



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

École nationale  
Polytechnique  
Département du Génie  
Industriel



## Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie Industriel

Option : Management Industriel

---

# Vers une solution Digital Twin pour l'activité de maintenance Chez CITAL

---

*Réalisé par :*

M. ACHACHERA Khalid  
Mme. SEGHIER Chahinez

*Encadré par :*

M. HAMRI Okba (ENP)

*Soutenu le 07 Juillet 2021, Devant le jury composé de :*

Mme. NIBOUCHE Fatima : ENP - Présidente

Mme. BOUKADOUM Nadjwa : ENP - Examinatrice





المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

École nationale  
Polytechnique  
Département du Génie  
Industriel



## Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie Industriel

Option : Management Industriel

---

# Vers une solution Digital Twin pour l'activité de maintenance Chez CITAL

---

*Réalisé par :*

M. ACHACHERA Khalid  
Mme. SEGHIER Chahinez

*Encadré par :*

M. HAMRI Okba (ENP)

*Soutenu le 07 Juillet 2021, Devant le jury composé de :*

Mme. NIBOUCHE Fatima : ENP - Présidente  
Mme. BOUKADOUM Nadjwa : ENP - Examinatrice

## تلخيص:

لقد أصبحت إدارة الثروة قضية رئيسية ومهمة، وادخال نهج أكثر حداثة لإدارة الصيانة. وفي هذا السياق، نريد أن نوجه عملنا الذي يتمثل في وضع نهج لزرع التوائم لمساعدة CITAL على رصد صيانة مكونات الترامواي واستخدامها على النحو الأمثل وتحسينها. الغرض من عملنا هو التعريف بمفهوم التوائم الرقمية وإظهار أهميتها من خلال نموذج رقمي وسيناريوهات ومحاكاة ثم تطوير نهج يقوم عليها، وسيكون بمثابة خريطة طريق CITAL لتنظيم نشاط صيانة ترامواي.

**الكلمات المفتاحية:** توأم رقمي، قالب رقمي، محاكاة، صيانة.

## Abstract

Wealth management has become a key and major issue, It is important today to bring more modern approaches in the management of maintenance. It is also important to design long-lasting structures. It is in this context that we direct our work to develop a digital twins implementation approach that helps CITAL to monitor, optimize and improve the maintenance of tramway components. The aim of our work is to introduce the concept of digital twin and show it's interest via a digital model, simulation scenarios and then develop an approach that will serve as a roadmap for CITAL organizing the maintenance activity of tramway components . .

## Keywords :

Digital twins , Digital Mock-Up , Simulation, Maintenance

## Résumé

La gestion du patrimoine est devenue un enjeu primordial et majeur, Il importe aujourd'hui d'apporter des approches plus modernes dans le management de maintenance. C'est dans ce contexte que nous orientons notre travail qui consiste à développer une démarche d'implantation de jumeaux numériques aidant l'entreprise CITAL à surveiller, optimiser et améliorer la maintenance des composants de tramway. Le but de notre travail consiste à introduire le concept des DT et de montrer son intérêt via une maquette numérique produit (DMU), et des scénarios de simulations ensuite d'élaborer une approche qui servira comme une feuille de route à CITAL pour organiser l'activité de maintenance des ponts de tramway . .

**Mots clé** Jumeaux numérique , Maquette numérique , Simulation , Pont , Maintenance



## *Dédicace*

Je dédie ce projet

A la mémoire de mon père que ses mots d'encouragements raisonnent toujours dans mes oreilles.

A ma mère qui est l'exemple de la femme combattante et forte.

À toute mes frères et sœurs qui sont toujours à mes côtés

À mes camarades de classes avec qui j'ai partagé mes plus agréables années.

À mon binôme qui est l'exemple d'empathie et de patience.

A NADIA qui m'a toujours poussé à franchir mes limites.

À moi-même, qui m'accepte telle que je suis

*Chahinez*

À la mémoire de ma grand-mère **TIMA**, que Dieu l'accueille dans son vaste paradis.

À Mes chers **parents** qui se sont sacrifiés pour ma réussite, m'ont soutenu, fait confiance et cru en moi jusqu'au bout,

À ma **tante**, la femme qui m'a élevé très jeune, la femme la plus proche de mon cœur. pour avoir toujours cru en moi, et pour m'avoir soutenu dans toutes les étapes de ma vie.

À mes frères et soeurs

À ma famille

À ma deuxième famille l'équipe **COLLO**

À mes amis de **Quartier**

À ma binôme **Chahinez**

*Khalid*

# Remerciements

Louanges à **ALLAH** clément et miséricordieux.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre stage et qui nous ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous tenons tout d'abord à adresser toute notre gratitude à notre promoteur **Mr.HAMRI** qui a accepté d'encadrer ce travail et s'est toujours montré disponible et à l'écoute tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son regard critique nous a permis de structurer ce travail, et de l'améliorer au fil des jours. Ses conseils, et le temps incommensurable qu'il a bien voulu nous consacrer ont toujours suscités notre profond respect. Veuillez trouver ici, l'expression de nos gratitude sincères et de notre grande estime.

En remercie l'ensemble des employés de « **CITAL** » et plus précisément Monsieur **KARIM BELAIB**, l'encadreure de CITAL de nous avoir donner de son temps et de son énergie pour nous guider et d'apporter de son expérience professionnelle

Madame **TOUATI ANISSA** de nous avoir aider dans la rédaction

Nous voudrions exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont consacré du temps, qui nous ont apporté des conseils et des éclaircissements tout le long de la période de stage.

Nos familles, pour leur soutien constant et leurs encouragements

# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

<b>Introduction générale</b>	<b>11</b>
<b>1 Présentation d'entreprise</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction	14
1.2 Présentation de CITAL	14
1.2.1 Présentation générale	14
1.2.2 Historique	15
1.2.3 Engagement de CITAL envers ses parties prenantes :	16
1.2.4 Organisation de CITAL :	17
1.2.5 Les activités de CITAL :	18
1.2.6 Environnement industriel	19
1.3 Conclusion	20
<b>2 Etat de l'art sur le digital twin</b>	<b>21</b>
2.1 Introduction	22
2.2 Digital twin	22
2.2.1 Définition de l'industrie 4.0	22
2.2.2 Définition de digital twin	23
2.2.3 Historique	23
2.2.4 Les composants d'un Digital Twin	24
2.2.5 Niveau d'intégration	26
2.2.6 Caractéristique de digital twin	28
2.2.7 Typologie de digital twins	29
2.2.8 Les avantages de l'utilisation de jumeaux numériques	30
2.2.9 Application actuelle des jumeaux numérique dans l'industrie	30
2.2.10 Enjeux	32
2.3 DMU et DT	35
2.3.1 Le concept de maquette numérique	35
2.3.2 Caractéristique de la maquettes mise en oeuvre utilisant les jumeaux numériques	36

2.3.3	Le rôle de l'intégration de l'information dans l'écosystème des DT : . . . . .	37
2.4	Modélisation de la maquette numérique produit . . . . .	39
2.5	Analyses des défaillances . . . . .	40
2.5.1	Les méthodes d'analyse des défaillance . . . . .	40
2.6	Des notions sur la maintenance . . . . .	40
2.6.1	Définition . . . . .	40
2.6.2	Les types de maintenances . . . . .	41
2.6.3	Les niveaux de maintenances . . . . .	41
2.7	Conclusion . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Analyse des défaillances du pont de bogie de tramway</b>	<b>44</b>
3.1	Introduction . . . . .	45
3.2	Interface roue rail . . . . .	45
3.2.1	Description du tramway CITADIS 402 . . . . .	45
3.2.2	Description de la chaîne traction . . . . .	50
3.3	Les étapes de maintenances (révision de pont ) . . . . .	57
3.4	Diagnostic . . . . .	63
3.5	Énoncé de la problématique . . . . .	67
3.6	Conclusion . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Architecture d'implémentation de l'approche proposée</b>	<b>68</b>
4.1	Introduction . . . . .	69
4.2	Méthodologie Généralisée . . . . .	70
4.2.1	Concept de jumeaux numériques pour une maquette numérique produit . . . . .	70
4.2.2	Méthodologie de développement des jumeaux numériques . . . . .	72
4.3	Mise en œuvre de la maquette numérique produit : cas de pont . . . . .	78
4.3.1	La maquette de tramway . . . . .	79
4.3.2	Classification des données à intégrer dans la maquette numérique et la proposition d'approche . . . . .	82
4.3.3	Intérêt de la maquette numérique produit dans le cycle de maintenance industrielle . . . . .	83
4.3.4	Cas d'études du comportement mécanique des composants du pont . . . . .	85
4.4	Conclusion . . . . .	89
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>90</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>93</b>
	<b>Annexes</b>	<b>94</b>

# Table des figures

1	Logo de CITAL . . . . .	14
2	Les actionnaires cital . . . . .	15
3	Historique de CITAL . . . . .	16
4	La répartition des sites . . . . .	17
5	Rôle des DT pendant le cycle de vie du produit. . . . .	23
6	Démarche proposée autour du jumeau numérique . . . . .	25
7	Les éléments d'un modèle de Digital Twin . . . . .	26
8	Différence dans le niveau d'intégration. . . . .	28
9	L'évolution de la publication sur les DT dans les différents domaine au fils des années . . . . .	32
10	Définition d'une maquette numérique produit . . . . .	35
11	Opérations de fusion possibles dans le développement de jumeaux numériques . . . . .	38
12	Maquette numérique de tramway . . . . .	39
13	Maquette numérique de bogie . . . . .	40
14	Différents compartiments et dimensions du CITADIS 402 . . . . .	47
15	Implantation des bogies, moteur et porteur, du CITADIS 402 . . . . .	48
16	Organigramme de la chaine de traction . . . . .	50
17	Bogie . . . . .	52
18	Pont moteur . . . . .	53
19	Photo du moteur + plaque signalétique. . . . .	55
20	Cas de défaillance des engrenages (6DR) mécaniques du pont . . . . .	63
21	Emplacement de l'engrenage défaillant dans la partie pignonnerie du pont . . . . .	64
22	Diagrammes de ISCHIKAWA . . . . .	65
23	Processus de DT . . . . .	73
24	Le schéma de l'architecture proposée . . . . .	76
25	Maquette numérique 3D de l'ensemble du tramway : rendu réaliste . . . . .	79
26	Maquette numérique 3D de l'ensemble du tramway : modèle de CAO . . . . .	80
27	Position des bogies sur la Maquette numérique 3D du tramway : rendu réaliste . . . . .	80
28	Position des bogies sur la Maquette numérique 3D du tramway : modèle de CAO . . . . .	81
29	Bogie . . . . .	81
30	Vue éclater de Bogie . . . . .	82
31	Détection d'interférences dans le montage . . . . .	82
32	Bogie . . . . .	84
33	Cas d'études pour deux engrenages . . . . .	85

34	Tolérance de montage des deux engranges . . . . .	86
35	Tolérance de contact entre les deux engrenages est de 1.23mm . . . . .	87
36	Contraintes équivalentes de Von mises pour le premier cas de la figure précédente . . . . .	87
37	Changement de valeur des tolérances de montages . . . . .	88
38	Contraintes équivalentes de Von mises pour le premier cas de la figure9 . . . . .	88
39	Composition de la chaîne de traction . . . . .	95
40	PANTOGRAPHES . . . . .	95
41	ETF . . . . .	96
42	ONIX : Rhéostat de freinage et onduleur . . . . .	97
43	Les trois concepts de base de SW . . . . .	99
44	Les étapes pour obtenir un volume . . . . .	100
45	Assemblage des pièces . . . . .	101
46	Assemblage famille des pièces . . . . .	102
47	Les engrenages à dentures hélicoïdales . . . . .	103
48	Interface solid . . . . .	104
49	Création des cercles . . . . .	105
50	Détermination de la valeur de bossage . . . . .	106
51	Étape d'extrusion . . . . .	106
52	Esquisse de création des flancs en 2D . . . . .	107
53	Flancs de deux dents successives . . . . .	108
54	Répétition circulaire . . . . .	109
55	Engrenage en 2D . . . . .	109
56	L'extrusion d'engrenage . . . . .	110
57	La courbe de la fonction Sigmoidale . . . . .	111
58	Réseau de neurone artificiel . . . . .	111
59	Machine à vecteurs de support (SVM) : . . . . .	112

# Liste des tableaux

1	Différence dans le niveau d'intégration. . . . .	27
2	Outils d'analyse des défaillances . . . . .	40
3	Méthode d'analyse et de résolution des problèmes QQQQCP. . . . .	66
4	Les Différents données nécessaires . . . . .	83
5	Classification des engrenages . . . . .	103
6	Caractéristique d'engrenage à dentures hélicoïdales . . . . .	103
7	Caractéristique et dimension d'engrenage . . . . .	104

# Liste des abréviations

- **AI** : Artificial intelligence
- **AMDEC** :Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité
- **ANN** :Réseau de neuronal artificiel
- **DT** : Digital Twin
- **DMU** : Digital Mock-Up
- **ETF** : Équipement traction freinage
- **GRF** : Groupe de refroidissement
- **IoT** : Internet of things
- **ML** :Machine learning
- **LR** :Régression logistique
- **QQOQCP** : Qui , Quoi , Où , Quand , Comment ,Pourquoi
- **PDQ** : qualité des données sur les produits
- **PLM** : Product lifecycle management
- **SVM** : Machine à vecteur de support
- **SW** : SolidWorks
- **5P** : 5 Pourquoi



# Introduction générale

Initié par les secteurs d'aérospatial, de l'aéronautique et du secteur militaire, le concept de jumeau numérique est actuellement utilisé par divers secteurs industriels. Il a séduit toutes les entreprises bénéficiant ainsi d'une meilleure visibilité sur l'état de tout l'équipement en temps réel et la mise en place d'une stratégie d'amélioration continue. Grâce à sa mise à jour en permanence, le jumeau numérique ou le digital twin, apporte une aide non négligeable aux entreprises pour développer, concevoir et optimiser les services de maintenance.

Les dirigeants d'entreprise, les conférenciers, les pouvoirs publics et tous les acteurs économiques cherchent à l'adopter afin de s'adapter à l'environnement complexe dominé par les aléas et incertitudes provoqués par la transformation rapide dans tous les secteurs et ainsi répondre à la demande et garder sa place dans un environnement compétitif.

En Algérie, le jumeau numérique demeure un outil encore mal compris des industriels. En effet peu d'entreprises pour ne pas dire aucune ne sait exploiter cette technologie en production. Le concept de jumeau numérique s'inscrit dans le concept de l'industrie du futur. L'avantage principal de cette technologie demeure la liaison en temps réel entre les mondes virtuels et physiques. Ainsi, ils peuvent fournir à chaque instant des informations sur l'état actuel de fonctionnement du système réel auxquels ils sont reliés. C'est un élément fondamental pour évaluer l'évolution d'un système physique et identifier rapidement les dérives éventuelles par rapport à sa référence numérique.

L'entreprise Cital passe de l'assemblage des tramways à une activité centrée sur la maintenance et principalement la maintenance des ponts de bogie. Cette transformation n'a pas été sans impact et l'entreprise a vu la nécessité d'intégrer un bureau d'étude spécialisé pour faire du rétro-engineering afin de se détacher du fournisseur TEXILIS et prendre l'activité de maintenance en main. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail particulièrement dans le cadre de l'analyse des défaillances des ponts de bogie moteur du tramway CITADIS.

En raison d'absence des plans et des données techniques liées aux différents organes du tramway l'analyse des causes de défaillance du pont ne peut pas être réalisée actuellement, donc la question posée est comment aider CITAL à analyser les causes des défaillances aux niveaux des ponts de bogie ? Afin de répondre aux besoins de CITAL, nous allons introduire une approche globale basée sur la technologie digital twin. Cette approche sera basée sur le concept de la maquette numérique produit (DMU) qui va servir comme source de documentation technique et support d'organisation l'activité de maintenance et d'analyse des défaillances des différents composants du pont tout au long de son cycle de vie, et aussi un support d'optimisation et de prise de décision.

Notre contribution consiste à développer une démarche globale d'implémentation d'une solution digital twin sur la base d'une maquette numérique afin d'organiser et capitaliser le savoir-faire lié à l'activité de maintenance du pont.

Pour mener à bien nos travaux, nous avons organisé notre mémoire en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'entreprise CITAL.

Le deuxième chapitre décrit l'architecture du tramway et son fonctionnement ainsi qu'une description du pont de bogie avec un diagnostic de l'atelier de maintenance.

Le troisième chapitre présente l'état de l'art sur la technologie digital twins.

Le quatrième et le dernier chapitre mettent en relief l'intérêt des digital twins à travers un scénario de simulation de la maquette numérique produit et une méthode d'implémentation.

# **Chapitre 1**

## **Présentation d'entreprise**

## 1.1 Introduction

Dans le présent chapitre nous présenterons l'entreprise CITAL, ainsi que l'ensemble de ses activités, ses objectifs et sa vision afin d'avoir une idée globale sur son environnement industriel ce qui enrichira nos futures observations et analyses dans la partie diagnostic.

## 1.2 Présentation de CITAL

### 1.2.1 Présentation générale

CITLA est une SPA qui est née en 2011 de la volonté de l'Algérie de se doter de capacités industrielles modernes d'assemblage et de maintenance dans le domaine ferroviaire, elle est en charge de satisfaire les besoins en tramways des projets en cours et futurs en Algérie. 6 systèmes de tramway sont maintenus par CITAL : Alger depuis décembre 2010 ; Oran depuis avril 2013 et Constantine depuis juin 2013, Sidi-Bel-Abbès depuis juillet 2017, Ouargla depuis mars 2018 et Sétif depuis mai 2018. Prochainement la maintenance des tramways de Mostaganem et celle des trains grande ligne CORADIA ALGERIE seront également assurée par CITAL.



FIGURE 1 – Logo de CITAL

CITAL est certifiée ISO 9001 version 2015.

- 145 rames de tramway produites.
- Développement d'un tissu économique et industriel ferroviaire à Annaba autour de l'usine, et dans toute l'Algérie autour des centres de maintenance CITAL.
- Le recrutement de plus de 500 cadres et employés localement, qui sont formés en Europe et en Algérie, pour devenir hautement qualifiés et maîtriser les technologies de pointe.
- 3 Grands Partenaires EMA, FERROVIAL et ALSTOM.
- La Qualité au meilleur niveau mondial attestée par les certifications ISO 9001.
- L'engagement de la préservation de notre environnement attesté par les certifications ISO 14001.[8]

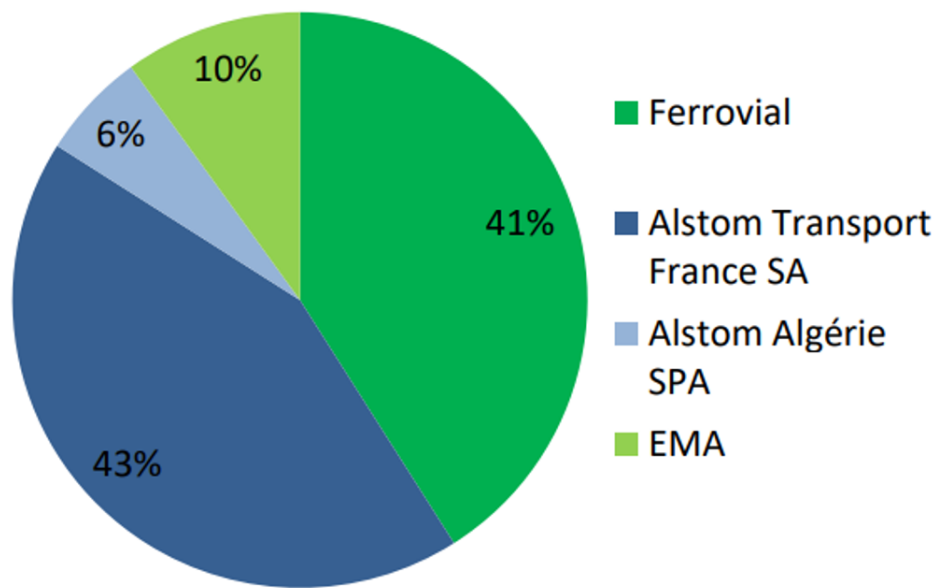


FIGURE 2 – Les actionnaires cital

## 1.2.2 Historique

Tout a commencé le 14 Novembre 2010, avec la Signature de l'accord Cadre et du Pacte d'Actionnaires. Puis le 15 Mars 2011, s'en suit la création de CITAL, l'unité d'assemblage et de maintenance de rames de tramways de type Citadis 302 et Citadis 402, en suite en 13 décembre 2012, la signature des Contrats Programmes de fourniture de matériels roulants (EMA) est effectuée. En 12 Mai 2015 on a Inauguré l'usine d'Annaba. Et le 10 Avril 2016 la signature de l'accord cadre entre Alstom, Ferroviail, EMA et SNTF pour l'extension des activités de CITAL à la famille des trains hybrides Coradia.[8]



FIGURE 3 – Historique de CITAL

### 1.2.3 Engagement de CITAL envers ses parties prenantes :

#### 1-Créer un tissu industriel national

La mission de CITAL consiste entre autres à trouver des fournisseurs sur le territoire national qui seront capables de réaliser des pièces de première main pour l'usine d'assemblage et de maintenance d'Annaba, pour cela CITAL s'appuie sur des organisations et sur des associations professionnelles telles que l'UPIAM (l'Union des Professionnels de l'Industrie Automobile et Mécanique), les CACI (les Chambres Algériennes du Commerce et de l'Industrie), ainsi que les BASTP, (les Bourses Algériennes de la Sous-traitance et de Partenariat).

CITAL fait également appel via des joint-ventures à des industriels étrangers qui s'associeront avec leurs homologues algériens.

La réussite de CITAL passera naturellement par la création d'un tissu industriel ferroviaire solide.

#### 2-Qualité

L'objectif de CITAL est d'assurer l'excellence en matière d'assemblage et de maintenance des matériels roulants ferroviaires par la qualité de ses produits et services, c'est le pari de tous les jours que se tient l'entreprise.

CITAL mène une politique de maîtrise de la qualité en amont et en aval de la chaîne de production et dans les activités de la maintenance, dans le respect optimal d'un cahier des charges strict et des contrôles clés aux différents points.

C'est grâce à l'ensemble de ces efforts que l'organisation de CITAL est conçue selon une

approche processus conformément aux normes internationales (CITAL est certifiée ISO 9001)

### 3-L'engagement HSE

CITAL affiche une politique d'amélioration continue, afin de consolider les acquis, améliorer ses résultats et assurer au personnel des conditions de travail optimales dans l'usine et sur les sites de maintenance. CITAL a opté pour une stratégie de l'intégration de l'HSE dans toutes ses activités à travers des programmes bien ciblés et la mise en place des deux systèmes de management ; environnemental ISO 14001 et de la santé et la sécurité au travail OSHAS 18001.

Afin d'y parvenir CITAL met tous les moyens nécessaires (humains et matériels) pour atteindre ces objectifs.

Enfin, CITAL, consciente des challenges présents et à venir œuvrera pour une industrie propre et veillera pour que ses fournisseurs adhèrent à ses valeurs.

### 4-Pôle ferroviaire

L'objectif est que les rames Citadis assemblées à Annaba puissent être exportées pour équiper des lignes de tramways à l'étranger.

. L'ambition de CITAL est de réaliser en outre, d'autres produits ferroviaires comme le métro, le tram train et le TGV.

Un protocole d'entente est signé pour l'extension de l'activité de CITAL à l'ingénierie, l'assemblage et la maintenance des trains grandes lignes entre les entreprises CITAL, FERROVIAL, EMA, la SNTF,

ALSTOM transport SA, et ALSTOM Algérie lors des travaux du 3ème Comité intergouvernemental algéro-français de haut niveau (CIHN).

## 1.2.4 Organisation de CITAL :

CITAL comprend 6 sites de maintenance en service et l'usine de Annaba ou on a effectué le stage



FIGURE 4 – La répartition des sites

• **site de Annaba :** L'activité principale de l'usine de ANNABA reposait sur le montage des ensembles et sous-ensembles constituant les rames de tramways de la gamme Citadis .Les ateliers de Annaba ont aussi des activités de maintenance, mutualisées avec les 6 dépôts de maintenance de tramway qui sont : ALGER CST ORN SID OUA STF et future MTA

Leur principal objectif est d'absorber plusieurs activités de maintenance niveau 3 et 4 en réparation et en révision ou les opérations de réparation suite aux accidents et vandalisme

**Description générale du site :**

- Localisation : route ELHADJAR, EL BOUNI ANNANA
- Surface globale :52 000m<sup>2</sup>
- Surface bâtie : 11 871m<sup>2</sup>
- Capacité de production :05 rames / mois.

**L'usine :**

1. Bâtiment d'Essai
2. Bâtiment Principal
3. Bâtiment Administratif
4. Poste de Garde
5. Poste de Livraison et Sous station Electrique
6. Atelier de maintenance
7. Remisage des rames
8. Voie d'essai

## 1.2.5 Les activités de CITAL :

### Production

CITAL assemble les rames de tramways CITADIS à la ville d'Annaba sur une superficie de 5,2 ha. L'usine dispose d'une capacité de livraison de 5 Rames de Tramways / mois avec une charge de production stabilisée, cohérente avec celle d'autres unités d'ALSTOM.

L'usine de production est dotée de tous les équipements d'assemblage, de tests et d'essais permettant de réaliser les tests dynamiques de type et de série.

Le centre d'essais est doté entre autre d'une voie de 1000 mètres équipée d'un système d'alimentation ultramoderne.

### Maintenance

L'une des activités principales de CITAL est la maintenance, aussi chaque ville équipée d'un système tramway sera dotée d'un centre de maintenance dans lequel seront effectuées toutes les prestations de maintenance.

Ces prestations sont nécessaires à la fois pour assurer la disponibilité des rames mais également la bonne image des tramways.

- 06 Systèmes maintenus par CITAL :

- Alger depuis décembre 2010 : 41 rames + le Système de Tramway et l'Infrastructure.
- Oran depuis avril 2013 : 30 rames + le Système de Tramway et l'Infrastructure.



- Constantine depuis juin 2013 : 27 rames + le Système de Tramway et l'Infrastructure.
- Sidi-Bel-Abbès depuis juillet 2017 : 30 rames + le Système de Tramway et l'Infrastructure
- Ouargla depuis mars 2018 : 23 rames + le Système de Tramway et l'Infrastructure
- Setif depuis mai 2018 : 26 rames + le Système de Tramway et l'Infrastructure

Il est rappelé que toutes ces activités seront réalisées par des équipes locales et donc CITAL contribue de manière directe au développement des régions en Algérie

### Ingénierie

Cital est à l'origine de la création d'un pôle à Annaba consacré à l'industrie ferroviaire, elle a pour ambition de construire le premier pôle algérien en fédérant les acteurs de l'industrie ferroviaire et en mettant à disposition des équipements et des plateformes d'ingénierie uniques en Algérie

une voie d'essais ferroviaires, une piste d'essais tramway, un bancs d'essais statique, ainsi qu'un centre de formation d'excellence en collaboration avec nos partenaires.

Au niveau de la maintenance des systèmes Tramway, une plateforme additionnelle est mise en place, elle fait prévaloir l'esprit d'initiative afin de contribuer à l'action d'intelligence collective dans le domaine d'ingénierie pour contribuer ainsi au développement de l'entreprise et faire face aux différentes problématiques techniques et des travaux d'innovation.[8]

## 1.2.6 Environnement industriel

CITAL-ANNABA est situé à Route d'El Hadjar, El Bouni, Annaba, elle a une surface globale de 52 000m<sup>2</sup> et comprend des plusieurs ateliers :

- **Atelier d'assemblage** a ce niveau on fait l'assemblage des rames de tramway CITADIS, elles viennent du port de ANNABA assemblé à 75%, et c'est au niveau de cet atelier que l'assemblage se finalise à 100% on compte 213 Rames de Tramways CITADIS assemblées jusqu'à présent.
- **Atelier révision Bogie** : il Comprend les opérations majeures, de maintenance des bogies du tramway et particulièrement les opérations réalisées sur expertise
  - \* LA RÉPARATION DES PONTS
 Afin d'assurer la maintenabilité et la disponibilité des ponts, Cet atelier constitue un atout majeur, de forte valeur ajoutée pour Annaba et les autres sites de CITAL  
 Une activité innovante, Fondée sur une stratégie de localisation et de partage de compétences entre le fournisseur des ponts TEXELIS et CITAL
- **Atelier d'étanchéité** c'est au niveau de cet atelier qu'on vérifie l'étanchéité et les vitres des rames ainsi que leur entretien.
- **Banc et voie d'essais dynamique** on le met en marche sur un rail, on fait des essais ou on simule l'environnement de son exploitation pour approuver sa conformité, on simule toutes les conditions d'exploitation : pluie, vent fort et on vérifie son opérabilité.
- **Atelier révision freinage** : Doté d'un BANC d'essai, le premier en Afrique , pour la révision des équipements de freinage du tramway, Cet atelier assure actuellement la maintenance des équipements de freinage de type KNORR, configuration principal du projet ALGER ;Cet Atelier, a acquis un deuxième BANC d'essai pour la maintenance des équipements de freinage de configuration FAIVELEY, planifié très prochainement pour la flotte de tramway hors Alger.
- **Atelier réparation vitrage** : Consiste au remplacement du vitrage des BAIE et des portes

des tramway suite accident/ vandalisme

- **Atelier révision compresseur** : Cet atelier assure les révisions 120000 KM et le traitement des correctifs liés aux pannes des compresseurs du tramway
- **Atelier réparation . Pantographe** cet atelier n'est pas encore opérationnel, il assure la réparation des pantographes l'organe qui connecte la rame au caténaire pour l'alimenter en énergie .

### 1.3 Conclusion

la présentation de cital et plus précisément le site de Annaba ont été effectués

Afin de situer l'entreprise et son champ d'action, cela nous a servis durant notre stage à poser les bonnes questions pour mieux cerner la problématique ultérieurement.

## **Chapitre 2**

### **Etat de l'art sur le digital twin**

## 2.1 Introduction

Le couplage entre le modèle physique et le modèle virtuel (maquette numérique produit) permet de simuler en temps réel les différents comportements (physique, mécanique, ...) d'un système mécanique donné (ou un produit).

L'industrie l'utilise pour surveiller, maintenir et optimiser ses machines et ses produits.

Classé parmi les dix grandes tendances technologiques stratégiques selon Gartner, le jumeau numérique s'installe progressivement dans le paysage industriel mondial. Si, aujourd'hui, peu d'entreprises exploitent encore cette technologie en production, les deux tiers de celles ayant une stratégie dans l'internet des objets (IoT) devraient la mettre en place d'ici à 2022, selon le cabinet de conseil.[19]

Dans ce chapitre on va aborder une partie de l'état de l'art en plus des détails sur la technologie de jumeau numérique ou digital twin :sa définition, historique, domaine d'application. Ainsi la définition de la maquette numérique et son intérêt dans le domaine de la maintenance industrielle.

## 2.2 Digital twin

### 2.2.1 Définition de l'industrie 4.0

Aujourd'hui, la nouvelle génération d'usines connectées, robotisées et intelligentes est connue sous le nom de l'industrie 4.0. Il s'agit de la nouvelle révolution numérique interconnectant le monde physique et le monde digital donnant aux machines, aux produits et aux collaborateurs la possibilité d'interagir entre eux. [11]

Apparu en 2011 pour la première fois au forum mondial de l'industrie de Hanovre naissant d'une réflexion allemande, le concept de « Industrie 4.0 » ou « Industrie du futur » a défini une nouvelle façon de voir les moyens de production pour faire face aux nouveaux défis, en utilisant de nouvelles technologies, créant de nouveaux business modèles pour tendre à une transformation dite digitale.[11]

Cette révolution a pour objectif de travailler avec un niveau d'automatisation élevé assurant ainsi une efficacité et une efficacité de la production et une réduction des coûts. Les entreprises travaillent ensemble dans un écosystème digital avec les fournisseurs et les clients. L'idée principale est d'exploiter le potentiel des nouvelles technologies et concepts comme l'utilisation de l'internet des objets, l'intégration de nouveaux processus techniques, la migration vers « smart factory » . L'Industrie 4.0 prend appui sur la communication en temps réel pour surveiller et agir sur les systèmes physiques. Son déploiement requiert une intégration de différents savoir-faire propres aux technologies numériques.[11]

Diverses stratégies nationales de développement industriel ont emboîté le pas de l'Allemagne, qui dès 2011 mettait en place le projet « Industrie 4.0 ». On voit ainsi apparaître « l'usine du Futur » en France, « usine intelligente » au Japon, « High value manufacturing Catapult » au Royaume Uni, « La fabbrica Del futuro » en Italie, « Advanced manufacturing partnership » aux États Unis, ou encore le projet « Made in China 2025 » en Chine. Ces efforts abordent différentes perspectives portant sur l'émergence de nouveaux processus, produits et services.

## 2.2.2 Définition de digital twin

Les jumeaux numériques ( DT ) peuvent être définis comme des machines (physiques et/ou virtuelles) ou des modèles informatisés qui simulent, reflètent ou « jumellent » la vie d'une entité physique, qui peut être un objet, un processus, un être humain, ou un exploit lié à l'être humain. Chaque DT est lié à son jumeau physique grâce à une clé unique, identifiant le jumeau physique, et donc permettant d'établir une relation bijective entre le DT et son jumeau. Un DT est plus qu'un simple modèle ou une simulation. Un DT est un vivant, intelligent et un modèle évolutif, étant la contrepartie virtuelle d'un entité ou un processus. Il suit le cycle de vie de son jumeau physique pour surveiller, contrôler et optimiser ses processus et ses fonctions. Il prédit en permanence les états futurs (par exemple, les défauts, dommages, défaillances), et permet de simuler et de tester de nouvelles configurations, afin d'appliquer de manière préventive les opérations de maintenance. Plus précisément, le processus de jumelage est autorisé par l'interaction continue, la communication et la synchronisation (optimisation en boucle fermée) entre le DT, son jumeau physique et l'environnement extérieur[5]

### Phases du cycle de vie du produit

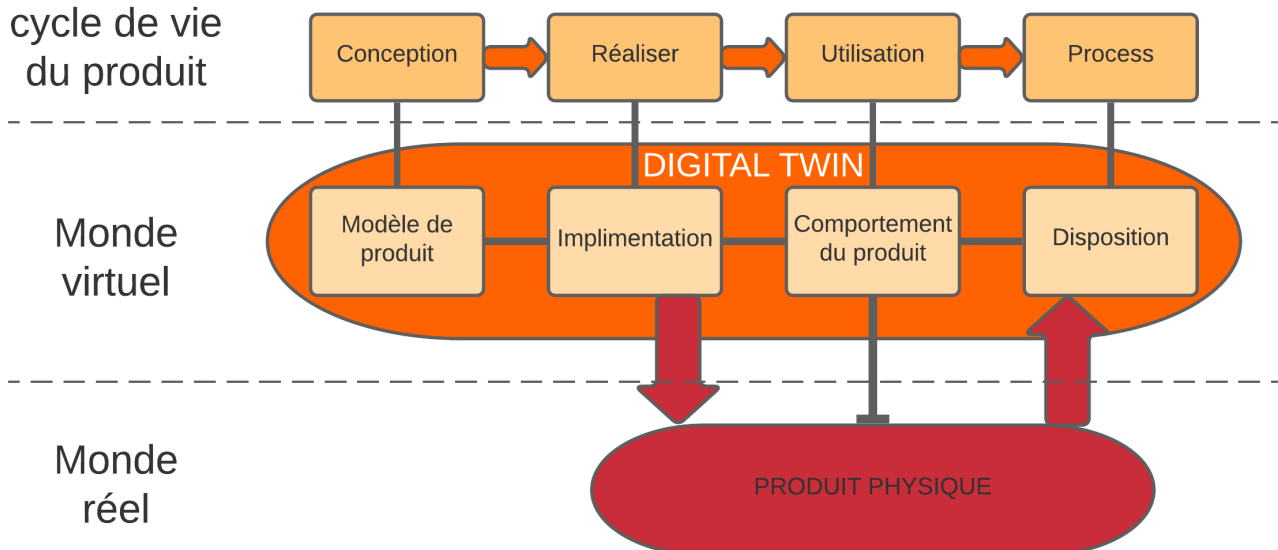


FIGURE 5 – Rôle des DT pendant le cycle de vie du produit.

## 2.2.3 Historique

Le concept de la Digital Twin a été introduit pour la première fois en 2002 lors d'une présentation de l'Université du Michigan dans un centre de formation de gestion du cycle de vie des produits ou product lifecycle management (PLM).

L'Université de Michigan a utilisé ce modèle conceptuel en 2002 dans ses premiers cours de PLM pour cadres. Il a été référencé comme modèle spatial miroir et référencé dans un article de

revue. Dans le livre PLM, Gestion du cycle de vie des produits : Conduire la prochaine génération de la pensée Lean, le modèle conceptuel appelé modèle miroir d'information [13] Le concept était largement étendu dans *virtually perfect : Driving innovative and lean products through product lifecycle management* Space Coast Press, 2011.

Le terme, Digital Twin est utilisé pour décrire le modèle. À ce moment-là, le jumeau numérique obtient assez d'attention de la part de l'industrie et le domaine académique. Boschert et Rosen ont considéré le concept des jumeaux numériques comme une modification des approches existantes dans la modélisation et la simulation de systèmes par l'utilisation des données et des informations de produits réels [6] Dans les premiers stades du jumeau numérique, il a englobé l'ensemble du cycle de vie du produit "du berceau au berceau". Il s'agissait donc d'une description holistique fondée sur un modèle d'un produit pour les étapes actuelles et futures du cycle de vie.

Plus tard, le concept du digital twins continue pour ensuite optimiser l'utilisation des produits et services et les activités de maintenances pour l'usine de fabrication.

Pendant l'entretien du produit, la surveillance de l'état et le soutien des opérations/services en tenant compte de toutes les données historiques disponibles et les modèles (p. ex., tels qu'ils ont été fabriqués et entretenus) se trouvent au centre d'intérêt.

Le jumeau numérique a été utilisé dans différentes industries sur une portée limitée. Nikolakis et al. Proposé une étude qui propose une approche numérique double dans le cadre d'un système cyber physique plus vaste (CPS) qui permet l'optimisation des processus de la planification et la mise en service de la production humaine en utilisant des approches basées sur la simulation[23]

Schroeder et al. ont proposé l'utilisation de AutomationML aux attributs de modèle liés à DT et ont constaté que ce modèle était très utile pour l'échange de données entre différents systèmes connectés avec DT [28]. Moreno et al ont présenté le processus pour construire un DT pour une machine de poinçonnage de tôle, Luo et al. ont présenté une méthode de modélisation où on utilise la stratégie de DT pour la machine CNC. Ils ont fourni une démonstration du concept de DT dans l'ère de la machine-outil CNC [22]. Sur un autre article, Botkina et coll. ont démontré une étude sur jumeau numérique d'un outil de coupe. DT est représenté comme une réplique numérique d'un outil physique, ses données format et structure, flux d'information et gestion des données, ainsi que pour des applications et des analyses de productivités ultérieures [7]. Liu et coll ont présenté le processus de mise en œuvre détaillée de la méthodologie DT proposée pour les parties clés du moteur diesel marin. Ils ont mentionné le manque de recherche dans la réalisation de la planification numérique de processus intelligents à double base pour les produits complexes [21].

De nombreuses grandes entreprises telles que PTC, ANSYS, GE et Siemens ont également exploré d'autres applications sous la années, le jumeau numérique se concentre sur les applications générales et spécifiques qui ne visent pas une étape du cycle de vie. Plutôt, le jumeau numérique se concentre sur l'intégration, la représentation virtuelle à l'exemple, et la réplique d'objets physiques.

En résumé, les concepts numériques jumeaux sont susceptibles de passer par d'autres révolutions et devenir plus pertinents au cours de la prochaine décennie.

## 2.2.4 Les composants d'un Digital Twin

### 1. L'environnement physique :

L'environnement physique est la base du développement d'un DT, généralement les objets inclus dans la plupart des études sont des produits fabriqués comme les véhicules, les avions et les imprimers 3D, l'intérêt majeur réside dans le fait que le DT n'est pas limité par l'objet lui-même mais souvent prend en considération l'environnement et ses interactions. si le DT est créé pour l'optimisation d'un processus de fabrication, donc le but du DT dans le cycle de vie du produit doit être spécifié.

## 2. L'espace virtuel :

L'espace virtuel est la première phase de création d'un DT qui intègre une représentation du modèle 3D de l'objet physique, contenant la modélisation géométrique de l'objet physique, les travailleurs virtuels et l'environnement virtuel dans lequel le produit est intégré. L'utilisateur doit modéliser et analyser celle du produit 3D dans l'espace physique et simuler cela dans l'espace virtuel, y compris les mouvements des travailleurs et des produits et comment ils interagissent. L'utilisateur doit également définir les attributs et les propriétés du produit et les règles de fonctionnement correspondantes dans le monde physique, puis les simuler dans l'espace virtuel, une fois que tous ces aspects ont été intégrés avec succès dans l'environnement du DT, la représentation virtuelle est considérée comme complète.

## 3. Intégration de l'information

L'information recueillie auprès des sources physiques (des fournisseurs, du produit lui-même, les changements organisationnels) seront analysés et intégrés au DT pendant la phase d'intégration des données. Ces données doivent être analysées et intégrées de façon transparente dans le DT, par exemple, un DT d'inventaire devrait comprendre la quantité de stock restant dans l'atelier comme des objets physiques et être en mesure de traduire cette information pour assurer le suivi des stocks à jour. C'est l'étape où les données du monde réel sont intégrées avec des représentations virtuelles pour créer un DT.

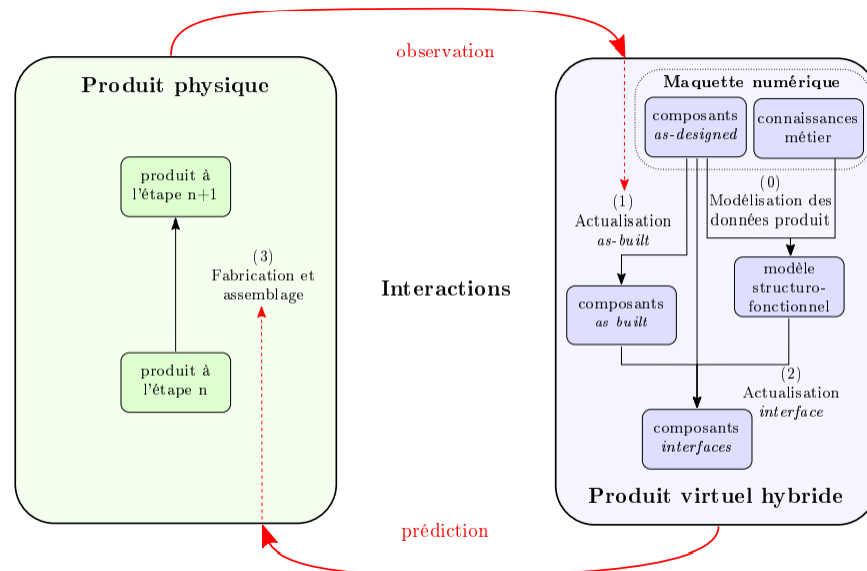


FIGURE 6 – Démarche proposée autour du jumeau numérique

## les éléments d'un modèle de Digital Twin

La figure présente ci-dessous représente un processus de fabrication réel et son jumeau numérique virtuel ainsi que les éléments qui les composent et les relie [24], nous citons :

- **Les capteurs** : qui permettent au jumeau numérique de récolter les données en temps réel afin de reproduire le même comportement que le processus de fabrication.
  - **Les données** : récoltées en temps réel ainsi que les données opérationnelles de l'entreprise, on peut retrouver même les dessins techniques, les données externes sont combinées.
  - **Intégration des données** : communiquées par les capteurs au monde numérique grâce à la périphérie, les interfaces de communication et la sécurité.
  - **Analyse des données** : au moyen de simulation et de visualisation par le jumeau numérique.
- [24]

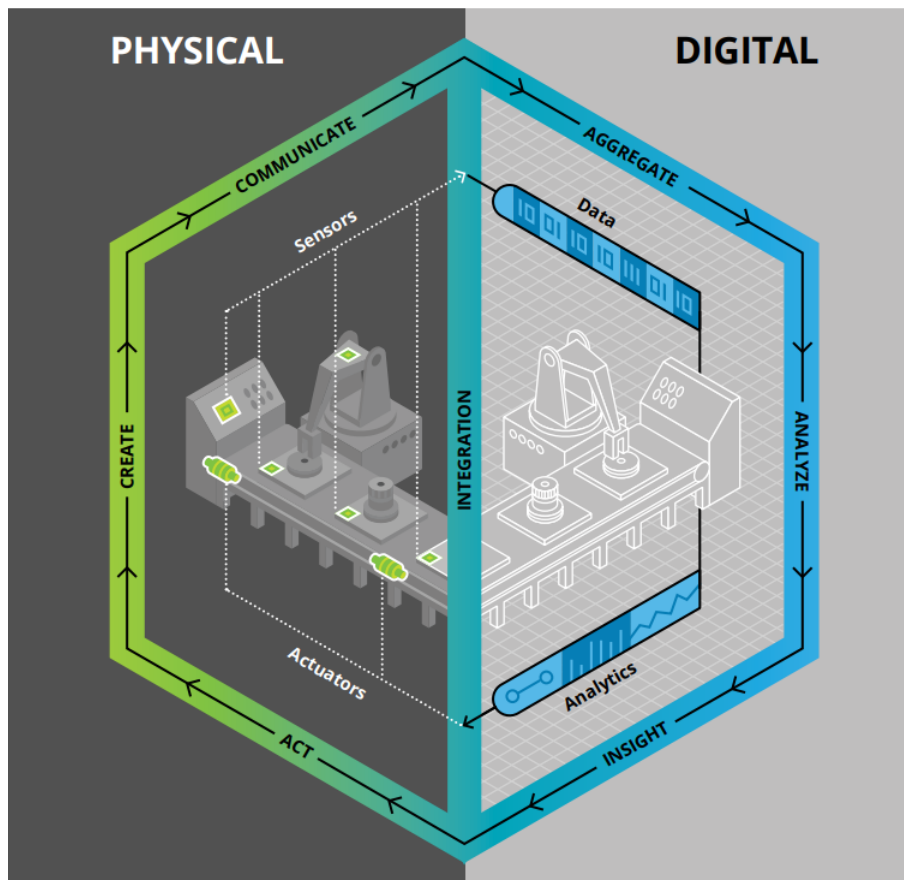


FIGURE 7 – Les éléments d'un modèle de Digital Twin

**Actionneurs** Le jumeau numérique va produire la même action que le modèle réel au moyen des informations transmises par les actionneurs.

## 2.2.5 Niveau d'intégration

Sur la base des définitions données d'un jumeau numérique dans n'importe quel contexte, on pourrait identifier une compréhension commune des jumeaux numériques, en tant que contreparties



numériques d'objets physiques. Dans ces définitions, les termes Digital Model, Digital Shadow et Digital Twin sont souvent utilisés comme synonymes. Cependant, les définitions données diffèrent dans le niveau d'intégration des données entre l'homologue physique et numérique. Certaines représentations numériques sont modélisées manuellement et ne sont liées à aucun objet physique existant, tandis que d'autres sont entièrement intégrées à l'échange de données en temps réel. Par conséquent, les auteurs souhaitent proposer une classification des jumeaux numériques en trois sous-catégories, en fonction de leur niveau d'intégration des données. [17]

<b>Termes</b>	<b>Niveau d'intégration</b>
Digital model	Un modèle numérique est une représentation numérique d'un objet physique existant ou planifié qui n'utilise aucune forme d'échange de données automatisé entre l'objet physique et l'objet numérique.
Digital shadow	Sur la base de la définition d'un modèle numérique, s'il existe en outre un flux de données unidirectionnel automatisé entre l'état d'un objet physique existant et un objet numérique, on pourrait se référer à une telle combinaison comme ombre numérique. Un changement d'état de l'objet physique entraîne un changement d'état de l'objet numérique, mais pas l'inverse.
Digital twin	Si, en outre, les flux de données entre un objet physique existant et un objet numérique sont entièrement intégrés dans les deux sens, on pourrait l'appeler Digital Twin. Dans une telle combinaison, l'objet numérique pourrait également agir comme instance de contrôle de l'objet physique. Il peut également y avoir d'autres objets, physiques ou numériques, qui induisent des changements d'état dans l'objet numérique. Un changement d'état de l'objet physique entraîne directement un changement d'état de l'objet numérique et inversement.

**TABLE 1** – Différence dans le niveau d'intégration.

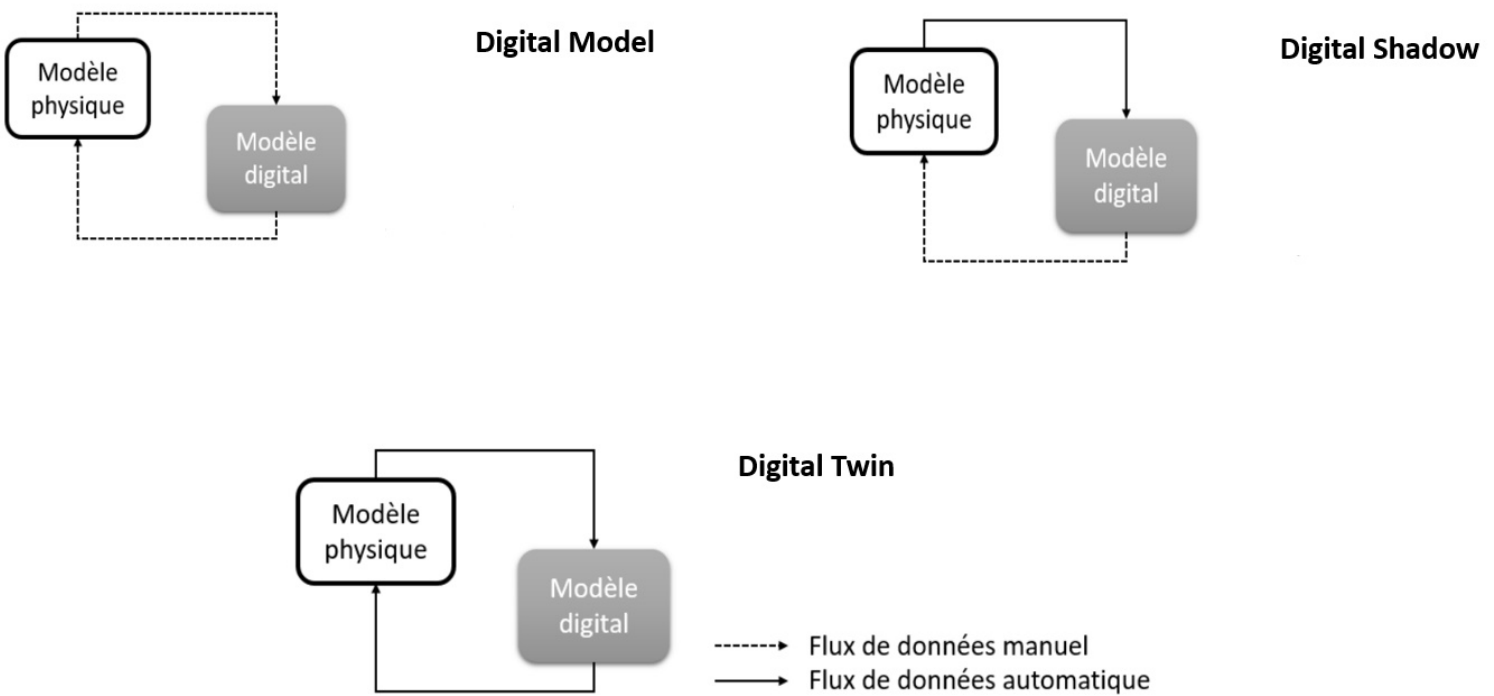


FIGURE 8 – Différence dans le niveau d'intégration.

### 2.2.6 Caractéristique de digital twin

**ponctualité** : un jumeau numérique reflète son jumeau physique en temps réel (proche), ce qui signifie que les changements d'état de l'objet physique sont (immédiatement) détectés et synchronisés avec son jumeau numérique.

**Fidélité** : la fiabilité et la sécurité d'un jumeau numérique doit être incontestable, permettant de faire confiance aveuglément à son Jumeau numérique pour prendre la décision.

**Intégration** : un Digital Twin intègre des données provenant de différents aspects de l'objet physique et assure la convergence dans un format cohérent.

**Intelligence** : Les jumeaux numériques ne représentent pas seulement des données d'objets, mais comprennent aussi des algorithmes qui décrivent, analysent ou prédisent le comportement de leurs jumeaux physiques.

**complexité** : les jumeaux numériques peuvent refléter différents types d'objets physiques, y compris les produits, les composants, les sources, les composants et les processus vivants et non vivants.

Entre autre, les jumeaux numériques peuvent envisager de multiples objectifs interdépendants ainsi que des sous-systèmes à différents niveaux de granularité. [30]

## 2.2.7 Typologie de digital twins

L'accent de Digital Twins est mis sur la phase d'utilisation du cycle de vie (Fig. 2) dans lequel les jumeaux numériques sont connectés à leurs jumeaux physiques. Au cours de cette phase, les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour décrire l'état des objets, prescrire les états souhaités, prévoir les états futurs et corriger à distance l'état des objets réels.

En conséquence, nous avons défini une typologie de jumeaux numériques :

**Imaginary Digital Twin** : une entité conceptuelle qui représente un objet qui n'existe pas encore dans la vie réelle. Il définit les informations nécessaires pour matérialiser son jumeau physique, y compris par exemple les exigences fonctionnelles, les modèles de produits 3D, les spécifications des matériaux et des ressources, les modèles de production et les spécifications d'élimination et de recyclage, les jumeaux imaginaires peuvent également simuler le comportement d'objets conçus et non encore existants dans les normes de tolérance.

**Monitoring Digital Twin** : une représentation numérique de l'état actuel, du comportement et la trajectoire d'un objet physique de la vie réelle. Il est (proche) en temps réel de son jumeau physique et sert à surveiller sa condition, son fonctionnement et son environnement externe. Un monitoring Digital Twin peut être à la fois descriptif, fournissant un aperçu de ce qui se passe ou avec l'objet physique, et faire le diagnostic, expliquer pourquoi cela se produit ou s'est produit en reliant l'objet à des données contextuelles.

**Predictive Digital Twin** : une projection numérique des états futurs et comportement des objets physiques à l'aide d'analyses prédictives, comme les méthodes de prévision statistique, de simulation et d'apprentissage automatique. La prévision est effectuée de façon dynamique à partir des données en temps réel (presque) du jumeau physique.

**Prescriptive Digital Twin** : un objet numérique intelligent qui ajoute de l'intelligence pour recommander des actions correctives et préventives sur la vie réelle des objets généralement basés sur des algorithmes d'optimisation et des techniques d'experts. Les jumeaux prescriptifs utilisent les résultats de la surveillance et de la prévision des jumeaux pour suggérer les mesures à prendre afin d'atteindre un résultat favorable. Les décisions et actions recommandées sont toujours prises par les humains, qui déclenchent également l'exécution d'interventions à distance ou sur site.

**Twin numérique autonome** : commande de manière autonome et complète le comportement d'objets réels sans intervention humaine sur place ou à distance. Les jumeaux autonomes peuvent également devenir des systèmes auto-adaptatifs capables d'apprendre sur leur environnement, auto-diagnostiquer leurs propres besoins de service et s'adapter aux préférences de l'utilisateur.

**Récollecion Digital Twin** : maintient l'historique complet de l'objet physique, qui n'existe plus dans la vie réelle. En tant que tel, se rappeler des jumeaux éliminés de la vie réelle. Ce type de Jumeaux numériques est souvent négligé dans la littérature, mais il est de plus en plus important pour réduire l'impact environnemental des éliminations et l'optimisation des objets de nouvelle génération.

On devrait remarquer que les propriétés énumérées ci-dessus ne sont pas indépendantes et un jumeau numérique n'appartient pas nécessairement à une catégorie, mais peut combiner des caractéristiques de différents types.

## 2.2.8 Les avantages de l'utilisation de jumeaux numériques

[29]

### 1. **Évaluation des risques et temps de production accélérés**

Avec l'aide d'un jumeau numérique, les entreprises peuvent tester et valider un produit avant même qu'il n'existe dans le monde réel. En créant une réplique du processus de production planifié, un jumeau numérique permet aux ingénieurs d'identifier toute défaillance du processus avant que le produit ne passe en production. Les ingénieurs peuvent perturber le système pour synthétiser des scénarios inattendus, examiner la réaction du système et identifier les stratégies d'atténuation correspondantes. Cette nouvelle capacité améliore l'évaluation des risques, accélère le développement de nouveaux produits et améliore la fiabilité de la ligne de production.

### 2. **Maintenance prédictive**

Étant donné que les capteurs IoT d'un système jumeau numérique génèrent des données volumineuses en temps réel, les entreprises peuvent analyser leurs données pour identifier de manière proactive tout problème au sein du système. Cette capacité permet aux entreprises de planifier plus précisément la maintenance préventive, améliorant ainsi l'efficacité de la ligne de production et réduisant les coûts de maintenance.

### 3. **Surveillance à distance en temps réel**

Il est souvent très difficile, voir impossible, d'obtenir une vue approfondie en temps réel d'un grand système physique. Cependant, un jumeau numérique est accessible n'importe où, permettant aux utilisateurs de surveiller et de contrôler les performances du système à distance.

### 4. **Meilleure collaboration en équipe**

L'automatisation des processus et l'accès 24h/24 et 7j/7 aux informations système permettent aux techniciens de se concentrer davantage sur la collaboration entre les équipes, ce qui améliore la productivité et l'efficacité opérationnelle.

### 5. **Meilleure prise de décision financière**

Une représentation virtuelle d'un objet physique a la capacité d'intégrer des données financières, telles que le coût des matériaux et de la main-d'œuvre. La disponibilité d'une grande quantité de données en temps réel et d'analyses avancées permet aux entreprises de prendre des décisions meilleures et plus rapides quant à savoir si les ajustements à une chaîne de valeur de fabrication sont financièrement sains.

## 2.2.9 Application actuelle des jumeaux numérique dans l'industrie

Les DT attirent l'intérêt de différents secteurs d'activité tels que la conception de produits, la logistique, la fabrication et la maintenance. En outre, les DT peuvent être utilisés pour augmenter les niveaux d'efficacité et d'automatisation de la fabrication, de la maintenance et du service après-vente.

plusieurs cas d'application de Digital Twin émergent, et ils sont principalement regroupés dans trois domaines : fabrication (qui comprend également l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles, MBSE), l'aviation et les soins de santé.

### 1. **FABRICATION**

Plusieurs travaux dans le domaine de la fabrication exploitent le DT pour optimiser tous les aspects du processus de fabrication des produits et du cycle de vie. Parmi eux on cite le travail de Rosen et coll qui soulignent que l'utilisation des DT permet de développer un système informatisé de supervision de chaque étape de la fabrication par une approche modulaire. Précisément, les auteurs proposent une approche modulaire Smart Manufacturing ,où les modules autonomes exécutent des tâches de haut niveau sans le contrôle humain, décidant parmi un ensemble d'actions alternatives ,et répondant aux défaillances ou aux événements imprévus sans affecter le travail d'autres modules (évitant ainsi les changements et la réorganisations au niveau de la supervision). À cette fin, les modules doivent avoir accès à des informations très réalistes, décrire l'état actuel du procédé et des produits. On arrive à cela en utilisant des répliques virtuelle fidèles de l'entité physiques, c.-à-d. un DT. Dans le scénario illustré, les DT permettent une communication continue entre le système et l'objet physique. Bien que soulignant son potentiel dans le domaine de la fabrication, le travail de Rosen .[27]à l'ensemble se référant à la DT comme un modèle ou une simulation réaliste avec la capacité de communiquer en permanence avec son jumeau physique, ce qui est une façon trop simpliste de le décrire. Les TD ne doivent pas être confondu avec les simulations ou avec les avatars produits par des applications de réalité virtuelle/augmentée, ce qui rend une simulation modèle ou (Produit) Avatar a DT est l'intelligence artificielle et les données continues (ou au moins périodiques) donc un échange en temps réel entre le modèle physique et son compteur virtuel. De plus, le DT doit être développé en intégrant le connaissances fournies par des experts humains et par des experts réels (historiques) données recueillies par les systèmes actuels et passés . Essentiellement, les TD sont des simulations particulières, plus précisément conçu pour leur fins , qui évoluent avec le système réel, pendant tout le cycle de vie.

## 2. AVIATION

Alors que la technologie DT dans la fabrication est appréciée pour la maintenance préventive [30] et pour sa capacité à optimiser et accélérer la production , dans le domaine de l'aviation la DT est principalement utilisé comme un moyen de prévision dans la maintenance . ex., détecter des changements dangereux dans l'aéronef structurel et déclencher des mécanismes d'auto-correction-aide à la décision, optimisation et diagnostique .

Dans les travaux de Yang et al. [31], les auteurs décrivent un avion DT exploitant une méthode de suivi automatique des images pour obtenir des renseignements sur la déformation de la pointe de la fissure et le comportement de croissance des fissures de l'alliage d'aluminium et de l'acier Les informations acquises permettent au modèle DT de prévoir les mécanismes de croissance des fissures de fatigue sous-cycle des matériaux de l'aéronef durant tout le cycle de vie de l'aéronef, ce qui permet de réduire le coût et le temps du développement et de l'entretien.

## 3. SOINS DE SANTÉ

Dans le contexte des soins de santé, les TD ont d'abord été utilisées pour la maintenance prédictive des dispositifs médicaux et l'optimisation de leur performance (en termes de vitesse d'examen et consommation d'énergie). D'autres applications de la technologie DT concernent l'optimisation du cycle de vie des hôpitaux. Exemples de Les TD appliquées à l'optimisation de la gestion des hôpitaux sont développé par GE Healthcare. Cette grande entreprise vise à concentrer sa plateforme d'analyse prédictive et ses applications d'IA sur la transformation de données patient importantes et variées dans l'intelligence exploitable.

L'objectif final est d'aider les hôpitaux et les associations gouvernementales dans la gestion et la coordination des soins aux patients sociale et de la population. par exemple : en s'appuyant sur les applications d'intelligence artificielle médicale, GE Health Care a développé un « Capacity Command Center » qui applique des simulations et des analyses pour une meilleure prise de décision [26] dans l'hôpital Johns Hopkins à Baltimore. En construisant un DT des trajectoires des patients, l'hôpital prédit l'activité des patients et planifie la capacité en fonction de la demande, améliorant ainsi significativement le service aux patients, la sécurité, l'expérience et volume.

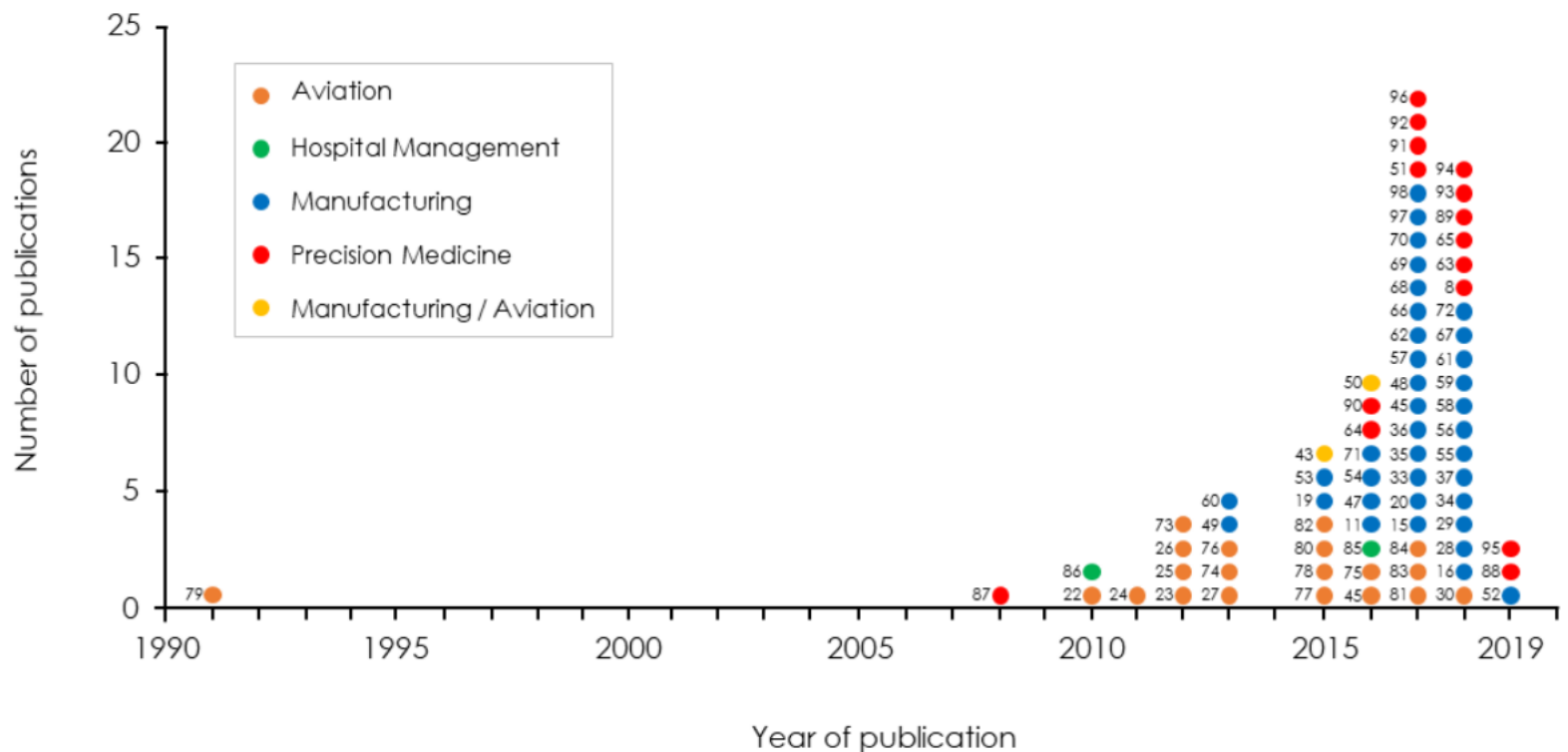


FIGURE 9 – L'évolution de la publication sur les DT dans les différents domaine au fils des années

## 2.2.10 Enjeux

Il y a actuellement des enjeux et des défis importants qui doivent être étudiés et traités plus en détail, et sont liés aux différents aspects, tous importants pour l'avenir de la recherche dans ce domaine.

### 1. QUESTIONS D'ÉTHIQUE

Les développeurs doivent aborder les questions d'éthiques soulevées par l'échange de données décrivant/produites étant analysé par de multiples sources, telles que la fabrication de société exploitant les TD développées par ses partenaires et clients, ou par des hôpitaux jumelés, des experts cliniques et des patients. Cela nécessite des développeurs et des utilisateurs pour traiter les déclarations de confidentialité et les limites légales qui doivent encore être établies.

cela est particulièrement vrai et critique avec les dossiers médicaux personnels. En effet, en particulier dans les domaines de la santé et de la médecine, l'accès à des données de haute qualité avec une cardinalité élevée et contenant suffisamment la variation sera cruciale pour assurer une formation efficace des modèles d'IA. Une réglementation appropriée devrait garantir que tous ces enregistrements sont rendus anonymes et ne sont utilisés qu'avec consentement des patients.

## 2. SÉCURITÉ ET VIE PRIVÉE

En raison de l'utilisation de l'IoT et du cloud computing, L'environnement DT doit être développé avec une attention particulière et une robustesse en ce qui concerne le piratage et les virus. Le piratage de renseignements privés, confidentiels ou de grande valeur jumelage. Spécialement pour la technologie DT en médecine et les secteurs des soins de santé, de la sécurité.

## 3. COÛT DE DÉVELOPPEMENT

Le développement d'un environnement DT nécessite de reconsidérer et re-configurer la plate-forme logicielle sous-jacente, ainsi que le matériel des machines de production et de leur cloud/physique interconnexion. Cela implique des coûts énormes et pourrait ouvrir la voie vers l'expansion de cette technologie juste pour les grandes entreprises disposant du capital et des ressources humaines nécessaires.[9].

## 4. RÉPARTITION ÉQUITABLE DE LA RICHESSE

Le développement d'environnements DT distribués nécessite que toutes les parties concernées soient fournis avec transparence et omniprésence connexion, capteurs et savoir-faire. Cette fonctionnalité est manquante lorsque les pays en développement (CDD) sont pris en compte. La diffusion de la technologie DT dans l'industrie manufacturière pourrait ainsi accroître l'écart entre les riches et les pauvres. L'avantage serait une amélioration mondialisée de soins de santé.

## 5. HWID ET EUD

Les TDM doivent être équipés d'interfaces bien conçues, utilisables et accessibles, pour permettre à n'importe qui (en particulier experts, mais experts dans des domaines spécifiques) interagir avec les TDM d'une manière naturelle, efficace et efficiente. Malheureusement, HWID et EUD sont souvent négligés par les informaticiens, qui préfèrent se concentrer sur le développement et l'utilisation des TDM que sur son processus de conception et sur le rôle de l'utilisateur final. Une approche de conception basée sur d'interaction de travail humain est appliquée depuis le début de l'idéation DT et la création, elle pourrait aider toutes les parties prenantes à comprendre les potentiels de la conception socio-technique.

## 6. LIMITES TECHNIQUES

Actuellement, il y a de nombreuses limites techniques qui ne sont toujours pas satisfaites, des questions suspendues sur le terrain. Tout d'abord, nous devons faire une distinction entre un DT lié à un objet (objet DTO) et a la DT lié à un être humain (DT Human). Les deux DT se partagent les mêmes caractéristiques mais diffèrent dans la façon dont les jumeaux (physiques et numériques) communiquent. Alors que DTObject peut exploiter une connexion continue en temps réel avec son jumeau, le DTHuman est connecté avec son jumeau physique par des dispositifs tiers (généralement des applications logicielles ou des capteurs) pas nécessairement garantir une connexion fluide et un débit élevé. À titre d'exemple, prenez les applications mobiles qui permettent aux utilisateurs de recueillir des données sur leur état de santé (p. ex., glucomètres, poids, pression artérielle). la faiblesse, en ce sens qu'une interaction stable,

intelligente, omniprésente et continue entre le DT Human et l'être humain peut améliorer les connaissances d'un DT générique, ce qui lui permet de réagir rapidement aux changements inattendus . Malheureusement, actuellement ce n'est pas une option viable.

Autres les limites qui affectent la façon dont la technologie DT est développée et utilisé, est sur la nécessité d'avoir des connexions Internet rapide qui doivent également être extrêmement fiables. Cette exigence est encore difficile à rencontrer dans de nombreux domaines dans le monde entier. En outre, un autre problème critique est que la collecte de grandes quantités de données rend difficile la conception d'interfaces efficaces pour ses la représentation visuelle et de permettre une interaction efficace entre les utilisateurs. La recherche sur la visualisation des données doit être poursuivie pour permettre la diffusion de ces informations visuelles et une interaction facile entre l'utilisateur final et les données de DT.



## 2.3 DMU et DT

### 2.3.1 Le concept de maquette numérique

la maquette numérique produit (DMU) est définie par l'ensemble des formes géométriques du produit plus les données technologiques liées à l'environnement de l'Object (matériaux, conditions aux limites, force, ...)

[14]



FIGURE 10 – Définition d'une maquette numérique produit

Les informations relatives à chaque produit sont regroupées sous forme numérique par un système de gestion de données appelé Product Lifecycle Management (PLM). Le PLM permet de gérer la définition d'un produit lors de toutes les activités de son cycle de vie. La maquette numérique (DMU ou Digital Mock-Up) se définit par la représentation du produit à une étape donnée de son cycle de vie, extraite du PLM. L'utilisation de la maquette numérique permet l'analyse virtuelle de plusieurs processus, notamment ceux d'assemblage, réduisant ainsi les temps de cycle nécessaires à la réalisation des activités autour du produit. [12]

### 2.3.2 Caractéristique de la maquettes mise en oeuvre utilisant les jumeaux numériques

La gestion d'un système aussi complexe nécessite des systèmes avec une puissance de calcul importante et de nos jours, les technologies utilisées ne procurent pas de le financement adéquat. En outre, il est nécessaire d'assurer ou de répondre aux différentes conditions du système. Les exigences importantes pour la mise en œuvre du système sont la conception de la maquette, et mettre en pratique La technologie de l'Internet des objets (IoT) .D'après la littérature disponible il est possible de résumer les conditions nécessaires au déploiement de produits intelligents qui sont :

- La nécessité d'établir une unification et une normalisation mondiales.
- Les possibilité de communication directe de IoT avec les bases de données pour la manipulation des données.
- L'existence d'une forme de communication fiable et sécurisée entre tous les appareils.
- La capacité des produits à coopérer avec l'ensemble du système pour surveiller leur propre état et de prendre des décisions prédictives sur leur propre état.

En élargissant ces exigences, nous pouvons formuler des points nécessaires à la mise en œuvre pour la réalisation réussie de l'activité avec possibilité de réalisation de technologie jumeaux numériques.

#### 1. Identification des composants :

Pour chaque partie du système (produits, services, unités),il est nécessaire de pouvoir d'identifier de manière unique et globale les composante, tout au long du spectre des produits et la durée de vie du produit.Cette identification peut donc être utilisée pour la coupler avec la projection virtuelle.

#### 2. Traitement des données

Tout au long de la vie du produit en trois phases (1. conception, 2. entretien et utilisation des produits, 3. recyclage) grand nombre de données générées. Un traitement se fait, ce qui signifie l'analyse et la synthèse de l'information dans ces grandes bases de données, c'est du Big Data.

#### 3. Modélisation

Pendant le cycle de vie du produit, généralement différentes variantes du produit d'origine sont élaborées et chaque variante a son image sous forme numérique – modèle. En raison de la large gamme de phases, il existe de nombreux modèles de produits - système modèles, modèles fonctionnels, modèles géométriques 3D, physiques modèles, modèles de production, modèles d'utilisation et ainsi de suite. il est important de normaliser la création de ces modèles pour une interpolation possible et possibilité de communication entre eux.

#### 4. Humain - interface machine

Concevoir et mettre en œuvre une interface homme-ordinateur appropriée assure que l'information dans le système est proprement diffusée et élimine les problèmes de traitement de grande quantité de données de sortie par les humains. Digital twin peut fournir l'information à tous les utilisateurs et à tous les coopérateurs impliqués dans le système et donc il est nécessaire d'élaborer un moyen de communication simple et fiable.

#### 5. Voies de communication et transmission de données

La caractéristique la plus importante, qui est évidente dans ce secteur est d'accroître la compatibilité. La tendance est qu'un réseau exécute différentes fonctions. Il peut être le management des processus et des systèmes, de configuration et de partage de données. Une

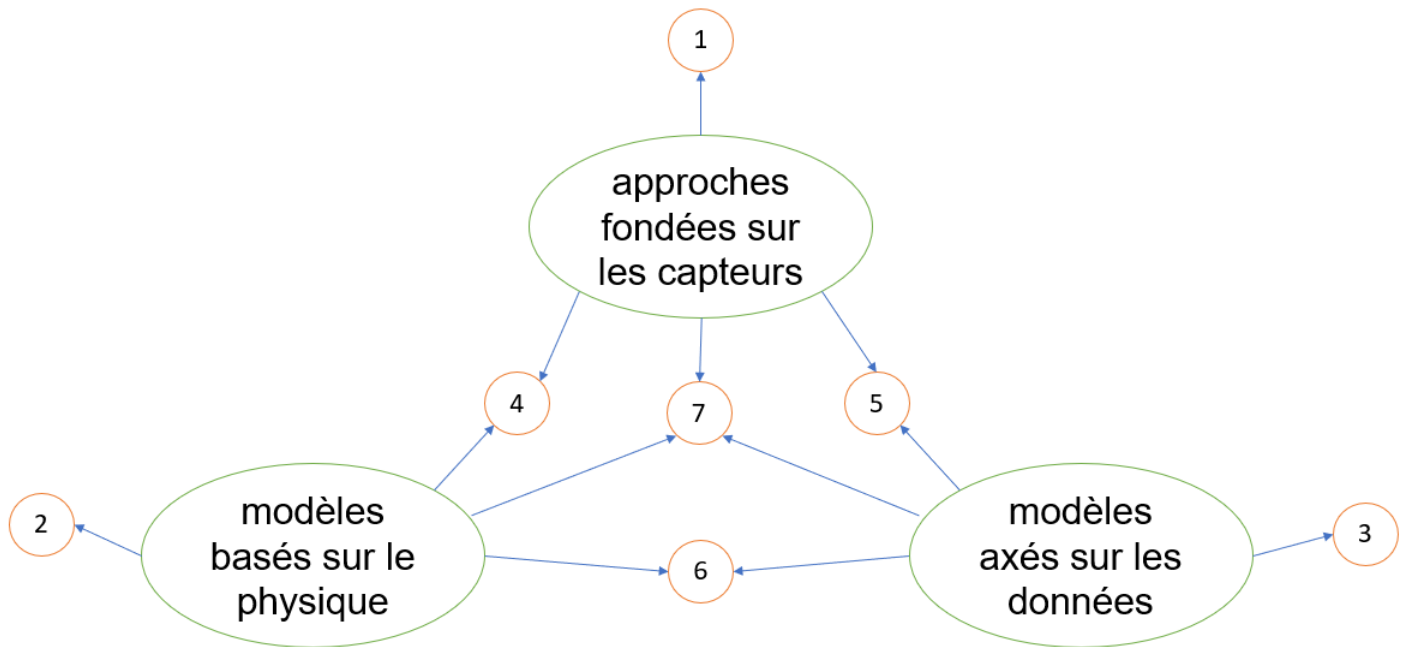
autre caractéristique importante qui peut être trouvée dans le réseau industriel est la mise en œuvre des normes Wi-Fi dans le management, avec l'introduction des technologies "smart" tel que l'IoT et les réseaux sensoriels.

### **2.3.3 Le rôle de l'intégration de l'information dans l'écosystème des DT :**

Les techniques de fusion de données ont été appliquées à l'évaluation non destructive il ya des années , tandis que la recherche sur la fusion des données a une histoire beaucoup plus longue[20]. Le concept plus général de « fusion de l'information » est défini comme « l'étude des méthodes efficaces de transformation automatique ou semi-automatique des informations provenant de différentes sources et différents points dans le temps dans une représentation qui fournit un appuis efficace à la prise de décision humaine ou automatisée. »

Le rôle de la fusion des données dans l'écosystème de jumeau numérique est illustré dans la Fig. 3. Les éléments de base d'un jumeau numérique la « simulation multiphysique, multi-échelle et probabiliste » est mise en œuvre par les modèles physiques et modèles de données. La source d'information peut être traitée comme un « capteur », soit un capteur « dur » ou un capteur « doux ». Le potentiel des opérations de fusion de données est indiqué à la figure2 . Les avantages des opérations de fusion sont énumérés comme suit :

1. Fusion des capteurs – meilleure qualité du signal
2. Fusion des modèles de physique – meilleur rendement des modèles
3. Fusion des modèles de données – meilleur rendement des modèles
4. Fusion de capteurs et de modèles basés sur le modèle physique adaptatif
5. Fusion de capteurs et de modèles de données – modèle robuste axé sur les données
6. Fusion de la physique et des modèles de données – amélioration de la prévision
7. Fusion des capteurs, de la physique et des modèles de données – prise de décision fiable



**FIGURE 11** – Opérations de fusion possibles dans le développement de jumeaux numériques

## 2.4 Modélisation de la maquette numérique produit

La maquette numérique produit est composée d'une forme géométriques (ou plusieurs) et des données technologiques liées à son environnement [14]

. La forme géométrique de la maquette numérique produit est modélisée en utilisant des modeleurs CAO (Conception Assistée par Ordinateur) tels que CATIA , SolidWorks, ...

Les dimensions des objets peuvent être prises directement sur le modèle physique ou par la technique de reverse engineering.

Les différentes contraintes d'assemblages sont prises en compte grâce à la notion de document assemblage fournit par les modeleurs géométriques .

Les différentes étapes de modélisation d'une maquette numérique produit par un logiciel de CAO sont décrites dans l'annexe.



FIGURE 12 – Maquette numérique de tramway

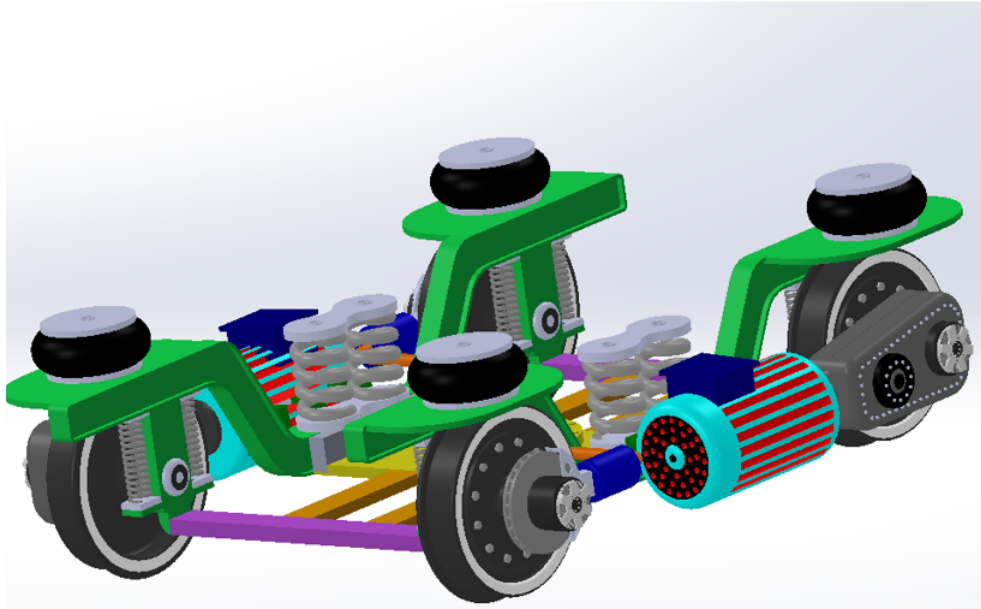


FIGURE 13 – Maquette numérique de bogie

## 2.5 Analyses des défaillances

L'analyse des défaillances doit permettre une analyse systématique des défaillances des processus, équipements ou produits.

### 2.5.1 Les méthodes d'analyse des défaillance

Outil	intérêt
<b>diagramme causes-effet=ishikawa=arête de poisson</b>	recherche des causes d'une défaillance
<b>Q-Q-O-Q-C-P &amp; 5 P</b>	Analyse de défaillance
<b>graphe de Pareto ou méthode ABC</b>	mise en évidence des actions prioritaires
<b>AMDEC</b>	analyse prévisionnelle des défaillances

TABLE 2 – Outils d'analyse des défaillances .

## 2.6 Des notions sur la maintenance

### 2.6.1 Définition

(norme NF EN 13306) La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. Une fonction requise est une

fonction, ou un ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné.

## 2.6.2 Les types de maintenances

### **La maintenance corrective**

C'est la maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

### **La maintenance préventive**

C'est la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien.

### **La maintenance préventive systématique**

C'est la maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

### **La maintenance préventive conditionnelle**

C'est la maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent.

### **La maintenance préventive prévisionnelle**

C'est la maintenance préventive conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

## 2.6.3 Les niveaux de maintenances

### — Niveau 1 :

**Définition :** Actions simples nécessaires à l'exploitation et réalisées sur des éléments facilement accessibles en toute sécurité à l'aide d'équipements de soutien intégrés au bien.

**Intervenant :** L'utilisateur du bien Exemples en préventif : Ronde de surveillance d'état ; Graissages journaliers ; Manœuvre manuelle d'organes mécaniques ; Relevés de valeurs d'état ou d'unités d'usage ; Test de lampes sur pupitre ; Purge d'éléments filtrants ; Contrôle d'encrassement des filtres.

**Exemples en correctif :** Remplacement des ampoules ; Ajustage, remplacement d'éléments d'usure ou détériorés, sur des éléments ou composants simples et accessibles.

### — Niveau 2 :

**Définition :** Actions qui nécessitent des procédures simples et/ou des équipements de soutien (intégrés au bien ou extérieurs) d'utilisation ou de mise en œuvre simple.

**Intervenant :** Personnel qualifié Un personnel est qualifié lorsqu'il a reçu une formation lui permettant de travailler en sécurité sur un bien présentant certains risques potentiels, et est reconnu apte pour l'exécution des travaux qui lui sont confiés, compte tenu de ses connaissances et de ses aptitudes.

**Exemples en préventif :** Contrôle de paramètres sur équipements en fonctionnement, à l'aide de moyens de mesure intégrés au bien; Réglages simples (alignement de poulies, alignement pompe-moteur, etc.); Contrôle des organes de coupure (capteurs, disjoncteurs, fusibles), de sécurité, etc.; Détartrage de surface de ruissellement (tour aérorefrigérante); Graissage à faible périodicité (hebdomadaire, mensuelle); Remplacement de filtres difficiles d'accès.

**Exemples en correctif :** Remplacement par échange standard de pièces : fusibles, courroies, filtres à air, etc.; Remplacement de tresses, de presse-étoupe, etc.; Lecture de logigrammes de dépannage pour remise en cycle; Remplacement de composants individuels d'usure ou détériorés par échange standard (rail, glissière, galet, rouleaux, chaîne, fusible, courroie, ...).

— **Niveau 3 :**

**Définition :** Opérations qui nécessitent des procédures complexes et/ou des équipements de soutien portatifs, d'utilisation ou de mise en œuvre complexes.

**Intervenant :** Technicien qualifié

**Exemples en préventif :** Contrôle et réglages impliquant l'utilisation d'appareils de mesure externes aux biens; Visite de maintenance préventive sur les équipements complexes; Contrôle d'allumage et de combustion (chaudières); Intervention de maintenance préventive intrusive; Relevé de paramètres techniques d'état de biens à l'aide de mesures effectuées d'équipements de mesure individuels (prélèvement de fluides ou de matière, ...).

**Exemples en correctif :** Diagnostic; Réparation d'une fuite de fluide frigorigène (groupe de froid); Reprise de calorifuge; Diagnostic d'état avec usage d'équipements de soutien portatifs et individuels (pocket automate, multimètre); Remplacement d'organes et de composants par échange standard de technicité générale, sans usage de moyens de soutien communs ou spécialisés (carte automate, vérin, pompe, moteurs, engrenage, roulement, ...); Dépannage de moyens de production par usage de moyens de mesure et de diagnostics individuels.

— **Niveau 4 :**



**Définition :** Opérations dont les procédures impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie particulière et/ou la mise en œuvre d'équipements de soutien spécialisés.

**Intervenant :** Technicien ou équipe spécialisée **Exemples en préventif :** Révisions partielles ou générales ne nécessitant pas le démontage complet de la machine; Analyse vibratoire; Analyse des lubrifiants; Thermographie infrarouge (installations électriques, mécanique, thermique,...); Relevé de paramètres techniques nécessitant des moyens de mesure collectifs (oscilloscope, collecteur de données vibratoires) avec analyse des données; Révision d'une pompe en atelier, suite à dépose préventive.

**Exemples en correctif :** Remplacement de clapets de compresseur; Remplacement de tête de câble en BTA; Révision d'une pompe en atelier spécialisé suite à dépose préventive; Réparation d'une pompe sur site, suite à une défaillance; Dépannage de moyens de production par usage de moyens de mesure ou de diagnostics collectifs et/ou de forte complexité (valise de programmation automate, système de régulation et de contrôle des commandes numériques, variateurs,...); Reprise de clôture extérieure; Remplacement d'une porte et mise en peinture; Réparations de fissures et défauts d'étanchéité; Reprise de fuite de toiture.

— **Niveau 5 :**

**Définition :** Opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire, faisant appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriels. Ce sont des opérations de rénovation, reconstruction, etc.

**Intervenant :** Constructeur ou société spécialisée **Exemples :** Révisions générales avec le démontage complet de la machine; Reprise dimensionnelle et géométrique; Réparations importantes réalisées par le constructeur ou le reconditionnement de ses biens; Remplacement de biens obsolètes ou en limite d'usure.

## 2.7 Conclusion

dans ce chapitre nous avons pu éclairer le concept de jumeau numérique et de maquette, donner ainsi une idée plus claire sur cette nouvelle technologie, nous avons également donné des notions sur l'analyse des défaillance et la maintenance. nous allons passé dans le chapitre qui suit à proposer une méthodologie d'implémentation pour mieux illustrer l'intérêt de la démarche.

## **Chapitre 3**

# **Analyse des défaillances du pont de bogie de tramway**

## 3.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, nous allons expliquer l'interface roue- rail pour mieux comprendre l'environnement dans lequel fonctionne le pont, et par la suite faire une analyse sur les défaillances de pont et un état de lieu pour détecter les dysfonctionnements dans l'atelier de réparation des ponts de bogies.

Pour ce faire, on a fait des interviews avec différents personnels impliqués dans la réparation des ponts : les responsables qualité, industrialisation et méthode ainsi que les techniciens de l'atelier.

Les observations ont pour but de tirer les besoins de l'atelier et de détecter les dysfonctionnements afin de mieux cerner la problématique et proposer une solution d'amélioration de la maintenance des ponts chez CITAL.

## 3.2 Interface roue rail

### 3.2.1 Description du tramway CITADIS 402

L'ALSTOM CITADIS 402 est un véhicule à plancher bas intégral de la gamme CITADIS. Il a une longueur de 44 mètres environ, bidirectionnel, pouvant transporter 302 personnes en charge normale ( $EL4 = 4p/m^2$ ). C'est un véhicule de 2,65 mètres de large à faces galbées, largement vitré et accessible par 6 portes doubles et deux portes simples aux extrémités.

Chaque rame se compose de deux modules d'extrémité (ME), avec cabine de conduite intégrée, de nacelles d'intercirculation (NI) et de compartiments voyageurs (CV) qui s'appuient et s'articulent avec deux modules ou nacelles adjacents.

La version 402 comporte 7 caisses, 2 bogies moteurs, 2 bogies porteurs.

La construction de la caisse fait appel à l'acier et à l'aluminium.

Le plancher est une construction mixte en aluminium soudé mais les zones au-dessus des bogies sont en acier soudé afin de renforcer la rigidité de l'ensemble. Les parties en acier et en aluminium sont assemblées par boutonnage

Les parois latérales, avec cadres de portes et de baies, sont en aluminium, assemblées séparément, cintrées puis boulonnées sur le plancher

Les différents éléments du pavillon, toujours en aluminium, avec les coffres d'appareillage précâblés, sont posés et fixés à la structure.

Après la mise en place des anneaux d'extrémité, la caisse présente un ensemble rigide et résistant.

La partie avant était conçue, à l'origine pour résister à un effort à la compression de 200 KN, valeur qui a été portée à 400 KN.

Les modules et compartiments passent alors à la chaîne de montage ; ils sont assemblés et montés sur les bogies et reçoivent les différents composants du pupitre de conduite déjà câblés, les habillages en polyester intérieurs et extérieurs, y compris en toiture, les revêtements de sol et les sièges.[2]

### **Les caractéristique principales des véhicules :**

- Hauteur 3270mm sans pantographe (3,348 pantographe replié),
- Masse en tare : 54t
- Fonctionnement en unité simple,
- Pas d'attelage – Barre de remorquage/poussage pour mode secours,
- Largeur de passage portes doubles : 1300 mm,
- Largeur de passage portes simples : 800 mm,
- Un pantographe/rame,
- Résistance à la compression : 400kN,
- Hauteur plancher/niveau supérieur rail : 350 mm,
- Niveau d'accès passagers : 320 mm,
- Niveau de plancher cabine : 678 mm,
- pas des sièges : 624
- Largeur des sièges 431 mm.

### **Les compartiments :**

Le véhicule CITADIS 402 est composé de 5 modules, 6 inter-circulations et 2 cabines de conduite. Les modules sont les suivants :

- 2 motrices avec cabine de conduite (M1 et M2),
- 1 nacelle porteuse (NP),
- 1 nacelle motrice (NM),
- 3 caisses suspendues (C1, CC et C2),

Les figures 5 et 6 montrent les compartiments de la rame, la disposition des différents équipements (intérieur, toiture . . . ), ainsi que les dimensions : [4]

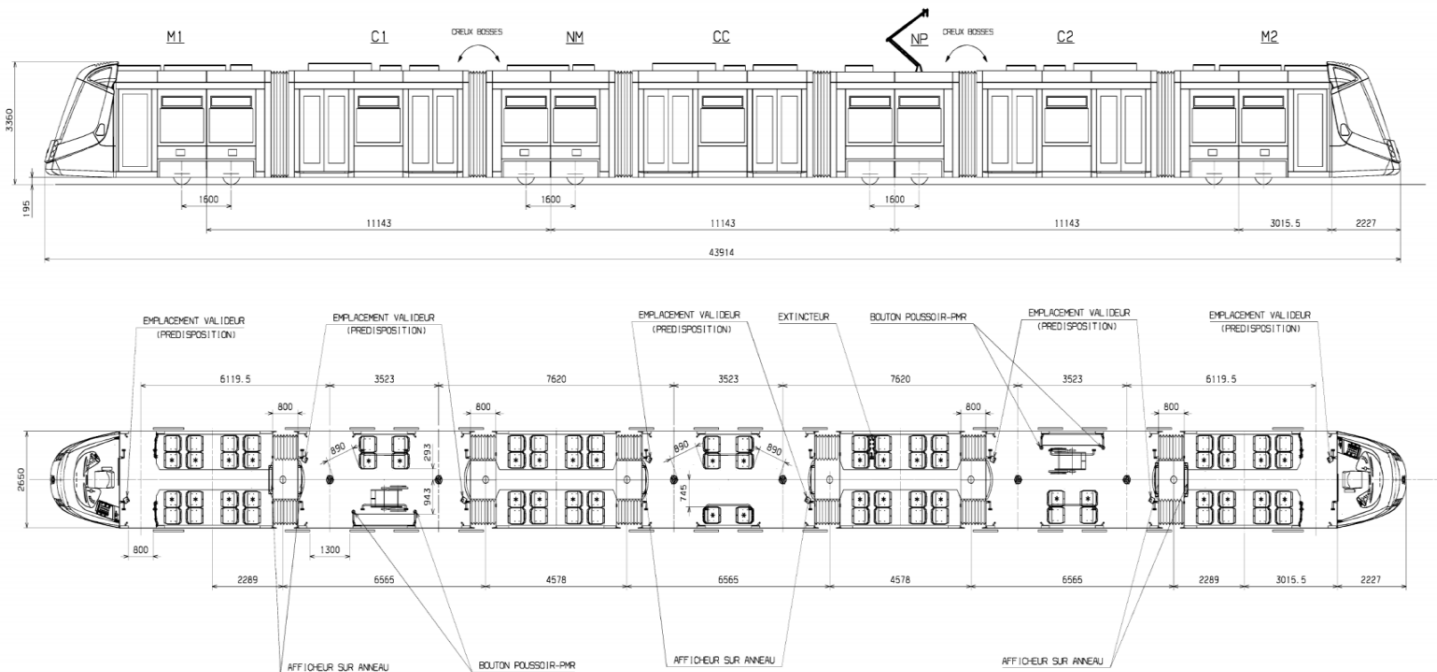


FIGURE 14 – Différents compartiments et dimensions du CITADIS 402

## Les bogies :

Pour les Citadis à plancher bas intégral, Alstom a développé le bogie porteur Arpège.

Le châssis du bogie porteur se compose de deux ensembles longeron - faux essieu surbaissés en L, articulés entre eux par des éléments élastiques, formant un cadre déformable pour tenir compte des gauches de la voie.

À l'extérieur de ces longerons sont fixées quatre roues élastiques de 530 mm de diamètre à l'état neuf sur lesquelles sont également fixés les freins à disque à commande électro-hydraulique.

Une caractéristique de ce bogie est l'absence de suspension primaire, le constructeur ayant fait le choix de roues « super élastiques » comportant deux anneaux concentriques en caoutchouc insérés entre le corps de la roue et le bandage.

La suspension secondaire est assurée par quatre ressorts hélicoïdaux sur lesquels repose l'élément de caisse.

Chaque longeron du châssis de bogie supporte un patin électromagnétique pour le freinage d'urgence.

Des amortisseurs hydrauliques, un transversal et deux verticaux, assurent un roulement stable sans mouvement de lacet, la fonction antiroulis étant assurée par une barre de torsion.

Le bogie moteur Arpège comporte la même mécanique. À l'extérieur de chaque angle fixe du cadre de bogie, donc en diagonale, est monté, transversalement, un moteur de traction triphasé asynchrone de 120 kW qui entraîne, par une chaîne cinématique passant par les faux essieux, les

deux roues qui se font face.

Deux blocs de frein à disque sont flasqués sur les roues opposées à la position du moteur de traction.

Le bogie, fixé au châssis de la caisse, peut, en entrée de courbe, subir une légère rotation de 2°, par rapport à l'axe longitudinal, rotation limitée par des silentblocs en caoutchouc.[4]

La rame repose sur 4 bogies ARPEGE :

- 2 bogies moteur de type ARPEGE 350M 1600 supportant les éléments M1 et M2,
- 1 bogie intermédiaire moteur de type ARPEGE 350P 1600 supportant l'élément NM ,
- 1 bogie intermédiaire porteur de type ARPEGE 350M 1600 supportant l'élément NP.

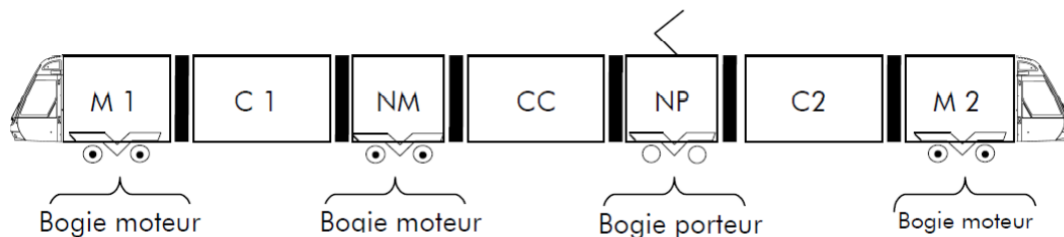


FIGURE 15 – Implantation des bogies, moteur et porteur, du CITADIS 402

## BOGIE PORTEUR

- Quatre disques de frein,
- Deux patins magnétiques,
- Entre axe essieux : 1600 mm,
- Diamètre des roues neuves/usées : 590/530 mm,

## BOGIE MOTEUR

- Deux disques de frein/bogie,
- patins magnétiques,
- Entre axe essieux : 1600 mm,
- Diamètre des roues neuves/usées : 590/530 mm,

### La propulsion :

La propulsion est assurée par 6 moteurs asynchrones (2 par bogie moteur) alimentés par deux onduleurs ONIX 808 NG. A chaque bogie motorisé est associé un Equipement de Traction Freinage (ETF).

La tension ligne au pantographe est de 750 V.

Le refroidissement est assuré par fluide caloporteur distribué par un groupe de refroidissement.

Vitesse maximale du véhicule : 70 km/h maxi.

Kilométrage annuel prévisionnel : 80 000 km/an/véhicule.

### **Performances en traction :**

Les trois bogies moteurs étant en service, les performances de montée en vitesse en alignement droit sur le plat du véhicule proposé sont les suivantes :

- Accélération moyenne entre 0 et 40 km/h égale à 1 m/s<sup>2</sup>,
- Accélération moyenne entre 0 et 70 km/h (en ne tenant pas compte de la limitation d'effort due au jerk\*) de l'ordre de 0,7 m/s<sup>2</sup>.

[\*Jerk ou coef. De jerk : Le mot Jerk signifie « secousse » c'est la dérivée du vecteur accélération par rapport au temps]

L'accélération résiduelle à 70 km/h est de l'ordre de 0,3 m/s<sup>2</sup>. L'adhérence maximale sollicitée au démarrage est de 21 %

### **Performances en freinage**

Les conditions suivantes sont considérées :

- Vitesse initiale de freinage : 70 km/h,
- Tous freins en service (suivant le type de freinage) et délivrant leur performance nominale,

### 3.2.2 Description de la chaîne traction

La chaîne de traction d'un véhicule électrique est l'ensemble des éléments depuis la source d'énergie jusqu'à la transmission mécanique. L'organigramme est donné sur la figure suivante :

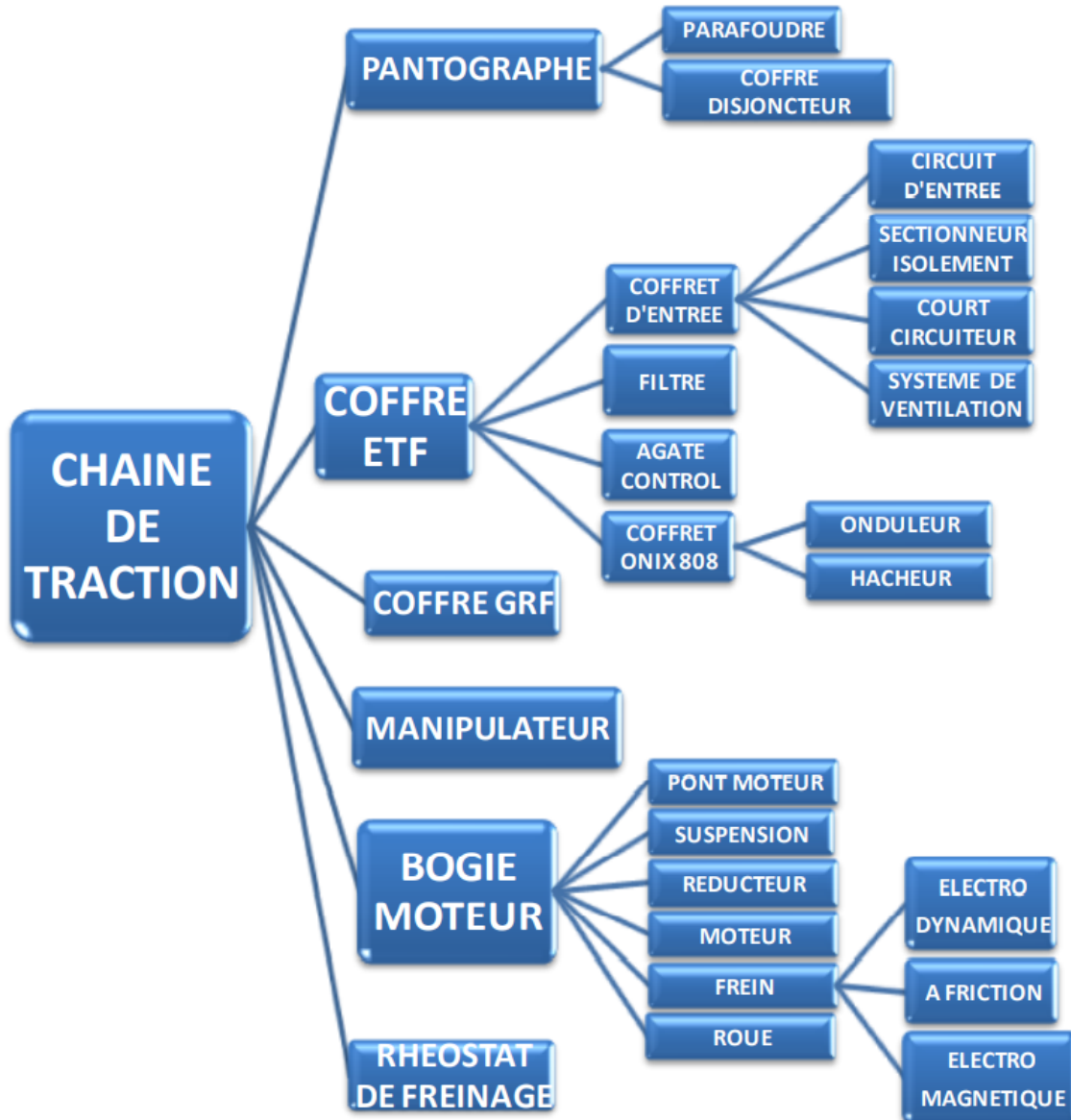


FIGURE 16 – Organigramme de la chaîne de traction



## Description de la chaîne cinématique

La chaîne cinématique détermine l'ordre des différents éléments constituant l'ensemble à mouvoir.

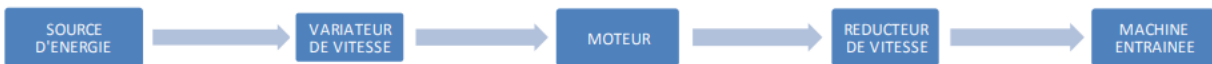
Dans sa forme la plus simple elle est représentée sous la forme suivante :



Plus généralement elle comporte un réducteur de vitesse :



Dans de nombreuses applications elle peut être complétée par un variateur :



Le 3ème type est celui qui nous intéressera pour l'étude de la chaîne de traction du tramway.

### 1-Équipement de la chaîne de traction-freinage

La chaîne de traction du tramway se compose de 6 éléments principales, comme le montre la figure 7, qu'on va développer au fur et à mesure. Ces éléments sont :

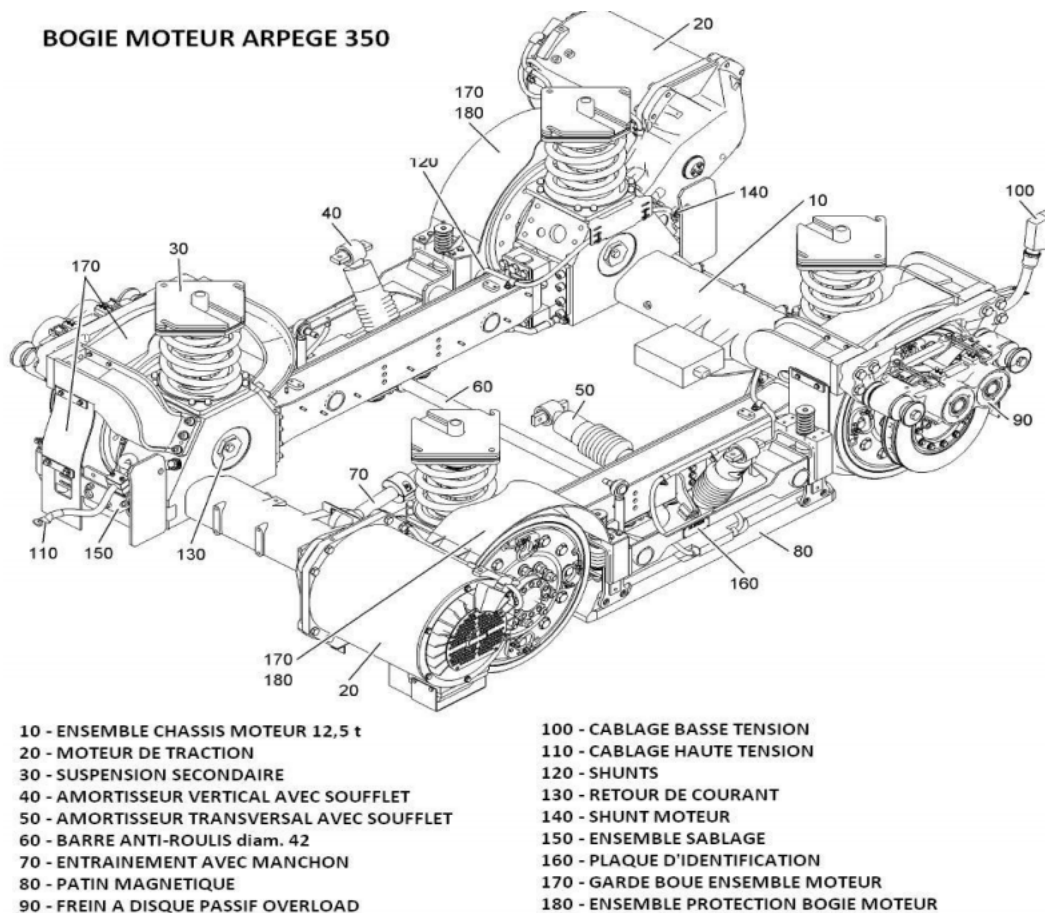
1. Le pantographe avec le parafoudre et le disjoncteur,
2. Le coffre ETF (équipement traction freinage),
3. Le coffre onix ,
4. le manipulateur
5. Le coffre GRF (groupe de refroidissement), ,
6. Le bogie moteur.

**2-Description et fonctionnement des équipements de la chaîne** Dans cette partie on va seulement détailler la description du bogie l'élément porteur du pont, les autres éléments seront décrits dans l'annexe

### BOGIE

Chaque élément CITADIS 402 est composé de 7 caisses sous lesquelles sont implantés 2 bogies ARPEGE 350 M moteurs extrêmes pour plancher bas, 1 bogie moteur intermédiaire ARPEGE 350 M pour plancher bas et 1 bogie porteur pour plancher bas.

Chaque bogie moteur ARPEGE 350 M est bimoteur à roulement sur fer et comporte 2 châssis - ponts moteurs[4]



**FIGURE 17 – Bogie**

Ces principaux constituants sont :

- (A) Le pont moteur
- (B) La suspension
- (C) Le moteur de traction
- (D) Le réducteur
- (E) les essieux et les roues
- (F) les freins

### A- Le pont moteur

Un châssis pont - moteur est constitué d'un pont moteur, et d'un longeron fixé rigidement au pont moteur. Chaque châssis - pont moteur fait office d'essieu et de demi - châssis de bogie, le pont réalisant la partie transversale du 1/2 châssis de bogie.

Chaque moteur est fixé rigidement à un pont et entraîne la chaîne cinématique sans accouplement. Le pont est muni de 2 moyeux sur lesquels sont fixées les roues fer élastiques.

La structure portante du pont moteur est constituée de :

- \* Une poutre résistante en 1 partie, dite corps de pont.
- \* 2 carters latéraux, boulonnés au corps de pont, le long desquels pourront cheminer des câbles électriques,
- \* 2 moyeux de roues recevant :
  - Pour chacun, une roue élastique dont la jante est boulonnée sur le moyeu,
  - Pour l'un des deux, un disque de frein.



**FIGURE 18 – Pont moteur**

Le pont moteur sert à transmettre :

- Les charges verticales, transversales et longitudinales de la caisse du véhicule (respectivement par l'intermédiaire de 2 suspensions secondaires à ressorts hélicoïdaux par pont, 2 butées transversales par pont et 1 bielle d'entraînement par bogie) à la voie (par l'intermédiaire des roues),
- Le couple moteur du moteur aux roues, aussi bien en accélération qu'en décélération (freinage électrique) et ceci dans les 2 sens de marche.
- Les efforts de freinage aux roues en décélération (freinage mécanique) et ceci dans les 2 sens de marche.

Le pont comporte aussi, pour les opérations de lubrification des pignons du réducteur et la vidange :

- un bouchon de remplissage d'huile, d'accès facile,
- Un contrôleur de niveau à visualisation aisée,
- Un bouchon de vidange,
- Un événement [1]

### **B-La suspension**

Afin d'amortir, d'entraîner et d'absorber les chocs sur la rame en mouvement, en freinage et à l'arrêt, le bogie est équipé de plusieurs systèmes de suspension

Ces systèmes sont : \* 2 amortisseurs verticaux,

\* Un ensemble de suspension secondaire qui regroupe 4 ressorts supportant la caisse,

\* Un amortisseur transversal pour améliorer le confort et stabilité de la caisse,

\* Une barre anti-roulis limitant les débattements de la caisse, sert à stabiliser le véhicule en réduisant les effets des virages et des irrégularités de la roue, elle améliore donc la tenue de route,

\* 2 bielles de barre anti-roulis assurant la liaison avec la caisse,

\* Un ensemble entraînement avec manchon, pour assurer l'entraînement de la caisse par le bogie lors de la traction et du freinage,

\* En plus des liaisons mécaniques caisse-bogie

### **C-Le moteur**

Chaque véhicule de référence Citadis 402 est composé de 6 essieux motorisés sur lesquels on trouve :

- Un moteur de traction disposé parallèlement à l'essieu et flasqué sur le réducteur,
- Un réducteur à double réduction, le moteur entraînant un premier étage à partir duquel le mouvement est distribué par l'intermédiaire d'un deuxième étage, directement sur la roue côté moteur et via un arbre de transmission sur la roue côté opposé du moteur,
- Le moteur est flasqué sur le carter secondaire du pont moteur. Le moteur est centré sur le carter par un alésage et bridé au carter (le pignon d'entrée du réducteur est calé sur l'arbre moteur).

Ce moteur de traction est un moteur triphasé, asynchrone 4 pôles, à cage d'écureuil, fermé et refroidi par fluide caloporteur (Le groupe de refroidissement « GRF » est dimensionné par l'intégrateur électricien selon les besoins du moteur).

La conception du moteur de traction est similaire aux moteurs déjà développés et en service pour les applications urbaines et suburbaines, depuis l'utilisation des onduleurs de traction triphasés.

Le refroidissement global moteur est fait par une circulation de liquide à l'intérieur d'une enveloppe concentrique, dimensionnée en fonction des performances du train, des pertes à évacuer, du volume imposé par le bogie et la caisse (pignon et étanchéité à chicanes), des contraintes de masse, de bruit, du type de fixations, ainsi que des contraintes de coût, de disponibilité et de maintenance.

Chaque moteur est fixé rigidement à un pont et entraîne la chaîne cinématique sans accouplement. Le pont est muni de 2 moyeux sur lesquels sont fixées les roues fer élastiques.

Le moteur est flasqué sur le carter support moteur, centré sur celui-ci par un alésage et bridé par des vis.



Par ailleurs, un frein à friction (du type frein à disques) est monté sur les essieux des bogies moteurs et sur les roues du bogie porteur.

L'actuation de ces freins à disques est électro-hydraulique de type indirect (effort de freinage assuré par des ressorts) sur les bogies moteurs, et de type direct (effort de freinage assuré par la pression hydraulique) sur le bogie porteur.

Enfin, tous les bogies sont équipés de patins de freins électromagnétiques. Ces derniers n'interviennent qu'en freinage d'urgence ou de sécurité.

Les efforts de freinage des freins électrodynamiques et à friction sont asservis à la charge du véhicule en freinage de service ou d'urgence.

Les coffres de traction ETF assurent la conjugaison des freins électrodynamiques et à friction. Ils envoient à l'électronique de frein une consigne de freinage mécanique, pour le frein à friction, issue de la conjugaison.

### 3.3 Les étapes de maintenances (révision de pont )

la maintenance effectuée dans cet atelier est du niveau 3 et niveau 4, qui se base essentiellement à faire une maintenance préventive systémique et une maintenance corrective. Dans ce qui suit nous énumérons les étapes de réparation d'un pont :

#### 1. Contrôles préliminaires :

- Vérifier l'état général du pont : saleté, fuites, chocs, écaillage de la peinture
- Vérifier le niveau d'huile
- Nettoyage extérieur du pont
- Mise en place du pont

#### 2. Démontage de l'obturateur et du retour de courant

- Utiliser une barre de desserrage
- Insérer la barre de poussée entre les câbles en prenant les précautions nécessaires pour ne pas les blesser.
- Utiliser un marteau pour le sortir

#### 3. Démontage du pont Débuter les opérations de démontage en commençant par le côté droit puis répéter exactement le même procédé pour le côté gauche

- Mettre en place la plaque d'arrêt et la fixer sur les goujons de roue
- Mettre de la graisse Molycote Longterm 2+ sur la bague laiton de l'outil de desserrage
- Dévisser et rebuter l'écrou de moyeu
- Si le pont n'est pas fixé utiliser la clé à chocs pneumatique avec un augmentateur  $\frac{3}{4}$  - 1"
- Enlever la rondelle d'arrêt
- Changement du joint d'étanchéité côté écrou

#### 4. Extraction du moyeu

- Dévisser les vis de fixation et les extraire, sauf 3 à 120° qui ne seront dévisser que partiellement (1 cm) pour permettre de désolidariser le moyeu et le carter latéral
- Visser la vis de blocage à la place du bouchon de niveau.
- Monter le support vérin F
- Positionner la barre de poussée et le vérin
- Utiliser le vérin pour extraire le moyeu et desceller le carter. Se servir du pied de biche pour assister le vérin.
- Lorsque le carter est en appui sur les vis et que le moyeu commence à sortir monter le crochet sur le moyeu et finir de l'extraire.

#### 5. Démontage du carter latéral

- Mettre en place deux guides.
- Dévisser les trois vis restantes
- Si le carter n'a pas été désolidariser à l'étape précédente utiliser 3 vis montées dans les filetages prévus à cet effet.
- Extraire le carter à l'aide du pied de biche.
- Sortir la couronne en l'inclinant
- Récupérer la cale de réglage dans la cuve. La mesurer en 3 points à 120° et inscrire la moyenne sur la fiche de réglage ainsi que sur la cale. Vérifier l'état de surface de la cale, s'il n'y a pas de rayure la conserver avec les autres cales de pré-charge.
- Démontez les guides.



- Repérer les pièces démontées et les mettre à l'abri des chocs

## 6. Extraction des pistes de roulements

\*Dans la cuve (10bis) :

- Utiliser l'extracteur FACOM.
- Insérer les griffes de l'extracteur dans les lumières prévues à cet effet.
- Utiliser deux clés plates ou à œil et un marteau pour faciliter l'extraction du roulement.

\*Dans le carter latéral (8ter) :

- Monter le carter sur le support de préférence fixé sur une table.
- Utiliser l'extracteur FACOM.
- Insérer les griffes de l'extracteur dans les lumières prévues à cet effet.
- Mettre en place l'entretoise
- Utiliser deux clés plates ou à œil et un marteau pour faciliter l'extraction du roulement.
- Récupérer la cale de pré charge . La mesurer en 3 points à 120° et inscrire la moyenne sur la fiche de réglage ainsi que sur la cale. Vérifier l'état de surface de la cale, s'il n'y a pas de rayure la conserver avec les autres cales de pré-charge

## 7. Démontage de la descente de mouvement

- Élinguer la descente de mouvement
- Dévisser les 3 vis (Douille avec 6 pans de 10 + barre de desserrage) de la rondelle de retenue et les 3 vis de l'axe supérieur . Récupérer les rondelles
- Dévisser les vis (Douille longue de 21 + barre de desserrage).
- Pour extraire la descente utiliser la massette plastique pour casser le film de Loctite.
- Enlever le pion de centrage s'il est sur la descente de mouvement, le laisser s'il est resté sur le carter.
- Repérer la face extérieure du pignon pour le remonter dans le même sens (Écrit métal).

## 8. Démontage des roulements des pignons frettés

\*Côté droit :

- Dévisser la volute d'huile à l'aide de l'outil .  
Bloquer le pignon à l'aide d'un étau en faisant attention à ne pas détériorer les portées de roulements et la denture du pignon
- Si besoin chauffer au chalumeau autour du filetage (pour désagréger le Loctite).
- Nettoyer le filetage et vérifier la conformité de la volute d'huile et la stocker
- Extraire les roulements à l'aide de l'extracteur à guillotine et de la bague d'extraction
- Contrôler les roulements et les rebuter si nécessaire.
- Contrôler la denture du pignon fretté après son nettoyage

\*Côté gauche :

- Extraire les roulements à l'aide de l'extracteur à guillotine et de la bague d'extraction
- Contrôler les roulements et les rebuter si nécessaire.
- Contrôler la denture du pignon fretté après son nettoyage

## 9. Nettoyage – préparation

- Gratter le loctite.
- Poncer les surfaces.
- Enlever le Dow Corning sur les pièces devant être réutilisées
- Nettoyer les filetages des vis et des obturateurs (Loctite, graisse, ...)

## 10. Correction de la hauteur du roulement étalon

- Comparer et relever la différence de hauteur des cônes entre le roulement neuf et le



- roulement étalon sur la même piste définitive à l'aide de l'outillage de mesure
- Sur le marbre , placer le cône du roulement étalon sur la piste du roulement définitif dans l'outillage de mesure.
- Sur le marbre , placer le cône du roulement étalon sur la piste du roulement définitif dans l'outillage de mesure.
- Tourner l'outillage pour assurer le bon positionnement des galets(au moins 5 tours dans le même sens).
- Régler le comparateur à zéro et refaire tourner l'outillage pour vérifier le zéro
- Placer le cône du roulement définitif sur sa piste et remettre l'outillage de contrôle en prenant soin de ne pas dérégler le comparateur.
- Tourner l'outillage pour assurer le bon positionnement des galets(au moins 5 tours dans le même sens).
- Relever l'écart sur le comparateur en vérifiant le sens (positif ou négatif).
- Compléter la feuille de réglage.
- Monter la piste de roulement définitive dans la cuve de pont avec l'aide de l'outillage
- Utiliser la même démarche pour le roulement du côté gauche (si changement de ce roulement).

#### 11. Montage des roulements sur le pignon freiné

- Vérifier que les portées de roulement soient propres et non détériorées.
- Poser sous presse le pignon freiné .
- Huiler légèrement la portée du roulement.
- Poser le cône du roulement sur le pignon freiné
- Monter le roulement à la presse (mini 5 tonnes, maxi 10 tonnes)
- Retourner le pignon 6GH sous la presse.
- Huiler légèrement la portée de roulement.
- Poser le cône du roulement 8 sur le pignon freiné
- Poser et centrer l'outil de montage sur l'ensemble
- Monter le roulement à la presse (mini 5 tonnes, maxi 10 tonnes)

Utiliser la même procédure que pour le côté gauche

#### 12. Détermination de la pré-charge des roulements des pignons freinés

- Mettre en place de la piste de roulement dans cuve à l'aide de l'outil
- Mettre en place le pignon freiné.
- Mettre en place la piste du roulement dans l'alésage de la plaque de mesure
- Vérifier que la vis de réglage se dévisse librement, dans le cas contraire nettoyer le filetage et le huiler
- Mettre en place la plaque de mesure, centrée par les pions, fixée par 5 vis serrées au couple de 145 mN (clé dynamométrique).
- Faire tourner le pignon (5 tours minimum) pour mettre en place les galets
- En tournant le pignon dans le sens horaire serrer la vis de réglage au couple de 8 mN (torquemeter).
- Desserrer la vis de 1/8 de tour.
- Faire tourner le pignon dans le sens horaire et serrer au couple de 2 mN. Refaire tourner en appliquant le couple. Répéter l'opération jusqu'à ce que le couple soit stabilisé à 2 mN.
- Faire le zéro de la jauge de profondeur sur la face de la cuve pour ne pas prendre en

compte l'épaisseur de la plaque (la tige de la jauge dans le perçage).

- Mesurer la cote Y1 (entre la face du pont et le flanc de la piste du roulement 8). Faire 3 mesures à 120° et reporter la moyenne sur la feuille de réglage.
- Déposer la plaque de mesure, la piste de roulement et l'ensemble pignon.

Faire la même mesure sur le côté droit

**13. Mesure des carters pour déterminer la pré-charge des roulements des pignons frettés**

- S'assurer que la face d'appui de la piste du roulement est propre et qu'il n'y a pas de bavure d'usinage.
- Mettre en place la bague étalon.
- Mesurer la cote X1 entre la face du carter et la face d'appui de la piste du roulement, faire 2 mesures à 180° et reporter la moyenne sur la feuille de réglage.
- Calculer l'épaisseur de la cale de pré charge et sélectionner la cale à monter.
- Mettre en place la cale et monter la piste de roulement dans son logement à l'aide du poussoir

**14. Détermination de la cale de voie et mise en place des goujons sur le moyeu**

- Mettre en place le carter sur le support
- Pour assurer le bon positionnement du carter le bloquer avec deux vis serrées au couple de 80 mN.
- Poser la cale 13, récupérée au démontage, dans son logement, chanfrein côté carter.
- Mettre en place l'entretoise étalon
- Mettre en place le moyeu correspondant.
- Faire le zéro de la jauge de profondeur sur une surface plane.
- Mesurer la cote de hauteur de voie (entre la base du carter et la surface d'appui de la roue fer)
- Sortir le moyeu, l'entretoise étalon et la cale.

**15. Montage des roulements et joints et assemblage moyeu – carter**

- Positionner le carter sur le support
- Mettre en place l'ensemble des pièces du support (bague, ressort et guide).
- Vérifier que toutes les pièces soient nettoyées repérées (si les deux côtés ont été démontés) et contrôlées.
- Mettre en place la cale de voie déterminée précédemment (gros chanfrein côté intérieur du carter).
- Emmancher la piste du roulement à l'aide du poussoir. (massette ou presse)
- Mettre en place le cône du roulement
- Mettre en place le joint sur son poussoir
- Emmancher le joint (massette ou presse) 10T Maximum

\*Assemblage du moyeu et du carter

- Huiler l'alésage du roulement et le joint .
- Dans le support mettre en place le ressort et le guide du moyeu.
- Mettre en place le moyeu . 10T Maximum
- Mettre en place l'étoile de maintien F032038509, la fixer sur le carter et sur le moyeu à l'aide de deux écrous de roues.
- Monter deux anneaux de levage
- Nettoyer le filetage et monter un écrou à blanc. Il doit se visser à la main jusqu'au bout.

**16. Détermination de la cale de précharge des roulements de moyeu**

- mettre en place la cale de réglage – grande portée côté couronne - (Voir fiche de réglage : épaisseur de la cale démontée + 0.25mm). (Maxi 0,25mm / Mini 0,20 mm)
  - Mettre en place le cône du roulement étalon (OFL 2717) sur le poussoir
  - Mettre en place le roulement étalon (3 bis) à l'aide du poussoir
  - Mettre en place la bague sous joint (6 bis).
  - Mettre en place la rondelle d'arrêt
  - Visser l'écrou de moyeu
  - Enlever l'étoile de maintien
  - Mettre en place l'outil de blocage du moyeu serré avec 2 écrous de roue.
  - Serrer au couple de 1150 mN. Multiplicateur de couple, clé dynamométrique, douille spéciale OFL
  - Enlever l'outil de blocage
- 17. Montage du roulement arrière et serrage du moyeu**
- Mettre en place le cône du roulement définitif sur le chauffe roulement (110°C)
  - Mettre en place le cône du roulement sur l'OFL 2719 (gants anti-chaleur).
  - Mettre en place le roulement sur le moyeu.
  - Mettre en place l'outil sur le moyeu.
  - Mettre en place l'OFL 2720 en appui sur le roulement.
  - Mettre en place le vérin sur la tige filetée.
  - Visser l'écrou derrière le vérin.
  - Actionner le vérin pour terminer la mise en place du roulement (pression max = 150 bars).
  - Déposer le vérin tirer / pousser
- 18. Contrôle de la cote de voie**
- Gratter la peinture pour pouvoir mesurer la largeur de la voie au niveau du moyeu (V1).
  - Mesurer la largeur de voie : 159 (+/-0.1) mm
- Si la côte est dans la tolérance alors la cale définie est bonne. Continuer les opérations. Inscrire la valeur mesurée dans la feuille de réglage
- 19. Démontage de la descente de mouvement**
- Mettre le pignon (5 bis) sur un support adapté
  - A l'aide d'un tournevis, ôter les coupelles, les nettoyer et les stocker.
  - Enlever les cônes des roulements (4 bis).
  - Taper à l'aide d'un jet en acier doux pour extraire les pistes des roulements (4bis) et la cale de pré charge
  - Récupérer la cale de réglage , la nettoyer et la mesurer en trois points.
  - Marquer au feutre la moyenne des côtes sur celle-ci en vue de sa réutilisation pour déterminer la pré charge des roulements
- 20. Montage des pignons 57 et 58 dents**
- Repérer les pistes des roulements (4 bis) avec leurs cônes et le côté du pignon (5 bis) ou elles vont être emmanchées.
  - Mettre en butée dans le pignon les pistes des roulements à l'aide de l'outil d'emmanchement et de la presse (7 tonnes).
  - Faire le « zéro » de la jauge de profondeur avec deux cales, pour ne pas tenir compte de l'épaisseur de ces deux cales.
  - Empiler les cônes des roulements avec les deux cales

- Mesurer et relever la hauteur totale de l'ensemble.
- Mettre en place la cale de précharge définitive et les 2 pistes de roulements (4bis) dans le pignon (5 bis )

#### 21. Remontage de la descente de mouvement

- Orienter l'axe intermédiaire en positionnant le trou de graissage vers le haut et en le tournant légèrement pour assurer le passage de l'embout de serrage des vis .
- Mettre en place les 4 guides pour guider la descente de mouvement.
- Nettoyer la face d'appui de la descente de mouvement et la mettre en place

#### 22. Remontage du reniflard

- Appliquer du Loctite 542 sur les filets.
- Serrer le raccord.
- Mettre en place le cache du reniflard sur le tube.
- Mettre en place le tube sur le raccord.
- Serrer le cache avec une clé plate.

#### 23. Niveau d'huile et serrage

\*Plein fait par nos soins :

- Faire le plein.
- Contrôler le niveau d'huile
- Monter le bouchon. Serrer au couple de 30 mN
- Apposer l'étiquette (1 pour un pont moteur, 2 pour un pont porteur)

\*Plein non fait par nos soins :

- Monter le bouchon.
- Apposer l'étiquette (1 pour un pont moteur, 2 pour un pont porteur)

### 3.4 Diagnostic

Le but initial de notre travail consiste à faire une analyse de défaillances des composants du pont de bogie de tram citadis chez cital (voir figure suivante ), pour cela il est nécessaire de faire état des lieux global.



**FIGURE 20** – Cas de défaillance des engrenages (6DR) mécaniques du pont

La problématique de départ exprimée par l'entreprise CITAL est d'identifier les causes de défaillance des engrenages type 6DR de la figure précédente .

L'engrenage défaillant en question (figure 6) est liée à une chaîne d'engrenage de la figure 7, qui est liée a la chaîne cinématique de tout le pont ! par conséquent l'analyse de ce genre de problème nécessite la mise en oeuvre de la maquette numérique 3D complète de tout le pont !

L'engrenage défaillant en question ne peut être analysé sans son environnement extérieur et ses liens d'assemblage avec les autres composant du pont, d'où la nécessité de mettre en oeuvre une approche globale de maintenance basée sur la technologie industrie 4.0, et plus précisément une approche numérique basée sur la technologie digital twin.

Pignonnerie :

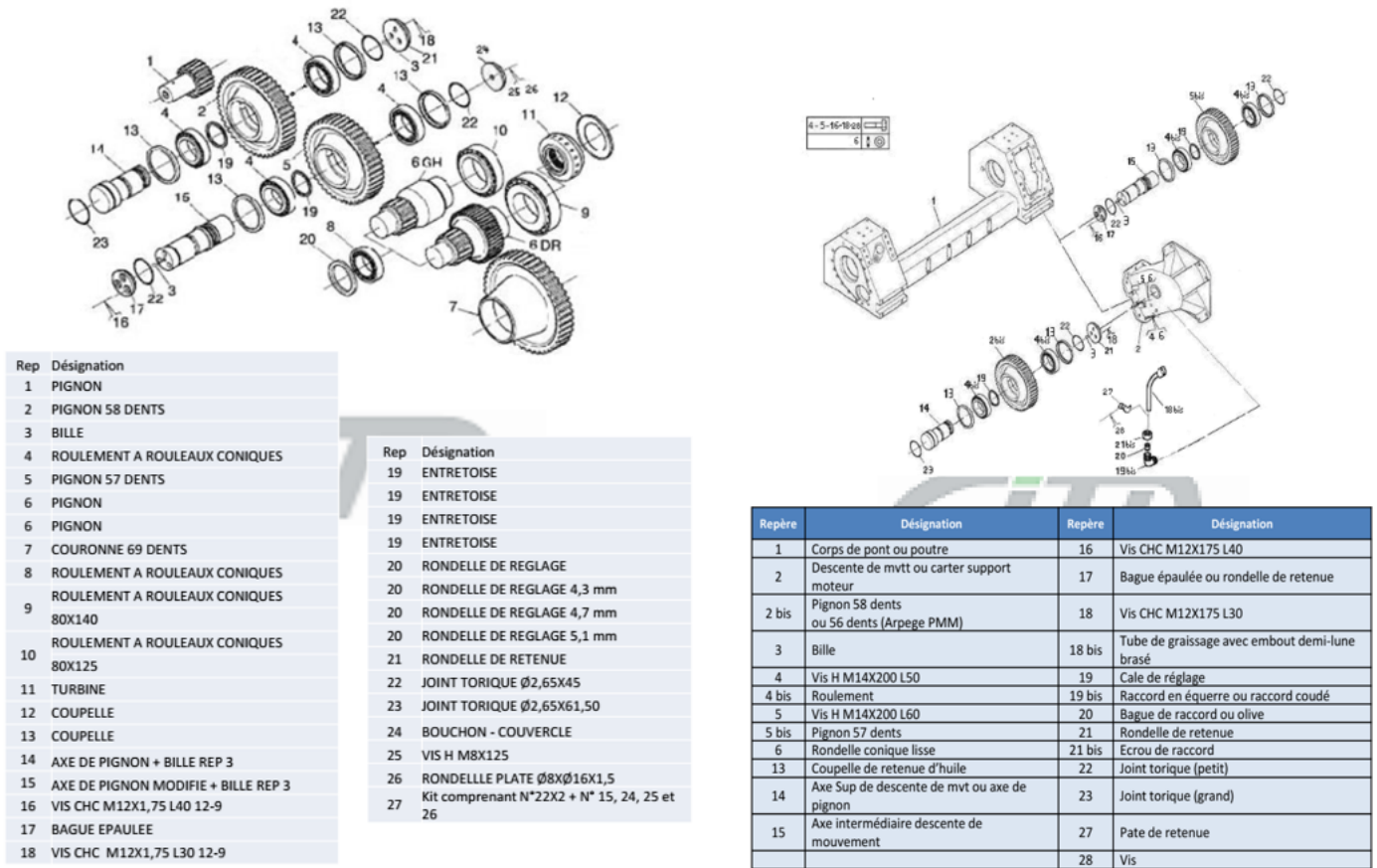


FIGURE 21 – Emplacement de l’engrenage défaillant dans la partie pignonnerie du pont

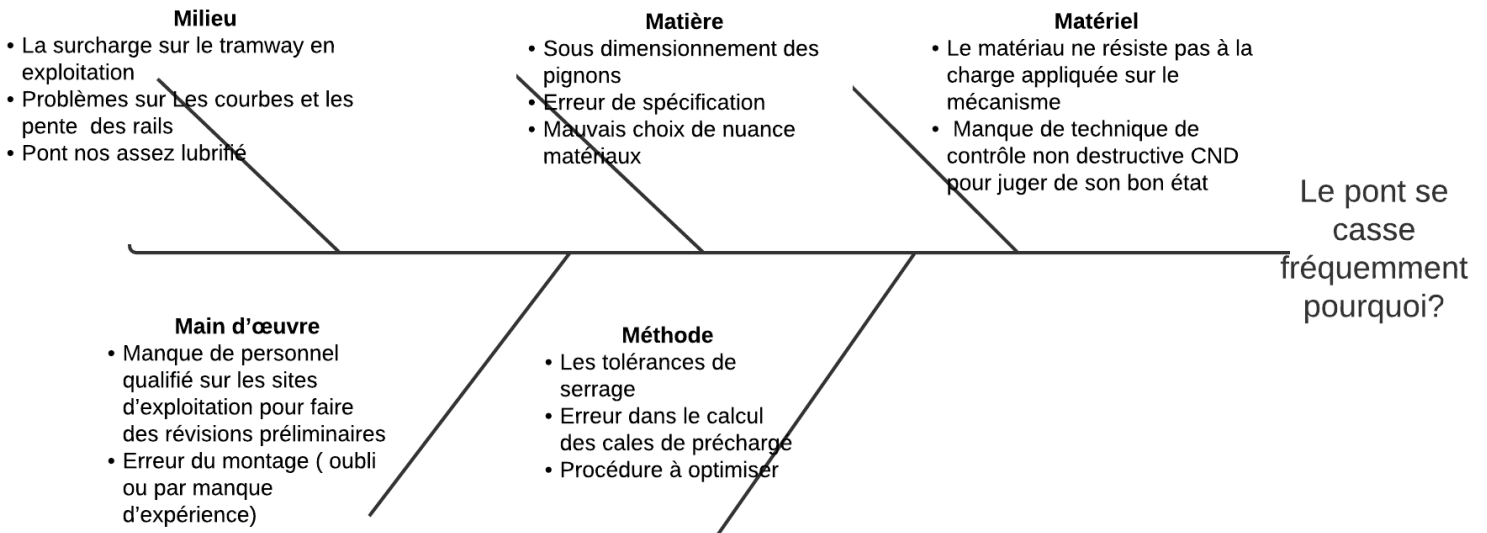
Notre visite sur site au sein de CITAL Annaba consistait à extraire toutes les informations nécessaires liées au fonctionnement du pont et aussi de l’activité de réparation des ponts. Ses informations sont primordiales pour les intégrer par la suite dans l’approche proposée dans les chapitres suivants.

Nous pouvons citer quelques insuffisances au niveau de l’activité de maintenance chez CITAL :

- L’absence des plans 3D des pièces des ponts qui ne sont pas fournis par le fournisseur.
- Absence d’informations sur nuances des matériaux utilisées dans la fabrications des différents composants mécaniques.
- Absence de traçabilité d’informations sur l’environnement intrinsèque (externe ) du pont.
- Manque du personnels qualifier pour la révision du pont ( Seule 2 personnels sont formé pour réviser le pont ) et la réparation se résume juste par un simple montage et démontage suivant la procédure exigé par le fournisseur !
- CITAL subit des sur-coûts imposés par la procédure de réparation de pont telle dictée par le fournisseur, en effet lorsqu’un des composants du pont est cassé, l’intégralité de la chaîne cinématique (pignonnerie) est changée!(voir figure 13)

nous avons ensuite essayé de faire une analyse des défaillances des ponts par la méthode AMDEC mais par manque de temps et de moyens nous nous sommes orientés ensuite vers l’élaboration d’un

diagramme d'ischikawa après avoir effectué des interviews avec les personnels de l'atelier et du département qualité, nous avons résumé les hypothèses concernant les causes de défaillance dans le diagramme suivant :



**FIGURE 22** – Diagrammes de ISCHIKAWA

Les causes suspectes des problèmes passent par la validation des hypothèses qui nécessitent un support de validation ! d'où l'intérêt de la maquette numérique produit et la solution digital twin proposée dans les chapitres suivants, qui a pour objectifs :

- Avoir une base de données 3D des différents composants et collecter les données de l'environnement intrinsèque du pont.
- Analyser en temps réel l'état de santé de chaque composant du pont.
- Avoir un outil d'aide à la décision pour l'activité de maintenance.
- Avoir un support numérique 3D permettant de développer des nouveaux modèles de ponts.
- Gestion des enregistrements de la maintenance préventive pour augmenter la visibilité et avoir une traçabilité.
- Documenter les activités de maintenance.
- Monitoring des équipements par des objets connectés (IOT).
- Optimiser la procédure de maintenance et surtout trouver un moyen pour optimiser les coûts liés aux changements de toutes les pièces du pont.

Pour cerner la problématique on établit le matrice QQQQCP suivante :

Questions	Réponses
QUI?	Les acteurs principaux concernés par la problématique sont : Responsable de l'ingénierie au site d'Alger c'est lui qui a lancé la demande Directeur du site de Annaba Responsable industrialisation et méthode à Annaba
Quoi ?	-les casses du pont moteur de bogie de tramways (écart énorme entre le MTTF et le MTBF donné par le constructeur et ce qui est enregistré. -Sur-coût lié aux procédures de montage qui exigent un changement de tous les composants du pont -Surcharge au niveau d'atelier réparation des ponts
Où ?	-Sur le site d'exploitation : les rames en exploitations parfois sont inférieurs a ce que l'entreprise exploitante exige -l'atelier réparation pont de bogie -Le bureau d'ingénierie pour détecter l'expertise et les compétences nécessaires pour minimiser la fréquences des casses et situer exactement le problème
Quand ?	-La problématique est remarquée depuis que le premier écart enregistré , et lors des surcharge d'exploitation des tramways ( la foire des livres sur ALGER et la période estivale )
Comment ?	- Fuite , vibration ou bruit suspecte détecté par le conducteur - Pénalité de retard ( des paiements considérés comme charge budgétaires non-prévues )
Pourquoi ?	- Analyser le pourquoi des casses des ponts nécessite la conception de la maquette numérique et la collectes des données d'exploitation du pont pour pouvoir faire une simulation réaliste de l'environnement du pont cela permet l'anticipation de problème de casse et donc une meilleure maîtrise de l'activité de maintenance -Augmenter la visibilité en assurant une traçabilité d'information qui aide à la prise de décision

**TABLE 3** – Méthode d'analyse et de résolution des problèmes QQQCP.



## 3.5 Énoncé de la problématique

L'analyse précédente des différents besoins en terme de structuration de l'activité de maintenance pour identifier les causes de défaillance des composants du pont, montre bien l'intérêt de l'activité d'ingénierie en amont.

L'activité d'ingénierie ou bureau d'études permet de collecter les données techniques liées à l'activité de maintenance en utilisant le reverse engineering et autres technologies.

A la base de ses informations une maquette numérique produit sera montée, afin d'avoir un support d'intégration de métiers et aussi un support de validation et d'analyse de durée de vie des composants du pont. la questions à poser est comment aider l'entreprise CITAL à analyser les casses des ponts via une maquette numériques ? peut-on aller plus loin et proposer une nouvelle approche ?

L'exploitation de la maquette numérique produit dans le cas dynamique peut être liée à un système d'information basé sur l'intelligence artificielle appelé digital twin. Mais que peut un digital twin ajouter de plus à notre maquette numérique ?

## 3.6 Conclusion

À la fin de ce chapitre, nous avons pu acquérir des connaissances sur le fonctionnement du tramway en général et sur le pont en particulier. Les analyses menées nous ont permis d'identifier et de détecter les dysfonctionnements qui empêchent le fonctionnement optimal de la maintenance, notamment l'absence de la traçabilité.

Nous avons par la suite dressé la problématique afin de mieux la cerner et guider notre démarche dans le pilotage de ce projet qui vise à proposer une démarche d'implémentation Digital twins pour organiser la maintenance chez CITAL.

Dans le chapitre qui suit nous entamons la démarche e notre solution.

## **Chapitre 4**

# **Architecture d'implémentation de l'approche proposée**

## 4.1 Introduction

D'après la littérature, les digital twins sont principalement utilisées dans 4 domaines : l'aéronautique, la médecine, le management hospitalier et la production, néanmoins il serait intéressant d'élargir ce concept sur plusieurs domaines tel que l'industrie ferroviaire. Cependant, il y a quelques obstacles et des challenges pour établir un jumeau numérique (un digital twin). Les principaux défis du jumeau numérique sont :

1. comment convertir les données en informations utiles sur différents systèmes de contrôles d'entreprise et dans la maquette numérique ?
2. comment intégrer efficacement une variété de données sur le processus de maintenance de l'élément physique, les opérateurs, et l'environnement de l'exploitation, en utilisant différentes méthodes.
3. comment rapidement répondre à un événement actuel en fonction des données en temps réel pour prendre une meilleure décision ?

Dans ce chapitre, on divise notre solutions sur deux volets le premier qui consiste à proposer une méthodologie globale pour répondre aux trois questions de mise en œuvre jumeaux numériques dans une maquette numérique produit, le deuxième sera une étude de cas consistant à faire une simulation qui a pour but de montrer l'intrêt de la démarche et de la maquette numérique pour l'activité de maintenance des ponts de tramway.

## 4.2 Méthodologie Généralisée

dans cette partie, nous nous sommes basés sur les recherches qui ont été effectuées auparavant pour proposer une approche généralisée et une architecture, notamment le mémoire de master intitulé "digital twin". pour cela nous avons synthétisé une définition de digital twin dans le cas d'un produit avant de passer au processus d'implémentation du digital twin.

### 4.2.1 Concept de jumeaux numériques pour une maquette numérique produit

La création d'un jumeau numérique pour un objet physique ou un produit commence par la création d'une maquette numérique qui consiste en une représentation géométrique d'un objet ou un ensemble d'objets en 3D par ordinateur pour faire des scénarios de simulation, analyser et contrôler.

Le jumeau numérique dépasse le simple fait de créer des scénarios de simulation en se connectant à temps réel par son jumeau physique. On crée à travers le digital twin un système qui automatise pour la collecte des données, par exemple : matériaux et données de conception etc .On a besoin d'intégrer aux données historiques sur le système (la maquette) des données en temps réel pour aider la création d'un jumeau numérique. Selon la littérature, un jumeau numérique doit avoir les caractéristiques suivantes : un élément physique, un espace virtuel et une méthodologie intégration des données de l'objet physique. Le jumeau numérique peut être un modèle de simulation, un algorithme, un modèle mathématique, etc. Un historique de l'ensemble de données peut être fourni à son jumeau numérique comme ensemble de données initiales pour former le modèle de référence qui est basé sur les technologies telles que machine learning, le deep learning et l'optimisation. Le jumeau numérique génère des recommandations ou de la rétroaction. La rétroaction génère une aide à la prise de décision pour l'utilisateur. Cette aide à la décision devrait être intuitive et aider à peaufiner ou à ajuster les erreurs toute au long du cycle de vie de produit. Ce processus se répète jusqu'à ce que le scénario optimal ou l'objectif soit atteint, l'utilisation optimale de sa capacité et l'anticipation d'éventuelles erreurs ou défaillances. Les auteurs ont 3 éléments importants pour la mise en œuvre de jumeaux numériques produit.

#### **Élément physique :**

Dans notre cas c'est l'objet physique lui-même (le pont de bogie). Tout d'abord, un jumeau numérique contient des données collectées et de son équivalent physique. Les données comprennent divers paramètres qui sont cruciaux pour la modélisation. Elles comprennent la conception de produits les spécifications, les données relatives aux procédés et à l'ingénierie et les données à jour (en temps réel); données historiques sur la configuration et l'état de fonctionnement, et les dossiers d'entretien du contrepartie du monde réel. Les données peuvent inclure les vibrations, la température interne ou externe, le couple moteur etc. Deuxièmement, un jumeau numérique peut contenir une variété de modèles informatiques ou analytiques relatifs à sa contrepartie dans le monde réel, passant par les lois naturelles, s'orientant vers les données (statistique, apprentissage automatique/artificiel intelligence) et géométrique ou orientée visualisation (modélisation 3D et augmentée réalité). Enfin, un jumeau numérique fournit des interfaces de service pour les applications d'accéder à ses données et d'invoquer ses modèles. La connexion entre un jumeau numérique et son la contrepartie du monde réel est dynamique, peut-être en temps réel et bidirectionnelle ;

Par conséquent, un jumeau numérique permet aux décideurs de simuler et de prédire l'état et le comportement de sa contrepartie du monde réel basé sur l'analyse de l'historique et en temps réel données traitées. Il répond de manière optimale aux conditions changeantes de la contrepartie du monde réel.

### **Élément numérique :**

L'élément numérique c'est le modèle 3D de la maquette numérique. La modélisation où les contraintes et les fonctions objectives sont ou une simulation où la logique de simulation et les mécanismes de raisonnement sont conçus pour capturer le modèle physique. L'élément numérique d'un jumeau numérique représente l'analyse quantitative et visuelle sur les actions réelles.

La différence entre la simulation et les paramètres de l'expérience de physique réelle est que la simulation n'est pas basée sur l'environnement réel, mais le modèle dans l'environnement virtuel a été cartographié à partir de l'environnement réel. Les méthodes correspondantes de simulation de la maquette, tels que la configuration logique numérique, ensemble d'événements, conditions de contraintes et conditions aux limites. Les différents paramètres de fonctionnement parmi la simulation peuvent être plus réels et décrire pleinement le fonctionnement et l'évolution de l'élément physique.

Les scénarios « possibles » peuvent être réalisés en simulation, ce qui permet d'améliorer et d'optimiser l'espace physique selon les résultats optimaux dans l'espace virtuel, afin de mieux améliorer la fiabilité et l'efficacité, réduire les coûts d'exploitation et de maintenance du produit.

### **Intégration :**

La connexion entre un jumeau numérique et son homologue du monde réel doit être dynamique, éventuellement en temps réel et bidirectionnelle. La communication entre les éléments numériques et physiques permet d'identifier rapidement les problèmes potentiels. C'est l'avantage et l'objectif des jumeaux numériques. Les données recueillies à partir de l'élément physique comprennent divers paramètres qui sont cruciaux pour la modélisation de l'élément physique. Il peut inclure les spécifications de conception du produit, les données techniques, les données sur l'environnement intrinsèque du produit et données conservées (configuration et états d'exploitation en temps réel et historiques, et dossiers de maintenance).

Les données peuvent également comprendre le temps et les ressources nécessaires pour mener à bien une opération.

L'intégration est la partie la plus importante du jumeau numérique. L'efficacité d'un jumeau numérique entièrement dépend de lui. Une boucle de rétroaction (encore mieux si automatisée) basée sur les données en temps réel et capacité d'ajustement peut renforcer le jumeau numérique immensément. L'intégration est la clé de la Une base de données ou un dépôt est important pour le jumeau numérique d'un produit. La base de données SQL (Structured Query Language) ou No-SQL peut être utilisée tant que les paramètres d'intérêt sont définis. Tout langage de programmation approprié peut être utilisé pour extraire automatiquement les données traitées de la base de données si elles sont disponibles. la collecte des données est manuelle car il s'agit d'un assemblage manuel, des outils statistiques peuvent être déployés pour annuler les écarts et les valeurs aberrantes.

Une considération importante est que l'ensemble du concept devrait être ajustable et évolutif pour les technologies plus récentes et meilleures. Cela peut permettre à la méthodologie proposée d'être adaptative.

## 4.2.2 Méthodologie de développement des jumeaux numériques

La technologie de digital twins prend son ampleur dans l'industrie aéronautique, hospitalière et d'autre. Une méthodologie adaptative peut aider l'effort. La méthodologie Digital Twin assure une traçabilité et produit une représentation numérique qui peut être déployée. Un utilisateur doit recueillir des données sur un phénomène ou un événement ou l'entité physique. Si l'utilisateur a des données opérationnelles comme les capteurs et des données d'événements comme les dossiers de maintenance, l'analyste peut les corrélérer pour construire un modèle qui peut les prédire à l'avenir.

Cette partie vise à donner le ton en proposant une méthodologie. Les utilisateurs peuvent appliquer cette la méthodologie de mise en œuvre des jumeaux numériques pour la maintenance et le suivi du pont de bogie de tramway

la méthodologie proposée qui est générique et celle qui peut être appliquée à une variété de maquettes produits.

Du point de vue de la méthodologie numérique, les utilisateurs fournissent des informations pour formuler le problème. Le problème digital twin comprend l'identification de l'objectif, des contraintes et facteurs. Ici, le jumeau numérique commence à acquérir des connaissances dynamiques. Les connaissances statiques comprennent les dimensions géométriques, la nomenclature des matériaux, processus, etc. L'information dynamique est celle qui change avec le temps tout au long du cycle de vie du produit. Une fois les connaissances recueillies, un modèle conceptuel est conçu. Le modèle conceptuel représente virtuellement les processus physiques dans la maintenance du pont. Il permettra l'échange de l'information sur les attributs du problème dans le monde virtuel. Une activité parallèle a lieu après formulation du problème, qui est de spécifier l'exigence de données. L'exigence de données décide quelles données devraient entrer dans le jumeau numérique. L'étape de l'exigence de données prend des propriétés physiques avec des capteurs qui mesurent les entrées critiques.[18]

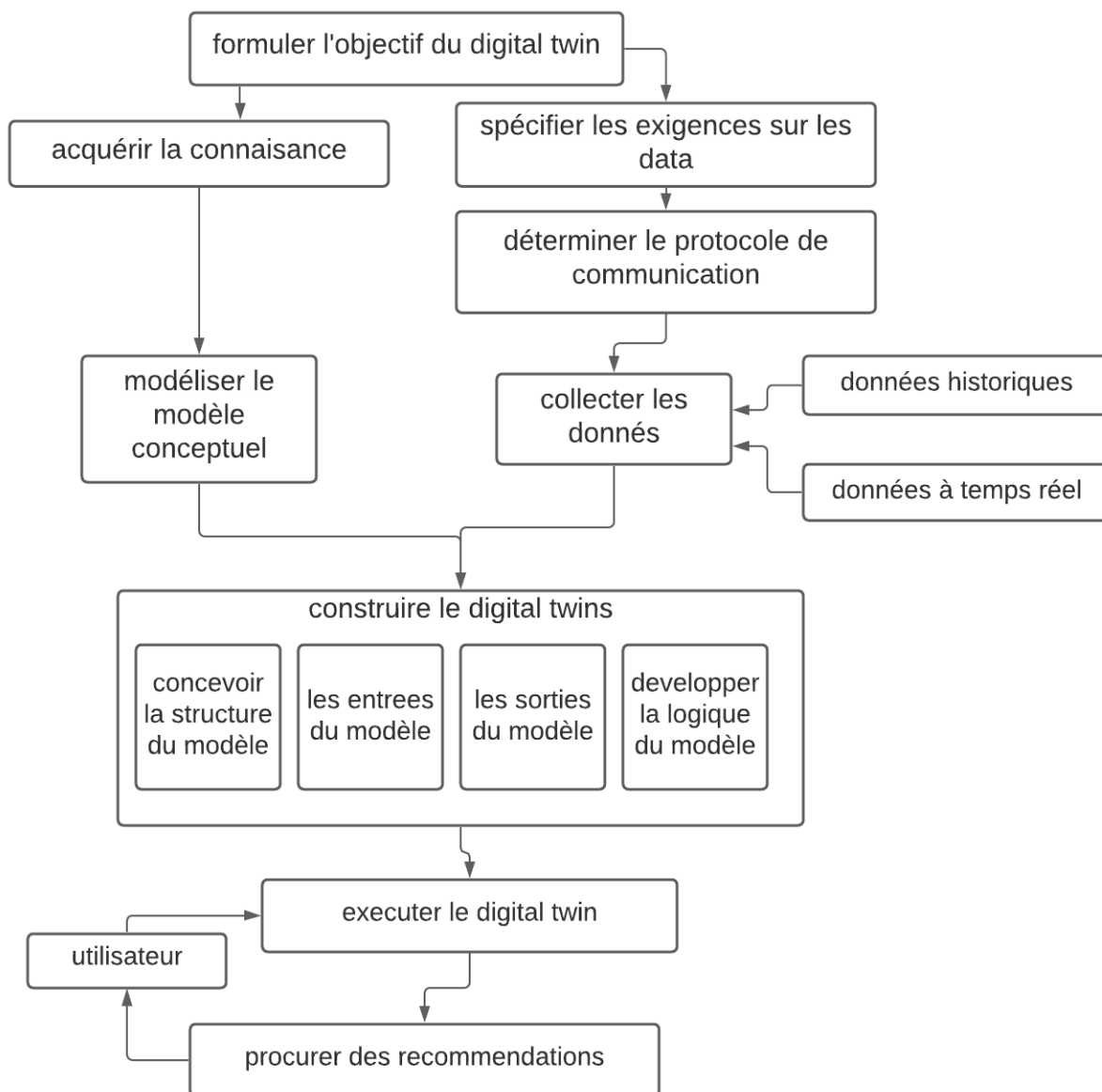


FIGURE 23 – Processus de DT

Il est décidé en fonction du point de vue de l'opération et facteurs externes. L'installation physique est équipée d'une capacité, au moyen de divers actionneurs, pour ajuster sa fonction, son comportement et sa structure dans le monde physique. Les capteurs et les commandes sont les deux piliers technologiques d'un jumeau numérique. Le premier joue un rôle dans le monde réel, tandis que ce dernier joue le rôle dans l'exécution des ajustements souhaités. La spécification des constructeurs comme une base pour le jumeau numérique. Après la spécification des exigences de données, le protocole de communication est déterminé. Les données doivent être communiquées en échangeant différentes fonctions en utilisant protocoles d'intégration et référentiel de données. Les connexions sont activées utilisant un certain nombre de technologies, telles que la communication réseau, le cloud computing et le réseau sécurité. Les technologies de mise en réseau possibles pour

les produits de consommation comprennent, par exemple, Bluetooth, code QR, code-barres, Wi-Fi, Z-Wave, etc.

Étant donné que les données sur les produits sont directement et indirectement récoltées concernant les interactions utilisateur-produit, il est essentiel de garantir la sécurité des connexions. Dans lumière de l'Internet des objets (IoT), beaucoup d'efforts ont été consacrés à connecter le physique et produits virtuels, qui peuvent être adaptés pour la recherche digital twins. L'agrégation des données et traitement peut être effectué sur le matériel local ou dans le cloud. La technologie progresse rapidement, et des architectures évolutives sont sorties, les protocoles de sécurité devient également un problème. La sécurité les aspects devraient être examinés et planifiés avec soin. Maintenant, les données sont recueillies et traitées.

Les données hétérogènes provenant de différentes sources doivent être accumulées dans une base de données.

Les données historiques sont déjà stockées dans une base de données. Les données en temps réel sur l'élément physique (le pont) et son environnement d'exploitation

Les données disponibles, les besoins en données et la stratégie - agir de façon cohérente pour organiser les données dans un format utile dans la base de données. La qualité des données est également un point de préoccupation. La qualité des données sur les produits (PDQ) doit être un objectif crucial pour assurer le succès mise en œuvre digital twin. Il existe deux utilisations des données sur les produits : (1) la direction latérale et (2) la direction verticale.

La direction latérale signifie utiliser les données du produit dans une phase du cycle de vie du produit. Vertical direction signifie réutiliser les données du produit dans les phases subséquentes du cycle de vie du produit. PDQ est important pour les deux utilisations.

Après la collecte et le traitement des données et le développement de la conception, la phase de la méthodologie se produit - la construction du jumeau numérique. Un modèle numérique de la physique sera créée par la modélisation d'une maquette en intégrant des facteurs d'entrée et de sortie, tels que la température, les vibrations, le temps, le taux de rendement etc . Les données devraient provenir du produit réel réelle. Il devrait y avoir une structure de modèle – conçu et intégré entre les différentes plateformes. La structure du modèle devrait faciliter transfert en temps réel entre les plateformes. Dans l'étape logique de la méthode de développement, données sont visualisées, surveillées et analysées. La plateforme et les technologies peut être utilisé pour développer des idées et des recommandations. L'optimisation de l'utilisation du produit peut être réalisé en établissant une logique de modèle avec succès

Après la construction du jumeau numérique, un utilisateur exécute le modèle digital twins. La sortie du jumeaux numériques fournit une rétroaction à l'utilisateur, de sorte que les utilisateurs peuvent prendre une décision éclairée. Le résultat de l'étape de recommandation est visualisé et mis en évidence. Le rendement peut être évalué, et différents scénarios peuvent être testés. Le jumeau numérique facilitera et changements et impacts à long terme sur le cycle de vie du produit. De cette manière, Les intervenants peuvent mettre à jour la conception ou faire des modifications soit sur les exigences d'exploitation ou les dimensions ou les efforts exercés pour obtenir un résultat plus favorable.



## Architecture d'implémentation :

dans cette section on propose une architecture du digital twin basée sur des travaux de recherches et sans trop tarder nous allons l'expliquer en détail dans les paragraphes qui suivent.

Les anomalies dans DMU peuvent être dues à des causes internes ou externes. L'architecture proposée vise à détecter rapidement les défauts du système susceptibles de compromettre la fiabilité du système

L'objectif principal est de localiser les problèmes, d'évaluer leurs criticités puis d'avertir les responsables de maintenance ou les opérateurs via les outils Iot

1. **DMU** : Elle se décompose de modèle physique et numérique et des capteurs
2. **Acquisition des données** : Une partie fondamentale dans la maintenance prédictive est l'acquisition des données des équipements. Cette fonction est importante car elle permet de connaître l'état et le comportement du DMU

Les Capteurs fournissent des données des composants spécifiques à la Montage par exemple les ordres de montage des pièces , les heures de fonctionnement des machines, les tolérances de montages . . . .

Les Iot peuvent nous renseigner sur certaines informations si besoin comme la température, la pression, les vibrations..

3. **L'ensemble des modules détecteurs** : Un ensemble de n modules Détecteurs (D1 à Dn) qui représentent des modèles comportementaux du système réel utilisés pour détecter les dysfonctionnements du DMU. Le cœur de chaque détecteur est un modèle prévoyant le comportement en temps réel.

Chaque détecteur est concerné par un aspect particulier du DMU (aspect événementiel en temps réel, aspect thermique, aspect énergétique, aspect économique, ...)

4. **Centre intelligent d'aide à la décision en maintenance** : Le centre intelligent d'aide à la décision permet de traiter les écarts détectés, entre le comportement virtuel idéal et le comportement réel.

Les dysfonctionnements ( données à temp réel ) observés détectés par sont stockés dans une base de données créant un historique de l'utilisation de l'équipement dans le temps.

Ces données historiques sont utilisées comme base pour une analyse ultérieure des données à l'aide d'un algorithme d'apprentissage automatique en détectant des modèles anormaux et en identifiant des scénarios de défaillance récurrents. L'utilisation de méthodes d'apprentissage automatique vise à améliorer l'efficacité globale du système.[11]

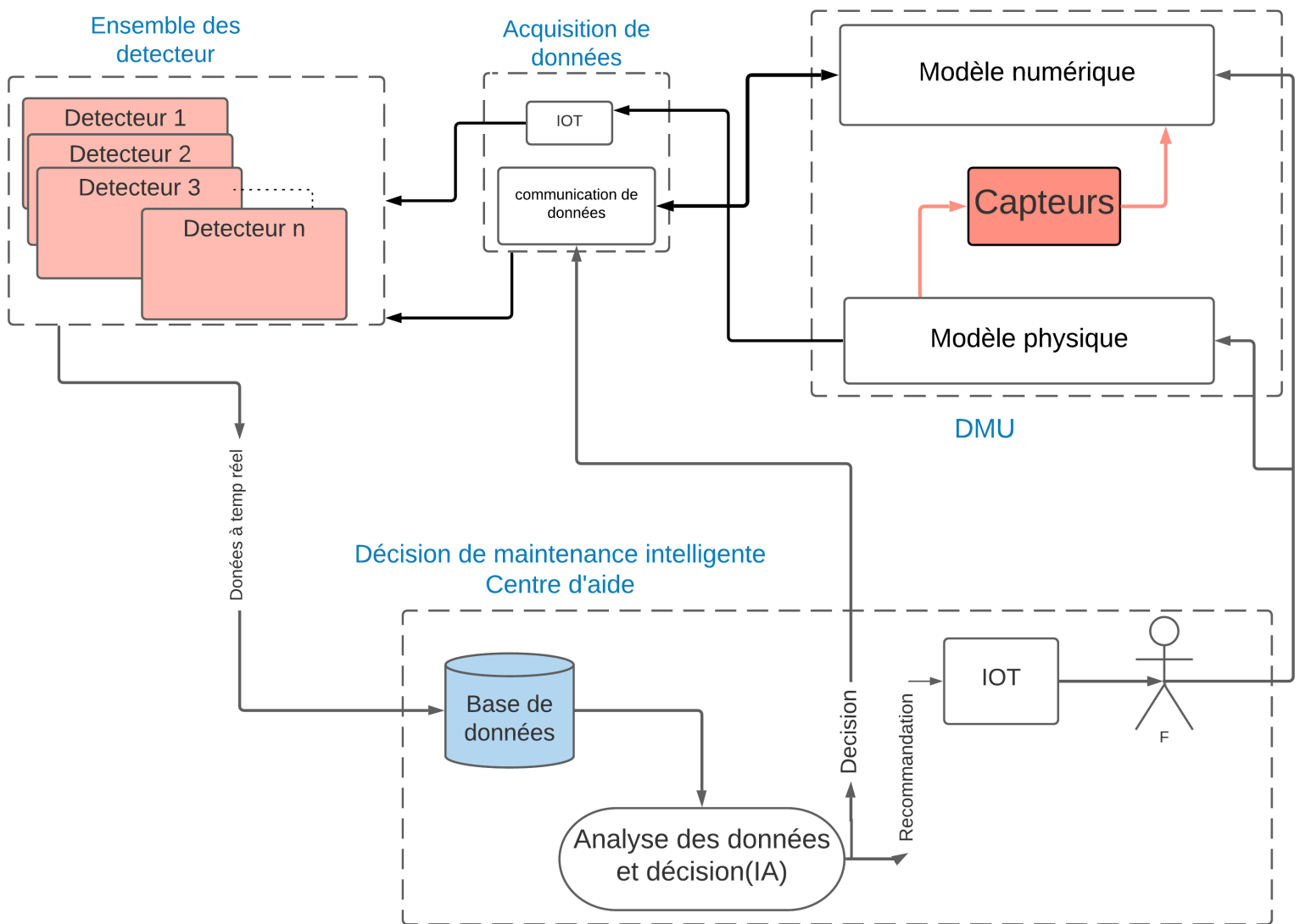


FIGURE 24 – Le schéma de l'architecture proposée

**L'analyse des données historiques :** Le résultat de cette analyse est la prédiction du comportement futur du système, indiquant l'occurrence d'une défaillance potentielle dans une période de temps et la notification de l'opérateur du dysfonctionnement ainsi que de sa criticité. Par conséquent, des actions peuvent être établies avant le dysfonctionnement.

**L'analyse des données immédiates :** elle permet de prendre des décisions concernant la maintenance réactive sur la base d'un seuil de temps de blocage estimé, préalablement fixé par l'opérateur.

Les résultats de cette analyse peuvent être des recommandations transmises à l'opérateur pour l'aider à entreprendre des réponses réactives qui seront appliquées au DMU. Ces recommandations d'ajustement des décisions de maintenance seront transmises via l'Iot

## Machine learning

L'intelligence artificielle est une constellation de nouvelles technologies donnant aux machines l'aptitude de percevoir, comprendre, agir et apprendre.

L'apprentissage automatique est une subdivision de l'intelligence artificielle. Les algorithmes de ce dernier permettent aux ordinateurs de s'entraîner sur des données afin d'automatiser le processus de décision.

Deux principales méthodes de Machine Learning sont largement adoptées de nos jours, l'apprentissage supervisé basé sur des données historiques disponibles et étiquetées préalablement et l'apprentissage non supervisé utilise des données non étiquetées, de sorte que l'algorithme d'apprentissage trouve tout seul des points communs parmi ses données d'entrée. Dans le cadre de l'apprentissage supervisé, nous retrouvons deux approches : la classification et la régression.

La classification est le processus de recherche de modèles mathématiques et statistiques pour séparer les données en plusieurs classes où les données peuvent être divisées en binaires ou en plusieurs étiquettes discrètes. Il est utilisé pour classer les modèles normaux et anormaux, défectueux et sains dans une certaine période de temps dans la maintenance prédictive. Alors que la régression est le processus de recherche d'un modèle pour distinguer les données en valeurs réelles continues. Elle est utilisée pour prédire le temps utile restant de l'équipement industriel en général.

Cependant, le défi est de choisir la technique appropriée et la plus efficace afin de présenter un socle d'aide à la décision solide. Il existe plusieurs méthodes capables de détecter les défaillances, de la plus simple à la plus complexe. Selon la littérature, les plus pertinentes et les plus utilisées dans les modèles de maintenance préventive sont la régression logistique (LR), le réseau neuronal artificiel (ANN) et la machine à vecteur de support (SVM).

### **4.3 Mise en œuvre de la maquette numérique produit : cas de pont**

L'approche proposée dans la figure suivante représente deux aspects : le premier aspect est celui de l'utilisation de maquette numérique comme support d'intégration du métier de la maintenance. Le deuxième aspect est celui de la connexion de la maquette physique avec la maquette numérique en vue de récolter des informations en temps réel permettant de simuler le comportement réel de notre pont du tramway.

Les informations qui sont récoltées à partir de la maquettes physiques sont exploitées dans la maquette numérique en vue de la gestion de l'activité de maintenance.

Dans cette section on va mettre en œuvre une architecture d'une solution digital twin à partir d'une maquette numérique du produit (pont du tramway).

Premièrement on va présenter la maquette numérique du pont ainsi les différents composants de la maquette

Deuxièmement on va faire une classification des informations nécessaires pour l'exploitation de la maquette numérique et on va décrire l'approche en cas des ponts

Troisièmement on va présenter l'intérêt de la maquette numérique produit dans le cycle de maintenance industrielle

Après on va illustrer l'intérêt de cette approche une exemple de simulation du comportement des engrenages du pont à partir des informations récoltées de la maquette physique

### 4.3.1 La maquette de tramway

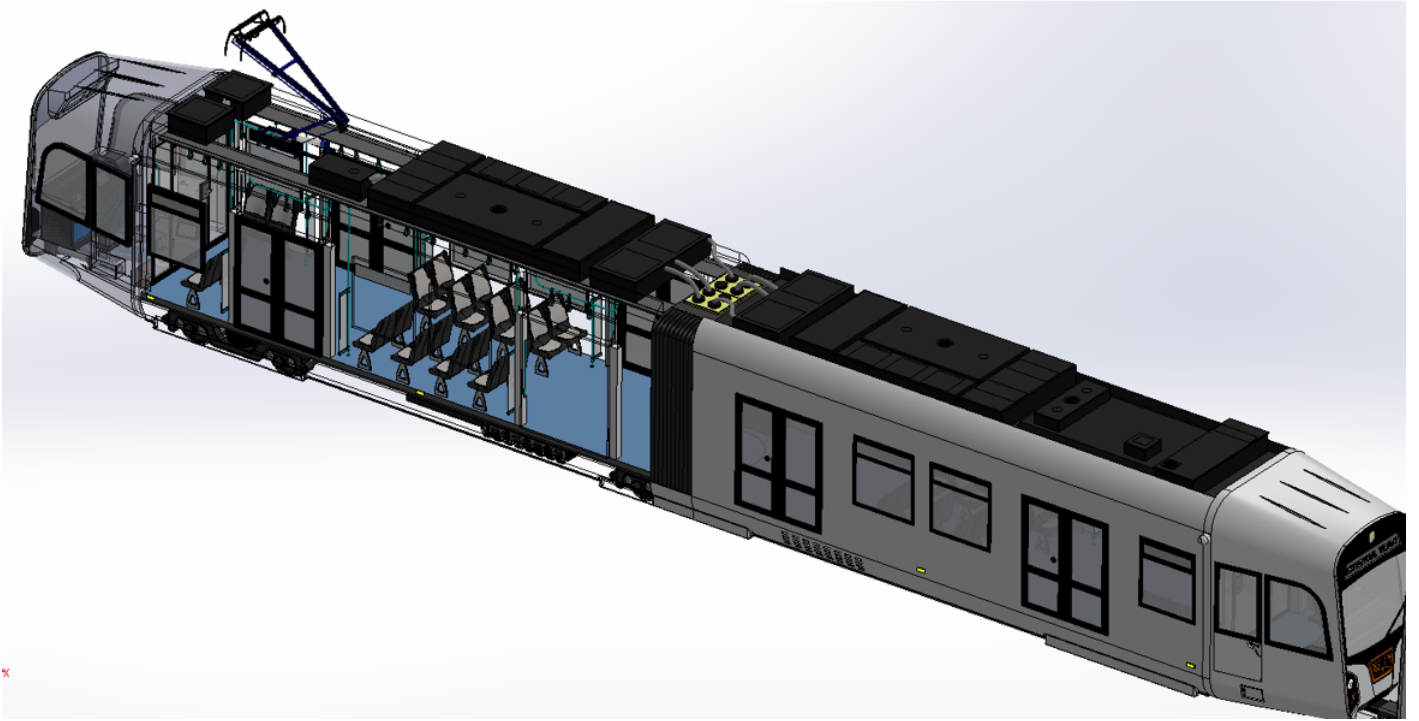
une maquette numérique produit est un support numériques composé de formes géométriques en 3D et des données technologiques liées aux domaines de compétences (Génie mécanique, génie civile, ...)

La maquette numérique 3D favorise le travail collaboratif entre différents acteurs de conception sur le même support permettant ainsi d'optimiser les coûts, et réduire des les délais de conception.

Ces 2 figures représentent un exemple de la maquette numérique 3D du tramway modèle CAO et modèle réaliste

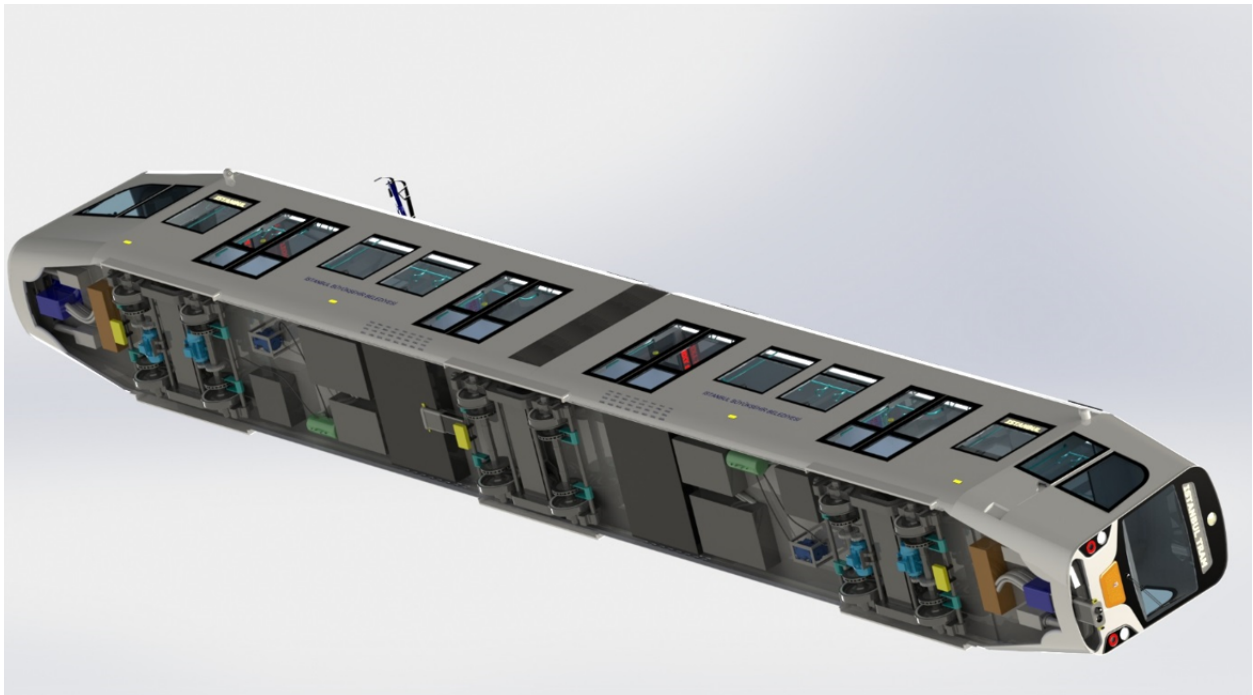


**FIGURE 25** – Maquette numérique 3D de l'ensemble du tramway : rendu réaliste



**FIGURE 26** – Maquette numérique 3D de l'ensemble du tramway : modèle de CAO

Et les 2 figures suivant représentent la position des bogies sur le tram et c'est la partie que nous intéresses



**FIGURE 27** – Position des bogies sur la Maquette numérique 3D du tramway : rendu réaliste



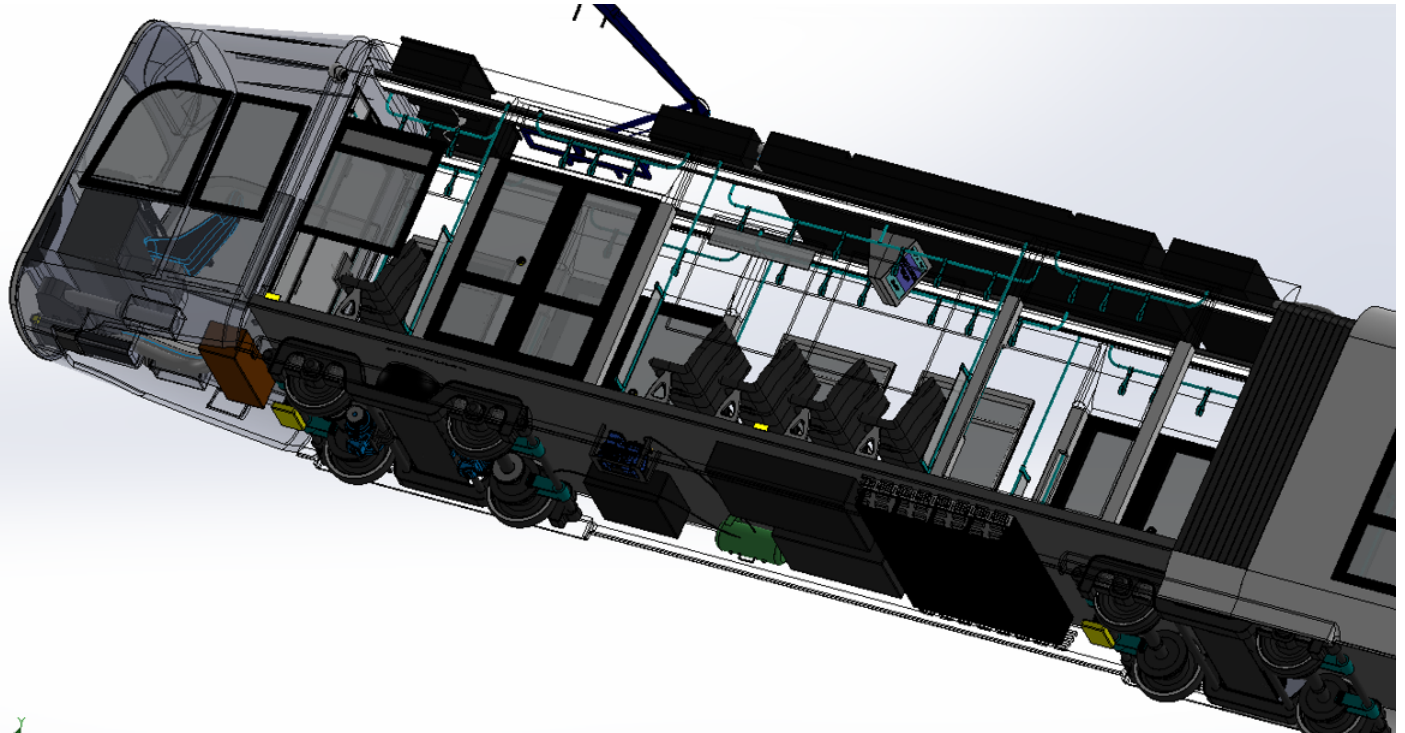


FIGURE 28 – Position des bogies sur la Maquette numérique 3D du tramway : modèle de CAO

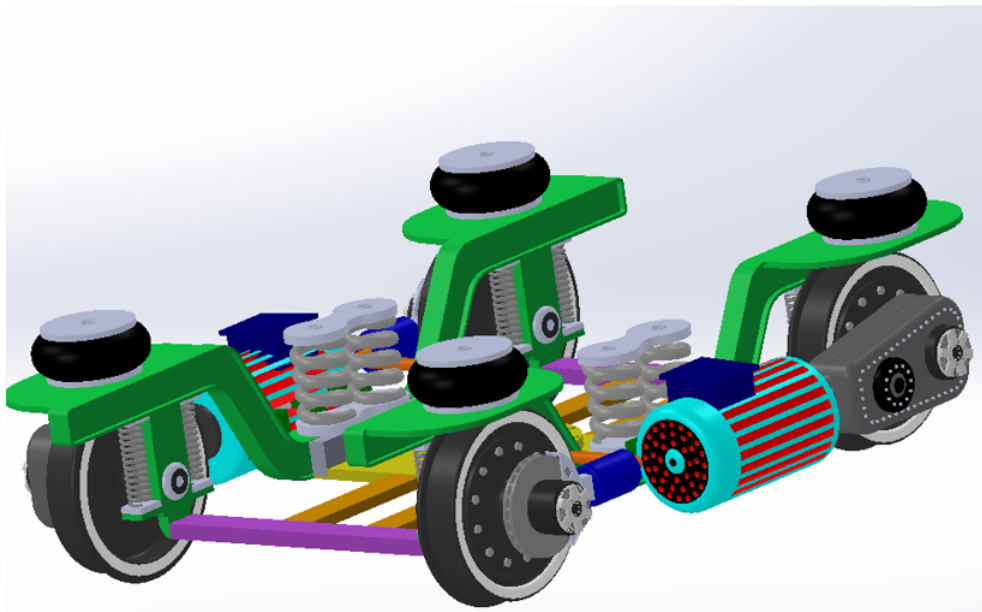


FIGURE 29 – Bogie

On a fait des simulation de montage et démontage de bogie en changeant des tolérances de montage et lors de ce changements on a détecter d'interférences dans le montage

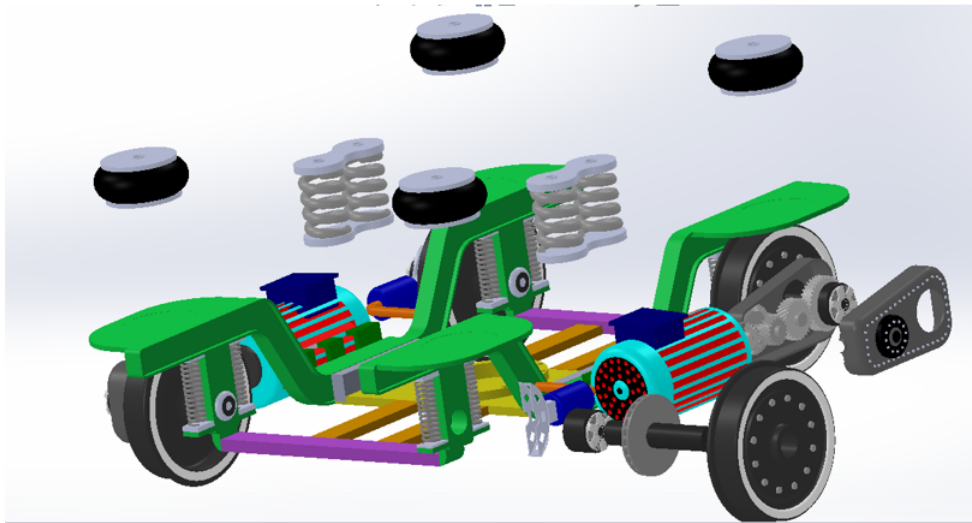


FIGURE 30 – Vue éclater de Bogie

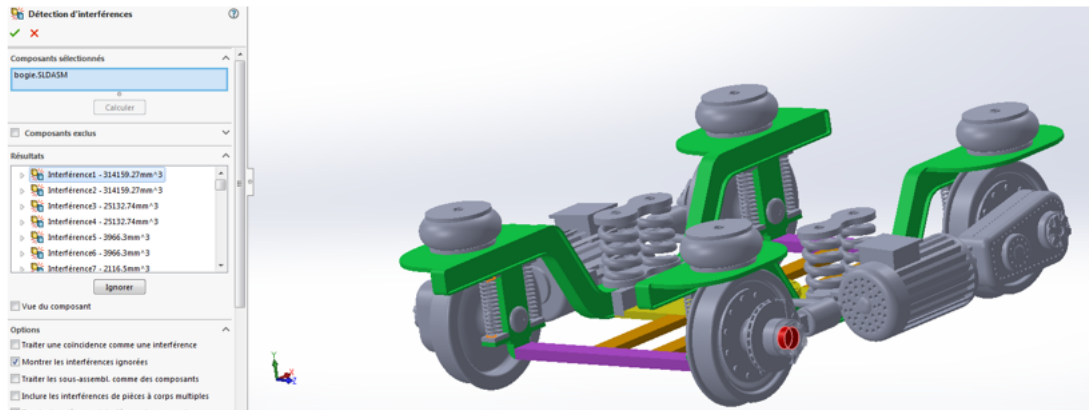


FIGURE 31 – Détection d'interférences dans le montage

### 4.3.2 Classification des données à intégrer dans la maquette numérique et la proposition d'approche

Quelle sont les informations nécessaires pour exploiter la maquette numérique.

Quelles sont les informations pour l'activité de maintenance ?

— Gamme d'assemblage et de démontage.



- Vérification des tolérances de montage.
- Vérification de l'état des pièces.
- Informations sur la disponibilité des pièces dans le magasin.
- Combien de pont à réparer.
- La durée de réparation.
- Le rôle de chaque intervenant.
- Le nombre d'intervenants.

<b>Activité de maintenance</b>	<b>Donné techniques</b>	formes géométriques + matériaux + force + conditions aux limites ...
	<b>Aspect organisationnel</b>	nombre d'opérateurs rôle de chaque opérateur durée de vie de l'opération de maintenance niveau d'accès pour chaque opérateur
	<b>Coût de l'activité</b>	coût de chaque composant salaire de chaque opérateur durée d'intervention les pannes

TABLE 4 – Les Différents données nécessaires .

### 4.3.3 Intérêt de la maquette numérique produit dans le cycle de maintenance industrielle

Les principaux avantages de la DMU se traduisent sur tous les plans : concevoir, construire, rénover, gérer et exploiter les équipements de manière optimale.

**Avantage n°1** : effectuer des simulations avant de prendre des décisions

La technologie est d'une grande aide à la décision : en procédant à des tests, simulations au travers de représentations visuelles, vous vérifiez la pertinence des données, évaluez le budget nécessaire, éliminez les doublons et les erreurs, réduisez les délais.

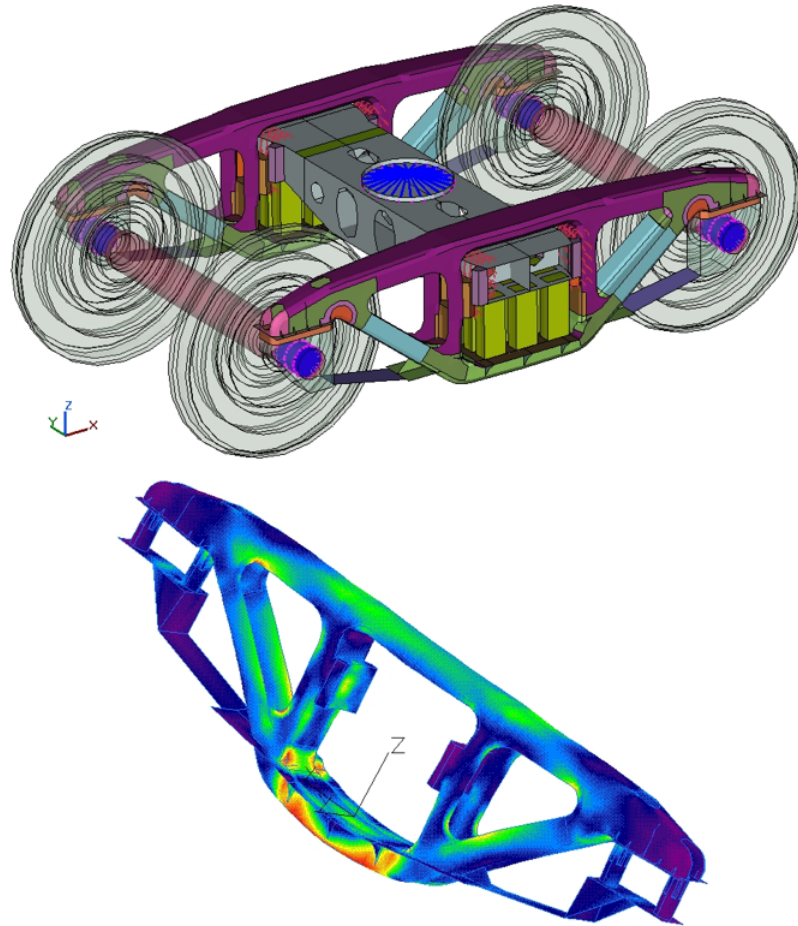


FIGURE 32 – Bogie

**Avantage n°2 : garder le contrôle de la réalisation**

Pour chaque étape, vous planifiez avec exactitude les degrés de complexité, les besoins et anticiper les difficultés. Les mauvaises surprises n'arrivent plus au fil du temps...

**Avantage n°3 réduire les coûts et raccourcir les délais**

Les informations sont centralisées et accessibles à tous les acteurs mobilisés simultanément, pendant tout le cycle de vie du produit. L'appréhension, la collaboration et l'organisation sont optimales, les problèmes détectés et évités, les coûts et les délais diminuent.

**Avantage n°4 : économiser des documents et de l'énergie**

L'écriture numérique des informations, c'est moins de documents, fini les versions multiples. L'utilisation d'une maquette numérique où les données sont centralisées accorde un accès simplifié aux acteurs, en éliminant la répétition de tâches chronophages.

**Avantage n°5 : obtenir une meilleure rentabilité**

Gain de temps, écartement des erreurs, collaboration : vous diminuez les coûts et raccourcissez le calendrier de livraison.

**Avantage n°6 :** une norme professionnelle européenne qualifiante

Entrée en vigueur en 2017, la loi concernant les marchés publics en France donne la possibilité au maître d'ouvrage d'imposer l'utilisation de la maquette numérique. A sa charge de déterminer l'objectif, la méthodologie et le niveau de la maquette dans ses grands axes.

**Avantage n°7 :** avoir un support de formation pour l'activité de maintenance

Gamme d'assemblage

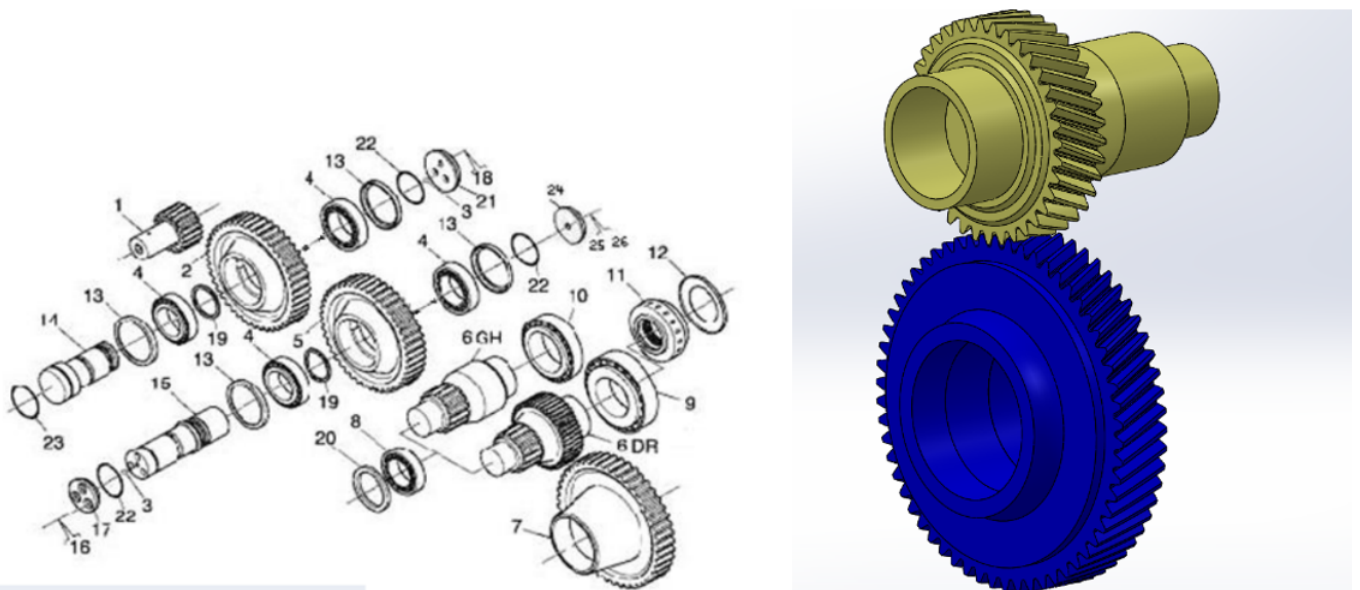
**Avantage n°8 :** La traçabilité des opérations de maintenance

#### 4.3.4 Cas d'études du comportement mécanique des composants du pont

le deuxième volet de notre solution consiste à faire des simulations sur notre maquette numérique spécifiquement sur les engrenages de la couronne et du pignon freiné afin de voir le comportement des engrenages qui change selon les conditions aux limites qu'on pose afin d'en tirer quelques causes suspectes et ainsi montrer l'intérêt de la maquette numérique dans l'activité de maintenance.

Pour cela on a pris l'exemple de deux engrenages du pont avec différentes informations techniques, dans cette simulation on a fixé tous les paramètres et on a joué sur un seul qui est les tolérances de montages différentes afin de voir l'influence des tolérances de montages sur les engrenages et les résultats de la simulation peuvent nous mener à proposer de meilleures procédures de montage et améliorer l'activité de maintenance.

L'image suivante montre les composants du pont les plus sollicités et qui vont être l'objet de notre simulation.



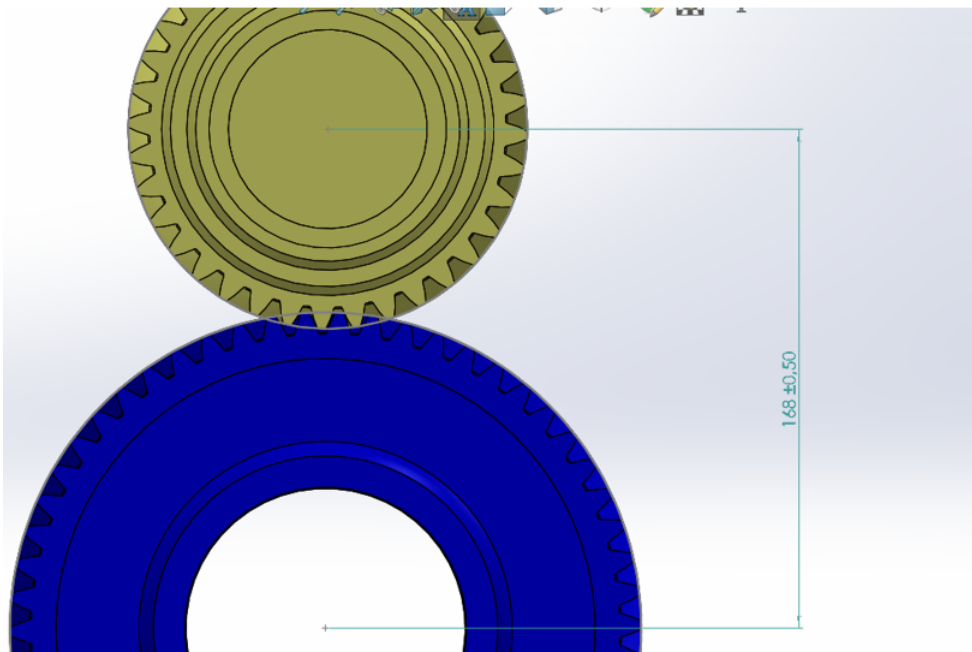
**FIGURE 33** – Cas d'études pour deux engrenages

Afin de montrer l'intérêt de notre approche nous allons utiliser les mêmes informations techniques pour la simulation numérique du comportement mécanique des deux engrenages :

- Mêmes conditions aux limites liées aux déplacements
- Mêmes conditions aux limites liées aux chargements

Seules les tolérances de contact qui changent (voir les 2 figure suivants )

Sur les différentes figures on montre le changement d'effort sur l'engrenage en variant les tolérances de montages, nous proposons deux variantes ou scénarios( deux valeurs de tolérances différentes) pour faire des comparaisons et en tirer des conclusions.



**FIGURE 34** – Tolérance de montage des deux engrenages

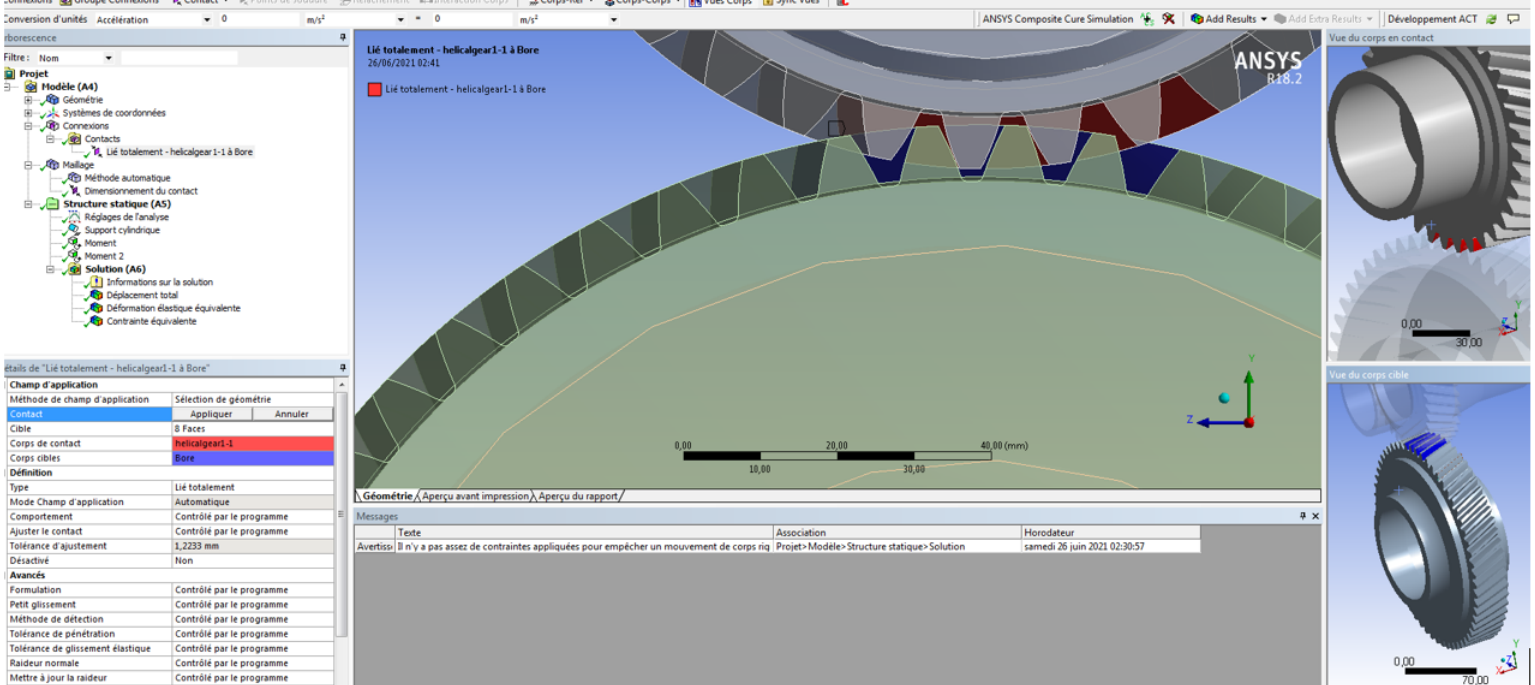


FIGURE 35 – Tolérance de contact entre les deux engrenages est de 1.23mm

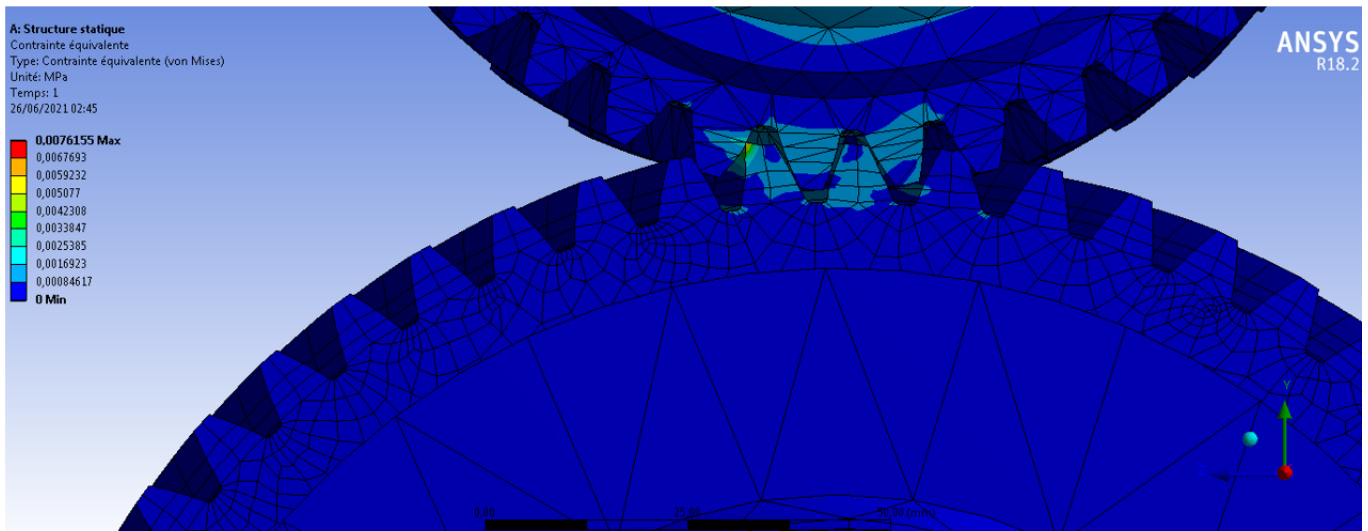


FIGURE 36 – Contraintes équivalentes de Von mises pour le premier cas de la figure précédente

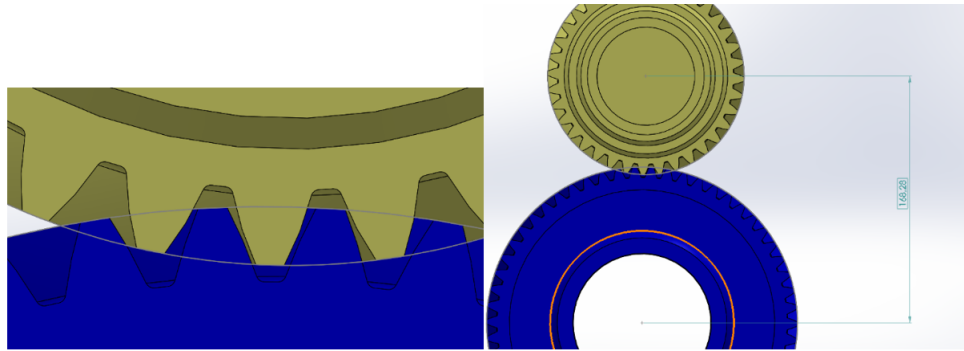


FIGURE 37 – Changement de valeur des tolérances de montages

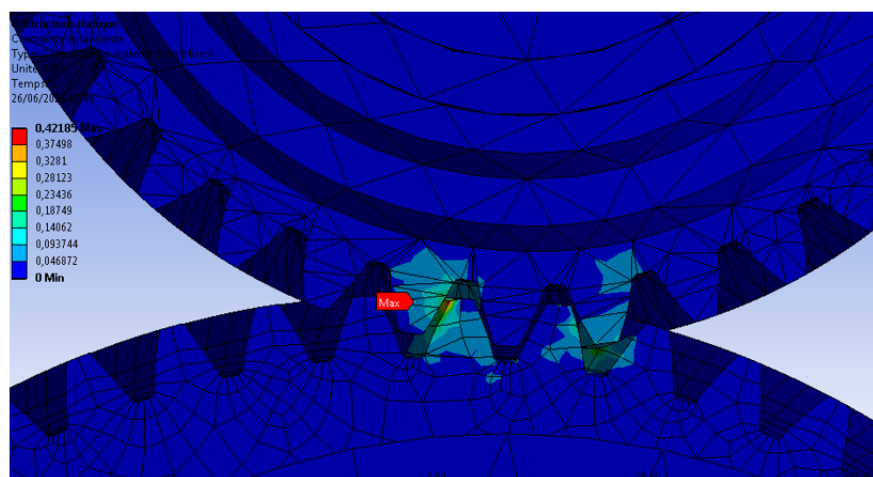


FIGURE 38 – Contraintes équivalentes de Von mises pour le premier cas de la figure9

**Interprétation :** les résultats des deux cas de montage des deux engrenages avec des tolérances différentes montre bien que la variation de tolérance due à l'activité de maintenance a un impact sur le comportement mécanique des engrenages (augmentation des contraintes aux niveaux des dents).

#### Observations et conclusion de l'étude de cas :

Cette étude de cas a démontré l'intérêt d'avoir une maquette numérique, en jouant sur les paramètres que les ingénieurs jugent importants on peut avoir une idée plus claire sur les causes des défaillances et cela seulement en fixant une variable et en changeant les autres et ainsi effectuer des améliorations dans la conception du produit ou les conditions aux limites à imposer aux différents composants du pont notamment les engrenages qui subissent souvent des défaillances.

Comme cité ci-dessus une simulation peut donner une idée sur l'environnement à l'instant T, imaginons le cas avec un jumeau numérique qui donne un feedback sur l'environnement, sur les paramètres pertinents à chaque instant et génère un apprentissage à travers les algorithmes d'apprentissage et le machine Learning donnant ainsi des suggestions à temps réel qui serviront tant qu'aide à la prise de décision et une anticipation sur les éventuels écarts et donc optimiser les coûts de maintenance dans une dynamique d'amélioration continue.

## **4.4 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons proposé Le Processus d'implémentation du jumeau numérique dans le cas d'un produit en proposant l'approche ainsi qu'une classification des données à prendre en considération pour organiser la maintenance du pont, on a pu également montrer l'intérêt de la maquette à travers un cas de simulation sur les engrenages du pignon freiné.

## Conclusion générale et perspectives

De nos jours, tous les systèmes peuvent être connectés grâce aux technologies de l'IoT et CPS, permettant de fonctionner en autonomie et indépendamment. La dernière révolution industrielle souligne la nécessité de promouvoir la communication et l'échange de données entre les systèmes réels et virtuels afin d'accroître la performance des systèmes et apporter plus de valeurs à l'entreprise. Pour rester compétitif, ils doivent être plus flexibles et réactifs afin de s'adapter aux besoins ainsi qu'aux aléas dans les différents processus dans l'entreprise tels que le processus de maintenance. Au niveau stratégique, ils sont aussi appelés à tirer profit des opportunités prometteuses offertes par l'industrie 4.0

C'est dans ce contexte que nous avons proposé une approche digital twin à l'entreprise CITAL afin de l'aider à atteindre ses objectifs, nous supposons que les concepts de la communication, la simulation et l'agrégation des données d'un jumeau numérique peuvent améliorer la fiabilité des systèmes de façon efficace et analyser les causes des défaillances. Ce dernier semble être une solution pertinente permettant de modéliser l'état d'un système, simuler ses performances, faciliter l'accès aux informations, donnant ainsi la possibilité de détecter tout écart de fonctionnement et de prévenir les dysfonctionnements éventuels du système et la préparation d'intervention de maintenance. Cela conduira également à favoriser l'anticipation des pannes, ce qui entraînera à son tour de meilleurs coûts et de meilleurs temps. Pour cela, une présentation de l'entreprise et un diagnostic sur l'atelier de réparation des ponts dans les deux premiers chapitres, permettant ainsi de formuler la problématique qui tourne autour du comment une technologie digital twin peut aider l'entreprise CITAL à analyser les causes des casses des ponts et ainsi optimiser les coûts de la maintenance. Une analyse de la littérature a été effectuée afin d'introduire le concept des jumeaux numériques, ses applications ses limites pour enfin proposer une architecture afin d'implémenter le digital twin basée sur le concept de maquette numérique produit. L'approche proposée montre bien qu'un jumeau numérique est apte à faire de la maintenance prédictive et réactive. Cette architecture repose principalement sur la synchronisation entre le système réel et le système virtuel, et l'analyse des données et les techniques d'intelligence artificielle. Cette architecture ou méthodologie proposée a été illustrée par un cas de simulation des engrenages, à travers cette étude on a pu démontrer que la simulation joue également un rôle crucial dans notre approche car elle est capable de représenter, de façon assez perspicace, le comportement d'un composant dans notre cas l'engrenage.

On peut conclure de que notre solution est une approche globale qui peut être adaptée au différents produits. Conscients des limites de notre solution qui se résume en une proposition de méthodologie, il faut souligner que l'intégration de cette technologie nécessite une équipe d'experts pluridisciplinaires afin de concrétiser cette approche et l'appliquer sur le terrain.

En outre, des recherches peuvent être conduites afin de proposer une première conception et mise en œuvre dans le contexte de l'intégration au sein du Digital Twin de produit, différentes techniques d'intelligence artificielle peuvent être mises en œuvre et testées afin de sélectionner la meilleure capable d'optimiser les stratégies de maintenance. D'autres travaux peuvent être menés



sur l'optimisation de la mise en œuvre de capteurs intelligents (localisation, fréquence d'envoi des données, cycle, etc.) pour obtenir des données plus pertinentes via la technologie IoT. Des TP de simulation sont développés en Annexe afin de permettre à l'étudiant de se familiariser avec SOLIDWORKS, ainsi que ses librairies et ses concepts de bases.

# Bibliographie

- [1] ALSTOM. « Bogie Arpège 350 M 1600 ». In : (2003).
- [2] ALSTOM. « Brochures du site alstom ». In : (2011).
- [3] ALSTOM. « Formation Citadis Alger – Chaîne de traction ». In : (2012).
- [4] ALSTOM. « Manuel de description et fonctionnement du CITADIS 402. » In : (2011).
- [5] Barbara Rita BARRICELLI, Elena CASIRAGHI et Daniela FOGLI. « A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications ». In : *IEEE Access* 7 (2019), p. 167653-167671.
- [6] Stefan BOSCHERT et Roland ROSEN. « Digital twin—the simulation aspect ». In : *Mechatronic futures*. Springer, 2016, p. 59-74.
- [7] Darya BOTKINA et al. « Digital twin of a cutting tool ». In : *Procedia Cirp* 72 (2018), p. 215-218.
- [8] CITAL. <https://www.cital-dz.com/>.. 2015.
- [9] Shoumen Palit Austin DATTA. « Emergence of digital twins ». In : *arXiv preprint arXiv:1610.06467* (2016).
- [10] *Étude vibration des engrenages*. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/12390/1/Ms.GM.Benkhedda.pdf>.
- [11] ABDOUNE Khadidja FARAH. *Implémentation d'un Digital Twin des stations de La chaîne MPS 500 sous Flexsim*. Université Abou Bakr Belkaid-Tlemcen, 2020.
- [12] Jean-Loup GREGORIO. « Contribution à la définition d'un jumeau numérique pour la maîtrise de la qualité géométrique des structures aéronautiques lors de leurs processus d'assemblage ». Thèse de doct. Université Paris-Saclay, 2020.
- [13] Michael W GRIEVES. « Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises ». In : *International Journal of Product Development* 2.1-2 (2005), p. 71-84.
- [14] Okba HAMRI et al. « Interfacing product views through a mixed shape representation. Part 1: Data structures and operators ». In : *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 2.2 (2008), p. 69-85.
- [15] R JEGADEESHWARAN et V SUGUMARAN. « Fault diagnosis of automobile hydraulic brake system using statistical features and support vector machines ». In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 52 (2015), p. 436-446.
- [16] Jiri KRENEK et al. « Application of artificial neural networks in condition based predictive maintenance ». In : *Recent developments in intelligent information and database systems* (2016), p. 75-86.
- [17] Werner KRITZINGER et al. « Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification ». In : *IFAC-PapersOnLine* 51.11 (2018), p. 1016-1022.

- [18] Hasan Habibul LATIF. *A Methodology for Developing Digital Twins in the Manufacturing Plant*. North Carolina State University, 2020.
- [19] *Le jumeau numérique donne vie à l'industrie 4.0*. <https://www.usinenouvelle.com/article/le-jumeau-numerique-donne-vie-a-l-industrie-4-0>. N953871. Accessed: 2020-04-22.
- [20] Martin LIGGINS II, David HALL et James LLINAS. *Handbook of multisensor data fusion: theory and practice*. CRC press, 2017.
- [21] Jinfeng LIU et al. « Dynamic evaluation method of machining process planning based on digital twin ». In : *IEEE Access* 7 (2019), p. 19312-19323.
- [22] Weichao LUO et al. « Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy ». In : *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 10.3 (2019), p. 1129-1140.
- [23] Nikolaos NIKOLAKIS et al. « The digital twin implementation for linking the virtual representation of human-based production tasks to their physical counterpart in the factory-floor ». In : *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 32.1 (2019), p. 1-12.
- [24] Aaron PARROTT et Lane WARSHAW. « Industry 4.0 and the digital twin ». In : *Deloitte University Press*. 2017, p. 1-17.
- [25] David PLANCHARD. *SolidWorks 2014 Tutorial with Video Instruction*. SDC Publications, 2014.
- [26] K POLYNIAC et J MATTHEWS. *The Johns Hopkins Hospital Launches Capacity Command Center to Enhance Hospital Operations*. 2019.
- [27] Roland ROSEN et al. « About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing ». In : *IFAC-PapersOnLine* 48.3 (2015), p. 567-572.
- [28] Guodong SHAO et al. « Standards-based integration of advanced process control and optimization ». In : *Journal of Industrial Information Integration* 13 (2019), p. 1-12.
- [29] *technologie DT*. <https://www.globallogic.com/insights/blogs/if-you-build-products-you-should-be-using-digital-twins/>.. 2019.
- [30] Cor VERDOUW et al. « Digital twins in smart farming ». In : *Agricultural Systems* 189 (2021), p. 103046.
- [31] Jian YANG, Wei ZHANG et Yongming LIU. « Subcycle fatigue crack growth mechanism investigation for aluminum alloys and steel ». In : *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2013, p. 1499.

# Annexes

## ANNEXE A

### QUESTIONNAIRE

1. Quels sont les ateliers qui existent au niveau du site ? département est responsable pour l'analyse et la réparation des ponts de bogie ?
2. Quelles démarche vous suivez pour analyser les causes de problèmes ?
3. Quelles sont les hypothèses tirées sur les causes des casses des pont ?
4. Que faites-vous pour les valider ?
5. Comment vous collaborer avec vos partenaires : l'entreprise exploitante SETRAM et le fournisseur ALSTOM pour trouver les solutions ?
6. Avez-vous un historique sur les pont réparés et qu'inscrivez-vous dedans ?
7. Combien y'a-t-il de personnels pour la réparations des ponts ?
8. Pourquoi vous changer toutes les pièces du pont lorsqu'un seule élément est cassé et le reste est intacte ?
9. Que faites-vous avec les pièces non cassées du pont réparé ?
10. Quel est exactement le problèmes es le MTTF( temps de la première panne qui est précoce) ou le MTBF ? ON veut améliorer quoi au juste ?
11. Avez-vous des retours qui entrent dans la garantie pour les ponts que vous avez réparé ?
12. Es-ce-que vous avez eu de problèmes de retard pour réparer les pont (pénalité de retard) ou de surcharge et est ce Problème récurrent ? quand vous avez commencé la maintenance (atelier bogie) ?
13. Y- t-il de fausses alertes ? et quelle fréquence ? (Sur quelles bases ils estiment qu'il y a des casses de ponts ?
14. Quand es-que le besoin de monter un bureau d'étude est né ? Quel est le but principal,
15. Comment vous coordonner avec l'équipe ingénierie pour résoudre les problèmes de l'entreprise ?
16. Le processus de communication est-il top-down ou bottom-up ?
17. Comment vous allez procéder pour analyser les causes de casses des ponts sans avoir de plan des pièces et la 3D ?

## ANNEXE B

### Description de la chaîne

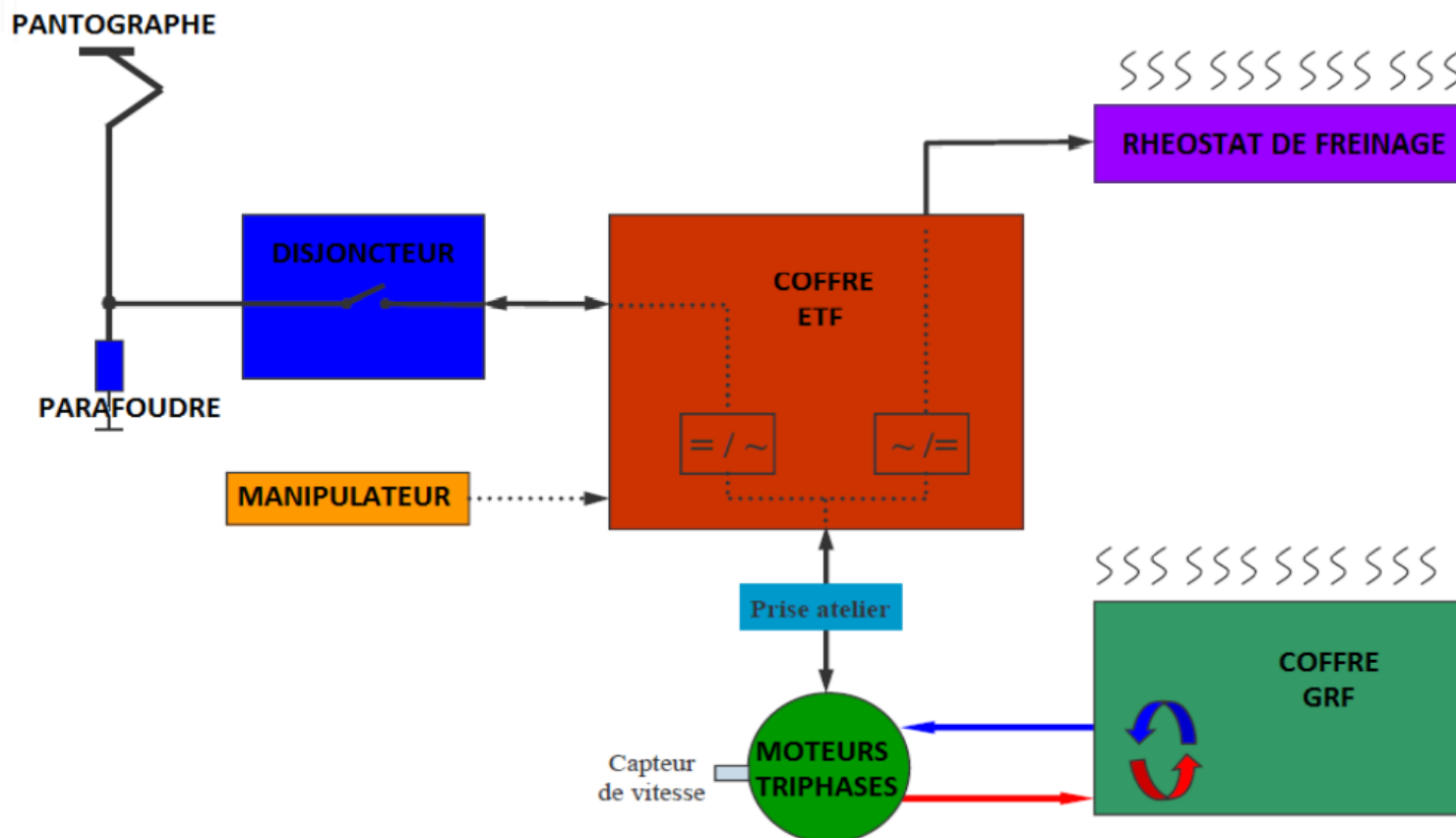


FIGURE 39 – Composition de la chaîne de traction

[3]

### 1-LE PANTOGRAPHE

Le pantographe est le dispositif articulé qui permet à une locomotive électrique de capter le courant par frottement sur la caténaire.

**Fonctionnement** : La montée ou la descente du pantographe s'obtient en agissant sur le ressort de descente placé à l'intérieur du servomoteur.

C'est en contrariant la force du ressort de descente, à l'aide de la pression des RP (Réservoirs Principaux) que l'on obtient la montée du pantographe. Cette montée est assurée uniquement par les ressorts de montée.

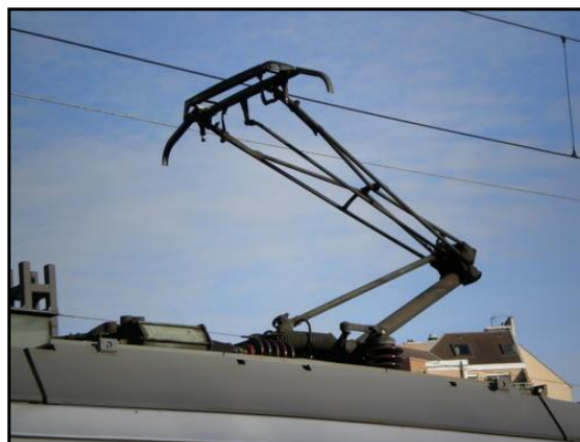


FIGURE 40 – PANTOGRAPHE

Lorsque l'on libère la force du ressort de descente, en supprimant la pression RP dans le servomoteur, on obtient l'abaissement du pantographe

#### **-Le parafoudre**

Le parafoudre VARISIL HDC 1 est destiné à la protection contre les surtensions du matériel alimenté sous une tension nominale de 750 V en courant continu. Le parafoudre VARISIL HDC 1 est de technologie à oxyde de zinc sans éclateur et avec enveloppe synthétique. Il s'agit d'un parafoudre 10 kA classe 2 par référence à la Norme CEI60099-4.

#### **-Le coffre disjoncteur principal**

Il se compose du disjoncteur, du circuit de pré-charge ainsi que le capteur de tension

#### **-Le disjoncteur**

C'est un dispositif de sécurité qui établit, supporte et interrompt des courants sous sa tension assignée ainsi il assure l'arrivage de juste ce qu'il faut en énergie pour le bon fonctionnement des équipements électriques qui suivent sur la chaîne de traction freinage.

#### **-Le circuit de recharge**

C'est un dispositif de sécurité et de prévention de dégâts contre les surtensions.

Il limite le courant à la mise sous tension. Le contacteur de pré-charge est commandé par l'Agate Contrôle qui vérifie la charge du filtre onduleur avant de commander l'enclenchement du disjoncteur.

#### **-Les capteurs de tension**

C'est une sorte de transformateurs de courant, qui au passage d'un courant sur son primaire arrivent à calculer son intensité sur leurs secondaires. Ils indiquent la tension caténaire aux commandes de traction.

## **2-LE COFFRE ÉQUIPEMENTS TRACTION-FREINAGE ETF**

Ils comportent un onduleur triphasé alimentant deux moteurs en parallèle, un sectionneur d'isolement et un hacheur de freinage rhéostatique faisant également office d'écrêteur en traction.

Ils comportent de plus un système de ventilation autonome alimenté à partir du réseau 24 V.

Les moteurs de traction (un par essieu du bogie moteur) sont alimentés en parallèle par l'onduleur du coffre ETF associé au bogie moteur.

## **3-LE COFFRE ONIX**

Il contient l'onduleur et le hacheur.



**FIGURE 41 – ETF**

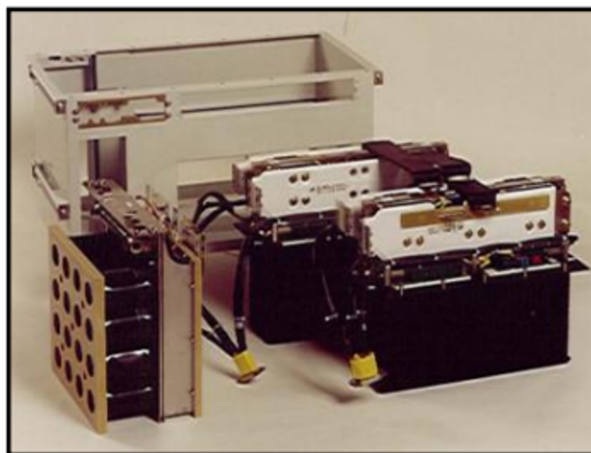
### -l'onduleur de tension

Il est intégré dans le module ONIX 808 L'onduleur assure l'ondulation du courant continu entrant de tension 750 VDC de la caténaire à un courant alternatif triphasé de tension 290 / 500 V (tension phase et entre phase) et de ce fait alimente les moteurs de traction.

### -Le hacheur rhéostatique

Il assure deux fonctions :

- Le frein électrique lorsque la caténaire n'est pas récupératrice (pas de consommateur).
- La protection des équipements vis-à-vis des surtensions Il est associé à un rhéostat qui est implanté sur les caisses C



**FIGURE 42 – ONIX : Rhéostat de freinage et onduleur**

### 4-GRF

Le GRF, appelé GRF5 – 5 pour 5e génération – est le groupe de refroidissement des moteurs de traction de la gamme Citadis. Il assure le refroidissement par une circulation d'eau dans les deux moteurs de traction du bogie. Il est prévu pour équiper l'ensemble des nouvelles rames Citadis 400 – 500.

## ANNEXE C

# SolidWorks pour la modélisation et la simulation

## Définition

SolidWorks est un outil de conception de modélisation volumique paramétrée basée sur des fonctions , associatif

- **Modèle géométrique** : le plus complet utilisé dans les systèmes de CAO, utilisant les informations qui relient les géométries du modèle entre elles (exemple : telle surface se rencontre avec telle arête)
- **Paramétrique** : Les cotes et les relations utilisées pour créer une fonction sont saisies et stockées dans le modèle; ce qui permet de les changer rapidement et sans difficulté, (Changement de la cote 60 en 45 par exemple).
- **Basée sur des fonctions** : En effet un modèle SolidWorks est formé d'éléments individuels appelés fonctions. Ce sont des fonctions géométriques telles que les bossages, les enlèvements de matière, les perçages, les nervures, les congés, les chanfreins et les dépouilles.

## Historique

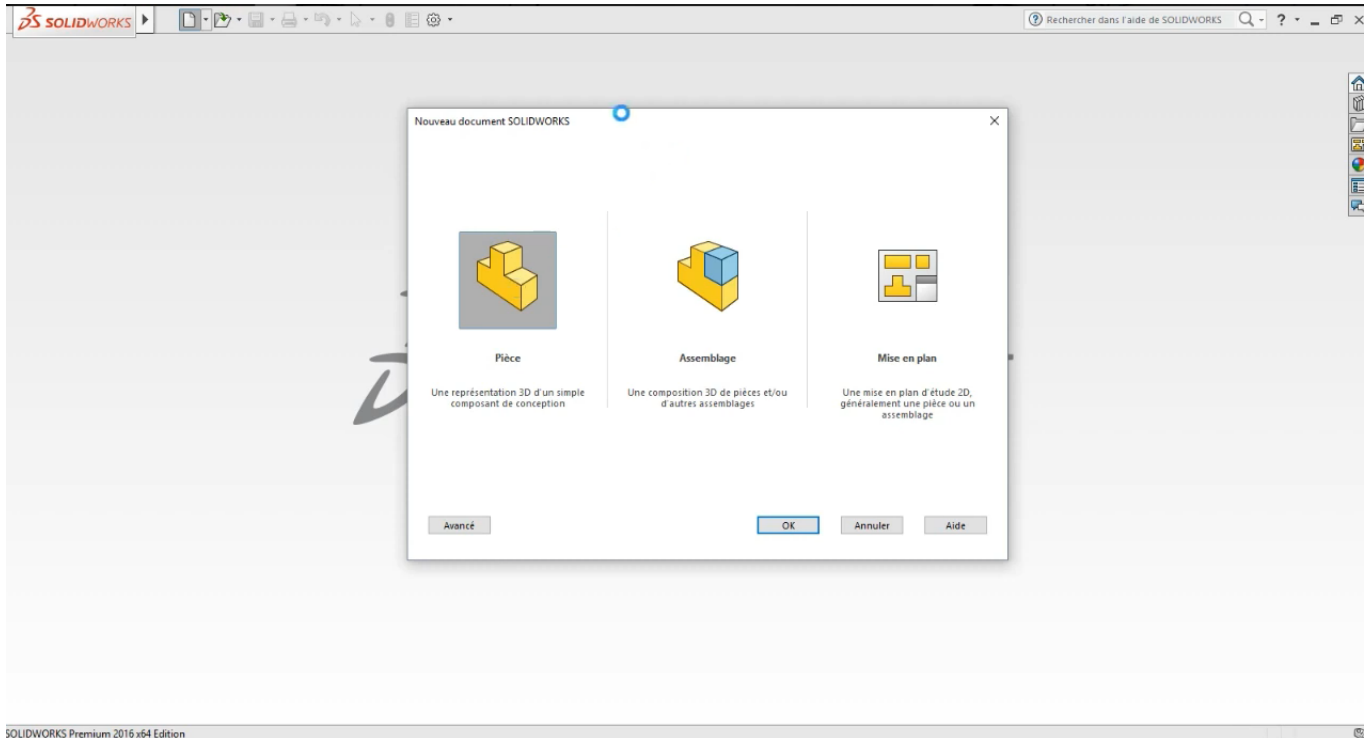
Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SolidWorks a été acheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes.

Parmi les plus grandes organisations utilisant SolidWorks, on peut citer Michelin, AREVA, PatekPhilippe, MegaBlocs, Axiome, ME2C,SACMO , le Boulch, Robert Renaud et le Ministère de l'Éducation nationale français[10]

## Fonctionnement

Solidworks est un modeleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés





**FIGURE 43** – Les trois concepts de base de SW

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur Solidworks

Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, ...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

## 1-Pièces

La pièce est l'objet 3D monobloc. La modélisation d'une telle entité dépendra de la culture de l'utilisateur. Comme de nombreux logiciels conviviaux, SolidWorks permet d'aboutir à un même résultat apparent par des voies souvent différentes. C'est lors de la retouche de ces fichiers ou de leur exploitation qu'on appréciera la bonne méthode.

Une pièce est la réunion d'un ensemble de fonctions volumiques avec des relations d'antériorité, des géométriques, des relations booléennes (ajout retrait)... Cette organisation est rappelée sur l'arbre de construction. Chaque ligne est associée à une fonction qu'on peut renommer à sa guise [10]

### les étapes pour obtenir un volume

1. Définir une origine
2. Choisir un plan
3. Tracer une esquisse
4. Contrainte générer un volume

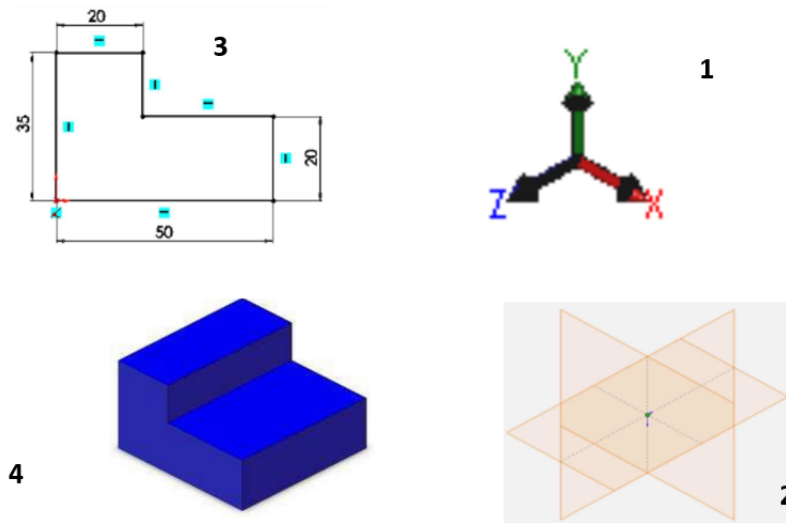


FIGURE 44 – Les étapes pour obtenir un volume

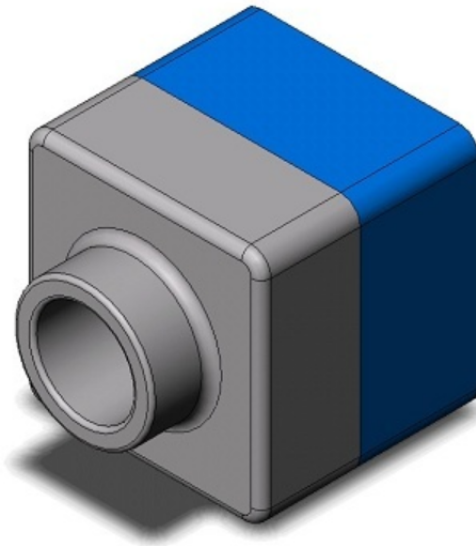
## 2-Assemblage

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition de pièces. La mise en position de pièces est définie par un ensemble des contraintes d'assemblage associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, ...). Dans une certaine mesure, ces associations de contraintes s'apparentent aux liaisons mécaniques entre les pièces.

Le mécanisme monté, s'il possède encore des mobilités, peut être manipulé virtuellement. On peut alors aisément procéder à des réglages à l'aide des différents outils disponibles (déplacement composants, détection de collision ou d'interférence, mesure des jeux, etc.)

### Les étapes de l'assemblage

1. Ajouter des pièces dans un assemblages
2. Déplacer et faire pivoter des composants dans un assemblage.
3. On peut positionner et orienter les composants à l'aide de contraintes qui créent des relations entre les composants



**FIGURE 45** – Assemblage des pièces

### 3-Familles de pièces

Un grand nombre d'objets de la vie courante se présentent sous une variété de tailles, ce qui constitue une famille de ces objets, tels que :Ecrus et boulons, Pignons de vélos, Roues de voitures, engrenages et poulies,...

Une famille de pièces est une feuille de calcul qui répertorie les différentes valeurs affectées aux cotes et fonctions d'une pièce. C'est un moyen simple de créer plusieurs configurations.

Les familles de pièces peuvent être des produits variant dans leurs tailles, dimensions, poids et capacités.

L'utilisation des familles de pièces requiert l'application Microsoft Excel

#### **Les étapes de la création d'une famille de pièce**

1. Renommer les fonctions et les cotes.
2. Afficher les cotes de fonctions.
3. Lier les valeurs des cotes de modèle.
4. Définir et vérifier les relations géométriques.
5. Créer une famille de pièces.
6. Afficher les configurations de pièces.
7. Editer une famille de pièces [25]

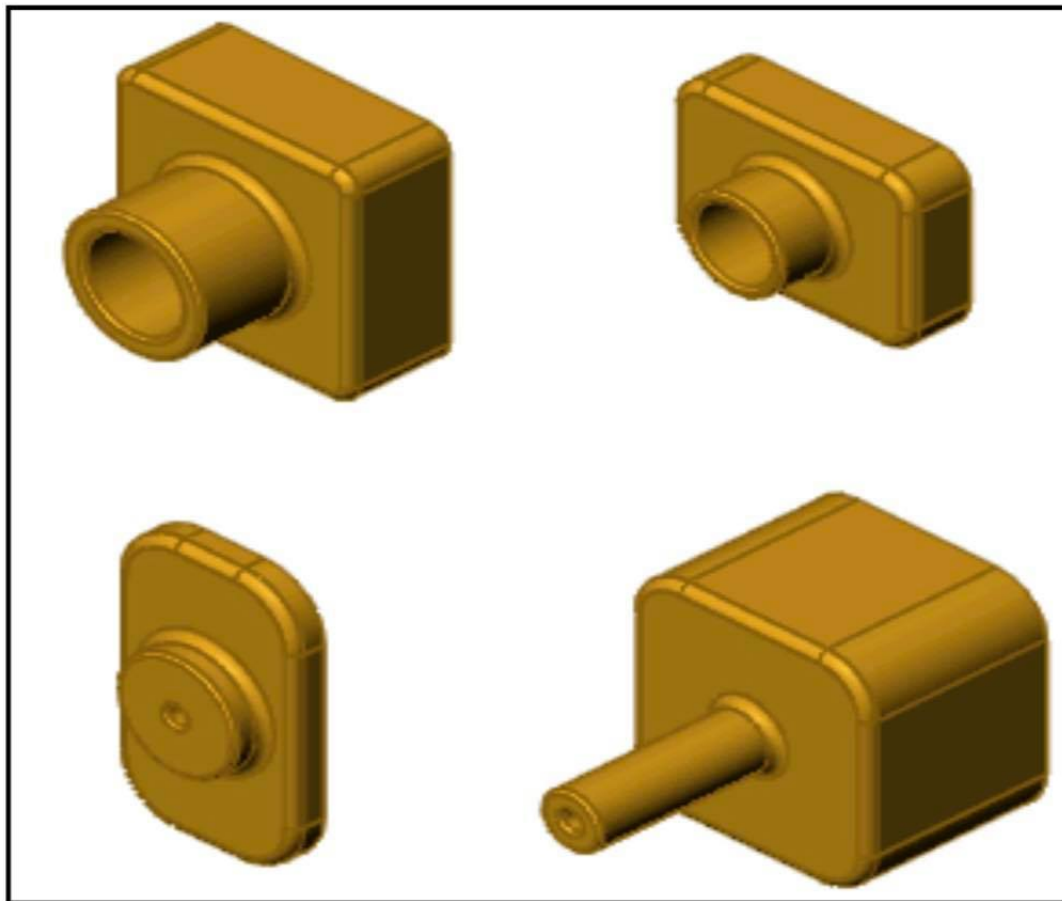


FIGURE 46 – Assemblage famille des pièces

## Engrenage

Un engrenage est composé «d'organes mécaniques à denture»; il permet la transmission et la transformation du mouvement.

Un engrenage est un ensemble de deux roues munies de dents assurant un entraînement positif (sans glissement possible) entre deux axes peu éloignés l'un de l'autre.

Position relatives des axes	Types d'engrenage	
Parallèles	Roues cylindrique	à dentures droites
		à dentures hélicoïdales
Concourants (en général perpendiculaire )	Roues conique	à dentures droites
		à dentures spirales

TABLE 5 – Classification des engrenages .

il y a différents types d'engrenages mais en s'intéresse à Engrenages droits à denture hélicoïdale ( dans le pont de bogie )

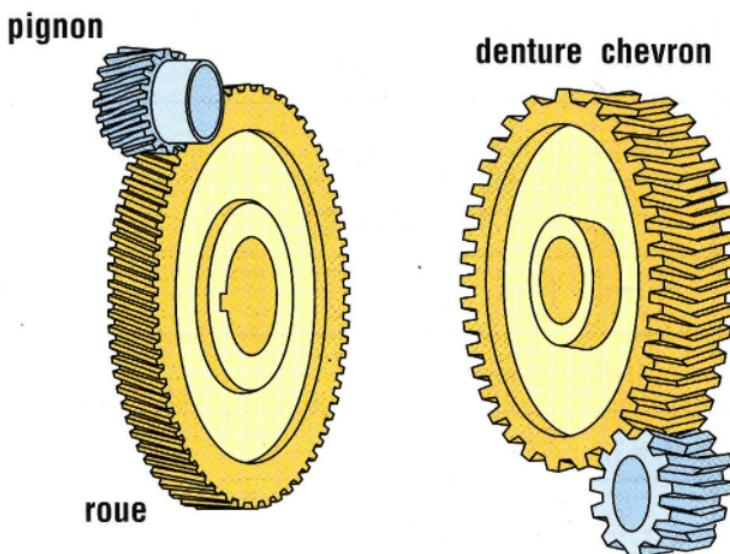


FIGURE 47 – Les engrenages à dentures hélicoïdales

Désignation	Symbole	Valeur
Angle d'hélice	$\beta^*$	Valeur comprise entre $15^\circ$ et $30^\circ$
Sens de l'hélice		Si le pignon à gauche , la roue aura une hélice à droite
Nombre de dents	Z	Nombre entier positive lié aux conditions de fonctionnement et de fabrication
Module réel	$m_n$	Déterminé par un calcul de résistance des matériaux et choisi parmi les valeurs normalisées
Pas réel	$p_n$	$p_n = \pi \cdot m_n$
Module apparent	$m_t$	$m_t = m_n / \cos \beta$
Pas apparent	$p_t$	$p_t = \pi \cdot m_t$
Diamètre primitif	$d_p$	$d_p = d - 2,5m_n$
Entraxe de l'engrenage	a	$a = (d_1 + d_2) / 2$
Angle de pression	$\alpha$	Généralement , $=20^\circ$

TABLE 6 – Caractéristique d'engrenage à dentures hélicoïdales .

## Interface de SW

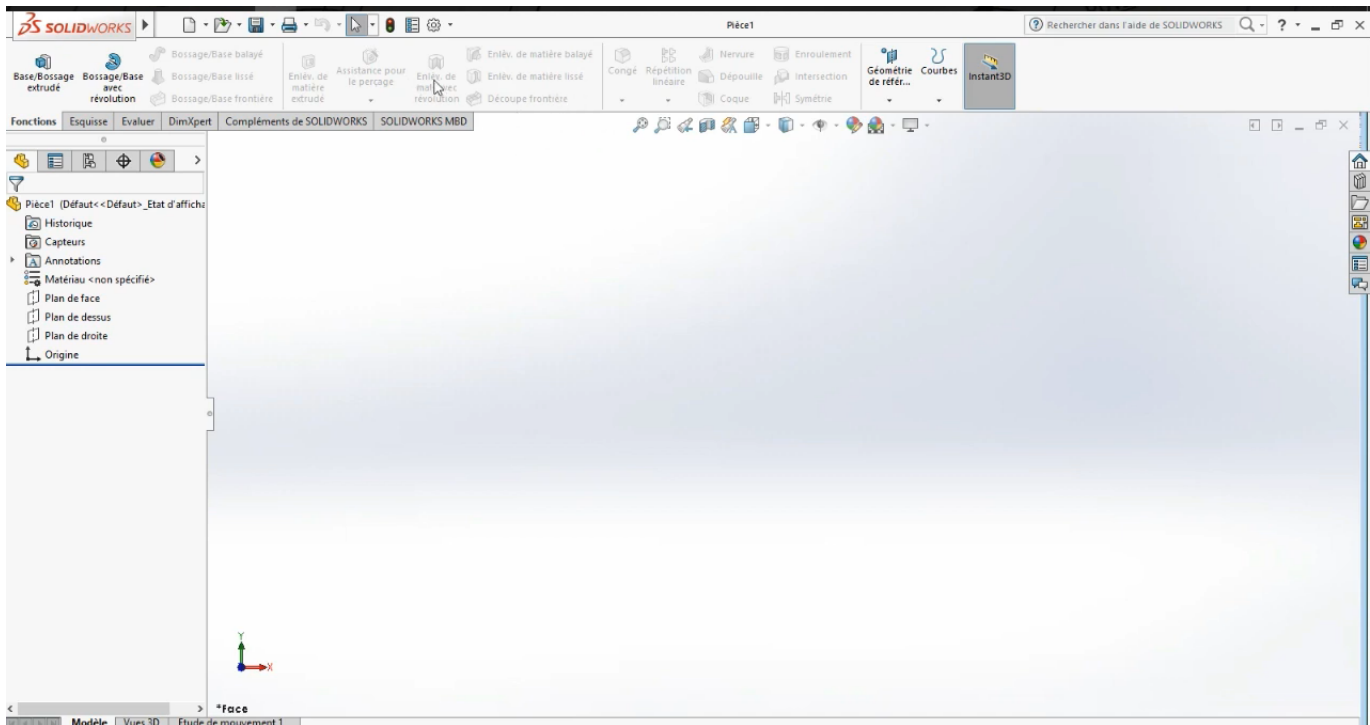


FIGURE 48 – Interface solid

## Les étapes de création d'un pignon dans SW

Le bignon cylindrique à dentures droites à créé est représenté par ces proportions et leurs dimensions générales données dans le tableau suivant :

Module m	<b>02</b>
Nombre de dents	<b>20</b>
diamètre primitif	<b>40</b>

TABLE 7 – Caractéristique et dimension d'engrenage .

### La conception des cercles

Ouvrir SW

Lors de l'ouverture , clique sur nouveau document apparition de l'écran de démarrage :

( 3 possibilités sont proposées )

1. Pièces

2. Assemblage
3. Mise en plan

Sélectionner pièces

Après la définition du plan de travail en deux dimensions ( 2D ) la premier étape est le dessin des trois cercles ( cercle primitif; cercle de pied et de tête )

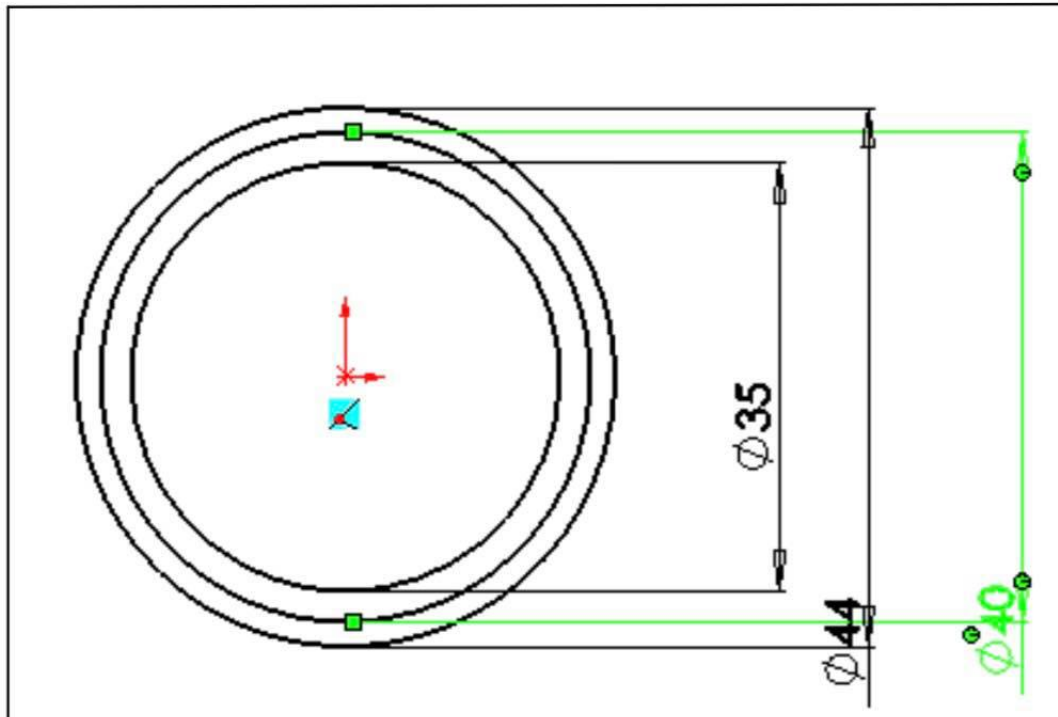
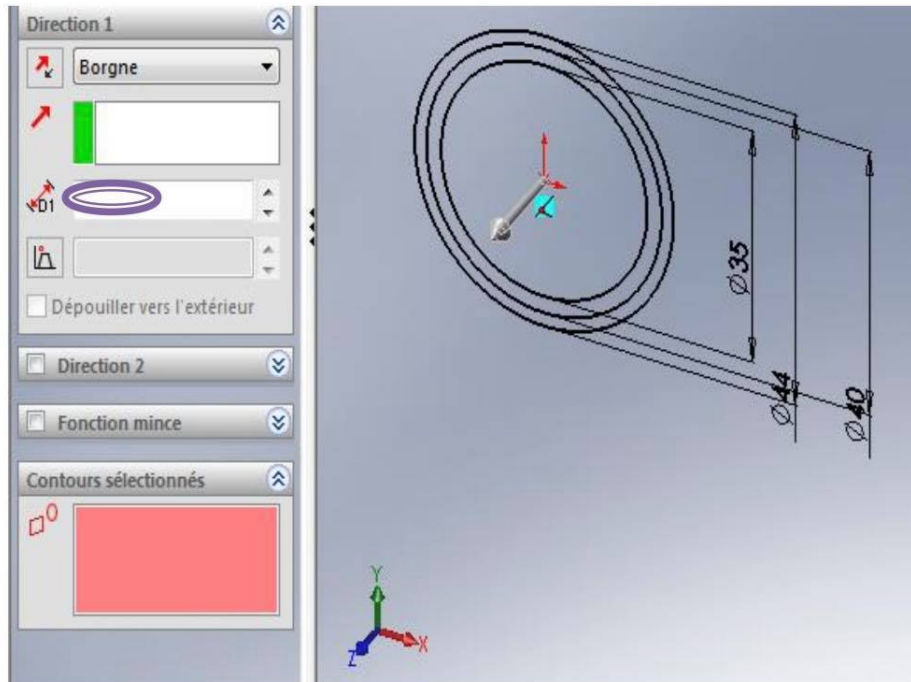


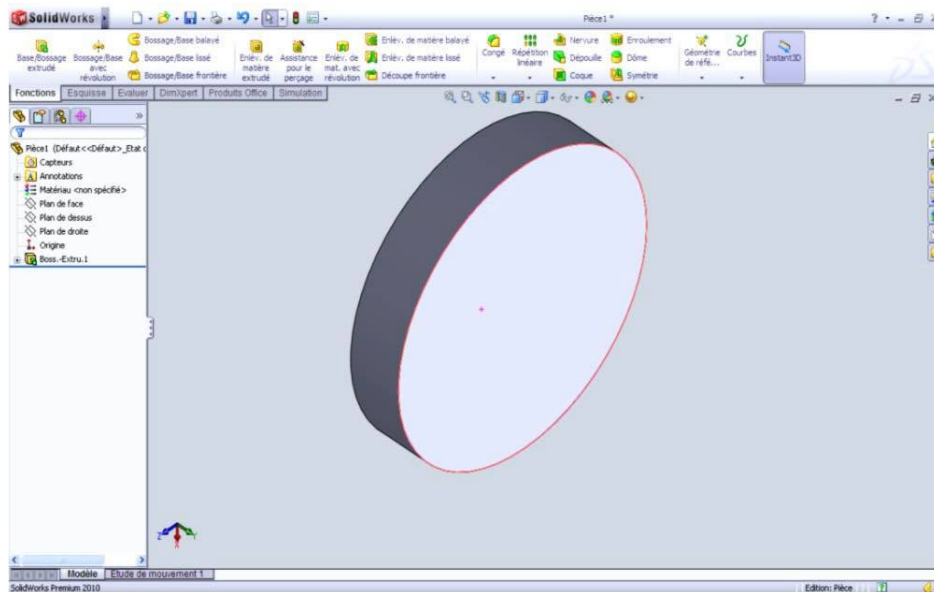
FIGURE 49 – Création des cercles

De deux dimensions (2D) vers trois dimensions (3D) c'est une opération d'extrusion de la section droite. La section est définie dans une esquisse (qui apparaît alors dans l'arbre de création comme élément générateur de la fonction), click sur l'icône (base/bossage extrudé) dans la barre d'outils. Cette esquisse contient l'ensemble des spécifications géométriques (Cotation) nécessaires à la complète définition de la section



**FIGURE 50 – Détermination de la valeur de bossage**

Le cercles nous montre ou entrer la valeur de bossage extrude . Par exemple 14mm :

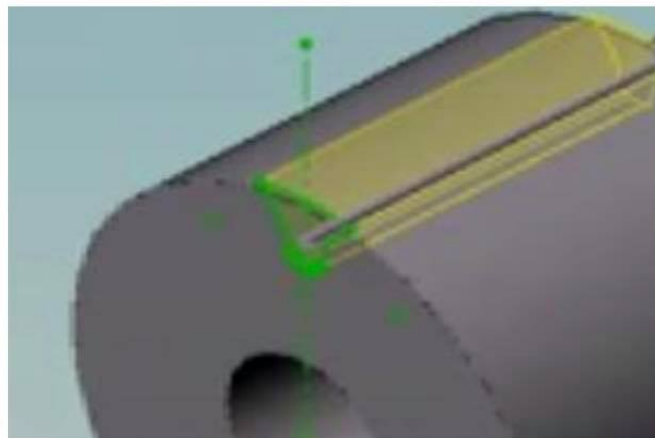
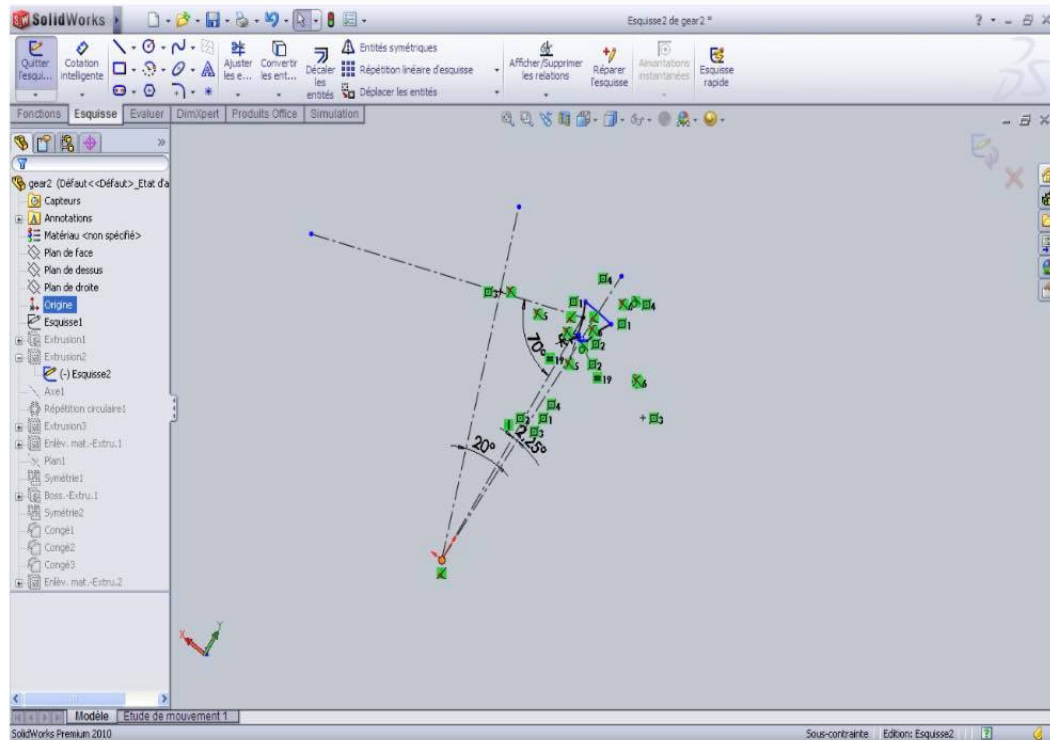


**FIGURE 51 – Étape d'extrusion**

On a le cylindre de tête. Maintenant ; il reste tracer les dents. Pour les dents il est suffisant de

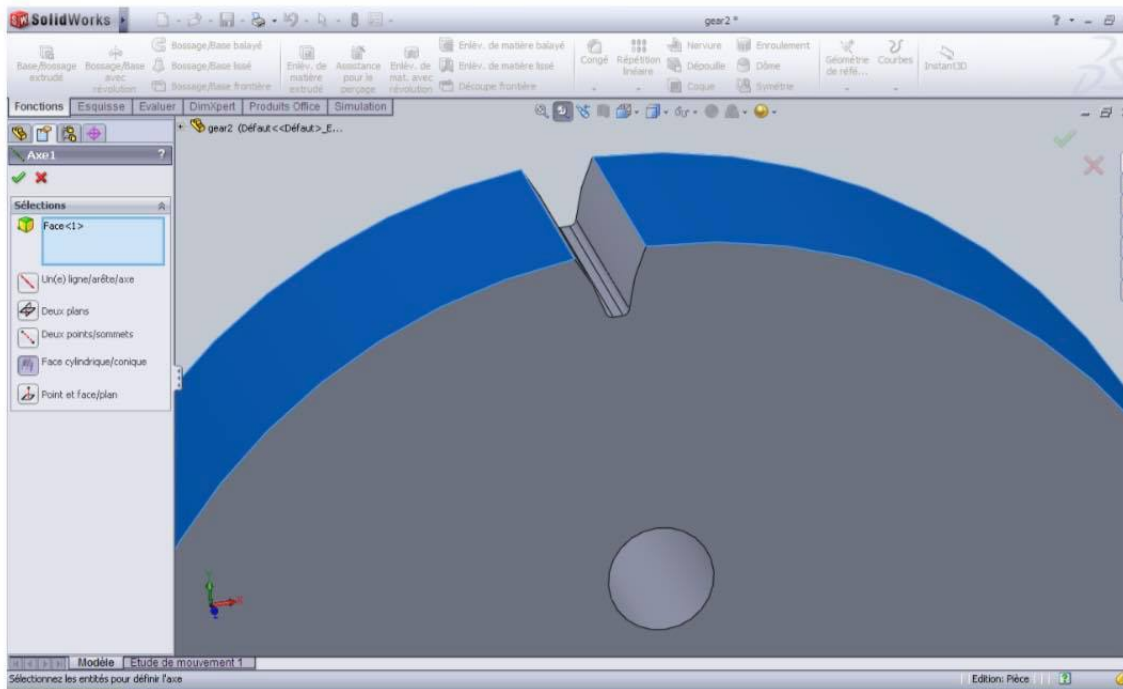


tracer deux flancs opposés de deux dents successives puis activer la commande répétition circulaire  
La première étape dans la création des flancs est de les dessiner sur le plan dans une nouvelle esquisse avec les dimensions calculés.



**FIGURE 52** – Esquisse de création des flancs en 2D

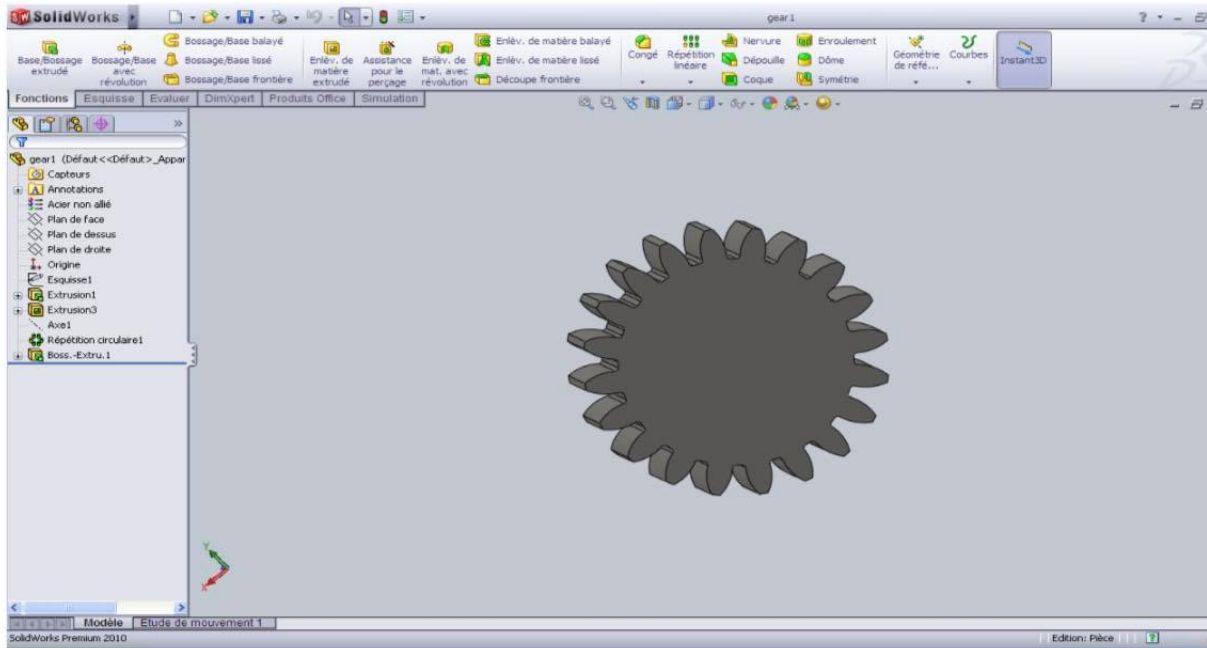
L'extrusion nous donne :



**FIGURE 53** – Flancs de deux dents successives

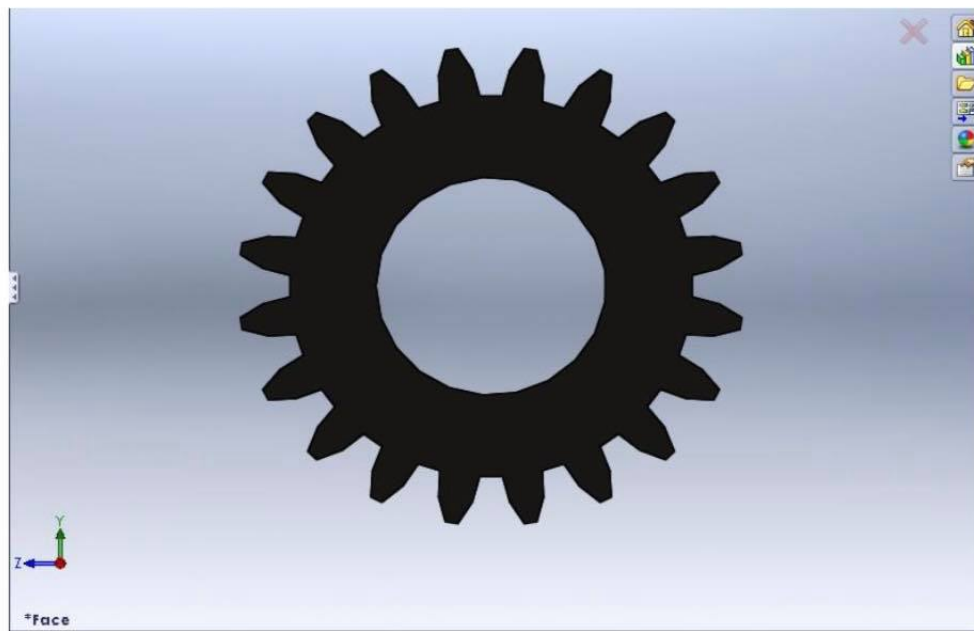
Et puis on click sur l'icône de répétition circulaire

1. On clique sur Outil
2. Outil d'esquisse
3. répétition circulaire



**FIGURE 54 – Répétition circulaire**

A la fin on clique sur la fonction ( Enlève de matière ) après on écrit le diamètre pour enlève la matière



**FIGURE 55 – Engrenage en 2D**

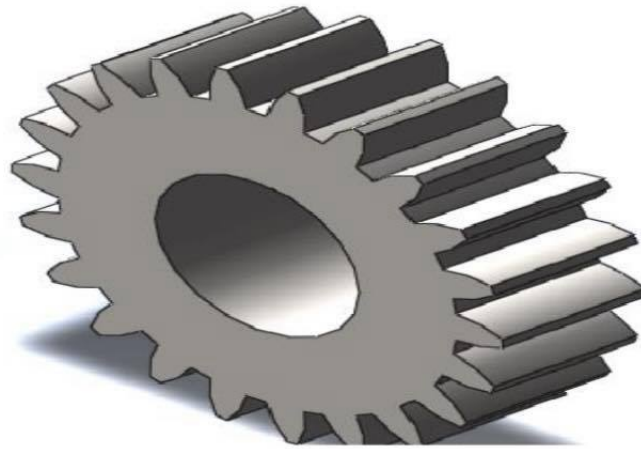


FIGURE 56 – L'extrusion d'engrenage

## ANNEXE D

### Les méthodes de ML

**1-Régression logistique (LR) :** La régression logistique est une technique d'apprentissage automatique qui est utilisé pour les problèmes de classification, c'est un algorithme d'analyse prédictive basé sur le concept de probabilité.

Elle utilisée pour attribuer des observations à un ensemble discret de classes pour analyser les problèmes lorsqu'il existe une ou plusieurs variable indépendantes qui déterminent un résultat. Le résultat est mesuré avec une variable dichotomique dans laquelle il n'y a que deux résultats possibles

Certains des exemples de problèmes de classification sont le spam par courrier électronique ou non, la fraude aux transactions en ligne ou non, la tumeur maligne ou bénigne

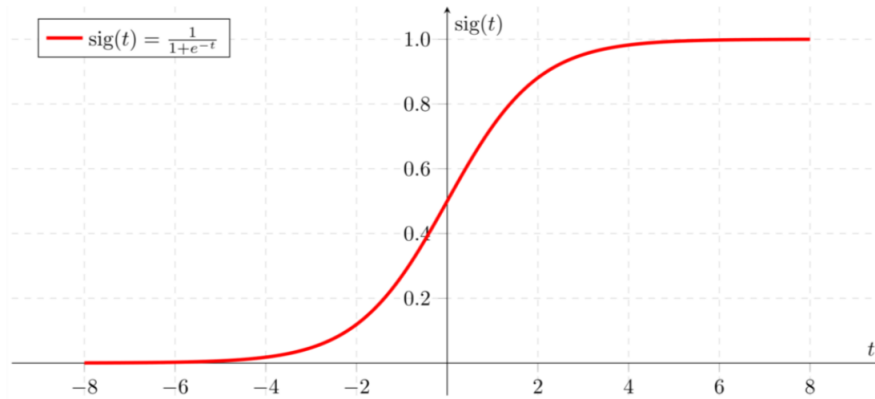
Il existe deux types de classification dans cette méthode, à savoir binaire et multilinéaire

La régression logistique utilise la fonction logistique Sigmoid, qui est une fonction S-discriminante pour comprimer la sortie d'une équation linéaire entre 0 et 1 et renvoyer une valeur de probabilité.

L'expression de la fonction sigmoïde est la suivante :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^x}$$

La courbe de la fonction Sigmoid est telle que :



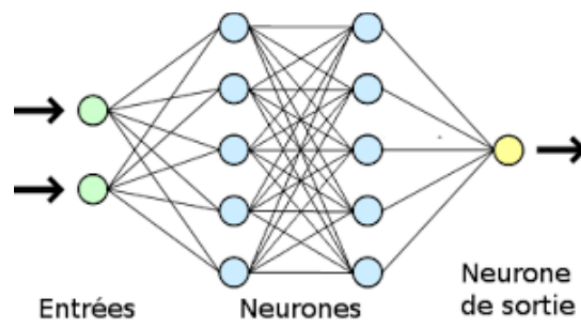
**FIGURE 57** – La courbe de la fonction Sigmoidé

**2-Réseau de neurones artificiels (ANN)** Les réseaux de neurones, communément appelés réseaux de neurones artificiels (ANN), sont une simulation de la fonctionnalité du cerveau humain dans les problèmes d'apprentissage automatique (ML) conçue pour traiter des informations liées entre elles. L'utilisation la plus courante des ANN est la régression et la classification

Le bloc de construction de base est similaire à un véritable réseau de neurones

Les neurones sont connectés en couches afin qu'une couche puisse communiquer avec d'autres couches formant un réseau neuronal. Les couches internes autres que les couches d'entrée et de sortie sont appelées couches cachées. Les sorties d'une couche sont envoyées aux entrées d'une autre couche.

La signification de chacune des entrées est multipliée par un poids. Elles sont ensuite additionnées par une fonction de sommation et transmises à une fonction d'activation telle que la fonction logistique pour produire une sortie.



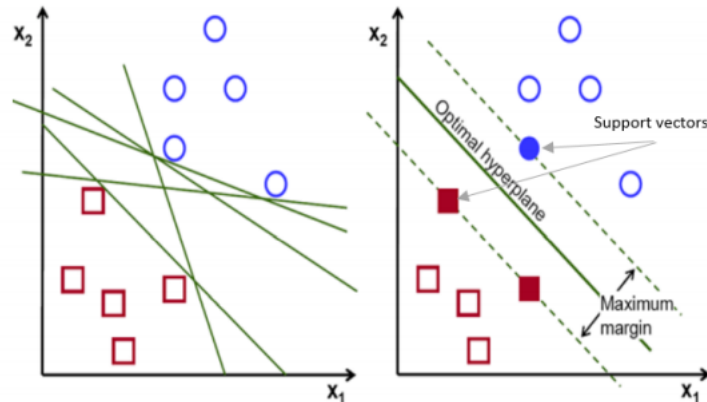
**FIGURE 58** – Réseau de neurone artificiel

Il est très puissant quand il y a des ensembles de données massifs, ils peuvent apprendre des tâches en considérant les données d'entrée. [16] En raison de leur capacité à apprendre des exemples, ANN a reçu une attention importante, il peut montrer des résultats prometteurs pour évaluer les données afin de soutenir les activités de maintenance prédictive

**3-Machine à vecteurs de support (SVM) :** La machine à vecteurs de support est un modèle linéaire pour les problèmes de classification et de régression. Il peut résoudre des problèmes linéaires et non linéaires et fonctionne bien pour de nombreux problèmes pratiques.

L'idée de SVM est de créer un hyperplan dans un espace à N dimensions qui sépare les données en classes.[15] Pour séparer les classes de points de données, il existe de nombreux hyperplans possibles qui pourraient être choisis. Le but est de trouver un plan qui a la marge maximale, c'est-à-dire la distance maximale entre les points de données des deux classes. L'optimisation de la distance de marge fournit un certain renforcement afin que les futurs points de données puissent être classés avec plus de confiance.

Les vecteurs de support sont des points de données plus proches de l'hyperplan et influencent la position et l'orientation de l'hyperplan. En utilisant ces vecteurs de support, la marge est maximisée. La suppression des vecteurs de support modifiera la position de l'hyperplan. Ces points aident principalement à construire un modèle SVM.



**FIGURE 59** – Machine à vecteurs de support (SVM) :