défis techniques, notamment en ce qui concerne la robustesse de la mise à jour des données. À la différence des SG 3D traditionnels, qui sont purement numériques, le contexte phygital exige la collecte de données tangibles. Bien que des méthodes existent pour extraire ces données à partir de vidéos (Armeni *et al*., 2019), leur efficacité dans un contexte réel reste à valider. À ce stade, nous envisageons deux voies complémentaires : la première s'appuie sur l'Internet des Objets (IoT), utilisant des tags et des beacons (Tyagi *et al*., 2022), et la seconde sur l'intégration d'un tableau de bord de type

Kanban (Salinas-Navarro *et al*., 2023). Ce tableau, en partie directement alimenté par les annotations des utilisateurs, serait en communication constante avec le SGP, permettant un suivi intégré — spatial, temporel et sémantique — des activités collaboratives. Il servirait également de moyen de visualisation du SGP pour les participants.

Pour conclure, cette rubrique analyse les complexités et les potentialités des environnements d'apprentissage multi-hybrides, tels que les FacLabs. Elle est également une première proposition d'un cadre pour orienter la conception de technologies dont la visée est de favoriser la continuité de la collaboration au sein de ces environnements.

REFERENCES

Abich, J., Parker, J., Murphy, J. S., et Eudy, M. (2021). A review of the evidence for training effectiveness with virtual reality technology. *Virtual Reality*, *25*(4), 919-933. https://doi.org/10.1007/s10055-020-00498-8

Agenjo, J., Evans, A., et Blat, J. (2013). WebGLStudio : a pipeline for WebGL scene creation. *18th International Conference on 3D Web Technology*, 79-82. https://doi.org/10.1145/2466533.2466551

Akkerman, S. F., et Bakker, A. (2011). Boundary crossing and boundary objects. *Review of educational research*, *81*(2), 132-169. https://doi.org/10.3102/0034654311404435

Al-Ghaili, A. M., Kasim, H., Al-Hada, N. M., Hassan, Z. B., Othman, M., Tharik, J. H., Kasmani, R. M., et Shayea, I. (2022). A Review of Metaverse's Definitions, Architecture, Applications, Challenges, Issues, Solutions, and Future Trends. *IEEE Access*, *10*, 125835-125866. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3225638

Altman, S. (2023). *Planning for AGI and beyond*. Récupérée juillet 11, 2024, à partir de https://openai.com/index/planning-for-agi-and-beyond/

Angrisani, L., Arpaia, P., Bonavolonta, F., et Lo Moriello, R. S. (2018). Academic FabLabs for industry 4.0 : Experience at University of Naples Federico II. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, *21*(1), 6-13. https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8278802

Angrisani, L., Arpaia, P., Capaldo, G., Moccaldi, N., Salatino, P., et Ventre, G. (2018). Evolution of the academic FabLab at University of Naples Federico II [Publisher : IOP Publishing]. *Journal of Physics : Conference Series*, *1065*(2), 022013. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/2/022013

Archieri, C., et Jaouen, P.-Y. (2020). Configurations d'action de formation à l'épreuve de l'approche sociotechnique : étude de cas dans un FabLab. *Savoirs*, *52*(1), 31-50. https://doi.org/10.3917/savo.052.0031

Armeni, I., He, Z.-Y., Zamir, A., Gwak, J., Malik, J., Fischer, M., et Savarese, S. (2019). 3D Scene Graph : A Structure for Unified Semantics, 3D Space, and Camera. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 5663-5672. https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00576

Bae, J., Shin, D., Ko, K., Lee, J., et Kim, U.-H. (2023). A Survey on 3D Scene Graphs : Definition, Generation and Application. Dans J. Jo, H.-L. Choi, M. Helbig, H. Oh, J. Hwangbo, C.-H. Lee et B. Stantic (dir.), *Robot Intelligence Technology and Applications 7* (p. 136-147). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26889-2_13

Baldwin, M. S., Khurana, R., McIsaac, D., Sun, Y., Tran, T., Zhang, X., Fogarty, J., Hayes, G. R., et Mankoff, J. (2019). Tangible Interfaces. Dans Y. Yesilada et S. Harper (dir.), *Web Accessibility : A Foundation for Research* (p. 715-735). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7440-0_36

Barba, E., et MacIntyre, B. (2011). A scale model of mixed reality. *8th ACM conference on Creativity and cognition*, 117-126. https://doi.org/10.1145/2069618.2069640

Borruat, S., Burton, R., Charlier, B., Ciussi, M., Deschryver, N., Docq, F., Douzet, C., et Henri, F. (2012). Dispositifs hybrides, nouvelle perspective pour une pédagogie renouvelée de l'enseignement supérieur. *Deschryver, N. & Charlier, B., éditeurs : HY-SUP : Programme Education et formation tout au long de la vie, Genève. Université de Genève*, *16*. https://doi.org/10.23709/sticef.30.2

Bouvier-Patron, P. (2021, janvier). Bricolage et Improvisation, deux clefs fondamentales de la création innovante. https://doi.org/10.1002/9781119832522.ch6

Carvalho, L., et Lamb, J. (2023). Postdigital Learning Spaces. Dans P. Jandric´ (dir.), *Encyclopedia of Postdigital Science and Education* (p. 1-5). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35469-4_13-1

Chang, X., Ren, P., Xu, P., Li, Z., Chen, X., et Hauptmann, A. (2023). A Comprehensive Survey of Scene Graphs : Generation and Application. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *45*(1), 1-26. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3137605

Charlier, B., Deschryver, N., et Peraya, D. (2006). Apprendre en présence et à distance : une définition des dispositifs hybrides. *Distances et savoirs*, *4*(4), 469-496. https://doi.org/10.3166/ds.4.469-496

Cheah, T., et Ng, K.-W. (2005). A practical implementation of a 3D game engine. *International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV'05)*, 351-358. https://doi.org/10.1109/CGIV.2005.9

Cheng, R., Wu, N., Chen, S., et Han, B. (2022). Will Metaverse Be NextG Internet ? Vision, Hype, and Reality. *IEEE Network*, *36*(5), 197-204. https://doi.org/10.1109/MNET.117.2200055

Collective, B. M., et Shaw, D. (2012). Makey Makey : improvising tangible and nature-based user interfaces. *6th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, 367-370. https://doi.org/10.1145/2148131.2148219

Correia, A., Fonseca, B., Paredes, H., Martins, P., et Morgado, L. (2016). Computer-Simulated 3D Virtual Environments in Collaborative Learning and Training : Meta-Review, Refinement, and Roadmap. Dans Y. Sivan (dir.), *Handbook on 3D3C Platforms : Applications and Tools for Three Dimensional Systems for Community, Creation and Commerce* (p. 403-440). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22041-3_15

Corsini, L., Dammicco, V., et Moultrie, J. (2021). Frugal innovation in a crisis : the digital fabrication maker response to COVID-19. *R&D Management*, *51*(2), 195-210. https://doi.org/10.1111/radm.12446

Cummings, J. J., et Bailenson, J. N. (2016). How Immersive Is Enough ? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. *Media Psychology*, *19*(2), 272-309. https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740

Davidsen, J., McIlvenny, P., et Ryberg, T. (2023). Researching Interactional and Volumetric Scenographies – Immersive Qualitative Digital Research. Dans P. Jandrić, A. MacKenzie et J. Knox (dir.), *Constructing Postdigital Research : Method and Emancipation* (p. 119-136). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35411-3_7

Engeström, Y., Engeström, R., et Kärkkäinen, M. (1995). Polycontextuality and boundary crossing in expert cognition : Learning and problem solving in complex work activities. *Learning and instruction*. https://doi.org/10.1016/0959-4752(95)00021-6

Eyal, L., et Gil, E. (2022). Hybrid Learning Spaces — A Three-Fold Evolving Perspective. Dans E. Gil, Y. Mor, Y. Dimitriadis et C. Köppe (dir.), *Hybrid Learning Spaces* (p. 11-23). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88520-5_2

Fawns, T. (2022). An entangled pedagogy : Looking beyond the pedagogy—technology dichotomy. *Postdigital Science and Education*, *4*(3), 711-728. https://doi.org/10.1007/s42438-022-00302-7

Felder, J. (2019). Méthode d'analyse et de modélisation des environnements personnels d'apprentissage. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation*, *26*(1), 9-37. https://doi.org/10.23709/sticef.26.1.2

Galan, J.-M., et Musiani, F. (2019). Créer un fablab à l'université : enjeux humains et institutionnels. *Sociologies pratiques*, *38*(1), 35-48. https://doi.org/10.3917/sopr.038.0035

Guillon, M., et Molinari, G. (2023). A Group Awareness Tool for Self-Assessment and Visualization of Participation : Its Effect on the Regulation of Unequal Participation. *Proceedings of the 16th International Conference on Computer-Supported Collaborative Learning (CSCL 2023)*, 35-42. https://doi.org/10.22318/cscl2023.719530

Heok, T. K., et Daman, D. (2004). A review on level of detail. *International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV 2004)*, 70-75. https://doi.org/10.1109/CGIV.2004.1323963

Hwang, G.-J., et Chien, S.-Y. (2022). Definition, roles, and potential research issues of the metaverse in education : An artificial intelligence perspective. *Computers and Education : Artificial Intelligence*, *3*, 100082. https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100082

Jandrić, P., Knox, J., Besley, T., Ryberg, T., Suoranta, J., et Hayes, S. (2018). Postdigital science and education. https://doi.org/10.1080/00131857.2018.1454000

Jung, B., et Vitzthum, A. (2022). Virtual Worlds. Dans R. Doerner, W. Broll, P. Grimm et B. Jung (dir.), *Virtual and Augmented Reality (VR/AR) : Foundations and Methods of Extended Realities (XR)* (p. 71-106). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79062-2_3

Kostakis, V., Niaros, V., et Giotitsas, C. (2015). Production and governance in hackerspaces : A manifestation of Commons-based peer production in the physical realm ? *International Journal of Cultural Studies*, *18*(5), 555-573. https://doi.org/10.1177/1367877913519310

Kshetri, N. (2022). A Typology of Metaverses. *Computer*, *55*(12), 150-155. https://doi.org/10.1109/MC.2022.3204978

Lhoste, E., et Barbier, M. (2015). Fablabs : the institutionnalisation of third-places of « soft hacking ». https://doi.org/doi.org/10.3917/rac.030.0043

Li, C., Li, W., Huang, H., et Yu, L.-F. (2022). Interactive augmented reality storytelling guided by scene semantics. *ACM Trans. Graph.*, *41*(4). https://doi.org/10.1145/3528223.3530061

Li, K., Cui, Y., Li, W., Lv, T., Yuan, X., Li, S., Ni, W., Simsek, M., et Dressler, F. (2022). When Internet of Things meets Metaverse : Convergence of Physical and Cyber Worlds. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2208.13501

Lorenzo, C. (2017). Digital Fabrication as a Tool for Teaching High-School Students STEM at the University. *Proceedings of the 2017 Conference on Interaction Design and Children*, 549-554. https://doi.org/10.1145/3078072.3084323

Mersand, S. (2021). The state of makerspace research : A review of the literature. *TechTrends*, *65*(2), 174-186. https://doi.org/10.1007/s11528-020-00566-5

Meyer, M. (2022). Expérimenter et rendre désirables les low tech. Une pragmatique de la documentation. *Réseaux*, *235*(5), 219-249. https://doi.org/10.3917/res.235.0219

Molinari, G., Raes, A., Zeng, L., Bridges, S., Mentzer, N., Farrington, S. W., Koehler, A., Mohandas, L., Aamir, A., Claypool, M., *et al*. (2022). How to promote optimal individual and collaborative learning in remote and hybrid environments ? A focus on motivational and emotional factors. *Proceedings of the 15th International Conference on Computer-Supported Collaborative Learning (CSCL 2022), pp. 501-508*. https://doi.org/10.22318/cscl2022.501

Morin, J.-H., et Moccozet, L. (2021). Build to think, build to learn : What can fabrication and creativity bring to rethink (higher) education ? *ITM Web of Conferences*, *38*, 02004. https://doi.org/10.1051/itmconf/20213802004

Ning, H., Wang, H., Lin, Y., Wang, W., Dhelim, S., Farha, F., Ding, J., et Daneshmand, M. (2021). A Survey on Metaverse : the State-of-the-art, Technologies, Applications, and Challenges. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2111.09673

Nørgård, R. T., et Hilli, C. (2022). Hyper-Hybrid Learning Spaces in Higher Education. Dans E. Gil, Y. Mor, Y. Dimitriadis et C. Köppe (dir.), *Hybrid Learning Spaces* (p. 25-41). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-88520-5_3

Paavola, S., et Hakkarainen, K. (2021). Trialogical learning and object-oriented collaboration. *International handbook of computer-supported collaborative learning*, 241-259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65291-3_13

Paavola, S., Lakkala, M., Muukkonen, H., Kosonen, K., et Karlgren, K. (2011). The roles and uses of design principles for developing the trialogical approach on learning. *Research in Learning Technology*, *19*(3). https://doi.org/10.3402/rlt.v19i3.17112

Paquelin, D., et Lachapelle-Bégin, L. (2022). *Hybridation : principes et repères* [thèse de doct., Université Laval (Québec, Canada)]. https://hal.science/hal-03718900

Paquelin, D., et Tendeng, M. L. (2020). Des dispositifs aux environnements personnels d'apprentissage de proximité (EPAP) : proposition de formalisation d'un objet de recherche. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire*, *17*(3), 70-85. https://doi.org/10.18162/ritpu-2020-v17n3-10

Peltier, C., et Séguin, C. (2021). Hybridation et dispositifs hybrides de formation dans l'enseignement supérieur : revue de la littérature 2012-2020. *Distances et médiations des savoirs*, (35). https://doi.org/10.4000/dms.6414

Pernia-Espinoza, A., Sodupe-Ortega, E., Pecina-Marqueta, S., Martinez-Banares, S., Sanz Garcia, A., et Blanco-Fernandez, J. (2017). Makerspaces in Higher Education : the UR-Maker experience at the University of La Rioja, 758-765. https://doi.org/10.4995/HEAd17.2017.5400

Pitkänen, K., et Andersen, H. V. (2018). Empowering Teachers and New Generations through Design Thinking and Digital Fabrication Learning Activities. *Conference on Creativity and Making in Education*, 55-63. https://doi.org/10.1145/3213818.3213826

Plattner, H., Meinel, C., et Leifer, L. (dir.). (2013, janvier). *Design Thinking : Understand – Improve – Apply* (2011th edition). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13757-0

Raffnsøe, S. (2008). Qu'est-ce qu'un dispositif ? : L'analytique sociale de Michel Foucault. *Symposium*, *12*(1), 44-66. https://doi.org/10.5840/symposium20081214

Rodriguez, A., Bibbo, L. M., Collazos, C., et Fernandez, A. (2022). An Approach to Model Haptic Awareness in Groupware Systems. Dans V. Agredo-Delgado, P. H. Ruiz et O. Correa-Madrigal (dir.), *8th Iberoamerican Workshop on Human-Computer Interaction (HCI-COLLAB 2022)* (p. 1-14). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24709-5_1

Rossitto, C., Bogdan, C., et Severinson-Eklundh, K. (2014). Understanding constellations of technologies in use in a collaborative nomadic setting. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, *23*, 137-161. https://doi.org/10.1007/s10606-013-9196-4

Rossitto, C., et Eklundh, K. S. (2007). Managing work at several places : a case of project work in a nomadic group of students. *Proceedings of the 14th European conference on Cognitive ergonomics : invent ! explore !*, 45-51. https://doi.org/10.1145/1362550.1362562

Ruvalcaba, O., et Rogoff, B. (2022). Children's fluid collaboration versus managing individual agendas : Cultural differences in pair programming. *Journal of Applied Developmental Psychology*, *81*, 101438. https://doi.org/10.1016/j.appdev.2022.101438

Ryberg, T., Davidsen, J., Bernhard, J., et Larsen, M. C. (2021). Ecotones : a conceptual contribution to postdigital thinking. *Postdigital Science and Education*, *3*, 407-424. https://doi.org/10.1007/s42438-020-00213-5DIVAPortal+7

Ryberg, T., Davidsen, J., et Hodgson, V. (2018). Understanding nomadic collaborative learning groups. *British Journal of Educational Technology*, *49*(2), 235-247. https://doi.org/10.1111/bjet.12584

Salinas-Navarro, D. E., Garay-Rondero, C. L., et Arana-Solares, I. A. (2023). Digitally Enabled Experiential Learning Spaces for Engineering Education 4.0. *Education Sciences*, *13*(1), 63. https://doi.org/10.3390/educsci13010063

Secundo, G., Rippa, P., et Cerchione, R. (2020). Digital Academic Entrepreneurship : A structured literature review and avenue for a research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, *157*, 120118. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120118

Smith, R. C., Iversen, O. S., et Hjorth, M. (2015). Design thinking for digital fabrication in education. *International Journal of Child-Computer Interaction*, *5*, 20-28. https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2015.10.002

Stickel, O., Stilz, M., Brocker, A., Borchers, J., et Pipek, V. (2019). Fab :UNIverse - Makerspaces, Fab Labs and Lab Managers in Academia. *Proceedings of the FabLearn Europe 2019 Conference*, 1-2. https://doi.org/10.1145/3335055.3335074

Svenkerud, S. W., Madsen, J., Ballangrud, B. B., Strande, A.-L., et Stenshorne, E. (2020). Sustainable use of ecological concepts in educational science. *Discourse and Communication for Sustainable Education*, *11*(1), 153-162. https://doi.org/10.2478/dcse-2020-0013

Tahara, T., Seno, T., Narita, G., et Ishikawa, T. (2020). Retargetable AR : Context-aware Augmented Reality in Indoor Scenes based on 3D Scene Graph. *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 249-255. https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct51615.2020.00072

Trestini, M. (2019). L'Environnement Numérique d'Apprentissage inscrit dans le paradigme de la modélisation systémique de la complexité. *Information, organisation, connaissances*, *2*(1). https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2019.0381

Tyagi, N., Singh, J., et Singh, S. (2022). Review of Indoor Positioning System : Technologies and Applications. *2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI)*, 723-728. https://doi.org/10.1109/ICDABI56818.2022.10041504

van Gisbergen, M., Kovacs, M., Campos, F., van der Heeft, M., et Vugts, V. (2019). What We Don't Know. The Effect of Realism in Virtual Reality on Experience and Behaviour. Dans M. C. tom Dieck et T. Jung (dir.), *Augmented Reality and Virtual Reality : The Power of AR and VR for Business* (p. 45-57). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06246-0_4

Wald, J., Dhamo, H., Navab, N., et Tombari, F. (2020). Learning 3D Semantic Scene Graphs From 3D Indoor Reconstructions. *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.03967

Yoon, B., Kim, H.-i., Lee, G. A., Billinghurst, M., et Woo, W. (2019). The Effect of Avatar Appearance on Social Presence in an Augmented Reality Remote Collaboration. *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 547-556. https://doi.org/10.1109/VR.2019.8797719