

# LES JUMEAUX NUMÉRIQUES ET SES OPPORTUNITÉS DE MISE EN ŒUVRE À MADAGASCAR

Iony Mahefa RASANDIFERA<sup>1</sup>, Maharo RAKOTOARIMANANA<sup>1</sup>, Dolly Armël Sylvain  
ANDRIATOAVINA<sup>1</sup>, Pierrot RANJARANIMARO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>École du Génie Industriel, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo

Correspondant : [ionymahefa@gmail.com](mailto:ionymahefa@gmail.com)

## 1. Résumé

Concept récent du monde industriel, le jumeau numérique devient le pilier de l'Industrie 4.0. Il est une représentation virtuelle dynamique d'un objet physique qui est unique et enrichie dans le temps de manière synchrone avec l'objet observé. Ce nouveau concept repose sur plusieurs technologies à citer le Big Data, l'intelligence artificielle, l'internet des objets, le Cloud Computing, etc. Le jumeau permet, non seulement le pilotage de production, la maintenance prédictive, mais aussi l'analyse et la simulation suivie des différentes optimisations et cognitions dans le cadre d'une conceptualisation et comparaison avec les états réels pour s'évoluer activement. Ayant une mise en œuvre complexe, il se base sur les données qui l'alimentent continuellement. Ce travail consiste à la présentation des concepts clés du jumeau numérique, suivi de l'analyse de la situation de Madagascar et de l'identification des opportunités à saisir à travers lui. Celle-ci peut commencer par des échanges technologiques avec les pays émergents du jumeau numérique pour pouvoir appréhender une première expérience.

**Mots-clés** : Jumeau numérique, Industrie 4.0, virtuel, cyberphysique, intelligence artificielle

## 2. Introduction

Dès la mécanisation aux XVIIIème siècle, les progrès technologiques ne cessaient d'impressionner le monde. Commençant par les premières inventions en Europe à citer les machines à vapeur en 1705 et les machines à tisser mécaniques en 1769 ; suivi par la seconde révolution industrielle aux XIXème siècle par le développement de l'électricité, de la mécanique, du pétrole, de la chimie ainsi que des moyens de communication et du transport collectif. Toutefois, les chercheurs ont découvert l'électronique aux XXème siècle, suivie par la création des robots en 1959 et

des automates en 1968. Ces dernières incitaient à une troisième révolution industrielle en introduisant des opérations plus complexes et automatisées tout en facilitant les tâches des employés et en assurant leur sécurité. De ce fait, l'automatique, l'informatique, et le nucléaire étaient en plein essor pour favoriser l'expansion des industries.

Cependant, même avec le développement des différentes technologies durant ces 3 dernières siècles, l'intelligence humaine ne cesse de progresser, des recherches poussées menées sur des technologies spécifiques ont donné naissance à de nouveaux concepts. À cet effet, le développement du numérique marque la fin du XIXème siècle, qui est une des évolutions de l'informatique et de l'électronique. Celle-ci marque une transition et met en œuvre une quatrième révolution industrielle plus connue sous le nom d' « Industrie 4.0 » ou « Usine du Futur ». Cette révolution numérique, tenant compte de son nom, intègre la dématérialisation, l'interconnexion des machines et des individus, et des nouvelles technologies telles que la mécatronique et l'intelligence artificielle. Cette nouvelle ère industrielle marque les années 2000 en Allemagne pour son premier déploiement, et suivies par les pays émergents quelques années plus tard. De plus, cette innovation exploite un nouvel axe du numérique en proposant la fusion des espaces physiques et virtuels en un système cyberphysique évoluant en parallèle. À partir de l'année 2010, cette espace ou modèle virtuel est devenu ce que l'on appelle actuellement « Jumeau numérique » ou « Digital Twins » définie comme un modèle dynamique d'un système réel reposant sur des données de capteurs.

Depuis 2017, le jumeau numérique devient un concept en plein essor dans le monde industriel, à tel point que certains parlent de « buzz word » ou mot à la mode. En 2011, il a même été déclaré par la NASA et l'US Air Force comme technologie clé. En connaissance de cette émergence et de cette grande mutation technologique, plusieurs pays de l'occident et de l'Asie sont en phase de développement et de déploiement pourtant il reste peu connu voir même inconnu des pays africains comme Madagascar. Sachant que ceux-ci sont des pays pauvres ou en voie de développement se limitant à l'utilisation des systèmes automatisés et robotisés dans les industries. Or, un des objectifs de l' « Industrie 4.0 » est d'avoir plus de 150 milliards d'objets connectés répartis dans le monde entier en 2025, du coup, il sera indispensable tôt ou tard pour les autres pays de suivre l'initiative de l'Industrie du futur.

Tout cela conduit à une formation intensive sur ce nouveau concept ainsi qu'à la recherche des usages et d'applications adéquates. Compte tenu de l'ampleur de

celle-ci, la technologie clé qui est le « Jumeau numérique » sera notre centre d'étude. Ainsi, les questions se posent : « Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ? Quelles sont ses avantages ? Quelles sont les ressources disponibles à Madagascar ? Quelles sont les différentes opportunités possibles ? » C'est pour répondre à ces questions que l'idée de cette recherche est née : LES JUMEAUX NUMÉRIQUES ET SES OPPORTUNITÉS DE MISE EN OEUVRE À MADAGASCAR.

D'ailleurs, à Madagascar, les étudiants et les chercheurs sont fascinés par les nouvelles technologies, tels que le « Digital Twin » fusionne le numérique et les objets physiques incitant à une opportunité d'apprentissage par rapport aux autres. Par la suite, sa mise en œuvre pourra générer des avantages tant dans les milieux industriels (usine de fabrication) que dans les autres domaines tels que les enseignements (université), le transport, le bâtiment et d'autres.

L'objectif global de cette recherche est alors de définir le jumeau numérique ainsi que de comprendre son fonctionnement puis d'établir les différentes opportunités de mise en œuvre possibles et réalisables à Madagascar pour favoriser le développement du pays. En effet, il nous faudra appréhender la vraie signification du jumeau suivie de son principe de mise en œuvre. En dernier lieu, la mise en place d'un état de lieux des technologies existantes est nécessaire pour dégager les opportunités possibles.

À partir de cet article, il nous sera possible d'expliquer clairement ce qu'est un jumeau numérique et son fonctionnement. Ensuite, il exposera les avantages du déploiement des jumeaux numériques puis les compétences et les technologies disponibles à Madagascar. Enfin, il énumérera les opportunités de jumeau pour différents domaines à Madagascar, tout en espérant que ce document servira de base pour des futures recherches surtout en ce qui concerne le déploiement.

### **3. Les jumeaux numériques**

#### 3.1. Terminologie de définitions des jumeaux numériques

Selon Nathalie Julien et Éric Martin, le jumeau numérique est un modèle vivant dynamique, exécutable et manipulable. En effet, c'est une représentation virtuelle dynamique d'un objet physique ou non (produit, processus ou service) ; unique et enrichie dans le temps de manière synchrone avec l'objet observé. Il est situé à

différents endroits avec de multiples états tout au long du cycle de vie de l'objet concerné [1].

Selon François HENQUET, le jumeau numérique est la représentation graphique, mais aussi comportementale, d'une machine ou d'un procédé réel sous forme entièrement numérique[2].

Selon MathWorks, un jumeau numérique est une représentation à jour, un modèle, d'un équipement physique réel en fonctionnement. Il reflète l'état actuel de l'équipement et comprend des données historiques pertinentes sur l'équipement. Les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour évaluer l'état actuel de l'équipement et, plus important encore, prédire le comportement futur, affiner le contrôle ou optimiser le fonctionnement[3].

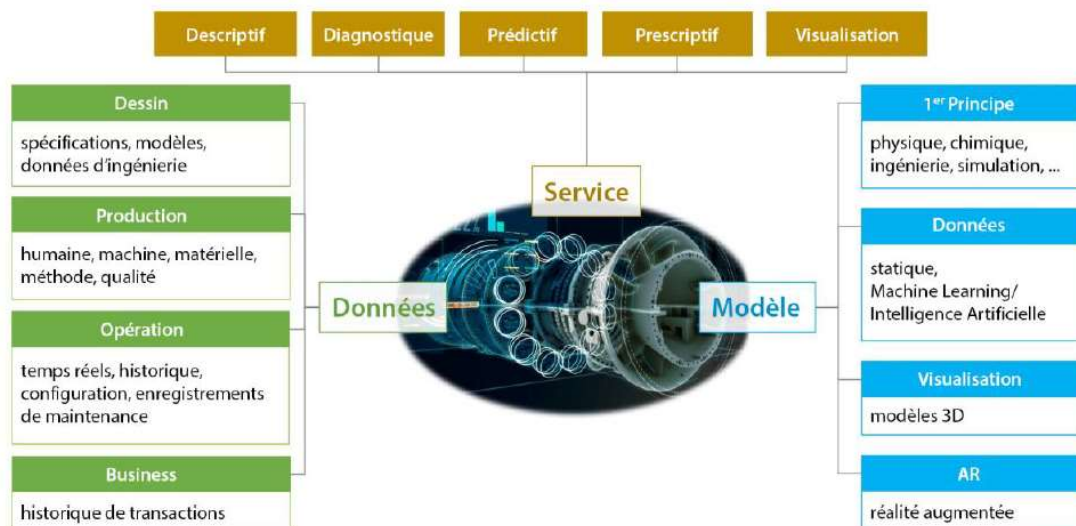
Un Jumeau numérique est un modèle virtuel d'un processus, d'un équipement, d'un produit ou d'un service utilisé pour détecter des problèmes, tester et simuler des scénarios sur le modèle physique d'une unité de production [4]. Il est ainsi un concept récent dans le monde industriel en matière d'efficacité, de valeur ajoutée et surtout de compétitivité entre les différentes entreprises. De ce fait, le jumeau numérique ou « Digital Twin » est l'un des piliers de l'Industrie 4.0.

En tant qu'acteur principal de l'usine du futur, le « Digital Twin » est :

- Un processus évolutif qui s'améliore en fonction des besoins et des progrès technologiques
- Un nouveau concept qui lie toutes les nouvelles technologies tant au niveau des communications (ICT), de l'Internet des Objets (IOT et IIOT), du Big Data, du Cloud, des différents systèmes automatisés.
- Un concept qui permet la fusion des espaces physique et virtuel pour créer le système cyberphysique (facteur clé de la 4ème révolution industrielle).

### 3.2. Présentation générale et fonctionnalité des Jumeaux numériques

Par rapport à nos différentes définitions, nous pouvons résumer en premier temps la présentation générale du « Digital Twin » par la figure représentative suivante :



© Siemens – adapté avec leur aimable autorisation

Figure 3-1 : Présentation générale du Digital Twins [2]

En effet, le jumeau se basant sur les données comme les dessins (spécifications, modèles, données d'ingénierie), les productions (méthode, machine, ressource humaine, machine ...) doivent se focaliser sur des modèles qui va le paramétrer comme les différents principes (mécaniques, ingénierie), modèles de données (machine learning, deep learning), modèles de visualisation 3D ... Ainsi, modèle et données réunies permettront au jumeau de procurer des services que l'on nommera « usages ». Sur ce, les usages affichent un certain degré de maturité qui sont bien différent, mais peuvent être aperçu d'une manière évolutive en engendrant une première classification du jumeau.

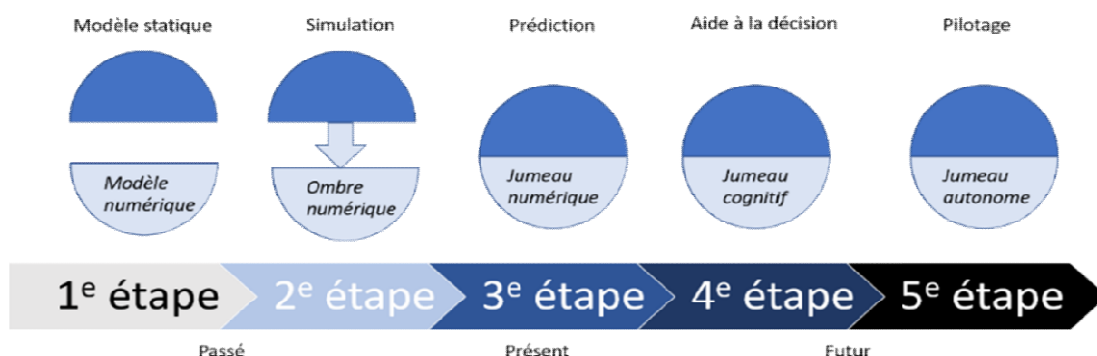


Figure 3-2 : Classification du jumeau selon les maturités [1]

D'après cette figure ci-dessus, il y a 5 classifications qui montrent aussi les différentes phases de maturité du jumeau numérique.

### 3.2.1. Modèle numérique/Miroir numérique

Le miroir numérique est l'origine du jumeau numérique, c'est un ensemble de modèles mathématiques qui s'efforcent de reproduire le plus fidèlement possible le comportement d'un objet physique (produits, équipements, usines) [1].

Selon Michael Grieves, le modèle numérique est défini comme une mise en miroir de ce qui existe dans le monde réel et ce qui existe dans le monde virtuel [5]. Il contient toutes les informations de l'objet physique, c'est-à-dire une représentation de toutes les disciplines pas seulement mécanique ou géométrique, mais aussi une représentation électronique, du câblage, du logiciel, du micrologiciel...

Les modèles 3D sont un des exemples de miroir numérique. Et dans cette première phase de maturité, il n'y a pas de communication directe entre les 2 mondes, il faudrait une intervention humaine pour alimenter le virtuel des données du monde physique.

### 3.2.2. Ombre numérique

L'ombre numérique est l'évolution du miroir numérique en incluant une dimension dynamique. Par rapport au modèle numérique, l'ombre représente toute trace digitale de l'activité de l'objet physique grâce à un flux unidirectionnel automatisé allant de l'état de l'objet physique vers sa contrepartie virtuelle [1]. Par contre, le flux en sens inverse est encore impossible, mais doit se faire manuellement si l'on veut interagir avec le système physique via l'espace virtuel.

### 3.2.3. Jumeau numérique : naissance du système cyberphysique

Grâce aux progrès technologiques, surtout au niveau de l'intelligence artificielle et de l'internet des objets ou bien même l'internet industriel des objets favorisant l'interconnexion des équipements industriels et des fonctionnalités de prédiction ; la fusion des deux espaces virtuels et physiques a vu le jour sous le nom de système cyberphysique. Ainsi, les communications entre les deux espaces sont automatiques, par la suite, un changement d'état de l'objet physique conduit directement à un changement d'état de l'objet numérique et vice versa. Le jumeau numérique devient alors un modèle vivant qui reflète les changements de sa contrepartie physique tout au long de sa vie [1]. Le jumeau devient interactif et intègre le « machine learning » pour permettre d'analyser une masse considérable de données afin d'en tirer des

interprétations et des connaissances sur des dysfonctionnements, allant même jusqu'à la prédiction d'événements ou de comportements.

#### 3.2.4. Jumeau numérique cognitif

Connaissant actuellement le fort développement de l'intelligence artificielle (machine learning et deep learning), l'amélioration de jumeau est en train de se réaliser dans le but d'apprendre à des données physiques (historique de données) et de fournir aux utilisateurs une aide à la décision. Cette capacité de réflexion lui donne l'appellation de jumeau numérique cognitif.

#### 3.2.5. Jumeau numérique autonome

Le jumeau autonome est un futur projet consistant à l'autopilotage. C'est-à-dire qu'il a la capacité de prendre lui-même les décisions et d'appliquer les contrôles à l'objet. En d'autres termes, nous assisterons aux déploiements du « strong AI » ou de l'intelligence artificielle forte étant capable de raisonner et résoudre des problèmes comme l'on a vu précédemment.

### 3.3. Classification des jumeaux numériques

Ayant déjà su la première classification, il existe une autre classification suivant leurs applications :

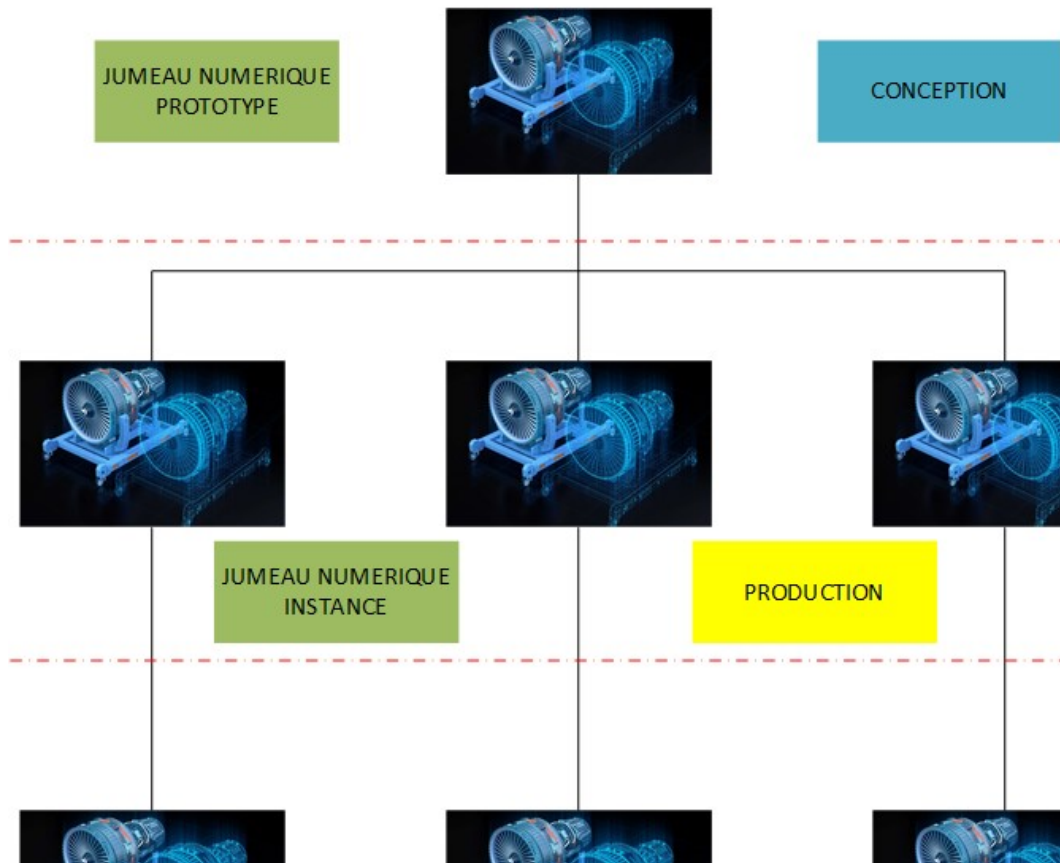


Figure 3-3 : Classification Jumeau Numérique suivant les applications

Cette figure montre les différents types de jumeaux numériques en rapport avec leurs applications et leur environnement.

### 3.3.1. Jumeau numérique PROTOTYPE

Le jumeau PROTOTYPE est celui utilisé à la conception, pour mettre en œuvre les scénarios d'usage, la réalité virtuelle et l'ergonomie. C'est-à-dire qu'il consiste à faire des analyses et des simulations tout en assurant les différents paramètres mécaniques, physiques, électriques et différents autres.

### 3.3.2. Jumeau numérique INSTANCE

Le jumeau INSTANCE est celui utilisé au moment de la production où il pourrait y avoir plusieurs variabilités de produits en fonction des demandes clients. Par rapport aux prototypes, il sera utile en matière d'optimisation et de cognition car plusieurs produits fabriqués à partir du même prototype peuvent avoir chacun leur instance [5].



### 3.3.3. Jumeau numérique AGRÉGAT

Le jumeau AGRÉGAT est celui utilisé par les clients, c'est-à-dire le déploiement vers le client. Une des priorités du « digital twin » est l'optimisation et l'amélioration des performances de l'équipement concerné. En effet, il sera question de conceptualisation, comparaison et de collaboration ; du fait qu'il y aura une étroite communication entre les clients et les concepteurs dans le but de créer une co-innovation. Ceci dans le but de vérifier ou de valider les cahiers de charges ainsi que de comparer le comportement de chaque jumeau déployé pour savoir si des solutions appropriées peuvent être applicables sur d'autres.

### 3.4. Envergure des jumeaux numériques

L'envergure se mesure par les types de données mises en jeu et les entités qu'ils peuvent modéliser. Sachant que tous les jumeaux apprennent en permanence, ils se mettent à jour en utilisant de multiples sources de données pour représenter son statut, sa condition de travail ou sa position en temps réel. D'où l'utilisation des données issue :

- De capteurs qui transmettent divers aspects de son état de fonctionnement ;
- D'expert humain, tel que des ingénieurs et des chercheurs ayant des connaissances approfondies du domaine industriel ;
- D'autres machines et flotte de machine similaires ;
- Des systèmes plus vastes allant vers les systèmes des systèmes
- De l'environnement dont ils font partie [1].

Au niveau des entités, nous pouvons déceler les objets physiques et immatériels comme un service ou un processus. Tels que pour les objets physiques, nous avons une approche écosystémique en diagramme de cercle concentrique suivant la figure suivante :

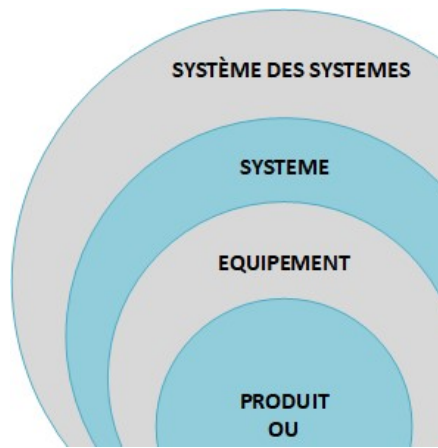


Figure 3-4 : Types d'objet modélisé par les Jumeaux

Cette approche écosystémique commence au plus bas de l'échelle avec le microsystème qui est représenté par les produits ou les composants. La conception du jumeau commence sur chaque composant (comme des transistors et des pièces mécaniques), puis pour avoir le jumeau d'un équipement, un assemblage de plusieurs jumeaux de composants (comme une machine). Et par continuité, l'assemblage de ces dernières engendre un jumeau d'un système (comme une ligne de production) et par la suite par un jumeau d'un système des systèmes (comme une usine ou à grande échelle allant jusqu'à une ville).

### 3.5. Jumeau numérique : mise en œuvre de plusieurs technologies

Le jumeau numérique étant un concept impliquant un grand nombre de technologies qui sont toutes interdépendantes entre eux :

- Des modèles mathématiques et visuels (2D,3D) pour synthétiser une reproduction de l'architecture de l'entité physique.
- L'internet industriel des objets incluant l'internet des objets, et le cloud pour l'interconnexion des machines (M2M) ainsi que la communication bidirectionnelle entre l'espace virtuel et physique.
- L'intelligence artificielle en utilisant le « machine learning » et le « deep learning » par le biais de plusieurs algorithmes, en assurant le bon fonctionnement des modèles tant au niveau de la prédiction que de l'aide à la décision allant jusqu'à la cognition.
- Le Big Data accompagné des smart Data et lean Data pour représenter les données
- Le Cloud, Fog et Edge computing pour assurer le traitement des données ainsi que le déploiement des services d'application [6].

- Les logiciels d'entreprise comme les CRM, ERP et les GPAO pour le pilotage et contrôle manuel par les clients utilisateurs, ils peuvent aussi être utilisés avec l'internet des objets pour assurer l'interaction homme-machine (IHM)

Tout ceci sera résumé par l'illustration de la figurel-15 :

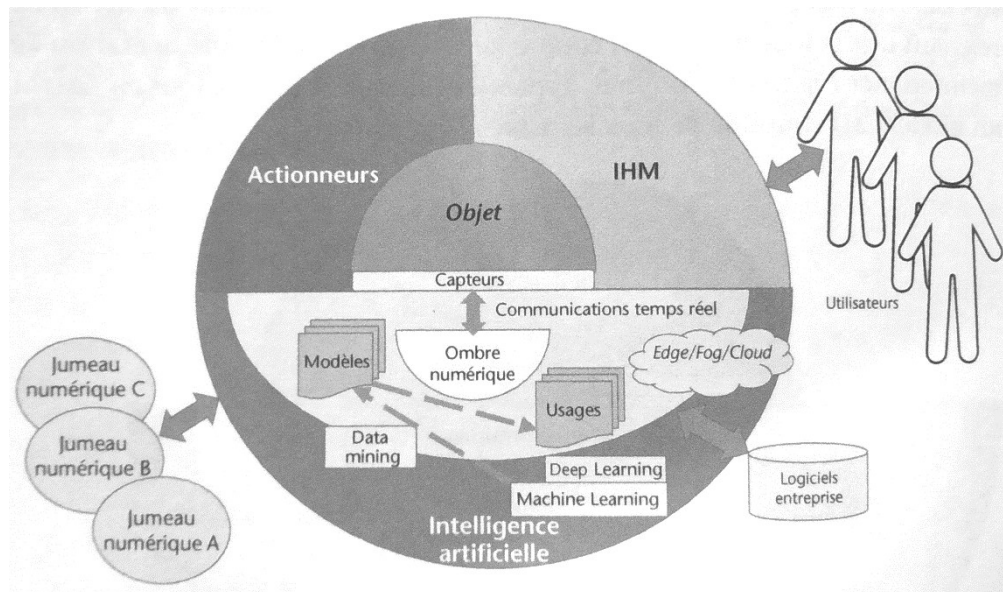


Figure 3-5 : Architecture générale d'un jumeau numérique [1]

### 3.6. Procédure de mise en œuvre d'un jumeau

Le jumeau numérique admet une architecture hiérarchisée allant de l'objet réel jusqu'à ses applications et usages, qui peut être illustré par la figure ci-dessus :

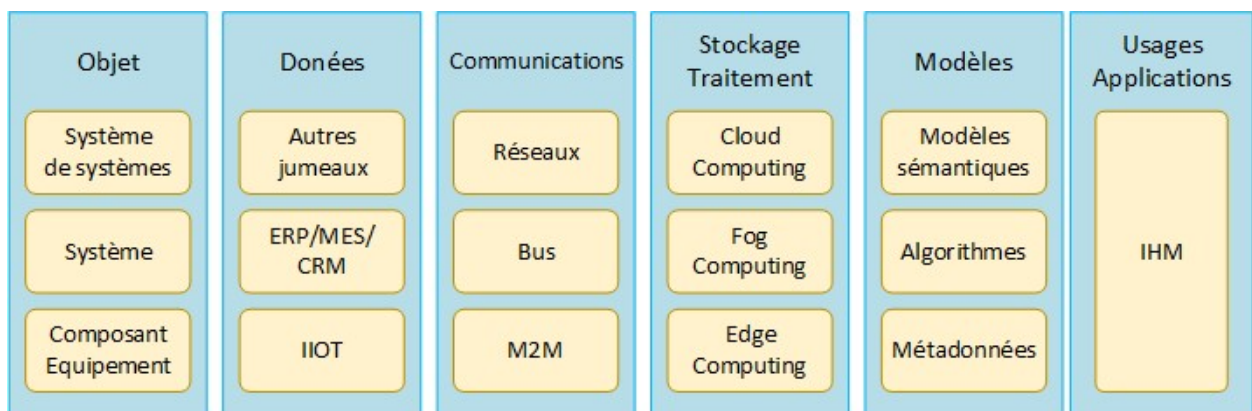


Figure 3-6 : architecture hiérarchisée d'un jumeau [1]

On peut dire que cette figure illustre les différentes technologies mises en jeu à chaque niveau du jumeau (objet), et nous observons les couches allant des objets physiques jusqu'aux Interfaces Homme Machine qui sont des usages ou des applications. Cependant, avec des études poussées, la mise en œuvre compte 3 étapes fondamentales [1] qui sont :

### 3.6.1. Des données aux modèles

La digitalisation tourne autour des données ainsi ces dernières sont les bases de la mise en œuvre d'un jumeau numérique qui est une des composantes clés de l'Industrie 4.0. Toutefois, il faut savoir que des données brutes sans traitement ne serviront à rien. La construction d'un modèle sera nécessaire pour l'exploitation. L'élaboration de ce modèle peut être illustrée par la figure suivante :

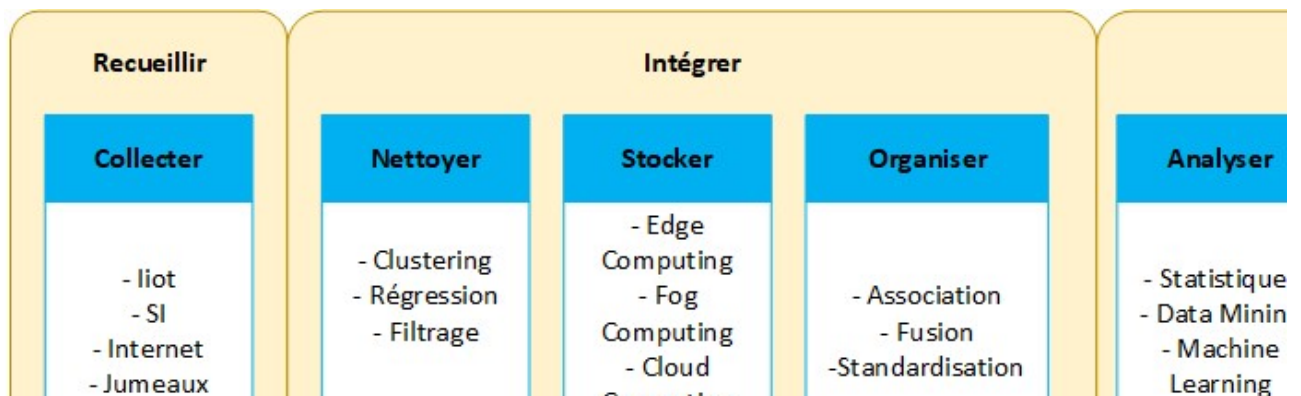


Figure 3-7 : Élaboration des modèles [1]

La première phase est alors de recueillir les données et si possible, des modèles. Pour cela, il faudra identifier les différentes sources de données réelles comme ceux des capteurs déployés avec l'IOT et celles fournies à l'IHM avec les utilisateurs ; des sources de données virtuelles récupérer par les logiciels d'entreprise, ou provenant d'une ombre numérique déjà réalisé et même peut provenir de toute source numérique tels qu'internet, historiques et documentations. Et avec une transmission à temps réel, celui-ci est délicat et les données sont acheminés avec des interfaces standardisées telles que RFID, WIFI, Bluetooth.

La seconde phase sera l'intégration. En premier lieu, les données seront nettoyées pour éliminer les « dirty data » (données redondantes, incomplètes, contradictoires, etc) afin de fiabiliser et éliminer les erreurs dans les interprétations. En second lieu, le stockage qui se déroule au niveau des cloud, edge, et fog computing que l'on avait déjà vus précédemment. Avec le traitement en temps réel, les données devront être structurées en base de données transactionnelle ou vectorielle. Et en dernier lieu, les informations vont être combinées selon certaines règles et associations pour améliorer la compréhension. Une organisation efficace et fiable sera nécessaire en développant une ontologie des données ou de se baser sur des méthodes structurées éprouvées d'ingénieries comme le MBSE (Model-Based System Engineering), UML ou SysML.

La dernière phase sera la génération de nouveau modèle à partir des données et modèle intégré. On procède à des approches statistiques (systèmes simples) ou à du machine learning. Il y aura un modèle qui sera généré et peut être testé. Puis il faudra aussi faire des représentations 2D ou 3D pour faciliter l'interfaçage et la communication avec les utilisateurs. C'est ainsi que l'on pourra coupler l'espace virtuel avec l'espace physique afin de créer un environnement immersif.

La manipulation des données devrait être délicate en matière de sécurité, confidentialité, intégrité et sûreté. De ce fait, il conviendra de mettre en place des règles pour prévenir des attaques, si nécessaire, aller jusqu'à des cryptages. Et on peut avoir ainsi une illustration sur le patrimoine digital suivant :



Figure 3-8 : Patrimoine digital [1]

### 3.6.2. Des modèles aux usages

Les modèles étant créés, plusieurs outils seront utilisés pour leurs analyses ainsi que l'apprentissage automatique. À ce stade, un jumeau de base pourrait fonctionner autour du pilotage de production et de la maintenance prédictive. Il reste l'intégration de l'**analyse et de la simulation** qui n'est qu'au niveau de la visibilité et la traçabilité des produits. Puis la combinaison avec les algorithmes de l'intelligence artificielle permet de développer des **optimisations et des prédictions**. Cette cognition fera évoluer le « digital twin » vers l'anticipation. Et enfin, dans un environnement immersif

entre le réel et le virtuel, il y aura une coopération (**conceptualisation, comparaison, collaboration**) ouvrant la voie vers une autonomie.

Alors les usages mis en évidence dans cette seconde étape sont :

- L'analyse et la simulation
- L'optimisation et la cognition
- La conceptualisation, la comparaison et la collaboration

Ce mode de fonctionnement des usages sera illustré par le schéma suivant :

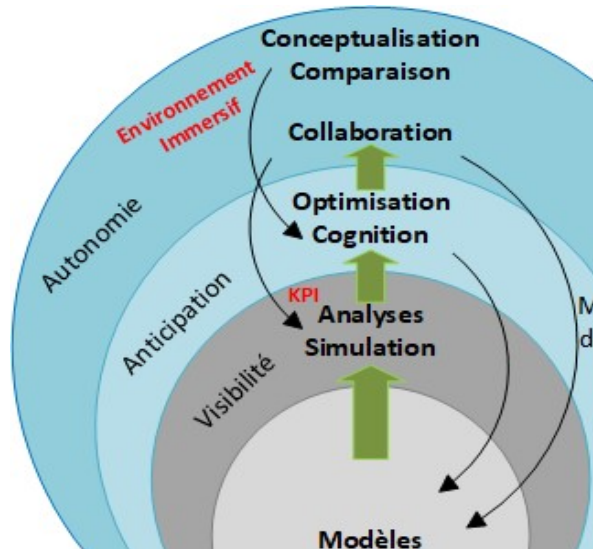


Figure 3-9 : Hiérarchie des usages [1]

Et chaque usage admet des objectifs par rapport à la phase d'application du jumeau :

Tableau 3-1 : Objectifs des différents usages du Digital Twin [1]

	<b>Conception</b>	<b>Production</b>	<b>Exploitation/Maintenance</b>
<b>Analyse Simulation</b>	Prototypage virtuel Implantation	Ordonnancement Surveillance	Personnalisation des services Maintenance préventive Aide au Diagnostic
<b>Optimisation Cognition</b>	Innovation	Aide à la décision Auto-adaptation	Auto-diagnostic Maintenance prédictive
<b>Conceptualisation Comparaison Collaboration</b>	Co-innovation	Pilotage autonome Reconfiguration Formation immersive	Auto-réparation Aide à l'intervention

Avant de partager les usages avec les utilisateurs, ils seront intégrés dans une plateforme de service collaboratif qui fournira à l'interlocuteur une interface ergonomique et une transparence du jumeau. Ainsi, les utilisateurs pourront avoir accès aux modèles, aux données ainsi qu'aux usages selon leur besoin sur la plateforme.

### 3.6.3. Des usages aux applications

Dans l'application du jumeau, il s'agit d'une méthodologie ou stratégie de déploiement, c'est-à-dire qu'à partir des applications souhaitées, les usages et les services nécessaires seront décelés. Et l'on peut se référer aux 2 tableaux suivants pour la pratique :

Tableau 3-2 : Exemples applications suivant les type de fabrication [1]

	<b>Applications</b>
<b>Fabrication Lean</b>	Machine to Machine (M2M)
<b>Fabrication flexible</b>	Prototypage virtuel
<b>Fabrication durable</b>	Ordonnancement faible consommation
<b>Fabrication intelligente</b>	Maintenance prédictive Cybersécurité industrielle
<b>Fabrication holonique</b>	Formation par réalité virtuelle IHM écologique
<b>Fabrication agile</b>	Chantier intelligent

Tableau 3-3 : Relations entre usage et domaines d'application [1]

Usage Fabrication	Analyse	Simulation	Optimisation	Cognition	Conceptualisation	Comparaison	Collaboration
Lean	X		X				
Flexible		X	X				
Durable	X	X	X			X	
Intelligente	X			X	X		
Holonique	X				X		X
Agile					X		X

## 4. Les avantages du déploiement des Jumeaux numériques

### 4.1. L'intérêt dans le Product Life Management (PLM)

Depuis la création de son concept, le jumeau numérique a été associé au cycle de vie du produit.

- En phase de conception

L'apport du jumeau numérique est indéniable lorsque l'on cherche à améliorer la performance d'un objet [1]. Il procure l'opportunité de travailler dans l'espace virtuel plutôt qu'avec des produits physiques pour réduire le coût à la concevoir ainsi que les tests des produits. Puis à partir des résultats, on peut passer à la fabrication, ce qui représente un gain de temps et une réduction des coûts considérables. De plus, les données issues des produits précédents peuvent être utilisées pour améliorer les futurs produits.

- En phase de production

Le jumeau numérique facilite la collaboration ; il permet de clarifier les spécifications avec les fournisseurs et optimiser la production en intégrant les demandes clients spécifiques, la personnalisation du produit, les options de configuration et les conditions de fabrication [1]. Ainsi, les jumeaux gardent une traçabilité complète et permettent d'optimiser les tâches et d'identifier les goulots d'étranglement pour diminuer les temps d'arrêt allant jusqu'à une excellence opérationnelle.

- En phase d'exploitation

En exploitation, le principal intérêt du jumeau numérique est d'optimiser la durée de vie de l'objet et de permettre la maintenance prédictive. Une fois que l'objet est dans les mains de l'utilisateur, les données continuent à être recueillies sur les performances et les conditions opérationnelles [1]. Et ils seront utilisés pour mettre en œuvre un planning de maintenance et une optimisation des performances.

- En fin de vie

Sachant que les jumeaux se basent sur les données, même en fin de vie, leurs données peuvent être utilisées pour la réalisation d'un autre jumeau. Il s'agit ici, de réutilisation, de reconditionnement et de recyclage ou de mise au rebut.



#### 4.2. Amélioration les performances

Les bénéfices liés au jumeau numérique dépendent fortement du secteur d'activité et de ses applications. Certains jumeaux fournissent des données qui ne sont pas mesurables directement sur l'objet physique, par exemple des données internes. L'utilisation d'un jumeau numérique permet d'économiser du temps et des ressources, telles que le développement, la fabrication, la maintenance. Le jumeau numérique a la capacité de diagnostiquer les objets ou les systèmes à partir de mesures ou de données interprétées qui permet de définir la cause des problèmes ou de certains comportements. Le jumeau peut également prédire les performances et le comportement de l'objet, en faisant jouer des simulations ou en vieillissant prématurément l'objet. Mais le jumeau peut également proposer des solutions, des adaptations ou des reconfigurations, permettant ainsi la flexibilité des installations. Il sera donc un outil efficace d'aide à la décision pour l'humain et pourra même devenir autonome s'il est apte à s'autoréparer.

#### 4.3. Apparition de nouveaux « Business model »

L'observation de l'usage du produit dans son environnement réel peut favoriser l'innovation et amener à développer une nouvelle fonction ou un nouveau produit, ceci afin de fournir des services plus adaptés au client. L'émergence des solutions Cloud a généré de nouveaux services : Infrastructure as a Service (IaaS), Platform as a Service (PaaS) et Software as a Service (SaaS). Le jumeau numérique quant à lui permet l'allocation de fonctionnalités détachées de l'équipement ; un équipement acheté à un vendeur peut avoir des fonctionnalités étendues aux usages et applications du jumeau numérique comme la maintenance prédictive, l'analyse de performances et les simulations prévisionnelles.

#### 4.4. Favorisation la collaboration

En facilitant la collaboration avec des plateformes communes, le jumeau numérique encourage la synergie des compétences. Les données envoyées par le jumeau numérique peuvent bénéficier à l'entreprise en interne, mais aussi en externe, à ses partenaires techniques ou commerciaux. Le jumeau numérique opère également de grandes transformations dans l'organisation des entreprises. En effet, l'interopérabilité du virtuel et du réel modifie la hiérarchie des savoir-faire et implique davantage de collaboration entre toutes les équipes (développeurs, commerciaux,

opérateurs de maintenance, assureurs, etc). À une plus large échelle, cette technologie s'inscrit dans le modèle de l'Industrie 4.0 permettant une connectivité sans frontière entre des entreprises de tous horizons.

## **5. Les compétences et technologies disponibles à Madagascar**

### 5.1. Ingénierie

Sachant que Madagascar compte actuellement une dizaine d'universités d'ingénierie accompagnée d'une vingtaine de lycées techniques à formation professionnelle, la formation ne répond pas aux demandes des étudiants, soit au niveau de méthode d'enseignement qu'au niveau des effectifs qui ne prend que 50% voire 40% des bacheliers. Sur ce, les cours offerts sont intéressants, mais ils ne sont pas à jour et les travaux pratiques sont rares. Néanmoins, avec le système LMD, les étudiants commencent à faire leur propre recherche qui est difficile à cause de l'accès restreint à l'Internet, et des bibliothèques avec des livres sur les anciennes technologies. Dans les 20 dernières années, malgré ses différentes contraintes, nombreux sont les ingénieurs et techniciens malgaches qui excellent dans les domaines suivants :

- Hydraulique et pneumatique
- Mécanique générale et analytique
- Science (maths, biologie, chimie...)
- Électricité et Électronique
- Automatisation et Robotique
- etc.

### 5.2. IT (Information technology) et TIC (Technologie d'Information et de la communication)

L'informatique à Madagascar commence à s'épanouir avec les différents emplois en offshore tels que les call centers et les mailings. En effet, les administrations réseaux, le développement web, le développement d'application mobile sont des compétences maîtrisées. Nombreux sont les Malgaches qui commencent à avoir des certificats comme CISCO. L'informatique devient une passion, que ce soit dans le domaine de l'open source (cc), ou non. Les développeurs deviennent de plus en plus curieux et visent à devenir des développeurs full-stack et commencent à découvrir l'approfondissement du Big Data et de l'intelligence artificielle avec le « machine learning » et le « deep Learning ». Sur ce, du côté des réseaux de télécommunications, les ingénieurs ont du potentiel et les infrastructures sont en phase d'amélioration.

### 5.3. Leadership Management et Gestion de projet

Le secteur tertiaire actuellement à Madagascar est en pleine expansion. Un des facteurs clés de ce progrès est le leadership, le management et la gestion de projet. On peut le prouver avec une statistique de l'INSTAT :

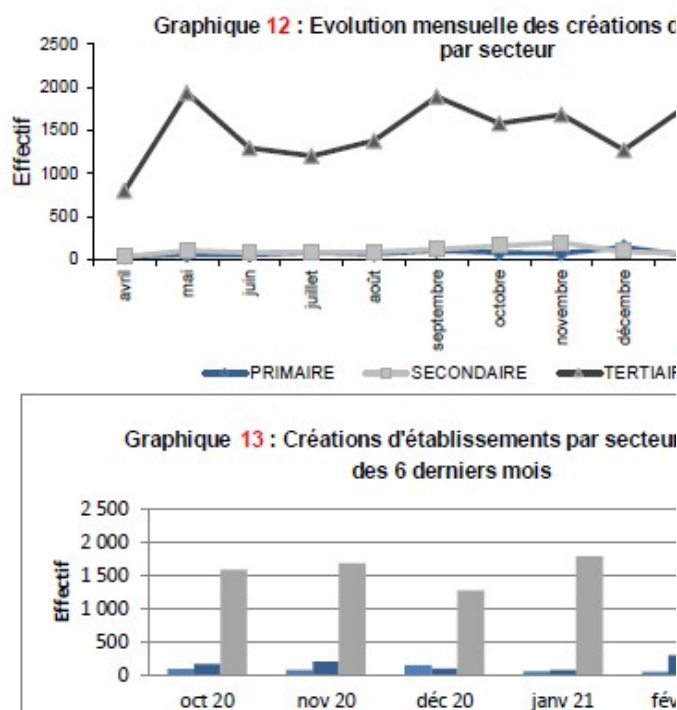


Figure 4-10 : évolution mensuelle des créations d'établissements [7]

Pendant ses 10 dernières années le leadership et le management de projet s'est répandu dans tout Madagascar, mais le secteur tertiaire l'a vraiment appliqué ainsi ils affichent les meilleurs résultats.

### 5.4. Internet

Madagascar avec l'arrivée de deux câbles fibre optique profite d'un internet haut débit de 100Mbps distribué par l'entreprise Telma. Presque les grandes villes sont actuellement équipées de cette connectivité haut débit qui assure une communication fluide et rapide. Néanmoins, pour un accès personnel, les prix sont encore exorbitants pour l'optique.

### 5.5. Cloud

Le Cloud est initialement conçu pour le stockage de données sans matériel physique. Il commence à imbriquer plusieurs services à Madagascar. Le plus grand

service ici, c'est le CRM et l'ERP, qui sont des solutions efficaces pour gérer des entreprises. Et ces logiciels imbriqués dans le cloud fonctionnent à merveille actuellement. Diverses entreprises malgaches travaillent avec des interfaces cloud actuellement :

- L'Etech en partenaire avec GoogleCloudplatform
- Madabooky (conçu et présenté par un étudiant de l'ITS-T dans le parcours GSA lors de son mémoire GSA) avec l'Amazon Web Service
- TranokalaPro en utilisant un cloud privé
- Hairun Techology avec un Cloud privé.
- Openflex avec un Cloud privé.

#### 5.6. Smart Device

Avec la mondialisation, plusieurs équipements connectés sont à disponibilité des Malgaches allant des petites pièces électroniques et les systèmes embarqués comme Arduino et Raspberry puis avec les smartphones et la réalité augmentée, et même jusqu'à la domotique et les véhicules intelligents. Ses objets étant actuellement à disponibilité de tous, les fournisseurs et les concessionnaires ne cessent de s'accroître.

#### 5.7. Réseau de communication 4G ET 5G

En effet, de nos jours, on constate une forte vulgarisation des technologies de pointe de la télécommunication dans les grandes villes comme Antananarivo, Antsirabe ou Toamasina. En définitive, en seulement quelques années, la Grande Ile a réussi à rattraper un retard de plusieurs dizaines d'années dans le domaine de la nouvelle technologie de l'information et de la communication. Et cela est dû surtout à un fort investissement des entreprises étrangères d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie qui développent leur marché à Madagascar.

## **6. Les opportunités de mise en œuvre du jumeau numérique à Madagascar**

### 6.1. Les branches d'activité clé de l'industrielle

Même si la part du PIB du secteur industriel est faible, l'industrie de Madagascar est composée de plusieurs branches d'activités qui seront listé par le tableau ci-dessous :

Tableau II-2 : Evolution du tissu industriel[7]

Evolution structurelle du tissu industriel (%)				
Code	CITI	2011	2012	2013
15	Industrie de boissons et Fabrication de produits alimentaires	12,6	16,0	28,1
16	Fabrication de produits à base de tabac	12,7	16,1	8,1
17	Fabrication de textiles	32,9	17,5	24,1
18	Fabrication d'articles d'habillements	11,8	14,3	14,1
19	Industrie des Cuirs et Chaussures	1,4	1,6	1,7
20	Industrie du Bois (sauf fabrication de meubles)	0,0	0,1	2,1
21	Fabrication de papier, de carton et d'articles en papier et carton	0,2	0,4	0,0
22	Edition et imprimerie et reproduction supports enregistrés	0,2	0,2	0,0
24	Produits chimiques -Produits pharmaceutiques - Corps Gras	5,7	3,4	3,1
25	Fabrication d'articles en caoutchouc et en matières plastiques	0,7	1,1	0,1
26	Fabrication de produits minéraux non métalliques	19,3	24,4	15,1
28	Fabrication d'ouvrage en métaux	0,4	2,4	0,1
33	Fabrication d'instruments médicaux, de précision, d'optique et d'horlogerie	0,1	0,2	0,1
36	Fabrication de meubles ; Activités de fabrication nca	1,6	1,9	0,1

Et pour mettre en évidence les différences entre chaque secteur, on a le diagramme suivant :

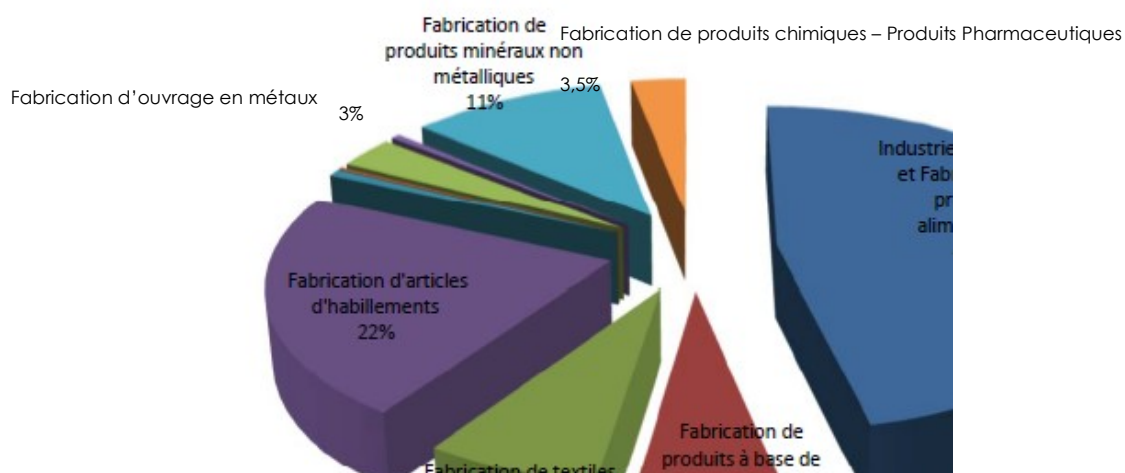


Figure II-32 : Structure du tissu industriel [7]

Ainsi, on observe que les secteurs suivants sont les plus développés :

- Industrie de boissons et fabrication de produits alimentaires
- Fabrication d'articles d'habillements et textiles
- Fabrication de produits à base de tabac.

- Fabrication de produits minéraux non métalliques

À partir de ses branches d'activités, nous pouvons recenser un fort indice de production industrielle illustrée par la figure suivante :

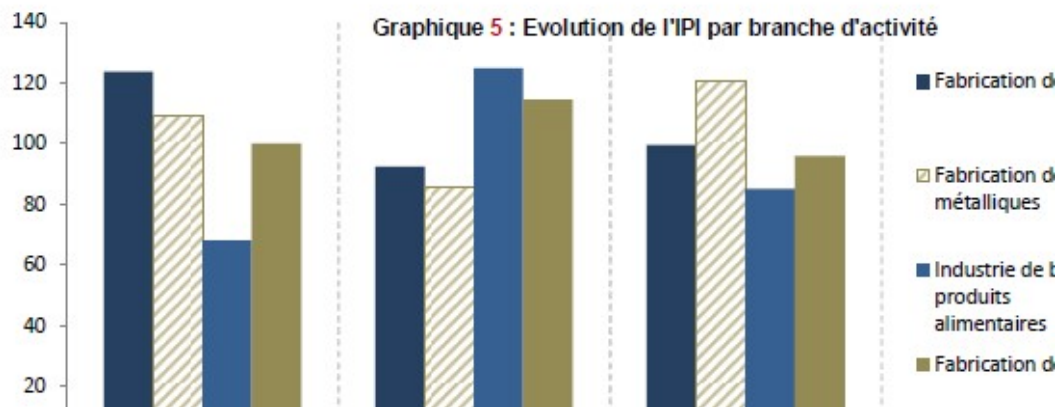


Figure II-33 : Evolution de l'indice de production Industrielle par Branche d'activité [7]

Sur ce, avec des observations sur ses branches, on peut distinguer les entreprises STAR, QMM et AMABATOVY qui sont respectivement des fabricants de boissons et de produits minéraux non métalliques. En effet, il utilise les nouvelles technologies comme l'automatisme, la robotique, le suivi de la production aux moyens de logiciels ERP.

## 6.2. Opportunité : Chantier aux jumeaux numériques

La mise en place d'un chantier aux jumeaux numériques est un grand projet pour Madagascar. Ce projet nécessite une bonne gestion et un bon leader car c'est la clé pour tout projet. En effet, vu que le jumeau est un projet très vaste et à long terme, le meilleur moyen d'y arriver est de « penser grand (opportunité), démarrer à bas échelle et élargissez efficacement en fonction des contraintes ». Ainsi compte tenue des différents technologies et compétences observés précédemment, les opportunités du jumeaux numériques à Madagascar sont :

### 6.2.1. Travaux pratiques en collaboration avec les universités et entreprises étrangères

Les jumeaux numériques sont multiplateformes et déployables au niveau des cloud. Actuellement plusieurs jumeaux sont en cours de développement chez les pays émergents de l'Industrie 4.0. Et aussi l'internet des jumeaux commence à voir le jour, c'est -à-dire l'interconnexion des jumeaux entre eux.

La formation d'ingénierie à Madagascar manque actuellement, manque de travaux pratiques, c'est-à-dire des expérimentations sur Machine. Un jumeau

représente un modèle vivant d'un équipement dans l'espace virtuel. Ainsi, pour une première utilisation du jumeau, nous pouvons trouver des coopérations et collaborations avec des universités et des entreprises étrangères pour accéder à leurs jumeaux dans le cloud. De ce fait, les étudiants peuvent expérimenter l'utilisation de plusieurs équipements sans avoir à tâtonner au moment de l'insertion professionnelle dans les industries. En contrepartie, les instituts malgaches peuvent participer à l'optimisation de ses jumeaux car ce concept est en amélioration continue visant une excellence opérationnelle.

#### 6.2.2. Jumeau des machines automatisés dans les industries

Cette opportunité peut être mise en place dans les branches des industries clés que l'on a vu précédemment. Sur ce, il faut synchroniser avec une formation des ingénieurs sur le jumeau numérique. À partir de la formation, les ingénieurs peuvent commencer par mettre en œuvre les jumeaux des composants comme les pièces de machines. Ce sera alors un environnement agréable pour l'étudiant ingénieur car il est à la fois dans le monde professionnel que dans le monde pédagogique. Ainsi, à la fin de la formation, les jumeaux numériques seront déjà opérationnels où l'entreprise en question pourra en profiter pour optimiser leur production, et favoriser la maintenance prédictive pour appréhender les différentes défaillances possibles.

#### 6.2.3. Smart city ou Smart campus

Connaissant l'existence de la télésurveillance, le réseau 5G ainsi que le projet de ports intelligents ; nous pouvons imaginer la mise en place d'un smart campus ou smart city qui est le jumeau d'une ville (d'une envergure de système de système). Pour y parvenir, nous avons des ingénieurs 3D qui excellent dans la modélisation 3D des bâtiments et de ses environnements. Puis, on peut se servir des caméras comme des capteurs pour nous fournir des données en utilisant la reconnaissance des objets. Ainsi la première application sera :

- Prévention sur les intrusions dans les villes
- Recherche des objets perdus
- Reconnaissance faciale pour les entrées de bâtiment
- Guide pour retrouver des parkings
- Tracer les accidents routiers
-

## 7. Conclusion

Le jumeau numérique est une représentation virtuelle dynamique d'un objet physique qui est unique et enrichie dans le temps de manière synchrone avec l'objet observé. Ainsi, le déploiement du jumeau procure un intérêt dans le cycle de vie d'un produit tout en améliorant les performances de ce dernier.

Compte tenu de l'émergence du jumeau numérique, Madagascar est en retard technologiquement et en déficit par rapport aux infrastructures exigées. Néanmoins quelques briques technologiques s'y sont développées comme le cloud, les réseaux 5g, l'intelligence artificielle et le big data. Ainsi, en propulsant l'utilisation efficace de ses technologies avec des compétences correspondantes, Madagascar peut réaliser un chantier de jumeau qui commence par les échanges technologiques avec les autres pays dans le but de mettre en œuvre des travaux collaboratifs qui permettront d'expérimenter le jumeau à distance via le Cloud. Ensuite, une formation des jeunes et ingénieurs sur les nouvelles technologies, effectuée en parallèle avec la réalisation des premiers jumeaux numériques malgaches dans les industries probantes favoriseront une mise en œuvre rapide.

Nous avons constaté à travers les recherches que le jumeau numérique est un concept très vaste imbriquant plusieurs nouvelles technologies qui ne sont pas encore totalement maîtrisées. L'expérimentation de la mise en œuvre présentait quelques difficultés tant au niveau des programmations que des simulations, d'où la nécessité d'une approfondissement. Il serait pertinent que Madagascar puisse déployer totalement des jumeaux dans quelques années.

## 8. Références :

- [1] N. JULIEN and E. MARTIN, *Le jumeau numérique - De l'intelligence artificielle à l'industrie agile*, Dunod. 2020.
- [2] F. HENQUET, "Digital Twin," *JobatSkillsCampus*, 2021. <https://online.jobsatskillscampus.be/courses/course-v1:Jobsaskills+CS02+2021/about>.
- [3] MathWorks, "What is Digital Twins," 2020. <https://www.mathworks.com/discovery/digital-twin.html> (accessed May 19, 2021).
- [4] N. JULIEN and E. MARTIN, *L'usine du Futur - Stratégies et Déploiement : Industrie 4.0, de l'IoT aux jumeaux numériques*. Dunod, 2018.
- [5] M. Dr. Grieves, "Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication This paper introduces the concept of a A Whitepaper by Dr . Michael



Grieves," *White Pap.*, no. March, 2014, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication).

[6] F. Tao, M. Zhang, and A. Y. C. Nee, "Digital Twin and Cloud, Fog, Edge Computing," *Digit. Twin Driven Smart Manuf.*, pp. 171–181, 2019, doi: 10.1016/b978-0-12-817630-6.00008-4.

[7] P. Trimestrielle, "Tableau de bord économique," 2021.