



HAL
open science

Méthode de conception intégrée d'un jumeau numérique d'équipement de production 4.0

Léandre Guitard

► **To cite this version:**

Léandre Guitard. Méthode de conception intégrée d'un jumeau numérique d'équipement de production 4.0. Génie logiciel [cs.SE]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. Français. NNT : 2023GRALI065 . tel-04329617

HAL Id: tel-04329617

<https://theses.hal.science/tel-04329617>

Submitted on 7 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production

Spécialité : GI - Génie Industriel : conception et production

Unité de recherche : Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble

Méthode de conception intégrée d'un jumeau numérique d'équipement de production 4.0

Integrated development method for the digital twin of a 4.0 production system

Présentée par :

Léandre GUITARD

Direction de thèse :

Daniel BRISSAUD

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP - UGA

Directeur de thèse

Frédéric NOEL

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Vincent CHEUTET

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, INSA Lyon

Frédéric MERIENNE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENSAM CER Cluny

Thèse soutenue publiquement le **24 novembre 2023**, devant le jury composé de :

Daniel BRISSAUD

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Grenoble INP

Directeur de thèse

George DRAGOI

PROFESSEUR EMERITE, Universitatea Politehnica din Bucuresti

Examineur

Vincent CHEUTET

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, INSA Lyon

Rapporteur

Frédéric MERIENNE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, ENSAM CER Cluny

Rapporteur

Peggy ZWOLINSKI

PROFESSEURE DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Présidente

Invités :

Frédéric Noel

PROFESSEUR, Grenoble INP - UGA

Marc Maléo

Hellomooov'



Remerciements

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude envers Daniel BRISSAUD ainsi que Frédéric NOËL, mes directeurs de thèse. Ils m'ont tous deux apporté leur soutien et leurs visions dans la conduite de ce projet de recherche. Leurs conseils et leurs méthodes m'ont permis de progresser tant au niveau scientifique que dans le développement de ma pensée.

Je souhaite aussi remercier Frédéric MERIENNE et Vincent CHEUTET qui ont accepté de rapporter ma thèse. Leurs perspectives et leurs remarques m'ont permis de grandement l'améliorer.

Je souhaite aussi remercier George DRAGOÏ et Peggy SWOLINSKI pour avoir été examinateurs lors de ma soutenance de thèse. Leurs visions et les questions qu'ils m'ont posées ont participé à ma prise de recul sur les recherches effectuées.

D'autres parts, je souhaite remercier les personnes avec qui j'ai travaillé chez Hellomoov'. Je voudrais remercier Marc MALEO mon responsable scientifique qui m'a appris beaucoup sur les systèmes de l'entreprise, Olivier CELARD, Joël BIDAUD, Bastien BRUN, Vivien RASSU, Tristan BESSIERE, Christophe POULET, Loïck TERPENT, Nicolas DUBEY, Alexandre BERNARD et Laurent VIVIER qui m'ont accompagné tout le long de mon parcours et ont toujours répondu présent quand j'avais besoin d'aide.

Je voudrais aussi remercier David BASLE un camarade de thèse avec qui les échanges m'ont poussé dans ma réflexion sur mon sujet ainsi que sur la démarche de recherche dans son ensemble.

Je tiens aussi à remercier Valérie ROCCHI pour sa participation dans l'encadrement de mes recherches.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude à ma compagne Daphné, à ma famille ; mes parents Benoît et Heidi, ma sœur Elsa et mon beau-frère Yoann, mon entourage ; Anthony, Thibaut et Charlélie. Ils m'ont tous soutenu à leur niveau dans mon travail, ils ont eu à me supporter dans les moments les plus difficiles et ont toujours été présents pour moi.

Résumé

Le jumeau numérique est un concept qui a été introduit par le professeur Grieves au début des années 2010, il propose un système composé de trois parties ; une entité physique, une entité dans un espace numérique qui réplique l'entité physique et une connexion entre ces deux entités afin de répondre à des fonctions qui aide le concepteur ou l'utilisateur du système physique. Dans les récentes années, de nombreux chercheurs se sont penchés sur ce sujet, l'ont développé pour préciser sa nature, ses fonctions, ainsi que ses limites, mais peu se sont penché sur la manière avec laquelle il est possible de le mettre en œuvre concrètement. On trouve dans la littérature des exemples de jumeau numérique, mais les auteurs décrivent rarement le déploiement d'un jumeau numérique

Si le concept semble simple, sa mise en œuvre interroge et l'on peut légitimement espérer définir une méthode de déploiement effective.

Ce travail a été mené en partenariat avec une entreprise se nommant Hellomoov'. C'est une PME du secteur de la transitique. C'est donc une entreprise qui fabrique des systèmes de transfert industriel pour d'autres entreprises, leur souhait est de mettre en œuvre un jumeau numérique pour leurs systèmes de transfert. Le jumeau numérique doit apporter de nombreux services comme de l'aide à la conception, de l'aide à la fabrication, de l'aide à la maintenance, etc. Le jumeau numérique d'un tel système peut aussi être intéressant pour son utilisateur, grâce à de l'aide à l'exploitation ou de la maintenance prédictive par exemple.

La méthodologie proposée ici est de mettre en place une architecture modulaire, où chaque module répond à une fonction grâce à un modèle de comportement (représentant un comportement du système), grâce à des données de configuration et grâce à des données provenant du terrain en utilisant la connexion dont le Dr Grieves parle. Une fois les besoins spécifiques de l'entreprise industrielle identifiés, on procède de manière itérative ; en commençant par un module, qui sert aussi d'interface pour le jumeau numérique, ensuite il faut créer la connexion entre les deux espaces et il est alors possible de rajouter les modules les uns après les autres. Cette méthode vise à un déploiement progressif pour permettre son acceptation par tous les niveaux de l'entreprise.

Dans le cas spécifique de Hellomoov', trois modules prioritaires ont été identifiés ; un simulateur de flux, une analyse des données pour la maintenance et un module de contrôle automatisé des sous-ensembles d'une ligne de transfert. Le simulateur a été développé sur un éditeur open source ce qui lui permet d'être très ouvert pour que de nouveaux éléments puissent facilement lui être adjoint. L'analyse des données provenant du terrain a montré qu'il était possible d'extrapoler au moins en partie l'état de santé de

certaines pièces critiques du système et ainsi de prévoir des interventions quand nécessaires. Enfin, grâce un boîtier électronique et aux données provenant du simulateur, Hellomoov' est capable de programmer automatiquement le comportement des tous les sous-ensembles d'une ligne de transfert, rendant le contrôle plus simple et pilotable à distance.

Une fois ces modules déployés, les entreprises peuvent étendre l'utilisation des données qui sont récoltées sur le terrain pour nourrir d'autres modules ainsi que pour améliorer ceux déjà existants considérant la mise en place d'un jumeau numérique. En effet, les données qui proviennent du terrain sont un reflet du comportement du système réel, elles peuvent donc aussi être utilisées pour améliorer et corriger les modèles de comportement qui répondent aux fonctions dans chacun des modules ; il s'agit ici de la suite à donner une fois que les modules sont déployés. Grâce à cette méthodologie, Hellomoov' a pu implémenter l'architecture et des modules et ainsi obtenir ce que l'on peut considérer comme un premier jumeau numérique. Nous faisons l'hypothèse que d'autres entreprises similaires devraient donc pouvoir utiliser cette méthodologie pour implémenter un jumeau numérique aussi.

Abstract

The digital twin is a concept that was introduced by Professor Grieves in the early 2000s, it proposes a system composed of three parts; a physical entity, an entity in a digital space that replicates the physical entity and a connection between these two entities in order to perform functions that help the designer or user of the physical system. In recent years, many researchers have studied this subject, have developed it to specify its nature, its functions, as well as its limits, but few have studied the way in which it is possible to implement it concretely. Examples of digital twins can be found in the literature, but the authors rarely describe the deployment of a digital twin.

If the concept seems simple, its execution raises questions, and we can legitimately hope to devise an effective deployment method.

This work was carried out in partnership with a company called Hellomoov'. It is a small and medium-sized company in the transitive sector. It is a company which manufactures industrial transfer systems for other companies, their wish is to implement a digital twin for their transfer systems. The digital twin must provide many services such as design assistance, manufacturing assistance, maintenance assistance, etc. The digital twin of such a system can also be interesting for its user, thanks to the assistance to the exploitation or the predictive maintenance for example.

The methodology proposed here is to set up a modular architecture, where each module responds to a function thanks to a behavioral model (representing a behavior of the system), thanks to configuration data and thanks to data coming from the field using the connection Dr. Grieves talked about. Once the specific needs of the industrial company are identified, we proceed in an iterative way; Starting with a module, which also serves as an interface for the digital twin, we then have to create the connection between the two spaces, it is then possible to add the other modules one after the other.

This method aims at a gradual deployment in order to gain the acceptance at all levels of the company.

In the specific case of Hellomoov', three modules have been identified; a flow simulator, a field data analysis for maintenance and an automated control module of the sub-assemblies of a transfer line. The simulator was developed on an open source editor which allows it to be very open so that new elements can easily be added to it. The analysis of the data coming from the field showed that it was possible to extrapolate at least partially the state of health of certain critical parts of the system and thus to plan maintenance interventions when necessary. Finally, thanks to an electronic box and to the data coming from the simulator, Hellomoov' is able to automatically program the behavior

of all the sub-assemblies of a transfer line, making the control easier and remotely controllable.

Once these modules are deployed, companies can extend the use of the data that are collected on the field to feed other modules as well as to improve the existing ones considering the implementation of a digital twin. Indeed, the data that comes from the field reflects the real system's behavior, so it can also be used to improve and correct the behavioral models that respond to the functions in each of the modules; this is the follow-up once the modules are deployed. Thanks to this methodology, Hellomoov' implemented the architecture and the modules and thus obtain what can be considered a first digital twin. We make the hypothesis that other similar companies are able to use this methodology to implement a digital twin too.

Table des matières

Remerciements	- 2 -
Résumé	- 3 -
Abstract	- 5 -
I. Le jumeau numérique dans une PME face au déploiement de l'industrie du futur	- 11 -
a. Qu'est-ce qu'un jumeau numérique	- 11 -
b. À quoi un jumeau numérique peut-il ressembler ?	- 13 -
i. Exemple d'un jumeau numérique d'une voiture	- 13 -
ii. Exemple d'un jumeau numérique d'une usine de production	- 15 -
c. Hellomoov' une PME face au déploiement de l'industrie du futur .-	- 16 -
i. Qui est Hellomoov'	- 16 -
ii. La place de l'innovation chez Hellomoov'	- 18 -
iii. Les systèmes de transferts	- 19 -
iv. Quel est le fonctionnement.....	- 19 -
v. Utilisation.....	- 22 -
vi. Spécificité de l'activité.....	- 22 -
vii. Le virage de l'industrie du futur	- 23 -
II. État de l'art	- 25 -
a. Le concept	- 25 -
i. Historique	- 25 -
ii. Un socle commun	- 25 -
La maquette numérique	- 27 -
L'ombre numérique	- 30 -
iii. Des différences persistent.....	- 33 -
b. Les méthodes d'implémentation du jumeau numérique	- 35 -
c. Les autres briques de l'industrie du futur dans l'industrie	- 38 -
d. La simulation dans les jumeaux numériques	- 40 -
e. Les plans d'expérience pour construire des références comportementales	- 42 -
f. L'internet des objets et l'électronique pour la communication	- 43 -

g.	Conclusion.....	- 46 -
i.	Méthodologie	- 46 -
ii.	Ce que l'on retire de l'état de l'art	- 47 -
iii.	L'analyse du terrain	- 48 -
III.	La proposition de méthodologie d'implémentation.....	- 51 -
a.	Les notions	- 51 -
i.	Module.....	- 51 -
ii.	Modèle	- 51 -
iii.	Acteurs humains	- 52 -
b.	Proposition d'architecture.....	- 52 -
c.	Proposition de méthodologie	- 56 -
i.	L'analyse du terrain	- 59 -
ii.	Planification	- 60 -
iii.	Réalisation.....	- 63 -
d.	Résultats	- 65 -
e.	Résumé	- 65 -
IV.	Le jumeau numérique appliqué à Hellomoov'	- 67 -
a.	Définition du périmètre	- 67 -
b.	Définition du besoin et des plans d'action	- 74 -
c.	Priorisation des modules	- 77 -
d.	Conclusion.....	- 79 -
V.	Le simulateur de flux.....	- 80 -
a.	Introduction : choix de développement d'un simulateur	- 81 -
i.	Les solutions préexistantes.....	- 81 -
ii.	Développement d'une solution maison	- 81 -
b.	Modèle d'un système de transfert	- 82 -
i.	Une architecture de composants paramétrés.....	- 82 -
ii.	Typologie de simulation.....	- 84 -
iii.	Modèles de composant	- 85 -
iv.	Interface avec le configurateur.....	- 88 -
c.	Implémentation d'un modèle sous Godot	- 88 -

i.	Implémentation d'un composant.....	88 -
ii.	Gestion du comportement.....	90 -
	Modèle logique	90 -
iii.	Orchestration d'une simulation	91 -
d.	Exemples de simulations sur des études clients	92 -
i.	Cahier des charges clients	93 -
ii.	Transformation en modèle via l'interface du simulateur	94 -
iii.	Démonstration de simulations	95 -
iv.	Valeur ajoutée	96 -
e.	Retour des utilisateurs	96 -
f.	Conclusion	97 -
VI.	Expérimentation et Récupération de mesures de données sur le terrain	98
	-	
a.	Hypothèses	99 -
b.	Principe	99 -
c.	Réalisation	101 -
i.	Distinguer les palettes.....	101 -
ii.	L'effet de la masse embarquée et de l'état des pions	103 -
iii.	L'effet de l'état des bandes	105 -
d.	Retour des futurs utilisateurs.....	107 -
e.	Conclusion	108 -
VII.	Développement du système de récupération de données et de contrôle de	
ligne	-	109 -
a.	Description du besoin.....	109 -
b.	La proposition technique.....	110 -
i.	L'architecture	110 -
ii.	Exemple de nœuds	111 -
iii.	Le nœud central.....	113 -
iv.	La programmation	113 -
v.	Lien avec le contexte Hellomoov'.....	115 -
c.	Le démonstrateur	116 -

i.	Les solutions techniques pour le démonstrateur	- 117 -
ii.	La réalisation	- 120 -
iii.	Les résultats	- 122 -
d.	Les résultats pour Hellomoov'	- 123 -
e.	Préindustrialisation envisagée chez Hellomoov'	- 123 -
VIII.	Conclusion	- 126 -
	Résultats académiques.....	- 126 -
	Résultats chez Hellomoov'	- 127 -
	Perspectives	- 128 -
	Bibliographie.....	- 130 -
	Table des illustrations.....	- 136 -
	Annexes	- 138 -
a.	Annexe 1 regroupement de photos de chaque élément de transfert :.	- 139 -
b.	Annexe 2 Support de présentation de la formation au simulateur-	145 -

Méthode de conception intégrée d'un jumeau numérique d'équipement de production 4.0

I. Le jumeau numérique dans une PME face au déploiement de l'industrie du futur

a. Qu'est-ce qu'un jumeau numérique

Le jumeau numérique apparaît être un support important pour l'industrie du futur. C'est un objet numérique rattaché à un système physique (produit, machine, usine...) et qui en est la réplique. Il est susceptible de faciliter sa conception, sa réalisation, son utilisation, sa maintenance ou son recyclage comme le décrivent Grieves et Vickers [Grieves Vickers et al. 2017].

C'est un outil qui peut être rattaché à différents types de systèmes ; des systèmes courants (tel que des voitures) ou des systèmes à usages professionnels (comme une ligne de fabrication). En fonction des cas, le jumeau numérique peut avoir des utilisateurs différents ; dans le cas d'un système courant, il peut être utilisé par le fabricant du système, pour suivre son produit (pour faire les mises à jour de l'ordinateur de bord par exemple), ou par l'utilisateur du système lui-même.

Le jumeau numérique permet, à celui qui y a accès, d'avoir durant tout le cycle de vie du système, les informations, les analyses et les recommandations qui lui sont les plus utiles. Grâce au jumeau numérique, l'utilisateur a accès, à tout moment, à une vision détaillée de l'état et du fonctionnement du système en question. Le jumeau numérique permet d'anticiper par simulation le comportement du système réel avec un modèle de simulation qui évolue avec le système physique. Cette vision lui permet de prendre les meilleures décisions en regroupant et en analysant toutes les données disponibles.

Le jumeau numérique est composé de données qui proviennent du système, sous forme d'un système d'information, dans lequel des modèles spécifiques, développés au préalable, vont requérir des informations. Ce sont ces modèles qui vont pouvoir fournir à l'utilisateur les informations, les recommandations et les conseils qui lui seront les plus utiles. De nombreux types de modèles peuvent être utilisés en fonction du système et de l'utilisation qui est souhaitée du jumeau numérique. Depuis des modèles mécaniques simples ou de matériaux, jusqu'à des modèles de maintenance prédictive, tout dépend de l'utilisation souhaitée. Il n'existe pas un environnement unique de jumeau numérique et

actuellement le développement d'un jumeau numérique demeure une action contextuelle. Par ailleurs pour être utilisé et performant pour l'utilisateur, le jumeau numérique doit proposer une ou plusieurs interfaces adaptées à l'utilisateur et à la fonction recherchée.

Le jumeau numérique est un outil qui peut faire appel à de nombreuses technologies de l'industrie du futur :

- La réalité virtuelle ou augmentée pour, par exemple, de l'aide à la fabrication ou de l'aide au dépannage à distance. C'est une solution novatrice pour la partie interface,
- La modélisation de comportements assistée par ordinateur qui permet notamment de générer des modèles de maintenance prédictive, mais qui bénéficie aussi aux systèmes d'apprentissages automatisés,
- l'internet des objets pour pouvoir enregistrer et transmettre les données du terrain nécessaires aux analyses et maintenir les jumeaux numérique et physique cohérents,
- bien que ce ne soit pas la seule possibilité, le jumeau numérique peut faire appel à des serveurs distants pour stocker, traiter les données et les mettre à disposition localement ou à distance,
- des actionneurs et du contrôle automatisé qui permettent au jumeau numérique d'agir sur le système physique.

Grâce à tous ces éléments, le jumeau numérique est capable de fournir de nombreux services à son utilisateur :

- de l'aide à la conception ; grâce à l'intégration des règles de conception,
- de l'aide au chiffrage ; grâce à l'intégration du jumeau numérique au SI de l'entreprise,
- de l'aide à l'ordonnancement ; encore une fois grâce à l'intégration au système d'information du jumeau numérique,
- de l'aide à la fabrication, en utilisant des notices de montage virtuel, générées automatiquement par le jumeau numérique,
- de l'aide à l'utilisation grâce aux indicateurs qu'il génère,
- du suivi de performance,
- de la maintenance prédictive,
- de l'aide à la reconfiguration,
- etc.

Ce sont ces fonctions qui peuvent convaincre un industriel ou ses employés de l'intérêt de la mise en place d'un jumeau numérique.

Ci-après nous décrivons deux cas de jumeau numérique

b. À quoi un jumeau numérique peut-il ressembler ?

i. Exemple d'un jumeau numérique d'une voiture

Le jumeau numérique d'une voiture pourrait avoir de nombreuses fonctions, depuis celle de s'assurer du bon fonctionnement du véhicule, permettre un retour d'information qui pourrait nourrir les bases de données qui serviront à améliorer les futures voitures ainsi que celle qui en est équipée. En général, un tel jumeau numérique n'est pas utilisé par le propriétaire de la voiture, mais plutôt par le constructeur afin d'avoir une vision de sa flotte de véhicule et de son utilisation. Bien que certaines fonctions de suivi de conduite puissent intéresser le conducteur.

Aujourd'hui avec les demandes de la personnalisation de masse, les demandes du jumeau numérique sont grandes ; chaque personne a un produit légèrement différent de celui de son voisin et donc il est plus complexe de gérer une flotte entière d'autant que chaque produit, même conçu identique, a sa propre histoire. Le jumeau numérique d'un véhicule doit donc comporter le modèle exact de chaque voiture ; toutes les pièces qui la composent, avec en fonction des usages souhaités, leur modèle en trois dimensions, les matériaux dont ils sont faits ainsi que la manière dont ces pièces sont assemblées. Ceci permet d'avoir une réplique exacte de chaque instance. Il faut, de plus, que chaque voiture communique avec son jumeau numérique. Il existe plusieurs solutions aujourd'hui, notamment grâce à la 4G et, sans doute bientôt, à la 5G. Cette connexion est bidirectionnelle, elle permet autant à la voiture de faire remonter les données de conduites et de fonctionnements que d'obtenir des informations, des ordres ou encore des mises à jour de son alter ego.

Grâce à ces modèles et aux données collectées, de nombreuses fonctions sont alors disponibles. Ces fonctions peuvent être utiles lors de la conception, de la réalisation ou de la vie courante de la voiture ;

- L'aide à la conception est un module qui permet au concepteur de nouvelles voitures d'utiliser les données collectées par les autres véhicules pour dimensionner et améliorer les nouveaux modèles. Le concepteur peut se baser sur des modèles mécaniques théoriques, mais aussi sur le comportement réel constaté et différent en fonction des configurations et instances de la flotte, en analysant l'historique des pannes ou les modes de défaillances des pièces, il est possible de savoir comment dimensionner les pièces pour limiter ces occurrences. Chaque nouvelle instance de cette flotte est une mine d'information supplémentaire pour le concepteur,

- lors de la fabrication, l'identification de chaque élément ou sous-ensemble permet d'avoir un suivi de la qualité et d'assurer une traçabilité exemplaire. C'est aussi une manière de limiter les erreurs de montage ; le jumeau numérique étant capable d'alerter si les mauvaises pièces sont installées ou si elles ne le sont pas correctement,

- durant la phase de vie normale de la voiture, le jumeau numérique permet de fournir de nombreuses informations au conducteur. Des informations basiques telles que la vitesse moyenne, la consommation moyenne, la consommation instantanée, l'autonomie restante qui peuvent être ensuite compilées et analysées pour l'utilisateur, pour l'informer sur son style de conduite par exemple. Grâce à des modèles de maintenance prédictive, le jumeau numérique est capable de communiquer la durée de vie restante des pièces d'usures (plaquettes de frein, pneus...) au propriétaire du véhicule, mais aussi éventuellement, à l'agent de maintenance ; le garage, pour qu'il puisse prévoir les interventions nécessaires ainsi que le besoin et le temps restant avant les autres maintenances importantes (courroie de distribution, suspension). Grâce aux données collectées par ailleurs, des modèles peuvent aussi prédire la qualité des fluides à bord (huile, liquide de frein...) et donc la nécessité de les changer,

- durant la phase de vie, le constructeur a aussi un intérêt au jumeau numérique, grâce à la connaissance précise de chaque véhicule, il peut savoir quelles voitures peuvent bénéficier d'une amélioration, d'une mise à jour ou non. Quand des mises à jour sont développées, il peut arriver que leur utilisation soit conditionnée ; que pour fonctionner il faille certains capteurs ou certains actionneurs ou une combinaison plus complexe de ces éléments. Grâce au jumeau numérique, avec la vision globale qu'il apporte, il est possible à tout moment de savoir qui peut utiliser une mise à jour ou une nouvelle fonction.

Ces éléments sont des modules potentiels d'un jumeau numérique de voiture. La ou les interfaces pour y accéder peuvent être variées et dépendront de l'utilisateur (l'utilisateur de la voiture ou le constructeur). On peut imaginer pour l'utilisateur soit à bord du véhicule lui-même, sur l'ordinateur de bord, ou un accès sur son ordinateur personnel via internet. Aujourd'hui, le constructeur et l'agent de maintenance ont accès aux données initiales du véhicule uniquement, mais grâce aux technologies de l'IoT, il est possible d'imaginer qu'ils pourront avoir accès aux données du jumeau numérique depuis un ordinateur.

Le jumeau numérique d'une voiture est un exemple d'un objet grand public, pour une utilisation industrielle, il est possible de faire le jumeau numérique d'une machine ou d'une usine de production.

ii. Exemple d'un jumeau numérique d'une usine de production

Le jumeau numérique d'une usine sera bien différent que celui d'une voiture. Les deux systèmes sont différents, ils ne sont pas utilisés de la même manière et donc leurs jumeaux numériques auront une utilisation et des fonctions différentes. L'hypothèse est que ce jumeau numérique est principalement utilisé par l'utilisateur de l'usine elle-même contrairement au cas de la voiture, bien qu'il soit tout à fait possible d'externaliser des modules ou des données si des fonctions sont réalisées par des prestataires ou des sous-traitants. Le jumeau numérique d'une usine a un intérêt principal qui est de suivre la production de l'usine et son évolution. Les demandes économiques sont de plus en plus strictes pour les entreprises manufacturières et la possibilité de suivre ses machines, de vérifier leur fonctionnement est un atout indéniable.

Le jumeau numérique d'une usine, comme celui d'une voiture commence tout d'abord, par la modélisation de son alter ego physique, par la création de nouveaux modèles ou par la récupération de modèles issus de la conception de l'usine ; il doit être une représentation fidèle du système auquel il est rattaché. Il doit aussi modéliser les comportements de la ligne de fabrication, savoir comment se comporte l'usine normalement pour pouvoir détecter s'il y a un problème. Pour faire ses analyses, le jumeau numérique doit aussi confronter les données issues des modèles aux données réelles, collectées sur le terrain. Donc, comme dans le cas d'une voiture, il doit y avoir une remontée d'information vers le jumeau numérique, mais le jumeau numérique doit disposer des mécanismes d'enregistrement des données de captures, de versionnement, et au final d'adaptation du comportement du modèle pour correspondre à la réalité physique. Dans le cas d'une usine, cette remontée est potentiellement plus simple étant donné que l'usine ne se déplace pas, les données pourraient être remontées le plus souvent par des câbles de connexion.

Une fois remontées et analysées, ces données peuvent fournir plusieurs services à l'utilisateur du jumeau numérique :

- Le jumeau numérique peut suivre et historiser la production. Il est de plus en plus demandé de garantir la traçabilité des produits fabriqués, le jumeau numérique intégré peut centraliser et enregistrer les données relatives à chacun des produits. Ainsi il est possible, à posteriori, de retrouver précisément les paramètres de production de chaque produit,
- le jumeau numérique peut ordonnancer la production. En étant connecté à l'ERP et aux commandes enregistrées, il est capable grâce aux modèles de production (temps de production, temps de flux...) de tester numériquement plusieurs scénarios et de proposer ou de lancer celui qui permet de répondre au mieux aux demandes [Noël et al. 2020],

- le jumeau numérique doit détecter les dérives au plus tôt pour les corriger. Grâce à des modèles de maintenance prédictive, ainsi que des données très précises (données de production ou de maintenance), le jumeau numérique doit pouvoir détecter des signaux faibles : une dérive d'une ou plusieurs métriques liées à la qualité ou non, qui sont le symptôme d'une défaillance à venir. Ces modèles sont capables de déterminer la provenance de la dérive ainsi que le délai avant que la défaillance ne se produise, laissant le temps aux techniciens de maintenance de se procurer les pièces nécessaires et de prévoir l'intervention. Cela permet de minimiser les coûts en limitant les immobilisations de pièces qui peuvent être chères, en limitant les pannes et les arrêts de production afin d'avoir au global le meilleur taux possible de disponibilité des machines.

Au global, le jumeau numérique est voué à devenir un outil industriel utilisé dans de nombreux domaines pour de nombreuses applications. C'est un outil principalement lié aux technologies de l'industrie du futur, tel que l'électronique, les réseaux et la modélisation de comportement. Il est à taille et à utilisation géométrie variable et il peut rendre de nombreux services à son utilisateur. De par les technologies et les modèles auxquels il fait appel, le jumeau numérique peut être lourd à implémenter et à déployer, surtout dans le cas de structures petites ou ayant moins d'accès aux compétences de l'industrie du futur. Malgré la difficulté, il propose des fonctions et des modules intéressants, quelle que soit la taille de la structure, il faut donc vérifier que les gains d'un jumeau numérique surpassent le coût et la difficulté de l'implémenter. Cela va grandement dépendre de la structure elle-même. Dans le cas présent, nous envisageons son déploiement dans l'entreprise Hellomoov'

c. Hellomoov' une PME face au déploiement de l'industrie du futur

i. Qui est Hellomoov'

Dans le cadre de ma thèse, je suis en CIFRE dans une entreprise qui s'appelle Hellomoov'. C'est un groupe du secteur industriel. Dans son ensemble, il représente environ 250 salariés dont l'activité principale est la transformation de profilés aluminium et de blocs de plastique pour fabriquer trois types de produits ; des châssis (pour des postes de travail ou des systèmes mécaniques), des convoyeurs à bandes, des systèmes de transferts à palettes et des outils plastiques. C'est un groupe industriel au service de l'industrie, il propose de fournir des solutions principalement mécaniques aux problèmes de déplacement de pièces et de produits dans les usines. Il est composé de 3 entreprises qui sont complémentaires ; Elcom, Faber et Transept.

On peut voir sur la figure 1 l'implantation des sites du groupe Hellomoov' en France. Elcom est la plus grosse entreprise du groupe et c'est aussi son origine historique. Elle regroupe environ 120 salariés. Basée à Bourgoin-Jallieu en Isère, c'est une entreprise créée en 1986 par deux associés, à l'origine pour distribuer les profilés aluminium et les accessoires de l'entreprise allemande Item. Un peu plus tard, durant les années 90, Elcom développe un premier système de transfert à palettes basé sur les produits item. Ce système connaît un franc succès, car il répond très bien au besoin tout en étant fiable et simple. En 2011, Éric Vergne reprend Elcom et dans la foulée, il rachète Faber, dans un premier temps, et Transept un peu plus tard. La force principale d'Elcom est la qualité des produits autant en profilé et accessoire qu'en système de transfert. Couplée à la capacité d'adapter chaque solution aux besoins spécifiques des clients, c'est ce qui explique le succès et la longévité de l'entreprise.

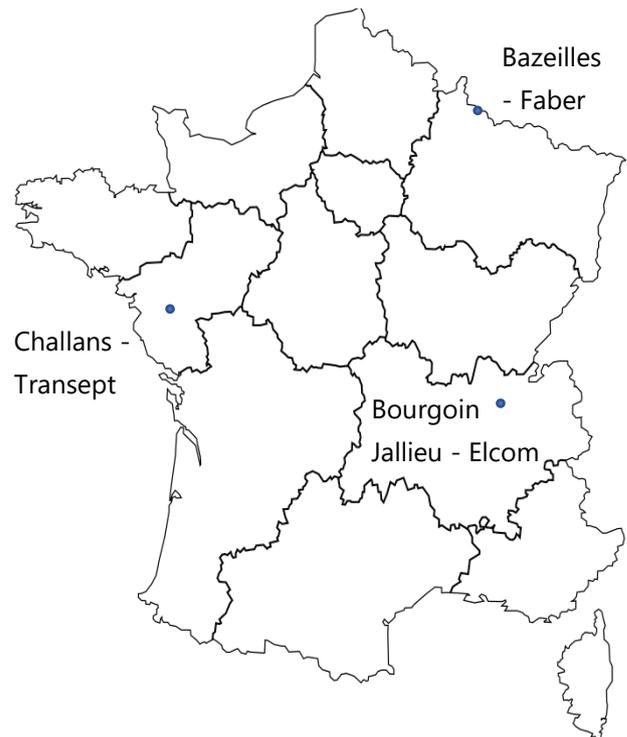


Figure 1 implantation du groupe Hellomoov'

Faber est une entreprise basée à Bazeilles dans les Ardennes. C'est une entreprise d'environ 90 salariés qui fabrique des convoyeurs à bande modulaire pour l'industrie agroalimentaire et pharmaceutique. Créé en 1957 à Sedan, leur cœur de métier à l'époque est la fabrication de chaînes plastiques. Un peu plus tard, dans les années 80, ils commencent à concevoir et à fabriquer des vis à pas variable, qui permettent de tourner ou de faire des lots de produits ainsi que des manchons de retournement qui eux permettent de retourner les produits à la volée. Tous ces éléments viennent se rajouter aux convoyeurs qu'ils fabriquent déjà, pour fournir des solutions complètes de déplacement pour des produits tel que des bouteilles, des bocaux par exemple.

Transept est la dernière venue dans le groupe, l'entreprise est basée à Challans en Vendée. L'entreprise représente environ 40 salariés. Comme Elcom, le cœur de métier de Transept est la transformation de profilé aluminium pour fabriquer des convoyeurs et des lignes d'assemblage. L'entreprise a été fondée en 1993. Ils ont un panel d'éléments pour proposer une solution personnalisée à chaque client. Le panel est composé d'éléments modulaires (type châssis ou poste de travail), des convoyeurs à bandes, un système de transfert à palettes ainsi que des axes linéaires. La force principale de transept est de

pouvoir jongler avec de nombreuses technologies et ainsi d'adapter la solution aux besoins du client.

Grâce à ces trois entreprises, le groupe Hellomoov' possède un large éventail de compétences, de technologies et de typologies de produits qui en font un acteur incontournable dans le secteur industriel de la logistique interne. Les compétences du groupe sont quasi exclusivement mécaniques ; l'usinage des profilés aluminium, pour Elcom et Transept, et des blocs plastiques pour Faber, il faut aussi raccorder les moteurs et les capteurs, mais le groupe Hellomoov' n'a pas de compétences en électrotechnique ou en automatique.

ii. La place de l'innovation chez Hellomoov'

Pour le groupe Hellomoov' un site est dédié à la recherche et au développement ; l'institut Hellomoov' Performance. C'est là que j'ai mené mon travail de recherche. L'institut est aussi basé à Bourgoin-Jallieu, mais il est sur un site séparé pour représenter le fait qu'il est dédié au groupe Hellomoov' dans son ensemble et pas uniquement pour Elcom. Le département recherche et développement est en charge d'améliorer les produits existants, de développer de nouveaux produits qui ont été identifiés comme étant pertinents de travailler avec les clients pour développer des solutions hors standards, personnalisées pour répondre au mieux à toutes leurs demandes, ainsi que les futures demandes du secteur. Pour ce faire, en plus de moi, l'institut est composé de deux techniciens de développement mécanique, qui connaissent bien les produits du groupe et qui sont en contact avec Elcom, Faber et Transept.

Comme décrit précédemment, le cœur de métier des entreprises du groupe Hellomoov' se concentre dans la mécanique. Dans le département de recherche et développement aussi, il n'y a pas de compétence en développement informatique, en électronique, ou dans les autres domaines qui ont trait à l'industrie du futur.

Chez Hellomoov', les sujets de recherche et développement peuvent provenir de deux canaux distincts. Premièrement, un client approche le service commercial avec un problème que les entreprises du groupe ne savent pas résoudre avec les solutions proposées au moment de sa demande, et dans ce cas il faut développer avec lui la solution la plus adaptée à son besoin. Le service développement peut ensuite la standardiser et l'industrialiser s'il estime qu'elle pourrait être bénéfique à plus de clients. Le second canal de recherche et développement est lié à la veille technologique interne ; une personne voit une technologie qu'il voit comme pouvant compléter la gamme ou améliorer un produit qui y est déjà présent. Compte tenu de la taille du groupe et de la typologie de notre activité, il faut faire des choix quant aux sujets de recherche et développement qui sont poursuivis, il faut donc systématiquement faire la preuve du bénéfice de chaque sujet. Dans le premier cas, la preuve est en grande partie amenée par le client ; le projet arrive

déjà avec une demande client. En revanche, dans le cas d'une source interne, il faut parvenir à démontrer l'intérêt de chaque sujet pour valider sa poursuite.

iii. Les systèmes de transferts

Dans le cadre de mes recherches chez Hellomooov', mon travail d'implémentation du jumeau numérique s'est porté sur une famille de produits en particulier, les systèmes de transfert à palettes.

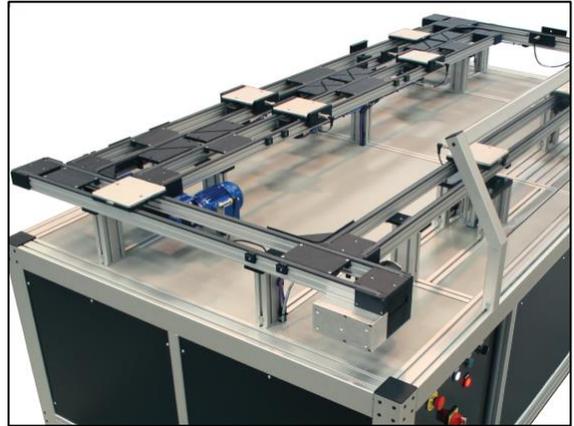


Figure 2 Deux exemples de ligne de transfert

Les systèmes de transfert à palette TLM sont les produits phares d'Hellomooov' et d'Elcom en particulier, le produit brille par sa simplicité et son efficacité à rendre le service demandé. La figure 2 présente deux exemples de ces lignes de transfert. Ils permettent de déplacer des objets allant de quelques centimètres jusqu'à un mètre et pesant jusqu'à 50 kg. Ces systèmes permettent de gérer le positionnement avec une très grande précision grâce à des indexages, de gérer des dérivations pour avoir la possibilité de faire des chemins parallèles. Ils sont basés sur les profilés aluminium ce qui garantit une grande liberté de conception de ligne.

iv. Quel est le fonctionnement

Les lignes de transfert sont composées de plusieurs éléments que l'on peut classer comme suit ;

Des éléments mobiles appelés des palettes sur lesquelles les utilisateurs viennent installer un porte-pièce qui est spécifiquement adapté aux produits ou aux sous-composants qu'ils veulent transporter. Ce sont elles qui vont se déplacer pour emporter les pièces du client à chaque point d'intérêt (par exemple des postes automatisés ou manuels). Les palettes sont carrées ou rectangulaires et ont, dessous, quatre pions escamotables qui viennent se loger dans des gorges pour assurer le guidage des palettes à tout moment.

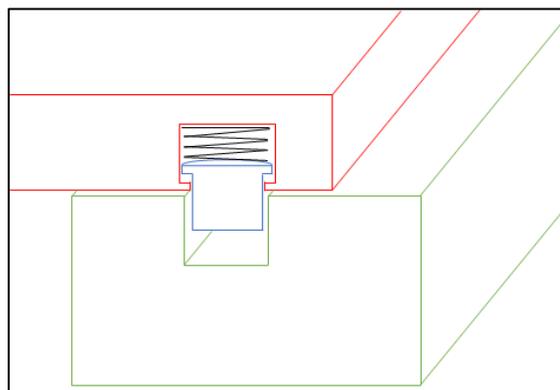


Figure 3 Schéma d'un pion de palette

La figure 3 est une représentation d'un pion de palette, le pion est représenté en bleu, le ressort pour le maintenir vers le bas est en noir, la palette est en rouge et le profilé dans lequel il y a la gorge est vert.

Des éléments fixes ;

- Des unités de transfert ; ce sont les éléments principaux de la ligne. Ils sont composés de deux profilés aluminiums parallèles, il y a, d'un côté un bloc moteur et de l'autre un bloc de renvoi. Sur les profilés, il y a un guide-bande et une bande qui est entraînée par le moteur. Les palettes reposent sur la bande, et par adhérence les deux bandes les font avancer. Les profilés d'une unité sont espacés exactement pour que les quatre pions des palettes soient de part et d'autre, garantissant ainsi le guidage lors du transit des palettes.
- Les points d'arrêts ; il y en a deux types, les butées et les indexages. Les butées vont simplement arrêter les palettes en les bloquant. Les indexages vont en plus d'arrêter la palette, l'indexer pour les postes qui nécessitent une précision supérieure (jusqu'à $\pm 0,03$ mm de répétabilité).
- Des cames ; ce sont les éléments qui permettent de faire tourner les palettes, elles sont composées de deux petites parties qui sont placées du côté extérieur de l'unité et d'une partie triangulaire qui joint les deux unités perpendiculairement. Les pièces placées du côté extérieur sont un peu en amont du virage, elles sont là pour lever les pions extérieurs des palettes pour qu'ils puissent passer au-dessus de l'unité. La partie triangulaire comporte une gorge en arc de cercle qui relie les faces intérieures des deux unités pour assurer le guidage des palettes lorsque les pions extérieurs sont relevés. On distingue :
 - Des cames simples ; qui permettent de faire passer les palettes d'une unité à une autre qui sont perpendiculaires, la palette fait donc un virage de 90° .

- Des cames courtes ; similairement aux cames simples, les cames courtes permettent aux palettes de passer d'une unité à une autre, mais les cames courtes permettent de le faire entre deux unités parallèles et non perpendiculaires. Deux plaques ayant chacune une gorge sont fixées entre deux unités parallèles et permettent de guider, l'une, les pions gauches et l'autre, les pions droits des palettes pour faire la transition.
- Des cames doubles ; ressemblent beaucoup aux cames courtes, elles permettent aussi de faire passer des palettes d'une unité vers une autre unité parallèle à la première, mais les cames doubles permettent d'aller d'une unité à gauche vers une unité à droite, mais aussi l'inverse sur un même système. Le choix du sens de circulation est géré par l'automate qui gère la machine complète.
- Les dérivations sont des actionneurs accessoires que l'on rajoute à une came ou une came courte, qui permettent de choisir quels pions vont être levés, au choix lever les pions extérieurs pour tourner dans la came, ou les pions intérieurs pour poursuivre tout droit. Le pilotage des dérivations est géré par l'automate qui gère la machine complète.
- Les retours 180° permettent aux palettes de faire un demi-tour sur une unité parallèle qui est placée à côté. Cette fonction pourrait être réalisée avec deux cames, mais l'encombrement et le coût serait largement supérieurs.
- Les retournements permettent de faire un demi-tour à une palette sans la faire changer d'unité, l'arrière devient donc l'avant et inversement. C'est une fonction qui peut être nécessaire en fonction des contraintes des machines de nos clients.
- Les ascenseurs permettent d'interrompre une ligne pour qu'elle puisse se poursuivre sur plusieurs niveaux différents.

L'annexe 1 est un regroupement de photos de chacun de ces éléments.

Grâce à tous les éléments décrits ci-dessus, il est possible de réaliser de nombreuses architectures différentes de ligne, pour pouvoir s'adapter au mieux aux contraintes de lieux et répondre aux besoins de flux du client ; le takt time et la productivité demandée.

Une ligne est toujours une boucle fermée, pour que les palettes puissent revenir au point d'origine. Elle commence par un ou plusieurs postes d'approvisionnement, où les produits dans leur état initial arrivent, ensuite s'enchaînent plusieurs postes de travail (automatique, réalisé par une machine ou manuel par des opérateurs) intercalés par des postes de contrôle avant d'arriver à un ou plusieurs postes d'évacuations où les produits traités vont pouvoir être récupérés pour poursuivre leur route. Après l'évacuation, le

système de transfert boucle pour rapporter les palettes vides vers le poste d'approvisionnement pour que le cycle puisse continuer.

Les différentes comes, ainsi que les retours 180° et les ascenseurs permettent d'adapter l'architecture de la ligne ; éviter des poteaux, contourner une machine qui a une grosse emprise... Les points d'arrêts permettent de gérer le flux et de positionner les produits pour qu'ils puissent être accessibles aux opérateurs et aux machines. Les dérivations permettent d'orienter les palettes vers les postes souhaités quand il y a différents cycles de production simultanément, de ségréger des pièces si elles s'avèrent non conformes ou de dédoubler le flux si certains postes ne permettent pas de respecter le takt time demandé par le client.

v. Utilisation

Grâce à de grandes possibilités de dimensions et de charges admissibles, les systèmes de transferts à palettes ont une large gamme d'utilisations possibles dans l'industrie manufacturière. Depuis des équipementiers automobiles comme Valeo, à des entreprises d'électroniques ces solutions de transfert sont utiles dans de nombreux domaines. Ils sont particulièrement efficaces quand il y a de la co-activité entre des machines automatisées et des opérations manuelles, car ces systèmes permettent facilement de les relier. Les systèmes de transfert sont aussi de plus en plus présents dans le secteur de l'agriculture expérimentale, où ils permettent de réaliser des fermes hors sol sur lesquelles il est possible d'appliquer des protocoles spécifiques à des fins de recherche notamment.

C'est une technologie simple, et peu coûteuse qui permet de répondre à de nombreuses problématiques techniques

vi. Spécificité de l'activité

Les systèmes de transfert sont une typologie de produit qui reste particulière pour plusieurs raisons ;

- Tout d'abord, Elcom traite rarement avec l'utilisateur des systèmes de transfert. Ces machines ne sont pas des machines complètes, mais un sous-système, une quasi-machine. Les clients sont les intégrateurs de machine spéciale ; ils conçoivent les systèmes complets pour réaliser les fonctions demandées par les industriels qui utiliseront la machine complète. Ce que cela implique, c'est que le service commercial d'Elcom est en général contacté pour la partie transfert bien plus tard dans la phase de conception de la machine complète, le délai qui est laissé à Hellomoov' est souvent très court, ce qui est une contrainte forte dans leur cycle de développement, ils se doivent d'être très réactif et d'être capable de répondre rapidement aux

demandes de devis notamment pour pouvoir au mieux préparer leur production.

- La deuxième grande particularité de l'activité d'Hellomoov' vient de la fonction qu'ils réalisent ; L'objectif des produits de transfert est de déplacer le produit du client-utilisateur de poste en poste. Ces systèmes de transfert n'apportent pas de valeur ajoutée au produit, ce n'est pas Hellomoov' qui est responsable de transformer le produit. Ce qui fait qu'il est souvent beaucoup plus difficile de justifier un prix plus élevé. Il leur faut donc absolument être capables de conserver des tarifs bas.

Pour résumer, de par la relation qu'il y a entre l'entreprise Hellomoov' et leurs clients ainsi que celle qu'il y a entre eux et les utilisateurs des systèmes de transfert, de par la valeur ajoutée de ces produits qui ne créent pas la valeur pour l'utilisateur, il y a deux aspects qui sont primordiaux pour Hellomoov', le rapport entre le coût et la qualité de leurs systèmes et le délai entre la demande initiale du client et la livraison de la machine finie (surtout la première réponse qui décrit simplement la solution proposée et le budget qu'elle demande). Tous gains sur ces aspects-là représentent un avantage notable pour l'entreprise.

vii. Le virage de l'industrie du futur

Les entreprises du groupe sont nées pendant la troisième révolution industrielle voire avant, ce qui signifie que le groupe a vu arriver l'industrie du futur, avec toutes ses nouvelles technologies : l'interconnectivité des systèmes basés sur l'internet des objets, etc. De nouveaux besoins sont aussi apparus. Grâce à la mécanisation puis à l'automatisation, le mode de production était la production de masse, mais avec l'arrivée de l'industrie du futur nous basculons dans la personnalisation de masse. La demande de flexibilité des produits est décuplée et par conséquent la flexibilité du moyen de production aussi.

Toujours grâce à ces nouvelles technologies, les possibilités de traitement et d'analyse des données ont aussi été fortement développées. Cela permet de mieux gérer et mieux contrôler les processus de production comme décrits dans l'exemple de la ligne de production plus haut. Cela permet de détecter les dérives au plus tôt pour pouvoir les corriger le plus vite possible et ainsi limiter les pertes qui pourraient être induites par ces dérives.

Dès lors, l'impulsion pour travailler sur les sujets de l'industrie du futur est venue autant de l'extérieur que de l'intérieur du groupe, pour répondre au mieux à leurs clients et pour maîtriser leur production et leurs produits en interne. Hellomoov' s'est donc lancé dans une démarche qui a été baptisée la Moovitique. La Moovitique est la transitique de l'usine du futur. Elle permet de mettre au service du transfert notamment, les avancées

des objets connectés, et des applications intelligentes. Cependant, comme mentionné précédemment, les compétences nécessaires pour travailler sur ces sujets ne sont pas présentes au sein du groupe à l'origine, et compte tenu de sa taille, il est difficile de dédier une part trop importante de ses ressources sur un tel sujet, qui risque de courir trop longtemps dans le temps. Il fallait définir au mieux le besoin pour pouvoir concentrer les recherches dans le secteur le plus approprié.

Le choix s'est porté sur le jumeau numérique, l'élément qui semble rassembler le plus de qualités recherchées. La question de recherche est alors : Dans ce contexte, **comment construire un jumeau numérique dans une PME spécialisée dans son domaine de production qui est autre que ce genre d'outils ?** On prendra le cas d'Hellooov', PME spécialisée dans la conception, fabrication et mise en service de systèmes de transfert mécaniques.

Pour un tel travail, la recherche intégrée au sein de l'entreprise a été privilégiée pour profiter de l'expérience déjà présente sur le terrain pour construire avec eux la méthodologie qui serait la mieux adaptée ainsi que d'un cas d'application pour l'illustrer. C'est donc lors d'une thèse CIFRE que ce travail de recherche a été mené. La majorité du temps a été passé dans l'entreprise, avec des contacts réguliers avec le laboratoire G-SCOP. Des réunions entre les trois partis ont aussi eu lieu régulièrement pour s'assurer du cadrage du projet de recherche.

II. État de l'art

a. Le concept

On peut attribuer la parenté du concept de jumeau numérique au Dr. Grieves en 2003 quand il décrit pour la première fois celui de « Conceptual ideal for PLM » qui est le concept servant de base à celui de jumeau numérique. De nombreux autres travaux s'y sont intéressés depuis.

i. Historique

Le premier article décrivant le concept de jumeau numérique Grieves et al. 2005 est issu d'un cours dispensé à l'université du Michigan en 2003. Cet article est centré autour du « Product lifecycle management » (PLM) ou gestion du cycle de vie produit, il décrit alors son concept comme un « Conceptual ideal for PLM », un idéal de conception pour la PLM. Il décrit cette idée comme « Mirrored spaces model » (MSM) ou le modèle des espaces miroirs. Cet article explique que le nouveau paradigme pour les entreprises manufacturières est le PLM et que ce paradigme nécessite le dé-silotage des données de l'objet, créant un « cœur de données ». Ce concept est l'essence du modèle des espaces miroirs proposés par l'auteur à l'origine du jumeau numérique.

En 2011 le terme de jumeau numérique a été utilisé pour la première fois dans un livre du Dr. Grives ; « *Virtually perfect : Driving Innovation and Lean Products through Product Lifecycle Management* ». Il attribue le terme à J. Vickers de la NASA ; avec qui il a travaillé sur le sujet, mais le concept reste identique.

ii. Un socle commun

Un jumeau numérique nécessite la communication entre deux éléments, un élément du monde réel (un objet, un système) et une copie numérique de cet objet. On retrouve cette notion dès 2005, où le « Mirrored spaces model » est composé de trois parties :

- un espace réel (qui correspond à l'objet réel),
- un espace virtuel (qui représente son alter ego numérique) et
- un mécanisme de connexion entre les deux

Cet aspect est présent dans toutes les descriptions du jumeau numérique [Glaessgen et al. 2012, Bolton et al. 2018, Tao et al. 2017, etc.]

En 2017 Grieves et Vickers (NASA) proposent une définition plus formalisée du concept. Dans cet article, le jumeau numérique est « *un regroupement de constructions d'informations virtuelles, qui décrivent un produit manufacturé réel ou potentiel depuis le*

niveau micro atomique jusqu'au niveau macro géométrique. Dans une version optimale du jumeau numérique, n'importe quelle information obtenue en examinant l'objet physique pourrait être obtenue de son jumeau numérique ».

Une autre définition du jumeau numérique citée de nombreuses fois est celle donnée par E. H. Glaessgen dans un article qu'il écrit pour la NASA [Glaessgen et al. 2012] à propos d'un nouveau paradigme pour gérer les véhicules de la NASA et de l'US Air force. Dans cet article, il le décrit comme « *an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history to mirror the life of its corresponding flying twin.* ». Cette définition est notamment utilisée par Ríos [Ríos et al. 2015], Tao [Tao et al. 2017] ainsi que Negri [Negri et al. 2017] par exemple.

En se basant sur la définition de Glaessgen, [Tao et al. 2017] décrit trois caractéristiques du jumeau numérique :

- Un reflet en temps réel de l'état du système réel, en gardant une synchronisation de haute-fidélité,
- une interaction et de la convergence à trois niveaux :
 - Une interconnexion spatiale ; peu importe où se trouvent les données du jumeau numérique, où se trouvent les jumeaux physiques, ils doivent tous pouvoir communiquer entre eux,
 - Une interconnexion temporelle ; les jumeaux numériques doivent pouvoir utiliser les données et profiter de l'expérience des jumeaux numériques dans le passé
 - Une interconnexion entre les espaces ; le jumeau physique doit pouvoir communiquer avec son jumeau physique et inversement
- une autoévolution et des modèles d'amélioration continue ; le jumeau numérique s'améliore lui-même en utilisant les données qu'il récolte et qu'il analyse afin de proposer des modèles plus précis et plus justes

[Liu et al. 2018] décrit le jumeau numérique comme « une combinaison de méthodes basées sur la modélisation et sur l'optimisation. La simulation et le transfert transparent de données d'une étape du cycle de vie d'un produit à la suivante ». On retrouve dans cette définition de nombreux éléments vus ailleurs comme la notion d'un objet, un jeu de données qui est l'image de cet objet et d'une communication entre les deux. On retrouve aussi l'idée que ce modèle doit être valable tout au long de la vie de l'objet.

Le jumeau numérique est particulièrement étudié dans le secteur aéronautique ; depuis le commencement, le concept est proposé à la NASA et dans l'US Air force, mais on le retrouve aussi pour des navires. Comme cité précédemment, Glaessgen et al. 2012 sont parmi les premiers à proposer une définition au jumeau numérique. Ce concept est

intéressant pour ces domaines, car il propose des modèles par instance physique, mais aussi une solution de flotte. En effet, le jumeau numérique propose d'utiliser les données d'un individu pour apporter des informations qui pourront servir pour les autres individus d'une même flotte, les mêmes véhicules, mais qui auront vécu des événements différents. On retrouve aussi cette idée dans les articles de la NASA [Reifsnider et al. 2013] et [Hochhalter et al. 2014], mais aussi chez Airbus [Ríos et al. 2015] ou encore SSI (un constructeur de navire canadien) [Morais et al. 2019].

Autre élément fortement exprimé, le besoin de communication automatique entre les jumeaux physique et numérique ; [Glaessgen et al. 2012, Bolton et al. 2018 et Tao et al. 2017] le mentionnent. Pour de nombreux chercheurs, il est nécessaire que le jumeau numérique soit capable de donner des prévisions, des prédictions : simuler le futur est crucial ; [Glaessgen et al. 2012, Bolton et al. 2018, Hochhalter et al. 2014, Reifsnider et al. 2013, etc.]

Bien que l'objectif d'un jumeau numérique soit de représenter un système réel, Liu [Liu et al. 2022] explique que par définition tous les modèles sont faux, car ils ne sont que des simplifications, il faut donc être prudent avec les décisions qui sont prises. De plus, Liu propose une architecture ;

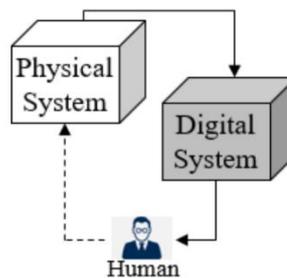


Figure 4 Proposition d'architecture, extrait de Liu et al. 2022²

Liu explique que deux systèmes ne peuvent pas se contrôler l'un l'autre, car cela mènerait à un blocage mutuel. On peut voir sur la figure 4 qu'étant donné que les modèles ne peuvent pas être entièrement exacts, Liu propose que le système physique ait la priorité et que le retour du système numérique vers le système physique soit validé par un être humain.

La notion centrale est une modélisation numérique. D'autres concepts proches existent et doivent être positionnés comme le concept de la maquette numérique (DMU) ou d'ombre numérique (Digital Shadow).

La maquette numérique

L'idée de maquette numérique est plus ancienne que celle de jumeau numérique, [Rooks et al. 1998] décrit la maquette numérique comme une simulation informatique qui peut être en réalité virtuelle qui contient toutes les fonctions qui permettent d'aider lors

de la conception, du développement, de la production et de la maintenance d'un produit. D'après cette vision, il n'y a pas de communication entre les objets physiques et leurs contreparties numérique. Cette définition datant d'il y a plus de vingt ans, les technologies disponibles à cette époque ne permettaient pas ces ambitions. Cet outil participe à la vérification de la conception d'un système, à s'assurer que les différentes pièces soient bien compatibles les unes avec les autres. Il participe à la gamme de montage en s'assurant que l'ordre et que les pièces ne se gênent pas, et bien d'autres applications en phase de conception.

Le sujet de la maquette numérique, comme celui du jumeau numérique, intéresse particulièrement l'industrie aéronautique ; Garbade [Garbade et al. 2007] (Airbus) écrit un article concernant l'intégration de la maquette numérique ; il parle d'une maquette numérique configurée, une version qui permet de passer facilement d'une version d'un produit à une autre.

Dai [Dai et al. 2020] écrit que la maquette numérique complète devrait être composée de trois éléments :

- Un modèle tridimensionnel du produit,
- la structure du produit, qui correspond aux dépendances hiérarchiques entre les pièces, l'organisation du modèle virtuel,
- les attributs du produit, qui correspondent aux versions des pièces, leurs numéros de série et les autres métadonnées qui leur sont liées.

Il décrit ensuite le concept de la maquette fonctionnelle (FDMU pour Fonctionnal Digital Mock-Up) qui est la possibilité d'avoir plusieurs versions de structure produit pour un même produit, permettant de passer facilement d'une version d'un produit à un autre.

Il oppose cette description de la maquette numérique à celle du jumeau numérique en décrivant le jumeau numérique comme devant être capable de décrire le produit, mais aussi de gérer efficacement les données de son cycle de vie. Pour lui, le jumeau numérique est une représentation d'un élément manufacturé, un modèle vivant, évolutif qui se met à jour et change en continu et de manière synchronisée en même temps que son alter ego. La maquette numérique est la représentation du produit parfait au stade de sa conception. Dans la réalité, il est impossible d'obtenir ce produit parfait ; le jumeau numérique est la représentation de l'objet réel. La maquette numérique est donc une part du jumeau numérique, une brique qui, avec les données provenant du système physique, nourrit le jumeau numérique, au moins à son initialisation comme il le montre dans la figure 5 qui représente la relation entre le jumeau numérique et la maquette numérique.

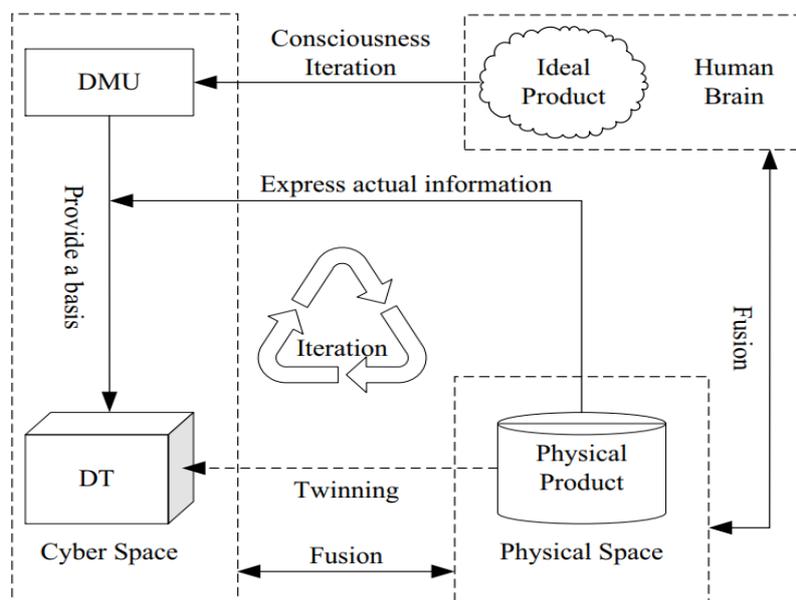


Figure 5 Dai et al. 2020 the relationship between DMU & DT

La maquette numérique est le modèle fidèle et assisté par ordinateur d'un produit [Riascos et al. 2015], il est construit pendant le développement produit et suit ses progrès pour remplacer une partie coûteuse des tests produit réel par des simulations numériques. La maquette numérique est aussi un élément du PLM ; c'est un modèle produit de référence tout au long de son cycle de vie. Riascos parle « d'afficher », ce qui montre que la connexion entre l'objet et son alter ego numérique n'est pas au centre de la maquette numérique alors qu'elle a une part majeure dans le cas du jumeau numérique.

Déjà en 2006, une maquette numérique est utilisée pour démanteler une centrale nucléaire en Corée [Kim et al. 2006]. La centrale est numériquement testée sur des

scénarios de démantèlement. Là encore (comme pour [Riascos et al. 2015]), il n’y a pas de connexion entre la partie réelle et la partie virtuelle.

D’après Kritzinger [Kritzinger et al. 2018], la différence principale entre un jumeau numérique et une maquette numérique (qu’il appelle un modèle numérique) est le niveau d’intégration ; pour lui dès lors que l’échange de données est entièrement manuel c’est une maquette numérique alors que dans le cas d’un jumeau numérique, les échanges sont fortement automatisés dans les deux directions ; de l’objet physique vers l’objet numérique et de l’objet numérique vers l’objet physique.

L’ombre numérique

L’ombre numérique est un concept qui se rapproche du jumeau numérique, ils sont parfois confondus, cependant on peut retrouver des définitions qui permettent de différencier ces deux concepts et d’obtenir une vision cohérente.

Kritzinger [Kritzinger et al. 2018] propose (comme pour la maquette numérique), de distinguer le jumeau numérique de l’ombre numérique en fonction de ce qu’il appelle le niveau d’intégration ; à quel point l’échange de données est automatisé entre l’objet réel et l’alter ego numérique. S’il propose que pour la maquette numérique les échanges sont uniquement manuels, pour l’ombre numérique les données provenant du terrain remontent automatiquement, mais l’objet numérique ne peut pas piloter l’objet réel, il n’y a pas de descente de données automatisée. Pour le jumeau numérique, les échanges sont automatisés dans les deux sens ; la remontée est automatique et le jumeau numérique peut, en fonction, des analyses piloter l’objet physique.

Bergs [Bergs et al. 2021] définit l’ombre numérique comme une représentation suffisamment fidèle des processus de production, de développement et des phases adjacentes avec pour objectif de créer un outil d’évaluation en temps réel basé sur les données pertinentes. Cette définition n’est pas spécifique et peut englober de nombreuses versions de jumeau numérique ou d’autres concepts de modélisation numérique de systèmes. Cependant, il ajoute que l’ombre numérique peut-être une étape préliminaire au jumeau numérique et qu’il pose les bases de la mesure en temps réel et des métadonnées d’un système, mais il ne décrit pas encore totalement l’objet et toutes ses propriétés comme Grieves dans [Grieves et al. 2017]. Bergs [Bergs et al. 2021] ajoute qu’une ombre numérique et un jumeau numérique sont tous deux basés sur une ressource physique qui vit des processus de changement d’état ; l’ombre numérique est une assignation de valeurs mesurées à un instant donné et pour une seule entité physique spécifique ; il ne doit y avoir qu’une seule ombre numérique par système et de même, il ne doit y avoir qu’un seul jumeau numérique par système. On retrouve là une partie des idées mentionnées avant ; l’auteur parle bien d’une connexion entre le système physique

et l'objet numérique, mais cette vision reste moins précise, laissant plus de place à l'interprétation.

Pour le jumeau numérique, Ladj [Ladj et al. 2020] utilise, lui aussi, la définition de Glaessgen [Glaessgen et al. 2012]. Cependant que le jumeau numérique ne consiste pas qu'en un jeu de données ; il inclut aussi des modèles et des algorithmes (qui assurent une concordance maximum entre les espaces physique et virtuel), ainsi que des actions rétroactives sur le système physique. Le jumeau numérique peut servir pour de la surveillance, du contrôle, du diagnostic ou encore du pronostic.

Plus loin, il fait la distinction entre trois types de jumeaux numériques :

- Un jumeau numérique de produit, qui est construit pour simuler et surveiller le comportement et l'état du système physique lors de ses phases de production et d'utilisation normale,
- un jumeau numérique de ressource de fabrication, qui correspond à la numérisation des machines de fabrication dans le but de pouvoir, entre autres, suivre leurs performances, apporter de l'aide à la maintenance, de l'aide à la décision, etc.
- un jumeau numérique de processus de fabrication, qui est un regroupement de plusieurs jumeaux numériques de ressource de fabrication qui couvre l'ensemble des ressources nécessaires à la réalisation d'un produit.

Schuh [Schuh et al. 2018] rappelle les origines du concept du jumeau numérique qui sont les maquettes réelles, répliques physiques que la NASA fabriquait afin de pouvoir refléter les conditions réelles notamment en cas de problème. Aujourd'hui, le principe reste le même, mais plutôt que d'avoir une copie physique du système, un modèle numérique collecte et combine toutes les données disponibles de chaque étape du cycle de vie et les rend accessibles aux étapes qui suivent. Le jumeau numérique est donc un modèle réaliste représentant un produit physique avec tous ses composants, leurs états actuels ainsi que leur environnement.

Pour Ladj [Ladj et al. 2020], l'ombre numérique est une base de données intégrée qui génère une représentation du système de production en temps réel. Cette base de données est créée en utilisant des algorithmes d'acquisition, d'analyse, d'évaluation et de consolidation des données. Pour Ladj, l'ombre numérique à une fonction clé ; apporter les bonnes informations, au bon moment et au bon endroit ; sans l'ombre numérique, un maillon manquerait entre l'usine numérique et une image holistique de la production ce qui rappelle les idées développées par Schuh [Schuh, 2018].

L'ombre numérique est quant à elle, la représentation suffisamment exacte d'un processus de production ou de développement d'un système, qui a pour objectif de créer une base d'analyse en temps réel pour toutes les données pertinentes.

Parmi les autres secteurs d'activité dans lesquels les concepts de modélisation numérique sont des sujets d'intérêt, on trouve la construction et la planification urbaine. Sepasgozar [Sepasgozar et al. 2021] traite du jumeau numérique et de l'ombre numérique dans ces secteurs. Il explique que ce sont des concepts qui sont plus récents dans ce secteur que dans l'industrie et qu'il y a parfois confusion avec le BIM ou « Building Information Modeling ». Il décrit le jumeau numérique comme étant la représentation d'un objet physique, mais qui doit répondre à quelques conditions ; bien qu'initialement le jumeau numérique soit perçu comme étant simplement capable de faire de la surveillance, du contrôle et de l'inspection d'objet, il doit aussi fonctionner dans des conditions extrêmes et pour des systèmes reculés ; il est donc attendu qu'un jumeau numérique soit aussi capable d'avoir une certaine forme de conscience de lui-même, d'optimisation autonome pour permettre une communication bidirectionnelle. Pour Sepasgozar [Sepasgozar et al. 2021] comme pour Kritzinger [Kritzinger et al. 2018], la différence entre le jumeau numérique et l'ombre numérique est l'automatisation ou non du flux de données provenant du terrain.

Lopez [Lopez et al. 2020] décrit l'ombre numérique comme une représentation numérique d'un système physique connectée avec ce système et qui est capable de le représenter de manière fiable. C'est la base de l'implémentation du jumeau numérique où les données, non seulement, proviennent du système pour aller vers les modèles, mais où les modèles ont un pouvoir de prévision qui leur permet d'agir sur le système, notamment en cas de dérive. L'auteur implique un autre domaine d'application du jumeau numérique : la biochimie.

Stecken [Stecken et al. 2019] écrit qu'un jumeau numérique décrit une image virtuelle d'un système, composant ou site réel ; qui peut être utilisée pour réaliser des simulations. Il peut être utilisé pour de la mise en service ou de l'optimisation. Des simulations différentes requièrent des modèles correspondants. Les différents modèles décrivent différentes vues du monde réel, mais aussi leurs liens ainsi que des métadonnées. Cependant, le jumeau numérique n'a pas de connexions avec le site réel, les changements dans le monde réel ne seront pas transférés automatiquement. Pour Stecken toujours, l'ombre numérique agrandit donc le jumeau numérique en reliant les données provenant du système réel lui apportant des informations à propos des conditions passées et futures.

On peut constater que les idées décrivant les trois concepts que sont la maquette numérique, l'ombre numérique et le jumeau numérique sont définies de la même manière ; la nature de la connexion entre le système physique et l'objet numérique est ce qui fait la différence entre eux, dans tous les cas, il s'agit d'un objet numérique qui représente d'une manière plus ou moins fiable, avec plus ou moins de pouvoir de prédiction en fonction des modèles utilisés.

Bien que ces définitions soient globalement cohérentes les unes avec les autres, il n'y a pas une seule définition qui regroupe tous les éléments et qui fait l'unanimité, comme le précise Uhlenkamp [Uhlenkamp et al. 2019]. Il précise que le jumeau numérique répond aux besoins et aux attentes de ceux qui le mettent en œuvre pour des tâches et des produits spécifiques.

iii. Des différences persistent

Malgré de nombreuses références dans la littérature aux termes de jumeau numérique et des concepts qui lui sont associés comme la maquette numérique et l'ombre numérique, il persiste quand même des différences conceptuelles entre eux.

Il y a très peu de définitions drastiquement différentes, la plus importante est pour Stecken [Stecken et al. 2019]. À propos des différences qu'il y a entre le jumeau numérique et l'ombre numérique, il écrit que contrairement à l'ombre numérique, le jumeau numérique n'a pas de connexion avec le système dont il est jumeau. Cette vision va à l'encontre de ce que la plupart des autres articles décrivent. Pour la grande majorité des chercheurs, le jumeau numérique doit justement avoir une connexion avec le système réel, c'est ce qui en fait un jumeau numérique, il doit évoluer grâce aux données qui proviennent du terrain et il doit pouvoir l'influencer en fonction des modèles qu'il contient.

Au-delà de cet article, la majorité des différences que l'on peut trouver proviennent d'une utilisation différente du jumeau numérique ; ces utilisations sont souvent liées à un secteur d'activité.

De nombreuses publications sont issues du domaine aéronautique, comme celles citées plus haut [Glaessgen et al. 2012, Grieves et al. 2017, Hochhalter et al. 2014 de la NASA, Ríos et al. 2015 d'Airbus ou encore Tuegel et al. 2012 de l'US Air Force]. Dans ce secteur industriel, on trouve plusieurs cas d'usage, certains proposent d'utiliser le jumeau numérique pour gérer une flotte ; comme Glaessgen 2012 ou Grieves 2017. Ils décrivent tous deux les aéronefs comme des systèmes complexes et qui ne sont pas forcément produits en très grand nombre. Dès lors, la capitalisation des données d'un individu comme support à tous les autres est une valeur ajoutée importante. L'autre aspect majoritaire dans l'utilisation d'un jumeau numérique dans le secteur de l'aéronautique, est la possibilité de pousser la gestion de la qualité des systèmes jusqu'aux aspects

microscopiques des pièces qui les composent, par exemple avec leur qualité métallurgique, leur structure cristalline [Hochhalter et al. 2014, Gregorio et al. 2020].

Dans le secteur automobile, les contraintes sont un peu différentes ; les flottes de véhicules sont plus importantes, et la valeur qui est rattachée à chaque individu est moindre. Pour Tharma [Tharma et al. 2019] le bénéfice du jumeau numérique se trouve dans ce cas surtout dans la gestion de configuration qu'il permet ; malgré un modèle identique, de nombreuses options permettent aux clients de personnaliser leur véhicule, cela crée un très grand nombre de variations différentes, Tharma décrit comment l'utilisation d'un jumeau numérique pourrait faciliter la gestion de configuration de produits. Pour Biesinger [Biesinger et al. 2019] et Piromalis [Piromalis et al. 2022], le jumeau numérique permet l'aide à la conception pour les ingénieurs qui conçoivent de nouveaux modèles, grâce à la modélisation (géométrique, mais aussi fonctionnelle) d'éléments d'un futur véhicule, il est possible de s'assurer qu'ils fonctionneront bien tous ensemble, ce qui correspond à une maquette numérique. Une fois le futur véhicule entièrement modélisé on obtient un prototype numérique sur lequel il est possible de simuler de nombreuses situations pour confirmer la conception du véhicule. Piromalis [Piromalis et al. 2022] va plus loin en décrivant comment un jumeau numérique peut assister l'utilisateur (le conducteur) dans son utilisation du système ; pour une voiture, le jumeau numérique pourrait contenir un modèle d'assistance à la conduite.

Dans le secteur ferroviaire, Alstom [Callcut et al. 2021] met en œuvre un jumeau numérique sur leur réseau au Royaume-Uni pour simuler des régimes de maintenance différents sans qu'il y ait de conséquences sur le réseau réel. Il utilise aussi le jumeau numérique pour simuler des situations d'urgence ou des modifications d'horaire pour voir l'impact que cela aurait sur le réseau et sur la maintenance des équipements.

Dans le secteur de la distribution d'énergie, on retrouve aussi des entreprises qui s'intéressent à l'utilisation de jumeau numérique ; General Electric (<https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin>) trouve de nombreux avantages et cas d'usages pour le jumeau numérique, depuis l'aide à la maintenance et à sa planification, grâce à des modèles de suivi des dérives, à de la réduction de gaspillage en optimisant la production et en prévoyant les demandes.

Globalement, il y a relativement peu de différences dans la manière dont le jumeau numérique est décrit dans la littérature. À l'exception d'un article pour qui la connexion avec l'alter ego physique n'est pas un élément clé, les autres différences que l'on trouve sont surtout liées à l'utilisation ainsi qu'au secteur industriel dans lequel le jumeau numérique est imaginé ou mis en œuvre. Pour nous et pour la suite de ce travail, nous utilisons la définition de Grieves [Grieves et al. 2017] et de Glaessgen [Glaessgen et al. 2012].

b. Les méthodes d'implémentation du jumeau numérique

On retrouve dans la littérature quelques publications décrivant des jumeaux qui ont été mis en œuvre, cependant, certains ne sont pas des jumeaux numériques tels que ce concept est décrit dans la littérature, mais surtout, très peu décrivent la méthodologie qui a été utilisée.

Redelinghuys 2019 décrit le jumeau numérique d'un outil de production ; un robot manipulateur pour des pots catalytiques. Ce jumeau numérique a été créé après la mise en œuvre du robot. Redelinghuys [Redelinghuys et al. 2019] décrit une architecture complète de jumeau numérique, en 6 couches allant du système physique (les actionneurs et les capteurs) jusqu'à des modèles distants de simulations et d'analyses. Cependant, dans cette application, l'environnement numérique était déjà très riche, l'IoT déjà largement utilisé. Dans cette application, on retrouve bien un système physique, un (ou plusieurs) modèle numérique du système physique ainsi qu'une communication bidirectionnelle entre les deux. Le système physique remonte des données vers les couches supérieures pour qu'elles soient analysées et dans un même temps, grâce aux analyses menées, les modèles numériques sont capables de piloter le robot. Le jumeau numérique est capable de détecter des pannes sur le robot et de diagnostiquer les problèmes. Bien que le jumeau numérique soit capable de piloter le système physique, dans ce cas d'usage, l'auteur précise que quelques problèmes surviennent ; le pilotage via une application dans un cloud génère une latence qui rend la tâche peu acceptable même aux limites des capacités des ordinateurs.

Xu [Xu et al. 2020] quant à lui, parle d'un cas d'utilisation dans la Navy pour suivre la santé des vaisseaux. Il cite dans son article le principe de parcimonie ; bien que le jumeau numérique peut s'intéresser à l'aspect microstructural d'un système, la complexité supplémentaire engendrée n'est pas forcément souhaitable. Dans le cas, les modèles restent à l'échelle macroscopique des coques des bâtiments dont il s'intéresse. Malheureusement, dans cet article, Xu ne décrit pas la méthodologie employée, il se contente de poser un cadre de déploiement d'un jumeau numérique.

Park [Park et al. 2019] décrit le cas d'une usine en tant que service (Factory as a service ou Faas) dans laquelle les auteurs ont mis en œuvre un jumeau numérique. Dans leur application, le jumeau numérique réplique le système de production lui-même, les objectifs étant d'apporter un suivi de la production, une surveillance des défauts et des pannes ainsi qu'une aide à la décision pour le fonctionnement. Il propose une architecture comportant quatre couches ; deux couches dans l'espace physique et deux couches dans l'espace numérique ; dans l'espace physique, on retrouve l'usine connectée et le réseau d'internet industriel des objets, alors que dans le monde numérique on trouve le progiciel de production ainsi des applications dans un cloud. Les auteurs décrivent le modèle utilisé,

avec les différentes couches et comment elles s'imbriquent, mais là encore, ils ne décrivent pas la méthodologie de mise en œuvre.

Bottani cherche à implémenter un jumeau numérique à un véhicule à guidage automatique (Automated Guided Vehicle ou AGV) [Bottani et al. 2019]. Dans cet article on se rapproche des travaux et des idées déjà décrites [Glaessgen et al. 2012, Grieves et al. 2005, Grieves et al. 2017] avec les questions de gestion de flottes, car comme pour les avions, les véhicules à guidage automatique sont souvent gérés en flotte. Les auteurs décrivent trois éléments nécessaires pour un jumeau numérique ; la communication entre les espaces physique et numérique, une connaissance complète de l'état du système et des capacités de calcul autonome, des modèles de comportement. Dans cette application, les auteurs ont utilisé des prototypes de véhicule à guidage automatique utilisant des robots Zumo de Pololu (<https://www.pololu.com/product/2510>) qui fonctionnent avec un microcontrôleur Arduino (<https://www.arduino.cc>). Comme pour les articles précédents, l'objectif et le cadre de déploiement sont décrits, mais pas la mise en œuvre en tant que telle.

De la même manière, Rabah [Rabah et al. 2018] écrit un article qui montre une preuve de concept d'un jumeau numérique, mais sans proposer de méthodologie pour le mettre en œuvre. Dans cet article il montre le jumeau numérique d'un système de surveillance de roulement à billes pour réaliser de la maintenance prédictive. Dans cet exemple, le jumeau numérique a été adjoint d'un système de réalité augmentée.

En 2020, Noël [Noël et al. 2020] décrit la mise en œuvre d'un jumeau numérique pour une ligne de production complète. Dans cet exemple, des données provenaient de nombreuses sources différentes, ce qui peut complexifier la mise en œuvre d'un tel outil. Il précise dans cet article qu'un jumeau numérique complet ne peut être atteint en une seule étape. L'article justifie les briques d'architectures qui ont été développées. La modélisation et la simulation sont des étapes pour obtenir un jumeau numérique complet. Les modèles sont continuellement mis à jour grâce au retour des éléments du terrain.

De même Pystina [Pystina et al. 2022] écrit dans un article qu'il n'y a pas un jumeau numérique unique pour un système physique. Il peut y en avoir plusieurs en fonction de l'utilisation qui est recherchée. Plus loin dans cet article, elle propose une démarche globale ;

- Définition de l'objectif principal (en utilisant le standard RAMI 4.0),
- définition des métamodèles (liens entre les éléments principaux),
- définition des systèmes en lien qui seront les supports pour l'atteinte de l'objectif (notamment des simulations, des synchronisations, des vérifications),
- connexion au jumeau numérique

Elle inclut dans cette démarche, pour le développement du jumeau numérique :

1. La définition de l'objectif et des indicateurs de performances en lien,
2. l'identification des sources de données (ressources),
3. l'identification des configurations systèmes nécessaires en lien avec les ressources,
4. la modélisation du jumeau numérique (fonctionnellement, architecture et structure logicielle) et analyses et
5. l'évaluation et la vérification.

Au global, peu d'exemples montrent réellement comment un jumeau numérique peut être mis en œuvre dans l'industrie, quelques articles proposent une ébauche de démarche globale [Noël et al. 2020, Pystina et al. 2022], mais comme le précise Brissaud [Brissaud et al. 2022] ; « La publication des manières d'exploiter ces potentiels de manière systématique est rare ».

Dans la presse spécialisée, certaines organisations ont mis en avant la mise en place de jumeau numérique, on retrouve parmi ces exemples le port de Rotterdam [Boyles 2019], qui avec l'aide de IBM a modélisé le port. Le but de la démarche est d'utiliser ces modèles pour prévoir les meilleurs départs des navires en fonction des marées et des besoins pour gagner en efficacité et en temps. La Red Bull Racing team de formule 1 [Breuer 2018] a aussi mis en œuvre un jumeau numérique ; les véhicules de formule 1 sont uniques, ils sont aussi souvent modifiés pour être améliorés en cherchant l'apex des performances. Dans ce travail, il est facile de créer des problèmes en cherchant à en résoudre, dans ce cadre la gestion des modifications et la possibilité de simuler les modifications sont des avantages certains ; c'est ce que la Red Bull racing team a mis en œuvre pour leur véhicule. Grâce à une solution de Siemens, ils sont capables de gérer les différentes configurations, de gérer les modifications et les modèles leur apportent une aide à la conception et à l'amélioration. Dans un autre domaine, BP [BP 2018] a mis en place un jumeau numérique pour une de leurs plateformes pétrolières dans la mer du nord. Leurs objectifs sont d'optimiser la production et de garantir une sécurité plus poussée. La Finlande quant à elle, a modélisé son réseau électrique [Engelhardt 2018] grâce à une solution de Siemens. Ce jumeau numérique a été pensé pour les aider à gérer l'investissement grâce à des modèles d'aide à la décision et leur permet de simuler le futur sur jusqu'à plusieurs décennies.

Dans tous les cas qui viennent d'être cités, bien que les outils et les utilisations aient été décrits, la manière dont ils ont été mis en œuvre ne l'est pas du tout et l'on peut aussi se demander s'il s'agit bien de jumeau numérique ou non ; dans tous ces exemples, on retrouve bien la modélisation numérique d'un système physique, la plupart du temps on retrouve une remontée de données depuis le terrain jusqu'à ces modèles (comme dans le cas du port de Rotterdam ou du réseau finlandais), mais il n'est pas certain que ces modèles puissent piloter leurs homologues physiques. Ils sont le plus souvent au moins une aide à la conception ou à la décision.

c. Les autres briques de l'industrie du futur dans l'industrie

Comme nous avons pu le voir, on retrouve peu d'exemple d'implémentation de jumeau numérique dans littérature, mais d'autres outils s'en rapprochant ont pu être implémenté.

Chavez [Chavez et al. 2020] écrit un article sur la mise en œuvre d'un outil de suivi de l'industrie 4.0 adapté aux PME. Dans ce travail, ils commencent par récolter des données et les analysent par un process numérique ; un modèle de comportement. Dans cet article l'objectif est de montrer comment il est possible de commencer la mise en œuvre des outils de l'industrie 4.0 dans une petite entreprise, les auteurs cherchent donc des solutions simples et peu coûteuses. Ils ont décidé de construire un système de collecte de données basées sur un microordinateur Raspberry pi. Bien que la méthodologie ne soit pas décrite dans le détail, on trouve quand même quelques éléments, et même s'il ne s'agit pas d'un jumeau numérique qui est mis en œuvre, le système déployé dans cet article peut être utilisé comme une première étape vers un jumeau numérique si c'est le souhait de l'entreprise.

En 2019, Cordeiro [Cordeiro et al. 2019] écrit un article qui décrit une méthode pour déployer ce que les auteurs décrivent comme « l'industrie 4.0 » dans un contexte industriel. Ils exposent la figure 6 qui est un logigramme qui comporte six étapes principales :

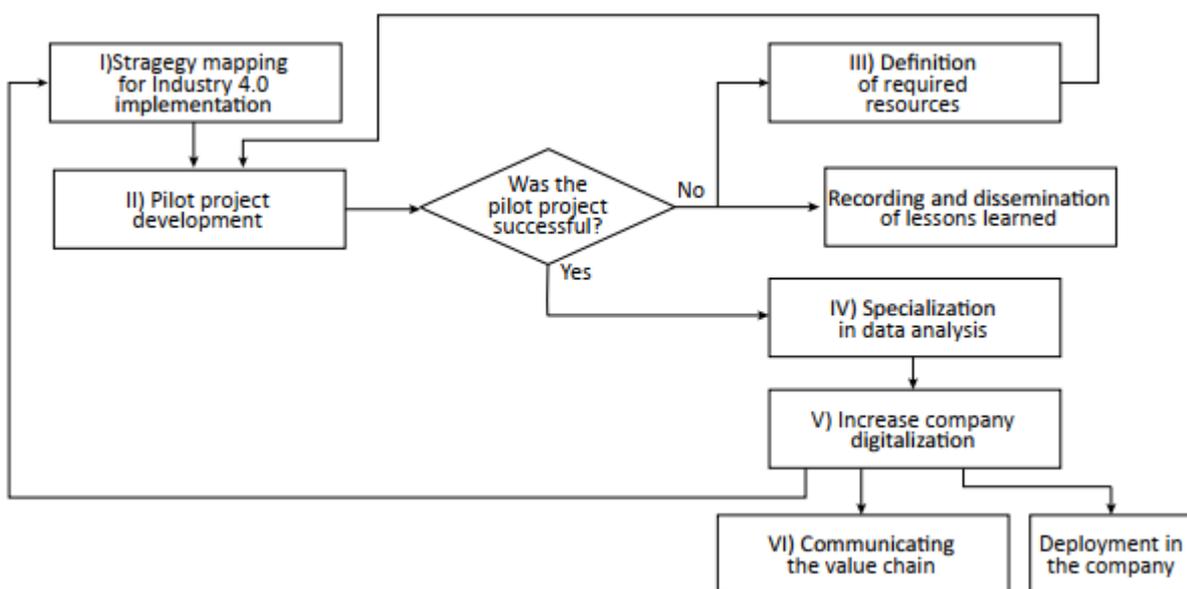


Figure 6 Étapes d'implémentation de l'industrie 4.0 - Cordeiro 2019

Ces étapes sont les suivantes ;

1. Établissement de la cartographie stratégique d'implémentation de l'industrie 4.0
2. Développement d'un projet pilote

3. Si le déploiement n'a pas été un succès ; définition des ressources nécessaires
4. Si le déploiement a réussi ; spécialisation de l'analyse des données
5. Accroissement de la numérisation de l'entreprise
6. Généralisation à la chaîne de valeur globale

Pour paraphraser, au début il est nécessaire de réaliser un état des lieux de l'entreprise, notamment son niveau de maturité afin de définir un objectif concordant. Ensuite l'entreprise peut lancer un pilote dans le système de production. Dans le cas d'un échec, il est primordial d'identifier les ressources qui ont fait défaut lors du pilote (ressources matérielles ou humaines). Lorsque le pilote est un succès, c'est l'occasion pour l'entreprise d'améliorer l'organisation et la manière avec laquelle les données collectées sont analysées, qu'elles soient analysées manuellement par des personnes ou automatiquement par des algorithmes. Après cela il est conseillé de poursuivre la numérisation de processus de l'entreprise. Une fois que la totalité du système de production est numérisée, il est possible de généraliser le projet pilote au reste de la chaîne de valeur de l'entreprise.

Bien que cet article propose une réelle méthode pour déployer l'industrie 4.0, elle demeure limitée dans le cas présent pour deux raisons :

Pour l'instant, cette proposition de méthode est uniquement théorique, il n'y a pas d'exemples de déploiement qui pourrait nous permettre d'avoir un retour sur cette méthode et ainsi savoir s'il y a des améliorations à lui porter.

Dans un article de 2019 [Frank et al. 2019] se basant sur des entreprises qui avaient déjà mis en œuvre des technologies de l'industrie 4.0, les auteurs proposent dans différents secteurs de mise en œuvre des grandes étapes correspondant à un accroissement de la complexité technologique qui peuvent être interprétées comme un cheminement logique pour arriver vers une entreprise complètement l'industrie 4.0. Les quatre grandes familles technologiques sont, dans l'ordre croissant de complexité ; le cloud, l'internet des objets, le Big Data et enfin l'Analytics. Dans ces familles de technologies, la progression pour un produit intelligent est en trois étapes ; un produit intelligent passif (connexion de l'objet et surveillance d'indicateurs), un produit intelligent actif (qui est capable d'optimiser ses propres paramètres en fonction des valeurs des indicateurs surveillés) et enfin un produit intelligent autonome. Bien que cet article propose une certaine méthodologie, ce n'est pas une feuille de route détaillée d'implémentation. Donc encore une fois, c'est une base intéressante, qui doit être adaptée.

Enfin, on trouve Gröger [Gröger et al. 2018] qui parle spécifiquement de la construction d'une plateforme d'Analytics pour l'industrie 4.0. Dans l'article, les auteurs parlent de la conception, de la construction et de la mise en œuvre de cet outil sur

différents sites d'un même groupe industriel. Pour la partie mise en œuvre, ils précisent qu'une approche universelle n'est pas envisageable, surtout compte tenu de la diversité du paysage industriel global, même uniquement dans le groupe où il a été mis en œuvre ; pour chaque client interne, différentes propositions de déploiement ont été proposées.

d. La simulation dans les jumeaux numériques

Le jumeau numérique fait, entre autres, appel à des simulations de process pour répondre aux fonctions qui lui sont demandées. Pour réaliser ces simulations, les deux modèles les plus utilisés sont la simulation continue ou la simulation par événements discrets [Intelligent robotics systems – W. Jacak – 2002]. La différence principale entre ces deux méthodologies est la manière dont les événements s'enchainent. Dans le cas de la simulation continue, le temps s'écoule par unités successives de durée égale et les événements surviennent si à un instant simulé les conditions sont réunies. Dans le cas de la simulation par événements discrets, le temps ne s'écoule que lorsqu'un événement survient, puis passe à l'évènement suivant. Le modèle est représenté à l'aide d'un réseau de files d'attente, de serveurs et d'autres composants qui simulent le comportement du système. Les flux étant le plus souvent des éléments continus, une simulation continue est plus appropriée. Pour simuler des éléments dont les paramètres changent de manière discrète, une simulation à événements discrets est plus adaptée [Özgün et al. – 2009]. Cependant, il est important de regarder au cas par cas quel modèle est le plus adapté [Schriber et al. 2012].

Par exemple, dans le cas du chapitre 2 du livre [Intelligent robotics systems – W. Jacak – 2002] l'objectif est le contrôle autonome d'une cellule robotique. Ces cellules nécessitent des modèles à événements discrets ; les changements discrets d'état du système sont importants, mais d'autres éléments tendent plutôt vers des modèles continus. Dans cet article, l'objectif est d'utiliser le simulateur comme un planificateur de processus en simulant différents ordres dans lesquels effectuer les opérations de la cellule robotisée. Pour réaliser cette tâche, les auteurs ont décidé d'utiliser une approche mixte, une partie du simulateur est basée sur un modèle de simulation continue et une autre sur un modèle à événements discrets. La première partie du simulateur gère les trajectoires et les mouvements du robot de la cellule ; pour vérifier qu'il n'y a pas de collisions, ils utilisent un modèle continu. Dans un second temps, pour les étapes des processus, ils utilisent un modèle à événements discrets, car il s'agit d'opérations discrètes. Une approche combinée était donc, pour eux, la meilleure solution, car elle associait une analyse systématique (continue) pour les mouvements du robot de la cellule et une analyse discrète lors de l'analyse des étapes successives.

Il est aussi possible de combiner les deux approches. C'est la simulation hybride. Cette méthode est de plus en plus utilisée, car elle a l'avantage de posséder des

comportements dynamiques de simulations continues et à évènements discrets en même temps et permet, par conséquent d'être plus précise que ces deux méthodes seules.

Barros Brito [Barros Brito et al. 2011] propose lui-aussi de favoriser une approche hybride pour les simulations. Il explique que traditionnellement, les simulations à évènements discrets représentent plutôt une vision du flux d'entités, de comment ces entités interagissent ensemble, alors que la simulation continue a plutôt pour fonction d'améliorer la compréhension d'un système complexe, en récoltant et en restituant des données du système. Ces données peuvent être sous la forme de diagrammes causaux, des boucles de rétroactions. En poussant la comparaison entre les deux modèles [Barros Brito et al. 2011] propose trois modèles de comparaison qui sont représentés en figure 7 :

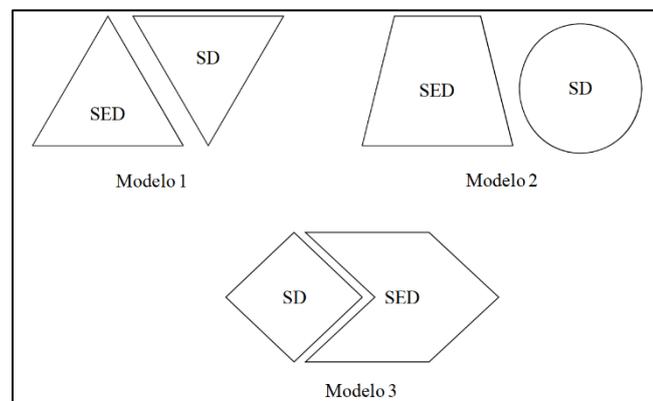


Figure 7 Représentation des trois modèles de comparaison entre la simulation continue (SD pour System Dynamics) et la simulation par évènements discrets (SED)

Le premier modèle s'appuie sur le principe que les deux méthodologies ont des hypothèses, des méthodes, des objectifs ainsi que des représentations du monde différentes.

Le deuxième modèle s'attache à montrer les similitudes entre les deux méthodologies. La proposition ici est que les différences d'approches sont secondaires et qu'au final il s'agit juste d'une approche différente à un objectif identique ; la modélisation d'un système.

Enfin le troisième modèle a pour objectif de relativiser les deux modèles précédents pour mettre en avant la possibilité pour un utilisateur d'intégrer les deux simultanément. Barros Brito précise qu'en effet, les deux approches (La simulation continue et la simulation par évènements discrets) ont des caractéristiques uniques, elles ont chacune des concepts qui leur sont propres et elles sont très efficaces dans des cas spécifiques, ces deux méthodologies sont complémentaires. Par conséquent, Barros Brito propose d'intégrer ces deux méthodes pour bénéficier de leurs avantages respectifs.

e. Les plans d'expérience pour construire des références comportementales

Pour développer certains modèles de comportement, il est possible de le faire de manière expérimentale, pour ce faire une des méthodes les plus répandues est de faire appel aux plans d'expérience. Les plans d'expérience sont des approches statistiques à la compréhension et à l'optimisation d'un processus en contrôlant les paramètres d'entrées et en mesurant les variables de sorties [Anderson et al. 2000]. Ce sont des méthodologies avec lesquelles il est possible de déterminer une ou plusieurs caractéristiques d'un système, c'est une manière d'organiser les expériences à mener pour déterminer l'impact des facteurs sur les paramètres [Park 2007].

Il existe de nombreuses manières de construire un plan d'expérience, parmi les plus connus on retrouve la méthode Taguchi. La méthode Taguchi développée par Genichi TAGUCHI dans les années 50 est particulièrement adaptée pour des problèmes avec de petites tailles d'échantillons avec de nombreux paramètres [Woodall et al. 2013]. L'un des principes centraux de cette méthode est l'identification des sources de « bruit » statistique est la réduction de leurs effets pour optimiser la variable de sortie du système.

En 2004, Ghani [Ghani et al. 2004] décrit comment il utilise la méthode Taguchi pour optimiser les paramètres de coupe pour l'usinage d'un acier H13. Son objectif est de minimiser la force de coupe et la rugosité de la pièce. Dans cette expérimentation, Ghani compare l'application de la méthode Taguchi à l'application de l'analyse de la variance et la loi de Pareto. Suite aux mesures et aux analyses, Ghani conclut que la méthode Taguchi est capable de traiter un problème tel que celui de l'optimisation des paramètres de coupe pour l'usinage de l'acier H13. Il conclut aussi que les deux méthodologies donnent des résultats similaires.

En 1992 Tsui [Tsui et al. 1992] met en œuvre la méthode Taguchi pour déterminer les paramètres de conception idéaux pour un produit. Grâce à cette méthode, les informations disponibles permettent d'améliorer la robustesse de la conception. Plus loin dans cet article, Tsui décrit et inclut d'autres méthodes statistiques qu'il utilise en complément de la méthode Taguchi, il parle notamment des modèles à surface de réponse.

En revanche, la méthode Taguchi ainsi que les autres méthodes de plan d'expérience ne sont pas forcément adaptées à toutes les situations ; par exemple, dans certains cas où le lien entre les paramètres d'entrée et les variables de sortie sont bien compris, ou quand le nombre de variables est limité, une méthodologie « d'une variable à la fois » peut suffire. De même, pour certains systèmes complexes et non linéaires, une approche plus avancée peut être nécessaire, telle que les modèles à surface de réponse [Tsui et al. 2013] ou les réseaux de neurones artificiels.

De même, Parks [Parks et al. 2001] cherche à « démystifier » la méthode Taguchi. Dans son article, il relève des critiques qu'il porte à cette méthode. Une des critiques clés est la supposition que tous les facteurs de bruit peuvent être contrôlés et minimisés. En réalité, de nombreux facteurs de bruit peuvent être hors de contrôle de l'ingénieur et par conséquent il est impossible d'éliminer complètement leurs effets. Cela peut rendre difficile le processus d'optimisation en utilisant la méthode Taguchi. Une autre critique de Parks sur la méthode Taguchi est qu'elle se concentre sur l'optimisation d'une variable de sortie unique, en négligeant la complexité des problèmes affairant au monde réel, où le plus souvent, plusieurs variables de sorties sont importantes.

Au travers de ces différents exemples, nous avons pu voir qu'une des manières de produire des modèles de comportement est d'utiliser des données expérimentales et de créer un modèle à partir d'elles. Pour ce faire, les plans d'expérience sont des outils qui nous permettent d'atteindre cet objectif, de même, la méthode Taguchi est un outil puissant qui permet de modéliser et de décrire le comportement d'un système et donc d'obtenir un modèle de comportement. En revanche, ces outils ont leurs limites et leurs inconvénients. Ces méthodes ont des cas d'applications spécifiques où chacune est la plus adaptée et pour certains systèmes complexes, le plus optimisé est de combiner plusieurs outils de plans d'expériences. Pour certains systèmes plus simples, les différentes méthodologies sont considérées comme trop complexes au regard de ce qui est recherché et faire varier une seule variable à la fois peut apporter les réponses recherchées. Dans chaque cas il faut donc déterminer la méthode la plus adaptée en fonction de la complexité du système et des éléments recherchés.

f. L'internet des objets et l'électronique pour la communication

L'un des principes de base du jumeau numérique est la connexion entre un objet numérique et un système physique ; établir un échange entre ces deux entités. Pour ce faire de nombreuses solutions existent et il est possible d'utiliser des outils d'un secteur en pleine expansion, l'IoT ou l'internet des objets (en anglais : « Internet of Things »). Ce travail de thèse est concentré sur des entreprises qui n'ont pas ces compétences, elles vont donc devoir réaliser des prototypes pour démontrer le fonctionnement des principes proposés avant leur industrialisation. Là aussi, en électronique de nombreux outils existent pour atteindre cet objectif. L'Arduino et le Raspberry pi sont deux exemples de produits grand public. Le LoRaWAN est quant à lui un exemple industriel de matériel pour intégrer de l'IoT à des systèmes.

L'Arduino est une plateforme open source de développement électronique [www.arduino.cc]. Arduino propose plusieurs cartes électroniques qui permettent facilement de lire des données d'entrées et de piloter des sorties logicielles. Arduino

profite d'une architecture et d'une programmation très simple. Les cartes électroniques Arduino sont largement utilisées aujourd'hui pour le prototypage ; pour le simple hobby, pour l'éducation [Sobota et al. 2013] mais aussi pour l'industrie [Bottani et al. 2019] ;

Sobota [Sobota et al. 2013] utilise un microcontrôleur Arduino dans un système développé pour l'éducation afin de simuler une expérimentation et générer des réponses physiques à des expérimentations pour les étudiants. L'Arduino a pour fonction dans ce système d'agir comme une interface entre le monde physique de l'expérimentation et la partie simulation du système. Les cartes Arduino peuvent profiter de leur connexion USB pour échanger avec d'autres composants qui pourront réaliser les tâches autres, notamment de simulations pures. De l'autre côté, les cartes Arduino possèdent des broches GPIO (en anglais ; General Purpose Input/Output) pour Entrée/sortie à usage général qui sont capables de recevoir des informations de capteurs et d'agir directement sur des actionneurs extérieurs. Dans cette application, Sobota n'utilise pas les microcontrôleurs Arduino comme prototype, mais bien comme composant du système définitif.

Bottani [Bottani et al. 2019] en revanche, utilise un système basé sur des microcontrôleurs Arduino comme une preuve de concept pour un système tout autre, il s'en sert comme une illustration pour montrer le fonctionnement d'un jumeau numérique d'un système d'AGV (en anglais : Automated Guided Vehicule) ou véhicule à guidage automatique. Les AGV étant des systèmes de transport intralogistique. Dans ce travail, Bottani utilise des robots mobiles basés sur des microcontrôleurs Arduino (Le robot nommé ZUMO du fabricant Pololu [www.pololu.com]) pour représenter les AGV. Dans ce cas donc, les systèmes basés sur l'Arduino ne sont pas l'élément testé, ils n'ont pas pour vocation à être industrialisés, cependant, ils restent de bons outils de prototypage comme Bottani l'explique ; « The choice of Zumo was motivated by the wide programming library, usable to control the rover, and most importantly, by the opportunity to implement the control tools developed for Arduino UNO microrontrroller, assembled on the rover ».

Le deuxième outil est le Raspberry pi ; il s'agit d'une gamme de microordinateurs qui permet de réaliser toutes sortes de projets utilisant de l'infrastructure réseau, de la collecte de données sur le terrain, de l'affichage local de données ou de l'internet des objets, et ce à un prix plus faible que celui d'un ordinateur classique [www.raspberrypi.com]. Les ordinateurs Raspberry Pi sont eux aussi utilisés dans les sphères du hobby l'exemple le plus connu étant la réalisation de bornes d'arcades chez soi [Sahni et al. 2015], mais aussi pour l'éducation [Sobota et al. 2013] ainsi que l'industrie [Chavez et al. 2020] ;

Comme décrit plus haut, Sobota [Sobota et al. 2013] construit un système pour représenter des expérimentations et leur apporter des réponses physiques pour l'apprentissage. Dans cette optique une carte Arduino est utilisée comme interface avec le monde physique, mais c'est un ordinateur Raspberry Pi qui contrôle la carte Arduino. Grâce aux fonctionnalités d'ordinateur que le Raspberry Pi possède, il est capable d'exécuter des programmes sur un système d'exploitation. Il est ensuite possible de connecter des esclaves grâce à une connexion USB pour les contrôler.

Dans un article de 2020, Chavez [Chavez et al. 2020] explore les possibilités de développer des outils numériques dans une PME. Pour ce faire il propose un système de surveillance numérique, capable de mettre à jour les commandes, calculer les indicateurs clés de performances numériques ainsi que de récolter des données de production pour qu'elles puissent être analysées. Il réalise un prototype qui est connecté à une IHM (Interface Homme Machine) ainsi qu'à un automate programmable industriel qui représente l'automate d'une machine réelle. Le prototype est notamment composé d'un ordinateur Raspberry Pi qui fait fonction de serveur qui porte une SCADA (en français ; Système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel) ainsi que l'analyse des données. L'ordinateur Raspberry Pi est aussi équipé d'un port Ethernet afin de pouvoir communiquer vers d'autres systèmes.

Grâce à ces exemples, on peut voir que les systèmes Arduino et Raspberry Pi sont des outils largement utilisés pour le prototypage. En revanche, ils ne sont pas analogues ; le microcontrôleur Arduino opère à un niveau plus bas que l'ordinateur Raspberry Pi, le premier va plus facilement être interfacé avec des actionneurs et des capteurs, mais il va manquer en revanche de puissance de calcul pour réaliser des analyses ou exécuter des programmes divers et variés. C'est là que l'ordinateur Raspberry Pi a toute sa place ; il peut facilement être interfacé avec des cartes Arduino pour pallier sa capacité à piloter lui-même des actionneurs, en revanche, fonctionnant grâce à un système d'exploitation et possédant des capacités de calcul comparables à un ordinateur classique (jusqu'à 8 Go de RAM par exemple) il est capable d'exécuter de nombreux programmes d'analyses de données. Il s'agit donc de deux systèmes complémentaires dont l'utilisation doit être faite au cas par cas.

Plus spécifiquement que le prototypage, la communication pour l'IoT peut être couverte par ces solutions, mais il existe aussi des solutions industrielles pour répondre à ces besoins en série et de manière plus robuste, l'une de ces technologies est le LoRaWAN :

Dans un article de 2017, Rizzi [Rizzi et al. 2017] décrit l'utilisation de la technologie LoRa dans un cadre industriel. LoRaWAN fait référence à un protocole communication

développé à Grenoble par la société Cycléo en 2009. La proposition de LoRaWAN est de fournir un protocole de communication basse énergie pour de petits paquets de données. Rizzi explique dans son article que cette technologie est largement capable de remplir ce type de rôle.

g. Conclusion

i. Méthodologie

Le sujet de ce travail de recherche étant la méthodologie avec laquelle un jumeau numérique peut être implémenté, la recherche de la définition et de l'historique du concept ; les mots clés de recherche ont donc naturellement été « digital twin » et « origin ». Dès les premiers résultats, il était clair que le Dr. Grieves était une figure centrale du concept. Dès lors, la recherche bibliographique s'est tournée vers les articles qui le citaient.

En poursuivant la lecture des articles trouvés avec ces mots clés, d'autres concepts revenaient souvent ; principalement « digital mock-up » et « digital shadow » (ou respectivement maquette numérique et ombre numérique) ainsi que l'historique des jumeaux non numérique que la NASA a utilisé notamment pour la mission Apollo 13. La question suivante était donc de définir quelles étaient les différences entre ces trois concepts ; les mots clés ont donc intégré « digital mock-up » et « digital shadow » quand ils étaient en lien avec « digital twin ».

La deuxième partie du sujet concernant la méthode d'implémentation, les recherches ont inclus « implementation », « methodology », « method » et « process ». Afin de trouver des exemples industriels, une partie des recherches a aussi été menée via un moteur de recherche classique pour cette section.

Étant donné le nombre relativement faible de références trouvées pour la méthodologie, il a fallu élargir les recherches à d'autres éléments ou outils de l'industrie du futur ou industrie 4.0. Par conséquent les termes « industry 4.0 » ont aussi été recherchés avec le mot « implementation » ainsi que « tools » (ou outil).

Dans la réalisation du jumeau numérique lors de cette étude, plusieurs sujets connexes sont apparus. Par conséquent une partie de l'état de l'art a été consacrée à ces sujets. Pour l'implémentation d'une simulation, les termes « simulation », « continuous simulation » ainsi que « discret event simulation » ont été recherchés. Pour la modélisation de comportement, les termes « design of experiment » et « Taguchi method » ont été le sujet de recherches. Enfin, pour la mise en œuvre de circuits électroniques pour du prototypage, les termes « electronic circuits », « electronic prototyping », « arduino » ainsi que « raspberry pi » ont été recherchés.

C'est avec ces termes que cet état de l'art a été construit

ii. Ce que l'on retire de l'état de l'art

Nous retenons de cet état de l'art :

Que toutes les définitions du jumeau numérique qui sont présentées mentionnent au minimum trois éléments constitutifs [Grieves et al. 2005, Glaessgen et al. 2012, Tao et al. 2017, Liu et al. 2018] nécessaires, mais pas forcément suffisants ;

- Un espace physique,
- un espace numérique,
- une connexion entre les deux.

Il ressort aussi qu'un jumeau numérique a pour objectif d'avoir accès aux données d'un système (potentiellement aussi à celles d'autres individus d'une même flotte) afin d'apporter un ou plusieurs services. Les services associés sont eux variés ; ils dépendent principalement de la typologie d'industrie dans laquelle le jumeau numérique évolue. Dans certaines industries, des modèles de maintenances prédictives peuvent utiliser les signaux faibles identifiés ou les données globalisées de la flotte dans son ensemble pour annoncer une défaillance et la traiter avant que les conséquences ne soient trop graves [Grieves et al. 2017, Glaessgen et al. 2012]. Dans certaines situations, les données permettent de nourrir une simulation qui permettra de prévoir au mieux la séquence de tâches la plus efficiente [Boyles 2019, Engelhardt 2018].

Un autre paramètre du jumeau numérique est la précision attendue sur les données. Dans certains cas, il est souhaitable d'avoir une précision microscopique pour garantir les caractéristiques mécaniques des pièces [Hochhalter et al. 2014, Gregorio et al. 2020, Reifsneider et al. 2013], cet aspect est aussi souvent lié au secteur industriel. Certains modèles diffèrent par l'étape de vie du système pendant laquelle le jumeau numérique est utilisé ; dans les phases de début de vie du système, avant l'utilisation normale, des modèles d'aide à la conception peuvent être utilisés. Plus tard, lorsque le système est dans sa phase d'utilisation normale, des modèles de maintenance prédictive ou d'aide à la gestion sont plus utiles.

La majorité de la littérature s'accorde aussi sur ce qui différencie un jumeau numérique d'une maquette numérique et d'une ombre numérique ; si l'échange de données entre le système physique et son alter ego est uniquement manuel alors on a une maquette numérique, si uniquement la remontée du terrain vers le monde numérique est automatisée alors c'est une ombre numérique, enfin, il faut que des échanges dans les deux directions soient automatisés pour qu'il s'agisse d'un jumeau numérique [Kritzinger et al. 2018]. En revanche, dans tous les cas, les données remontées doivent pouvoir être utilisées pour corriger les modèles de l'objet numérique.

Pour ce qui est de la méthodologie, on ne retrouve que peu d'articles décrivant la mise en œuvre d'un tel outil dans le monde industriel, et dans ces exemples, encore très peu décrivent une vraie méthodologie d'implémentation. Grâce à l'élargissement de la recherche, vers d'autres implémentations, on retrouve certaines pistes, certaines idées, mais pas de démarche globale. Certains proposent d'axer le déploiement vers un enchaînement séquentiel [Cordeiro et al. 2019] par itération, d'autres se trouvent plutôt vers une implémentation d'échelle, du spécifique vers le général [Chavez et al. 2020] enfin, le troisième axe est une implémentation dans le sens de la complexité, commencer par l'élément le plus simple pour gagner en complexité au fur et à mesure [Frank et al. 2019].

Le secteur industriel dans lequel le jumeau numérique va être mis en œuvre semble être le critère déterminant ; il est important de relever les aspects notables du terrain où ce travail de recherche est mené.

iii. L'analyse du terrain

Comme évoqué au chapitre 2, Hellomoov' est un groupe d'environ 250 personnes. Elle traite principalement le domaine mécanique donc sans compétences particulières relevant du jumeau numérique (Électronique, informatique...). L'entreprise a en revanche lancé un projet de configurateur intelligent pour concevoir plus rapidement ses solutions de convoyage et de transitique et souhaite mettre en œuvre le concept de la continuité numérique, même si pour l'instant il n'y a pas ou peu d'automatisation des processus numériques (transfert des conceptions vers l'atelier ou transmission des données vers l'ERP). De plus, une entreprise extérieure a été missionnée pour réaliser la simulation d'une solution de système de transfert, mais ce n'est qu'un cas unique, le succès a été très mitigé, car la simulation fournie est entièrement fermée, ce qui a été réalisé n'est pas réutilisable par ailleurs.

Dès lors, les problématiques qui se posent sont les suivantes :

1. Quelle est la valeur ajoutée pour Hellomoov' de se doter d'un outil comme le jumeau numérique pour leurs systèmes de transfert ?
2. Comment peut-on adapter et appliquer ce concept à une entreprise du type d'Hellomoov' ?
3. Quelle méthodologie est adaptée à la mise en œuvre de ce concept dans leur environnement ?

Nous déclinons la question de recherche qui en découle :

Quelle méthode pour implémenter et déployer efficacement un jumeau numérique dans une PME ?

Cela entraîne les sous-questions suivantes :

Quel jumeau numérique pour une PME ?

Quel jumeau numérique pour une PME spécialisée dans un secteur autre que l'industrie du futur ?

L'état de l'art ci-dessus nous permet d'obtenir quelques éléments concernant ces sujets : D'après le socle commun décrit par Grieves [Grieves et. al 2005] qui a été repris par de nombreux autres chercheurs ([Glaessgen et al 2012], [Vickers et. al 2017], [Tao et. al 2017]) les trois composantes d'un jumeau numérique sont nécessaires et ils devront donc être implémentés, que ce soit dans un grand groupe ou une PME.

En revanche, comme le décrit Chavez [Chavez et. al 2020] le contexte d'une PME et notamment d'une PME qui est spécialisée dans un domaine éloigné de l'industrie du futur est notablement différent. Dans ce contexte, la méthodologie et les éléments qui devront être implémentés profiteront de plusieurs critères :

- Plus la méthodologie et les éléments à implémenter seront simples, plus les chances de succès de la méthodologie seront grandes,
- moins les éléments seront coûteux plus les risques associés à leur mise en œuvre seront faibles,

On peut aussi voir comme le montre Chavez [Chavez et. al 2020] ainsi que Bottani [Bottani et. al 2019] les outils open source et les logiciels associés aux microcontrôleurs Arduino ainsi qu'aux microordinateurs Raspberry PI sont de plus en plus utilisés dans le contexte industriel et notamment dans les PME, pour une question de coût dans un premier temps, mais aussi pour l'indépendance que l'utilisation de tels outils semble garantir.

Compte tenu des éléments mentionnés il a fallu faire quelques hypothèses de recherche pour cadrer ce travail et définir les limites de l'application des résultats qui seront trouvés :

Dans le cadre de ce travail, Hellomoov' a souhaité concentrer les travaux sur un produit en particulier, pour ne pas s'éparpiller, pour démontrer le concept dans un premier temps avant de chercher à la généraliser. Ils ont choisi leur produit phare, celui qui représente la plus grande valeur ajoutée par la société. **L'étude sur l'implémentation d'un jumeau numérique sera faite sur les systèmes de transfert.**

Les conditions de développement et d'implémentation sont directement conditionnées par la somme des compétences au sein de l'entreprise dans laquelle l'étude est menée. **L'entreprise compte moins de 250 salariés dont la spécialité est la mécanique et pas du tout l'informatique ou la programmation.**

Dans la littérature, il y a plusieurs manières d'appréhender un jumeau numérique, notamment concernant son utilisation durant la vie du produit. Cette différence va entraîner des variations quant à son déploiement et la manière dont l'implémentation

sera conduite. **Dans le cas présent, l'objectif est de déployer un jumeau numérique de produit, qui va le suivre durant la totalité de sa vie pour maximiser son utilité.** C'est un jumeau numérique qui combine des caractéristiques des jumeaux numériques de voitures et de ligne de production présentés dans l'exemple ; il combine des fonctions pour un produit, comme l'aide à la conception pour une voiture, mais aussi l'étude des dérives pour détecter des défauts comme pour une ligne de production.

Dans les chapitres qui suivent, nous allons donc proposer une méthodologie de mise en œuvre et de déploiement de jumeaux numériques puis une illustration de cette méthodologie dans l'entreprise Hellomoov'.

III. La proposition de méthodologie d'implémentation

a. Les notions

Les chapitres précédents ont introduit la notion de jumeau numérique, mais pour définir une méthodologie d'implémentation d'autres concepts doivent être introduits. Le jumeau numérique vise à disposer d'une représentation virtuelle du système réel, représentation qui évolue avec le système, pour permettre des prises de décision sur le monde physique via le suivi dans le monde virtualisé. Compte tenu de la complexité sous-jacente, la décomposition en module vise à traiter cette complexité en bornant des étapes de construction.

i. Module

Nous proposons un déploiement modulaire. Un module est un sous-composant d'un jumeau numérique ; c'est un élément numérique qui répond à une ou plusieurs fonctions en utilisant des données de configuration ou provenant du terrain ainsi qu'un ou plusieurs modèles de comportement du système. Dans le cadre du jumeau numérique, il faut considérer qu'un module répond à plusieurs contraintes ;

- Il participe à une ou plusieurs fonctions,
- il contient un ou plusieurs modèles de comportement du système,
- il utilise des données de configuration et/ou des données provenant du terrain,
- il est intégré et suffisamment ouvert pour échanger des données vers d'autres objets numériques (tel que d'autres modules, ou des bases de données), pour être une partie intégrante du jumeau numérique complet,
- pour permettre une implémentation plus flexible, il peut fonctionner de manière autonome, ou être couplé à d'autres modules.

ii. Modèle

Dans la description d'un module, le terme de modèle est utilisé. Un modèle est un ensemble d'informations qu'un programme ou un algorithme utilise pour simuler le comportement d'un système. Les comportements en question sont nombreux, ils peuvent représenter les déformations mécaniques du système, la manière dont les flux sont organisés ou encore la manière dont les pièces sont positionnées les unes par rapport aux autres, etc.

iii. Acteurs humains

Le jumeau numérique évolue dans un environnement multi-acteurs qui partage des rôles spécifiques. Certains ont trait au système auquel le jumeau numérique va se rattacher et d'autres au jumeau numérique lui-même.

Le système physique va avoir un concepteur et un utilisateur. Son jumeau numérique nécessite deux rôles à minima ; le concepteur du jumeau numérique et son utilisateur. Les cas de figure les plus communs sont les suivants ;

- Dans le cas où le jumeau numérique est un service supplémentaire vendu avec le système, le concepteur du système et le concepteur du jumeau numérique sont de la même entreprise alors que l'utilisateur du système et l'utilisateur du jumeau numérique seront d'une organisation différente.
- l'acteur qui a acheté et qui utilise le système décide de lui ajouter un jumeau numérique ; dans ce cas, le concepteur du système est un acteur et une autre organisation porte les rôles d'utilisateurs du système ainsi que ceux de concepteur et utilisateur du jumeau numérique.
- le jumeau numérique sert au concepteur du système pour l'améliorer ; dans ce cas, les rôles de concepteur du système et du jumeau numérique ainsi que l'utilisateur du jumeau numérique sont portés par une entreprise alors que l'utilisateur du jumeau numérique représente une autre organisation.

b. Proposition d'architecture

Tel que le décrit Dr. Grieves [Grieves et al. 2005], initialement nommé (Ideal for Product Life Management), le jumeau numérique peut être vu comme une base de données intelligente, qui contient des modèles permettant d'aider l'utilisateur à prendre des décisions ou plus directement piloter le système qu'il émule. Le jumeau numérique est spécifique à chaque instance physique. Le corollaire à l'aide à la décision est qu'il y a deux aspects primordiaux au jumeau numérique, que l'on peut placer sur deux axes :

- L'accès à des données provenant du terrain
- La précision des modèles dans chaque module

Connectivité	Pas de connexion avec le système réel	Données de terrain disponible
Précision		
Les modèles ne sont pas suffisamment précis pour réaliser des analyses fiables	NA / Ce n'est pas un jumeau numérique	Supervision
Les modèles permettent de réaliser des analyses et des projections	Jumeau numérique ou physique style Apollo 13	Jumeau numérique complet

Tableau 1 Matrice précision connectivité

La table 1 est la matrice mettant en relation la précision et la connectivité de l'objet de modélisation numérique d'un système. Si les modèles ne permettent pas de réaliser des analyses et que l'objet numérique n'a pas accès à des données de terrain alors ce n'est pas un objet de modélisation numérique. Si en revanche l'objet numérique a accès à des données du terrain, mais que les modèles ne sont toujours pas suffisamment précis alors l'objet se rapproche d'une supervision. Si à l'inverse les modèles sont suffisamment précis pour réaliser des analyses fiables, mais qu'il n'y a pas de connexion avec le système réel alors l'objet numérique se rapproche plus d'une maquette numérique, d'un modèle de jumeau physique tel qu'utilisé par la NASA pour la mission Apollo 13 [Goodman et al. 2009]. Seulement si l'objet numérique a une connexion avec le système réel et que les modèles qu'il contient sont suffisamment précis il s'agit d'un jumeau numérique complet. De cette matrice découlent trois composants du jumeau numérique :

- **Les données de terrain** : elles supervisent l'état du système, la manière dont il évolue dans l'environnement dans lequel il se trouve (vitesse, températures des composants, température de l'environnement, consommation électrique, vibration...). Ce sont les données traitées par les modèles pour les prévisions et les projections de situations futures,
- **les données de configuration** : elles montrent la structure, l'architecture du système, la version du programme, toutes les informations qui permettent d'identifier le système. Ces données permettront de construire les modèles de comportement, si elles ne sont pas assez précises et fiables les modèles ne le seront pas non plus,
- **les modèles de comportement** : dérivés des données de configuration, ils mettent en équations les comportements du système pour pouvoir analyser les données issues du terrain et prévoir des scénarios futurs.

Le jumeau numérique offre de nombreuses possibilités, de nombreuses fonctions au service de l'utilisateur et du système auquel il est rattaché. Cela se traduit par une série de modules qui répondent chacun à une fonction durant la vie du système physique et auxquels chaque utilisateur accède via une interface. L'amplitude de l'utilisation de chaque module peut grandement varier et les interfaces peuvent être multiples et simultanées en fonction du module et de l'utilisateur.

Dans le cas du système de transfert de Hellomoov' le jumeau numérique consisterait en une série de modules. Chacun des modules possède ses propres typologies de données de configuration (chaque module n'a pas besoin des mêmes données pour pouvoir répondre aux besoins) et ses propres modèles qui représentent les différents comportements du système réel.

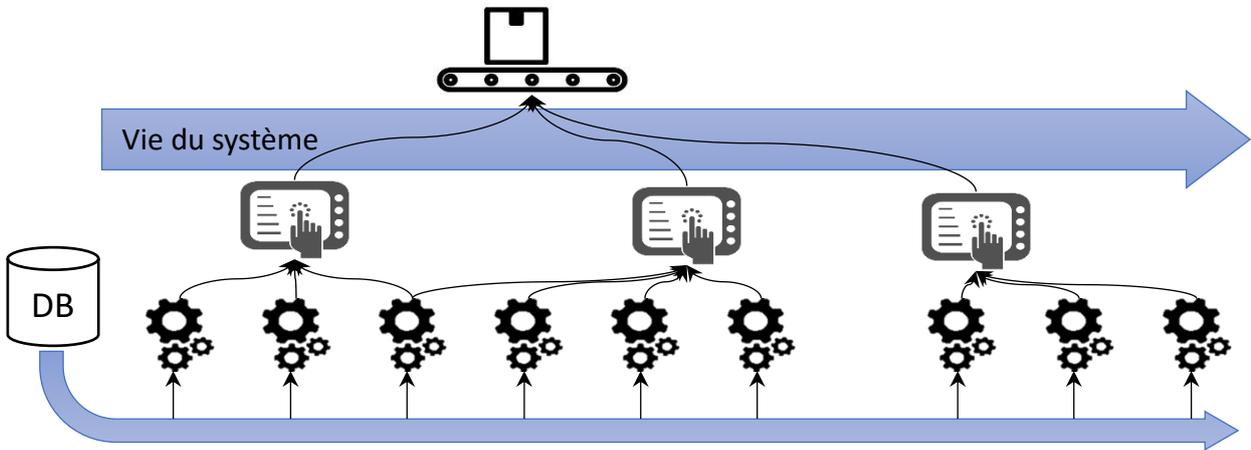


Figure 8 Représentation du cycle de vie du jumeau numérique

Dans la figure 8 on peut voir la représentation du système réel en haut, avec l'évolution de sa vie de gauche à droite. En dessous, plusieurs interfaces sont disponibles auxquelles sont reliés plusieurs modules chacune. Certains modules ne sont accessibles que via une seule interface, mais d'autres sont accessibles via plusieurs. De plus les modules ont accès à une base de données qui regroupe les informations de configuration de la ligne et ils contiennent les modèles développés au préalable, ce sont grâce à ces éléments qu'ils peuvent fournir leurs analyses.

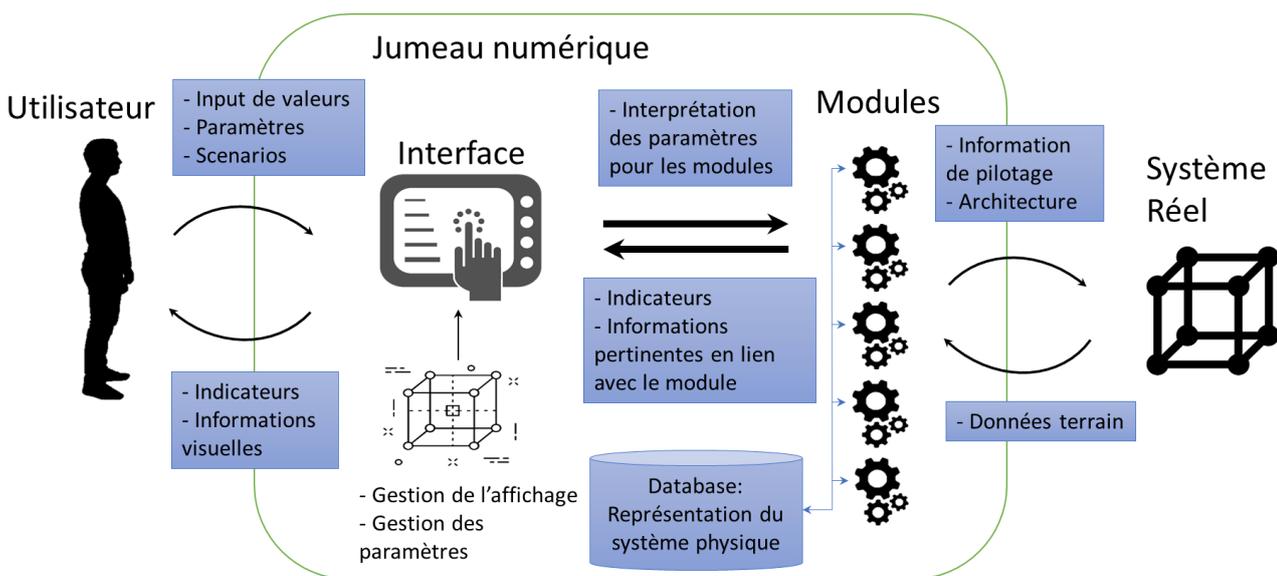


Figure 9 Synoptique du jumeau numérique

La figure 9 montre le synoptique du jumeau numérique. L'utilisation des modules est transparente, il n'a pas besoin d'aller chercher chacun des modules individuellement, mais grâce une interface, l'utilisateur pourra accéder aux fonctions qu'il souhaite et ainsi faire travailler les modules en arrière-plan

L'utilisateur (à gauche fig.9) va utiliser une interface appropriée pour envoyer des paramètres ou des valeurs au module qui propose de répondre à son besoin. L'interface peut avoir une première couche d'interprétation en fonction du module, puis le module traite les données grâce aux modèles et aux données de configuration pour renvoyer les informations demandées à l'utilisateur via l'interface qui va gérer leur affichage (via des métaphores graphiques ou directement sous forme de données chiffrées ou textuelles). Dans un même temps, les éléments provenant de l'utilisateur peuvent avoir pour vocation de piloter le système physique (à droite fig.9) via le jumeau numérique, dans ce cas, les données qui proviennent des modules vont aussi transmettre des ordres directement au jumeau physique. À l'inverse, le jumeau physique renvoie aussi des données du terrain, ces données sont traitées par le module prévu pour, et en fonction de la nature des résultats de chaque module, renvoyer soit une commande vers le jumeau physique soit une alerte ou un message à l'utilisateur.

Un tel outil génère une masse de données importante ; en fonction de l'utilisation du jumeau numérique, les modèles vont générer des prévisions ou des analyses qui une fois cumulées vont aussi représenter un volume important. De plus, si le jumeau numérique utilise de nombreuses sources de données provenant du terrain, là encore, une fois cumulées ces données vont être encore plus importantes. Pour une entreprise ajoutant un jumeau numérique aux produits qu'elle vend, ce volume peut rapidement devenir un point d'attention pour le stockage de ces données. Il existe plusieurs solutions :

- en ayant des serveurs dédiés, qui ont été loués ou achetés
- en utilisant des services de stockage distant.

Les modèles contenus dans un jumeau numérique représentent la réelle valeur ajoutée de cet outil. Ce sont eux qui aident à concevoir, à faire fonctionner, à analyser les signaux faibles et bien plus. Les compétences nécessaires au développement de ces algorithmes et ces modèles sont critiques, mais les PME qui ne sont dans un secteur d'activités qui n'a pas de lien avec l'industrie du futur n'ont pas forcément les compétences nécessaires pour les développer. Il est donc important de déterminer une stratégie vis-à-vis de ces modèles. Il est important de déterminer dans chaque cas s'il est préférable d'acquérir ces compétences pour développer les modèles en interne ou si le

développement sera sous-traité. Dans le second cas, il est aussi critique de déterminer qui aura la propriété intellectuelle de ces modèles.

Que ce soit les modèles, les algorithmes et même les données brutes, ce sont des informations sensibles. Elles pourraient être utilisées de manières malveillantes et par conséquent elles doivent être protégées et sécurisées. Il y a plusieurs manières de traiter cet aspect depuis l'isolement des réseaux jusqu'à des solutions de cryptage.

c. Proposition de méthodologie

L'état de l'art montre que peu de travaux se sont penchés sur la méthodologie avec laquelle il est possible d'implémenter un jumeau numérique, d'autant plus dans une entreprise relativement petite et sans les compétences qui y sont en général associées.

La proposition de Cordeiro [Cordeiro – 2019] est un point de départ pour cette étude, cependant il n'est pas possible de l'appliquer tel quel. En effet elle décrit l'application de l'industrie 4.0 dans son entièreté ce qui n'est pas le sujet ici, ensuite, la proposition n'est pas tout à fait la même ; dans le cas de l'article, vouloir déployer « l'industrie 4.0 » est une bascule vers une production différente, alors que le sujet de cette étude est de numériser et rendre intelligent un produit, pas le mode de production. Malgré cela, il est possible d'en extrapoler une méthodologie équivalente :

1. définir une stratégie de mise en œuvre sur un produit,
2. lancer un projet pilote,
3. si le déploiement n'a pas été un succès ; définition des ressources nécessaires,
4. si le déploiement a réussi ; spécialisation de l'analyse des données,
5. itérer sur un autre projet,
6. généraliser à tous les produits.

Ce qui pourrait donner les descriptions suivantes ; dans un premier temps, réaliser un état des lieux de l'entreprise afin de proposer un objectif (par exemple, se focaliser sur un seul produit et de découper le jumeau numérique en briques fonctionnelles) ensuite sélectionner une brique à mettre en œuvre comme un projet pilote. Si la mise en œuvre échoue, il faut faire un retour d'expérience et trouver ce qui a fait défaut pour pouvoir relancer le projet ou la méthodologie dans son ensemble. Si la mise en œuvre est un succès, il y aura un élément qui va générer beaucoup de données, il faut donc optimiser et améliorer l'analyse des données générées. Ensuite il est possible de passer à une brique suivante. Enfin, quand toutes les briques ont été faites pour un produit, il est possible de généraliser le processus sur les autres produits.

Compte tenu de l'état de l'art ainsi que des hypothèses de recherche (ce cadre industriel), il n'est pas envisageable de tenter de déployer un tel outil en une seule étape ; cela représente un risque trop important pour deux raisons :

- l'investissement est trop conséquent pour une PME,
- les entreprises du périmètre de ce travail de thèse n'ont pas de compétences dans les spécialités liées au jumeau numérique (IoT, conception logicielle...) ce qui augmente encore le risque.

Dès lors, une méthodologie structurée s'impose. Il faut donc définir les étapes à mettre en œuvre pour obtenir la mise en œuvre d'un jumeau numérique intégré.

Ici, le choix d'implémenter un jumeau numérique a été fait à priori, la méthodologie n'a pas pour but de définir si le jumeau numérique est une solution pour l'entreprise, mais de savoir comment procéder une fois ce choix acté.

De même, certains modules ou fonctions ont aussi pu être identifiés à priori par l'entreprise ce qui va avoir un impact direct sur la priorisation et l'ordonnancement des modules à mettre en œuvre.

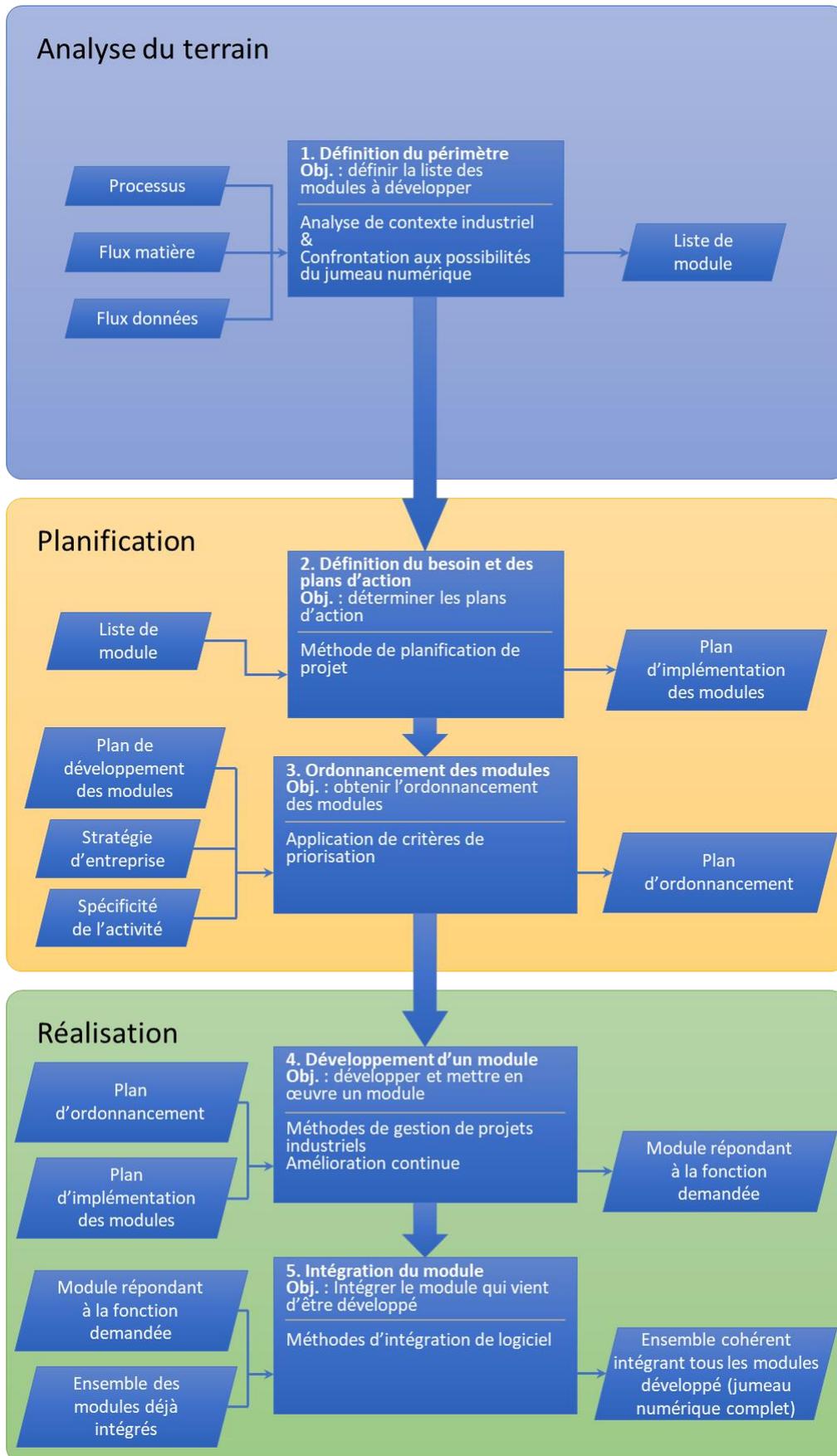


Figure 10 Méthodologie d'implémentation d'un jumeau numérique dans une PME

La figure 10 est un logigramme décrivant notre méthodologie d'implémentation du jumeau numérique. Les grands rectangles représentent des macro-étapes ou phases, les rectangles représentent des étapes dans lesquels on retrouve le numéro de l'étape, son titre, son objectif et en dessous du trait on retrouve la démarche avec laquelle on peut atteindre cet objectif. Les parallélogrammes représentent quant à eux des données ou des informations, en tant qu'entrée pour une étape s'ils sont à gauche, en tant que livrables s'ils sont à droite.

Cette méthodologie se découpe en trois phases majeures qui sont représentées par les trois grands rectangles de couleur et que nous détaillons ci-après ;

- **l'analyse du terrain** en bleu,
- **la planification** en jaune,
- **la réalisation** en vert.

i. L'analyse du terrain

La première phase majeure de cette méthodologie est l'analyse du terrain pour définir le périmètre de l'application du jumeau numérique.

Étape 1. Définition du périmètre :

- **Objectif** : l'objectif de cette étape est de définir les services que le jumeau numérique peut apporter à l'entité qui souhaite le mettre en œuvre
- **Éléments d'entrées** : Pour répondre à cet objectif, il faut étudier les données de processus, les flux de données ainsi que les flux de matière en rapport avec le système auquel le jumeau numérique sera appliqué, la définition du périmètre étant un facteur clé de succès d'un projet [Besteiro et al. 2015]
- **Livrable (élément de sortie)** : L'objectif de cette étape étant de définir les services auxquels le futur jumeau numérique répondra, le livrable est une liste des modules qui composeront ce jumeau numérique et qui répondront aux fonctions souhaitées
- **Démarche** : afin de répondre à l'objectif, il faut appliquer une analyse de données [Besteiro et al. 2015]. L'objectif étant de confronter les données en rapport avec le système aux informations du jumeau numérique et ses capacités à apporter une valeur ajoutée, faciliter un processus existant ou remplacer une étape du cycle de vie du système

Description : le jumeau numérique est un outil numérique intégré, l'environnement dans lequel il sera déployé va grandement influencer ; les éléments numériques avec lesquels il devra communiquer par exemple. Il est donc important de commencer par réaliser un état des lieux de l'entreprise et du système à jumeler. Le but de cette étape est d'identifier les fonctions auxquelles le jumeau numérique doit

répondre. Il faut analyser les processus ; autant analyser les flux de matières (les étapes par lesquelles les différentes matières passent ; contrôle à réception, étapes de production...), que les flux de données (identifier les données, leurs sources, leurs destinations et la manière dont elles sont utilisées ; nomenclatures produits, gammes de fabrication...);

- **L'analyse des flux de matières** permet d'identifier des étapes ou des fonctions auxquelles le jumeau numérique pourrait répondre (des modules ou des fonctions potentielles du futur jumeau numérique). Elle permettra aussi de voir si ces étapes peuvent générer des données matières qui sont susceptibles d'être utiles au jumeau numérique et enfin, l'analyse du flux de matières va permettre d'identifier des modèles qui ont déjà été développés ou qui sont déjà utilisés.
- **L'analyse des flux de données** identifie les échanges voire des étapes complètes (de validation par exemple) qui pourraient être gérées par le jumeau numérique. Cette analyse va, de plus, permettre d'identifier les données et leurs sources, qui pourront nourrir et être utiles au jumeau numérique afin d'étudier la meilleure manière de les intégrer ; il peut s'agir de capteurs connectés ou de données provenant d'autres logiciels. Enfin, l'analyse du flux de données permettra d'identifier les modèles développés pour ces étapes du flux en vue de les intégrer au futur jumeau numérique.

L'analyse de la situation existante va permettre de déterminer les besoins d'assistance numérique à ces différentes étapes. Basé sur toutes ces analyses, il détermine les modules et les manières dont le jumeau numérique génère une valeur ajoutée au système.

Enfin un autre élément important pour l'implémentation du jumeau numérique est l'existence d'outils logiciels qui pourront être utiles au jumeau numérique ; un logiciel de supervision, des plans de maintenance ou une caractérisation des défaillances pourront être intégrés sans modification fonctionnelle à apporter.

Une fois que la situation actuelle analysée et la liste des modules à mettre en œuvre rédigée, il est possible de passer à la partie de planification.

ii. Planification

Basée sur la liste des modules établie lors de l'étape majeure précédente, il est possible de planifier la manière dont ces modules vont être implémentés

Étape 2. Définition du besoin et des plans d'implémentation :

- **Objectif** : l'objectif de cette étape est d'analyser les modules de la liste de modules obtenue à l'étape précédente pour déterminer des plans d'implémentation de chaque module
- **Éléments d'entrés** : pour répondre à cet objectif, il est nécessaire d'avoir la liste des modules qui vont être mise en œuvre dans le jumeau numérique
- **Livrable (élément de sortie)** : le livrable pour cette étape est un plan d'implémentation pour chaque module. Ce plan d'implémentation a pour objectif d'estimer le travail ainsi que les ressources nécessaires à la bonne mise en œuvre de tous les modules
- **Démarche** : afin d'obtenir ces livrables et de répondre à l'objectif, il faut appliquer des méthodes de planification de projet industriel. Il existe de nombreuses méthodes de planification de projet (PERT, Le WBS ou encore le Critical chain project management) [Leach et al. 1999]

Description : une fois que toutes les fonctions et que tous les modules répondant à ces fonctions ont été identifiés, il est crucial d'étudier la manière avec laquelle ces modules vont être implémentés et de proposer le plan d'implémentation de chaque module. En effet, ces plans d'implémentations pour les modules vont permettre de préparer au mieux leur mise en œuvre et ainsi améliorer grandement les chances de succès de ces modules. Il est nécessaire de réaliser ces plans à cette étape, car ils vont être utiles avant l'implémentation elle-même des modules. Beaucoup de structures ont déjà leur démarche de planification de projet qui peuvent être différentes, cependant sans aller jusqu'à en recommander une plutôt qu'une autre, certains éléments doivent nécessairement être étudiés pour le bon déroulé de cette étape et des suivantes :

- **Le coût** ; la bonne estimation du coût de l'implémentation d'un module est un facteur clé de réussite de cette implémentation. Il permet de s'assurer de ne pas manquer de ressource avant la réussite de la mise en œuvre de chaque module,
- **Le temps de réalisation** ; pour préparer au mieux la mise en œuvre d'un module, la planification des tâches et l'estimation des durées de chacune est aussi un élément crucial, il permettra d'estimer la charge de travail et donc l'engagement humain nécessaire pour constituer l'équipe adéquat,
- **Les compétences** ; là encore, afin de constituer l'équipe la plus adaptée aux projets, il est primordial d'identifier les compétences qui vont être requises pour mener chaque projet d'implémentation de modules,
- **Les ressources matérielles** ; que les modules soient purement numériques ou qu'ils aient une partie physique conséquente, des ressources matérielles seront nécessaires. Pour ne pas manquer de ressources avant la réussite de la mise en œuvre des modules, il est important d'identifier les ressources qui seront requises pour atteindre ces objectifs,
- **Les ressources logicielles** ; tous les modules ont au moins un aspect numérique et donc logiciel, afin de s'assurer de la bonne mise en œuvre de

ces modules, les ressources logicielles nécessaires doivent être identifiées. Leur identification permettra de s'assurer qu'elles ne manqueront pas lors de la mise œuvre de chaque module

Une fois que les plans d'implémentations pour chaque module ont été réalisés, il est possible de passer à l'étape suivante d'ordonnement des modules.

Étape 3. Ordonnement des modules :

- **Objectif** : l'objectif de cette étape est de définir l'ordre dans lequel les modules vont être mis en œuvre
- **Éléments d'entrées** : pour répondre à cet objectif ; il est nécessaire d'avoir les plans d'implémentation des modules envisagés afin de voir ce que ces implémentations impliquent, il est aussi important d'avoir des informations quant à la stratégie de l'entreprise, car elle aura un impact sur ses priorités, ainsi que la description des spécificités de l'activité en lien avec le futur jumeau numérique qui aura elle aussi un impact certain sur la priorisation de modules
- **Livrable (élément de sortie)** : le livrable de cette étape est un ordonnancement des modules pour les mettre en œuvre
- **Démarche** : afin d'obtenir ce livrable et atteindre l'objectif de l'étape, il faut appliquer des critères de priorisation (sous forme de matrice décisionnelle ou autre) pour identifier les modules les plus critiques, les plus prioritaires et ainsi proposer un ordre, dans lequel les implémenter [Lehtola et al. 2006]

Description : Une fois les modules identifiés et leur implémentation planifiée, il faut les ordonner pour savoir dans quel ordre les mettre en œuvre. À cette étape, les modules qui ont été identifiés à priori par l'entreprise, qui a pu déclencher le projet d'implémentation de jumeau numérique peuvent être traités différemment, cela étant, si ces modules ont été identifiés au départ c'est probablement qu'ils étaient critiques pour l'entreprise et donc prioritaires. Les éléments cités à l'étape précédente vont être des éléments déterminants dans l'ordonnement des modules, ils sont autant de critères de priorisation ; le coût de développement, la durée de développement, les différentes ressources nécessaires. La stratégie de l'entreprise et les spécificités de l'activité ou du système pour lequel on souhaite implémenter un jumeau numérique sont aussi importantes. Ces éléments interviennent de nombreuses manières ; si la stratégie de l'entreprise est de proposer de nouveaux services à leurs clients en association avec les produits qu'ils vendent, des modules de maintenance prédictive ou d'amélioration statistique des performances seront sans doute privilégiés. Si l'activité fabrique des produits ultra-personnalisables, tous les modules d'aide à la conception, notamment ceux qui sont directement utilisables par les clients comme un configurateur de produits seront prioritaires dans l'ordre d'implémentation.

Une fois l'ordre d'implémentation formalisé, il est possible de passer à la partie réalisation.

iii. Réalisation

La phase de réalisation de cette méthodologie est itérative ; le développement d'un module, puis son intégration, doivent être répétés pour chacun des modules identifiés, jusqu'à obtenir le jumeau numérique complet.

Étape 4. Développement d'un module :

- **Objectif** : l'objectif de cette étape est de mettre en œuvre un module
- **Éléments d'entrées** : pour répondre à cet objectif, cette étape nécessite l'ordonnancement de l'étape précédente, pour savoir quel module mettre en œuvre et le plan d'implémentation de ce module
- **Livrable (élément de sortie)** : le livrable de cette étape est d'avoir le module identifié qui répond à sa fonction principale
- **Démarche** : afin d'obtenir le livrable de cette étape et d'atteindre l'objectif, il faut conduire le projet industriel de mise en œuvre du premier module du jumeau numérique [Charva et al. 2003]

Description : Cette étape est la première étape de réalisation. À cette étape un module va être implémenté. La mise en œuvre des modules est un projet industriel à part entière et il doit être mené en tant que tel. Le plan de déploiement a déjà été conçu il reste donc à l'appliquer en constituant l'équipe projet et en menant le pilotage du projet industriel. Ce pilotage peut être réalisé de différentes manières en fonction de la culture de l'entreprise mettant en œuvre le jumeau numérique et la nature du module étant implémenté (méthode Agile ou SCRUM pour des projets orientés vers l'informatique, ou méthodes du chemin critique ou du PERT pour des projets plus généralistes).

C'est dans cette étape que les compétences de développement logiciel, que les entreprises de ce scope n'ont pas, sont importantes. La création des modèles de comportement représentant le système sont des éléments critiques, ils sont la valeur ajoutée du jumeau numérique et potentiellement celle de l'entreprise si le système à jumeler est un produit. Dans ce cadre, l'entreprise a deux possibilités principales ;

- elle peut faire appel à de la sous-traitance,
- elle peut recruter du personnel ayant les compétences

La sous-traitance permet d'avoir de la flexibilité une fois que les modèles sont développés, mais elle comporte un risque plus important pour les savoir-faire et la valeur ajoutée qui sont critiques pour l'entreprise. De l'autre côté, le recrutement de ces

compétences peut être difficile étant donné que l'entreprise ne connaît pas ou peu le domaine en question ; de plus un tel processus peut être long.

Dans la majorité des cas, pour le jumeau numérique lui-même ainsi que la plupart de ses modules, l'amélioration continue est une phase importante de la mise en œuvre. En effet l'amélioration continue permet de ne pas figer un élément, mais au contraire de le faire vivre et de le rendre continuellement plus efficient dans sa réponse aux fonctions pour lesquelles il a été créé et plus adapté au besoin réel. Cela peut se traduire par l'ajout de fonctions, par l'amélioration des fonctions déjà existantes, par l'amélioration des interfaces du module, de la gestion des données et de leur stockage et bien d'autres. Un des aspects primordiaux de l'amélioration continue d'un module réside aussi dans l'amélioration des modèles de comportement qu'il comporte, les données provenant du terrain étant alors une source inestimable.

Il n'est pas souhaitable d'arrêter l'implémentation du jumeau numérique tant que l'amélioration continue du premier module est en cours, une fois que le premier module répond à la fonction pour laquelle il a été implémenté et que la phase d'amélioration continue est engagée, il est possible de commencer ; l'intégration de ce module, et le développement des modules suivants.

Étape 5. Intégration du module :

- **Objectif** : l'objectif de cette étape est d'intégrer le module qui vient d'être mis en œuvre au reste du jumeau numérique
- **Éléments d'entrées** : cette étape nécessite le module qui vient d'être mis en œuvre ainsi que les modules déjà existants
- **Livrable (élément de sortie)** : cette étape livre un jumeau numérique complété
- **Démarche** : pour intégrer un module à un ensemble, plusieurs méthodes sont disponibles ; il pourra être préférable d'utiliser plutôt l'une ou l'autre, parmi l'intégration horizontale (Entreprise Service Bus), l'intégration en étoile ou encore l'intégration au format de données commun [Schimdt – 2005]

Description : Une fois le module mis en œuvre, il est important que ce module soit intégré au reste du jumeau numérique, pour obtenir un outil cohérent et pas simplement une accumulation d'outil numérique déconnecté. Le but de l'intégration est d'avoir des transitions les plus invisibles possible ; plus une donnée devra être ressaisie plus grandes sont les possibilités d'erreurs. Idéalement l'utilisateur a accès à tout ce dont il a besoin à un certain moment via une seule interface, et elle devrait être capable de connecter les données de configuration, les données de terrain ainsi que les modèles de comportement avec le moins d'intervention de sa part.

Plusieurs méthodes d'intégration existent, l'intégration horizontale, l'intégration en étoile ou l'intégration au format de données commun. L'intégration horizontale consiste à développer un système de communication entre les différents éléments de l'entité numérique, l'intérêt de cette méthode est qu'il est plus simple d'intégrer de multiples modules une fois que le système de communication commun est développé, cependant, il faut le développer. L'intégration en étoile consiste à développer les liens entre les éléments de manière systématique, l'avantage de cette méthode est qu'il n'y a pas d'élément central à mettre en œuvre, en revanche, chaque nouveau module à intégrer est plus compliqué que le précédent, car il faut ajouter un lien supplémentaire. Enfin, l'intégration au format de données commun consiste à s'assurer que chaque élément de l'entité numérique utilise les mêmes types de données pour rendre leur échange simple. L'avantage de cette solution est qu'il n'y a pas non plus d'éléments centraux à développer et que l'ajout d'un nouveau module reste simple, car le format est toujours le même, l'inconvénient est que si des éléments sont déjà existants, si leur format de donnée n'est pas le même, soit il faut l'adapter soit cette méthode n'est pas possible.

d. Résultats

Cette méthodologie permet d'obtenir un jumeau numérique complet dans le cadre d'une PME dont ce n'est pas le secteur d'activité. Elle permet dans un premier temps d'obtenir une image globale de ce que le jumeau numérique sera une fois le projet porté à son terme en fournissant une liste de modules qui répondent à des fonctions pour améliorer ou faciliter la vie du système auquel il est rattaché.

Bien que ce ne soit pas probable, il est possible qu'à l'issue de cette première partie, aucun module n'ait été identifié, dans ce cas, il semble que le jumeau numérique ne soit pas l'outil approprié et alors la démarche d'implémentation s'arrête.

e. Résumé

La mise en œuvre d'un projet numérique comme un jumeau numérique est un défi, surtout pour une PME. Pour maximiser la réussite d'un tel projet, nous proposons une architecture ainsi qu'une méthodologie pour implémenter un tel objet.

L'architecture est découpée en modules qui répondent chacun à une ou plusieurs fonctions. Ces modules ont besoin d'une interface au minimum ainsi que d'une connexion avec le système physique.

On peut découper cette méthodologie en trois phases ; la première phase est une phase d'état des lieux, pour connaître au mieux le jumeau numérique qui doit être

implémenté ainsi que les ressources et processus présents dans l'organisation, le tout afin d'établir la liste des modules qui composeront le jumeau numérique.

Grâce à cet état des lieux et à la liste des modules, la phase de planification peut commencer. Dans cette phase, grâce à la liste des modules, un plan d'implémentation pour chacun d'eux est rédigé puis ces modules sont ordonnancés en utilisant des critères de priorisations. Parmi les critères les plus courants, on retrouve le coût d'implémentation, le délai de mise en œuvre ou encore la criticité de la fonction à laquelle répond le module.

Enfin, la dernière phase est celle de la réalisation. Grâce au plan d'implémentation réalisé ainsi que l'ordre donné par l'ordonnancement le premier module est implémenté. L'implémentation d'un tel élément est un projet industriel en lui-même et ce que ce projet implique dépend de la nature du module, cependant, on retrouvera des phases de prototypage, des phases de test en interne et éventuellement avec les clients le cas échéant, des phases d'industrialisation ainsi qu'une partie d'amélioration continue. La préconisation de cette méthodologie est de poursuivre l'implémentation du premier module jusqu'à ce qu'il réponde à sa fonction principale, après quoi il est possible de l'intégrer à ce qui deviendra le jumeau numérique. Dans le même temps, le deuxième module commence à être implémenté, alors que le travail sur le premier continue ; l'ajout de fonction, l'amélioration des fonctions existant ou de l'interface ainsi que la diversification de l'utilisation des données peuvent par exemple participer à améliorer les modèles de comportement qui sont contenus dans le module. Nous préconisons cette démarche d'amélioration continue pour tous les modules suivants aussi.

IV. Le jumeau numérique appliqué à Hellomoov'

Pour illustrer la méthodologie proposée dans cette thèse, elle est appliquée dans un cadre industriel, l'entreprise Hellomoov'.

a. Définition du périmètre

Comme décrit dans le chapitre précédent, la première étape consiste dans l'analyse du contexte industriel dans lequel le jumeau sera implémenté, dans ce cas ; Hellomoov' ; Hellomoov' produit des lignes de transfert industriels :

- la taille de l'entreprise : Hellomoov' est un groupe d'environ 250 salariés,
- les compétences au sein de l'entreprise ; Hellomoov' intervient principalement en mécanique, conception, usinage et assemblage,
- la proposition de valeur : les systèmes de transfert ne sont pas des machines qui apporte de la valeur ajoutée aux produits qu'ils transportent. Pour autant indispensables, l'usine finale vise à les minimiser, car leur valeur ajoutée est indirecte.

Avant le début du projet de jumeau numérique, Hellomoov' avait identifié des modules que l'entreprise souhaitait voir mis en œuvre en priorité ; un simulateur de flux, un module de maintenance prédictive et un système de contrôle de ligne. Ce travail prendra donc évidemment en compte cet a priori.

On souhaite réaliser un jumeau numérique des lignes de transfert vendues par Hellomoov', nous avons regardé le processus principal lié à ce produit, c'est à dire ; le processus de vente, depuis le besoin du client jusqu'à livraison.

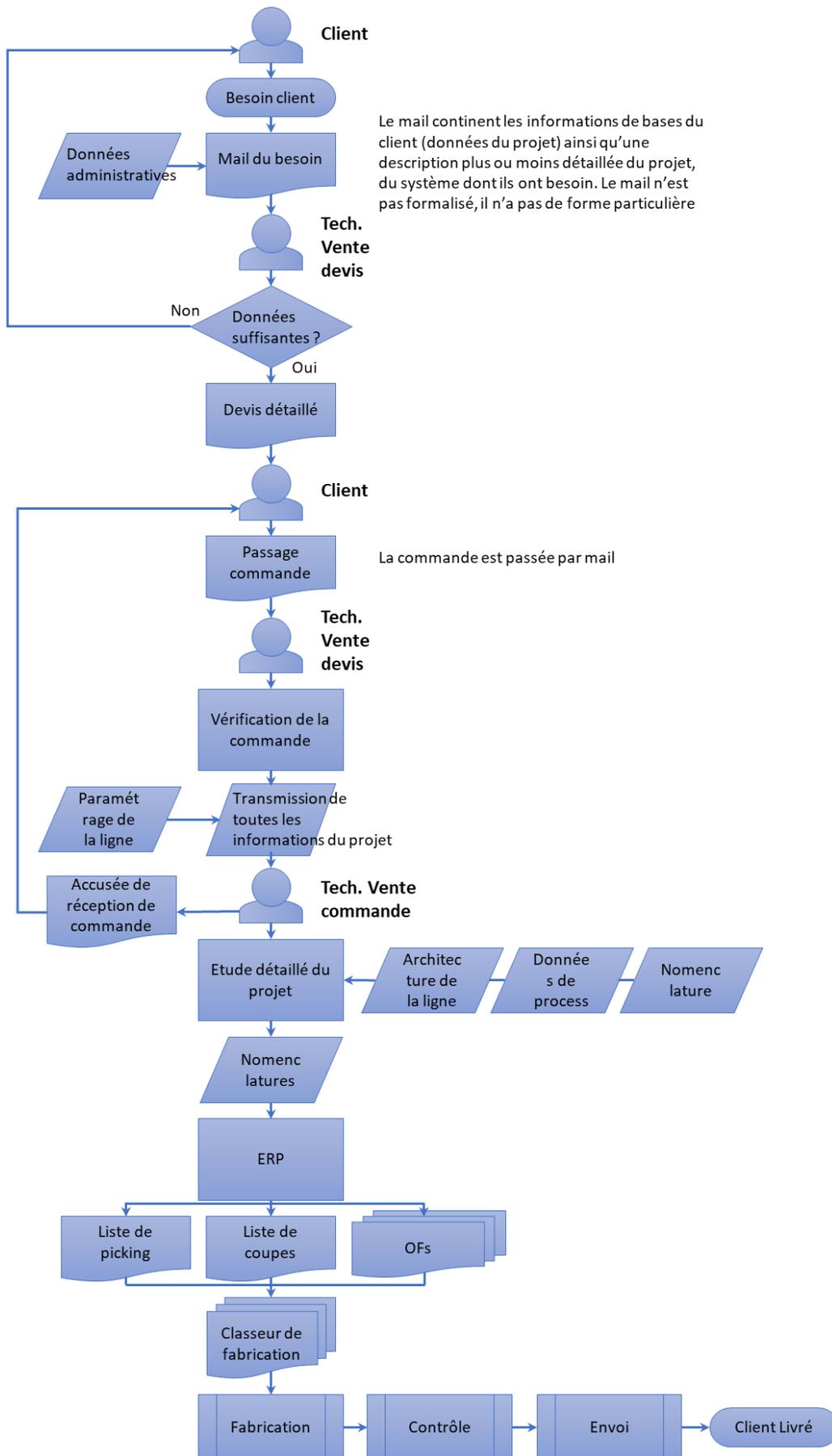


Figure 11 Processus de vente chez Hellomooov'

Pour cette thèse nous avons formalisé le processus de vente chez Hellomoov' en interrogeant les membres de l'équipe de vente. La figure 11 est une représentation de ce processus. Les figures en forme de capsule représentent le début et la fin du processus, les parallélogrammes représentent des données, les rectangles représentent des actions ou des objets, les rectangles terminés par une vague représentent des documents, les losanges représentent des décisions et enfin, les rectangles avec deux traits verticaux représentent des macro-actions.

Dans le processus existant, on peut voir que le besoin venant du client est transmis via un mail contenant les informations que le client identifie comme importantes, cependant, parfois ces informations ne sont pas suffisantes et le technicien de vente/devis qui reçoit ce mail est obligé de demander des précisions au client. Une fois que le technicien de vente/devis a toutes ces informations, il peut rédiger un devis proposant une solution technique basée sur son expérience ainsi que sur celles de ses collègues avec un prix approximatif. Si le devis convient au client, il renvoie par mail une commande correspondant au devis qu'il a reçu. Le technicien de vente/devis doit alors vérifier la commande pour s'assurer qu'elle concorde bien avec le devis fourni précédemment. Puis il envoie le dossier technique complet au technicien de vente commande avec notamment les données de paramétrage de la ligne plus précises que dans le devis, qui lui renvoie un accusé de réception de commande au client. Le technicien de vente commande va alors réaliser l'étude détaillée du projet ; en partant de la proposition faite dans le devis, il va construire la ligne dans son ensemble dans un modèle 3D afin de générer la nomenclature globale du projet qu'il va ensuite renseigner dans l'ERP Hellomoov'. L'ERP va pouvoir ensuite générer une liste de picking des pièces, une liste de coupe à usiner sur les pièces ainsi que les ordres de fabrication pour chaque pièce. Tous ces documents sont rassemblés dans le classeur de fabrication de l'affaire, un classeur physique où tous les documents de l'affaire sont rassemblés après avoir été imprimés. Ce classeur va ensuite dans l'atelier où les pièces sont retirées, usinées et enfin assemblées pour construire la ligne afin de tester le montage. Puis la ligne est désassemblée, emballée, envoyée, remontée et mise en service chez le client qui pourra alors réceptionner l'installation.

Au vu de ce processus, on peut noter qu'il y a peu d'étapes qui sont automatisées, ou plus largement intégrées à un workflow. On peut aussi voir que la collecte d'informations auprès du client entraîne des aller-retours qui peuvent prendre du temps. Enfin, la plus grande partie de la phase de conception est réalisée empiriquement ; cette méthode fonctionne, mais elle peut causer des temps de développement plus importants, car la fiabilité des conceptions des lignes dépend de l'expérience de celui qui la conçoit ou du temps passé à vérifier auprès d'un collègue. Cela implique aussi un temps de formation au poste plus important pour acquérir l'expérience nécessaire, par exemple pour

connaître les combinaisons d'éléments de transfert qui pourront répondre aux besoins du client.

Dans un second temps, pour définir le périmètre du futur jumeau numérique, il est important de regarder les particularités de l'activité : la valeur ajoutée apportée par un système de transfert est un flux, le déplacement de produits. La modélisation du flux est donc une fonction qui est recherchée. Ces systèmes sont fiables ; il y a peu de pannes rapportées, mais les pannes peuvent entraîner des conséquences importantes comme des arrêts de production qui peuvent être graves. La possibilité d'améliorer les opérations de maintenances et de prévenir des pannes sont des fonctions recherchées.

Enfin, comme précisé précédemment, le flux apporté par les systèmes de transfert ne fait pas partie de la valeur ajoutée du produit de l'entreprise cliente, de plus ce sont des systèmes modulaires, la fonction liée à leurs réutilisations est donc aussi une fonction recherchée dans le jumeau numérique.

Ces éléments nous conduisent à la liste des modules qui composeront le jumeau numérique chez Hellomooov' :

Un module d'aide à la conception : ce module supporte la conception des solutions de transfert. Il peut y avoir plusieurs niveaux d'assistance, depuis la conception via un configurateur (un logiciel qui permet de renseigner des données de configuration et qui est capable de réaliser une préconception, cet outil est principalement utilisé par les technico-commerciaux) jusqu'à des algorithmes d'auto génération ainsi que depuis une unité simple jusqu'à un système complet. Les modèles nécessaires pour le fonctionnement de ce module sont principalement une mise en équation de règles de conception (les longueurs maximales, les charges admissibles, les distances minimales entre équipements de ligne...). Dans le cas le plus avancé, un technicien pourrait seulement entrer les informations de volumes disponibles dans l'atelier du client, les points de passages obligatoires éventuels, le takt time maximum, les poids et dimensions des produits et le modèle serait capable de proposer une ligne de transfert qui pourrait répondre à ces besoins.

Le système physique n'existe pas à ce stade, mais nous intégrons tout de même ce modèle comme partie du jumeau numérique, car il participe au lien entre conception et produit fabriqué.

Un module de simulation : dans le cas du transfert, la simulation de flux intéresse l'entreprise. Dans le contexte de système de transfert, le flux, le déplacement des palettes et des produits du client sont la valeur ajoutée du système. Modéliser ce comportement permet principalement de confirmer l'efficacité d'une solution, qu'elle répond bien au

besoin exprimé par le client. Après avoir chargé les données issues du module d'aide à la conception, le simulateur peut aussi générer un modèle 3D de la solution proposée. Ensuite, en s'appuyant sur une base de données du comportement de chaque composant, le simulateur peut afficher le déplacement des palettes et le comportement de la ligne. De plus le simulateur génère un rapport contenant les KPI principaux de fonctionnement du système ; le takt time, le temps d'attente moyen de chaque palette par exemple. Une fois que la simulation confirme que la solution répond bien au besoin, le simulateur peut communiquer avec l'ERP pour générer une nomenclature d'achat et pour pouvoir sortir les pièces du stock et ainsi lancer la production.

Un module d'aide à la fabrication/montage : le module d'aide à la fabrication et au montage est un module qui assiste les techniciens dans les étapes de fabrication. Grâce à des lunettes de réalité augmentée, il est envisagé de reconnaître et d'afficher les pièces sur lesquelles le technicien doit intervenir, soit pour les usiner (découpe, perçage) soit pour les monter (l'orientation des pièces, le positionnement vis-à-vis des autres pièces). En réalité augmentée, il est aussi possible d'afficher les outils nécessaires, les machines, ou tout autre élément nécessaire à la réalisation des tâches en question. Le module d'aide à la fabrication est aussi là pour garantir que le montage se passe comme prévu, grâce au repérage des pièces, par rapport au plan, il est possible de s'assurer que les bonnes pièces soient mises au bon endroit et ainsi que le système sera conforme au système conçu.

Une supervision contrôlée : le module de supervision donne une vision en temps réel de l'état du système de transfert une fois celui-ci en fonctionnement. Grâce aux technologies de l'internet des objets, le jumeau numérique récupère les informations provenant des capteurs directement sur la machine. Cela permet une supervision du système de transfert sur place et à distance. Le module affiche la valeur de tous les capteurs et de tous les actionneurs sur la ligne. Ce module permet aussi d'agir à distance directement sur la ligne via la même voie de communication, il est envisageable de piloter manuellement chaque élément.

Un module de contrôle de ligne : Le module de contrôle de ligne pilote les éléments d'une ligne de transfert de manière indépendante de l'automate programmable industriel qui gère la globalité de la ligne. Cette possibilité permet de gagner de l'indépendance au regard des clients intégrateurs et ainsi d'être autonome sur les produits proposés. Un tel module permet aussi d'acquérir l'accès aux systèmes de transfert sur site pour récolter des données de fonctionnement pour de nombreux autres modules.

Un module de contrôle de cohérence : ce module vise à confronter le comportement de la ligne sur le simulateur à celui de la ligne dans la réalité. Pour ce faire, au moment où une palette est détectée par un capteur sur la ligne, toujours grâce aux technologies de l'internet des objets, l'information remonte jusqu'au jumeau numérique, notamment quand une palette arrive et quitte un point d'arrêt. Quand le capteur de présence perd l'information de présence palette, c'est qu'elle a quitté ce point, alors le modèle libère aussi la palette dans sa simulation. Le module de contrôle de cohérence va alors mesurer l'écart qu'il y a entre le moment où la palette arrive au prochain point d'intérêt (prochain capteur de présence) et celui où la palette virtuelle dans le simulateur arrivera au même point.

Si l'écart est relativement petit et toujours dans le même sens le modèle du simulateur est imparfait et dans ce cas on peut utiliser cette opportunité pour corriger le simulateur. Si l'écart est faible, mais qu'il varie en positif ou en négatif, c'est que le modèle est suffisamment précis, mais qu'un facteur extérieur, non contrôlé vient affecter le temps de passage des palettes on est sans doute à la limite de précision du modèle avec les données disponibles à cet instant. Si l'écart est grand, dans un sens ou dans l'autre, c'est qu'il y a un problème sur la ligne ; soit la palette est restée bloquée, soit elle a été retirée, soit une autre palette a été rajoutée.

Une autre vérification de ce module est le fonctionnement des points d'arrêts ; si l'ordre de libération a été envoyé, mais que la palette est toujours présente au poste, le point d'arrêt ne l'a pas libéré et donc il y a un problème sur la ligne elle-même. Le grand avantage de ce module est qu'il est capable de pointer spécifiquement l'endroit qui semble poser problème.

Un module de maintenance prédictive : Le module de maintenance prédictive propose d'analyser les données provenant du terrain grâce à des algorithmes conventionnels ou d'intelligence artificielle pour détecter des signaux faibles qui annoncent des défaillances à venir. Les modèles de maintenance prédictive sont capables de déterminer qu'une défaillance va avoir lieu, mais aussi de spécifiquement décrire quelles pièces vont défaillir et prévenir suffisamment tôt pour que le propriétaire du système ait le temps de s'assurer que les pièces incriminées soient en stock de les commander et de prévoir et d'organiser une intervention pour corriger le problème.

Les modèles dans le module de maintenance prédictive représentent le comportement de vieillissement de la ligne de transfert. Ils représentent la corrélation entre l'usure de pièces et certains effets physiques extérieurs (vibrations, température, consommation d'énergie, dans le cas des systèmes de transfert le temps de passage).

En combinant ces données avec des données provenant de l'ERP relatives aux coûts complets de revient des pièces, avec pour objectif de déterminer s'il est économiquement intéressant de réparer la ligne ou s'il est plus intéressant de commander une nouvelle ligne. Il est possible d'intégrer dans cette analyse les nouvelles références du catalogue pour obtenir une ligne la plus performante possible.

Un module d'assistance à la maintenance : le module d'assistance à la maintenance, comme le module d'aide à la fabrication et au montage, propose d'utiliser les technologies de la réalité augmentée pour aider aux interventions de maintenance. En utilisant les données provenant du module de maintenance prédictive, le module va orienter les opérations de maintenance du technicien. Si le jumeau numérique inclut un modèle 3D de la ligne ainsi que la liste des pièces, quand le technicien arrive sur le système, en synchronisant le modèle avec ce que le technicien voit, le module peut désigner les pièces sur lesquelles il doit intervenir. Encore une fois, de la même manière que le module d'aide à la fabrication, ce module est aussi capable de désigner les outils nécessaires pour l'intervention. Ce module représente donc un gain notable en temps d'intervention ainsi qu'en limitant les erreurs potentielles qui proviendrait d'une intervention sur une mauvaise pièce ou avec des outils non adaptés qui pourraient endommager des pièces.

Un module d'assistance à la reconfiguration : dans ce cas, la reconfiguration est le fait de profiter des données issues de l'utilisation réelle de la ligne de transfert pour proposer une nouvelle architecture de la ligne si le module conclut qu'il est possible d'optimiser son architecture. Le module devra estimer que la première configuration n'est pas la plus optimale pour plusieurs raisons ;

- L'utilisation de la ligne n'est pas strictement celle prévue lors de la conception pour de multiples raisons possibles ; le temps de cycle de certains postes n'est pas celui prévu ou encore le mix des références de production n'est pas celui qui était prévu
- De nouveaux accessoires ont été développés qui permettraient d'augmenter significativement les possibilités de la ligne

En étudiant statistiquement l'utilisation de la ligne (nombre de pièces fabriquées, le temps de cycle des postes, le mix de production, le taux de qualité), le module utilise ces données et les croise avec les nouveaux équipements de transfert pour vérifier si la configuration actuelle est la plus pertinente ou s'il y a maintenant une autre solution qui correspond mieux à l'utilisation réelle de la ligne. Une fois l'architecture proposée, elle peut être importée dans le simulateur comme pour le configurateur et transmettre la liste de pièces à l'ERP pour lancer la production si le client le souhaite.

Un module de réutilisation/cannibalisation : ce module propose d'aider le propriétaire d'une ou plusieurs lignes de transfert à réutiliser les éléments de ces lignes si elles viennent à être déclassées. En enregistrant les pièces qui font partie d'une ligne après qu'elle a arrêté de produire et en transmettant ces informations au configurateur, il sera capable de générer de nouvelles lignes en privilégiant les pièces qui sont déjà en stock. L'objectif est de réduire le coût d'une ligne en utilisant des pièces qui sont déjà la propriété du client, mais cela permet aussi de réduire l'empreinte environnementale de l'activité. Les questions qui se posent avec ce module sont notamment ; quelle est la limite d'usage des pièces (notamment les pièces de structure), quel équilibre doit être trouvé entre la réutilisation des pièces par rapport au design optimal d'une solution. Ce modèle peut être couplé à d'autres modules ;

- Avec le module d'aide à la conception, en prenant en compte les chutes déjà disponibles, pour réduire le coût et l'empreinte écologique des lignes conçues.
- Avec le module d'aide à la reconfiguration, pour prendre en compte les pièces qui sont déjà présentes et ne pas recommencer avec uniquement du neuf mais aussi réutiliser les pièces qui ont déjà servi au système précédent.

Cette fonction pourrait être intégrée au configurateur dans un second temps par exemple

Nous avons identifié ces modules avec Hellomoov' comme pouvant leur bénéficier ; ils constituent la base du jumeau numérique qu'ils souhaitent mettre en œuvre à long terme pour leurs systèmes de transfert. Il est évident que le sujet de ce travail de thèse n'est pas de développer tous ces modules, mais bien de proposer une manière de le faire et de l'illustrer via plusieurs exemples, pour démontrer la faisabilité.

b. Définition du besoin et des plans d'action

Comme décrit dans la méthodologie présentée dans le chapitre précédent, la deuxième étape est la définition du besoin et du plan d'action pour chaque module. Dans le cas de cette étude, nous présentons en exemple, les plans d'action pour les modules dont les mises en œuvre ont été entamées. Ces modules ont été identifiés avant le début du projet de jumeau numérique. Cela étant, ces modules auraient pu être sélectionnées comme prioritaire par les outils proposés dans la méthodologie d'implémentation. Ces modules sont les suivants :

Le module de simulation :

Objectifs : L'objectif d'un module de simulation est de générer une simulation d'une ligne de transfert représentant son fonctionnement, l'objectif étant d'obtenir un document qui sera à la fois un support commercial, mais surtout la simulation permet de confirmer que la conception répond bien au besoin exprimé par le client (notamment le takt time).

Gains : Grâce à ce module, le temps de mise sur le marché peut être grandement réduit, car la conception est facilitée par cet outil et il augmente le niveau de confiance dans la solution proposée. De plus le bénéfice commercial, bien qu'il soit difficilement quantifiable, a été confirmé par l'équipe commerciale en échangeant avec leurs clients.

Risques : Les gains techniques provenant du simulateur sont directement liés à la confiance que les techniciens ont en l'outil. Pour qu'un tel outil soit fiable et qu'il donne confiance il doit prendre en compte le plus d'éléments possible, mais il est difficile de tout prendre en compte et avant cela les gains techniques en temps de mise sur le marché seront plus faibles.

Jalons principaux :

1. Identification des besoins du logiciel,
2. identification du support (logiciel commercial ou développement interne et environnement de développement intégré si développement interne),
3. développement des premières fonctions (via l'adaptation du logiciel existant ou pour le développement interne),
4. tests des fonctions en interne,
5. validation de la fonction principale,
6. tests des fonctions auprès des clients si besoin exprimé,
7. amélioration continue par itération de développement notamment

Ressources nécessaires estimées :

- Durée du projet : environ 1 500 heures si développement en interne
- Coût : achat logiciel commercial si existant et satisfaisant, ou achat environnement de développement intégré ou néant si les logiciels choisis sont open source
- Compétences : compétence de développement logiciel
- Matériel : néant, car les PC sont déjà à disposition
- Logiciel : un simulateur de flux ou un environnement de développement intégré

Le module de maintenance prédictive :

Objectifs : l'objectif du module de maintenance prédictive est d'identifier la variation de valeur d'un paramètre de fonctionnement, avant qu'il soit détectable, sans outils qui signalent la dégradation de l'état de santé d'un élément d'un système de transfert, en vue de prévoir une intervention de maintenance pour remplacer la pièce avant qu'elle ne casse.

Gains : l'identification d'une pièce avant défaillance et la prévision d'une intervention avant la casse, évitent la défaillance pendant le fonctionnement et donc l'arrêt machine qui est très coûteux pour l'utilisateur.

Risques : il y a deux risques associés à ce module ; le plus important est l'échec de l'association ou la détection d'un signal faible à l'état de santé d'une pièce. Dans ce cas, tout le temps ainsi que les moyens investis sont perdus. Le second risque est le risque de faux positifs : la détection d'un signal faible qui ne provoque pas une défaillance à venir ou à plus ou moins long terme. Dans ce cas, certaines pièces pourraient être remplacées sans qu'il y ait le besoin réel, ce qui représente une perte financière, mais elle peut être relativisée au regard de la valeur des pièces par rapport au coût d'arrêt de production.

Jalons principaux :

1. Identification des sources de pannes les plus problématiques,
2. identification des paramètres de fonctionnement qui pourraient refléter l'état des pièces identifiées,
3. modélisation de l'évolution des paramètres à l'image de l'état des pièces,
4. définition des règles de calcul de signaux faibles et d'identification de défaillances à venir et préconisation d'action,
5. tests de ces règles de calcul,
6. amélioration continue du module

Ressources nécessaires estimées :

- Durée du projet : environ 500 heures
- Coût : système de captation (développement, adaptation ou achat), système de récolte (développement, adaptation ou achat)
- Compétences : compétence en statistique et en analyse de données, ainsi qu'en modélisation de comportement
- Matériel : système de captation et système de récolte
- Logiciel : logiciel de traitement des données ; tableur type Excel ou google sheet

Le module de contrôle de ligne :

Objectifs : l'objectif du module de contrôle de ligne est de développer un système permettant de piloter les actionneurs d'un système de transfert de manière autonome.

Gains : le fait d'être autonome pour le pilotage des lignes de transfert permet de proposer une solution fonctionnelle seule et donc intégrable bien plus facilement, mais aussi de gagner en indépendance vis-à-vis des intégrateurs et ainsi être capable de proposer un système fonctionnel indépendant du reste du système.

Risques : le risque principal de ce module est que certains clients intégrateurs pourraient prendre la démarche comme étant une tentative de prendre une part de leur marché alors que l'objectif est de faciliter l'intégration des systèmes. De plus, en fonction des solutions techniques retenues, la complexité ajoutée engendre des coûts supplémentaires supérieurs à ce qui était prévu.

Jalons principaux :

1. Identification des entrées et des sorties du système de contrôle
2. définition de l'architecture du système
3. choix des solutions techniques pour répondre au besoin
4. développement des prototypes
5. tests des prototypes
6. validation du développement
7. industrialisation des solutions retenues
8. amélioration continue du système

Ressources nécessaires estimées :

- Durée du projet : environ 750 heures
- Coûts : matériels électroniques pour le prototypage, coûts d'industrialisation
- Compétences : compétence en conception électronique, compétence en programmation électronique
- Matériels : matériels électroniques
- Logiciel : logiciel de programmation

c. Priorisation des modules

Une fois que les plans d'action de chaque module ont été rédigés, nous pouvons passer à l'étape suivante de la méthodologie : la priorisation des modules pour définir l'ordre dans lequel ils seront mis en œuvre.

Pour prioriser les modules, il faut définir et pondérer les critères qui sont les plus importants pour l'entreprise notamment ceux mentionnés dans le chapitre précédent. Dans le cas d'Hellomoov' nous pouvons lister :

La durée du projet de déploiement du module : l'ampleur de chaque projet peut être importante pour pouvoir choisir développement plus court et ainsi obtenir une

« victoire facile » rapidement pour donner confiance dans le projet global du jumeau numérique.

Le coût du projet de déploiement du module : en fonction de l'état financier de l'entreprise et sa capacité d'investissement.

Les compétences nécessaires au déploiement du module : en fonction de la présence de ces compétences au sein de l'entreprise ou non, la démarche d'intégration de ces compétences avant le début du projet de déploiement ou leurs externalisations sera un facteur déterminant.

Matériel nécessaire au déploiement du module : La présence du matériel nécessaire ou l'acquisition de ce matériel sont des éléments déterminants dans l'ordre dans lequel déployer les modules.

Logiciels nécessaires au déploiement du module : De même que pour le point précédent, leur présence ou non dans l'entreprise est déterminante dans la définition de l'ordre dans lequel déployer les modules.

En plus des éléments qui seront applicables pour la majorité des cas, certains critères sont spécifiques à chaque entreprise, pour Hellomoov' il y en a un principal :

L'impact sur le temps de mise sur le marché : Pour Hellomoov', le temps entre la réception du besoin provenant du client et la livraison du système sont clés, car livrant des systèmes qui n'apportent pas de valeur ajoutée directe au produit du client, Hellomoov' est souvent contactée dans les dernières phases du projet ce qui fait de la rapidité de livraison un critère important pour le client. Pour ces mêmes raisons, le temps entre la demande du client et la première offre proposée par Hellomoov' est aussi critique pour obtenir le contrat, dès lors, les modules d'aide à la conception vont avoir un fort avantage.

Il existe plusieurs manières de trier les modules par ordre d'implémentation, Hellomoov' a opté pour une méthode empirique de définition des priorités. Hellomoov' souhaitait avant le début du projet de développement d'un jumeau numérique mettre en œuvre les modules de simulateur de flux, de maintenance prédictive et le module de contrôle de ligne. Cela étant, après avoir échangé avec la direction d'Hellomoov' sur les avantages et les risques liés à ces modules et la décision a été prise de commencer par le module de simulation, car le gain en temps de mise sur le marché ainsi que le gain commercial ont été considérés comme étant prévalants, surtout au regard du coût de développement qui peut être limité si un environnement de développement intégré open source et gratuit est trouvé.

Dans un second temps, pour compléter l'offre de valeur et augmenter la confiance des clients dans le produit de transfert, alors que certains arrêts machine peuvent être

très coûteux et que le développement de ce module représente un investissement faible, nous avons sélectionné le module de maintenance prédictive comme deuxième module. C'est donc la proposition de valeur faite aux clients ainsi que le faible coût qui a fait que le module de maintenance prédictive a été placé en deuxième position.

Ensuite, pour gagner en indépendance vis-à-vis des clients intégrateurs et ainsi obtenir l'accès aux données terrain des systèmes de transfert qui est un aspect crucial du jumeau numérique, le troisième module choisi par Hellomoov' est le module de contrôle de ligne. Dans le cas du module de contrôle de ligne, le gain en indépendance ainsi que l'opportunité d'obtenir des données de fonctionnement des lignes de transfert ont placé ce module en troisième position.

d. Conclusion

Grâce à la méthodologie proposée dans le chapitre précédent, nous avons pu définir une vision pour le futur jumeau numérique d'Hellomoov' ; de définir les fonctions ainsi que les modules qui composeront le jumeau numérique, de définir les plans d'action pour chacun de ces modules et enfin de définir l'ordre dans lequel ces modules seront mis en œuvre. La suite de la thèse illustre cette mise en œuvre pour les modules du simulateur, de l'utilisation de données du terrain pour de la maintenance prédictive ainsi que le module de contrôle de ligne.

V. Le simulateur de flux

Le simulateur de flux anticipe le comportement d'un dispositif de transfert en « jouant numériquement » la distribution et le cheminement des palettes.

Il est un élément qui peut être utilisé de manière isolée ou intégrée à un ensemble plus global. C'est un module qui ne nécessite pas a priori de connexion avec le système physique dans un premier temps ce qui rend plus simple sa mise-en-œuvre (en particulier pour Hellomoov' dans une phase de premier déploiement), il permet un gain important lors de la mise sur le marché de cellule de transfert, car il réduit fortement les itérations de développement qui prennent du temps au début de la conception de la ligne. Ce gain pour la conception et la mise en service est un élément clé pour l'entreprise compte tenu du délai qui est laissé à Hellomoov' durant la phase commerciale.

Un tel simulateur doit répondre à plusieurs besoins :

- Étant donné que c'est dans la démarche d'un jumeau numérique que ce simulateur est implémenté, il doit être intégrable ; il doit pouvoir s'interfacer avec les autres éléments du jumeau numérique,
- puisse qu'il peut être le premier élément à être mis en œuvre, il doit aussi pouvoir s'utiliser de manière autonome,
- l'objectif est aussi que ce soit un outil qui soit utilisé le plus souvent possible, il doit donc être capable de couvrir la majorité des cas auxquels l'entreprise sera confrontée,
- toujours pour maximiser son utilisation, le simulateur doit être simple d'utilisation et permettre de modéliser et modifier rapidement le ou les éléments à simuler, ce qui autorise le test de plusieurs scénarios,
- il doit rendre un résultat proche de la réalité, en tout cas suffisamment proche pour que les informations données soient utiles à la prise de décision concernant la ligne de transfert. Plus le simulateur est précis plus il est possible de prévoir son fonctionnement long terme. Le niveau de précision nécessaire est subjectif, mais les écarts doivent être suffisamment faibles pour que le régime stable d'une ligne de transfert soit représentatif du fonctionnement réel.

Comme indiqué plus haut, c'est un module d'aide à la conception comme dans l'exemple du jumeau numérique de voiture présenté dans l'introduction.

a. Introduction : choix de développement d'un simulateur

Deux possibilités pour obtenir cet outil doivent être envisagées : 1/trouver une solution commerciale déjà existante, ou 2/développer une solution propriétaire qui répondra exactement aux besoins exprimés.

i. Les solutions préexistantes

Il existe de nombreuses solutions commerciales de simulation de flux, principalement pour les entreprises d'intra logistiques. Des logiciels tel que Visual Components, Flexsim, Arena ou encore Simul8.

L'inconvénient majeur commun à toutes ces solutions est la correspondance des comportements proposés avec ceux des éléments réels d'une ligne de transfert ; la plupart des éléments donnent un trajet aux palettes qui va être particulier et qu'il n'est pas possible de reproduire dans ces logiciels.

Un autre inconvénient que ces solutions peuvent poser est le tarif qui est un facteur de décision important.

ii. Développement d'une solution maison

Le développement d'un logiciel maison pour répondre exactement à nos besoins pose son propre lot de difficultés ; il exige des compétences qui ne sont pas nécessairement présentes et ne sont pas le cœur de métier de la PME. C'est effectivement le cas chez Hellomoov' : au sein de l'entreprise, il n'y a pas de développeurs logiciels. Une personne est responsable de travailler sur le configurateur mentionné précédemment, mais cette personne est déjà complètement occupée par celui-ci. D'un autre côté, externaliser le développement représente des coûts importants et une maîtrise bien moindre de l'outil. La décision d'Hellomoov' a été prise de développer le simulateur en interne.

Une fois le choix d'un développement interne engagé, toute une panoplie de sujets de génie logiciel apparaissent dont principalement le choix de la plateforme de développement utiliser :

- choix de l'IDE (environnement de développement intégré) des logiciels de développement informatique généralistes (tel que NetBeans, GNAT Studio...)
- choix des bibliothèques support à la simulation à proprement parlé : pour la simulation de poste de transfert, les comportements physiques utilisés pour un simulateur de flux, ainsi que la volonté affichée de disposer d'un rendu visuel réaliste nous ont conduit à envisager des moteurs de jeux vidéo (moteur physique, moteur de collisions, rendu 3D...). Par conséquent les recherches se sont portées dans cette direction. Dans cette

catégorie, trois solutions ont été étudiées : Blender, Unity et Godot, bien que d'autres existent aussi (Unreal, etc.).

Blender est un logiciel de modélisation et d'animation tridimensionnel open source. Il permet de modéliser des objets et de les animer en fonction de situations extérieures. C'est un logiciel open source ce qui permet d'être beaucoup plus ouvert et rend son utilisation bien plus libre.

Unity est un logiciel de développement de jeux vidéo. Il intègre des fonctions de mécanique des solides, notamment la gravité (de la simulation continue), la gestion des collisions (simulation par événements discrets). Les logiciels de développement de jeux vidéo ont aussi de nombreuses fonctions d'interface utilisateur (tel que des fenêtres, des zones de saisie, des boutons...)

Godot est, comme Unity, un logiciel de développement et d'édition de jeux vidéo, il a donc lui aussi des fonctions déjà intégrées ; des fonctions mécaniques et des fonctions d'interfaces. Godot est aussi un logiciel libre, open source (sous licence MIT [<https://godotengine.org/license/>]). L'avantage d'un logiciel gratuit et open source, est non seulement en termes de coût bien évidemment, mais aussi (et surtout dans le monde de l'industrie) la garantie de l'utilisabilité de l'éditeur dans la durée, sans problème de licence, avec moins de problèmes de mise à jour.

Un des aspects importants pour Hellomoov' dans le développement de ce simulateur était la propriété intellectuelle qui y était rattachée. L'entreprise a considéré qu'il était critique de conserver la maîtrise et la propriété des modèles de comportement ainsi que des données d'architecture.

Ces éléments établis, l'entreprise a décidé de démontrer que le simulateur de flux pouvait être développé en interne en essayant de développer une version simplifiée dans un premier temps. Par conséquent opter pour une solution libre et gratuite semblait être le plus logique. Godot a été retenu et c'est donc avec ce logiciel que nous avons développé le simulateur de flux.

b. Modèle d'un système de transfert

i. Une architecture de composants paramétrés

Les systèmes de transfert d'Hellomoov' sont des systèmes modulaires, composés de briques élémentaires, qui une fois assemblées permettent de déplacer les produits qui sont dessus. Pour obtenir un système complet fonctionnel, il y a certains éléments nécessaires ;

- Les palettes,
- les unités de transfert,

- les cames,
- les dériviations,
- les points d'arrêts (butée et indexage),
- les cames courtes et
- les retours 180°

Ensemble, ils couvrent la grande majorité de la gamme, mais il sera possible d'ajouter d'autres éléments au fur et à mesure de la poursuite du développement du simulateur. La plupart de ces éléments peuvent être paramétrés ; l'unité de transfert à une longueur, les cames sont placées à une certaine distance le long d'une unité, les dériviatiions ont plusieurs modes de fonctionnement, etc.

En plus de ces éléments physiques, pour fonctionner correctement, un système de transfert nécessite d'autres objets dans le programme pour se rapprocher du fonctionnement réel :

- des points d'approvisionnement ; pour un système réel, c'est le client qui a la charge de mettre en œuvre l'approvisionnement des pièces, mais le comportement des palettes peut être impacté par la présence d'une pièce ou non, par exemple, une dérivation peut envoyer une palette dans un sens ou dans l'autre si la palette est occupée ou non. Un autre comportement impacté par les points d'approvisionnements est celui des points d'arrêt. Si le poste d'approvisionnement est constitué de plusieurs points d'arrêt, il est important de les synchroniser ; que tous les points d'arrêt du poste d'approvisionnement soient occupés pour pouvoir approvisionner les palettes à ce poste,
- des points d'évacuation ; de la même manière que l'approvisionnement des pièces, il est important, pour les mêmes raisons, d'évacuer les pièces du simulateur,
- des sorties de dérivation ; dès lors qu'une dérivation est présente sur une ligne, il va forcément y avoir au moins un point où plusieurs tronçons vont se rejoindre. Pour éviter des chocs dans une came (qui pourraient endommager les pièces d'une ligne de transfert), il est nécessaire de mettre une butée sur chaque tronçon en amont de la sortie de dérivation pour ne permettre qu'à une seule palette d'être dans la sortie de dérivation à chaque instant. Ces butées vont aussi gérer les priorités (quelle palette doit passer en premier si plusieurs sont aux butées de la gestion) et donc agir ensemble. Ce sont les sorties de dériviatiions qui vont gérer cela.

Malgré toutes les combinaisons possibles du fait de la variété d'éléments composant un système de transfert, la logique de construction est quasiment toujours la

même ; une ligne de transfert est toujours une boucle fermée, en commençant par l'approvisionnement des pièces brutes, les palettes sont ensuite amenées vers une succession de points d'arrêt pour effectuer des actions sur les produits présents sur les palettes (des postes de travail en série ou en parallèle si les étapes sont trop longues), parmi les actions on retrouve des actions de productions ou de contrôle. Puis une fois que toutes les actions ont été effectuées, les palettes acheminent les produits vers un poste d'évacuation, enfin les palettes, alors vides, retournent vers le poste d'approvisionnement et le cycle se répète. Entre temps, les palettes vont aussi passer par des points d'arrêt qui ont pour fonctions de gérer le flux, pour éviter qu'elles ne s'entrechoquent lorsque cela n'est pas souhaitable (par exemple dans les cames à 90°, lors d'un virage). Avec ces concepts simples de construction, il est possible de créer des lignes simples, comme une boucle rectangulaire avec uniquement quelques postes, mais il est aussi possible de créer des lignes bien plus complexes avec plusieurs dérivations, voire des dérivations imbriquées les unes dans les autres.

Les nombreux éléments pouvant constituer une ligne permettent principalement d'adapter la structure d'une ligne à l'environnement de son utilisateur ; la taille et la configuration de son atelier, la taille des machines qui sont sur la ligne, etc. La deuxième fonction principale des différents éléments de transfert est de garantir un flux ; parfois, si un poste prend plus de temps que les autres, il est nécessaire de le doubler pour obtenir la productivité souhaitée, il faut alors un dispositif permettant de diviser le flux ainsi qu'un autre pour le regrouper à posteriori ; une entrée de dérivation et une sortie de dérivation.

ii. Typologie de simulation

Lors d'une simulation par événements discrets, le simulateur attend qu'un événement survienne pour calculer ce qui se passera ensuite [Schriber et al. 2012], dans le cas présent des systèmes de transfert à palettes, l'objectif de la simulation est de déterminer la position des palettes. Leur position dépend principalement de l'unité de transfert sur laquelle elles sont (et de la vitesse de cette unité) et éventuellement des accessoires comme des butées ou des cames, mais les palettes sont aussi impactées par les autres palettes sur la ligne. Si une ligne n'était constituée que d'une seule palette, il serait facile de déterminer la position de cette palette ; la palette est sur une unité qui avance à 15m/min et l'unité est longue de 3 m, il faudra donc 12 secondes pour parcourir les 3 m, une fois arrivée au bout, la palette arrive dans une came, et il faut 6,3 secondes pour franchir la came, etc. Le problème survient quand il y a plusieurs palettes sur une même ligne ; car la position des palettes est aussi largement impactée par les autres palettes, si une palette est arrêtée par une butée, elle peut arrêter la palette d'après, ce qui rend bien plus compliquée la simulation, car la position de chaque palette dépend de la position de toutes les autres. Elles sont au contact les unes avec les autres

La méthode que nous avons privilégiée est donc un modèle hybride [Barros Brito et al. 2011] ; les aspects mécaniques d'avance et de gravité utilisent des modèles de simulation continue déjà présents dans le logiciel de développement, en revanche pour le comportement lié aux autres éléments de la ligne de transfert, des scripts de simulations par évènements discrets ont été encodés spécifiquement.

Pour illustrer ce principe, on peut regarder comment les palettes avancent ; une vitesse leur est donnée et à chaque unité de temps, le logiciel recalcule leur nouvelle position. Ce mécanisme est un mécanisme de simulation continue ; le temps est divisé en unité équivalente et les valeurs des variables est recalculé à pour chaque unité de temps en fonction des paramètres nouveaux de l'unité de temps en question. En revanche, pour le comportement des palettes avec les éléments de transfert, le comportement est celui d'une simulation à évènements discrets ; les évènements agissent comme des interrupteurs pendant que la simulation continue, ils vont modifier l'état présent, vont faire évoluer les paramètres de la simulation continue (vitesse, direction...).

iii. Modèles de composant

Tous ces éléments de transfert sont composés de pièces, des pièces statiques, des actionneurs et des effecteurs. Leurs dimensions et leurs dispositions vont définir en partie les architectures qu'il est possible de réaliser. De plus c'est la fonction et le comportement de ces éléments qui va définir comment la ligne dans son ensemble va fonctionner et si elle peut répondre aux besoins qui ont été exprimés et auxquels elle est censée répondre. En exemple, voici la description de deux des éléments les plus communs et les plus critiques d'une ligne de transfert :

Les points d'arrêt



Figure 12 a Photo d'une butée

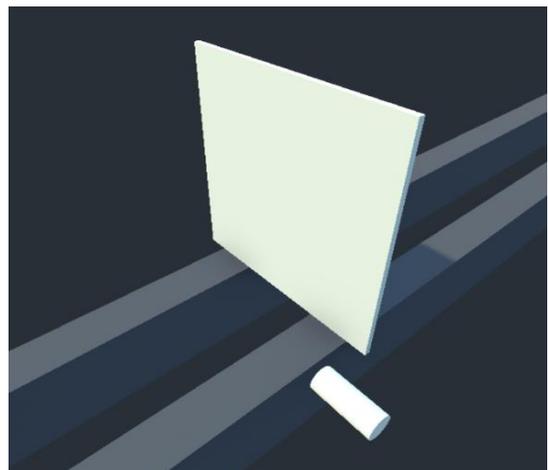


Figure 12 b Représentation d'un point d'arrêt dans le simulateur

La figure 12a est la photo d'une butée (un des points d'arrêts) pour le TLM 2000. On peut voir qu'elle se trouve exclusivement en dessous de la palette, il est donc difficile de la voir, c'est pourquoi pour la représenter dans le simulateur le choix a été fait d'une

représentation abstraite. La figure 12 b est une image extraite du simulateur où l'on peut voir un point d'arrêt, il est représenté par un carré blanc qui symbolise un obstacle qu'une palette ne peut pas franchir. Les points d'arrêt ont forcément un capteur de présence, il a été représenté par un cylindre horizontal.

Les points d'arrêts font partie des éléments les plus importants d'un système de transfert, ce sont eux qui gèrent le flux pour les postes de travail, la gestion des comes (pour éviter que les palettes ne s'entrechoquent) ainsi que les évacuations et les approvisionnements. Les points d'arrêt se situent entre les profilés d'une unité, sous les palettes. Pour le TLM 2000 (la gamme la plus populaire de transfert Hellomooov') la butée est un cylindre qui a un « doigt » qui peut monter ou descendre et qui va se loger dans une rainure de la palette. Cette rainure n'est pas présente sur toute la longueur de la palette, lorsque la palette est suffisamment avancée, le doigt arrive au bout et l'empêche d'avancer plus.

Les points d'arrêt ont des modes de pilotages uniques, ils vont correspondre aux conditions de libération de la palette ; cela peut être uniquement une durée (dans le cas d'un poste de travail par exemple), un capteur de saturation en aval (comme dans le cas d'une gestion de came), un état de la palette (pour un point d'arrêt d'un poste d'approvisionnement), ou une combinaison de plusieurs de ces éléments.

Les dérivations



Figure 13 a Photo d'une dérivation

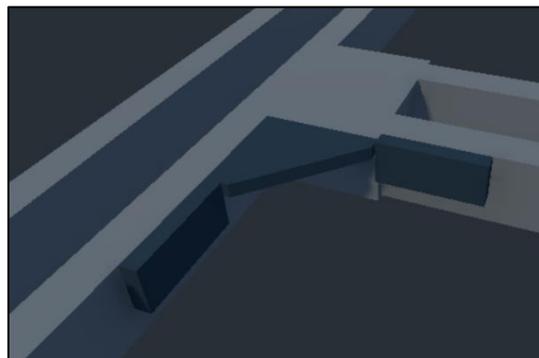


Figure 13 b Représentation d'une dérivation dans le simulateur

Les dérivations sont des éléments qui ont pour fonction de permettre de soit faire tourner une palette sur une autre unité perpendiculaire à la première soit de la laisser continuer tout droit. On peut voir la photo d'une dérivation sur la figure 13a. La dérivation est composée de quatre éléments ;

- une partie triangulaire (isocèle rectangle) qui joint les deux unités, dans cette partie une gorge est usinée pour guider les pions intérieurs lors du virage,
- en amont et en aval de la partie triangulaire on trouve des guides pour guider les pions avant et après la rotation,
- sur la face extérieure de la première unité il y a aussi un guide, celui-ci sert à guider la palette quand elle va tout droit,
- deux actionneurs, deux rampes qui peuvent être en position haute ou en position basse et qui permettent de relever deux pions (soit les pions extérieurs si la palette doit tourner, soit les intérieurs si la palette doit continuer tout droit)

La figure 13 b est une capture d'écran de la représentation d'une dérivation dans le simulateur.

Les dérivations ont plusieurs modes de fonctionnement, différentes manières de définir comment la répartition des palettes se fera. Il y a quatre modes de fonctionnements ;

- Un mode de répartition conditionnel (dépendant du statut de la palette). Les paramètres de ce mode sont la direction par défaut (soit tout droit, soit tourner) ainsi que la condition pour aller dans l'autre sens (est-ce que la palette est occupée ou non, est-ce que le produit qui est présent sur elle est bon ou mauvais),
- un mode aléatoire (où il y a un pourcentage de seuil séparant les palettes qui vont tourner et celles qui vont continuer tout droit). Le paramètre de ce mode est le pourcentage de chance que la palette tourne,
- un mode systématique (où les palettes vont avoir un cycle bien spécifique d'alternance entre un nombre de palettes qui vont continuer tout droit et celles qui vont tourner). Pour ce mode, il y a deux paramètres, le nombre de palettes qui vont tourner et le nombre de palettes d'une période. Par exemple, si la première valeur est deux et la seconde est cinq, alors les deux premières palettes vont aller tout droit, les trois suivantes tourneront, les deux suivantes iront tout droit et ainsi de suite
- un mode de saturation (où les palettes ont une direction par défaut et si cette voie est saturée alors la dérivation va envoyer les palettes dans l'autre direction). Le seul paramètre de ce mode est le sens par défaut de la dérivation. Il faut ensuite nécessairement un capteur de saturation.

Ces modes de pilotage sont identiques à ceux des cames courtes qui ont aussi la fonction de dérivations, mais sur une unité parallèle à la première et non perpendiculaire comme le cas présent.

iv. Interface avec le configurateur

Le simulateur est un élément du jumeau numérique, il doit donc communiquer avec d'autres éléments. En particulier, il communique avec le configurateur, dont le simulateur va recevoir une configuration pour tester le flux. Il faut donc établir un protocole de communication entre ces deux éléments. Un format de fichier de description de l'architecture d'une ligne de transfert a été prescrit à cet effet. Ce fichier peut être importé dans le simulateur ou le simulateur peut être activé par la mise à jour d'un lien.

c. Implémentation d'un modèle sous Godot

i. Implémentation d'un composant

Dans l'éditeur Godot, les éléments sont implémentés en tant qu'objets appelés nœuds, chaque nœud représentant un élément d'un système de transfert (une palette, une unité, une came, un point d'arrêt...). Chaque nœud dans Godot peut avoir autant de sous-composants que nécessaire pour obtenir le visuel ainsi que le comportement souhaité.

Pour la partie visuelle, le sous-composant de base est le « maillage ». Il y a un certain nombre de maillages (de formes) qui sont disponibles et en les combinant (en ajoutant deux maillages ensemble ou en soustrayant un maillage à un autre) il est possible d'obtenir n'importe quelle forme. C'est comme cela qu'un nœud peut avoir une représentation visuelle. Pour le cas d'Hellomoov', pour représenter les pièces, le choix a été de représenter les pièces pour qu'elles soient aussi ressemblantes que possible, mais sans forcément avoir tous les détails pour ne pas alourdir les modèles, l'objectif étant que les pièces soient reconnaissables, qu'il soit facile d'identifier qu'une ligne de transfert était bien d'Hellomoov'.

Pour que cette représentation puisse interagir avec d'autres éléments, on doit gérer les collisions. La collision est un capteur qui va détecter si une autre forme de collision chevauche la première. Si c'est le cas, le script des nœuds va pouvoir réagir.

Pour savoir comment un nœud se comporte vis-à-vis de l'environnement dans son ensemble, il est possible d'ajouter un ou plusieurs sous-composants :

- Un « corps statique » sera indéformable et ne sera pas affecté par la gravité,

- un « corps rigide » sera affecté par la gravité et par des forces ajoutées dans un script, mais ne pourra pas être déplacé par une collision avec un autre objet,
- un « corps cinétique » est affecté par la gravité ou non (grâce à un paramètre à renseigner) et il pourra être déplacé par une collision.

En plus de ces outils, Godot dispose d'autres sous-composants qui permettront d'apporter des fonctions spécifiques en fonction du besoin. Dans le cas du simulateur de flux d'Hellomoov voici certains exemples de ces sous-composants qui ont été utilisés :

- Les RayCast ; le RayCast est un type de capteur, à partir d'un point d'origine, d'une direction et d'une longueur, il va déterminer la distance (si elle est inférieure à la longueur donnée en paramètre) du premier objet qu'il rencontrera. Il sera aussi capable d'identifier l'objet en question,
- les Chemins ; les chemins sont des courbes qui sont paramétrées dans un script,
- les Suivies de Chemins ; sont des objets qui sont prévus pour suivre les courbes des chemins, ils permettront non seulement de suivre la trajectoire, mais aussi d'orienter l'objet auquel ils sont attachés dans le sens de l'avance si c'est désiré

D'autres sous-composants existent pour gérer l'interface utilisateur. On retrouve dans cette famille des fenêtres, des boutons, des zones de saisie, des zones d'affichage...

Une fois modélisé le système on doit lui attacher un script qui décrit son comportement. Il est possible de rattacher un script qui gèrera le comportement de chaque objet. Les scripts sont décomposés en quatre grandes parties :

- La déclaration des variables,
- la fonction « `_ready` » ; c'est une fonction qui n'est exécutée qu'une seule fois ; lors de l'instanciation de l'objet auquel le script est rattaché,
- la fonction « `_physics_process` » ; est la fonction qui boucle à l'infini, et qui définit le comportement à unité de temps
- les callbacks liés à des évènements ; dans cette partie on retrouve des fonctions d'interruptions (comme quand un corps entre dans la zone de collision d'un autre) et des fonctions créées par ailleurs qui sont appelées en fonction des boucles de programme.

Enfin, pour visualiser les éléments, il faut une caméra ainsi qu'une ou plusieurs sources de lumière. La caméra peut être déplacée, et elle peut offrir une vue en perspective ou une vue orthogonale

Ce fonctionnement en nœud permet d'ajouter de nouveaux composants relativement facilement. Par exemple dans le cas d'Hellomoov', un élément qui n'est pas standard, mais qui est utilisé de plus en plus est l'ascenseur. Pour ajouter un ascenseur, il faut créer un nouveau nœud, à ce nœud sera rattaché un maillage pour lui donner un visuel à l'écran. Une fois le visuel établi, pour que l'ascenseur se comporte correctement vis-à-vis de l'environnement, il faut lui ajouter le sous-composant « corps statique » pour qu'il ne soit pas affecté ni par la gravité ni par des collisions si on le considère immobile. Ensuite, il faut qu'il ait une forme de collision pour que les palettes détectent qu'elles sont entrées dans une zone qui correspond à un ascenseur. On peut lui ajouter les éléments d'interface utilisateur qui permettront de le paramétrer (position, hauteur à laquelle il va montrer et descendre, vitesse de déplacement...). Enfin, il faut construire un script pour décrire son comportement lors d'une simulation.

ii. Gestion du comportement

Modèle logique

Pour le fonctionnement du simulateur, nous avons utilisé une logique de comportement proposé dans l'éditeur Godot. Le principe repose sur un échange de données appelé des « signaux ». Un signal est une fonction qui relie deux objets, deux scripts l'un à l'autre. Pour mettre en place un signal, plusieurs éléments sont nécessaires ; il faut une fonction appelée quand le signal est activé, il faut un objet source qui est à l'origine du signal et un objet cible qui va recevoir les données.

Certains signaux sont préconstruits dans Godot, comme la collision. Dans le cas de la collision, l'objet source est la forme de collision, l'objet cible est l'objet auquel la forme de collision est rattachée et l'évènement s'appelle « body_entered ». Quand un corps entre dans la forme de collision, elle envoie les données correspondantes au signal, dans ce cas l'objet qui est entré en collision. Ensuite dans la fonction de l'objet cible, il est possible d'effectuer toutes actions souhaitées correspondant au comportement attendu.

Il est aussi possible de créer des signaux manuellement pour transmettre des données entre les objets. Par exemple, une fois qu'une palette entre dans la zone de collision d'une unité de transfert, l'unité va recevoir l'information qu'une palette spécifique est entrée dans la zone de collisions. Dans la fonction du signal de l'unité, nous avons créé un autre signal qui donne l'ordre d'avance. Après avoir identifié la bonne palette grâce à l'information provenant du signal de collision, l'unité va transmettre via ce signal, une cible ainsi qu'une vitesse pour que la palette puisse poursuivre sa route.

Dans ce simulateur, les seuls éléments qui bougent sont les palettes, il est donc naturel qu'elles regroupent le plus de fonctions et de signaux. Tous les éléments sont synchronisés sur les palettes ;

- pour les éléments de transfert, en leur donnant une cible de vitesse, ou une courbe à suivre,
- pour les postes d'approvisionnement et d'évacuation en ajoutant ou retirant les produits sur les palettes.

Les éléments de transfert ont aussi besoin de connaître leur position et leur orientation dans l'espace pour pouvoir calculer leur sortie (les unités de transfert ont en plus besoin de connaître leur paramètre de longueur qui est renseignée par l'utilisateur lors de la configuration), leur vitesse est soit un paramètre fixe dans l'objet lui-même, ou il est renseigné par l'utilisateur.

Les points d'arrêts, les dérives, les comes courtes, les convergences, les postes d'approvisionnements et les postes d'évacuations ont besoin d'informations spécifiques pour gérer leur comportement. Ce sont des éléments qui participent à la gestion du flux, l'utilisateur doit donc renseigner les données de flux nécessaires. Ces éléments, dans un système réel, sont pilotés via un automate programmable industriel en grafcet ; dans le but de simplifier le pilotage, l'ajout de fonction et d'homogénéiser autant que possible les comportements, nous avons aussi programmé les scripts afférents au comportement de flux de ces objets sous forme de grafcet, bien qu'il ait fallu, au prototypage, adapter les grafkets à un langage textuel. Parmi les grafkets de ces éléments, pour une dérivation par exemple, on trouve le grafket correspondant à l'assignation par saturation :

À l'étape initiale de ce grafket il n'y a pas de palette dans la zone de saturation, pour passer à la première étape, la réceptivité attend l'information qu'une palette est arrivée à la dérivation, ensuite il y a une divergence en ou dans le grafket ; d'un côté la condition est remplie si la zone n'est pas surveillée de l'autre si la zone est saturée. Enfin, en fonction de la condition qui est remplie le grafket passe soit à l'étape pour envoyer la palette tout droit, soit à l'étape pour la faire tourner.

Le fait d'utiliser des grafkets pour piloter les comportements de flux permet aussi d'anticiper le développement futur dans l'objectif de la continuité numérique ; il sera plus simple d'avoir des informations sous forme de grafket pour les réutiliser dans un automate si le contrôle de l'automate en production est au final souhaité.

iii. Orchestration d'une simulation

Une fois que tous les éléments créés, il faut orchestrer le tout, (uniquement avec l'interface utilisateur) jusqu'à obtenir une simulation qui progresse, où l'on voit les palettes se déplacer et les indicateurs évoluer. Pour cette orchestration le simulateur a besoin d'un nœud principal. C'est en général à ce nœud que les éléments d'interface utilisateur sont attachés, ainsi que les caméras et les lumières.

Son rôle est aussi de gérer l'arborescence des objets qui sont ajoutés. Comme précisé plus haut, même si le simulateur doit être capable de fonctionner en autonomie, il fait quand même partie de l'ensemble qu'est le jumeau numérique. Pour pouvoir être utilisé de manière autonome, il est possible d'ajouter des éléments directement dans le simulateur, pour ce faire il y a un menu permettant de sélectionner l'objet que l'on souhaite ajouter. Une fois sélectionné, il faut le paramétrer (position, vitesse pour une unité, mode de fonctionnement pour une dérivation...). Il est ainsi possible de construire une ligne complète pour la simuler. En revanche, le simulateur est aussi intégré ; un fichier peut être généré par le configurateur et être lu par le simulateur pour créer l'arborescence de la ligne préalablement construite dans le configurateur.

La syntaxe du fichier provenant du configurateur permet aussi d'assurer une autre fonction du nœud principale ; la sauvegarde et le chargement de ligne précédemment construite ; le processus de construction d'une ligne dans le simulateur directement prend un temps d'environ une heure pour les lignes les plus simples jusqu'à une demi-journée pour des lignes plus complexes. Devoir reconstruire ces lignes à chaque fois serait trop coûteux. Nous avons donc ajouté une fonction de sauvegarde et de chargement de ligne. Les informations de la ligne sont enregistrées de la même manière que le configurateur les enregistre pour les exporter vers le simulateur, la seule différence est qu'il y a potentiellement plus de données dans un fichier sauvegardé depuis le simulateur, car il peut contenir des données de flux, qui ne sont pas gérées par le configurateur.

Le nœud principal est aussi celui qui va gérer la navigation dans la simulation, c'est lui qui va lancer la simulation et l'arrêter. C'est aussi lui qui va créer les courbes pour les chemins que certains objets utilisent (les cames courtes et les retours 180°). Il va aussi gérer le rafraîchissement de l'affichage des indicateurs de la simulation (temps, takt-time).

Pour que les signaux mentionnés plus haut fonctionnent, ils doivent être connectés entre l'objet source et l'objet cible, le nœud principal a aussi la fonction de s'assurer que tous les objets soient correctement connectés entre eux. Pour ce faire, il vérifie que toutes les fonctions de signaux soient bien rattachées à un objet source.

d. Exemples de simulations sur des études clients

Une fois le simulateur suffisamment avancé pour être utilisable, une affaire a été choisie pour mettre en application le développement.

i. Cahier des charges clients

Le client travaille dans l'industrie de la parfumerie et la machine qu'il souhaite avoir a pour fonction de traiter des bouteilles en aluminium (sertissage de bouchon, contrôle...) qui contiendront des produits pour la production. Le client étant déjà un utilisateur de transfert Hellomoov', il est familier avec la technologie et la manière dont les lignes sont conçues, il a donc pu exprimer son besoin sous le format d'une ligne qu'il a dessiné :

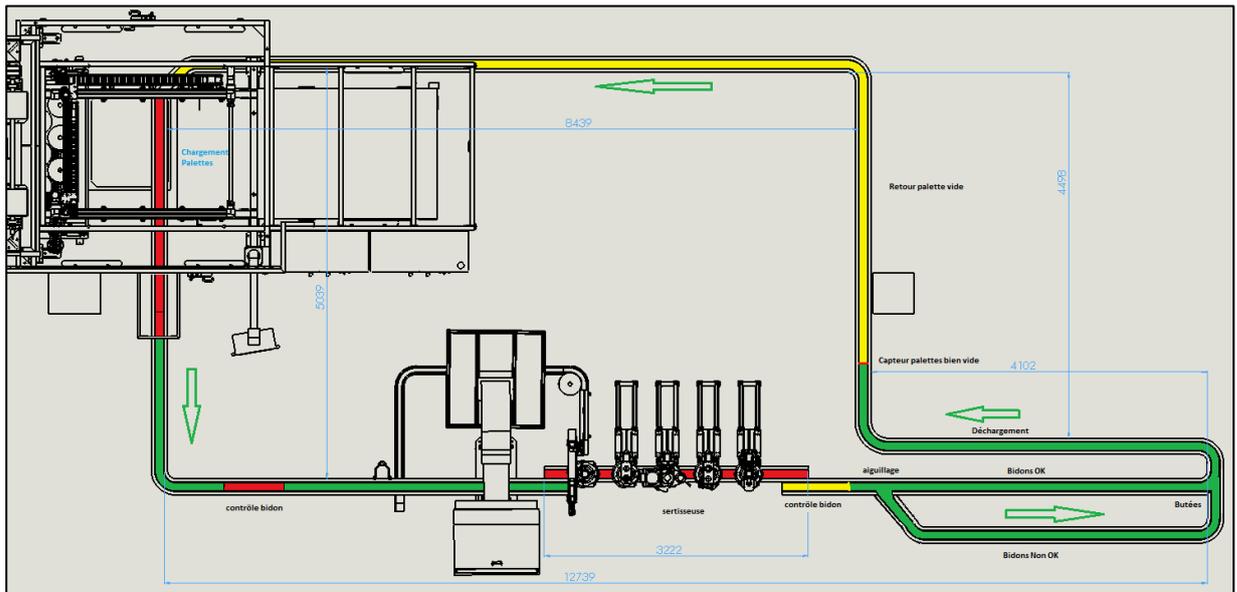


Figure 14 Schéma représentant le besoin du client

La figure 14 est le schéma qui a été envoyé par le client ; sur ce schéma, les données qui sont communiquées sont les positions et les dimensions des postes de travail sur la ligne ainsi que les caractéristiques du local où sera installée la ligne (notamment un poteau carré représenté à droite de la ligne). Le client a accompagné le schéma d'information de flux supplémentaires ; les temps aux postes, ainsi que le takt time qui est recherché. Ces données permettent de commencer la conception d'une ligne.

ii. Transformation en modèle via l'interface du simulateur

Le simulateur étant encore en développement, la conception de la ligne a d'abord été réalisée avec les moyens conventionnels ;

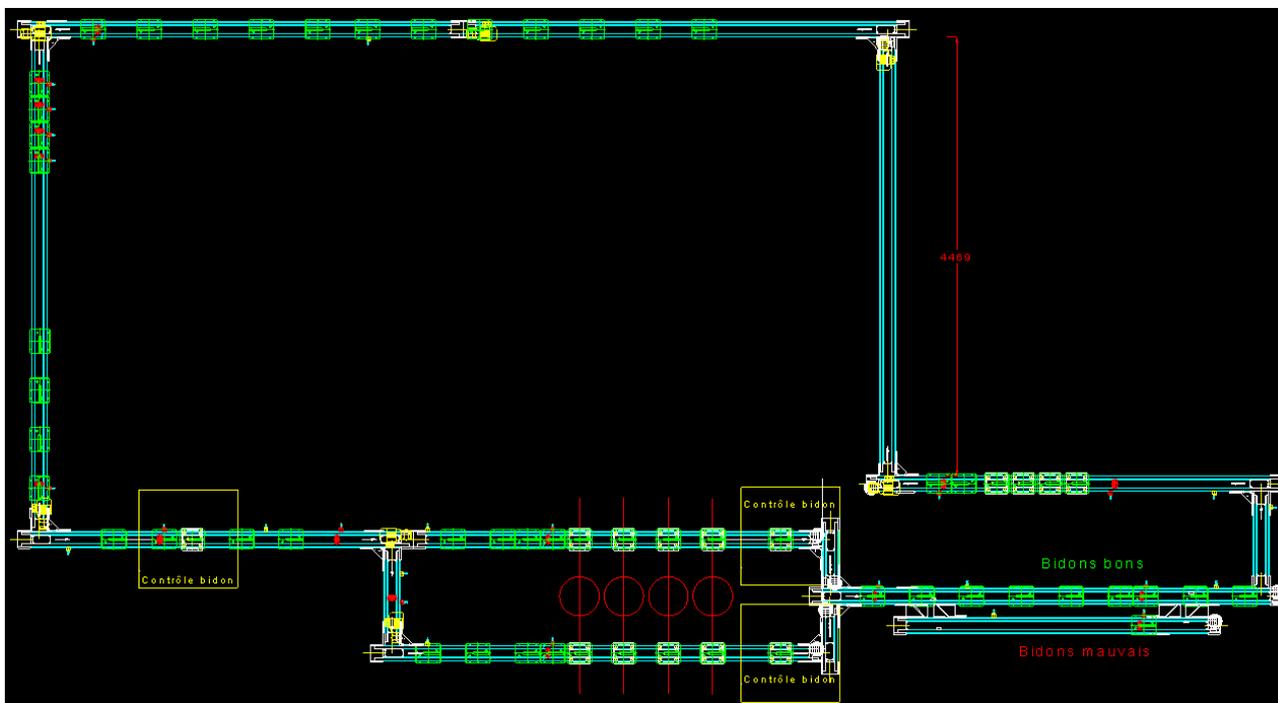


Figure 15 Plan coté de la première solution proposée

La figure 15 est le plan côté de la conception qui a été réalisée par le technicien de conception. La principale observation que l'on peut faire est la branche parallèle supplémentaire qui a été ajoutée, en effet, compte tenu des données de flux ainsi que du takt time requis par le client, il n'était pas possible de réaliser la ligne qu'avec une série de postes de travail, il a donc fallu dédoubler ces postes. Grâce à ce plan, la ligne a pu être construite dans le simulateur ; chaque élément ajouté l'un après l'autre.

iii. Démonstration de simulations

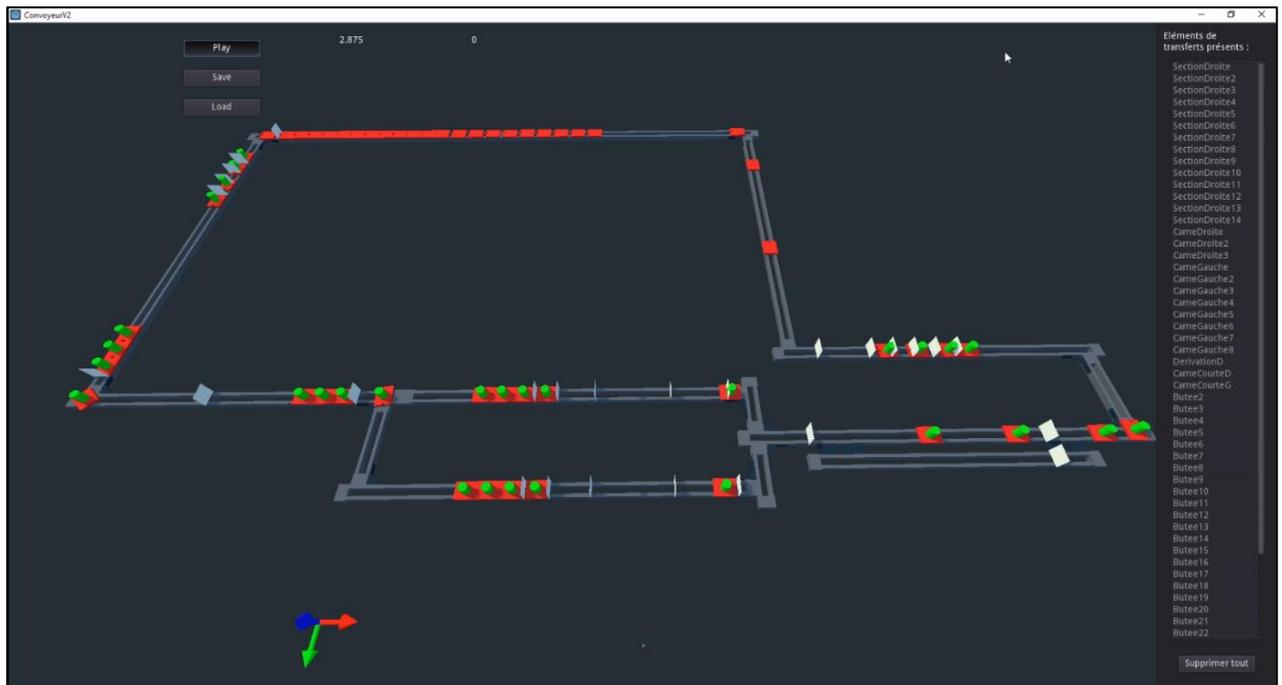


Figure 16 capture d'écran de la simulation de la première solution

La figure 16 montre une capture d'écran de la simulation en cours de fonctionnement. Cette simulation a permis de vérifier que la conception telle que proposée ne permet pas d'atteindre le takt time recherché. En parallèle de la première conception, le client a fait évoluer ses besoins, alors en combinaison, avec le takt time non atteint, une nouvelle architecture a été proposée ;

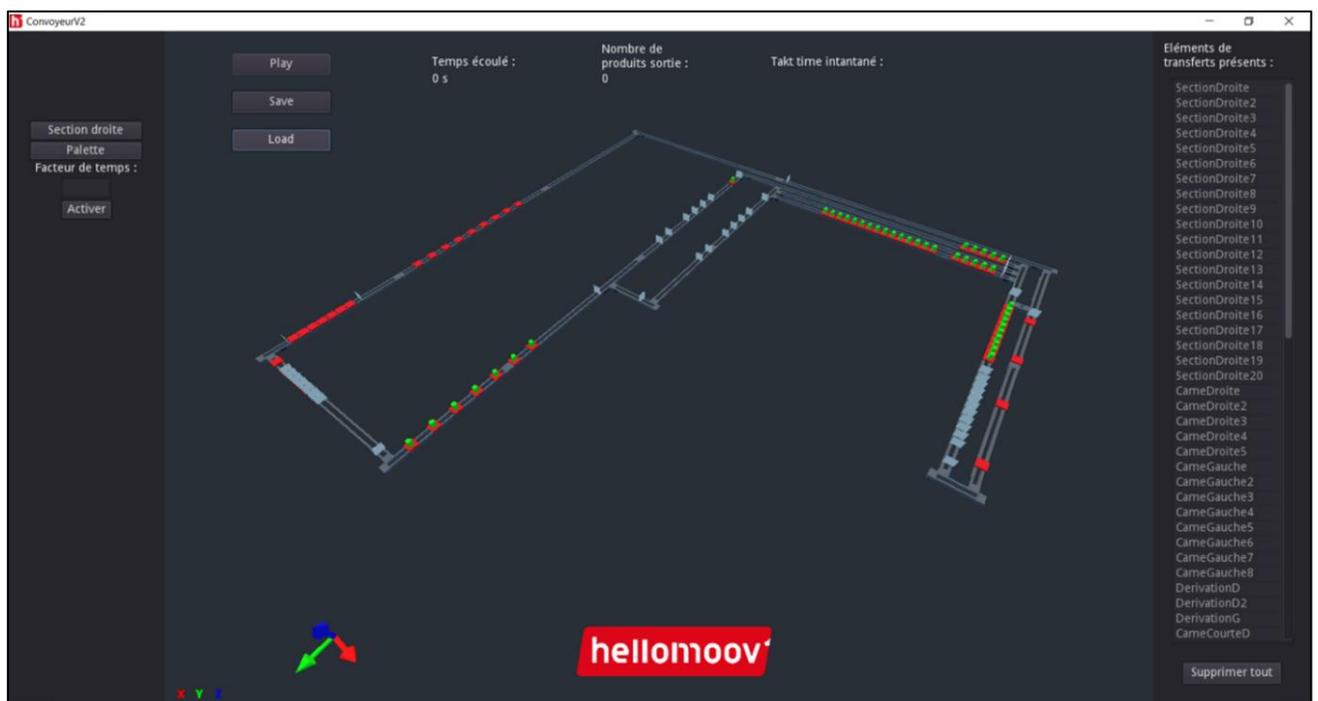


Figure 17 Capture d'écran de la simulation de la deuxième solution

La figure 17 montre la capture d'écran de la seconde conception modélisée dans le simulateur. Dans cette seconde simulation, l'objectif de takt time a été atteint, nous avons donc pu confirmer que la conception allait répondre aux besoins du client.

Cependant, basées sur ces deux simulations quelques modifications minimales ont été apportées et donc d'autres simulations ont été réalisées.

iv. Valeur ajoutée

Le simulateur, bien qu'en cours de développement, a déjà permis de déterminer que la première conception de la ligne n'allait pas permettre d'obtenir les résultats escomptés. Des modifications ont pu être apportées et re-simulées pour confirmer l'efficacité de ces modifications. Le simulateur a permis de se rendre compte de ce problème au plus tôt pour le corriger dans de meilleures conditions

e. Retour des utilisateurs

Le simulateur de flux est un outil du jumeau numérique qui est destiné aux techniciens chez Hellomoov', pour une utilisation en interne. Une fois que le simulateur a été utilisé avec succès (dans le cas décrit précédemment) il a été présenté aux techniciens devis. Des remarques ont été remontées et ont été prises en compte pour la suite du développement (tel que la possibilité de faire des modifications de ligne pour simuler des scénarios différents pour une même ligne).

Une fois les fonctions principales du simulateur réalisées, il est capable de répondre aux besoins initialement exprimés lors de la définition du périmètre. Une formation a été organisée pour les techniciens. La formation est découpée en trois parties majeure, la première est la description du simulateur et des éléments qui sont présents dans cet outil, une deuxième partie où nous expliquons le fonctionnement de chacun des éléments du simulateur, enfin, une mise en application de chacun via un exemple commun, en l'occurrence la ligne présentée précédemment.

En annexe 2 on retrouve le support de présentation de la formation au simulateur.

À l'issue de cette formation, des bugs ont été remontés pour être corrigés (par exemple des erreurs d'affichages des valeurs, ou des éléments qui ne sont pas censés être affichés en permanence et qui le sont) ainsi que des propositions d'amélioration du simulateur qui seront portées lors de la phase d'amélioration continue (tel qu'une nouvelle manière de modifier les lignes pour simuler plus facilement différents scénarios).

Dans la globalité, le simulateur a été accueilli très favorablement. Les techniciens à qui nous avons présenté l'outil étaient tous d'accord de l'intérêt du module et de l'avantage qu'il peut apporter. La réalisation du simulateur, les possibilités de

l'appropriation du logiciel et de la liberté d'amélioration qui proviennent du choix de l'avoir développé en interne ont aussi été des facteurs de satisfaction de la part des techniciens à qui nous avons présenté le simulateur.

f. Conclusion

Le simulateur de flux présenté ici a été développé et est en cours de déploiement avec succès chez Hellomoov'. Il fonctionne et donne des résultats cohérents sur des études clients, il a notamment permis de constater qu'une conception ne serait pas capable de répondre au besoin avant que la moindre pièce ne soit commandée ou fabriquée, permettant ainsi de reconcevoir la ligne en évitant un coût financier et en temps non négligeable pour Hellomoov'.

Ce simulateur est né de la volonté de développer un jumeau numérique, il a été choisi comme premier module notamment dû aux avantages stratégiques qu'il apportait (réduction du temps de conception pour répondre aux besoins du client le plus rapidement possible). Le fait d'avoir choisi de le développer en interne plutôt que de prendre une solution déjà existante sur le marché et venu de la combinaison de contraintes techniques (la modélisation suffisamment juste du comportement des éléments de transfert) ainsi que de décision stratégique de l'entreprise (la conservation de la propriété intellectuelle du comportement, le risque de payer pour une solution qui ne répondait pas suffisamment aux besoins de l'entreprise...).

C'est une brique du jumeau numérique et il a été pensé en tant que tel ; il est intégrable et déjà en partie intégré, étant capable d'échanger des données avec le configurateur. Le succès de ce simulateur valide la stratégie méthodologique de construire un jumeau numérique via une séquence de modules intégrables.

VI. Expérimentation et Récupération de mesures de données sur le terrain

Comme mentionné au chapitre 3, les éléments principaux du jumeau numérique sont les données de configurations, les modèles de comportement et des données provenant du terrain. Les modèles caractérisent des couplages forts entre de nombreux phénomènes physiques propres à chaque type de produits. L'enregistrement des données de configuration commence avec le simulateur, et peut être complété par des données provenant du terrain. Dans un jumeau numérique, les données du terrain peuvent avoir plusieurs utilisations :

- Rendre compte de l'état du système réel (« monitoring » : on parle alors de digital shadow),
- retourner des données permettant d'améliorer et d'individualiser les modèles de comportement : phase de calibration du modèle,
- anticiper des comportements pour réaliser d'autres fonctions du jumeau numérique.

Face à un comportement complexe à modéliser, l'enregistrement a pour but de créer un nouveau modèle de comportement et de le nourrir. De nombreuses données peuvent être enregistrées et être utilisées pour modéliser un comportement d'un système de transfert. Dans le but de simplifier et de valider ce processus, il semble plus efficace d'enregistrer une donnée de capteurs usuels et qui apporte de l'information de comportement. L'un des aspects essentiels d'un système de transfert est le temps de parcours des palettes. En effet, la valeur ajoutée finale d'un tel système est un flux ; le déplacement d'un produit dans son environnement. Il est très facile d'obtenir de telles valeurs, car ces systèmes utilisent la position des palettes pour les postes de travail par exemple. Il suffit d'enregistrer le moment où une palette est à un endroit, puis à un autre pour avoir une image du flux via le temps de passage d'une palette. De plus, chez Hellomoov' on considère que le temps de parcours est directement impacté par l'état de santé de certains éléments ; les pions de guidages des palettes et les bandes de convoyage ; c'est une connaissance experte que nous souhaitons modéliser. L'objectif est donc d'obtenir un modèle de comportement représentant l'évolution de l'état de santé de certaines pièces d'une ligne de transfert en fonction de signaux faibles (temps de passage) et ainsi obtenir un modèle se dirigeant vers celui de la maintenance prédictive. Ce chapitre est donc la première étape vers l'obtention de ce module de maintenance prédictive. Dans cette démarche, c'est un module du type de ceux présentés dans l'exemple du jumeau numérique de ligne de production dans l'introduction.

L'idée de cette expérimentation est donc d'atteindre deux objectifs ; récolter des données du terrain pour le jumeau numérique et tester un système pour déterminer si le temps de parcours peut être un indicateur de l'état de santé des pions de guidage et des bandes de convoyage.

L'autre élément important pour cette problématique est la mécanique avec laquelle les données vont être recueillies. Il existe de nombreuses technologies qui permettent de réaliser cette fonction. Dans le cadre de ce travail, cet aspect n'est pas étudié, un choix a été fait en fonction du matériel disponible à l'atelier, mais il ne présume pas de la généralité de cette solution.

a. Hypothèses

Via cette expérimentation, on cherche à valider plusieurs hypothèses :

- il est possible, de manière fiable, de mesurer et d'enregistrer des données provenant du système physique, dans le cas présent le temps de passage d'une palette,
- grâce à ces mesures, il est possible de suivre l'évolution du temps de passage des palettes,
- grâce à ces mesures et à aux variations du temps de passage, il est possible d'extrapoler des informations sur l'évolution de l'état du système de transfert qui peut aller jusqu'à la nécessiter une intervention (de maintenance),

b. Principe

Le matériel, une boucle de transfert à disposition, a permis de monter un banc d'essai divisé en deux parties ;

- le transfert traditionnel,
- le système d'acquisition et d'enregistrement des données.

Le système de transfert est une boucle rectangulaire de transfert TLM 2000 (pour des palettes d'une largeur de 200 mm) qui mesure 1 020 mm par 2 860 mm et a une vitesse de 15m/min. Sur cette boucle est positionnée une butée temporisée qui vient arrêter toutes les palettes pendant environ 1,4 seconde. Cette butée a pour fonction de s'assurer que des palettes ne vont pas venir en contact les unes avec les autres dans un virage (les systèmes de transfert n'étant pas prévu pour).

Le système d'acquisition est composé de deux capteurs de position (inductifs) et d'une carte de contrôle à microcontrôleur Arduino avec un module de carte SD. Le premier capteur est positionné 560 mm en aval de la butée et le second est positionné en

aval de la came, à 410 mm. Cela permet d'intégrer une came dans la mesure à l'endroit où l'on a le plus de chance de voir une variation, notamment attribuable à l'état des pions.

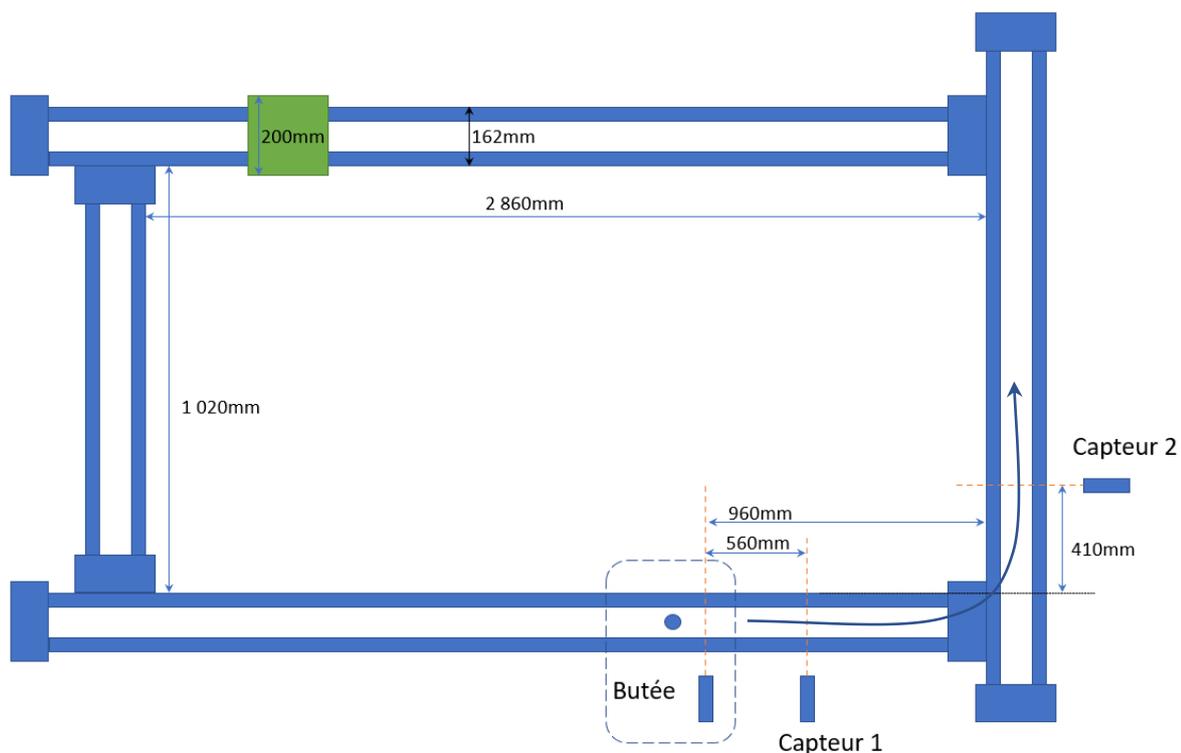


Figure 18 Schéma de banc d'essai

On peut voir sur la figure 18, le schéma représentant la ligne sur laquelle l'expérimentation a été menée. C'est un système spécifique, mais caractéristique des technologies utilisées chez Hellomoov'.

Le fonctionnement du banc est le suivant ; le microcontrôleur enregistre, chaque fois qu'une palette passe devant un capteur, l'heure de son horloge dans un fichier (respectivement capteur1.csv et capteur2.csv). Après une campagne de mesure, on a donc deux fichiers qui sont composés d'une liste de temps, chaque temps correspondant au passage d'une palette devant un des capteurs. On peut donc déterminer le temps de passage d'une palette entre ces deux capteurs en faisant la différence entre le temps du capteur 2 et le temps du capteur 1. Cependant, les palettes ne sont pas identifiées, le système d'acquisition ne sait pas différencier les palettes.

Le programme est simple ; les capteurs sont raccordés sur des entrées analogiques (pour s'assurer qu'un niveau sera lisible), à chaque itération du programme, la valeur de chaque capteur est lue et si la valeur est supérieure à un seuil préalablement défini, un dispositif Arduino enregistre dans un fichier (soit capteur1.csv soit capteur2.csv) le temps écoulé (en millisecondes) depuis que la carte est alimentée. Pour les valeurs des seuils, il a fallu expérimentalement déterminer les valeurs, on a constaté que lorsque les capteurs

sont désactivés les valeurs lues se trouvaient autour de 150 mV à 200 mV et que lorsqu'ils étaient activés, les valeurs gravitaient autour de 350 mV, le seuil a donc été fixé à 250 mV.

Pour une expérimentation comme celle-ci, il y a un certain nombre de paramètres sur lesquels il est possible d'influer pour tester s'ils ont un effet sur le paramètre étudié. Les moteurs tournent à une vitesse constante, il n'y a pas de boucle de régulation donc la vitesse des moteurs et donc des bandes n'est pas un paramètre. Les seuls paramètres sur lesquels il est possible d'agir sont ;

- la charge sur chaque palette,
- l'état des pions de guidage,
- l'état des bandes des unités.

c. Réalisation

Pour conduire cette expérimentation, plusieurs vagues de mesures ont été menées, avec chacune leurs paramètres en fonction des résultats recherchés.

i. Distinguer les palettes

La première vague de mesure a pour objectif de confirmer la première hypothèse ; il est possible d'enregistrer le temps de passage des palettes, mais aussi de vérifier que grâce à ces données il est possible de distinguer les palettes. Cette première vague n'a donc pas besoin de durer très longtemps, juste suffisamment pour y voir une périodicité et vérifier qu'elle correspond au nombre de palettes sur le transfert.

Cette première vague a été conduite pendant une heure

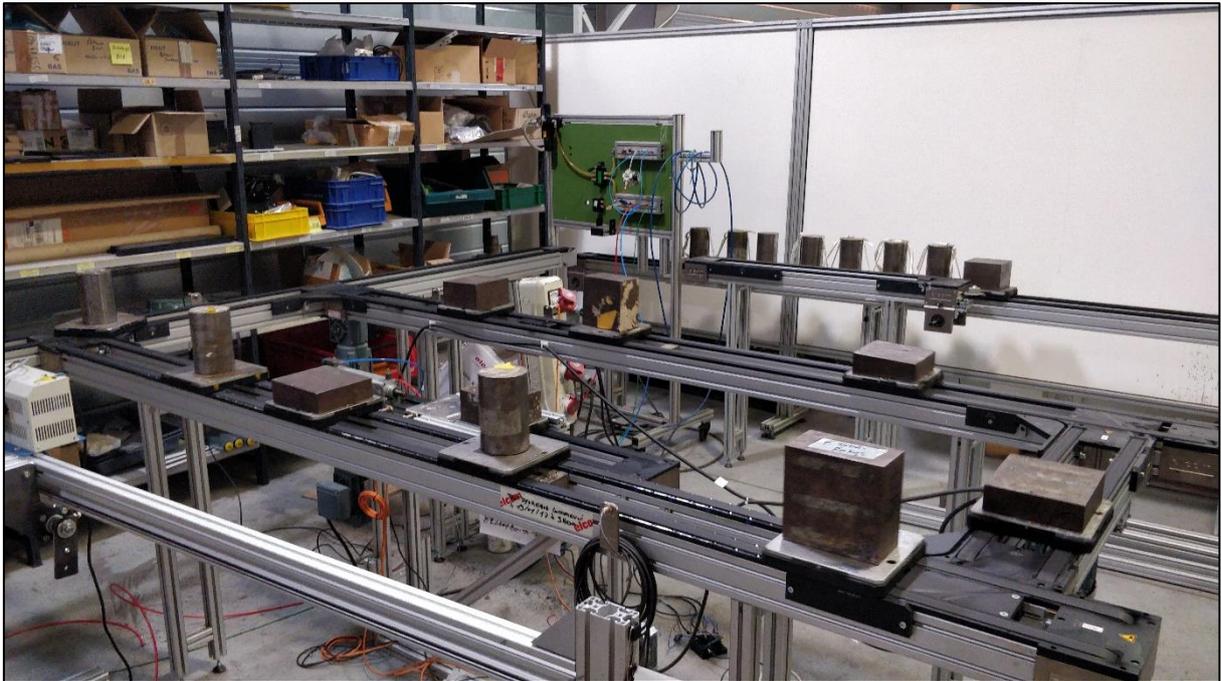


Figure 19 Photographie de la première vague de mesure de l'expérience

La figure 19 montre le montage de l'expérience pour la première vague, avec les palettes qui étaient sur la ligne (des lopins d'acier, de formes et de charges variables).

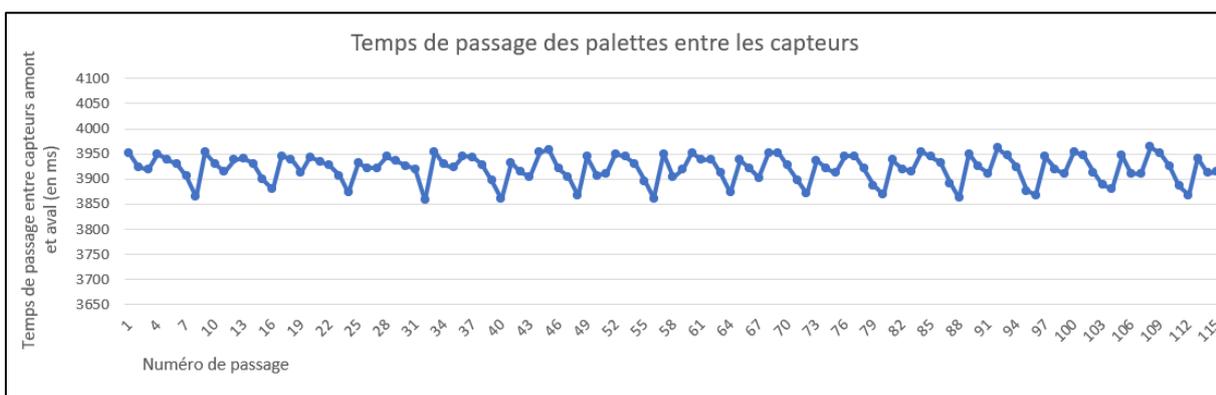


Figure 20 Extrait du graphique de l'historisation des temps de passage des palettes entre les capteurs

La figure 20 est un extrait de la représentation des temps de passage des palettes dans le temps. Après avoir chargé les données des deux fichiers dans un tableur, on calcule la différence, ligne à ligne entre les valeurs du capteur 1 et du capteur 2 pour obtenir le temps de passage de chaque palette. Cependant, comme précisé plus haut, le système d'acquisition ne sait pas distinguer les palettes. La première vague de mesure a aussi été

conduite pour cela. Sur la figure 20, le premier point (à 3 951 ms) correspond à la différence entre le temps auquel la première palette est passée devant le capteur aval (capteur 2) et le temps auquel cette même palette est passée devant le capteur amont (capteur 1). Ce qui signifie que la première palette a mis 3 951 ms pour parcourir la distance entre le capteur 1 et le capteur 2. Le deuxième point représente le même calcul pour la palette suivante. S'il n'y a qu'une seule palette sur le circuit, il correspond au temps du deuxième passage de cette palette.

Sur le graphique de la figure 20, on peut voir une périodicité des temps de passage. En calculant la période de ces temps de passage, on retrouve le nombre de palettes présent sur le banc d'essai au moment de la vague de mesure. On peut donc conclure qu'il est possible de compter les palettes sur un tronçon et par conséquent de les identifier. Cependant, il est important de noter que cette méthode d'identification des palettes est limitée ; elle fonctionne uniquement dans le cas où les palettes ne changent pas d'ordre entre deux passages devant la zone de mesure, car dans le cas contraire, il n'y a plus de périodicité il n'est donc plus possible de déterminer la période et par conséquent d'identifier les palettes.

ii. L'effet de la masse embarquée et de l'état des pions

Pour confirmer qu'il est possible de distinguer les palettes en fonction de la masse embarquée et de l'état de pions, quatre vagues expérimentales ont été menées ; une avec une palette vide et des pions neufs, une deuxième avec la palette chargée avec 20kg et toujours les pions neufs, la troisième la palette est toujours chargée, mais les pions ont été remplacés par de vieux pions qui commençaient à être abimés et enfin, la dernière vague avec la palette vide et les pions abimés

Les données de la première de ces vagues ont montré qu'il y avait une variation périodique journalière. L'hypothèse retenue est que cette variation provient de l'évolution de la température et de l'hygrométrie dans l'atelier. Cette hypothèse n'a cependant pas encore été confirmée. Pour s'affranchir de cette variabilité, chaque vague de mesure a été menée pendant 24 h pour que les échantillons soient comparables.

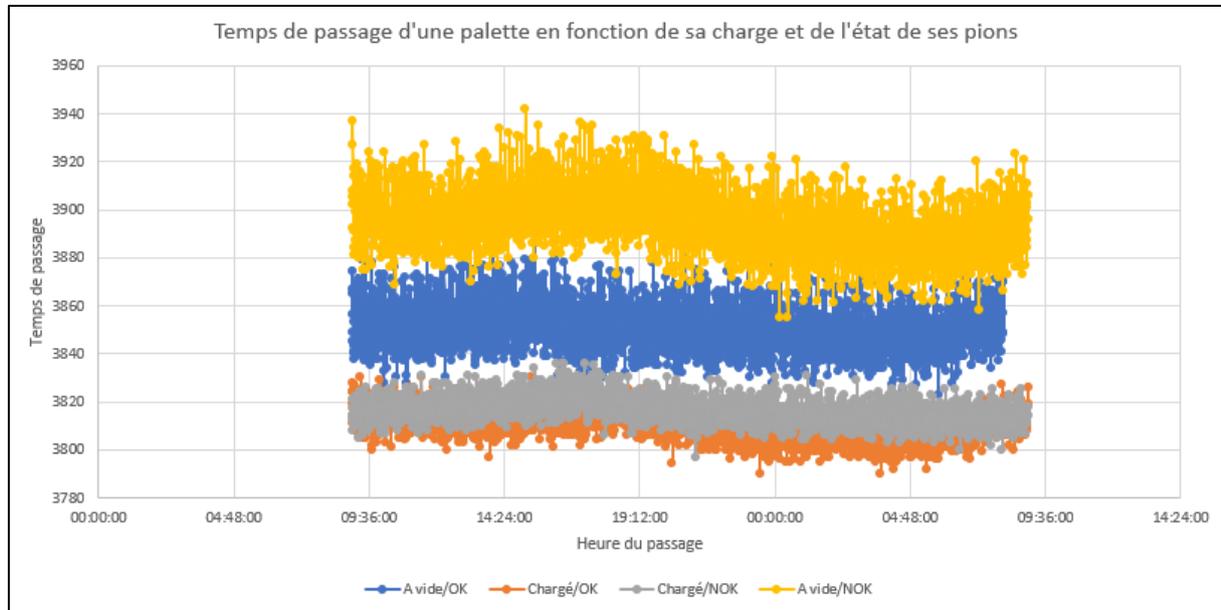


Figure 21 Graphique des temps ordonnés de passages des palettes en fonction de la charge et de l'état des pions sur chacune d'elles

On peut voir sur la figure 21 que les fluctuations diurnes sont faibles au regard des variations de l'état de pions lorsque la palette est à vide. On peut donc en conclure que cette méthodologie permet d'estimer l'état des pions dans des zones où les palettes sont vides. Il devrait même être théoriquement possible, après avoir confirmé que cette variabilité provient bien de la température et de l'humidité, d'obtenir un niveau de précision supérieur en effectuant les vagues de mesure à isopression et isotempérature

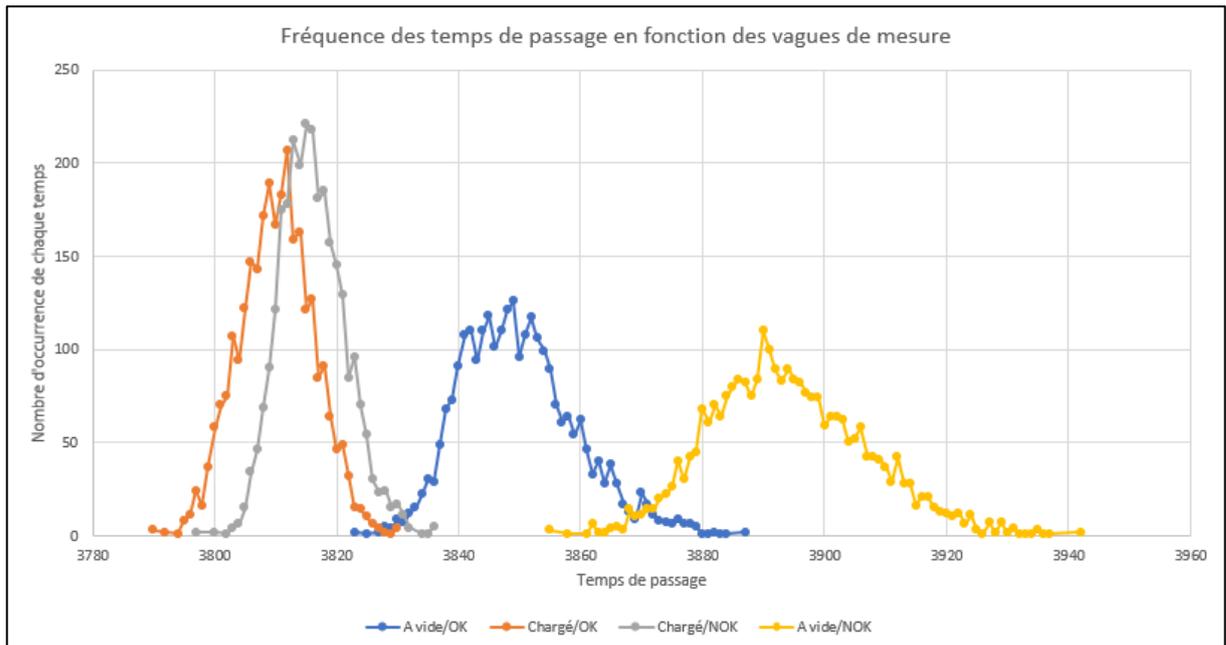


Figure 22 Graphique de la fréquence d'apparition des temps de passage en fonction de la charge et de l'état des pions

Sur la figure 22, on voit quatre courbes correspondant aux différentes vagues de mesure. On constate sur ce graphique, que quand la palette est chargée, elle met moins de temps à parcourir la distance. C'est conforme aux attentes, car la palette chargée adhère mieux aux bandes et a plus d'inertie ce qui l'entraîne plus facilement dans la came. On peut aussi voir, même si c'est moins clair, que quand la palette est chargée, les pions usés ont tendance à faire que la palette prend plus de temps pour couvrir la distance, la moyenne de la palette vide avec les pions neufs est à 3 850 ms avec un écart-type de 9,5 ms alors que lorsque les pions sont usés (palette toujours à vide) la moyenne passe à 3 894 ms et l'écart-type à 12,7 ms. C'est aussi conforme aux attentes, car les pions usés vont avoir tendance à plus accrocher dans la came de rotation ce qui va ralentir la palette. Les différences entre les pions quand la palette est chargée sont faibles, autant en moyenne (3 810 ms et 3 816 ms) qu'en dispersion (6,1 ms et 5,3 ms), il semble donc compliqué d'utiliser cette méthodologie pour déduire l'état des pions lorsque la palette est chargée, en revanche, c'est bien plus prometteur si elle est vide.

iii. L'effet de l'état des bandes

Après avoir montré l'impact de l'état des pions et de la masse embarquée sur la palette, les vagues suivantes avaient pour objectif d'observer le comportement en fonction de l'état des bandes du système de transfert. La première manière dont les bandes peuvent être altérées est avec un agent chimique, par exemple une graisse. Les bandes ont donc été saturées en graisse avant de commencer les mesures de temps de parcours.

Pour cette vague de mesure, une palette chargée avec des pions neufs a été utilisée et les données de la vague de mesure précédente ont servi de référence. Pour s'affranchir de la fluctuation diurne, la mesure a été prolongée, elle a duré un peu plus de cinq jours. Les résultats ont donc été réduits pour les deux vagues pour pouvoir être comparés.

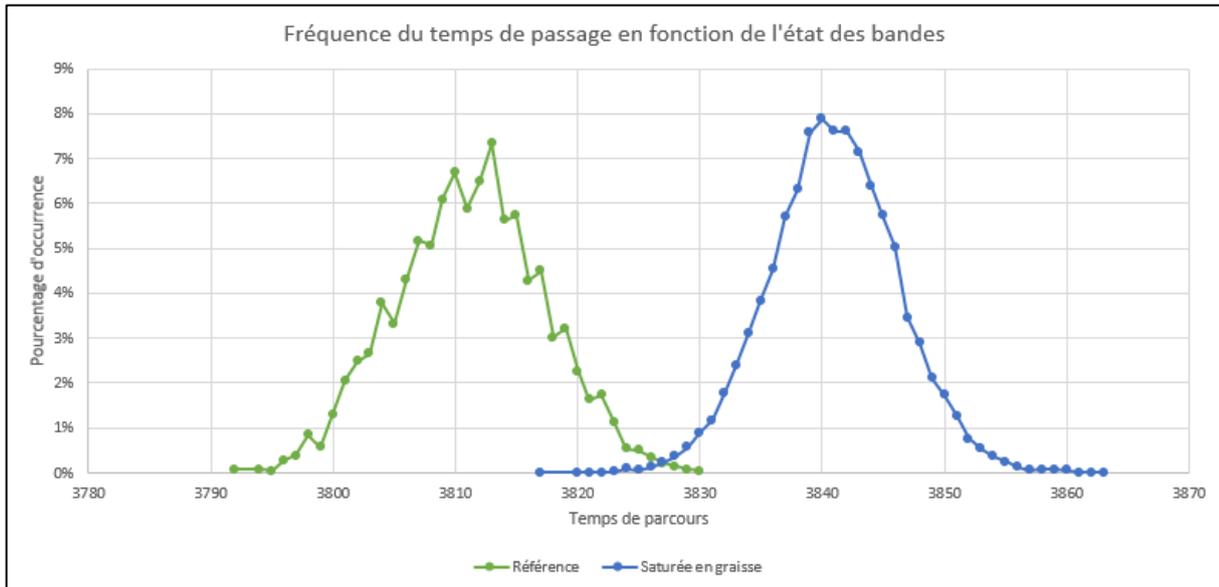


Figure 23 Graphique de la fréquence d'apparition des temps de passage en fonction de l'état des bandes de convoyage

Sur la figure 23, on peut voir que là encore, il y a un écart significatif entre les deux paramètres, même avec la palette chargée ce qui montrait moins de différence lors de la vague de mesures précédentes. Comme pour la vague précédente, les résultats sont conformes aux attentes, les bandes étant graissées, la palette adhère moins bien ce qui fait qu'elle met plus de temps à passer la came.

Il devrait donc pouvoir être possible de détecter si les bandes ont été contaminées par un agent gras qui viendrait impacter l'adhérence des bandes.



Figure 24a et 24b photographies des feuilles abrasives servant à endommager les bandes de convoyages

Le deuxième type d'altération qui peut être appliqué aux bandes est une attaque physique. Dans certains environnements, de la poussière ou des copeaux peuvent se déposer sur les unités de transfert et les endommager prématurément, mais cela peut

aussi correspondre à l'usure naturelle des bandes. Pour simuler cette altération, des bandes de feuilles abrasives ont été scotchées sur le système de transfert et une charge a été placée dessus pour que les bandes, en tournant normalement, viennent frotter contre les feuilles abrasives (figure 24a et b).

Étant donné que pour cette vague l'action sur les bandes n'était pas ponctuelle, mais continue (de l'usure accélérée), ce n'est pas un état qui est étudié, mais une évolution, l'enregistrement a duré plus longtemps, la vague de mesure a duré quinze jours. Pendant ces quinze jours, la palette s'est bloquée dans la came. Cela n'a été observé que 36 h après le blocage. Il y a donc une période sans données.

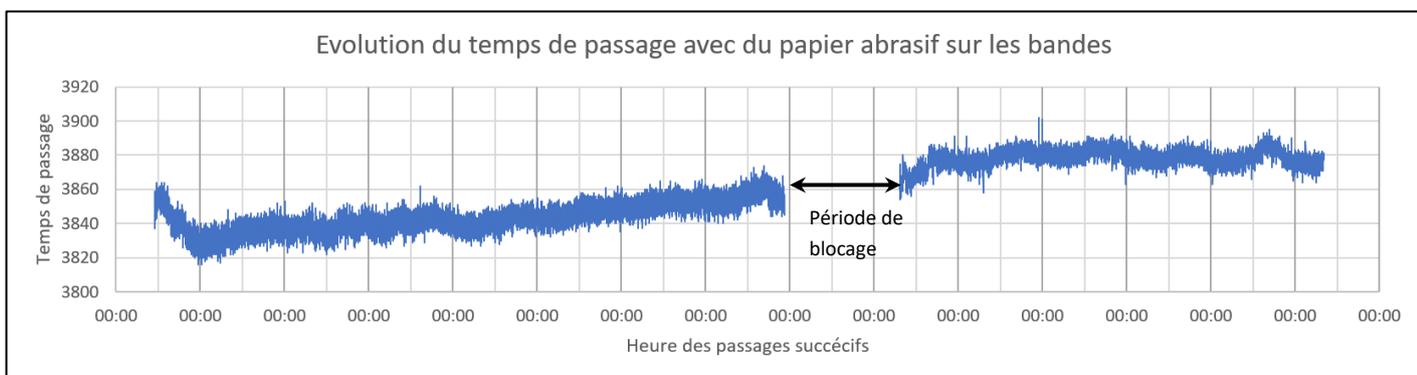


Figure 25 Graphique de l'évolution du temps de parcours au fur et à mesure de l'endommagement des bandes de convoyages

Avant de lancer la vague de mesure, les bandes ont été nettoyées mécaniquement dans un premier temps (avec des chiffons) puis avec un produit dégraissant pour retirer le plus de graisse possible sans les affecter plus, cependant on peut voir sur la figure 25 dans les premières heures que le temps de passage diminue drastiquement, l'hypothèse est que le papier abrasif a, dans un premier temps, retiré les restes de graisse sur les bandes, avant d'avoir l'effet d'usure. On peut voir à partir de minuit le premier jour que le temps croit progressivement pendant sept jours, jusqu'au blocage de la palette. Après ce blocage, il continue à croître, même si c'est moins significatif.

Il semble donc possible de détecter la dérive de la santé des bandes grâce à l'évolution du temps de parcours. En revanche, pour l'instant il n'y a pas de proposition de modèle de prévision ; il est seulement possible de détecter cette dérive.

d. Retour des futurs utilisateurs

Durant le développement de cette expérimentation et de ces modèles, nous avons échangé de nombreuses fois avec les équipes qui pourront être amenées à utiliser ces modèles. L'échange avec un technicien après-vente qui a effectué des interventions chez

des clients, procure un retour très positif, les conséquences d'un arrêt machine causé par la rupture d'une bande sont très lourdes pour le client, même si cela arrive rarement. Avoir la possibilité de prévoir la rupture d'une bande avant qu'elle n'arrive est donc un avantage indéniable. Cependant, la mise en œuvre d'un tel modèle de comportement est perçue comme étant complexe.

e. Conclusion

En repartant des hypothèses initiales, on en conclut :

- qu'il est possible d'enregistrer des données grâce notamment à des microcontrôleurs,
- que grâce à ces données il est possible de suivre l'évolution de ces paramètres,
- et que grâce à ces évolutions il est possible d'en déduire, au moins en partie, l'état de santé du système.

Pour autant sur un système réel, les facteurs d'évolution agissent simultanément. La mesure du temps de parcours indique des causes possibles, mais ne les identifie pas encore à ce stade, cela requiert soit une heuristique pour analyser l'évolution des temps de passage soit des capteurs complémentaires. Pour autant ces résultats montrent qu'il est possible de développer un modèle qui sera capable d'estimer l'état de santé des bandes et des pions sur leurs systèmes de transfert. Cela va représenter un coût, de mise au point et d'implémentation. Il faut encore s'assurer que l'industrialisation de cette méthode ainsi que son déploiement soit pertinente financièrement. Il faut prendre en compte également, qu'en installant des systèmes d'acquisition de données terrain, il sera possible d'estimer l'état de santé de certains éléments, mais cela ouvre aussi la porte à d'autres fonctions, comme mentionné au début de ce chapitre. Notamment, il sera possible d'améliorer et d'individualiser les modèles du simulateur de flux, pour que les simulations soient plus fiables et qu'elles apportent un pouvoir de prédiction supérieur.

VII. Développement du système de récupération de données et de contrôle de ligne

Nous avons vu dans le chapitre IV comment valoriser des données provenant du terrain (notamment pour faire de la maintenance prédictive). Il faut un système capable de récolter et d'enregistrer les données en question. La récupération des données permet d'envisager aussi le contrôle de ligne, qui peut bénéficier de la logique du jumeau numérique. Pour Hellomoov', c'est une opportunité de travailler sur un sujet qui avait déjà été identifiée et dont la mise en œuvre a été facilitée par le simulateur.

a. Description du besoin

Pour récolter les données du terrain, il faut un système électronique qui peut fournir d'autres fonctions, y compris l'automatisation de production. L'opportunité de développer un système capable de contrôler la ligne profite d'une autre valeur ajoutée du jumeau numérique. En effet, lorsque le simulateur a été développé, la logique de contrôle a été programmée dans le logiciel, tous les comportements des différents éléments du transfert ont été traduits en programmes permettant leurs réutilisations et pourquoi pas en production. L'objectif est donc double ; permettre de récupérer les données du terrain pour les valoriser et capitaliser davantage sur le travail réalisé pour le simulateur.

Ces objectifs ne peuvent être sans contraintes :

Le système doit pouvoir s'interfacer avec la ou les sources de données. Dans un premier temps, nous avons enregistré des états de capteurs inductifs de position. Ensuite, pour que les données puissent être valorisées, elles doivent pouvoir être enregistrées et transmises pour être traitées par le jumeau numérique.

Même si Hellomoov' ne cherche pas à fabriquer des machines spéciales, leurs clients principaux sont des intégrateurs de machines spéciales ; l'utilisation d'automates programmables industriels pourrait être vu comme étant une tentative de prendre une part de marché de leur partenaire. Pour protéger ses relations avec eux, Hellomoov' a donc décidé de ne pas utiliser d'automate programmable industriel.

Afin de maximiser l'utilisabilité de cette solution, le système doit être entièrement réversible, c'est-à-dire pilotable de manière conventionnelle. La nouvelle solution doit interfacer les capteurs et les actionneurs déjà utilisés pour qu'il y ait le moins de pièces à remplacer le cas échéant. Dans un premier temps, nous nous concentrons sur la gamme de l'ITS 24V, un système tout électrique. Ce qui limite les typologies de technologies. Cela permet de simplifier les interfaces. Toujours afin de maximiser l'utilisabilité du nouveau système et sachant qu'Hellomoov' n'a pas de compétences en automatisme, le système

doit être très simple et adaptable très facilement. Il doit y avoir le moins d'automatismes possible pendant sa mise en œuvre, voire pas du tout.

b. La proposition technique

i. L'architecture

Les informations à capturer sont réparties dans toute l'usine. Il est donc important de décomposer le système de retour. Nous créons la notion de nœud qui dans le cadre d'un système de transfert correspond aux composants électriques et électroniques d'une fonction d'un transfert (par exemple ; un virage ou un point d'arrêt). Chaque nœud a un boîtier électronique qui gère ses entrées et ses sorties. La ligne de transfert est donc contrôlée localement et indépendamment par ces boîtiers électroniques.

Pour couvrir la grande majorité des lignes de transfert, six types de nœuds sont en général nécessaires, dont certains couvrent déjà quelques variations :

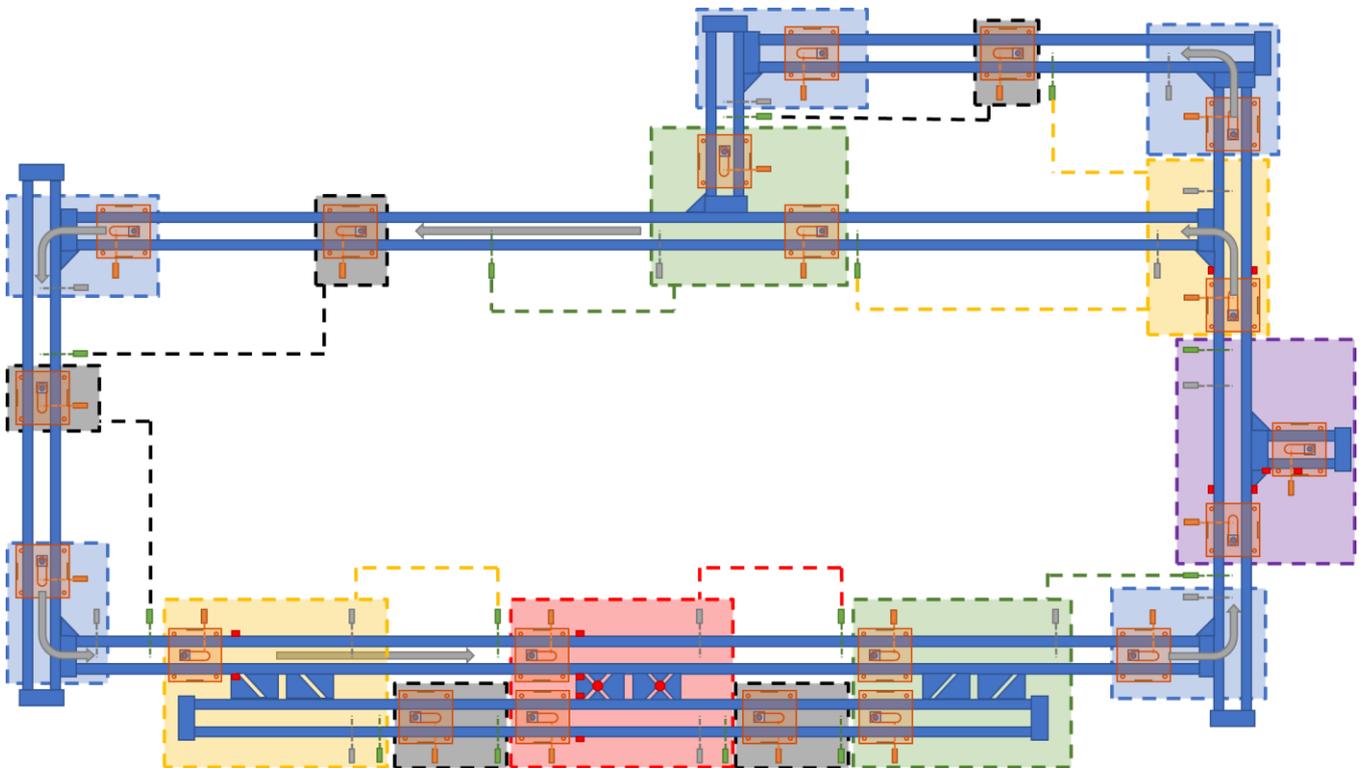


Figure 26 Synoptique d'une ligne de transfert contenant les types de nœuds principaux

Dans la figure 26, on peut voir un exemple de ligne qui regroupe les principaux types de nœuds, qui permettent de couvrir la quasi-totalité des besoins. Pour la compréhension du schéma ;

- En bleu, on retrouve les éléments d'un transfert, avec les unités, les cames à 90°, les cames courtes et les cames doubles,

- les carrés orange représentent les palettes,
- les petits rectangles orange, vert et gris suivi d'un court trait en pointillé représentent des capteurs inductifs qui détectent les palettes. Leurs couleurs différencient leurs fonctions dans la gestion de la ligne. Les oranges sont les capteurs de présence palette à une butée (qu'elle soit de gestion ou de poste), les vertes sont des butées de saturation, indiquant si un poste est saturé ou s'il y a un emplacement disponible pour envoyer la palette suivante, enfin les gris sont des capteurs de passage, ils permettent de savoir qu'une palette est passée ; elle n'est plus dans une came et donc la came est libre et il est possible d'envoyer la palette suivante,
- les grands rectangles transparents sont la représentation des nœuds. Comme dit précédemment, il faut six types de nœuds pour couvrir les besoins d'une ligne :
 - En noir, il y a les points d'arrêts,
 - en bleu ; les gestions de comes,
 - en jaune ; les entrées de dérivation,
 - en vert ; les sorties de dérivation,
 - en rouge ; les comes doubles et
 - en violet ; les guichets

Un nœud est un regroupement de plusieurs composants d'un système de transfert tel que des butées ou des comes qui répondent à une fonction d'un système de transfert.

ii. Exemple de nœuds

Six types de boîtiers sont nécessaires avec six fonctionnements différents.

Les rectangles gris correspondent aux points d'arrêt, que ce soit les butées ou des indexages, pour des postes de travail manuel ou automatique ou bien encore pour des postes de contrôle

La figure 27 montre que les points d'arrêt sont composés d'un capteur de présence palette (pour que le système sache qu'une palette est arrivée) et d'un capteur de saturation qui peut être assez loin du point d'arrêt lui-même en fonction de l'architecture de la ligne. On peut voir aussi la butée sous la palette qui pour ce nœud est le seul actionneur. En plus de ces éléments, il y a aussi un capteur RFID, qui identifie la palette et par extension le produit dessus, ainsi qu'une interface avec l'automate du poste. Cette interface est primordiale pour signifier au poste

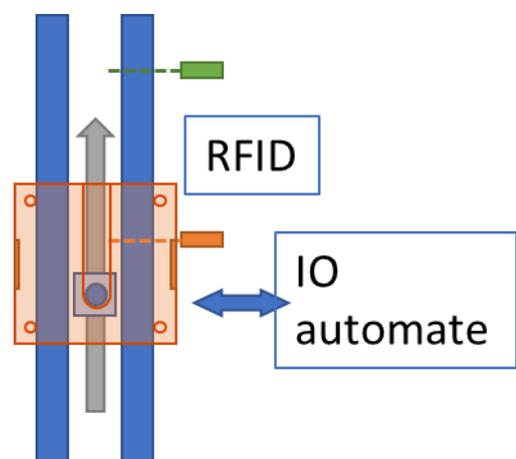
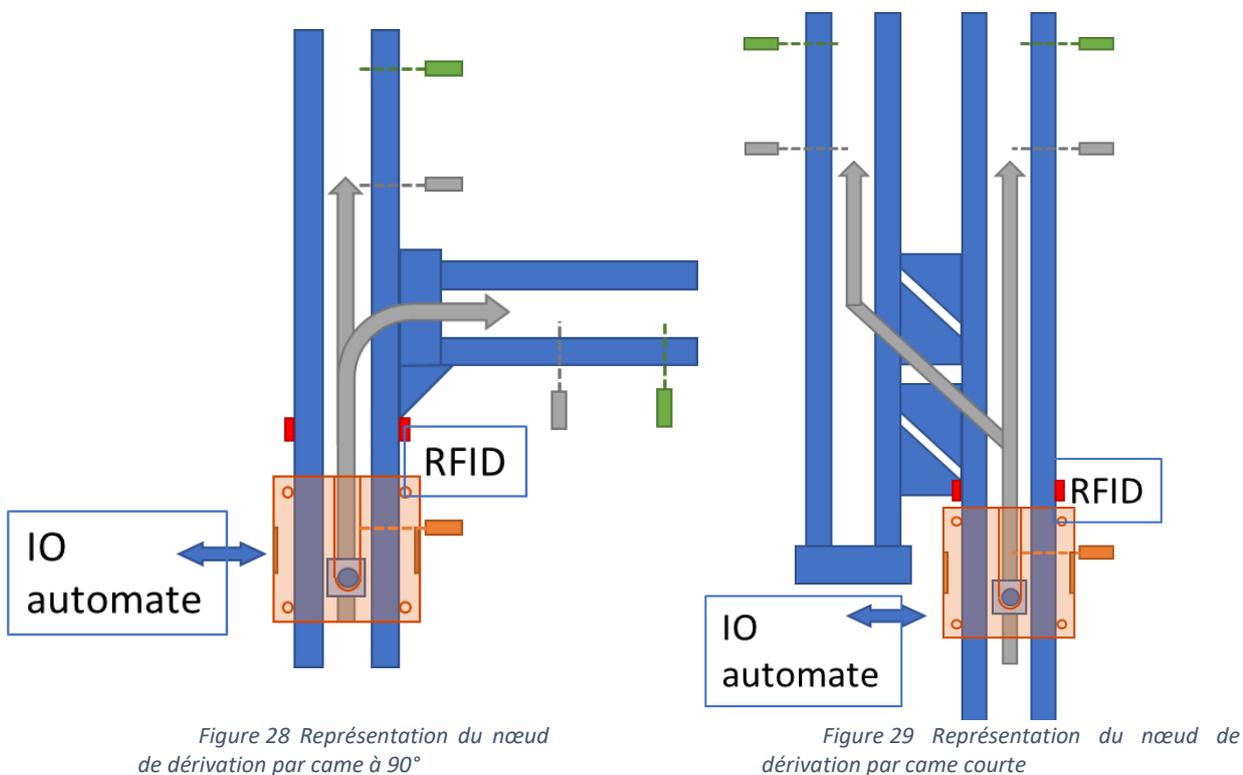


Figure 27 Représentation du nœud de point d'arrêt

que la palette est arrivée et pour que le poste puisse communiquer au nœud que l'opération est terminée.

Techniquement, sur ce nœud, il y a donc deux entrées en 24V (les capteurs inductifs), une sortie en modulation par largeur d'impulsion (MLI ou PWM), une connexion vers un capteur RFID à déterminer et une interface avec un automate à déterminer aussi.

Le deuxième exemple que l'on peut regarder est le nœud d'une entrée de dérivation, il s'agit des rectangles jaunes. Les entrées de dérivation sont les endroits où la ligne se sépare en deux et où les palettes peuvent aller dans les deux directions.



Les figures 28 et 29 représentent le schéma de deux entrées de dérivation possibles, la première en utilisant une came à 90° et l'autre avec une came courte. Les systèmes mécaniques diffèrent, mais le fonctionnement global est le même, la palette arrive par le bas et a deux possibilités, continuer tout droit ou partir vers la droite pour le premier cas et vers la gauche pour le second.

Pour être maîtrisée, une entrée de dérivation est constituée de cinq capteurs, un capteur de présence à la butée (butée nécessaire pour s'assurer que deux palettes ne rentreront pas en collision) puis, sur chaque brin ; un capteur de passage pour signaler que la palette est sortie du virage où les collisions sont interdites et un capteur de saturation pour savoir si une place est disponible d'un côté ou de l'autre. De plus, une

entrée de dérivation doit piloter trois actionneurs, le servomoteur de la butée au début de la dérivation et deux autres servomoteurs (représentés par les petits rectangles rouges dans les figures 28 et 29) qui actionnent une rampe pour monter les pions des palettes (soit les pions extérieurs pour prendre le virage, soit les pions intérieurs pour continuer tout droit). L'entrée de dérivation est aussi équipée d'un lecteur RFID et d'une connexion avec l'automate du client utilisés en fonction du mode de pilotage de l'entrée de dérivation.

Il y a en effet plusieurs manières de répartir les palettes lorsqu'elles arrivent à l'entrée d'une dérivation ; par exemple si la dérivation est justifiée pour dupliquer un poste de travail qui est plus long que le takt time, la priorité est donnée à la boucle la plus courte, et si cette direction est saturée (information disponible grâce au capteur vert) alors le système envoie les palettes dans l'autre direction. Parfois, la dérivation est utilisée pour séparer des produits, par exemple après un contrôle si un produit est identifié comme étant non conforme, alors le produit incriminé et repéré de même que la palette sur laquelle il est, et une dérivation peut aiguiller vers un poste de remise en conformité ou un poste de rebut.

iii. Le nœud central

Les six types de nœuds correspondent à la nature des éléments pilotés. Il faut assurer une fonction complémentaire de communication vers le jumeau numérique. Il est possible d'introduire un septième type de nœud pour centraliser les données des nœuds de pilotage et faciliter l'échange avec le jumeau numérique ; et ainsi capitaliser sur les données collectées. Il ne pilote donc pas d'actionneurs et n'est pas non plus connecté à des capteurs, il est seulement en lien avec les autres nœuds, et avec l'extérieur du système de transfert vers le jumeau numérique (et éventuellement au système client pour éviter que chaque nœud ait à se connecter individuellement, le nœud central sert de passerelle pour simplifier le système)

iv. La programmation

Si la PME n'a pas de compétence en automatisme, il faut que la programmation soit très simple pour assurer l'utilisabilité de cette fonction : le nombre de nœuds a été minimisé. Cependant, ce module de collecte des données et de contrôle de ligne peut profiter des avancées qui ont été apportées dans un autre module ; le simulateur de flux. En effet, un des travaux menés pour le simulateur est la description des comportements des éléments d'une ligne et leur traduction en programme. Dans le module présent, il est possible de capitaliser sur ce travail et de réutiliser ces programmes pour programmer chaque nœud ce qui fait de ce type de système, un système en lien avec un jumeau numérique.

La philosophie de programmation du simulateur a été de programmer des objets indépendamment les uns des autres (programmation multiagents), ce qui correspond à l'architecture de ce module aussi. Pour la programmation de ces objets, dans le simulateur on peut distinguer deux parties ; le code pour le fonctionnement du logiciel et le code pour décrire le comportement de l'objet (la traduction du comportement réel de l'objet en ligne de code). C'est cette deuxième partie qui peut être utilisée ici.

À partir de la simulation, exporter un modèle de contrôle d'automate exige de transformer la simulation, en un langage de commande. Par exemple cela peut se déployer sous l'export sous la forme d'un GRAFCET. Transposer les grafjets n'est pas compliqué ; dans le simulateur ils ont été préparés. Cependant certains éléments qui ne l'étaient pas, par exemple la libération d'une palette :

```
If G7 == 2 and G7FM :
```

```
    Emit_signal(« paletteExited », palette, self.name)
```

Figure 30 Extrait du programme du simulateur correspondant à l'étape de libération d'une palette

Dans la figure 30, extraite du programme d'une butée dans le simulateur, la commande « emit_signal(« paletteExited », palette, self.name) » est la fonction autorisant la palette à poursuivre sa route, on pourrait penser qu'il suffit de faire correspondre cette fonction à l'ordre en MLI (pour Modulation par Largeur d'Impulsion ou PWM en anglais) d'abaissement de la butée, mais ce n'est pas une traduction aussi directe. En effet, pour le fonctionnement réel, il faut aussi donner l'ordre à la butée de remonter pour pouvoir arrêter la palette suivante.

```
void libePalette() {  
  
    butee.write(0) ;  
    etatButee = 1 ;  
}
```

Figure 31 Extrait du programme du nœud de dérivation correspondant à l'abaissement de la butée de ce nœud

Dans la figure 31, extraite du programme du nœud d'une dérivation, la commande `butee.write(0)` est la partie responsable de l'envoi du signal en PWM pour abaisser la palette, cependant, contrairement au simulateur, cette commande seule ne permet pas de réaliser la fonction, il faut ajouter la ligne suivante : `etatButee = 1 ;` Cette ligne permet de mémoriser que la butée est actuellement ouverte. Dans la boucle du programme, on retrouve ensuite :

```

if (etatButee && bufferCapteur1 == 0) {

    butee.write(180) ;

    etatButee = 0 ;

}

```

Figure 32 Extrait du programme du nœud de dérivation correspondant à la remontée de la butée de ce nœud

Dans la figure 32, extraite le programme du nœud, on retrouve la variable `etatButee` qui contient l'information de si la butée est passante ou bloquée. Cette information est testée avec une autre variable, `bufferCapteur1` qui est l'image de ce que détecte le capteur de présence à la butée. Le fonctionnement global de cette partie est le suivant, le drapeau métallique de détection présent sur la palette est prévu pour faire la longueur que la palette doit parcourir avant que la butée ne puisse remonter, ainsi si la butée a libéré une palette, elle est présente à la butée et donc le capteur la détecte. Une fois que la butée libère la palette, elle avance jusqu'à ce que le capteur ne détecte plus le drapeau, ce qui signifie qu'elle a suffisamment avancé pour que la butée remonte. Si la butée est descendue, on teste donc si le capteur de présence est activé ou non, s'il ne l'est plus c'est que la palette a suffisamment avancé et l'on envoie donc l'ordre `butee.write(180)` : (l'ordre en PWM pour que la butée remonte). Alors on remet à zéro la mémoire de l'état de la butée ce qui mémorise que la butée est remontée.

Ce type de traduction est spécifique pour chaque type de nœud. Nous avons ainsi la totalité des comportements des six types de nœuds. Cette méthode assure la continuité numérique, il n'y a pas besoin de recopier, ou de reconcevoir le ou les programmes à chaque fois, une fois validés par simulation, il n'y a plus besoin de les modifier et l'on est assuré qu'ils fonctionnent. Cela limite grandement les possibilités d'erreurs. De plus, étant donné que les programmes sont rédigés au préalable, le besoin de compétence en automatisme ou en programmation est limité au développement de la solution, ce qui peut être sous-traité. Après il n'est plus nécessaire de conserver ces compétences si elles ne font pas partie du cœur de compétences de l'entreprise. L'inconvénient est que cela rend cette solution assez rigide ; si lors d'un développement un nouveau nœud est conçu, il faudra redévelopper le programme pour ce module.

v. Lien avec le contexte Hellomoov'

Pour Hellomoov', le besoin de développer un système électronique pour récolter les données provenant du terrain est une opportunité de travailler sur un sujet qu'ils

avaient identifié il y a quelques années déjà. Parfois, Hellomoov' est directement contacté par le client/utilisateur pour réaliser un système complet. Hellomoov' réalise alors la ligne de transfert et sous-traite l'automatisme. Dans ce cas, le coût de l'automatisme représente en moyenne 25 % du prix de vente du système complet. C'est pourquoi l'entreprise cherche à pouvoir s'occuper en interne des cas les plus simples d'automatisation des lignes qui représente la majorité des affaires où le client/utilisateur la contacte directement.

L'architecture en nœud que nous proposons pour cette partie est aussi parfaitement adaptée aux systèmes proposés par Hellomoov', car ces systèmes sont modulaires et les nœuds peuvent être combinés pour répondre le plus justement aux besoins d'Hellomoov'.

De plus, comme Hellomoov' est un groupe qui ne possède pas de compétences en automatisme, la simplicité de programmation que permet la valorisation des modèles développés pour le simulateur de flux répond donc aussi aux objectifs de l'entreprise.

En revanche un aspect important de ce module est la concurrence qui peut être vue de la part des clients intégrateurs des systèmes de transfert. En effet jusqu'à présent le pilotage de ces lignes était géré par les intégrateurs de machines spéciales qui sont les clients d'Hellomoov'. Pour s'assurer que cette démarche ne soit pas vue comme une manière de prendre des parts de marché, il est important de mettre en avant le fait que ces systèmes sont toujours prévus pour être vendus à ces intégrateurs, cela leur simplifie la tâche d'intégrer les systèmes de transfert étant donné que leur pilotage est déjà géré. De plus, l'objectif n'est en aucun cas de piloter la ligne de fabrication dans son ensemble mais uniquement son système de transfert, l'intégrateur a donc toujours toute sa place.

c. Le démonstrateur

Afin de s'assurer que ces principes fonctionnent, un démonstrateur a été réalisé. Ce démonstrateur n'a pas pour objectif de démontrer le fonctionnement global du système, mais démontre que chacune des sous-fonctions répond bien au besoin, afin de consulter des spécialistes pour l'industrialiser. Les sous-fonctions testées sont les suivantes :

- Le pilotage en PWM des actionneurs de butée et de dérivation,
- l'acquisition des données provenant des capteurs de position 24V,
- la lecture d'un tag RFID sur une palette, ainsi que la différenciation de lecteur RFID sur un même nœud,
- la communication internœud,
- le fonctionnement de l'architecture en nœud proposée

i. Les solutions techniques pour le démonstrateur

Pour réaliser ce démonstrateur, nous choisissons des composants qui s'approchent de ceux réellement imaginés pour la solution industrielle, mais en même temps faciles d'accès et suffisamment adaptables pour répondre aux besoins.

Comme spécifié plus haut, un automate programmable industriel n'est pas envisageable pour gérer le programme. La solution retenue est un microcontrôleur, pour cette application spécifiquement, l'ESP 32, car c'est la solution qui offre une grande versatilité tout en étant facile d'accès et peu chère. La figure 33 est une photo du microcontrôleur. L'ESP 32 est une des solutions électroniques de prototypages les plus utilisées aujourd'hui. Il a l'avantage de posséder 32 entrées/sorties dont certaines peuvent être utilisées en PWM ainsi que des capacités intégrées en WiFi et en Bluetooth. La carte est programmée grâce au logiciel Arduino qui est libre d'accès et dont il est facile de trouver des références en ligne. Enfin, c'est une carte qui est relativement peu chère (environ 12 € par carte).



Figure 33 Photo de l'ESP 32

Le lecteur RFID retenu est la carte RC522 (fig. 34) qui est une antenne RFID capable de lire l'identité de tags RFID. C'est une carte souvent utilisée avec Arduino, elle est complètement compatible et simple de contrôle via un microcontrôleur. Elle est aussi peu chère (entre 3 et 12 € environ, en fonction du site d'achat).



Figure 34 Photo de la carte RC522

Afin de montrer le fonctionnement de ce système, le mieux est de le mettre sur une ligne fonctionnelle. Malheureusement, nous ne disposons pas de ligne en ITS 24V disponible, mais il y avait en revanche une ligne de TLM 1500 (pour des palettes standards de 150 mm par 150 mm) avec les mêmes actionneurs et les mêmes capteurs. C'est donc sur cette ligne que le démonstrateur a été implémenté.

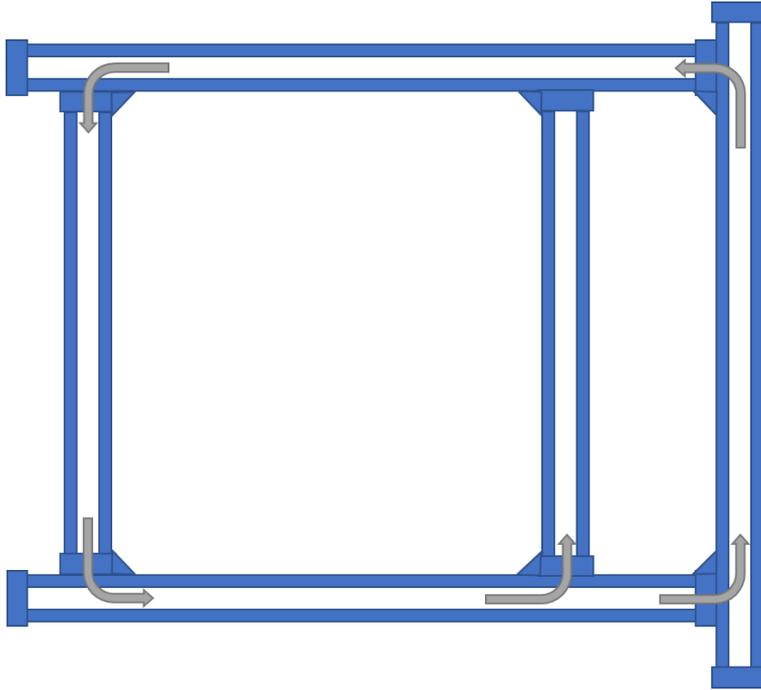


Figure 35 Schéma de la ligne nue du démonstrateur

La figure 35 représente le schéma de la ligne du démonstrateur. On peut y voir une boucle carrée avec un brin supplémentaire qui permet d'avoir une dérivation.

Pour faciliter la mise en œuvre, pour ne pas avoir à souder directement les capteurs et les actionneurs au microcontrôleur, les composants électroniques ont été soudés sur un circuit imprimé de prototypage, avec des borniers pour les composants extérieurs.

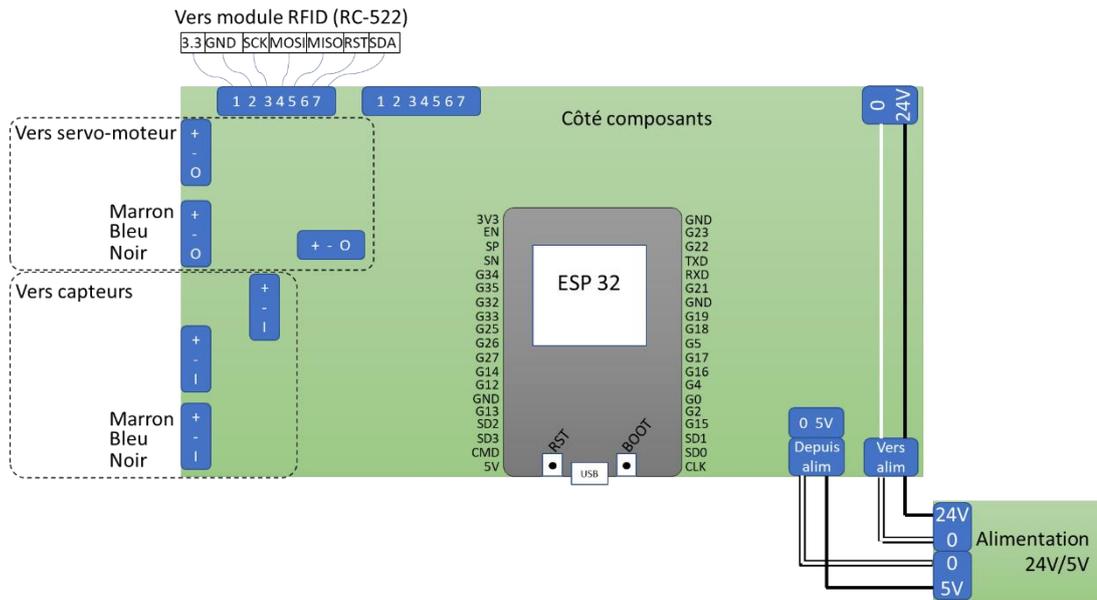


Figure 36 Schéma du circuit imprimé d'une carte de nœud

La figure 36 montre la disposition du microcontrôleur sur le circuit imprimé. Les rectangles bleus représentent des borniers à vis pour connecter l'alimentation ainsi que les capteurs et les actionneurs. Toujours sur la figure 36 on peut voir que le prototype est prévu pour recevoir jusqu'à trois capteurs, trois actionneurs et deux lecteurs RFID.

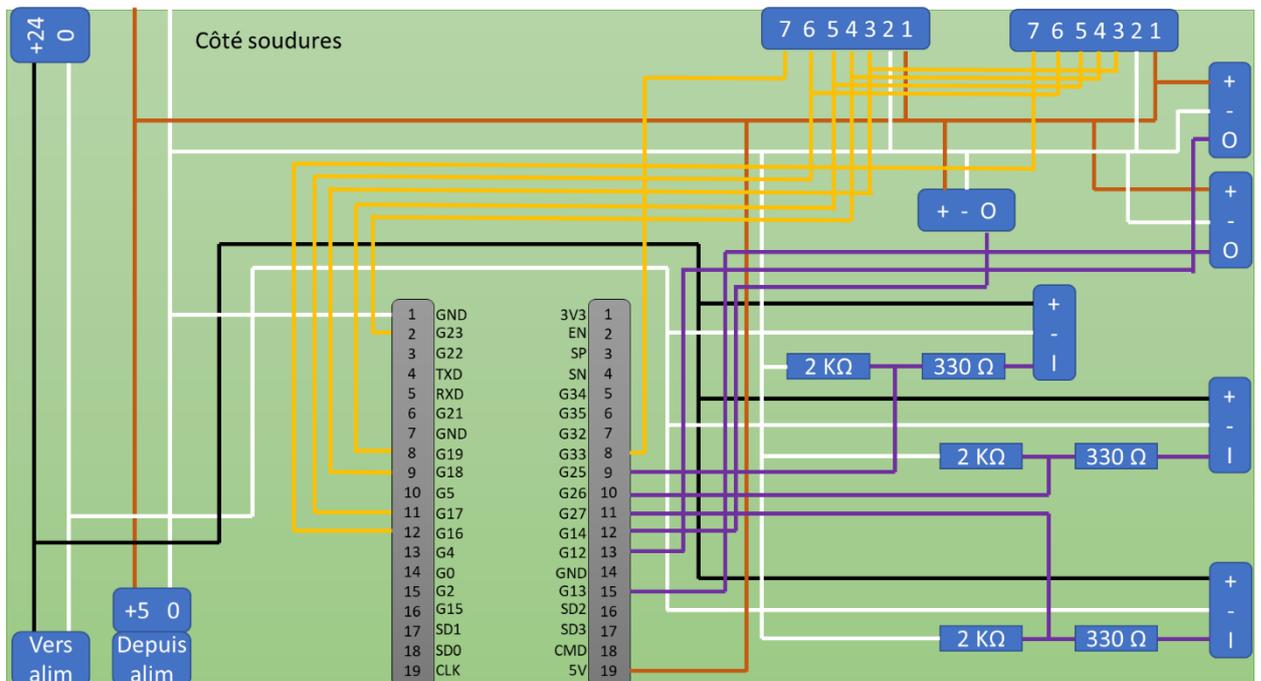


Figure 37 Schéma du circuit imprimé représentant les connexions

La figure 37 présente les câblages entre les différents composants, en noir nous avons le 24V, en marron le 5 V et en blanc le 0V. Les fils violets sont les entrées-sorties des capteurs et des servomoteurs et les fils jaunes sont les fils des lecteurs RFID. Les rectangles bleus représentent les résistances des ponts diviseurs de tension. Avec 24 V aux bornes de 2 330Ω, il y a 3,4 V aux bornes de la résistance de 330Ω, pour une tension nominale de 3,3 V. C'est le couplage de résistances standards qui s'approche le plus de la valeur nominale cible.

ii. La réalisation

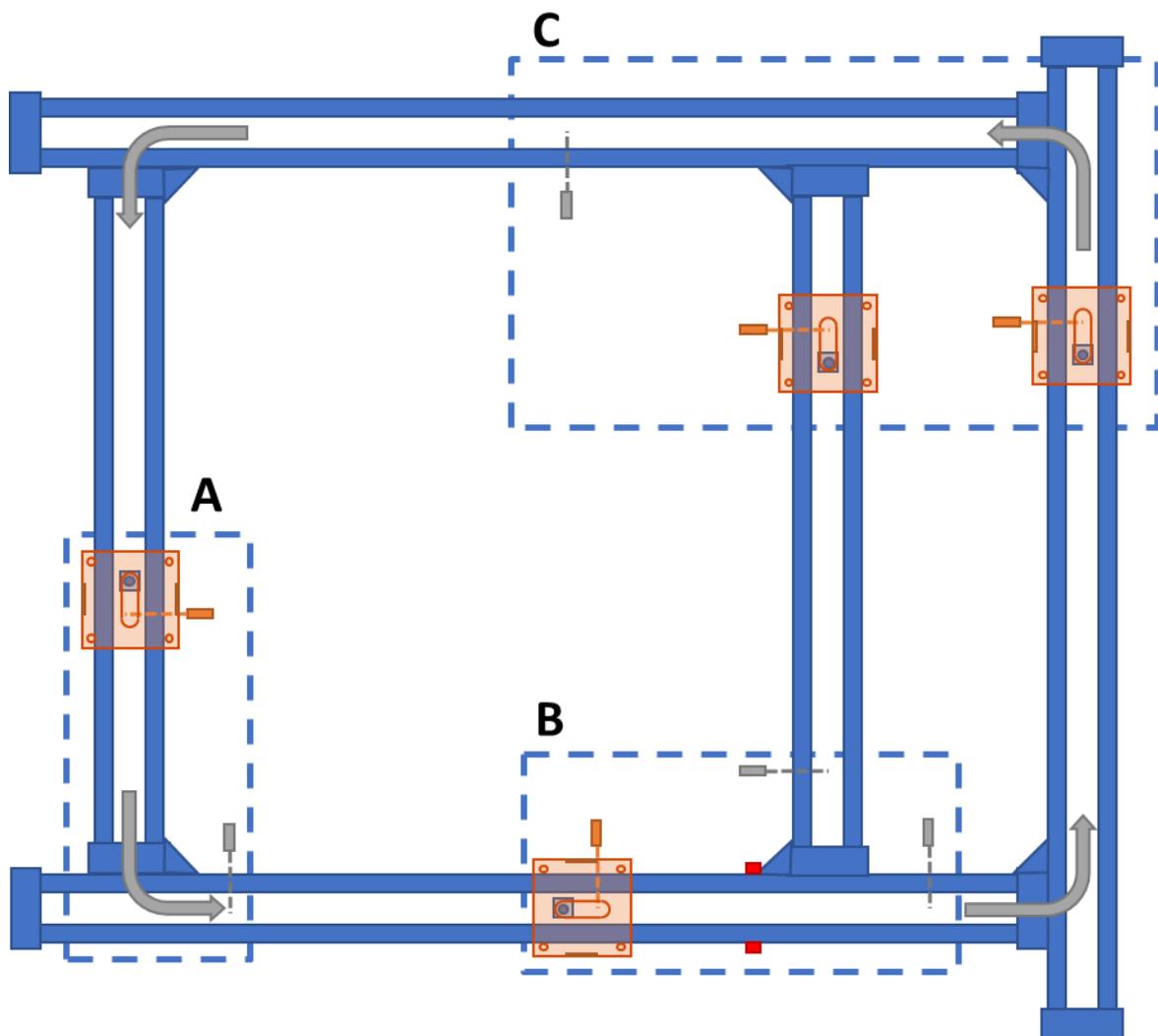


Figure 38 Schéma de la ligne du démonstrateur avec ses équipements

Sur le démonstrateur représenté dans la figure 38, on peut voir les éléments qui ont été rajoutés sur la ligne. Au total, il y a quatre butées, huit capteurs et un jeu de dérivation. Ce démonstrateur se compose de trois nœuds chacun repéré par une lettre.

Le nœud A est une gestion de came. C'est un des nœuds les plus communs, car théoriquement à chaque came à 90° il devrait y avoir une gestion de ce type et c'est de plus, l'un des nœuds les plus simples : il a très peu d'entrées sorties. La fonction de ce

nœud est de s'assurer que les palettes ne s'entrechoquent pas dans les virages, car cela pourrait endommager les palettes, les produits au-dessus ou encore les rainures dans lesquelles les pions sont guidés. Ce nœud est composé d'une butée et de deux capteurs. Quand une palette arrive au capteur de présence de la butée qui est en amont de la came, la butée laisse passer la palette, mais si une autre palette arrive avant que la première soit passée devant le capteur de passage en aval de la came à 90° la butée ne la laissera pas passer.

Le nœud B est une entrée de dérivation. Elles sont surtout utilisées quand un poste sur une ligne à un temps de cycle supérieur au takt time de la ligne. Dans ce cas il faut dédoubler les postes pour obtenir la cadence souhaitée. On place une dérivation qui répartit le flux vers un brin ou vers l'autre. Une dérivation est utilisée après un contrôle de pièces pour envoyer les pièces non conformes vers le retravail ou vers le rebut. Ce nœud est un peu plus complexe que la gestion de came, il est composé d'une butée, mais aussi de la dérivation a proprement parlé. Il s'agit de deux actionneurs qui fonctionnent en opposition ; quand l'un est en bas l'autre est en haut et inversement pour lever les pions extérieur ou intérieur de la palette. Cela représente donc trois actionneurs en PWM à piloter en simultané et est donc un test supplémentaire pour le démonstrateur. Pour certains modes de fonctionnement d'une dérivation il est important d'identifier les palettes (pour envoyer les bonnes palettes au retravail par exemple) ce nœud est donc aussi équipé d'un lecteur RFID ce qui permet de valider aussi ce fonctionnement. Ce Nœud est aussi équipé de trois capteurs, le capteur de présence palette à la butée et un capteur de passage sur chaque brin. Compte tenu de la taille du système de transfert, pas besoin de mettre de capteurs de saturation.

Le nœud C est une sortie de dérivation. À chaque entrée de dérivation correspond une sortie. La sortie de dérivation est responsable de l'endroit où les palettes se rejoignent. Il faut non seulement s'assurer qu'elles ne s'entrechoquent pas, mais aussi gérer la priorité. En fonction de la ligne, il y a deux modes principaux de gestion de la priorité ; soit en FIFO (First In First Out), où la première palette arrivée à sa butée sera la première palette libérée, soit une gestion par défaut, où un brin est prioritaire sur l'autre et tant que ce brin n'est pas vide, ce sont les palettes qui sont sur ce brin qui passeront en premier. Ce deuxième mode peut être utile lorsqu'un des deux brins est notablement plus long que l'autre, sans ce mode, les palettes risqueraient de s'accumuler sur le brin le plus long et de ne jamais passer si le temps entre le dernier poste du brin court et la sortie de dérivation est plus courte que le temps de passage à la sortie de dérivation. Ce nœud est moins compliqué que le précédent, il y a deux butées et donc deux servomoteurs à piloter. Il y a aussi au total trois capteurs, un capteur de présence à chaque butée et le capteur de passage pour avoir l'information que la palette est sortie de la zone de la sortie

de dérivation. Là encore, vu la taille du système de transfert, il n'y a pas besoin de capteurs de saturation.

Durant les tests le démonstrateur enregistre les événements où les palettes passent devant les capteurs, étant donné que l'environnement de programmation et le langage sont identiques aux expérimentations, les commandes et le programme pour cette partie sont identiques à ceux du chapitre précédent.

iii. Les résultats

Le démonstrateur a permis de vérifier le fonctionnement de nombreux aspects du système. Dans un premier temps, il est possible pour les microcontrôleurs de piloter les servomoteurs qui actionnent les effecteurs d'une ligne de transfert, même plusieurs simultanément (au minimum trois). Il est aussi possible, grâce à un pont diviseur de tension, de recueillir le signal des capteurs inductifs présents sur ces lignes. Il est possible d'identifier un tag RFID grâce à un lecteur RFID connecté au microcontrôleur et même de distinguer sur quel lecteur le tag est passé si plusieurs lecteurs sont connectés en simultané. La majorité de l'architecture proposée a aussi été testée, le démonstrateur a permis de voir que les nœuds de point d'arrêt, de gestion de came, d'entrée de dérivation et de sortie de dérivation fonctionnent. La came double et le guichet n'ont pas pu être testés, car la ligne sur laquelle le démonstrateur a été réalisé était trop petite. Le démonstrateur a montré que la gestion locale d'une ligne fonctionne bien, que la philosophie de découpage est bonne et qu'il est donc possible de gérer toute une ligne grâce à ces modules électroniques.

Certains éléments n'ont pas été testés sur le démonstrateur, mais lors de la réalisation des cartes électroniques ; pour la came double, il peut être nécessaire d'avoir un lecteur RFID aux deux entrées. Il faut donc s'assurer que les cartes différencient les entrées et il se trouve que la carte en est capable.

Le dernier point est la communication entre les cartes. Pour ce faire, les cartes ESP 32 sont équipées du WiFi ainsi que du Bluetooth. Après quelques recherches, le protocole ESP-Now semblait être le plus simple et le plus efficace à mettre en œuvre. C'est le protocole qui utilise la bande fréquence du Bluetooth. Ce protocole permet l'échange de petits paquets de données sans nécessiter de créer un réseau. La portée théorique est de 200 m ce qui est suffisant pour couvrir une ligne complète de transfert, ce protocole a été testé, il fonctionne très bien et est très simple d'utilisation.

Certains aspects du système n'ont pas encore été étudiés, certains nœuds n'ont pas été testés, en l'occurrence la came double et le guichet, compte tenu du succès des autres nœuds, il ne semble pas y avoir de raison de douter de la faisabilité et donc de ne pas passer à l'étape suivante du projet.

Enfin, la centralisation des données n'a pas encore été mise en œuvre. Le nœud central qui devrait permettre de regrouper les données de toute la ligne pour simplifier leurs récupérations n'a pas été testé ; les limites du protocole ESP-Now n'ont pas été testées non plus (le nombre d'entités connectées en simultanée, les interférences potentielles). Les solutions de transmission des données enregistrées n'ont pas été testées non plus. Cependant l'expérience acquise nous permet de supposer une convergence vers une solution opérationnelle.

d. Les résultats pour Hellomoov'

Grâce au démonstrateur nous avons démontré que les modèles développés pour le comportement d'une ligne dans le simulateur sont capables de piloter les lignes de transfert d'Hellomoov' ; les modèles de comportement représentent la manière dont les actionneurs se comportent en fonction de l'état des capteurs et du mode de fonctionnement choisi par l'utilisateur. On peut donc imaginer un pilotage en mode multi-agent.

Comme mentionné au paragraphe précédent, la solution technique pour remonter les données vers le jumeau numérique n'a pas été testée. Aujourd'hui, les données sont enregistrées sur une carte mémoire qui est récupérée et lue manuellement. Cela ne pose aucun problème quand le système de transfert se trouve dans les locaux d'Hellomoov', mais quand les lignes seront chez leurs utilisateurs cela sera indispensable pour un contrôle à distance.

Grâce à cette réalisation, nous démontrons qu'une telle solution permet de répondre aux besoins d'Hellomoov'. En effet, grâce à ce système l'entreprise est capable de récolter les données provenant du terrain, ouvrant la voie à de nombreuses possibilités grâce au traitement des données (maintenance prédictive, analyse de l'utilisation...). Mais cette avancée permet aussi à l'entreprise de devenir moins dépendante, en acquérant la compétence de mise en œuvre de ses lignes de transfert. Elle est de fait moins dépendante des intégrateurs de machines spéciales qui ont la charge d'intégrer le système de transfert. Dès lors, bien qu'ils aient encore cette charge, elle est grandement simplifiée grâce à la pré-gestion de ce sous-ensemble. L'élément restant à réaliser est la connexion aux interfaces ; l'énergie, mais surtout les autres entités de la machine spéciale et les différentes machines automatisées qui s'y rapportent. La société peut intégrer dans sa compétence une part importante de l'automatisation, ce qui n'est pas l'objectif premier, mais qui autorise de nouveaux produits dans une stratégie PSS (Produit Service Système) grâce à la connexion à un jumeau numérique.

e. Pré-industrialisation envisagée chez Hellomoov'

Malgré les éléments non testés, le succès du démonstrateur est suffisant pour passer à l'étape de pré-industrialisation. Hellomoov' a donc consulté un concepteur et

fabricant d'électronique avec lequel il travaille déjà pour estimer le coût que représentent le développement et la fabrication en série d'une solution permettant de réaliser les mêmes fonctions que ce démonstrateur.

Après quelques échanges techniques ainsi qu'une visite pour voir le démonstrateur, ce fabricant a proposé la réalisation de deux cartes différentes ; en effet, la complexité électronique supplémentaire nécessaire au fonctionnement des nœuds de came double et de guichet (principalement le nombre d'entrée et de sortie supplémentaire nécessaire) combiné au fait que ces nœuds sont bien moins utilisés rend plus intéressant la réalisation de deux cartes. Une première plus simple et moins coûteuse, qui sera capable de piloter tous les nœuds à l'exception de la came double et du guichet et une seconde, plus complexe, qui pourra gérer ces nœuds.

L'entreprise d'électronique a fait parvenir une offre pour le développement et la réalisation de cartes prototypes pour qu'Hellomoov' teste leurs solutions et confirme son fonctionnement. Dans cette offre, le coût de développement total est 11 810 € et une carte prototype coûterait 77,60 €. Hellomoov' n'a pas encore passé la commande pour tester ces prototypes.

L'objectif de cette partie est de concevoir une solution permettant de collecter des données d'un système de transfert et dans même temps de le piloter. Compte tenu des contraintes en compétence et en technologie, Hellomoov' se dirige vers une philosophie de décentralisation et de standardisation de sous-ensembles fonctionnels appelés des nœuds. Découlant de cette architecture, des cartes électroniques ont été réalisées afin de démontrer le fonctionnement de cette solution. Ces cartes et ce système plus généralement bénéficient du travail de développement du simulateur, pour leur programmation qui a, de ce fait, été largement simplifiée.

Cette solution permet aussi de poursuivre la continuité numérique du système dans son ensemble, les données qui sont entrées lors de la configuration, mais surtout lors de la simulation (les données qui représentent le comportement du système de transfert et qui sont l'image des programmes qui permettent de piloter le système) sont conservées et sont réutilisées sans avoir à être de nouveau saisies informatiquement.

La mise en œuvre d'une telle solution n'est pas sans conséquence. La solution a volontairement été conçue de manière à ne pas nécessiter de programmation lors de sa mise en œuvre (le travail doit être entièrement fait en amont), il faut cependant maîtriser la partie électronique afin de pouvoir l'utiliser. Ce ne sont pas des compétences actuellement mises en avant à ce jour chez Hellomoov', il s'agit donc d'un axe de travail afin de mettre en avant commercialement cette solution.

Un des autres obstacles à dépasser pour que ce système soit un succès est de solliciter l'intérêt pour les clients. De nombreuses entreprises industrielles sont très

protectrices de leurs données de fabrication et il n'est pas forcément simple de leur transmettre l'idée que ce ne sont pas ces données qui sont ciblées dans le cas de ce système. Il s'agit uniquement des données liées au système de transfert lui-même. Pour certain le simple fait de devoir transmettre des données en utilisant un de leurs canaux (en se connectant à leur WiFi par exemple) peut poser problème, les solutions de transmission sont donc une partie qu'il faut encore travailler et sur laquelle il faut intégrer les clients.

Cela étant, les possibilités qui sont ouvertes grâce à la récolte des données que permet ce système est extrêmement riche. C'est une porte qui s'ouvre sur de nombreuses fonctions possibles grâce aux technologies du Big Data qui seront un sujet très important pour la suite de ce système.

VIII. Conclusion

Résultats académiques

Les apports technologiques récents ont permis l'émergence de nouveaux outils à mettre au service de l'industrie. Le jumeau numérique est un de ces outils. Il profite du développement de la numérisation, de l'internet des objets ainsi que de l'accroissement de la puissance de calcul des ordinateurs pour créer une réplique numérique d'un système physique. Si aujourd'hui le concept est largement décrit, son application ainsi que la manière de le mettre en œuvre ne le sont pas.

C'est en partant de ces constats que ce travail de recherche a été mené : Quelle méthode pour implémenter un jumeau numérique dans une PME ?

Afin de répondre concrètement à cette question, nous nous sommes intéressés à une entreprise qui souhaitait mettre en œuvre ce concept : Hellomoov'.

Les deux contributions principales de ce travail sont une architecture de jumeau numérique ainsi qu'une démarche pour implémenter le jumeau numérique dans une entreprise comme Hellomoov'.

L'architecture proposée repose sur le principe de modules fonctionnels qui dépendent du besoin de l'entité et qui une fois regroupées et intégrées ensemble et au reste de l'environnement de l'entreprise crée un jumeau numérique complet.

Le processus, quant à lui, peut être résumé en trois grandes étapes ;

1. La première phase est une phase d'analyse détaillée de l'entreprise, de son environnement et de ces ressources ainsi que des systèmes auquel on veut implémenter un jumeau numérique,
2. grâce à ces informations, il est ensuite possible de définir au mieux les besoins concrets de l'entreprise ; quelles fonctions sont attendues pour le jumeau numérique, quels sont les modules qui y répondent le mieux, quels modèles seront nécessaires pour ces modules, qu'est-ce qui est déjà présent dans l'organisation pour ces modules, il est possible de les prioriser selon la stratégie d'entreprise selon leur contexte stratégique,
3. la dernière partie est l'implémentation en tant que telle, une fois le premier module choisi nous proposons une méthode itérative de mise en œuvre des modules, les uns après les autres : une forme de montée en puissance. De plus, une fois que des modules sont en fonctionnement, l'amélioration continue est nécessaire, autant pour l'amélioration de chaque module, que pour l'amélioration de leur cohésion pour obtenir un ensemble intégré et cohérent qu'est le jumeau numérique complet.

Résultats chez Hellomoov'

Chez Hellomoov', après avoir analysé les produits qu'ils fabriquent ainsi que la nature de leur activité, nous avons proposé un certain nombre de modules à mettre en œuvre pour obtenir le jumeau numérique le plus adapté pour eux. Parmi les modules, nous avons travaillé sur trois d'entre eux à divers degrés d'avancement ;

- un simulateur de flux ; il permet de construire ou d'importer une ligne construite dans le configurateur d'Hellomoov', afin de vérifier qu'elle réponde bien au besoin du client, particulièrement le takt-time attendu. Le simulateur a été testé sur une affaire client et a permis de réaliser que la première conception ne pouvait pas assurer le takt-time demandé par le client. Ce module démontre une capacité de simulation mais aussi de description du système physique,
- un module de maintenance prédictive ; grâce à des données de présence palette sur une ligne, le modèle permet de détecter une variation dans le temps de passage qui indique une dégradation de l'état de santé d'un des éléments d'une ligne et ainsi pouvoir prévoir une intervention avant la casse éventuelle de la pièce et par conséquent le blocage de la ligne. Nous avons développé un modèle de détection des défaillances à venir et nous l'avons testé dans des conditions de laboratoire, les résultats sont encourageants, mais des expérimentations supplémentaires sont nécessaires, notamment dans des conditions réelles où l'évolution des paramètres est bien plus lente que dans les conditions des tests préliminaires. Ce module démontre une méthode d'analyse comportementale d'un système basée sur des données capteurs,
- un module de contrôle de ligne ; ce module propose une architecture décentralisée de pilotage d'une ligne de transfert. L'objectif de ce module est de réduire la dépendance d'Hellomoov' à des entreprises d'automatisme pour le pilotage de leurs systèmes. Il permet à Hellomoov' de garder le contrôle sur leurs systèmes jusqu'à leurs utilisations. Pour ce module des prototypes ont été réalisés afin de voir si des cartes électroniques seraient capables de gérer une ligne dans son intégralité. L'essai a été un succès et l'industrialisation a été lancée, notamment par une consultation d'une entreprise de conception et de fabrication de cartes électroniques. Ce module démontre la mise en place de la connexion entre le jumeau numérique et le jumeau physique et la continuité numérique entre conception et production.

Grâce au processus proposé, une PME qui n'a pas de compétences dans les secteurs de l'industrie du futur peut mettre en œuvre les premières étapes de l'implémentation d'un jumeau numérique. Bien que tous les éléments ne soient pas encore en place, ces premières étapes sont cruciales, car elles définissent ce que le jumeau numérique sera à terme.

Il reste des modules à développer, à industrialiser et tester. Il manque aussi la mise en œuvre complète de tous les éléments cités sur un cas réel ; le simulateur a été utilisé sur un cas réel, mais aujourd'hui les données des lignes de transfert en cours d'utilisation ne sont pas récoltées et aucune ligne utilisée chez un client n'est pilotée grâce à un boîtier électronique. Nous avons démontré la capacité d'y arriver.

Perspectives

Notre méthode n'a été déployée que chez Hellomoov' et le travail dans cette entreprise n'est pas terminé ; Hellomoov' n'a pas encore un jumeau numérique complet, il serait souhaitable qu'Hellomoov' poursuive le déploiement des modules du jumeau que nous avons identifiés ensemble. Dans un premier temps, la généralisation de l'utilisation des modules qui ont été développés serait bénéfique ;

- la poursuite de la formation des techniciens de vente à l'utilisation du simulateur, la poursuite de son amélioration continue ainsi que la confrontation des modèles qu'il contient aux données réelles du terrain pour les améliorer,
- la poursuite de développement des modèles de maintenance prédictive par la récolte de données sur le terrain, sur des systèmes réels pour les confronter aux données obtenues expérimentalement, l'identification d'autres signaux faibles pour compléter la détection de dérives et ainsi couvrir le plus possible des pannes potentielles,
- la finalisation de l'industrialisation des boîtiers de contrôle de ligne pour, dans un premier temps les proposer en test à des clients utilisateurs pour commencer la récolte des données terrain ainsi que la présentation aux clients intégrateurs pour leur donner confiance dans le produit et passer à une phase de production en série en tant qu'option par exemple.

En plus de la poursuite du développement des modules déjà entamé, il serait bénéfique de commencer la mise en œuvre des autres modules identifiés durant ce projet ; notamment les modules d'aide à la fabrication et à la maintenance qui pourraient faciliter la formation de nouveaux techniciens grâce à la technologie de réalité augmentée par exemple. Il est cependant aussi important d'être à l'écoute du client pour connaître ses besoins et la manière dont ils vont évoluer dans le futur.

Cela étant, le déploiement avec succès d'un outil comme le jumeau numérique dans une entreprise unique n'est pas scientifiquement suffisant pour valider complètement le processus proposé, il semble nécessaire d'appliquer cette méthode dans une autre entreprise pour profiter d'un retour d'expérience complémentaire. Son déploiement dans un secteur d'activité différent, ou avec une entreprise de taille différente serait un apport significatif à ce travail. Cela permettrait de voir comment l'architecture et la méthodologie peuvent s'adapter à des paramètres différents, et devenir plus génériques.

Pour donner suite à ce travail de thèse, je souhaiterais poursuivre cette démarche dans l'industrie. L'idéal serait un poste dans une autre entreprise qui souhaite aussi mettre un jumeau numérique et ainsi confirmer et améliorer ou amender la méthodologie que nous proposons ici. Quelle que soit l'issue d'une nouvelle mise en œuvre de jumeau numérique, cela permettrait à minima de généraliser les conclusions sur cette méthodologie.

D'ici cinq à dix ans, nous pensons que le jumeau numérique sera un outil omniprésent dans l'industrie ; il apporte un cadre de développement et d'implémentation à des modèles de comportement qui répondent à de vraies problématiques industrielles. Dès lors, proposer et améliorer une proposition de méthode de mise en œuvre est un apport important au secteur industriel.

La difficulté principale réside dans la généralisation d'une telle méthodologie. Le jumeau numérique est un concept général, il doit être adapté à chaque implémentation, la méthode avec laquelle il est implémenté doit aussi s'adapter à chaque cas, à chaque secteur d'activité, à chaque entreprise, à chaque produit.

L'intégration de certaines technologies est aussi une difficulté. Les technologies comme l'intelligence artificielle, ou le machine learning sont des technologies qui représentent déjà un challenge pour les mettre en œuvre, les intégrer à un outil plus global représente une complexité supplémentaire à laquelle il faudra se préparer.

Bibliographie

[Anderson et al. 2000] : "Design of Experiments" in ECT 3rd ed., Vol. 7, pp. 526–538, by G. J. Hahn, General Electric Co.; in ECT 4th ed., Vol. 7, pp. 1056–1071, by Gerald J. Hahn, General Electric Company; "Design of Experiments" in ECT (online), posting date: December 4, 2000, by Gerald J. Hahn, General Electric Company; "Design of Experiments" in ECT 5th ed., Vol. 8, pp. 383–410, by Gerald J. Hahn and Angela N. Patterson, General Electric.

[Bergs et al. 2021] : Bergs T, Gierlings S, Auerbach T, Klink A, Schraknepper D, Augspurger T. The concept of digital twin and digital shadow in manufacturing. *Procedia CIRP*, 2021;101:81–4.

[Besteiro et al. 2015] : BESTEIRO, Elen Nara Carpim, DE SOUZA PINTO, Jefferson, et NOVASKI, Olívio. Success factors in project management. *Business management dynamics*, 2015, vol. 4, no 9.

[Biesinger et al. 2019] : F. Biesinger and M. Weyrich, "The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry," 2019 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), Salerno, Italy, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICMECT.2019.8932101.

[Bolton et al. 2018] : Ruth N. Bolton, Janet R. McColl-Kennedy, Lilliemay Cheung, Andrew Gallan, Chiara Orsinger, Lars Witell, Mohamed Zaki, (2018) "Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms", *Journal of Service Management*, <https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0113>.

[Bottani et al. 2021] : Bottani, E.; Cammardella, A.; Murino, T.; Vespoli, S. From the Cyber-Physical System to the Digital Twin: The process development for behaviour modelling of a Cyber Guided Vehicle in M2M logic. In *Proceedings of the XXII Summer School FrancescoTurcoIndustrial Systems Engineering*, Brescia, Italy, 8–10 September 2021.

[Brissaud et al. 2022] : Brissaud, D., Sakao, T., Riel, A., Erkoyuncu, J. A., (2022), Designing value-driven solutions: The evolution of industrial product- service systems, *CIRP annals*, 71(2), 553-575. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.05.006>.

[Callcut et al. 2021] : Callcut, M.; Cerceau gliozzo, J.-P.; Varga, L.; McMillan, L. Digital Twins in Civil Infrastructure Systems. *Sustainability* 2021, 13, 11549. <https://doi.org/10.3390/su132011549>.

[Chavez et al. 2020] : Chavez, Z. (2020). Industrial implementation of an SME-adapted digital tool for monitoring the production: introducing digitalization in small companies. 1015–1024.

[Cordeiro et al. 2019] : Cordeiro, G. A.; Ordóñez, R. E. C.; Ferro, R. (2019), "Theoretical proposal of steps for the implementation of the Industry 4.0 concept", *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, Vol. 16, No. 2, pp. 166-179, available from: <https://bjopm.emnuvens.com.br/bjopm/article/view/803> (access year month day).

[Dai et al. 2020] : Dai, Sheng & Zhao, Gang & Yu, Yong & Bao, Qiangwei. (2020). The Evolution from Digital Mock-Up to Digital Twin. 10.3233/FAIA200781.

[Frank et al. 2019] : Alejandro Germán Frank, Lucas Santos Dalenogare, Néstor Fabián Ayala, Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies, International Journal of Production Economics (2019), doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.

[Garbade et al. 2007] : Garbade, R., Dolezal, W.R. (2007). DMU@Airbus — Evolution of the Digital Mock-up (DMU) at Airbus to the Centre of Aircraft Development. In: Krause, FL. (eds) The Future of Product Development. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69820-3_2.

[Ghani et al. 2004] : J.A Ghani, I.A Choudhury, H.H Hassan, Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters, Journal of Materials Processing Technology, Volume 145, Issue 1, 2004, Pages 84-92, ISSN 0924-0136, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00865-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00865-3).

[Glaessgen et al. 2012] : Glaessgen, Edward & Stargel, David. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. 10.2514/6.2012-1818.

[Goodman et al. 2009] : Goodman, J. (2009). Apollo 13 Guidance, Navigation, and Control Challenges. In AIAA SPACE Forum. AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition. doi:10.2514/6.2009-6455.

[Gregorio et al. 2020] : 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. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris-Saclay, 2020. Français. NNT : 2020UPASN008. tel-02616138v2.

[Grieves et al. 2005] : Grieves, M.W. (2005) 'Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises', Int. J. Product Development, Vol. 2, Nos. 1/2, pp.71–84.

[Grieves et al. 2017] : Grieves, M., Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

[Gröger et al. 2018] : Gröger, C. Building an Industry 4.0 Analytics Platform. Datenbank Spektrum 18, 5–14 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13222-018-0273-1>.

[Hochhalter et al. 2014] : Hochhalter, J.D., Leser, W.P., Newman, J.A., Glaessgen, E.H., Gupta, V.K., & Yamakov, V.I. (2014). Coupling Damage-Sensing Particles to the Digital Twin Concept.

[Kim et al. 2006] : Sung-Kyun Kim, Hee-Sung Park, Kune-Woo Lee, Chong-Hun Jung, Development of a digital mock-up system for selecting a decommissioning scenario, Annals of Nuclear Energy, Volume 33, Issues 14–15, 2006, Pages 1227-1235, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.07.009>.

[Kritzinger et al. 2018] : Werner Kritzinger, Matthias Karner, Georg Traar, Jan Henjes, Wilfried Sihm, Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 11, 2018, Pages 1016-1022, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.

[Ladj et al. 2020] : Asma Ladj, et al., Journal of Manufacturing Systems, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.018>.

[Leach et al. 1999] : Leach, L. P. (1999). Critical Chain Project Management Improves Project Performance. Project Management Journal, 30(2), 39–51. <https://doi.org/10.1177/875697289903000207>.

[Lehtola et al. 2006] : Lehtola, Laura & Kauppinen, Marjo. (2006). Suitability of requirements prioritization methods for market-driven software product development. Software Process: Improvement and Practice. 11. 7-19. 10.1002/spip.249.

[Liu et al. 2018] : Qiang Liu, Hao Zhang, Jiewu Leng & Xin Chen (2018): Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system, International Journal of Production Research, DOI: 10.1080/00207543.2018.1471243.

[Liu et al. 2022] : Yinling Liu, Thierry Moyaux, Guillaume Bouleux, Vincent Cheutet. An agent-based architecture of the Digital Twin for an Emergency Department. 2022. hal-03607543.

[Lopez et al. 2020] : Lopez, P.C., Udugama, I.A., Thomsen, S.T., Roslander, C., Junicke, H., Mauricio-Iglesias, M. and Gernaey, K.V. (2020), Towards a digital twin: a hybrid data-driven and mechanistic digital shadow to forecast the evolution of lignocellulosic fermentation. Biofuels, Bioprod. Bioref., 14: 1046-1060. <https://doi.org/10.1002/bbb.2108>.

[Morais et al. 2019] : Morais, D., G. Goulanian, and N. Danese. 2019. “The future reality of the Digital Twin as a cross-enterprise marine asset”. In Proceedings of International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Volume 2019, 24–26.

[Negri et al. 2017] : Elisa Negri, Luca Fumagalli, Marco Macchi, A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems, Procedia Manufacturing, Volume 11, 2017, Pages 939-948, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>.

[Noël et al. 2020] : Noël, Frédéric & Alpan, Gülgün & Mangione, Fabien. (2020). A Complete Digital Chain to Enable the Digital Twin of a Shop Floor. 10.1007/978-3-030-62807-9_11.

[Özgün et al. 2009] : Özgün, O., & Barlas, Y. (2009, July). Discrete vs. continuous simulation: When does it matter. In Proceedings of the 27th international conference of the system dynamics society (Vol. 6, pp. 1-22).

[Park et al. 2019] : Kyu Tae Park, Young Wook Nam, Hyeon Seung Lee, Sung Ju Im, Sang Do Noh, Ji Yeon Son & Hyun Kim (2019): Design and implementation of a digital twin

application for a connected micro smart factory, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, DOI: 10.1080/0951192X.2019.1599439.

[Park et al. 2007] : Park, Gyung-Jin. (2007). Analytic Methods for Design Practice. *Analytic Methods for Design Practice*. 10.1007/978-1-84628-473-1.

[Parks et al. 2001] : J.M. Parks, On stochastic optimization: Taguchi Methods™ demystified; its limitations and fallacy clarified, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Volume 16, Issue 1, 2001, Pages 87-101, ISSN 0266-8920, [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(00\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(00)00011-4).

[Piromalis et al. 2022] : Piromalis, D.; Kantaros, A. Digital Twins in the Automotive Industry: The Road toward physical-Digital Convergence. *Appl. Syst. Innov.* 2022, 5, 65. <https://doi.org/10.3390/asi5040065>.

[Pystina et al. 2022] : Xeniya Pystina, Lilia Gzara, Vincent Cheutet, Aicha Sekhari. A conceptual framework elements for Digital Twin deployment in production systems domain. 12th International Conference on Information Society and Technology, Mar 2022, Kopaonik, Croatia. pp.39-44. hal-03878395.

[Rabah et al. 2018] : Souad Rabah, Ahlem Assila, Elio Khouri, Florian Maier, Fakreddine Ababsa, Valéry bourny, Paul Maier, Frédéric Mérienne, Towards improving the future of manufacturing through digital twin and augmented reality technologies, *Procedia Manufacturing*, Volume 17, 2018, Pages 460-467, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.070>.

[Redelinghuys et al. 2020] : Redelinghuys, A.J.H., Basson, A.H. & Kruger, K. A six-layer architecture for the digital twin: a manufacturing case study implementation. *J Intell Manuf* 31, 1383–1402 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01516-6>.

[Reifsnider et al. 2013] : Reifsnider, K., & Majumdar, P.K. (2013). Multiphysics Stimulated Simulation Digital Twin Methods for Fleet Management.

[Riascos et al. 2015] : Riascos, R., Levy, L., Stjepandić, J., Fröhlich, A. (2015). Digital Mock-up. In: Stjepandić, J., Wognum, N., J.C. Verhagen, W. (eds) *Concurrent Engineering in the 21st Century*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13776-6_13.

[Ríos et al. 2015] : Ríos, José & Hernandez-Matias, Juan & Oliva, Manuel & Mas, Fernando. (2015). Product Avatar as Digital Counterpart of a Physical Individual Product: Literature Review and Implications in an Aircraft. 10.3233/978-1-61499-544-9-657.

[Rizzi et al. 2017] : M. Rizzi, P. Ferrari, A. Flammini, E. Sisinni and M. Gidlund, "Using LoRa for industrial wireless networks," 2017 IEEE 13th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS), Trondheim, Norway, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/WFCS.2017.7991972.

[Rooks et al. 1998] : Rooks, B. (1998), "A shorter product development time with digital mock - up", *Assembly Automation*, Vol. 18 No. 1, pp. 34-38. <https://doi.org/10.1108/01445159810201405>.

[Sahni et al. 2015] : Sahni, Nishant & Srinivasan, Kailash & Savla, Harsh. (2015). A Review on Developing an Arcade Game Machine and an Arcade Game using Raspberry Pi and Pygame. International Journal of Computer Applications. 120. 37-39. 10.5120/21323-4353.

[Schuh et al. 2018] : G. Schuh, C. Dölle and C. Tönnes, "Methodology for the derivation of a digital shadow for engineering management," 2018 IEEE Technology and Engineering Management Conference (TEMSCON), Evanston, IL, USA, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/TEMSCON.2018.8488412.

[Sepasgozar et al. 2021] : Sepasgozar, S.M.E. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. Buildings 2021, 11, 151. <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>.

[Sobota et al. 2013] : Jaroslav Sobota, Roman Pišl, Pavel Balda, Miloš Schlegel, Raspberry Pi and Arduino boards in control education, IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 17, 2013, Pages 7-12, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823434, <https://doi.org/10.3182/20130828-3-UK-2039.00003>.

[Stecken et al. 2019] : Jannis Stecken, Martin Ebel, Matthias Bartelt, Jens Poeppebusch, Bernd Kuhlenkötter, Digital Shadow Platform as an Innovative Business Model, Procedia CIRP, Volume 83, 2019, Pages 204-209, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.130>.

[Tao et al. 2018] : Tao, F., Cheng, J., Qi, Q. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. Int J Adv Manuf Technol 94, 3563–3576 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.

[Tharma et al. 2018] : Tharma, Rajeeth & Winter, Roland & Eigner, Martin. (2018). AN APPROACH FOR THE IMPLEMENTATION OF THE DIGITAL TWIN IN THE AUTOMOTIVE WIRING HARNESS FIELD. 3023-3032. 10.21278/idc.2018.0188.

[Tsui et al. 1992] : KWOK-LEUNG TSUI (1992): AN OVERVIEW OF TAGUCHI METHOD AND NEWLY DEVELOPED STATISTICAL METHODS FOR ROBUST DESIGN, IIE Transactions, 24:5, 44-57.

[Tuegel et al. 2012] : Tuegel, Eric. (2012). The Airframe Digital Twin: Some Challenges to Realization. Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 10.2514/6.2012-1812.

[Uhlenkamp et al. 2019] : Uhlenkamp, Jan-Frederik & Hribernik, Karl & Wellsandt, Stefan & Thoben, Klaus-Dieter. (2019). Digital Twin Applications : A first systemization of their dimensions. 1-8. 10.1109/ICE.2019.8792579.

[Woodall et al. 2003] : William H Woodall, Rachele Koudelik, Kwok-Leung Tsui, Seoung Bum Kim, Zachary G Stoumbos & Christos P Carvounis MD (2003) A Review and Analysis of the Mahalanobis—Taguchi System, Technometrics, 45:1, 1-15, DOI: 10.1198/004017002188618626.

[Xu et al. 2020]: Wenjun Xu, et al., Journal of Manufacturing Systems, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.013>.

Table des illustrations

Figure 1 implantation du groupe Hellomoov'	- 17 -
Figure 2 Deux exemples de ligne de transfert	- 19 -
Figure 3 Schéma d'un pion de palette	- 20 -
Figure 4 Proposition d'architecture, extrait de Liu et al. 2022 ²	- 27 -
Figure 5 Dai et al. 2020 the relationship between DMU & DT	- 29 -
Figure 6 Étapes d'implémentation du l'industrie 4.0 - Cordeiro 2019	- 38 -
Figure 7 Représentation des trois modèles de comparaison entre la simulation continue (SD pour System Dynamics) et la simulation par évènements discrets (SED)	- 41 -
Figure 8 Représentation du cycle de vie du jumeau numérique	- 54 -
Figure 9 Synoptique du jumeau numérique	- 54 -
Figure 10 Méthodologie d'implémentation d'un jumeau numérique dans une PME..	- 58 -
Figure 11 Processus de vente chez Hellomoov'	- 68 -
Figure 12 a Photo d'une butée	- 85 -
Figure 12 b Représentation d'un point d'arrêt dans le simulateur	- 85 -
Figure 13 a Photo d'une dérivation	- 86 -
Figure 13 b Représentation d'une dérivation dans le simulateur	- 86 -
Figure 14 Schéma représentant le besoin du client	- 93 -
Figure 15 Plan coté de la première solution proposée	- 94 -
Figure 16 capture d'écran de la simulation de la première solution	- 95 -
Figure 17 Capture d'écran de la simulation de la deuxième solution	- 95 -
Figure 18 Schéma de banc d'essai	- 100 -
Figure 19 Photographie de la première vague de mesure de l'expérimentation	- 102 -
Figure 20 Extrait du graphique de l'historisation des temps de passage des palettes entre les capteurs	- 102 -
Figure 21 Graphique des temps ordonnés de passages des palettes en fonction de la charge et de l'état des pions sur chacune d'elles	- 104 -
Figure 22 Graphique de la fréquence d'apparition des temps de passage en fonction de la charge et de l'état des pions	- 105 -
Figure 23 Graphique de la fréquence d'apparition des temps de passage en fonction de l'état des bandes de convoyage	- 106 -
Figure 24a et 24b photographies des feuilles abrasives servant à endommager les bandes de convoyages	- 106 -
Figure 25 Graphique de l'évolution du temps de parcours au fur et à mesure de l'endommagement des bandes de convoyages	- 107 -
Figure 26 Synoptique d'une ligne de transfert contenant les types de nœuds principaux	- 110 -
Figure 27 Représentation du nœud de point d'arrêt	- 111 -
Figure 28 Représentation du nœud de dérivation par came à 90°	- 112 -
Figure 29 Représentation du nœud de dérivation par came courte	- 112 -
Figure 30 Extrait du programme du simulateur correspondant à l'étape de libération d'une palette	- 114 -
Figure 31 Extrait du programme du nœud de dérivation correspondant à l'abaissement de la butée de ce nœud	- 114 -

Figure 32 Extrait du programme du nœud de dérivation correspondant à la remontée de la butée de ce nœud	- 115 -
Figure 33 Photo de l'ESP 32	- 117 -
Figure 34 Photo de la carte RC522	- 117 -
Figure 35 Schéma de la ligne nue du démonstrateur.....	- 118 -
Figure 36 Schéma du circuit imprimé d'une carte de nœud	- 119 -
Figure 37 Schéma du circuit imprimé représentant les connexions	- 119 -
Figure 38 Schéma de la ligne du démonstrateur avec ses équipements	- 120 -

Annexes

- a. Annexe 1 regroupement de photos de chaque élément de transfert :



Figure 39 Une palette, à gauche vu du dessous et à droite du dessus



Figure 40 Une unité de transfert

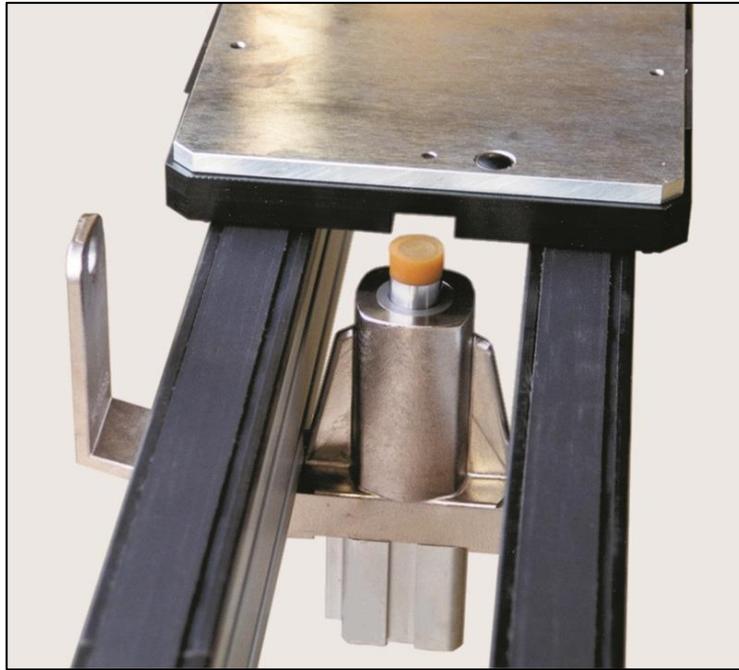


Figure 41 Un point d'arrêt : une butée

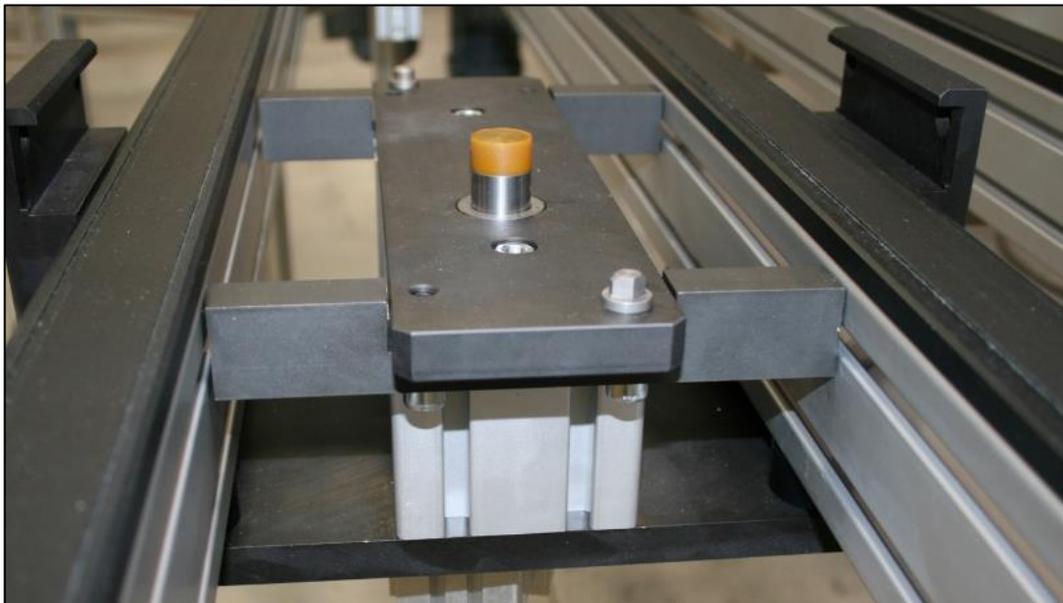


Figure 42 Un point d'arrêt : un indexage

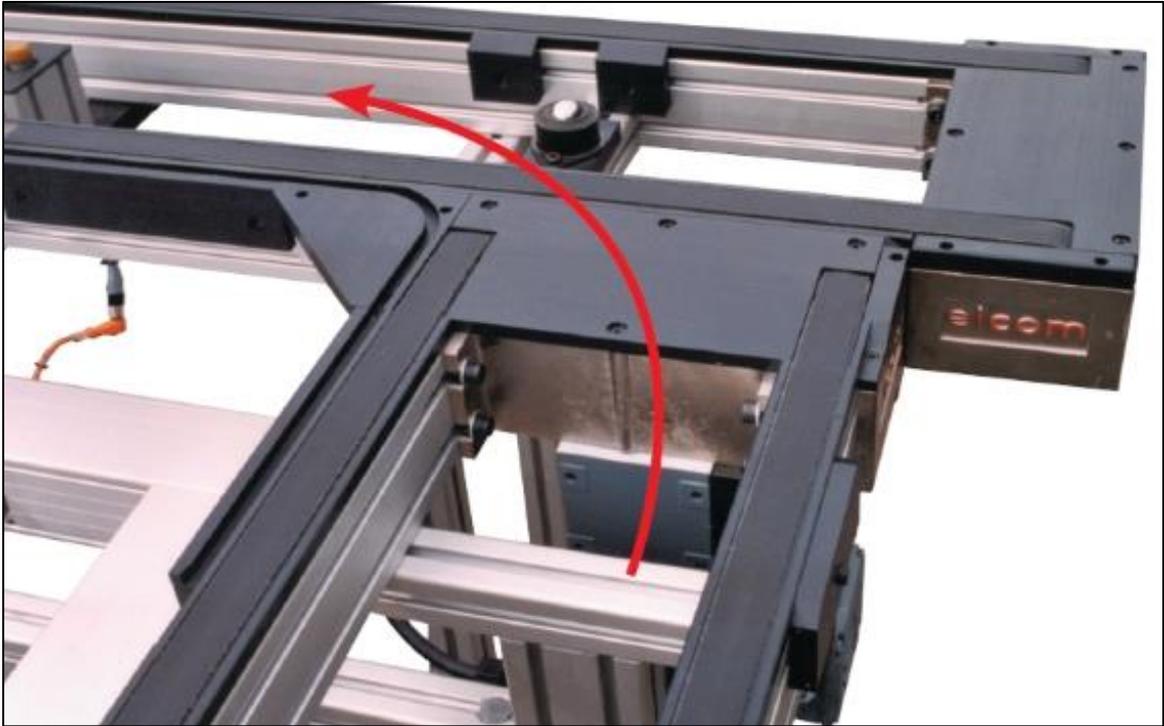


Figure 43 Une came



Figure 44 Une came double



Figure 45 Une came courte



Figure 46 Une dérivation

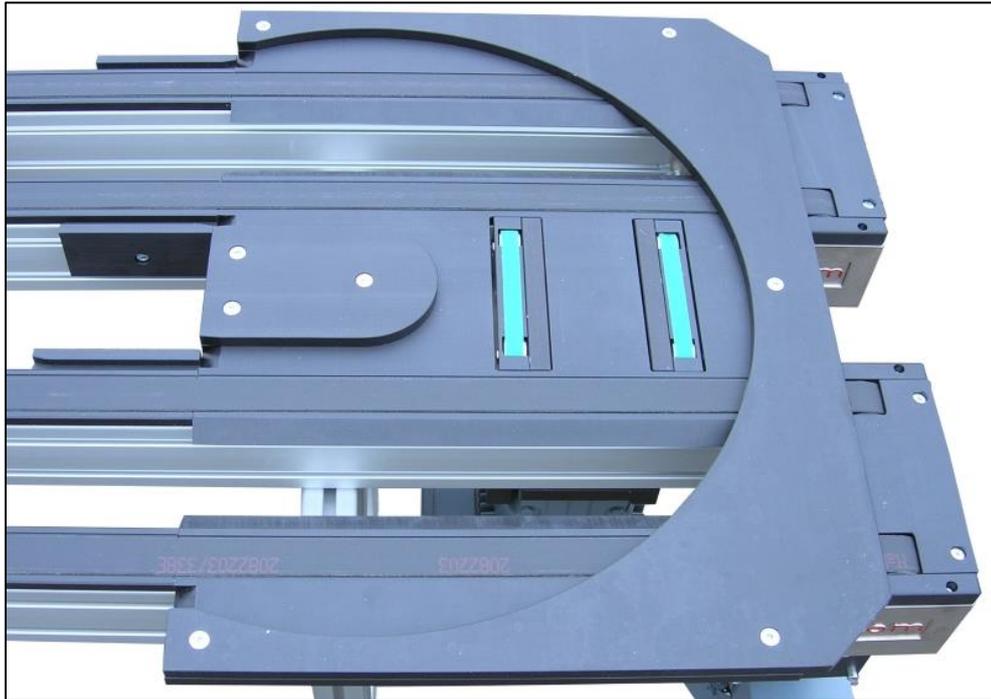


Figure 47 Un retour 180°



Figure 48 Un retournement



Figure 49 Un ascenseur

Notice d'utilisation du simulateur

Sommaire

- I. Description
- II. Créer une ligne
- III. Enregistrer une ligne
- IV. Importer une ligne
- V. Paramétrer une ligne
- VI. Ajouter des palettes
- VII. Lire la simulation

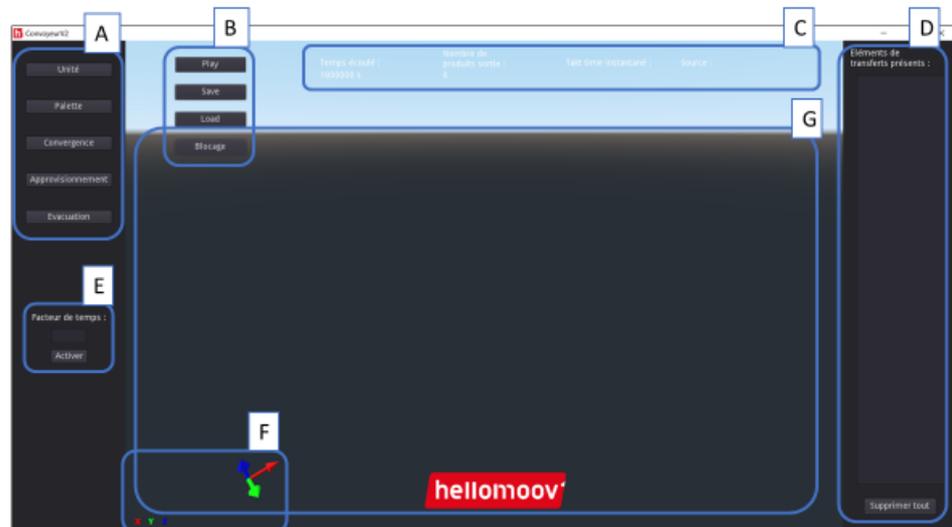
I. Description

Ce simulateur est un simulateur de flux, il a pour objectif de modéliser rapidement une ligne complète (environ 4 h) afin de pouvoir confirmer le design et fournir un élément visuel au client pour voir le fonctionnement du futur système.

Dans le but de faciliter son utilité, il est conçu pour être utilisé de concert avec le configurateur, sans avoir à refaire le travail réalisé précédemment, de pouvoir donc importer une ligne conçue au préalable. Il n'est cependant pas nécessaire d'être passé par DriveWorks, il est tout à fait possible de concevoir la ligne dans le simulateur directement

Description de l'interface

- A : Boutons de création de lignes
- B : Boutons de navigation simulation
- C : Informations de simulations
- D : Liste des éléments présents
- E : Options d'accélération de la simulation
- F : Représentation des axes
- G : Zone de travail



Description de l'interface

A : boutons qui permettent de rajouter des éléments à une ligne de transfert (certains éléments ne sont accessibles que dans d'autres menus)

B : boutons qui permettent de charger, de sauvegarder, de lancer une simulation

C : affichage des données intéressantes ; durée de la simulation, nombre de produits qui sont sortis durant cette simulation, takt time (quotient du temps écoulé de la simulation par le nombre de produits sorti), le nom et la localisation du fichier de sauvegarde

D : une liste de tous les éléments du système en cours de simulation, cette liste

est sélectionnable pour atteindre les paramètres de l'élément en question

E : boutons qui permettent de gérer le facteur de temps, c'est-à-dire le ratio d'accélération du temps de la simulation par rapport au temps réel

F : rappel visuel de l'orientation des axes

G : zone de travail dans laquelle apparaîtront les éléments qui ont été placés et où les palettes se déplaceront lors de la simulation

Navigation dans le simulateur

Il y a plusieurs manières de naviguer la simulation :

- En cliquant sur le bouton du milieu et déplaçant la souris, vous pourrez faire tourner dans la simulation
- En cliquant sur le bouton droit et déplaçant la souris, vous pourrez vous translater dans la simulation
- En faisant rouler la molette, vous pourrez zoomer ou dézoomer dans la simulation
- En appuyant sur la touche F1 du clavier, vous pouvez alterner entre la vue orthogonale et la vue en perspective

Si à un moment vous vous perdez dans la simulation, vous pouvez appuyer sur la barre espace pour recentrer la vue sur la ligne

II. Créer une ligne

Si vous n'avez conçu la ligne que vous souhaitez simuler, il vous faudra la construire dans le simulateur

Philosophie de construction

Dans le simulateur, les accessoires sont liés à l'unité sur laquelle ils sont rattachés, C'est pour cela que vous ne trouvez pas de boutons pour une came ou une butée sur l'interface principale.

Il vous faudra placer une unité puis vous pourrez placer sur elle les accessoires qui vous intéressent (butée, came, dérivation...).

Unité — placement

Il y a plusieurs manières de placer une unité :

Soit en cliquant sur le bouton *Unité* en haut à gauche dans le menu et en définissant manuellement les coordonnées de l'unité

Soit en cliquant sur le bouton et en sélectionnant la *position suggérée* souhaitée

Soit en cliquant sur une des flèches représentant une position suggérée dans la zone de travail



Note : pour la première unité, vous devez seulement cliquer sur le bouton *unité*, la position et l'orientation seront mise par défaut

Notice d'utilisation du simulateur

9

Les positions suggérées

Les positions suggérées sont des positions qui semblent toutes indiquées pour qu'une unité s'y trouve, par exemple après avoir placé une came, le logiciel comprend qu'il y aura probablement une unité qui sera à cet endroit.

L'avantage des positions suggérées c'est que, contenu dans le logiciel, il y a déjà la position précise ainsi que l'orientation de l'unité en question, il est donc bien plus facile de construire une ligne comme ça.

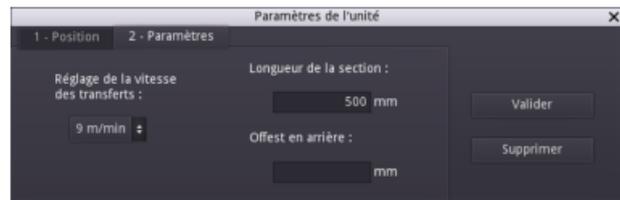
Les flèches représentant les positions suggérées ne sont pas affichées en permanence, la zone de travail serait surchargée, elles n'apparaissent que quand le curseur de la souris passe au-dessus d'eux



Notice d'utilisation du simulateur

10

Unité — paramétrage



Comme dit précédemment, pour la première unité, les 2 seuls paramètres sont la vitesse et la longueur de l'unité. *L'offset* n'est utile que pour un cas particulier expliqué dans la slide suivante.

Le paramètre de *vitesse* est dans le menu déroulant ou seules les vitesses standard sont présentes (9, 15 et 19m/min)

La *longueur* est un champ numérique où la valeur par défaut est 500 mm, car c'est la valeur minimum, mais le minimum et maximum ne sont pas limité.

Unité — l'offset



Dans le cas où une came entrée et placée à la fin d'une unité, le simulateur sait déjà comment placer l'unité suivante, mais il va la coller à l'unité précédente (comme dans le cas 1). Il est cependant possible de reculer l'unité aval grâce au paramètre offset. Par exemple un offset de 100 mm (le cas 2)

Placer un accessoire



Après avoir validé, une nouvelle fenêtre apparaîtra, la fenêtre « accessoire »

Dans cette fenêtre il y a 3 champs :

Tout d'abord, le type d'accessoire que vous souhaitez mettre

La distance par rapport à l'origine à laquelle vous souhaitez placer l'accessoire

Et éventuellement, s'il s'agit d'une came (gauche ou droite) la possibilité de directement mettre la came à l'extrémité de l'unité (si c'est une came entrée gauche ou droite) et dans ce cas le paramètre distance n'est plus utilisé

De plus, pour les retours 180, ni la distance ni la case extrémité n'ont à être remplies, car le retour 180 est forcément en bout d'unité

Distance par rapport à l'origine

Le paramètre distance par rapport à l'origine qui concerne les cames, les dérivations, les cames courtes et les butées fonctionnent de la manière suivante

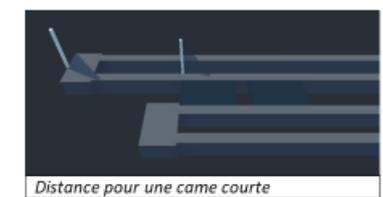
La distance est prise depuis l'origine de l'unité et :

Jusqu'au plan de symétrie de l'unité suivante pour les cames et les dérivations

Jusqu'à la première face du corps d'une came courte

Jusqu'au centre de la position statique d'une palette arrêtée pour une butée

Pour faciliter la lecture, 2 repères sont là pour aider à visualiser la distance en question

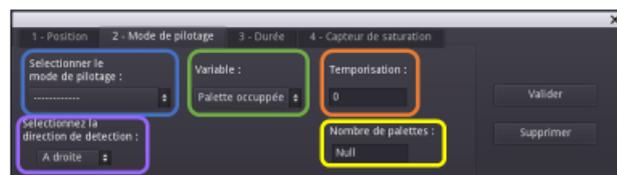


Paramétrage des accessoires

Pour les Cames et les Retours 180°, une fois placé, ils sont fonctionnels. En revanche, pour les 3 autres familles (Dérivation, Came courte et Butée) après les avoir placés il faut encore les paramétrer

Paramétrage — Butée

Dans l'onglet *Mode de pilotage* :

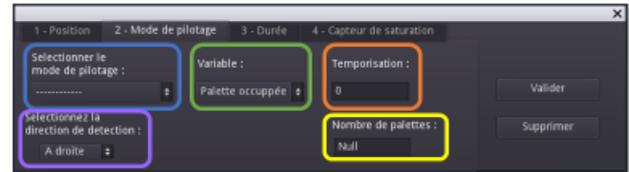


Le mode de pilotage va définir le fonctionnement de la butée :

- **Gestion de zone** ; la butée va surveiller le capteur de saturation en aval pour savoir s'il peut libérer celle au poste ou non. Tant qu'il n'y a pas plus de palettes que le nombre dans **Nombre de palettes** la butée libèrera la palette
- **Gestion de zone avec variable** ; le fonctionnement est le même que le paramètre, mais en plus il faut que la palette soit dans une condition particulière en plus pour être libérée ; la palette doit soit être **occupée**, soit le **produit dessus doit être bon**, soit la palette doit être **libre**, soit le **produit doit être mauvais**

Paramétrage — Butée

Dans l'onglet *Mode de pilotage* :



- **Poste avec gestion** ; la butée va attendre la durée renseignée dans **Temporisation** et une fois la durée écoulée, comme dans la *gestion de zone* elle va surveiller le capteur de saturation et ne laisser passer des palettes tant qu'il y en a moins que le **nombre de palettes**
- **Temporisation** ; la butée va simplement attendre la durée renseignée dans **Temporisation** et libérer la palette après

Chaque butée a, au minimum, 1 capteur de présence, représenté par un **cylindre**. Ce cylindre devient vert quand il détecte une palette. Par défaut, il est à droite, mais il est possible de **le mettre à gauche**



17

Paramétrage — Butée



Pour certains fonctionnements, la butée a besoin d'un ou plusieurs capteurs de saturation :

Le switch permet d'activer ou non, les capteurs de saturation

La liste permet de voir tous les capteurs de saturations présents pour la butée et d'en ajouter en cliquant dans une partie vide de la zone

Chaque capteur de saturation est rattaché un élément, on peut voir lequel dans la **zone** prévue pour cela

Une fois l'élément sélectionné, on peut déplacer le capteur pour le mettre là où l'on souhaite grâce au paramètre **offset**

Par défaut, les capteurs seront à droite, on peut les mettre à gauche grâce au **bouton gauche**

Notice d'utilisation du simulateur

18

Paramétrage Dérivation et came courte



Les dérivations et les comes courtes se paramètrent de la même manière, la question est de déterminer comment savoir si une palette doit poursuivre son chemin ou si elle doit tourner. Il y a **4 modes** avec chacun leurs paramètres :

- *Condition*
- *Aléatoire*
- *Systematique*
- *Saturation*

Mode Condition



Dans le mode **Condition**, c'est l'état de la palette qui va déterminer la direction que prendra la palette :

Après avoir défini **le sens par défaut** (qui correspond au sens que prendra la palette si la condition n'est pas remplie)

On peut sélectionner la **condition** qui fera que la palette prendra l'autre direction ; **palette occupée, produit bon, palette libre, produit mauvais**

Mode Aléatoire



Dans le mode **Aléatoire**, la palette ira tout droit par défaut et il y a un pourcentage de chance qu'elle tourne.

Ce pourcentage est renseigné dans le paramètre **Ratio aléatoire**

Mode Systématique



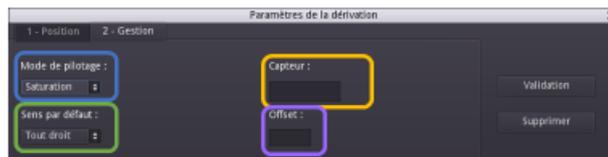
Dans le mode **Systématique**, les palettes vont suivre un cycle systématique, x palettes tout droit, y palettes tourneront

Le **premier paramètre** renseigne le nombre de palettes qui iront tout droit

Le **second** renseigne le nombre de palettes total du cycle

Donc si le premier paramètre est à 2 et que le second est 5 ; 2 palettes iront tout droit, puis 3 palettes tourneront, puis 2 palettes iront tout droit et ainsi de suite

Mode Saturation

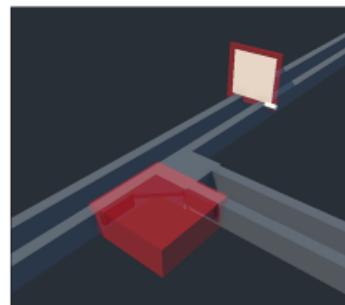


Dans le mode **Saturation**, la palette a une **direction par défaut**, sur cette direction il y a un **capteur de saturation**, si ce capteur est activé alors l'accessoire considère que la direction est saturée et il l'enverra donc dans l'autre direction.

Après avoir cliqué dans le paramètre **Capteur** on peut sélectionner l'élément auquel va se rattacher le capteur, puis on peut décaler le capteur grâce au paramètre **offset**

Paramétrage

Tant que tous les éléments n'ont pas été paramétrés, ils apparaîtront en rouge et il sera impossible de lancer la simulation



Éléments particuliers

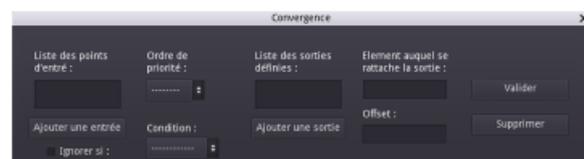
En plus des éléments (unité et accessoires), il y a d'autres objets qu'il faut rajouter grâce aux boutons du menu de droite :

- *Les convergences*
- *Les points d'approvisionnement*
- *Les points d'évacuations*



Ces éléments sont particuliers, car ils n'ont pas de modèle 3D, ils n'apparaissent pas à l'écran

Convergence



Dès lors qu'il y a une dérivation ou une came courte plus loin sur la ligne il y aura en endroit où le flux se rejoindra, c'est une convergence.

C'est un élément particulier, car il faut gérer une priorité entre 2 branches ou plus.

Une convergence peut avoir 2 entrées ou plus et plusieurs sorties.

Le principe est le suivant, dès qu'une palette entre dans la convergence, aucune autre ne peut entrer, dès que la palette entrée prend une des sorties, la suivante peut entrer. Si plusieurs palettes sont présentes à plusieurs entrées, la palette présente au poste de priorité la plus élevée (ordre de priorité le plus faible) rentrera en premier

Convergence



Les points d'entrées d'une convergence sont forcément des butées, car il faut pouvoir gérer les entrées, en cliquant sur le bouton **Ajouter une entrée** on peut sélectionner une butée, puis on peut sélectionner son **Ordre de priorité** (si une entrée a déjà une priorité, une autre entrée ne peut pas sélectionner la même)

Il est possible d'ignorer une entrée dans certaines conditions ; si entre l'entrée et la convergence il y a une dérivation conditionnelle, on peut reporter cette condition pour éviter de bloquer la convergence. Pour cela il faut cocher la case **Ignorer si** et renseigner la **condition** permettant à la palette de ne pas rentrer dans la convergence

En cliquant sur les butées dans la liste, vous pourrez voir les paramètres de chaque entrée (ordre de priorité et condition pour ignorer)

Convergence



Pour les sorties, on rajoute un capteur par sortie, une fois un des capteurs activés, on sait que la palette est sortie et l'on peut donc envoyer les suivantes

Pour ajouter un capteur il faut cliquer sur le bouton **Ajouter une sortie** puis sélectionner **l'élément auquel se rattache le capteur** on peut alors positionner le capteur grâce à **l'offset**

Approvisionnement

L'approvisionnement est l'endroit où les palettes arrivent vides et où elles repartent avec un produit. L'approvisionnement se fait à une butée. Sur un poste d'approvisionnement, il peut y avoir plusieurs butées où plusieurs palettes vont recevoir un produit en simultané.

L'approvisionnement ne gère que l'ajout du produit, pour la gestion de la butée elle-même il faut régler ses propres paramètres (souvent une *gestion de zone avec variable* ou *poste avec gestion* ou la condition est la présence du produit sur la palette et le temps est à 0)

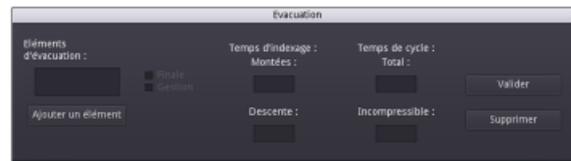
Approvisionnement



Pour ajouter une butée, il faut cliquer sur le bouton **Ajouter un élément** puis sélectionner la butée à ajouter. Si c'est la butée la plus en aval de l'approvisionnement il faut cocher le paramètre **Finale** et si elle doit être gérée avec un capteur de saturation il faut cocher le paramètre **Gestion**.

Il y a 4 paramètres de temps pour l'approvisionnement ; **le temps total** correspond au temps le plus court auquel l'approvisionnement peut fournir des pièces, **le Temps incompressible** correspond au temps minimum que toutes les palettes doivent être à leurs postes avant que les produits soient déposés, **les temps de montée et de descente d'indexage** correspondent (dans le cas où ce sont des indexages et non des butées) aux temps que mettent les indexages pour monter en position où les palettes sont considérées au poste et descendre pour libérer les palettes

Évacuation



L'évacuation est l'exact miroir de l'approvisionnement, il fonctionne exactement de la même manière, avec les mêmes paramètres et le même principe

Les palettes



Pour ajouter des palettes, il faut cliquer sur le bouton *Palette* dans le menu à gauche, puis il y a 2 possibilités :

- Soit en les ajoutant une par une en appuyant sur le bouton **Ajouter** et en rentrant manuellement leurs positions et leurs orientations
- Soit en sélectionnant des unités sur lesquelles répartir un certain nombre de palettes

En cliquant sur **Ajouter unité** **au-dessus** s'affichera le nombre maximum théorique de palettes que cette unité pourrait porter, ensuite il faut renseigner le **nombre de palettes** à ajouter et **l'offset** qui correspond à l'espace entre l'extrémité de l'unité et la première palette.

Vous pouvez ensuite choisir si les palettes sont **occupées ou non** et si le produit positionné dessus est **bon ou non**

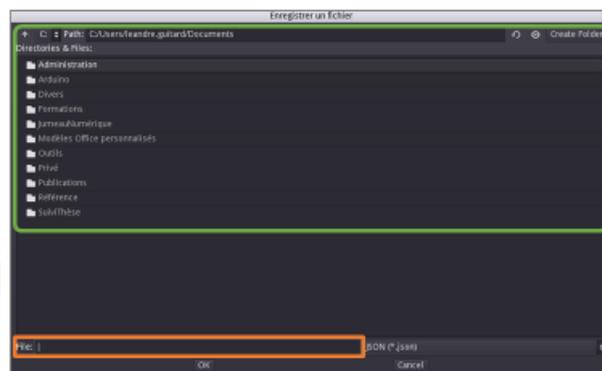
En cliquant sur **Fermer** le simulateur tentera de positionner le nombre de palettes souhaité, si une palette devait tomber sur un accessoire, le simulateur ignorera cette position et passera à la suivante

Sauvegarde

A n'importe quel moment lors de l'édition de la ligne, il est possible de sauvegarder la configuration (position des éléments et paramétrage).

Pour cela, il faut cliquer sur le bouton **Save** du menu de simulation.

Une fois le bouton cliqué, une fenêtre d'enregistrement s'ouvrira, dans laquelle vous pourrez **sélectionner le dossier** dans lequel vous souhaitez faire la sauvegarde et en dessous **le nom** que vous souhaitez donner au fichier



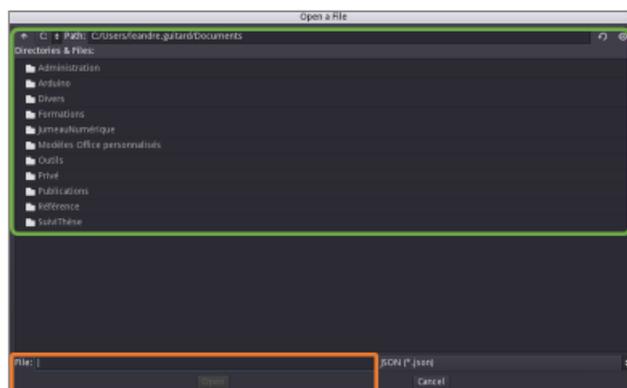
Notice d'utilisation du simulateur

33

Charger — Importer

Dans le simulateur, charger un projet fait entièrement sur le simulateur ou importer un projet provenant du configurateur se fait de la même manière. Il faut cliquer sur le bouton **Load** du menu.

Une fois cliqué, une fenêtre s'ouvrira et vous permettra de **trouver le dossier** dans lequel se trouve le fichier, de **le sélectionner** et de **l'ouvrir**



Notice d'utilisation du simulateur

34

Importer

Pour l'importation il faut noter que le configurateur gère uniquement l'architecture, pas les paramètres de flux, par conséquent si vous importez une ligne, il vous faudra faire attention à plusieurs points :

- Paramétrer les butées, les dérivations et les cames courtes
- Ajouter les convergences, les approvisionnements et les évacuations
- Ajouter les palettes

Facteur de temps

Afin d'avoir une projection de ce qu'il se passera dans le futur, il est possible d'accélérer une simulation, cela est fait via un facteur de temps, le facteur de temps représente le nombre de secondes qui s'écouleront pour la simulation pour une seconde dans la réalité, donc si l'on met un facteur de temps de 1 la simulation s'écoulera normalement, si l'on met 0,5 la simulation ira 2 fois plus lentement et si l'on met 2 elle ira 2 fois plus vite. Pour ce faire, il faut renseigner une valeur et cliquer sur le bouton Activer avant de lancer la simulation.



Lancer une simulation

Une fois une ligne construite et paramétrée, et que les palettes aient été ajoutées, vous pouvez lancer la simulation en cliquant sur le bouton **Play** du menu de simulation.



Notice d'utilisation du simulateur

37

Enregistrement des données

Pendant une simulation, un certain nombre de paramètres sont enregistrés (chaque moment où des produits ont été évacués), pour obtenir ce fichier, en cliquant sur *Pause* cela ouvrira une fenêtre pour l'enregistrer sur votre ordinateur, c'est le même processus que pour sauvegarder une configuration.

Le fichier enregistré est un fichier .json qui peut être lu comme un .csv par Excel

Notice d'utilisation du simulateur

38