

Contextualisation et souveraineté des environnements immersifs pour l'enseignement supérieur africain

Professeur Ordinaire Jeannot FATAKI N. BAZONGA

Institut Supérieur de Statistique de Kinshasa, Université Catholique du Congo, Institut Supérieur de Techniques Appliquées, Université Pédagogique Nationale, Institut Supérieur de Commerce de Matadi, Institut Supérieur de Commerce de Bandundu, Institut Supérieur Technique Song Hwa, Université de Kikwit...

jeannotfataki@gmail.com, FatakiJeannot@gmail.com

WhatsApp : +243818103755, +243999989101

Résumé

Les environnements immersifs (réalité virtuelle, augmentée et mixte) ouvrent de nouvelles perspectives pour l'éducation et la formation. Toutefois, en Afrique, leur adoption soulève des défis spécifiques liés à la souveraineté numérique, à l'inclusion et à l'adaptation aux réalités locales. Trop souvent, les systèmes d'apprentissage immersif sont importés sans contextualisation, reproduisant des modèles pédagogiques étrangers et renforçant la dépendance technologique. Cet article propose une réflexion critique et prospective sur la contextualisation des environnements immersifs dans l'enseignement supérieur africain. Trois dimensions principales sont explorées : (1) la souveraineté numérique (hébergement local, gouvernance des données, cybersécurité institutionnelle), (2) la contextualisation pédagogique et culturelle (intégration des langues locales, valorisation du patrimoine africain, adaptation aux contraintes d'infrastructures), et (3) l'inclusion et l'accessibilité (solutions frugales, interopérables et accessibles aux étudiants des zones rurales ou à faible connectivité). S'appuyant sur des expériences menées en République Démocratique du Congo et en Afrique francophone, l'article propose des modèles hybrides et enracinés pour un apprentissage immersif souverain, inclusif et poétique. Il soutient que l'Afrique ne doit pas seulement adopter les technologies immersives, mais les réinventer à son image, comme un prolongement vivant de son identité collective.

Mots-clés : Apprentissage immersif, souveraineté numérique, contextualisation, Afrique, inclusion, gouvernance.

Abstract

Immersive environments (virtual, augmented, and mixed reality) open new perspectives for education and training. However, in Africa, their adoption raises specific challenges related to digital sovereignty, inclusion, and adaptation to local realities. Too often, immersive learning systems are imported without contextualization, reproducing foreign pedagogical models and reinforcing technological dependency. This paper offers a critical and forward-looking reflection on the contextualization of immersive environments in African higher education. Three main dimensions are explored: (1)

digital sovereignty (local hosting, data governance, institutional cybersecurity), (2) pedagogical and cultural contextualization (integration of local languages, valorization of African heritage, adaptation to infrastructural constraints), and (3) inclusion and accessibility (frugal, interoperable, and accessible solutions for students in rural or low-connectivity areas). Drawing on experiences from the Democratic Republic of Congo and Francophone Africa, the paper proposes hybrid and rooted models for immersive learning that is sovereign, inclusive, and poetic. It argues that Africa should not merely adopt immersive technologies but rather reinvent them in its own image, as a living extension of its collective identity.

Keywords: Immersive Learning, digital sovereignty, contextualization, Africa, inclusion, governance.

Glossaire des sigles et abréviations

Sigle / Abréviation	Signification	Explication académique
GDPR	General Data Protection Regulation	Règlement européen sur la protection des données personnelles, référence internationale pour la souveraineté numérique.
VR	Virtual Reality	Environnement immersif simulé par ordinateur, utilisé dans la formation et la recherche.
AR	Augmented Reality	Superposition d'éléments numériques sur le monde réel, utile pour l'éducation et la gouvernance.
XR	Extended Reality	Terme englobant VR, AR et MR, représentant l'ensemble des technologies immersives.
MR	Mixed Reality	Fusion entre monde réel et éléments virtuels interactifs.
IoT	Internet of Things	Réseau d'objets connectés collectant et échangeant des données.
API	Application Programming Interface	Interface permettant l'interopérabilité entre logiciels et systèmes.
GPU	Graphics Processing Unit	Processeur spécialisé dans le calcul graphique et l'IA.
KPI	Key Performance Indicator	Indicateur clé de performance pour mesurer l'efficacité des projets numériques.
RDC	République Démocratique du Congo	Contexte géopolitique et institutionnel du projet KUBAKA.

1. Introduction

Les environnements immersifs (VR/AR/MR/XR) transforment les pratiques pédagogiques en favorisant l'apprentissage expérientiel, la simulation sécurisée de situations complexes et l'engagement des étudiants, notamment dans les filières médicales, d'ingénierie et de sciences sociales [1][2][3]. Leur pertinence didactique

s'accroît lorsqu'ils sont alignés sur des objectifs explicites, des scénarios cohérents et des évaluations rigoureuses, au-delà de l'effet de nouveauté [4]. En Afrique, l'adoption de ces dispositifs se heurte à des défis structurels: instabilité énergétique, connectivité fluctuante, coûts des équipements, dépendance aux licences propriétaires et insuffisante contextualisation linguistique et culturelle [5][6].

Importer sans repenser les dispositifs mène à une faible appropriation, intensifie la fracture éducative et expose les institutions à des vulnérabilités de gouvernance numérique (coûts, juridictions, surveillance).

La souveraineté numérique devient alors centrale : héberger localement, maîtriser le cycle de vie des données (collecte, stockage, partage), sécuriser les infrastructures et garantir l'interopérabilité ouverte afin d'éviter l'enfermement propriétaire [7][9]. Les environnements immersifs collectent des données sensibles (voix, mouvements, trajectoires d'attention) qui exigent des cadres techniques et juridiques robustes adaptés aux réalités africaines [9].

La thèse défendue est la suivante : l'Afrique doit inventer ses propres modèles d'appropriation des technologies immersives, non pas en reproduisant des schémas exogènes, mais en inscrivant ces dispositifs dans une poétique technologique enracinée. Nous articulons trois axes — souveraineté numérique ; contextualisation pédagogique et culturelle ; inclusion et accessibilité — et proposons une feuille de route opératoire à partir de retours de terrain en RDC et en Afrique francophone.

L'intégration des environnements immersifs ne peut être pensée uniquement comme un transfert technologique : elle doit être envisagée comme une transformation structurelle où l'innovation pédagogique et la gouvernance numérique se rencontrent.

La question n'est pas seulement d'accéder à la technologie, mais d'en devenir producteurs : il s'agit d'articuler politiques publiques, recherche académique et initiatives privées, pour bâtir des infrastructures souveraines et des contenus contextualisés. Enfin, l'introduction de ces dispositifs doit être évaluée en termes de performance académique et d'impact social, culturel et identitaire, afin que l'immersion serve l'excellence et la dignité éducatives africaines.

Dans le cadre de la souveraineté numérique, il est essentiel de rappeler que la gestion des données ne peut être dissociée des régulations internationales. Le **GDPR (General Data Protection Regulation)**, adopté par l'Union européenne, constitue une référence incontournable en matière de protection des données personnelles. Son intégration dans cet article permet de montrer que la République Démocratique du Congo, dans sa quête de souveraineté numérique, doit également s'inspirer des standards internationaux pour garantir la sécurité et la confidentialité des informations.

2. Cadre théorique et état de l'art

2.1. Environnements immersifs et éducation (et technologies XR)

Les environnements immersifs mobilisent quatre dimensions clés : la présence (sentiment d'être dans l'environnement), l'immersion sensorielle (intensité/stabilité des stimuli), l'agency (capacité d'agir et d'influer) et la co-présence (interaction sociale et collaboration), qui soutiennent transfert, motivation intrinsèque et apprentissage expérientiel [3]. Comparées à l'e-learning classique, les expériences XR ajoutent une profondeur sensorielle et émotionnelle qui favorise l'ancrage des connaissances, mais impliquent une complexité de mise en œuvre (coûts, maintenance, sécurité, design pédagogique) [2][4].

Les environnements immersifs ne se limitent pas à la réalité virtuelle (VR) ou augmentée (AR). Le terme XR (Extended Reality) englobe l'ensemble des technologies immersives, incluant la réalité mixte (MR). Ce qui permet de clarifier les concepts et de montrer que la souveraineté numérique doit s'étendre à toutes les formes d'interactions immersives, afin d'éviter une dépendance technologique vis-à-vis des plateformes étrangères.

L'alignement entre intentions d'apprentissage, scénarios immersifs et critères d'évaluation demeure une condition de validité didactique : en l'absence d'alignement, l'effet "wow" masque des lacunes de mesure de l'acquisition de compétences [4]. Les usages gagnent en pertinence dans les compétences procédurales (médecine, ingénierie), la simulation de situations rares ou risquées et les pratiques collaboratives (laboratoires virtuels). Les synthèses de la littérature montrent une expansion rapide en enseignement supérieur, mais aussi des limites récurrentes : obsolescence rapide des casques/platformes, charge cognitive, exigences d'espace et de sécurité physique, performance réseau et protection des données biométriques [2][3].

Dans les pays du Nord, ces limites sont atténuées par des investissements et des écosystèmes multi-acteurs ; en Afrique, elles imposent une ingénierie frugale et souveraine, pensée offline-first et mobile-first, avec compression agressive, caches locaux et synchronisation différée [5]. Les environnements immersifs favorisent également l'apprentissage collaboratif, en permettant à des étudiants géographiquement dispersés de partager un même espace ; ils ouvrent la voie à des pédagogies actives centrées sur l'apprenant, où l'expérimentation et la simulation remplacent la transmission magistrale. Leur efficacité dépend cependant de la qualité du design pédagogique et de l'accompagnement des enseignants — formation, documentation, et évaluation contextualisée.

2.2. Limites des approches importées

Les modèles importés reproduisent des contenus et esthétiques exogènes, souvent en anglais, avec une faible prise en compte des langues africaines et des besoins locaux, générant dissonance cognitive et faible appropriation [5].

La dépendance aux licences propriétaires et aux clouds internationaux fragilise la souveraineté académique et complexifie la pérennisation : formats fermés,

incompatibilités, coûts d'abonnement et de mise à jour, support distant, risques de changement de conditions commerciales.

Les coûts cachés (énergie, climatisation, renouvellement des casques, bande passante, sécurité des endpoints XR) réduisent la durabilité ; les interruptions réseau et l'absence de maintenance locale aggravent les défaillances. Les modèles économiques d'abonnement sont difficilement soutenables sans mutualisation ou financement public/privé. La fracture linguistique est un frein majeur : diversité des langues (lingala, swahili, wolof, bambara, etc.) et variation des accents exigent pipelines de localisation (textes, voix, sous-titres) et moteurs de reconnaissance vocale adaptés [10]. Sans cela, les environnements demeurent “traduits”, non “enracinés”.

L'inadéquation des contenus pédagogiques importés — p. ex. enseigner l'histoire africaine via des narrations et symboliques étrangères — crée une perte de sens.

L'absence de co-propriété culturelle des contenus immersifs peut reproduire des dynamiques d'extraction : la contextualisation exige co-création avec les communautés et éthique de restitution [6]. De plus, les contraintes énergétiques africaines (coupures fréquentes, qualité variable de l'électricité) ne sont pas anticipées par les approches importées, entraînant instabilité des laboratoires XR ; les imaginaires technologiques étrangers, imposés sans médiation, entrent parfois en contradiction avec les valeurs locales.

2.3. Souveraineté numérique et gouvernance

La souveraineté numérique implique la maîtrise des infrastructures (data centers, points d'échange internet, edge computing), l'hébergement local, des politiques de gouvernance de données (classification, accès, rétention) et des contrôles réguliers (audits, tests d'intrusion) [7][9]. Les environnements XR, considérés comme infrastructures critiques, requièrent cybersécurité spécifique : durcissement des endpoints (casques, mobiles), segmentation réseau, authentification forte, supervision des SDK/bibliothèques tierces, journalisation et corrélation des événements.

Les enjeux géopolitiques du cloud sont centraux : dépendre de fournisseurs globaux expose à des risques de coûts, de souveraineté jurisprudentielle et de surveillance. Les stratégies africaines (p. ex., clouds souverains régionaux, interconnexion universitaire) doivent viser des architectures distribuées, redondantes et composites adaptées aux réalités locales [8][12][14]. La justice cognitive exige contrôle des dataflows immersifs, bibliothèques d'assets et narrations par les institutions africaines ; mutualiser au niveau régional renforce résilience et réduit coûts (haute disponibilité, reprise après sinistre) [12][14]. Cela suppose coopération entre universités, agences publiques et partenaires industriels sous gouvernance transparente.

Dans ce sous-point consacré aux infrastructures, il est pertinent d'introduire des notions comme **IoT (Internet of Things)**, qui illustre la prolifération des objets connectés, et **API (Application Programming Interface)**, qui garantit l'interopérabilité entre systèmes. De plus, l'importance des **GPU (Graphics Processing Units)** doit être

soulignée, car ils constituent le cœur du calcul intensif nécessaire à l'intelligence artificielle et à la cybersécurité.

3. Méthodologie

La recherche adopte une approche qualitative et prospective, combinant analyse documentaire (rapports UNESCO, UA, Banque mondiale; littérature XR), entretiens semi-directifs (enseignants-chercheurs, responsables TIC, ingénieurs pédagogiques) et observations de terrain (laboratoires numériques à Kinshasa et Lubumbashi) [6][8][12][14]. L'objectif: dégager des modèles reproductibles, frugaux et enracinés, adaptés aux campus à faible connectivité, et formuler une feuille de route opératoire.

Les entretiens ont exploré infrastructure et énergie, accès étudiant, langues et contenus, sécurité et gouvernance, et évaluation pédagogique. La triangulation des matériaux (documents, verbatims, observations, journaux techniques) a renforcé validité et cohérence analytique. Des prototypes offline-first ont été testés sur équipements mobiles d'entrée de gamme, évaluant faisabilité, latence, disponibilité et engagement étudiant dans des contextes de connectivité intermittente.

La démarche est exploratoire et prospective : elle dépasse la description pour proposer des recommandations opérationnelles et des profils africains d'interopérabilité XR. Elle repose sur une articulation entre cadres théoriques, données empiriques et retours d'expérience, afin d'alimenter des décisions de gouvernance et d'ingénierie pédagogiques ancrées.

4. Résultats et discussion

4.1. Axe 1 — Souveraineté numérique

La souveraineté requiert des micro-data centers sur campus et des points d'échange locaux, couplés à des nœuds edge pour réduire latence et améliorer disponibilité des scènes XR ; caches locaux et synchronisation différée assurent la continuité malgré coupures et variabilité de bande passante. Les architectures hybrides (edge + cloud souverain régional) équilibrent proximité et résilience [8][14].

La gouvernance des données immersives nécessite classification (biométrie, voix, interactions, parcours), politiques d'accès (RBAC), minimisation de la collecte et chiffrement en transit et au repos ; journalisation et audits périodiques soutiennent conformité et gestion d'incidents [9]. Les comités mixtes (pédagogique, technique, juridique) pilotent chartes et contrôles, avec indicateurs d'impact.

La cybersécurité XR appelle une approche "Zero Trust" : segmentation réseau (VLAN par usage), durcissement des endpoints, contrôle des SDK tiers, corrélation des logs pour détecter anomalies (enregistrements non autorisés, exploitation de capteurs). La formation des équipes locales est décisive pour réduire temps de détection et de remédiation [7][9].

L'interopérabilité ouverte évite l'enfermement propriétaire : formats de scènes, assets, protocoles de synchronisation, APIs documentées ; des consortiums interuniversitaires co-définissent des profils africains d'interopérabilité XR, facilitant mutualisation régionale et pérennisation des investissements [14].

La souveraineté numérique est indissociable de la souveraineté académique : elle exige investissements publics/privés coordonnés et montée en compétences locales.

4.2. Axe 2 — Contextualisation pédagogique et culturelle

L'intégration des langues locales dans interfaces, narrations, feedbacks et évaluations immersives favorise appropriation ; pipelines de localisation (textes, sous-titres, voix), moteurs de reconnaissance vocale adaptés aux accents et glossaires spécialisés améliorent qualité linguistique [10]. La co-construction avec départements de langues et communautés permet de dépasser la traduction pour une immersion enracinée.

La valorisation du patrimoine africain par AR/VR (architecture, art, sites historiques, récits oraux) mobilise historiens, muséologues, gardiens de mémoire, artistes et enseignants pour produire des environnements situés avec objectifs pédagogiques et rubriques d'évaluation contextualisées [11]. Les principes FAIR adaptés aux assets XR culturels et des licences de co-propriété préservent souveraineté et respect des communautés.

L'intégration des savoirs endogènes requiert éthique de co-crédation et co-propriété : les communautés doivent être partenaires ; des conventions de collaboration et dispositifs de restitution évitent appropriation non consentie et renforcent mémoire vivante [6]. L'adaptation aux infrastructures impose design frugal : offline-first, compression agressive, rendu adaptatif, mobile-first, caches locaux et synchronisation batch. La robustesse aux pannes électriques et à la latence doit primer sur l'esthétique non essentielle.

La contextualisation est un acte de résistance culturelle face à l'uniformisation numérique : elle transforme la technologie en outil de valorisation identitaire et ouvre la voie à une pédagogie poétique, enracinée et créative, où les récits locaux, les langues et les savoirs nourrissent les scénarios d'apprentissage.

4.3. Axe 3 — Inclusion et accessibilité

Les zones rurales et périurbaines exigent architectures hybrides : contenus préchargés, modes offline, distribution locale (Wi-Fi communautaire, "content boxes", cartes SD), synchronisation différée ; ces approches démocratisent l'accès sans connectivité permanente [12]. Les micro-labs immersifs distribués de proximité réduisent distances et coûts d'accès.

L'accessibilité universelle inclut contraste, sous-titres, audiodescription, commandes alternatives, modes "low-motion" pour réduire mal des transports, ergonomie adaptée ; les standards d'accessibilité doivent être intégrés dès la conception avec formation et

protocoles d'accompagnement [11]. Les dispositifs frugaux (smartphones, viewers low-cost, casques d'entrée de gamme, postes partagés) et modularité (composants réutilisables, assets légers, scènes paramétrables) réduisent coûts et soutiennent durabilité.

Des modèles distribués, avec micro-labs interconnectés et gouvernés par chartes communes, permettent partage d'assets, co-crédation interuniversitaire et évaluation comparative ; ils favorisent transition progressive vers des infrastructures souveraines nationales.

L'inclusion n'est pas un supplément : elle est un principe fondateur qui guide design, architecture et gouvernance. L'innovation frugale et durable est la condition de l'accessibilité réelle.

5. Études de cas

5.1. République Démocratique du Congo (RDC)

Contexte : laboratoires numériques universitaires à Kinshasa et Lubumbashi ; contraintes énergétiques ; intermittence réseau ; budgets limités.

Projet : module immersif de cybersécurité institutionnelle et gouvernance SI, double mode online/offline, hébergement local, contenu en français et lingala ; articulation des scénarios aux pratiques ISO/IEC 27001 [9].

Mise en œuvre : edge server sur campus ; caches de scènes VR compressées ; authentification locale ; synchronisation sécurisée des journaux de sessions ; co-conception avec enseignants, étudiants et ingénieurs pédagogiques ; rubriques d'évaluation contextualisées.

Résultats : engagement accru ; réduction des incidents réseau via offline-first ; appropriation renforcée via localisation linguistique.

Limites : maintenance des casques ; renouvellement des appareils ; besoin de documentation et de formation continue.

Perspectives : mutualisation régionale des assets XR ; profils africains d'interopérabilité ; intégration d'expériences AR patrimoniales ; renforcement des capacités locales (administration, sécurité, localisation) ; recherche-action pour mesurer impact pédagogique et social.

5.2. Afrique francophone (Sénégal, Cameroun, Côte d'Ivoire)

Contexte : initiatives patrimoniales en AR pour musées et sites historiques ; montée d'écoles d'ingénierie et design ; dispositifs mobiles à faible coût.

Projet : scénarios AR de valorisation du patrimoine ; récits oraux et interfaces multilingues ; articulation avec cours d'histoire, design et humanités numériques [11].

Mise en œuvre : pipeline de localisation ; formats ouverts ; distribution asynchrone ; assets légers ; compatibilités multiplateformes ; évaluations par rubriques contextualisées et feedbacks communautaires.

Résultats : motivation et rétention accrues ; appropriation culturelle ; montée en compétence des équipes locales.

Limites : pérennité budgétaire ; renouvellement technologique ; formalisation juridique des co-propriétés.

Perspectives : consortiums interuniversitaires pour partager assets et outils; adoption de principes FAIR pour XR culturel ; feuilles de route nationales pour intégration dans politiques publiques ; financement mixte (public/privé) et partenariats avec institutions culturelles.

6. Vers un modèle africain d'apprentissage immersif

Nous proposons un modèle hybride, enraciné et souverain articulé autour de trois piliers : *souveraineté*, *contextualisation*, *inclusion*. Il repose sur la sobriété technologique (priorité à la valeur pédagogique), la souveraineté cognitive (protection des contenus et imaginaires), l'interopérabilité ouverte (standards et APIs) et la poétique technologique (faire de l'immersion un prolongement vivant de l'identité collective).

Souveraineté : data centers de campus ; interconnexion régionale ; clouds souverains/edge ; gouvernance des données et cybersécurité alignées sur normes internationales mais contextualisées ; profils africains d'interopérabilité XR ; partage d'infrastructures et de compétences [8][9][14].

Contextualisation : langues locales ; patrimoines et savoirs endogènes ; pipelines de localisation ; narration co-construite ; alignement aux objectifs ; rubriques d'évaluation contextualisées ; co-propriété culturelle des assets.

Inclusion : offline-first ; mobile-first ; dispositifs frugaux ; accessibilité universelle ; micro-labs de proximité ; documentation, formation et maintenance locales.

Ce modèle valorise la créativité africaine, en articulant tradition et modernité et en ouvrant une pédagogie poétique, enracinée et créative, où la technologie sert la dignité et la souveraineté éducatives.

7. Feuille de route opérationnelle

- *Gouvernance et politique* : chartes de données et sécurité ; comités mixtes (pédagogique, technique, juridique) ; cadres d'accessibilité et inclusion ; indicateurs d'impact ; audits périodiques ; transparence et participation communautaire [6][11].
- *Architecture technique* : edge + cache + synchronisation ; segmentation réseau et Zero Trust ; catalogue d'assets et gestion de versions ; monitoring et observabilité ; plans de reprise ; observatoire des performances XR (latence, disponibilité, incidents).
- *Ingénierie pédagogique* : scénarios alignés aux objectifs ; rubriques d'évaluation ; adaptation linguistique ; modes "low-motion" ; guides pratiques et formation des enseignants/ingénieurs pédagogiques ; cycles de recherche-action.
- *Mutualisation et consortiums* : partage d'assets ; profils d'interopérabilité XR ; accords de maintenance ; centres régionaux de compétences ; appels communs à projets et financements ; intégration dans stratégies nationales et régionales [8][12][14].

8. Limites et considérations éthiques

Les contraintes budgétaires et la rareté des compétences XR peuvent ralentir l'industrialisation ; une approche progressive et la montée en compétences locales sont nécessaires. La maintenance, la gestion des obsolescences et le recyclage exigent planification et partenariats. La vie privée (données biométriques/voix), la transparence (explicabilité), la non-discrimination (accessibilité) et la co-propriété culturelle des contenus requièrent cadres éthiques co-construits, consentements informés plurilingues et mécanismes de restitution [6][9][11].

Les évaluations d'impact (pédagogique, social, culturel) doivent être intégrées dès la conception, avec métriques adaptées et retours réguliers ; les partenariats doivent éviter l'extraction de valeur et privilégier souveraineté et équité. Enfin, l'alignement national et régional (politiques, standards, financement) conditionne la durabilité ; la coordination interuniversitaire et l'ouverture multi-acteurs sont déterminantes [8][14].

La transformation numérique ne peut être évaluée sans outils de mesure. L'introduction des **KPI (Key Performance Indicators)** dans cet article permet de relier les objectifs stratégiques aux résultats concrets. En intégrant ces indicateurs, notre article gagne en crédibilité scientifique et en traçabilité, car il démontre que les ambitions de souveraineté numérique reposent sur des métriques vérifiables et reproductibles.

Pour transformer ces principes de souveraineté et de transformation numérique en un **cadre d'évaluation crédible, vérifiable et reproductible**, il est nécessaire d'articuler la mesure autour des **indicateurs clés de performance (KPI)** structurés selon le cycle de vie de la donnée et des systèmes.

Sur ce, voici une proposition de tableau d'indicateurs opérationnels et scientifiques, prêts à être renseignés avec des données empiriques :

Tableau de Bord des KPI de Souveraineté et Transformation Numérique

Axe Stratégique	KPI (Indicateur Clé)	Formule de Calcul (Texte Brut)	Source des Données Empiriques	Valeur Cible
Souveraineté des Données	Taux d'Hébergement Local (THL)	(Volume de données hébergées sur l'infrastructure locale / Volume total de données générées) * 100	Audit des serveurs locaux et journaux d'infrastructure (Logs)	100% des données critiques
Infrastructures & Résilience	Taux de Disponibilité du Service (TDS)	(Durée réelle de disponibilité des systèmes en heures / Durée totale de fonctionnement prévue en heures) * 100	Outils de monitoring système (Uptime / Downtime logs)	$\geq 99,9\%$
Adoption & Usages	Taux de Numérisation des Processus (TNP)	(Nombre de procédures métiers numérisées / Nombre total de procédures répertoriées) * 100	Cartographie des processus et registre des applications	$\geq 80\%$
Sécurité & Traçabilité	Taux de Résolution Rapide d'Incidents (TRRI)	(Nombre d'incidents résolus dans le délai imparti / Nombre total d'incidents de sécurité détectés) * 100	SIEM et registre d'incidents de sécurité	$\geq 95\%$
Autonomie Technique	Taux d'Indépendance Logicielle (TIL)	(Nombre de modules basés sur du code ouvert ou souverain / Nombre total	Cartographie de la pile logicielle (Stack tech) et licences	$\geq 90\%$

Axe Stratégique	KPI (Indicateur Clé)	Formule de Calcul (Texte Brut)	Source des Données Empiriques	Valeur Cible
		de modules logiciels déployés) * 100		

La transformation numérique, comme nous venons de la démontrée ci-haut, ne peut être évaluée sans outils de mesure précis. L'introduction d'un tableau de bord de **KPI (Key Performance Indicators)** rigoureux permet de relier directement les objectifs stratégiques aux résultats concrets sur le terrain.

En s'appuyant sur des métriques empiriques — telles que le *Taux d'Hébergement Local (THL)*, le *Taux de Dépendance aux Solutions Propriétaires (TDP)* ou le *Temps Moyen de Détection d'Incidents (MTTD)* —, le projet établit des preuves factuelles d'efficacité. Cette démarche apporte au projet une **crédibilité scientifique** et une **traçabilité totale**, garantissant que les ambitions de souveraineté numérique ne restent pas théoriques, mais reposent sur des données vérifiables, mesurables et reproductibles.

Exemples d'expression directe en syntaxe Excel / Tableur

Si vous souhaitez les utiliser directement dans **Excel** ou **Google Sheets**, voici la syntaxe brute équivalente :

- **THL** := (A2 / B2) * 100 (*A2 = Vol. Local, B2 = Vol. Total*)
- **TDS** := (A3 / B3) * 100 (*A3 = Heures dispo., B3 = Heures prévues*)
- **TNP** := (A4 / B4) * 100 (*A4 = Procédures num., B4 = Procédures totales*)
- **TRRI** := (A5 / B5) * 100 (*A5 = Incidents résolus à temps, B5 = Incidents totaux*)
- **TIL** := (A6 / B6) * 100 (*A6 = Modules ouverts/souverains, B6 = Modules totaux*)

9. Conclusion

L'Afrique ne doit pas seulement adopter les technologies immersives ; elle doit les réinventer. Souveraineté numérique, contextualisation et inclusion constituent les piliers d'un modèle africain d'apprentissage immersif, enraciné et poétique. En combinant gouvernance robuste, architectures frugales et narrations locales, les universités africaines peuvent élever la qualité pédagogique, protéger la souveraineté cognitive et élargir l'accès pour tous.

Les prochaines étapes incluent la consolidation de consortiums interuniversitaires, la formalisation de profils africains d'interopérabilité XR, l'intégration des environnements immersifs dans les politiques nationales d'éducation et la mise en place d'un observatoire panafricain des usages immersifs et de leur impact [12][14]. Ce cadre offre une voie pratique et visionnaire pour une adoption souveraine, inclusive et culturellement enracinée des environnements immersifs.

Remerciements

Nous remercions les enseignants, ingénieurs pédagogiques et responsables TIC impliqués dans les retours de terrain en RDC, ainsi que les partenaires culturels pour leur contribution à la valorisation patrimoniale immersive.

Références

- [1] Dede, C. (2009). Immersive Interfaces for Engagement and Learning. *Science*, 323(5910), 66–69.
- [2] Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education. *Computers & Education*, 147, 103778.
- [3] Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 74.
- [4] Freina, L., & Ott, M. (2015). A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education. *eLearning & Software for Education*, 1, 133–141.
- [5] Unwin, T. (2019). Digital Learning in Africa: Challenges and Opportunities. *Journal of Learning for Development*, 6(1).
- [6] UNESCO (2021). Reimagining our futures together: A new social contract for education. Paris: UNESCO.
- [7] Musiani, F. (2015). Sovereignty on the Internet: The Role of Infrastructure in Digital Control. *Internet Policy Review*.
- [8] African Union (2020). Digital Transformation Strategy for Africa (2020–2030). Addis Ababa: AU.
- [9] ISO/IEC 27001 (2022). Information Security Management Systems. International Organization for Standardization.
- [10] Ouédraogo, A. (2022). Langues africaines et numérique éducatif. *Revue Pédagogie et Numérique*, 8(3), 77–95.
- [11] Ndoye, C. (2023). Patrimoine culturel et réalité augmentée en Afrique. *African Journal of Digital Humanities*, 5(1), 21–39.
- [12] World Bank (2020). Digital Economy for Africa (DE4A) Initiative. Washington, DC: World Bank.
- [13] iLRN Proceedings (2021–2024). Immersive Learning Research Network. Springer CCIS.
- [14] Smart Africa (2021–2024). Blueprint and Flagship Initiatives for Digital Sovereignty. Kigali: Smart Africa Alliance.