

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Management Industriel et Logistique

Présenté par : YELLES CHAUCHE Safia Nassima

Thème

**Approches méthodologiques pour le
développement de jumeaux numériques :
Cas pratique d'une fromagerie bio**

Soutenu publiquement, le 07/07/2024, devant le jury composé de :

M. Mohammed BENNEKROUF	MCA	ESSA Tlemcen	Président
M. Fouad MALIKI	MCA	ESSA Tlemcen	Encadrant
M. Mohammed Adel HAMZAOU	MC	ENSIBS	Co. Encadrant
Mme. Nathalie JULIEN	Prof	ENSIBS	Co. Encadrant
M. Mehdi SOUIER	Prof	Univ. Tlemcen	Examinateur
M. Luka LE ROUX	Postdoc	Univ. Bretagne Sud	Examinateur
Mme. Nourelhouda SEKKAL	MCB	ESSA Tlemcen	Examinateur
M. Salim KAZI AOUL	Ingénieur	ENSIBS	Invité

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Ce projet n'aurait pas vu le jour sans l'intervention déterminante et bienveillante de nombreuses personnes, chacune apportant une contribution précieuse à sa réalisation.

En premier lieu, je souhaite exprimer toute ma gratitude envers Monsieur Fouad MALIKI, mon encadrant, dont l'expertise, la disponibilité et les conseils avisés ont été essentiels à chaque étape de ce travail. Son soutien infaillible a été une source d'inspiration et de confiance, sans laquelle ce projet n'aurait pas pu aboutir de la même manière.

À Madame Nathalie JULIEN, je suis infiniment reconnaissant pour m'avoir accordé cette opportunité précieuse. Sa confiance initiale et son soutien constant ont été des moteurs essentiels qui ont alimenté ma motivation tout au long de cette expérience captivante.

À Monsieur Mohammed Adel HAMZAOU, je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères pour ses conseils éclairés, sa patience infinie et son soutien indéfectible. Sa présence bienveillante a été un véritable soutien moral dans les moments où les défis semblaient insurmontables.

Enfin, à Monsieur KAZI AOUL Salim, je suis profondément reconnaissant pour son appui inconditionnel et son dévouement à assurer mon intégration harmonieuse au sein de l'équipe à l'ENSIBS. Sa générosité et son engagement à faciliter mon chemin ont joué un rôle crucial dans la réussite de ce projet.

Chacun d'entre eux a non seulement enrichi mon parcours académique mais a également contribué de manière significative à mon développement personnel. Leur soutien précieux restera gravé dans ma mémoire comme une pierre angulaire de cette expérience transformative à l'ENSIBS.

Je témoigne aussi de ma reconnaissance et ma gratitude à tous les enseignants qui ont apporté leur aide, ont guidé mes réflexions et ont contribué à la réussite de ce parcours universitaire ainsi qu'à ce projet, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques.

À mes amis qui méritent une mention spéciale pour avoir marqué positivement ces années universitaires. Leurs encouragements, leur amitié et leurs précieux moments partagés ont enrichi mon expérience étudiante et ont été une source constante de motivation.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance profonde envers mes parents, dont le soutien indéfectible, tant moral que financier, a été un pilier essentiel tout au long de mes études. Leur dévouement constant, leurs conseils avisés et leur croyance inébranlable en mes capacités ont été d'un soutien inestimable. À mes grands frères, je suis reconnaissante pour leur guidance bienveillante qui m'a aidé à garder le cap lorsque cela était nécessaire.

Je tiens également à remercier toutes les personnes rencontrées au fil de cette aventure, dont le soutien désintéressé et la disponibilité ont été précieux. Leur contribution a été significative et a renforcé mon parcours académique de manière indélébile.

Je tiens à rendre hommage à un être cher qui nous a quittés, une personne qui a marqué profondément mon parcours depuis la maternelle jusqu'à ce jour. Mon grand-père, El Hachemi BABAHMED, restera à jamais dans mon cœur pour sa joie de vivre contagieuse, sa gaité, son humour bienveillant, sa gentillesse sans limites et son dévouement constant. Il a été une source inépuisable d'enseignements et de soutien jusqu'à son dernier souffle.

Je suis reconnaissante envers chacune de ces personnes, qui ont toutes joué un rôle crucial dans la réalisation de ce mémoire et dans mon parcours personnel. Leurs contributions ont été au-delà de mes attentes et ont rendu cette expérience non seulement enrichissante, mais aussi inoubliable.

Sommaire

- 1 L'industrie 4.0 et le jumeau numérique 9**
- 1.1 Introduction : 9
- 1.2 L'industrie 4.0 : 9
- 1.2.1 Les principales caractéristiques de l'industrie 4.0 : 10
- 1.3 Le Jumeau numérique : 12
- 1.3.1 Historique : 12
- 1.3.2 Les descriptions du jumeau numérique dans la littérature : 15
- 1.3.3 Les domaines d'applications du jumeau numérique : 19
- 1.3.4 les caractéristiques du jumeau numérique : 22
- 1.3.5 Méthodologie de développement et de déploiement du jumeau numérique : 23
- 1.4 Conclusion : 25

- 2 Les outils de modélisation 27**
- 2.1 Introduction : 27
- 2.2 Le BPMN (Business Process Model and Notation) : 27
- 2.2.1 Historique et évolution : 28
- 2.2.2 Principes fondamentaux de BPMN : 28
- 2.3 Le SADT (Structured Analysis and Design Technique) : 33
- 2.4 L'AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) : 35
- 2.4.1 Comment appliquer la méthode AMDEC ? 35
- 2.4.2 Les différents types d'AMDEC : 37
- 2.5 Conclusion : 37

- 3 Etude de cas 38**
- 3.1 Introduction : 38
- 3.2 Étude de cas sur une Ligne de Production de Yaourt avec BPMN.Demo : 38
- 3.3 Étude de cas sur une ligne de production de yaourt avec SADT : 51
- 3.4 Étude de cas sur une ligne de production de yaourt avec AMDEC : 55
- 3.5 L'intégration de l'ergonomie au jumeau numérique : 58
- 3.5.1 Définition de l'ergonomie : 58
- 3.5.2 La démarche de conception ergonomique : 58
- 3.5.3 Étapes de conception génériques pour le jumeau numérique intégrant l'ergonomie dès le départ: 60
- 3.6 Conclusion : 61

Liste des figures

- 1.1 Les piliers sur lesquels repose l'Industrie 4.0 11
- 1.2 Conceptual ideal for PLM 13
- 1.3 Modèle de concept jumeau numérique à cinq dimensions selon (Tao, et al., 2019) 15
- 1.4 Évolution du concept de jumeau numérique 15

1.5	Les éléments d'un modèle de jumeau numérique [12]	19
1.6	Jumeau numérique d'un scanner à rayons X [11]	20
1.7	Évolution des usages	23
1.8	Méthodologie de déploiement basée sur l'architecture 5C CPS	24
1.9	Le jumeau numérique dans son système cyber-physique social	25
2.1	Représentation des différents évènements de début	29
2.2	Représentation des différents évènements intermédiaires	30
2.3	Représentation des différents évènements de fin	30
2.4	Représentation des liens	31
2.5	Représentation des différentes tâches	31
2.6	Représentation des différents sous-processus	32
2.7	Représentation des différentes passerelles	32
2.8	Représentation d'une piscine	33
2.9	Représentation des couloirs à l'intérieur d'une piscine	33
2.10	Représentation SADT [14]	34
2.11	Représentation des niveaux inférieurs dans SADT [24]	35
3.1	Représentation globale en BPMN de la ligne de production de yaourts brassé et nature	39
3.2	Représentation de la première partie en BPMN de la ligne de production de yaourts brassé et nature	40
3.3	Représentation du sous-processus de réception de lait	40
3.4	Représentation du sous-processus de réception des ingrédients	40
3.5	Représentation de la deuxième partie en BPMN de la ligne de production de yaourts brassé et nature	41
3.6	Représentation du sous-processus de pasteurisation du lait	41
3.7	Représentation de la troisième partie en BPMN des processus de production des yaourts brassé et nature	42
3.8	Représentation du sous-processus de nettoyage des cuves	42
3.9	Représentation de la quatrième partie du BPMN des processus de production des yaourts brassé et nature	43
3.10	Représentation de la cinquième partie du BPMN des processus de production des yaourts brassé et nature	43
3.11	Représentation du sous-processus d'étiquetage	44
3.12	Représentation du sous-processus de stockage	44
3.13	Représentation BPMN de la ligne de production de yaourt avec les 3 couches (Humain-Jumeau numérique-Partie physique)	45
3.14	Représentation BPMN du rôle de l'humain au début du processus	45
3.15	Représentation BPMN du rôle du jumeau numérique au début du processus	46
3.16	Représentation BPMN du rôle de la partie physique au début du processus	46
3.17	Représentation BPMN du rôle de la partie physique	47
3.18	Représentation BPMN des échanges entre le jumeau numérique et la partie physique	47
3.19	Représentation BPMN de la suite des tâche pour la partie physique	48
3.20	Représentation BPMN de l'envoi de message du jumeau numérique au autre parties pour le début des actions parallèle	48
3.21	Représentation BPMN des tâches parallèles de l'humain	49
3.22	Représentation BPMN des tâches parallèles du jumeau numérique et la partie physique	49
3.23	Représentation BPMN de la suite des tâches de la partie physique	50
3.24	Représentation BPMN de la suite des tâches du jumeau numérique et la partie physique	50
3.25	Représentation BPMN de la fin des tâches de l'humain et du jumeau numérique	51
3.26	Représentation BPMN de la fin des tâches du jumeau numérique et la partie physique	51
3.27	Représentation SADT de la réception des ingrédients	52
3.28	Représentation SADT de la préparation de la fabrication	53
3.29	Représentation SADT de l'action mécanique	53
3.30	Représentation SADT du traitement thermique	54
3.31	Représentation SADT de l'emballage et le suremballage	54

3.32 Représentation SADT du système global et les interactions entre les composants du système	55
3.33 Représentation du tableau pour l'AMDEC	56
3.34 L'AMDEC réalisée pour la ligne de production de yaourt	57
3.35 Démarche de conduite de projet proposée par l'ergonomie de l'activité [6]	59
3.36 Méthodologie de déploiement basée sur l'architecture 5C CPS et incluant une approche ergonomique[15]	60

Liste des tableaux

1.1 Les définitions existantes du jumeau numérique [3]	18
2.1 Les types d'AMDEC [10]	37

Introduction générale

L'avènement de l'Industrie 4.0 marque une ère où la frontière entre le monde physique et numérique s'efface progressivement. Ce mouvement transforme profondément les méthodes traditionnelles de production industrielle en intégrant des technologies avancées telles que l'Internet des Objets (IoT), la fabrication additive, et les systèmes cyber-physiques. Au cœur de cette révolution se trouve le concept de jumeau numérique, une réplique virtuelle d'un objet, d'un processus ou d'un système physique en temps réel. Cette technologie permet une modélisation détaillée et une simulation avancée, ouvrant la voie à l'optimisation des performances, à la prévision des comportements et à la gestion proactive des opérations industrielles.

Pour concrétiser ces avancées théoriques, l'utilisation d'outils de modélisation comme le Business Process Model and Notation (BPMN), le Structured Analysis and Design Technique (SADT), et l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est essentielle. Ces méthodologies offrent des cadres structurés pour la représentation des processus, la décomposition des systèmes complexes, et l'évaluation des risques, respectivement. Ensemble, ces outils facilitent la conception, l'analyse et l'optimisation des jumeaux numériques dans divers domaines industriels, ouvrant la voie à des innovations significatives et à une compétitivité accrue.

En tant que stagiaire engagé dans le projet TERRA (Pour la Transformation Numérique des Producteurs et Transformateurs Laitiers), cette évolution technologique n'est pas seulement un sujet d'étude, mais une réalité à laquelle je contribue activement. Collaborant avec des partenaires académiques et industriels en Bretagne, je participe à la mise en place de méthodologies avancées pour développer et déployer des jumeaux numériques adaptés au secteur agroalimentaire. Notre objectif est clair : utiliser ces technologies pour optimiser les processus de production dans une fromagerie bio locale, tout en garantissant l'intégrité des produits et en répondant aux défis spécifiques des circuits courts alimentaires.

Dans le premier chapitre de ce rapport, nous entreprendrons une exploration approfondie de l'Industrie 4.0, mettant en lumière les tenants et aboutissants de cette révolution industrielle. Nous définirons les fondements théoriques de l'Industrie 4.0, en mettant en évidence ses principaux piliers tels que l'Internet des Objets (IoT), la fabrication additive, l'intelligence artificielle (IA) et les systèmes cyber-physiques. Ensuite, nous nous concentrerons sur le concept de jumeau numérique, pivot central de l'Industrie 4.0, en explorant sa définition, ses caractéristiques et ses applications dans divers secteurs industriels. Nous aborderons également une méthodologie clé pour le déploiement et le développement du jumeau numérique. Cette approche méthodique repose sur des architectures telles que les systèmes 5C CPS (Commande, Contrôle, Communication, Calcul, Cyber), fournissant un cadre structuré pour la conception et l'implémentation efficaces des jumeaux numériques. Elle intègre les avancées technologiques tout en tenant compte des défis humains et organisationnels, facilitant ainsi une adoption harmonieuse dans différents secteurs industriels.

Le deuxième chapitre a ensuite approfondi l'utilisation de BPMN, SADT et l'AMDEC dans le cadre du projet TERRA. Ces outils de modélisation ont été cruciaux pour structurer et analyser les processus de fabrication de la fromagerie bio, en permettant une compréhension approfondie du fonctionnement de la ligne de production de yaourt. Ils ont identifié les forces à renforcer et les risques à anticiper, posant ainsi les fondations d'un jumeau numérique robuste, spécifiquement adapté aux besoins de l'industrie agroalimentaire.

Enfin, le troisième chapitre a réalisé une analyse approfondie de la ligne de production de yaourt en utilisant les méthodologies précédemment introduites. À travers BPMN, nous avons cartographié de manière détaillée les flux opérationnels, tandis que l'analyse SADT a scruté les fonctions principales et les dynamiques opérationnelles essentielles. L'AMDEC a joué un rôle crucial en identifiant les risques potentiels auxquels cette ligne est confrontée. De plus, l'intégration de l'ergonomie a mis en lumière l'importance d'une interaction harmonieuse entre les opérateurs humains, les équipements et les processus, visant à améliorer à la fois la productivité et le bien-être au travail.

En conclusion, ce mémoire démontre comment le jumeau numérique peut révolutionner les pratiques industrielles dans les circuits courts alimentaires. En combinant une approche méthodologique rigoureuse avec une vision prospective, le projet TERRA illustre avec succès l'application des technologies avancées pour améliorer l'efficacité opérationnelle et promouvoir la durabilité environnementale. En optimisant les processus de fabrication à travers BPMN, SADT et l'AMDEC, le projet pose les bases d'un jumeau numérique robuste et adapté aux spécificités de l'industrie agroalimentaire. Cette initiative offre des perspectives prometteuses pour l'avenir de ce secteur, en facilitant la transition vers des pratiques plus intelligentes, plus sûres et plus durables.

Chapitre 1

L'industrie 4.0 et le jumeau numérique

1.1 Introduction :

L'objectif de ce projet est de concevoir et de modéliser un jumeau numérique logistique dans le cadre du projet TERRA. Ce premier chapitre commence par une brève exploration de l'historique marquant l'évolution du jumeau numérique, suivi par une présentation des différentes définitions et caractéristiques de ce concept. En outre, nous aborderons la méthodologie de développement et de déploiement du jumeau numérique.

1.2 L'industrie 4.0 :

Dans un contexte où les avancées scientifiques et technologiques progressent de manière exponentielle, et dans une ère de mondialisation omniprésente, l'industrie se voit contrainte de repenser ses approches et ses stratégies pour répondre à ces évolutions, tout en satisfaisant les exigences croissantes des clients et en prenant en compte les enjeux environnementaux. Cette conjoncture a conduit certains pays à réévaluer leurs stratégies industrielles, donnant ainsi naissance à divers projets visant à améliorer et à développer le secteur. Parmi ces initiatives, on trouve l'"Industrie 4.0" en Allemagne et le plan "Made in China 2025" en Chine, partageant un objectif commun : moderniser l'industrie en la rendant plus intelligente. Ces efforts convergents semblent annoncer l'avènement d'une quatrième révolution industrielle.

C'est lors de la foire de Hanovre (Hannover Messe) en Allemagne, en 2011, que le concept d'"Industrie 4.0" est officiellement présenté. Il s'agissait d'un projet initié par le gouvernement fédéral allemand, visant à numériser et à renforcer la compétitivité de l'industrie allemande.

Selon Germany Trade and Invest (GTAI), l'Industrie 4.0 représente un changement de paradigme de la production "centralisée" à la production "décentralisée", rendu possible par les avancées technologiques qui bouleversent la logique traditionnelle du processus de production. Concrètement, cela implique que les machines industrielles ne se contentent plus simplement de "traiter" le produit, mais que le produit interagit avec la machine pour lui indiquer précisément quoi faire, créant ainsi ce qu'on appelle un "smart Product". [1]

Selon GTAI, l'Industrie 4.0 représente "l'évolution technologique des systèmes embarqués vers les systèmes de cyber-physique", une approche qui "relie les technologies de production intégrées aux processus de production intelligents" [1]

De manière globale, l'Industrie 4.0, considérée comme la quatrième révolution industrielle, favorisera l'interaction entre le monde physique et le monde virtuel en exploitant des technologies telles que l'Internet des objets, les systèmes cyber-physiques, et bien d'autres encore. Cette convergence technologique donne naissance à ce que l'on appelle la "smart factory" ou l'usine intelligente. [22]

Contrairement aux révolutions industrielles précédentes, l'Industrie 4.0 est unique en ce sens qu'elle a été anticipée avant même de se produire. Cette anticipation permet aux chercheurs et aux indus-

triels de façonner cette révolution selon leurs besoins et leurs visions. Cependant, ces visions diffèrent entre les chercheurs et les praticiens de l'industrie, ce qui explique le manque de définition claire de l'Industrie 4.0 à ce jour. Bien que les différentes définitions convergent, elles ne se rejoignent pas nécessairement [22]. De plus, chaque pays et chaque acteur insiste sur des priorités différentes concernant l'exploitation de cette nouvelle technologie. [7]

Dans ce qui suit, voici quelques définitions de l'Industrie 4.0 telles qu'elles ont été trouvées dans la littérature :

- "L'industrie 4.0 est l'intégration de machines et de dispositifs physiques complexes avec des capteurs et des logiciels en réseau, utilisés pour prédire, contrôler et planifier de meilleurs résultats commerciaux et sociétaux." [22]
- "L'industrie 4.0 combine les méthodes de production avec les technologies de l'information et de la communication. Dans le monde de l'industrie 4.0, hommes, machines, équipements, systèmes logistiques et produits communiquent et interagissent entre eux directement." [23]
- "L'industrie 4.0 décrit l'Organisation des processus de production basés sur la technologie et les dispositifs communiquant de façon autonome les uns avec les autres le long de la chaîne de valeur." [43]

Le cœur de l'Industrie 4.0 réside dans le concept du système cyber-physique (CPS). Ce terme désigne la fusion de systèmes logiciels et matériels au sein d'un réseau complexe et intelligent, où chaque objet physique possède une identité distincte. Un CPS se compose des approches technologiques de trois éléments essentiels : l'informatique omniprésente, l'Internet des objets et des services, ainsi que le Cloud Computing, en plus d'autres technologies qui seront détaillées dans la suite.

1.2.1 Les principales caractéristiques de l'industrie 4.0 :

L'objectif de l'Industrie 4.0 est d'intégrer les avancées fulgurantes des nouvelles technologies de l'information, de la robotisation, de la virtualisation, etc., qui ont connu une croissance exponentielle au cours de la dernière décennie. Cette intégration va entraîner une transformation fondamentale du fonctionnement de l'industrie telle que nous la connaissons aujourd'hui. En effet, grâce à la connectivité entre capteurs, machines, produits et systèmes d'information tout au long de la chaîne de valeur, il sera désormais possible de collecter et d'analyser les données provenant de toutes les machines et de tous les systèmes. Cela permettra des processus de production plus rapides, plus flexibles et plus efficaces, conduisant ainsi à la fabrication de produits de meilleure qualité à des coûts réduits.

Il est important de souligner que chaque pays souhaite façonner la quatrième révolution industrielle selon ses propres besoins. Cependant, une caractéristique fondamentale de cette révolution est l'ensemble des technologies qui rendent cette transformation possible. Parmi celles-ci, nous retrouvons le BIG DATA, les Robots autonomes, la simulation, l'intégration verticale et horizontale, l'Internet des objets industriels (IIOT : Industrial Internet Of Things), la cyber-sécurité, le Cloud, la fabrication additive et la réalité augmentée comme montré dans la figure 1.1 :

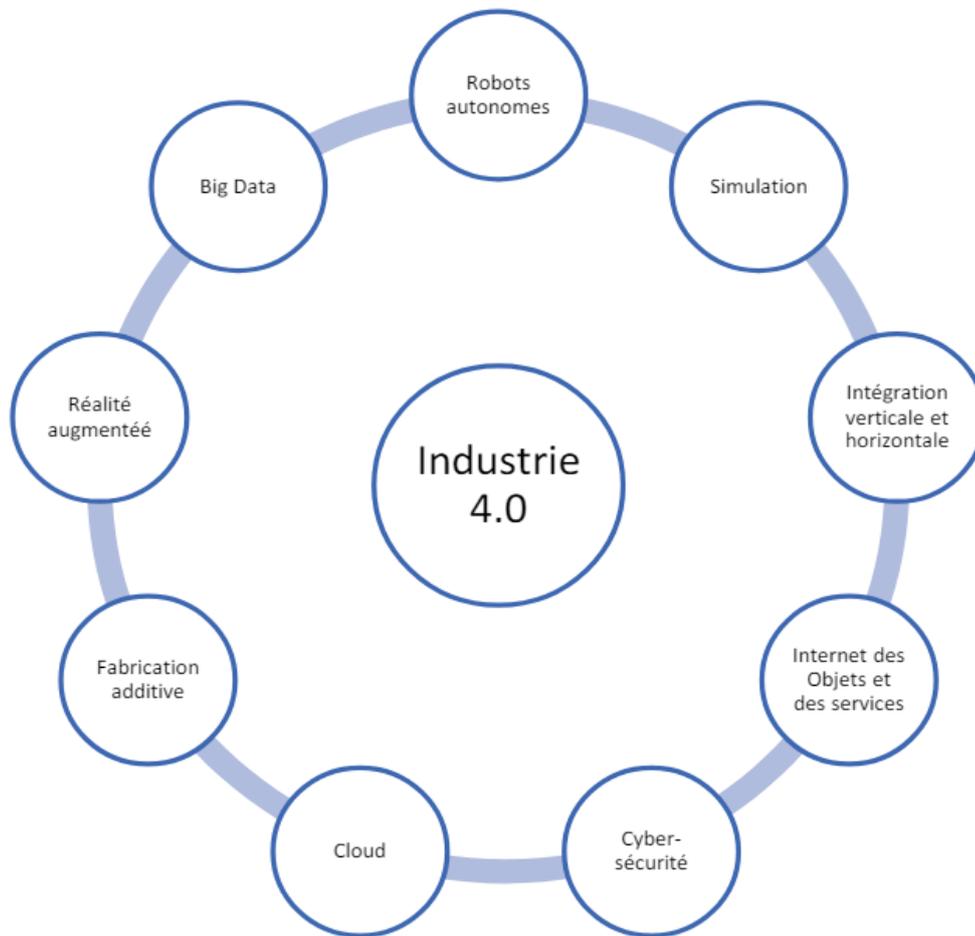


Figure 1.1: Les piliers sur lesquels repose l'Industrie 4.0 [34]

- **Big data** : Ce terme désigne des ensembles de données devenus si volumineux qu'ils dépassent les capacités humaines d'analyse, ainsi que celles des outils informatiques traditionnels. Cette "explosion des données" se manifeste dans de nombreux domaines, et les systèmes de production ne font pas exception à ce phénomène. Dans le cadre de l'industrie 4.0, la collecte et l'évaluation exhaustive des données provenant de diverses sources (équipements et systèmes de production, systèmes de gestion et interactions clients) joueront un rôle crucial dans l'optimisation de la production, en facilitant la prise de décision en temps réel. [34]
- **Robots autonomes** : Actuellement, les robots sont utilisés dans l'industrie pour réaliser des tâches complexes, mais ils sont généralement isolés pour des raisons de sécurité. Dans le cadre de l'industrie 4.0, nous voyons l'émergence de robots autonomes, flexibles et coopératifs, capables de travailler en toute sécurité aux côtés des humains. Ces robots sont appelés "cobots" (robots collaboratifs). [34]
- **Simulation** : Dans l'industrie 4.0, les simulations jouent un rôle crucial en utilisant des données en temps réel pour créer des représentations virtuelles du monde physique, connues sous le nom de jumeaux numériques (Digital Twins) ou systèmes cyber-physiques. Ces simulations permettent d'analyser le fonctionnement des systèmes, de prévoir des événements tels que des pannes ou des dysfonctionnements, et d'optimiser les performances, augmentant ainsi la productivité. [34]
- **Intégration verticale et horizontale** : Actuellement, les systèmes informatiques ne sont pas entièrement intégrés, ce qui limite les liens entre les entreprises, les fournisseurs et les clients, ainsi qu'entre les différents départements internes d'une entreprise. L'intégration verticale vise à optimiser la reconfiguration des processus de production en connectant tous les systèmes (capteurs, actionneurs, etc.) avec les divers outils de gestion de production (planification, stocks, etc.), permettant ainsi un transfert d'informations plus fluide et précis. En revanche, l'intégration

horizontale vise à optimiser la chaîne de valeur du produit en connectant l'entreprise avec les acteurs externes (fournisseurs, clients, etc.) grâce à des technologies telles que l'Internet des services. [1]

- **Internet des objets industriels** : L'Internet des objets industriels, également connu sous le nom d'Internet industriel, est un réseau composé de nombreux dispositifs interconnectés par des technologies de communication. Ces systèmes sont capables de surveiller, de collecter, d'échanger, d'analyser et de fournir des informations précieuses de manière inédite. Cela permet aux entreprises de prendre des décisions plus intelligentes et plus rapides, facilitant ainsi la fabrication intelligente (Smart Manufacturing). [32]
- **Internet des services** : Permet aux fournisseurs de services de les offrir via Internet. Ainsi, les entreprises cherchent à proposer des produits qu'elles transforment ensuite en services. [1]
- **Cyber-sécurité** : Les technologies qui composent l'industrie 4.0 utilisent toutes des protocoles de communication standardisés, ce qui signifie qu'elles sont toutes, d'une manière ou d'une autre, connectées à un réseau. Cela a créé un besoin crucial de protéger ces informations contre les menaces potentielles, telles que les cyberattaques. Par conséquent, des communications sécurisées et fiables, ainsi qu'une gestion sophistiquée des identités, des accès des machines et des utilisateurs, sont devenues essentielles. [34]
- **Cloud** : Les entreprises utilisent déjà des logiciels basés sur le cloud pour certaines de leurs applications de gestion. Cependant, avec l'avènement de l'Industrie 4.0, un plus grand nombre d'entreprises dans le secteur de la production nécessiteront un partage accru des données, tant en interne qu'avec des partenaires externes. [34]
- **Fabrication additive** : Les entreprises commencent tout juste à adopter la fabrication additive, comme l'impression 3D, principalement pour la création de prototypes et la production de composants individuels. Avec l'Industrie 4.0, ces méthodes de fabrication additive seront largement utilisées pour produire de petits lots de produits personnalisés, offrant des avantages tels que des conceptions complexes et légères. Des systèmes de fabrication additive haute performance et décentralisés permettront de réduire les distances de transport et les stocks, optimisant ainsi l'efficacité logistique et la flexibilité de production. [34]
- **Réalité augmentée** : La réalité augmentée (RA) se définit comme une vision en temps réel, directe ou indirecte, d'un environnement physique réel, dans lequel les éléments sont enrichis par des données sensorielles générées par ordinateur, telles que des données sonores, graphiques ou GPS. Par exemple, les travailleurs peuvent recevoir des instructions de réparation spécifiques sur la manière de remplacer une pièce donnée tout en inspectant le système à réparer. Ces informations peuvent être affichées directement dans le champ de vision des travailleurs à l'aide de dispositifs tels que des lunettes à réalité augmentée. [34]

1.3 Le Jumeau numérique :

1.3.1 Historique :

- **1970**

Bien que l'intérêt croissant pour le jumeau numérique soit une tendance relativement récente, il convient de souligner que le concept lui-même est ancien. Les origines du jumeau numérique remontent aux années 1970, période durant laquelle la NASA a développé une "technologie de mise en miroir" visant à simuler des systèmes spatiaux au moyen de répliques physiques complexes sur Terre. Ces simulateurs ont joué un rôle crucial lors de la célèbre mission Apollo 13, un événement qui demeure parmi les plus mémorables de l'histoire américaine. Pendant cette opération de secours particulièrement épique, quinze modèles contrôlés par ordinateur ont permis aux ingénieurs d'analyser et de reproduire les conditions à bord du vaisseau spatial endommagé, situé à plus de 320 000 km de la Terre, afin d'utiliser ces données pour assurer le retour en sécurité de l'équipage. [25] [16]

- **2003**

Le terme Digital Twin (jumeau numérique) a été introduit la toute première fois en 2002 à l'université de Michigan par le docteur Michael Grieves dans sa présentation à l'industrie pour la création d'un centre de gestion du cycle de vie d'un produit PLM (Product Lifecycle Management) L'une des diapositives de la présentation, comme le montre la Figure 1.2, avait comme titre "Conceptual Ideal for PLM" ce qui deviendra par la suite "Digital Twin". Ce concept reflète en effet une représentation dynamique d'un système composé de deux systèmes, l'un réel et l'autre virtuel et que ces deux derniers sont liés tout au long du cycle de vie du système [19]. Comme le montre la Figure 1.2, ce concept est composé de trois parties : Le produit physique dans l'environnement réel, le produit virtuel dans un environnement virtuel et la connexion des données et de l'information qui relie les deux environnements [19].

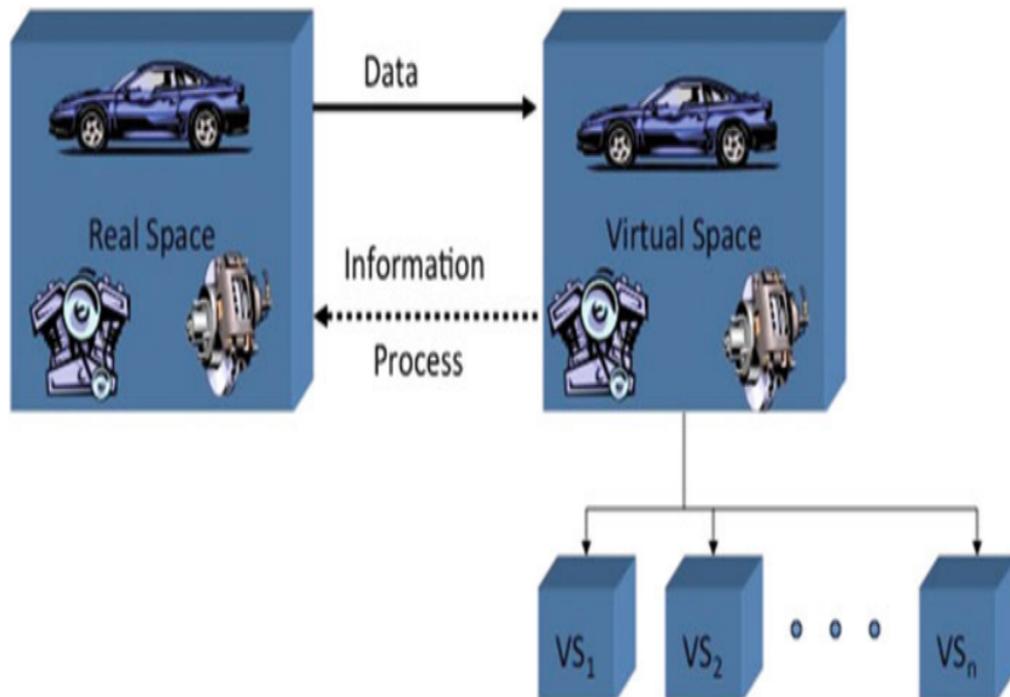


Figure 1.2: Conceptual ideal for PLM
[19]

- **2010**

Après une relative absence d'informations jusqu'en 2010, le concept de jumeau numérique se précise avec une première définition de la NASA le décrivant comme "une simulation intégrée multi physique multi-échelle d'un véhicule ou d'un système qui utilise les meilleurs modèles physiques, données de capteurs et historiques de la flotte pour être un miroir de la vie du jumeau volant lui correspondant". En 2011, un article de la NASA et de l'US Air Force le positionne comme une technologie clé. Les avancées technologiques telles que l'IoT et l'IA rendent sa mise en œuvre possible. Avec l'émergence d'Industrie 4.0 en 2011, le jumeau numérique s'étend à l'industrie à partir de 2013, élargissant son champ d'application de la simulation à l'optimisation et à la prédiction en temps réel. En 2013 également, Eric Tuegel, de l'US Air Force Research Laboratory, étend la définition du jumeau numérique en le concevant comme une architecture intégrée pour l'aide à la décision. [25]

- **2014**

En 2014, le Dr. Michael Grieves publie un livre blanc qui approfondit le concept du jumeau numérique en le décrivant comme un modèle virtuel dynamique. Il élargit également son application à divers secteurs industriels, notamment l'automobile, le pétrole et le gaz, ainsi que le domaine de la santé. [25]

- **2017**

En 2017 et 2018, l'entreprise américaine Gartner a classé le jumeau numérique parmi les 10 technologies les plus prometteuses pour les 10 prochaines années. Le concept a ainsi gagné en traction et s'est traduit par un afflux de publications scientifiques, qui ont triplé chaque année, ainsi que par une augmentation du nombre d'entreprises s'engageant dans ce domaine.

- **2019**

Dans leur livre en 2019, Tao et al. ont présenté un nouveau modèle pour expliquer la technologie du jumeau numérique. Ce modèle se compose de cinq parties principales, chacune représentant une caractéristique clé du jumeau numérique. Il s'agit d'une évolution du modèle jumeau numérique tridimensionnel initialement proposé par Grieves en 2003 dans son cours sur la gestion du cycle de vie des produits (PLM) à l'Université du Michigan (qui a été mentionné pour la première fois dans la littérature dans son livre de 2014). En plus des trois dimensions du modèle de Grieves - l'élément physique, l'élément virtuel et les données et informations, Tao et al. (2019) ont ajouté deux dimensions supplémentaires [20], comme indiqué dans l'expression :

$$M_{DT} = (PE, VE, SS, DD, CN)[20]$$

Sachant que :

- **PE** : représente l'entité physique présente dans le monde réel. [20]
- **VE** : l'entité virtuelle constituée d'une collection de modèles. [20]
- **SS** : les services fournis à la fois à PE et à VE. [20]
- **DD** : les données qui composent le jumeau numérique. [20]
- **CN** : les connexions entre les différents composants du jumeau numérique. [20]

"Pour clarifier la façon dont ils conceptualisent le jumeau numérique, Tao et al. (2019) ont utilisé une analogie avec le corps humain dans leur livre. Selon leur description, l'EP agit comme le "squelette" qui soutient la jumeau numérique. VE est le "cœur" du système, "pompe" les résultats et les méthodes de simulation vers d'autres parties. SS est l'"organe sensoriel" qui communique directement avec les utilisateurs. Le DD est le "sang" qui alimente en permanence le jumeau numérique en données importantes. Par conséquent, le CN agit comme un "conduit sanguin", délivrant des informations aux différentes parties du jumeau numérique." [20]

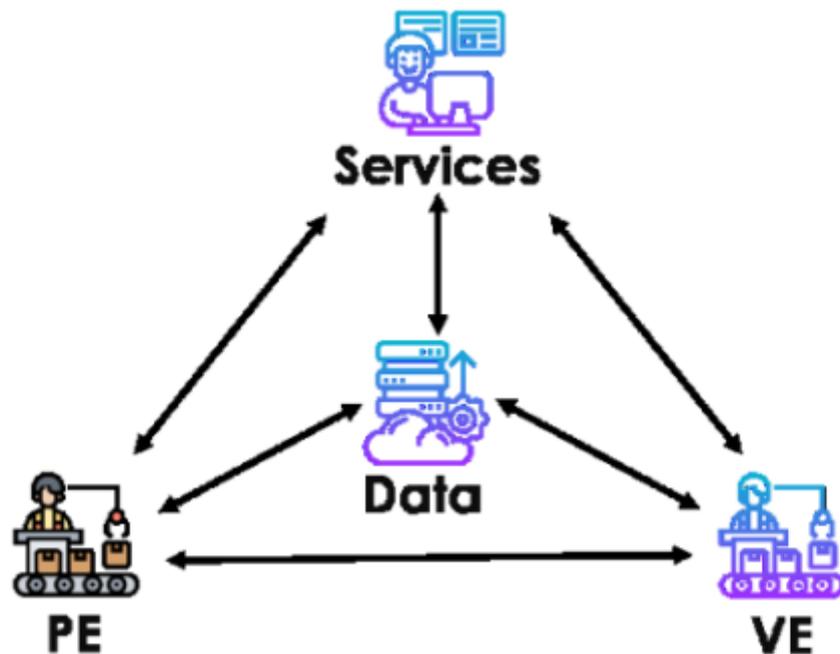


Figure 1.3: Modèle de concept jumeau numérique à cinq dimensions selon (Tao, et al., 2019) [20]

La Figure 1.4 offre une synthèse de l'évolution récente du concept de jumeau numérique. Initialement, les jumeaux numériques étaient confinés à des secteurs tels que l'aérospatial et la défense en raison de leur coût élevé et de leur complexité. Cependant, au fil du temps, ils ont évolué pour devenir plus accessibles, suscitant désormais un intérêt croissant dans une variété de domaines d'activité [25]

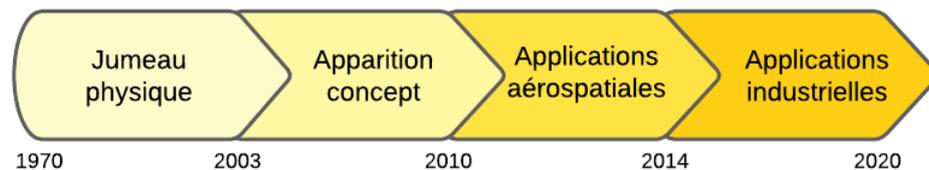


Figure 1.4: Évolution du concept de jumeau numérique [25]

1.3.2 Les descriptions du jumeau numérique dans la littérature :

Depuis la toute première définition publiée par la NASA, différents auteurs ont décrit le jumeau numérique selon leurs propres termes et en fonction de son application [42]. Les définitions données dans la littérature font référence au jumeau numérique comme étant un modèle virtuel ou numérique, une présentation, une contrepartie, un sosie, un clone, une empreinte, un logiciel analogue, une représentation, des constructions d'information ou une simulation de son homologue physique. [42]. La manière dont le concept de JN est abordé et défini par différentes communautés professionnelles peut être comparée selon Farah ABDOUNE dans sa thèse de doctorat [3] à la métaphore d'un groupe de personnes aveugles n'ayant jamais rencontré d'éléphant auparavant. Elles apprennent ce qu'est un éléphant en le touchant chacune à leur tour. Chaque personne touche une partie différente du corps de l'éléphant et le décrit selon son expérience limitée, aboutissant à des descriptions variées et souvent divergentes. Chacun perçoit une partie de la réalité de l'éléphant, mais aucune ne détient la vérité complète. Chacune possède seulement une part de cette vérité. [3]

Nous présentons dans le Tableau 1.1 ci-dessous les différentes définitions du jumeau numérique proposées dans la littérature. Bien que cette liste ne soit pas exhaustive, elle regroupe les définitions les plus couramment utilisées depuis l'émergence du jumeau numérique. On peut y observer une diversité de perspectives et de points de vue sur le jumeau numérique.

Auteur	Définition du JN
(Grievess,2014) [18]	Un ensemble de constructions d'informations virtuelles qui décrivent entièrement un produit manufacturé physique potentiel ou réel, du niveau micro atomique au niveau macro géométrique. À son optimum, toute information pouvant être obtenue à partir de l'inspection d'un produit manufacturé physique peut être obtenue à partir de son JN. Le modèle conceptuel du JN contient trois parties principales : a) les produits physiques dans l'espace réel, b) les produits virtuels dans l'espace virtuel, et c) les connexions de données et d'informations qui relient les produits virtuels et réels.
(Glaessgen et Stargel, 2012) [17]	Une simulation intégrée multi physique, multi-échelle et probabiliste d'un produit complexe et utilise les meilleurs modèles physiques disponibles, mises à jour de capteurs, etc., pour refléter la vie de son jumeau correspondant.
(Lee et al., 2013) [28]	Un modèle couplé permet un JN de la machine réelle qui fonctionne dans la plateforme cloud en parallèle avec le processus réel et simule l'état de santé avec une connaissance intégrée à la fois des algorithmes analytiques basés sur les données ainsi que d'autres connaissances physiques disponibles. L'approche du modèle couplé construit d'abord une image numérique d'une machine dès le stade de la conception.
Rosen et al., 2015) [33]	Un modèle très réaliste de l'état actuel du processus et de leur propre comportement en interaction avec leur environnement dans le monde réel.
(Brenner et Hummel, 2017) [9]	Une copie numérique d'une usine, d'une machine, d'un ouvrier, etc., qui est créée et peut être développée indépendamment, mise à jour automatiquement et disponible dans le monde entier en temps réel.
(Schleich et al.,2017) [36]	Une relation bidirectionnelle entre un artefact physique et l'ensemble de ses modèles virtuels, permettant l'exécution efficace de la conception, de la production, de l'entretien et de diverses autres activités du produit tout au long du cycle de vie du produit.
(Schluse et al., 2017) [37]	Une réplique virtuelle un à un d'un actif technique (par exemple, une machine, un composant et une partie de l'environnement). Un JN contient des modèles de ces données (géométrie, structure, . . .), de ses fonctionnalités (traitement des données, comportement, . . .) et de ses interfaces de communication. Il intègre toutes les connaissances issues des activités de modélisation en ingénierie (modèle numérique) et des données de travail capturées lors de l'exploitation réelle (ombre numérique). Un JN contient des modèles de ses données (géométrie, structure, . . .), de ses fonctionnalités (traitement des données, comportement, . . .) et de ses interfaces de communication.

(H. Zhang et al., 2017) [47]	Un ensemble de modèles réalistes de produits et de processus de production reliant d'énormes quantités de données à une simulation rapide et permettant une évaluation précoce et efficace des conséquences, des performances et de la qualité des décisions de conception sur les produits et la chaîne de production.
(Negri et al., 2017) [30]	Une contrepartie virtuelle et informatisée d'un système physique qui peut exploiter une synchronisation en temps réel des données captées provenant du terrain et est profondément liée à l'Industrie 4.0.
(Asimov et al., 2018) [4]	Une réplique virtuelle d'une installation physique réelle, qui peut vérifier la cohérence des données de surveillance, effectuer une exploration de données pour détecter les problèmes existants et prévoir les problèmes à venir, et qui utilise un moteur de connaissances IA pour prendre des décisions commerciales efficaces.
(Tao et al., 2018) [44]	Un ensemble de modèles virtuels. Ces images miroir et le mappage des produits physiques dans l'espace virtuel. Ils pourraient refléter l'ensemble du processus du cycle de vie, ainsi que simuler, surveiller, diagnostiquer, prédire et contrôler l'état et les comportements des entités physiques correspondantes. Les modèles virtuels incluent non seulement les modèles géométriques, mais également toutes les règles et tous les comportements, tels que les propriétés des matériaux, l'analyse mécanique, la surveillance de la santé.
(Z. Liu et al., 2018) [29]	Un modèle vivant qui s'adapte en permanence aux changements de l'environnement ou de l'exploitation à l'aide de données sensorielles en temps réel et peut prévoir l'avenir des actifs physiques correspondants pour la maintenance prédictive.
(Zhuang et al., 2018) [48]	Un modèle dynamique dans le monde virtuel qui est entièrement cohérent avec son entité physique correspondante dans le monde réel et peut simuler les caractéristiques, le comportement, la vie et les performances de son homologue physique en temps opportun.
(Nathalie JULIEN et Eric Martin., 2020) [25]	Le jumeau numérique est donc une représentation virtuelle dynamique d'un objet, physique ou non. Cet objet peut être un produit, un processus ou un service. Cette représentation unique de l'objet est enrichie et évolue dans le temps de manière synchrone avec l'objet observé. Elle peut être située à différents endroits et avoir de multiples états, sans être jamais complètement visible. Le jumeau numérique est la partie du système qui exclut la partie physique de l'objet. Il comprend donc : - L'ensemble des capteurs et objets connectés positionnés sur l'objet pour recueillir les données. - Les communications en temps réel entre les espaces physique et virtuel. - L'ombre numérique de l'objet qui représente toute la trace digitale de son activité. - L'architecture des données, des modèles et des usages (comprenant les algorithmes de traitement des données et d'intelligence artificielle) qui organise les flux d'information. - Les interfaces homme-machine.

(Semeraro al.,2021)[38] et	Un ensemble de modèles adaptatifs qui émulent le comportement d'un système physique dans un système virtuel en obtenant des données en temps réel pour se mettre à jour tout au long de son cycle de vie. Le JN réplique le système physique pour prévoir les défaillances et les opportunités de changement, prescrire des actions en temps réel pour optimiser et/ou atténuer les événements inattendus, observer et évaluer le système de profil de fonctionnement
----------------------------	---

Table 1.1: Les définitions existantes du jumeau numérique [3]

Le concept de jumeau numérique consiste à analyser en continu les flux de données collectés par des capteurs situés tout au long du processus matériel. Ces capteurs recueillent des informations sur l'évolution des produits, lesquelles sont transmises en temps réel à une plateforme numérique. Cette plateforme effectue alors une analyse quasi instantanée pour optimiser le processus de manière transparente et continue. Cela permet non seulement d'analyser les données et de contrôler le système, mais aussi de prédire d'éventuelles défaillances, facilitant ainsi des interventions proactives et des réparations anticipées.

Le jumeau numérique permet également de faire fonctionner les machines et de planifier les ressources, ce qui augmente l'efficacité opérationnelle et améliore le développement des produits. La figure 1.5 met en évidence la circulation des flux de données entre la partie réelle (PHYSIQUE), composée de capteurs et d'actionneurs, et la partie numérique ou virtuelle (DIGITALE), constamment mise à jour. Les éléments mentionnés ci-dessus sont détaillés ci-après [1] [2]:

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

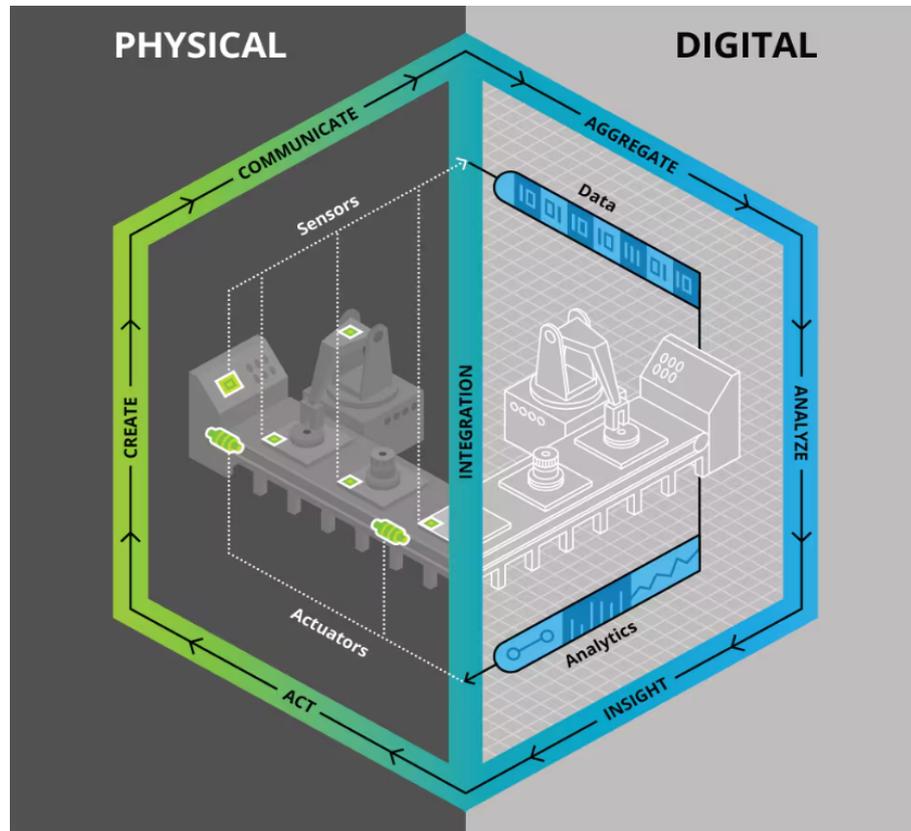


Figure 1.5: Les éléments d'un modèle de jumeau numérique [12]

1.3.3 Les domaines d'applications du jumeau numérique :

Les jumeaux numériques peuvent modéliser toute entité physique, allant des nanomatériaux aux villes entières. Dans certains cas, ils ont même été utilisés pour représenter des êtres humains et leurs comportements. De nombreuses organisations, à travers divers secteurs, conçoivent, testent et intègrent les jumeaux numériques dans leurs opérations. Les exemples suivants démontrent le potentiel des jumeaux numériques à résoudre une multitude de défis commerciaux et à dévoiler de nombreuses sources de valeur.

Les jumeaux numériques dans les sciences de la vie et la santé :

L'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 dans les systèmes de santé a donné naissance au concept de Santé 4.0 (H4.0), permettant de personnaliser les soins en temps réel pour les patients, les professionnels et les aidants. Les jumeaux numériques, technologie clé de cette révolution, sont particulièrement recherchés pour résoudre les problèmes de santé [21]. Erol et al. (2020) ont étudié les pratiques des jumeaux numériques dans quatre domaines principaux : les patients numériques, l'industrie pharmaceutique, les hôpitaux et les technologies portables. [13]

Les chercheurs et cliniciens explorent le potentiel des jumeaux numériques pour modéliser les aspects du corps humain, aidant les médecins à mieux comprendre la structure et le comportement du corps sans tests invasifs. Ces modèles permettent de répéter des opérations complexes en toute sécurité et d'accélérer le développement de médicaments en évaluant de nouvelles thérapies virtuellement. [11]

Par exemple, Siemens Healthineers a développé des modèles numériques du cœur humain, simulant son comportement mécanique et électrique, pour créer des modèles uniques et spécifiques aux patients à partir d'images médicales et de données d'électrocardiogramme [11]. Philips, de son côté, travaille sur un projet similaire pour créer un jumeau numérique du cœur et utilise des techniques d'intelligence artificielle pour le support à distance des équipements complexes comme les scanners IRM, comme montré sur la figure 1.6 . [?]

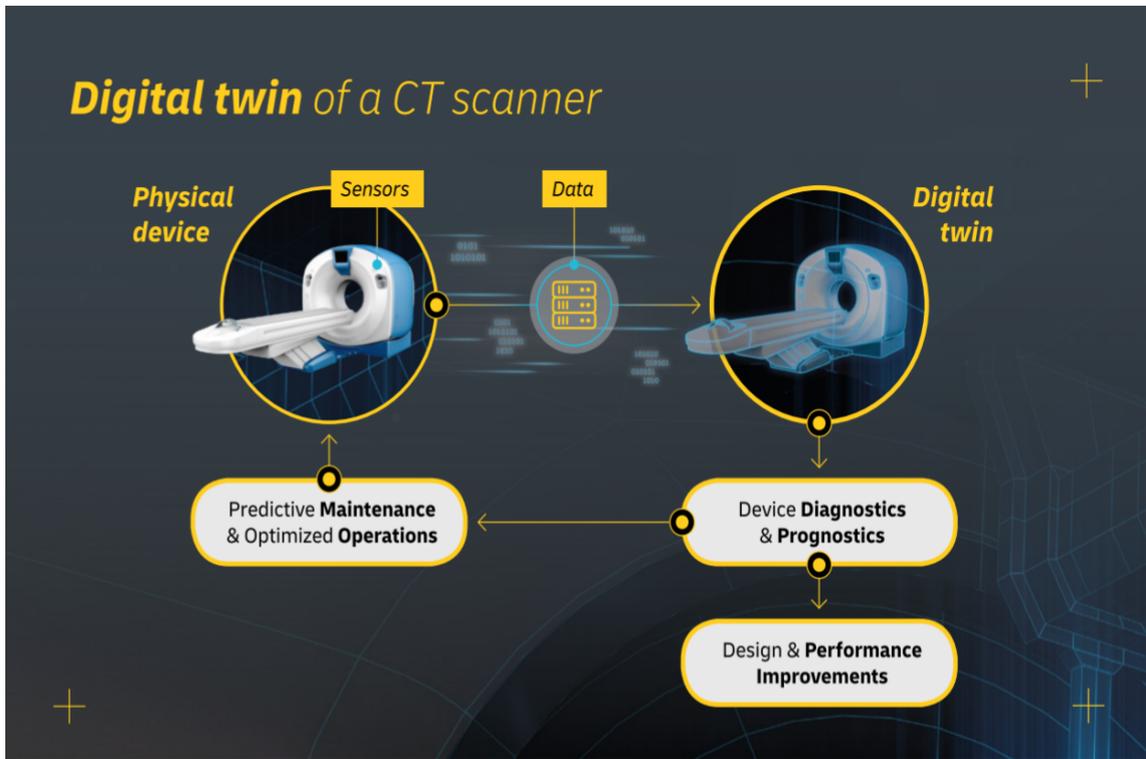


Figure 1.6: Jumeau numérique d'un scanner à rayons X [11]

Des approches de jumeaux numériques, initialement développées pour la fabrication, sont également appliquées pour améliorer l'efficacité des hôpitaux. L'hôpital Mater Private à Dublin a créé un jumeau numérique de son service de radiologie pour modéliser les flux de travail et tester des modifications d'agencement et de demande. De même, GE Healthcare utilise cette technologie pour modéliser et simuler les flux de travail hospitaliers dans sa plateforme Hospital of the Future Analytics. [11]

Enfin, le projet DigiTwins, un consortium de 118 entreprises et institutions académiques, vise à créer un jumeau numérique personnel pour chaque citoyen européen, afin d'améliorer significativement la capacité des médecins à diagnostiquer et traiter les maladies, avec un potentiel d'économies de 280 milliards d'euros par an pour les systèmes de santé européens. [11]

Les villes intelligentes :

Les villes sont devenues de plus en plus intelligentes au cours des deux dernières décennies, utilisant les technologies de l'information et de la communication (TIC) pour surveiller les opérations municipales. Les données sont générées à partir de diverses activités urbaines telles que le trafic et les transports, la production d'électricité, la distribution des services publics, l'approvisionnement en eau et la gestion des déchets.

White et al. (2021) ont démontré comment un jumeau numérique public et ouvert de la zone des Docklands à Dublin peut être utilisé pour la planification urbaine des horizons et des espaces verts, permettant aux utilisateurs d'interagir et de commenter les changements prévus [46]. "Virtual Singapore", une initiative de la nation intelligente de Singapour, est le premier jumeau numérique au monde d'une cité-état existante, permettant aux Singapouriens de participer efficacement à l'économie numérique et à l'urbanisation [35]. Le jumeau numérique de Zurich, l'un des plus avancés au monde, fait partie intégrante de la stratégie de ville intelligente de Zurich, facilitant la prise de décision grâce à une image spatiale numérique [39].

En résumé, les villes intelligentes exploitent les TIC pour améliorer la gestion urbaine, avec des exemples notables à Dublin, Singapour et Zurich, où les jumeaux numériques jouent un rôle crucial dans la planification et la prise de décision urbaines.

Les bâtiments :

L'émergence des bâtiments intelligents permet un contrôle avancé des aspects opérationnels et structurels, tels que l'efficacité énergétique, la surveillance en temps réel de l'état des structures et la résistance aux catastrophes naturelles. Le développement et l'intégration des jumeaux numériques deviennent indispensables. [21]

Shu et al. (2019) ont introduit le concept de jumeau numérique pour surveiller la santé structurelle en temps réel en utilisant des données 3D [40]. Kaewunruen et al. (2018) ont utilisé des modèles d'information du bâtiment (BIM) pour visualiser, collaborer et estimer les coûts de bâtiments à énergie nette zéro [26].

En résumé, les jumeaux numériques sont essentiels pour améliorer l'efficacité, la surveillance et la résilience des bâtiments intelligents, avec des avancées significatives dans la capture de données et le support décisionnel. [21]

le transport :

En plus des jumeaux numériques orientés produits et processus, les jumeaux numériques logistiques ont également suscité l'intérêt de plusieurs études. Pour traiter les préoccupations logistiques internes, Martínez-Gutiérrez et al. (2021) ont proposé un nouveau concept de jumeau numérique basé sur des services externes pour le transport de véhicules guidés automatiquement (AGV) [21]. Yan et al. (2021) ont mis en place un équipement virtuel pour résoudre un problème de planification de processus lié au transport [21]. Brenner et Hummel (2017) ont implémenté un système de gestion numérique des ateliers au sein de l'ESB Logistics Learning Factory, qui comprenait la majorité des composants d'infrastructure nécessaires [21].

D'autres applications de jumeau numérique dans le domaine des transports incluent les ascenseurs et les systèmes de transport vertical (Gonzalez et al., 2020), les jumeaux numériques pour pipelines (Sleiti et al., 2022), le système de gestion du trafic routier (Wang et al., 2021), les véhicules électriques intelligents (Bhatti et al., 2021) et le contrôle adaptatif du trafic [21].

En résumé, les jumeaux numériques logistiques sont utilisés pour améliorer la gestion des transports internes et externes, avec des applications allant des AGV et pipelines aux véhicules électriques intelligents et systèmes de contrôle du trafic [21].

L'énergie :

Les chercheurs se sont intéressés à la façon dont les jumeaux numériques peuvent offrir un avantage disruptif aux niveaux de contrôle, d'optimisation et de conception lorsqu'il s'agit de production, de transit ou de stockage d'énergie, voire même de consommation. Certaines études ont été menées dans un environnement industriel, telles que les systèmes de fabrication écoénergétiques, malgré le fait que l'application des jumeaux numériques pour la gestion de la consommation d'énergie des équipements (EECM) ne se limite pas à cela. Zhang et al. (2018) ont identifié trois grandes classes : l'optimisation de la consommation d'énergie, l'analyse de la consommation d'énergie et la surveillance de la consommation d'énergie. Une stratégie basée sur les jumeaux numériques combinée à une prise de décision basée sur des agents pour l'optimisation en temps réel de la planification des mouvements dans les cellules robotisées a été mise en place par Vatankhah Barenji et al. (2021), incluant l'optimisation des couches physique et virtuelle de l'usine de production pour réduire la consommation d'énergie [21].

La production d'énergie, qu'elle soit d'origine fossile ou renouvelable, implique de gros actifs complexes, souvent dans des endroits éloignés. Ces caractéristiques stimulent l'exploration et l'adoption des jumeaux numériques comme moyen d'améliorer la fiabilité et la sécurité tout en maîtrisant les coûts d'exploitation. Dans le secteur pétrolier et gazier offshore, par exemple, Aker BP a utilisé la technologie d'analyse de Siemens dans son projet Ivar Aasen au large de la côte norvégienne. Le succès du projet, qui réduit les besoins en main-d'œuvre sur la plateforme et optimise les calendriers

de maintenance de l'équipement, a conduit à un accord stratégique entre les deux entreprises. Ailleurs dans la mer du Nord, Royal Dutch Shell est impliqué dans un projet de deux ans pour développer un jumeau numérique d'une plateforme de production offshore existante. Dans le secteur de l'énergie éolienne, les solutions de jumeaux numériques aident les entreprises à gérer des turbines plus grandes et à atteindre des objectifs de fiabilité et de réduction des coûts agressifs. Par exemple, le groupe de conseil en ingénierie norvégien DNV GL a développé WindGEMINI, un ensemble de jumeaux numériques comprenant des modèles basés sur la physique pour surveiller l'intégrité structurelle et prédire la durée de vie résiduelle des turbines et des composants. GE explore également le potentiel des jumeaux numériques dans son propre secteur des éoliennes. Dans un projet pilote, la société a construit un modèle thermique des composants clés des éoliennes, permettant aux ingénieurs de créer des capteurs virtuels estimant la température des composants inaccessibles en fonction des données des capteurs physiques installés à proximité. [11]

Industrie 4.0 et fabrication intelligente :

Les jumeaux numériques sont devenus cruciaux dans l'industrie, facilitant la fabrication intelligente. Les chercheurs ont identifié quatre phases de durée de vie des jumeaux numériques pour les applications industrielles : conception, fabrication, service et retraite. Dans la phase de conception, les jumeaux numériques sont utilisés pour l'optimisation itérative et l'évaluation virtuelle, offrant ainsi des avantages significatifs en termes de conception et de validation de produits. En fabrication, ils permettent la surveillance en temps réel et l'optimisation des processus, contribuant ainsi à l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et à la réduction des coûts. La maintenance prédictive et le diagnostic des pannes sont des applications courantes dans la phase de service, assurant une fiabilité accrue des équipements et des processus. Enfin, la phase de retraite bénéficie de la préservation des connaissances pour éviter les erreurs récurrentes, démontrant ainsi l'importance croissante des jumeaux numériques dans l'ensemble du cycle de vie industriel et leur rôle essentiel dans la transformation numérique de l'industrie. [21]

1.3.4 les caractéristiques du jumeau numérique :

Le jumeau numérique sera donc composé de trois principales parties :

Les données et les modèles :

Les données sont des informations brutes qui peuvent être collectées, stockées et traitées. Elles proviennent du monde physique par le biais de capteurs ou du monde virtuel par le biais de bases de données, de systèmes d'information...[25]. Les modèles sont des représentations simplifiées ou abstraites de systèmes, de processus ou de phénomènes réels. Ils sont employés pour saisir, anticiper ou reproduire le comportement de ces éléments. Les données sont nécessaires pour alimenter le jumeau numérique en informations en temps réel sur l'objet ou le système réel, tandis que les modèles permettent de simuler, prédire et analyser le comportement de l'objet ou du système basé sur ces données, offrant ainsi une représentation virtuelle précise et utile.

Les usages :

Les jumeaux numériques ont de multiples usages. Ils permettent d'optimiser les performances en simulant différentes configurations et en identifiant les améliorations possibles. Ils facilitent la prévision et la planification en permettant de simuler le comportement futur d'un objet ou d'un système. Les jumeaux numériques sont également utiles pour la détection des anomalies et la maintenance prédictive, en comparant les données réelles aux prédictions du jumeau numérique. Ils peuvent également être utilisés pour la formation, la visualisation et la collaboration en fournissant une représentation virtuelle précise et interactive de l'objet ou du système réel.

L'évolution des usages du jumeaux numérique peuvent être représenter dans la figure 1.7

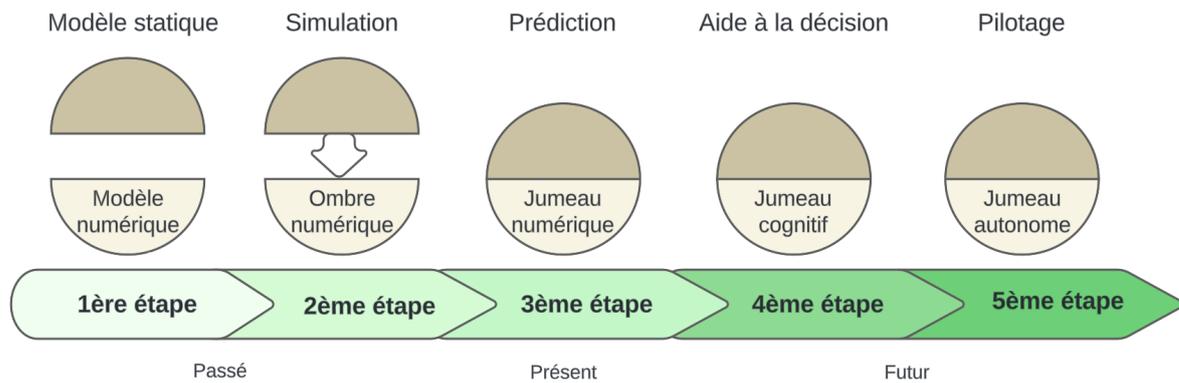


Figure 1.7: Évolution des usages [25]

Dans la première étape, un modèle statique est utilisé pour surveiller passivement l'objet et détecter tout écart par rapport à son état normal. [25]

La deuxième étape implique la collecte automatique de données en temps réel, permettant ainsi la simulation de différents scénarios pour optimiser les activités. [25]

La troisième étape combine les espaces physique et virtuel pour créer un jumeau interactif, utilisant des techniques d'intelligence artificielle pour analyser les données et prédire les dysfonctionnements potentiels. [25]

La quatrième étape vise à créer un jumeau cognitif capable d'apprendre des données physiques et virtuelles pour fournir des aides à la décision avancées à l'utilisateur. [25] Enfin, la cinquième étape aboutit à un jumeau autonome capable de prendre des décisions et d'appliquer des contrôles à l'objet de manière autonome, s'adaptant aux nouveaux usages. [25]

Il est également crucial de considérer l'interface homme-machine pour une interaction efficace. Le jumeau numérique doit être transparent dans son utilisation, avec des représentations en 2D ou en 3D pour une visualisation efficace des informations. Chaque instance de jumeau numérique doit être intelligente, collaborative, interactive, immersive et entièrement contextuelle à chaque étape du processus. [25]

Les applications :

Les applications jouent un rôle crucial dans l'exploitation du jumeau numérique. Leur déploiement permet de faire évoluer le jumeau numérique en fonction des connaissances extraites. Les algorithmes d'intelligence artificielle peuvent également alimenter le jumeau numérique, qui sera ainsi en mesure de prendre des décisions pour se reconfigurer, s'adapter, se corriger et s'améliorer. Les résultats peuvent être visualisés grâce à des interfaces homme-machine pour faciliter la collaboration et fournir des éléments d'aide à la décision. Le jumeau numérique peut également collaborer avec d'autres jumeaux numériques. [25]

1.3.5 Méthodologie de développement et de déploiement du jumeau numérique :

Avant de commencer à développer notre jumeau numérique, il est essentiel de bien comprendre le concept ainsi que ses caractéristiques, afin de pouvoir ensuite passer à sa mise en œuvre. Pour mettre en pratique notre approche de déploiement, nous nous basons sur l'architecture 5C CPS largement reconnue suggéré dans (Lee, Bagheri et Kao 2015) [27]. Nous avons donc cinq processus de déploiement qui sont comme représentés dans la figure 1.8 :

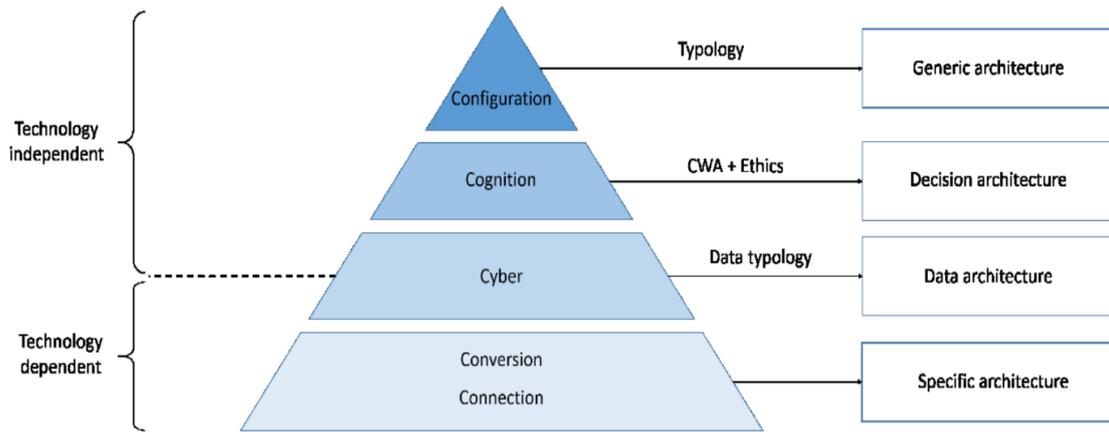


Figure 1.8: Méthodologie de déploiement basée sur l'architecture 5C CPS

[20]

- **Configuration :**

La première étape au sommet de la pyramide consiste à configurer le jumeau numérique en définissant ses besoins, ses utilisations et sa typologie. On détaille dans son cas les attributs clés de son architecture pour l'application spécifique envisagée, en proposant une "Typologie" de 13 critères pour guider efficacement les concepteurs qui sont : l'entité du jumeau numérique, le type, le niveau, la maturité, la topologie, la synchronisation, la boucle de décision, les utilisateurs, les usages, les applications, La version à développer, le modèle et enfin la fidélité du jumeau numérique. [20]

- **Cognition :**

Le jumeau numérique évolue vers des systèmes plus autonomes, soulevant des questions sur le rôle de l'agent humain. Cette intégration humaine a conduit au développement d'un système cyber-physique-social, où l'opérateur humain est considéré comme une entité active agissant sur le système. Une coopération entre le jumeau humain et le jumeau numérique est nécessaire, impliquant l'étude des modalités d'interaction et de collaboration sociotechnique, y compris la répartition des tâches, l'attribution des niveaux de décision et l'identification des questions éthiques. Pour analyser cette dynamique, il est proposé d'utiliser l'analyse cognitive du travail (CWA) qui propose une analyse du système en se concentrant sur les contraintes imposées par l'environnement de travail dans lequel évoluent les opérateurs, Elle comprend cinq étapes : analyse du domaine de travail (WDA), analyse des tâches de contrôle (ConTA), analyse de la stratégie (StrA), analyse de la coopération au sein de l'organisation sociale (SOCA) et analyse des compétences des travailleurs. [20]

- **Cyber :**

À ce stade du déploiement, il est crucial d'ébaucher l'architecture des données pour le jumeau numérique et d'identifier le cycle de vie des données à l'intérieur de celui-ci. C'est à ce moment que les premiers choix technologiques sont faits, ce qui peut inclure la décentralisation, la cybersécurité, et la réactivité du système, entre autres. Pour faciliter ce processus, des schémas de flux de données sont élaborés pour représenter le cycle de vie des données, aidant ainsi à ajuster l'architecture du jumeau numérique en fonction du volume de données nécessaire pour répondre aux besoins spécifiques. [20]

- **Conversion et connexion :**

À ces niveaux, l'architecture précédemment définie sera progressivement affinée en spécifiant les interconnexions et les protocoles de communication, favorisant l'utilisation d'outils standards tels que OPC-UA, MTConnect et MQTT. Ces choix influenceront la sélection des capteurs et des méthodes de collecte de données, qui seront adaptés en fonction du contexte de l'application. De nombreux choix technologiques dépendent souvent des technologies déjà en place dans l'entreprise. L'objectif de ces étapes est de produire des métriques permettant de

comparer les différents choix technologiques afin de sélectionner l'architecture la plus adaptée en termes de coût, de performance, d'agilité, de sécurité, etc. [20]

Le cercle vertueux de l'interaction-évolution :

L'interaction continue avec différents intervenants (physiques, numériques et humains) permet au jumeau numérique de se développer et de s'adapter à de nouveaux besoins comme montré dans la figure 1.9 . Cependant, cette évolution dépend du niveau de liberté que nous lui accordons. Plus le jumeau numérique interagit avec son environnement, plus il se développe et élargit ses possibilités : dans les tâches qui lui sont attribuées, dans la précision et l'efficacité avec lesquelles il les exécute, dans la confiance qu'on lui accorde et dans le degré d'autonomie qui lui est octroyé. [21]

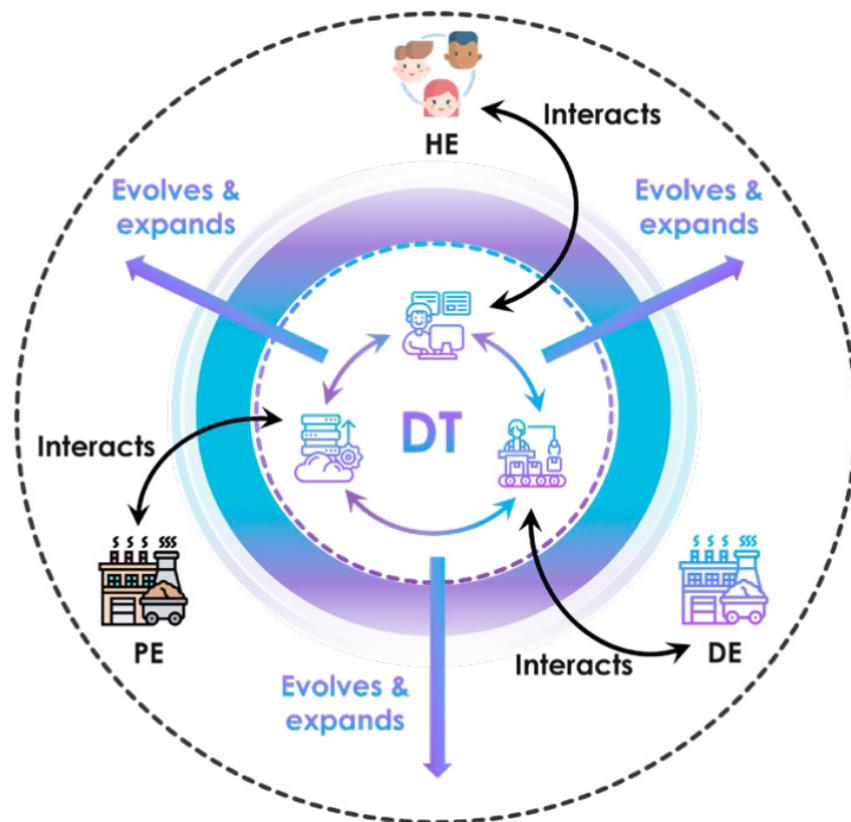


Figure 1.9: Le jumeau numérique dans son système cyber-physique social [21]

1.4 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons plongé dans l'univers fascinant de l'industrie 4.0, explorant ses fondements, son évolution historique et ses principales caractéristiques. Nous avons débuté par retracer son parcours depuis ses débuts dans les années 1970 jusqu'à son statut actuel de révolution majeure dans divers secteurs industriels.

Au cœur de cette révolution se trouve le concept novateur du jumeau numérique, que nous avons scruté en détail. Cette réplique virtuelle et dynamique d'un système physique s'est révélée être un pilier essentiel de cette transformation. Nous avons examiné les différentes définitions du jumeau numérique, révélant sa complexité grandissante, allant des simples modèles virtuels aux entités autonomes.

Dans cette optique, nous avons exploré les multiples domaines d'application du jumeau numérique, allant de la santé à l'industrie en passant par l'énergie. Nous avons analysé ses composants et ses caractéristiques, soulignant son rôle crucial dans l'optimisation des performances, la détection des anomalies et la promotion de la collaboration.

Enfin, nous avons abordé une méthodologie fondamentale pour le développement et le déploiement du jumeau numérique, en mettant en avant l'approche basée sur l'architecture 5C CPS. Cette méthodologie offre un cadre structuré, prenant en compte les aspects technologiques, humains et sociotechniques nécessaires à la conception et à la mise en œuvre efficaces de ces systèmes complexes.

En conclusion, ce premier chapitre nous a permis de saisir l'importance cruciale du jumeau numérique dans le contexte de l'industrie 4.0. En exploitant les avancées technologiques modernes et en adoptant une approche holistique, nous sommes mieux équipés pour maximiser les avantages de cette révolution industrielle, anticiper les défis futurs et favoriser l'innovation dans divers domaines. Dans cette démarche, le projet TERRA (Pour la Transformation Numérique des Producteurs et Transformateurs Laitiers) joue un rôle essentiel en facilitant la transition numérique dans le secteur agroalimentaire, tout en contribuant activement au développement et à l'application des jumeaux numériques pour une efficacité opérationnelle accrue et une meilleure compétitivité.

Dans le prochain chapitre, nous allons examiner en détail les outils de modélisation qui nous aideront à accomplir cette tâche. Nous présenterons et analyserons les méthodes telles que BPMN, SADT et AMDEC, et nous montrerons comment ces outils peuvent être utilisés de manière complémentaire pour construire un jumeau numérique robuste et fonctionnel, adapté aux besoins spécifiques de notre projet dans le cadre de la fromagerie bio.

Chapitre 2

Les outils de modélisation

2.1 Introduction :

Le projet TERRA, qui vise à modéliser et concevoir un jumeau numérique logistique et/ou pour un processus étendu, trouve une application pratique dans le contexte d'une fromagerie bio. Pour atteindre cet objectif, il est impératif de modéliser les processus de fabrication en abordant à la fois les aspects fonctionnels et dysfonctionnels. Cette double approche nous permet de capturer une image complète et réaliste du fonctionnement de la fromagerie, tout en anticipant et en planifiant les potentielles défaillances.

Après concertation avec mes encadrants, les membres de l'équipe et en tenant compte des méthodologies employées dans d'autres projets similaires, notre choix s'est porté sur l'utilisation de trois outils de modélisation spécifiques :

- **BPMN (Business Process Model and Notation)** : Cet outil est privilégié pour sa capacité à représenter de manière claire et précise les processus métiers, facilitant ainsi la compréhension et l'optimisation des workflows au sein de la fromagerie.
- **SADT (Structured Analysis and Design Technique)** : Utilisé pour structurer et analyser les systèmes complexes, SADT nous aide à décomposer les processus de fabrication en éléments plus simples et mieux gérables.
- **AMDEC (Analyse des Modes, des Effets et de la Criticité des Défaillances)** : Cet outil est crucial pour l'analyse des aspects dysfonctionnels du processus. Il nous permet d'identifier, d'évaluer et de hiérarchiser les défaillances potentielles, ainsi que leurs effets sur la production, afin de développer des stratégies de mitigation efficaces.

En outre, nous souhaitons également intégrer une étude ergonomique par rapport à cette technologie. Cette étude vise à évaluer l'impact de la mise en place du jumeau numérique sur les utilisateurs finaux, en assurant que les outils et interfaces développés sont intuitifs et facilitent le travail quotidien des opérateurs et des gestionnaires de la fromagerie.

Dans les sections suivantes, nous détaillerons comment ces outils de modélisation sont utilisés dans le cadre du projet TERRA, en nous concentrant particulièrement sur le cas pratique de la fromagerie bio. Nous illustrerons comment la combinaison de BPMN, SADT et AMDEC nous permet de poser les bases d'un jumeau numérique, en répondant aux exigences spécifiques de la production tout en anticipant et en minimisant les risques liés aux défaillances. Cette approche méthodique nous aide à structurer efficacement notre projet dès ses premières étapes.

2.2 Le BPMN (Business Process Model and Notation) :

Dans un contexte concurrentiel de plus en plus intense, il devient impératif de gérer efficacement la complexité des processus de son entreprise pour accroître son agilité. La capacité à modéliser et à ajuster ces processus métier, qui représentent un savoir-faire distinctif, garantit un avantage concurrentiel significatif et assure leur optimalité.[5]

Aujourd'hui, la norme BPMN (Business Process Model and Notation) s'impose dans la formalisation visuelle des processus. Elle vise à encadrer la modélisation de ces processus en utilisant une notation claire, intuitive et universellement compréhensible. En décrivant de manière exhaustive les diverses étapes d'un processus métier à travers un cadre graphique commun, il permet à une organisation de partager une vision unifiée des processus et de faciliter leur mise en œuvre. Les flux d'informations nécessaires à la gestion d'un processus sont ainsi représentés de manière visuelle, ce qui favorise une meilleure compréhension. Cette approche graphique offre une communication simplifiée entre les collaborateurs, les outils visuels étant souvent plus accessibles et explicites que du texte brut. L'objectif principal est de fournir un langage normalisé pour que toutes les parties prenantes d'un processus métier puissent le comprendre, favorisant ainsi une collaboration fluide et une augmentation de la productivité au sein de l'entreprise.[5]

Un processus métier désigne un ensemble organisé de tâches, qu'elles soient effectuées par des actions humaines ou automatisées, dans le but de réaliser un objectif spécifique et préalablement défini. Il implique la participation d'acteurs métier, chacun responsable d'une activité spécifique, et peut inclure des sous-processus. Dans certaines situations, un processus métier peut être externalisé, notamment dans le cadre de la sous-traitance. La norme BPMN offre un moyen de modéliser ces processus métiers, établissant ainsi un cadre standardisé qui représente la première étape vers une optimisation.[5]

2.2.1 Historique et évolution :

Origines de BPMN :

Business Process Model and Notation (BPMN) a été développé par l'Object Management Group (OMG), une organisation internationale à but non lucratif qui se consacre à la création de normes pour les systèmes informatiques. L'OMG a publié la première version de BPMN en mai 2004, avec l'objectif principal de fournir une notation graphique standardisée pour la modélisation des processus métiers, compréhensible par tous les intervenants, des analystes métier aux développeurs techniques [31].

La version 1.0 de BPMN visait à combler le fossé entre la conception des processus métier et leur mise en œuvre technique. Avant BPMN, il n'existait pas de notation universellement acceptée pour représenter les processus métiers de manière compréhensible et technique [31]. BPMN a introduit une notation intuitive qui permet de modéliser les processus de bout en bout, facilitant ainsi la communication entre les différentes parties prenantes et améliorant l'efficacité et l'efficience des processus [31].

Évolution vers BPMN 2.0 :

En 2011, l'OMG a publié BPMN 2.0, une version améliorée de la norme qui a apporté de nouvelles fonctionnalités et une meilleure intégration avec d'autres normes de gestion des processus métiers. BPMN 2.0 a introduit des éléments de modélisation supplémentaires, une sémantique plus riche et une meilleure prise en charge de l'exécution des processus [31].

L'adoption de BPMN par les organisations du monde entier a été favorisée par son caractère intuitif et sa capacité à représenter des processus complexes de manière claire et structurée. Aujourd'hui, BPMN est largement utilisé pour la modélisation, l'analyse, la conception et l'exécution des processus métiers dans divers secteurs industriels [41].

2.2.2 Principes fondamentaux de BPMN :

BPMN (Business Process Model and Notation) est une norme internationale pour la modélisation des processus métiers. Il fournit un ensemble de symboles graphiques et de règles pour représenter les processus de manière compréhensible et standardisée, les plus utilisés sont :

Les évènements :

Les évènements sont des éléments cruciaux dans la notation BPMN, car ils marquent des points significatifs dans le processus métier, déclenchent des actions ou réagissent à des conditions spécifiques [41]. Les différents types d'évènements dans BPMN sont :

- **Évènements de début** : Les évènements de début signalent le commencement d'un processus. Ils sont représentés par un cercle vide. Ces évènements indiquent le point de départ à partir duquel le flux de travail commence.[31]
 - **Évènement de Début Simple** : Utilisé pour indiquer le démarrage normal d'un processus. Il est représenté par un cercle vide.
 - **Évènement de Début Conditionnel** : Utilisé pour démarrer un processus lorsqu'une condition spécifique est remplie. Il est représenté par un cercle avec une feuille à l'intérieur.
 - **Évènement de Début de Message** : Déclenché par la réception d'un message. Il est représenté par un cercle avec une enveloppe à l'intérieur.
 - **Évènement de Début de Minuteur** : Déclenché à un moment précis ou après une durée spécifiée. Il est représenté par un cercle avec une horloge à l'intérieur.
 - **Signal de début** : Le début du processus se fait par le signal. Il est représenté par un cercle avec un triangle à l'intérieur.



Figure 2.1: Représentation des différents évènements de début

- **Évènements intermédiaires** : Les évènements intermédiaires se produisent entre le début et la fin d'un processus. Ils sont représentés par un double cercle avec un symbole spécifique à l'intérieur. Ils peuvent capturer, lancer ou interrompre des flux de travail en cours. Ils en existent plusieurs mais les plus utilisés sont :[31].
 - **Évènement Intermédiaire de Message** : Représente l'envoi ou la réception d'un message pendant le processus. L'envoi est représenté par un double cercle avec une enveloppe blanche à l'intérieur et la réception avec une enveloppe noire à l'intérieur.
 - **Évènement Intermédiaire de Minuteur** : Utilisé pour indiquer des délais ou des attentes dans le processus. Il est représenté par un double cercle avec une horloge à l'intérieur.
 - **Évènement Intermédiaire de Signal** : Envoie ou reçoit un signal qui peut être capturé par d'autres éléments du processus. L'envoi est représenté par un double cercle avec un triangle vide à l'intérieur et la réception par un triangle noir.
 - **Évènement Intermédiaire Conditionnel** : Utilisé pour attendre une certaine condition pour reprendre le processus. Il est représenté par un double cercle avec une feuille à l'intérieur.

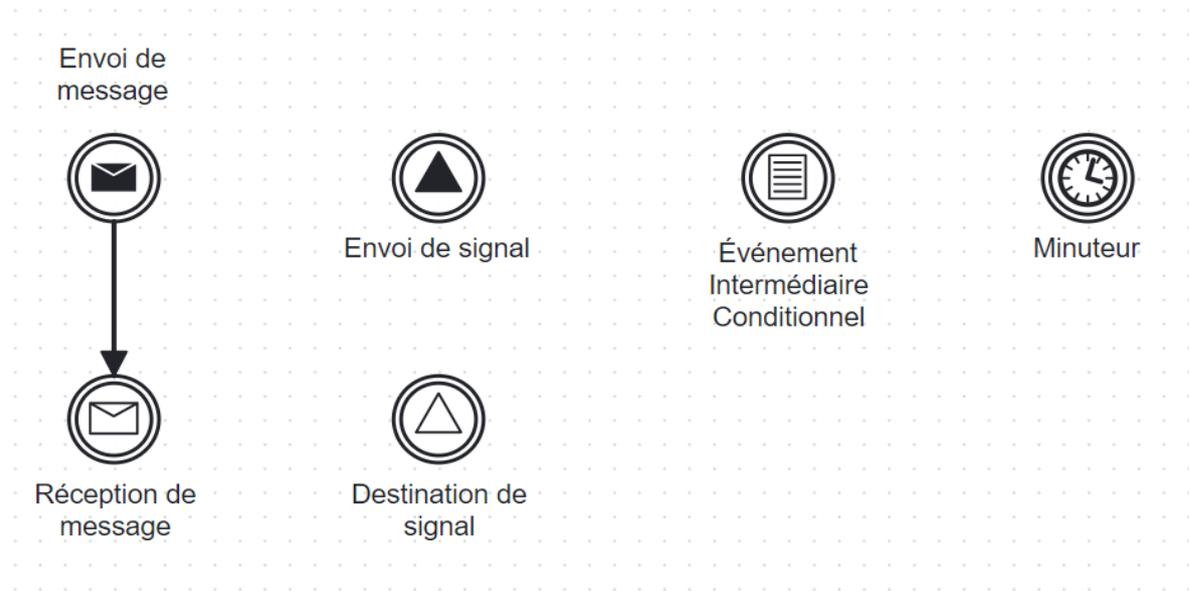


Figure 2.2: Représentation des différents évènements intermédiaires

- **Événements de fin** : Les événements de fin marquent la terminaison d'un processus. Ils sont représentés par un cercle avec un contour épais. Ces événements signalent la conclusion d'un flux de travail et peuvent avoir des impacts sur d'autres processus [31]. Les plus utilisés sont :
 - **Événement de Fin Simple** : Indique la fin normale d'un processus. Il est représenté par un cercle avec un contour épais.
 - **Événement de Fin d'erreur** : Utilisé pour signaler qu'une erreur a mis fin au processus. Il est représenté par un cercle avec un contour épais et une forme en "N" à l'intérieur.
 - **Événement de Fin de Message** : Envoie un message à la fin du processus. Il est représenté par un cercle avec un contour épais et une enveloppe noire à l'intérieur.
 - **Événement de Fin de Signal** : Envoie un signal à la fin du processus. Il est représenté par un cercle avec un contour épais et un triangle noir à l'intérieur.

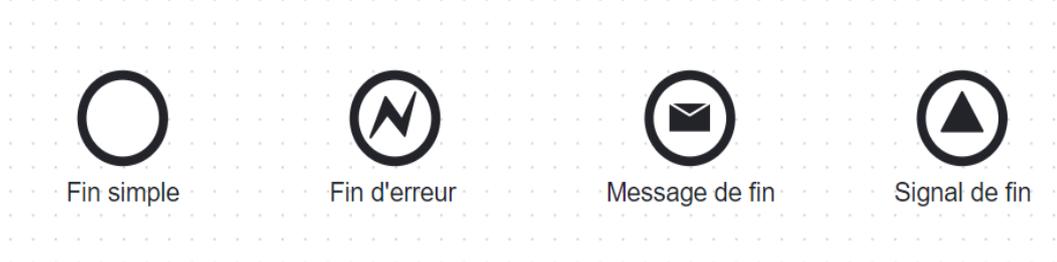


Figure 2.3: Représentation des différents évènements de fin

- **Les liens** : Ils permettent de couper un processus qui est devenu trop long afin qu'il soit facilement lisible, et de continuer le processus sur une autre ligne dans le même pool. Ils sont modélisés par un double cercle, avec une flèche noire pour l'envoi ou une flèche vide pour la réception.



Figure 2.4: Représentation des liens

Les activités :

Les activités sont des éléments clés dans la notation BPMN (Business Process Model and Notation). Elles englobent l'exécution de tâches, de sous-processus et d'autres actions, sont des étapes à réaliser pour atteindre l'objectif du processus. Ces activités peuvent impliquer une intervention humaine, comme les tâches utilisateurs et manuelles, ou être automatisées, comme dans le cas des tâches de service et des scripts. Les sous-processus, si nécessaire, permettent de spécifier et d'isoler des comportements distincts. Elles sont représentées par des rectangles aux coins arrondis.

- **Les tâches :** Une tâche est l'activité la plus élémentaire dans BPMN. Elle représente une unité de travail unique et indivisible exécutée dans le cadre d'un processus métier. Les tâches sont modélisées par des rectangles avec des coins arrondis [31]. Les plus utilisées sont :
 - **Tâche Utilisateur (User Task) :** Une tâche exécutée par un utilisateur humain avec l'aide d'un logiciel. Elle est représentée par un rectangle avec des coins arrondis avec un utilisateur dans le coin supérieur droit.
 - **Tâche de Service (Service Task) :** Une tâche exécutée par un service web ou une application automatisée. Elle est représentée par un rectangle avec des coins arrondis avec un boulon dans le coin supérieur droit.
 - **Tâche manuelle (Manual Task) :** Une tâche exécutée manuellement seulement. Elle est représentée par un rectangle avec des coins arrondis avec une main dans le coin supérieur droit.



Figure 2.5: Représentation des différentes tâches

- **Sous-processus :** Un sous-processus est une activité composée de plusieurs tâches ou autres activités. Il est modélisé par un rectangle avec des coins arrondis et un petit plus (+) en bas au centre. Les sous-processus permettent de décomposer un processus complexe en éléments plus simples et gérables. [31]
 - **Sous-processus Développé (Expanded Sub-process) :** Un sous-processus dont les détails sont visibles dans le même diagramme.
 - **Sous-processus Réduit (Collapsed Sub-process) :** Un sous-processus dont les détails sont cachés et représentés par un seul élément.

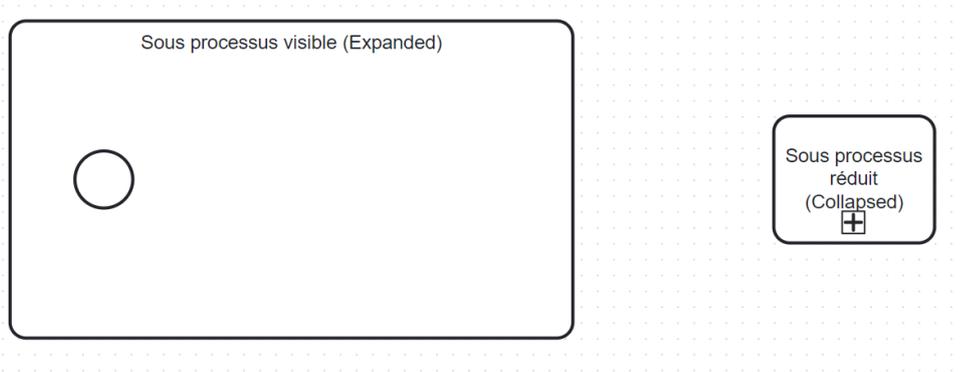


Figure 2.6: Représentation des différents sous-processus

Les passerelles :

Les passerelles sont des éléments fondamentaux dans BPMN (Business Process Model and Notation) car elles déterminent le chemin que prendra le flux de processus en fonction de certaines conditions [8]. Elles sont utilisées pour dissocier ou réunir des flux [31]. On retrouve les plus utilisées :

- **Passerelle Exclusive (Exclusive Gateway) :** Une passerelle exclusive permet de créer des chemins alternatifs dans un processus en fonction de conditions définies. Seule une des voies de sortie sera prise. Elle est modélisée par un losange avec un "X" à l'intérieur.
- **Passerelle Parallèle (Parallel Gateway) :** Une passerelle parallèle divise le flux de processus en plusieurs chemins qui sont exécutés simultanément, ou synchronise plusieurs flux de processus dans un seul flux. Elle est modélisée par un losange avec un signe plus (+) à l'intérieur.
- **Passerelle Inclusive (Inclusive Gateway) :** Une passerelle inclusive permet de créer des chemins alternatifs dans un processus, où une ou plusieurs voies de sortie peuvent être prises simultanément en fonction des conditions définies. Elle est modélisée par un losange avec un cercle à l'intérieur.



Figure 2.7: Représentation des différentes passerelles

Les flux de séquence :

Les flux de séquence sont des éléments essentiels dans BPMN (Business Process Model and Notation), car ils définissent l'ordre dans lequel les activités et les événements doivent être exécutés dans un processus métier. Il est représenté par une ligne continue avec une flèche au bout indiquant la direction du flux

les piscines et couloirs :

- **Les piscines :** Les piscines sont des conteneurs visuels qui représentent des entités distinctes impliquées dans un processus métier. Chaque piscine représente généralement une entité externe telle qu'une entreprise, un système informatique ou un département. Elles peuvent également représenter des acteurs externes ou des systèmes externes avec lesquels l'organisation interagit. Les piscines servent à délimiter les frontières organisationnelles ou fonctionnelles et à montrer les

interactions entre les différentes entités. Dans un diagramme BPMN, les piscines sont souvent disposées horizontalement ou verticalement, et les processus métier sont modélisés à l'intérieur de chaque piscine pour montrer comment les activités sont exécutées au sein de cette entité [31].

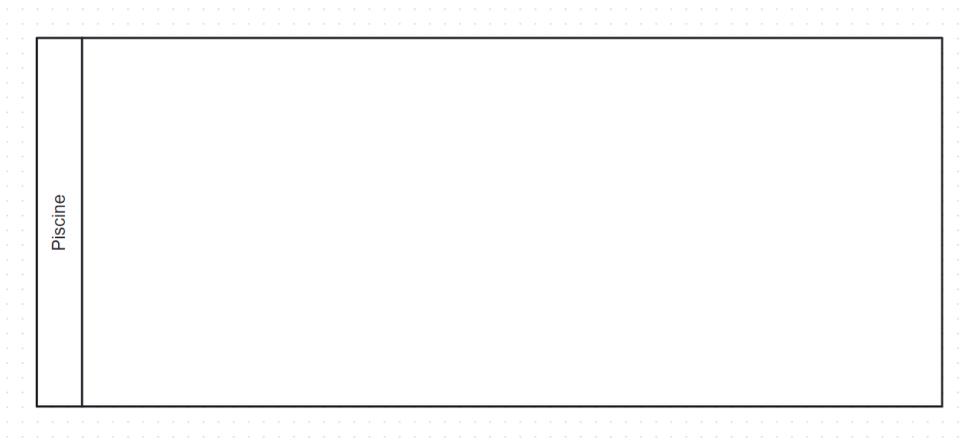


Figure 2.8: Représentation d'une piscine

- **Les couloirs** : Les couloirs sont des subdivisions des piscines qui représentent les différentes unités organisationnelles, les départements ou les rôles au sein d'une entité. Les couloirs permettent de détailler la répartition des responsabilités et des activités au sein d'une piscine. Par exemple, dans une piscine représentant une entreprise, les couloirs peuvent représenter des départements tels que les ventes, le marketing, la production, les ressources humaines, etc. Les activités sont alors modélisées à l'intérieur de chaque couloir pour montrer quel département ou quel rôle est responsable de leur exécution. Les couloirs sont souvent représentés par des bandes horizontales ou verticales à l'intérieur des piscines, et ils sont étiquetés pour indiquer le département ou le rôle qu'ils représentent [31].

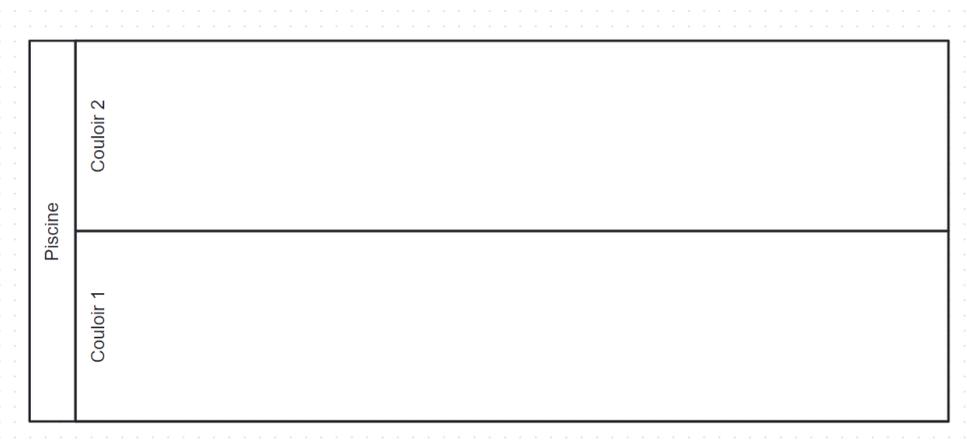


Figure 2.9: Représentation des couloirs à l'intérieur d'une piscine

2.3 Le SADT (Structured Analysis and Design Technique) :

Lorsque les entreprises se lancent dans des projets de conception de systèmes complexes, il est essentiel d'adopter une approche méthodique pour comprendre, analyser et concevoir ces systèmes de manière efficace. C'est là que la Structured Analysis and Design Technique (SADT) entre en jeu.

La Structured Analysis and Design Technique (SADT) a été développée aux États-Unis en 1977 par Doug Ross pour la société SofTech. À l'origine connue sous le nom d'IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling), cette méthode, également appelée analyse fonctionnelle descendante, est une approche graphique largement utilisée pour analyser, documenter et concevoir des systèmes complexes.

Son principe fondamental réside dans la décomposition des processus et des systèmes en modules plus petits et plus gérables, permettant ainsi une progression méthodique du général au particulier en s'intéressant aux activités du système. [24]

Elle permet de représenter un modèle du système réel en utilisant des boîtes et des flèches représentant des flux (énergie, matière ou information) entrant ou sortant de ces boîtes. Cette boîte, qui représente le système global, est numérotée A-0 comme illustré dans la figure 3.1 [24]

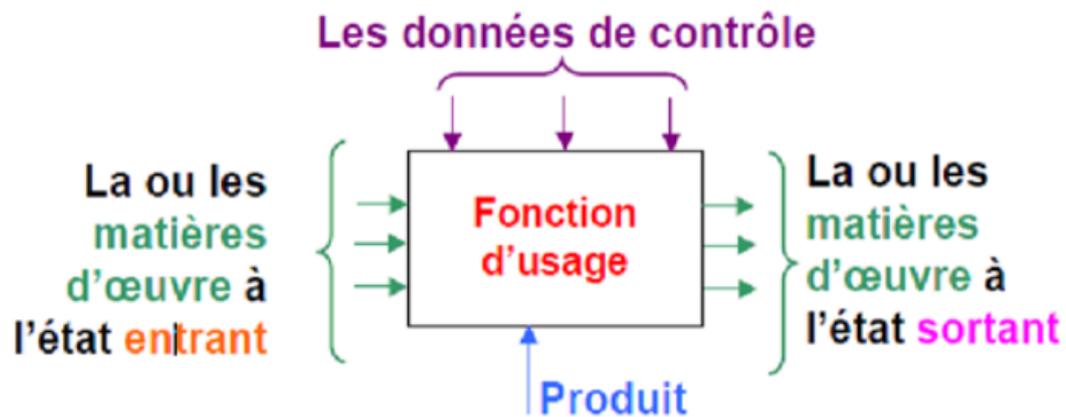


Figure 2.10: Représentation SADT [14]

Pour mieux comprendre cette représentation on trouve :

- Le produit qui se définit comme l'élément qui est ou sera fourni à un utilisateur afin de satisfaire ses besoins, conformément aux spécifications établies dans le cahier des charges. [14]
- La fonction d'usage représente la tâche accomplie par le produit pour répondre aux besoins spécifiques d'un utilisateur donné.[14]
- La matière d'œuvre représente le support sur lequel le produit agit. En général, il existe trois types de matière d'œuvre : la matière physique, l'énergie et l'information.[14]
- Le produit intervient sur la matière d'œuvre pour la faire évoluer d'un état initial (état entrant) à un état final (état sortant). La différence entre l'état sortant et l'état entrant est ce qu'on appelle la valeur ajoutée apportée par le produit à la matière d'œuvre. [14]
- Les données de contrôle sont les informations nécessaires au produit pour démarrer ou modifier son processus de création de la valeur ajoutée. Parmi les données de contrôle les plus courantes, on trouve la disponibilité des différentes sources d'énergie et les instructions fournies par l'utilisateur. [14]

À partir de cette représentation du système global, il est possible de développer des niveaux inférieurs afin d'explorer plus en détail les composants et les interactions du système, comme illustré dans la figure suivante 3.2 :

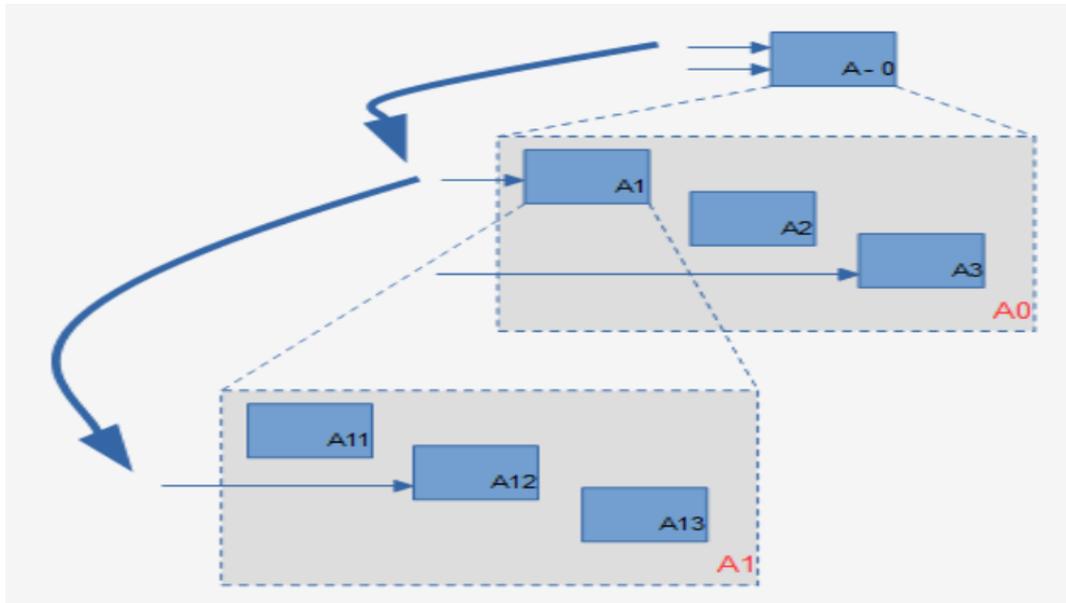


Figure 2.11: Représentation des niveaux inférieurs dans SADT [24]

Chaque boîte représente une action que doit réaliser un constituant du système pour lui permettre de satisfaire la fonction globale. [24]

2.4 L'AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) :

Créée initialement par l'armée américaine et adoptée par les industries de l'aéronautique et de l'automobile, la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) est aujourd'hui largement utilisée par les entreprises pour obtenir des normes et des certifications. [10]

L'AMDEC est un outil d'analyse systématique des défaillances, de leurs causes et de leurs effets. Elle consiste à effectuer des contrôles ciblés sur différents points de la chaîne de production, d'un produit ou d'un service fini, afin d'identifier les défaillances potentielles et d'évaluer leur criticité. [10]

Cette méthode permet de répertorier et d'organiser les modes de défaillance lors de la conception d'un produit ou de la mise en œuvre d'un processus. Elle est généralement utilisée dans les travaux d'étude pour réaliser une analyse à la fois qualitative et quantitative, ce qui permet de mettre en place des actions correctives ou préventives appropriées. [10]

L'acronyme AMDEC signifie :

- **Modes de défaillance** : Ce sont les situations dans lesquelles le système peut fonctionner de manière anormale ou cesser totalement de fonctionner, comme une fuite ou un court-circuit, par exemple. [10]
- **Causes des défaillances** : Ce sont les anomalies ou les facteurs qui provoquent la défaillance.[10]
- **Effets des défaillances** : Ce sont les conséquences de la défaillance pour l'utilisateur.[10]
- **Criticité** : Il s'agit de déterminer le degré de gravité des défaillances identifiées.[10]

2.4.1 Comment appliquer la méthode AMDEC ?

Pour appliquer la méthode AMDEC, il est nécessaire de suivre plusieurs étapes :

- **Étape 1 : Elaborer un groupe de travail pluridisciplinaire**

La première étape consiste à former un groupe de travail composé de participants provenant de divers domaines et spécialités. La diversité des compétences permet d'obtenir une analyse approfondie et pertinente des études menées dans le cadre de la méthode AMDEC. Ce groupe de travail pluridisciplinaire est dirigé par un chef d'équipe, dont le rôle est crucial pour orienter et superviser l'étude. [10]

- **Étape 2 : Déterminer l'objet et le périmètre de l'étude**

Il s'agit de définir les objectifs et les limites de l'étude. L'équipe doit se concentrer sur le produit fini ou en cours de réalisation ainsi que sur la chaîne de production, afin de répertorier et de mettre en relation toutes les fonctions du produit et les phases du processus. Cette étape permet d'identifier les causes potentielles de dysfonctionnement. [10]

- **Étape 3 : Identifier les modes de défaillances**

Cette phase permet d'identifier les défaillances initiales, c'est-à-dire les dysfonctionnements observés dans les systèmes. [10]

- **Étape 4 : Identifier les effets et les causes**

Lors de cette phase, le groupe de travail se concentre sur les effets et les causes des modes de défaillance identifiés. [10]

- **Étape 5 : Évaluer les défaillances**

Il s'agit de l'aspect quantitatif de l'analyse. Cette étape vise à évaluer les défaillances potentielles et à étudier leur criticité, c'est-à-dire le degré de gravité des défaillances possibles.[10]

Généralement, le degré de criticité est évalué sur une échelle allant de 1 à 10, où 1 représente une faible sévérité de l'effet du défaut, et 10 une forte sévérité. [10]

La criticité est déterminée à partir d'une triple cotation : Gravité – Occurrence – Détection.

Ainsi, il est possible d'établir l'échelle de gravité comme suit :

- Gravité potentielle sur une échelle de 1 à 10 (conséquence plus ou moins grave pour l'utilisateur).
- Fréquence d'apparition de la défaillance estimée sur une échelle de 1 à 10 (l'occurrence).
- Capacité de détection sur une échelle de 1 à 10 (degré de risque de ne pas détecter la défaillance).

L'indice de criticité est le résultat du produit des trois notes :

Criticité = Gravité x Fréquence x Détection. [10]

- **Étape 6 : Hiérarchiser les défaillances**

Cette étape consiste à classer les défaillances en fonction de leur ordre de priorité, en utilisant des seuils d'alerte pour déterminer lesquelles nécessitent une attention immédiate. Le but est de traiter en priorité les défaillances ayant la plus grande criticité, tandis que celles avec une criticité moindre seront gérées de manière secondaire.[10]

- **Étape 7 : Mettre en place des actions correctives ou préventives**

Le classement des divers modes de défaillance vise à identifier les actions correctives nécessaires lorsque cela est possible. Ces actions peuvent aboutir à l'élimination totale de la défaillance ou à sa réduction. De plus, ce classement permet de définir des actions préventives visant à réduire la criticité des défaillances. [10]

- **Étape 8 : Le suivi des actions mises en place**

Il est essentiel de vérifier régulièrement et de mettre à jour le plan d'action mis en place afin d'assurer son efficacité et d'améliorer les résultats. [10]

2.4.2 Les différents types d'AMDEC :

La méthode AMDEC se présente sous différentes formes en fonction de l'objectif de l'étude. Parmi les plus importantes, le tableau suivant résume les trois méthodes principales [10] :

Types d'AMDEC	Fonction	Support de travail
AMDEC Produit	Analyse des défaillances d'un produit, qu'elles soient liées à sa conception, à sa fabrication ou à son utilisation.	Mise en place d'un plan de fiabilisation.
AMDEC Processus	Analyse des défaillances sur les méthodes de production d'un produit ainsi que sur les procédures mises en œuvre pour accomplir une tâche consiste à identifier les problèmes potentiels dans les processus de fabrication et les méthodes opérationnelles.	Mise en place d'un plan de surveillance et un contrôle qualité.
AMDEC Moyen de Production	Analyse des défaillances des machines et équipements impliqués dans la réalisation d'un produit, tels que ceux utilisés dans la chaîne de production.	Guide listant les actions préventives à effectuer sur un équipement.

Table 2.1: Les types d'AMDEC [10]

2.5 Conclusion :

En conclusion, les outils de modélisation tels que le BPMN, le SADT et l'AMDEC jouent un rôle fondamental dans le développement du projet TERRA pour la création d'un jumeau numérique adapté à une fromagerie bio. Leur utilisation permet de structurer et d'analyser les processus de fabrication de manière exhaustive, en tenant compte à la fois des aspects fonctionnels et des éventuels dysfonctionnements.

Le BPMN offre une représentation claire et standardisée des processus métiers, favorisant la communication et la compréhension au sein de l'organisation. Le SADT, quant à lui, permet une décomposition systématique des systèmes complexes, facilitant ainsi leur conception et leur analyse. Enfin, l'AMDEC permet d'identifier, d'évaluer et de hiérarchiser les défaillances potentielles, contribuant ainsi à la mise en place de stratégies de mitigation efficaces.

En combinant ces outils de modélisation, le projet TERRA pose les bases d'un jumeau numérique robuste et adapté aux besoins spécifiques de la fromagerie bio. Cette approche méthodique permet d'anticiper les risques et de maximiser l'efficacité opérationnelle, tout en assurant la qualité et la sécurité des produits finaux. Ainsi, les outils de modélisation jouent un rôle essentiel dans la transformation digitale de l'industrie agroalimentaire, en permettant aux entreprises d'innover et de rester compétitives dans un environnement en constante évolution.

Chapitre 3

Etude de cas

3.1 Introduction :

Dans le chapitre suivant, nous plongerons dans une étude approfondie d'une ligne de production de yaourt, une exploration qui nous permettra de saisir les nuances tant fonctionnelles que dysfonctionnelles de ce processus vital. Notre objectif est de plonger dans les méandres de cette chaîne de production, d'en comprendre chaque étape à travers le prisme de la modélisation BPMN (Business Process Model and Notation). À travers cet outil, nous allons cartographier avec précision les flux, les activités et les interactions au sein de cette ligne de production, y compris les différentes interactions avec l'humain et le jumeau.

Mais notre enquête ne s'arrête pas là. Nous explorerons également les aspects fonctionnels de cette ligne de production en utilisant l'analyse SADT (Structured Analysis and Design Technique). Cette approche nous permettra d'examiner les fonctions principales ainsi que les relations entre les différentes parties prenantes, offrant ainsi un aperçu détaillé de la dynamique opérationnelle de cette ligne de production de yaourt.

En outre, nous aborderons l'étude des risques potentiels en utilisant l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité). Cette analyse nous permettra de mettre en lumière les éventuelles défaillances, leurs causes sous-jacentes et les mesures préventives qui pourraient être mises en place pour atténuer ces risques.

De plus, dans ce chapitre, nous aborderons une petite étude ergonomique dans le projet Terra, visant à évaluer l'interaction entre les opérateurs humains, les équipements et les processus. Cette analyse complémentaire nous permettra d'identifier les points d'optimisation pour garantir une intégration harmonieuse entre l'homme et la machine, contribuant ainsi à la productivité et au bien-être des travailleurs.

À travers cette approche méthodique et exhaustive, nous nous efforcerons de découvrir les forces et les faiblesses de cette ligne de production de yaourt, tout en identifiant les opportunités d'amélioration et les stratégies d'optimisation possibles.

3.2 Étude de cas sur une Ligne de Production de Yaourt avec BPMN.Demo :

BPMN.Demo est un outil logiciel spécialisé dans la modélisation, la visualisation et l'analyse des processus métiers en utilisant la norme Business Process Model and Notation (BPMN). Il est conçu pour aider les professionnels à créer des diagrammes BPMN clairs et précis, facilitant ainsi la compréhension et l'optimisation des processus métiers au sein des organisations.

Dans le cadre du projet TERRA, visant à développer un jumeau numérique pour une fromagerie bio, cette phase de travail est particulièrement significative. Elle implique l'identification des premiers éléments fondamentaux correspondant aux principales activités de la fromagerie, servant ainsi de base à la modélisation du jumeau numérique. Parmi ces éléments figurent les équipements de production, les flux de matières premières, ainsi que les différentes étapes du processus de fabrication. Dans ce contexte, la modélisation de la ligne de production de yaourt dans notre cas est essentielle. L'objectif est donc de définir ces composants essentiels afin de poser les bases de la modélisation du jumeau numérique, qui permettra de reproduire virtuellement le fonctionnement complet de la fromagerie. Avec l'aide de BPMN.demo, nous pouvons représenter de manière détaillée chaque étape du processus de production de yaourt, identifier les interactions entre les différents acteurs et flux de travail, et évaluer la performance globale du processus.

Dans la suite de notre travail, nous divisons notre démarche en deux parties représentations, reflétant la complexité de la ligne de production de yaourt. Dans la première représentation, nous explorerons le fonctionnement du processus de fabrication de yaourt tel qu'il se présente actuellement. Cette analyse approfondie nous permettra de saisir les rouages essentiels de la production, mettant en lumière les flux, les étapes clés et les interactions au sein de la chaîne de production.

Dans la deuxième représentation, nous aborderons une approche plus détaillée en tentant de répartir les tâches de la ligne entre l'humain, le jumeau numérique et la partie physique, constituée des machines utilisées. Cette démarche nous aidera à évaluer la contribution de chaque élément au processus global, ouvrant ainsi la voie à une optimisation de la répartition des tâches pour améliorer l'efficacité et la performance de la ligne de production.

Cette ligne se décompose en deux branches principales : l'une dédiée au yaourt brassé et l'autre au yaourt nature. Tout d'abord, notre objectif principal est d'acquérir un maximum d'informations sur le fonctionnement détaillé de chaque branche, depuis la réception des matières premières jusqu'au stockage des produits finis, qui se présentent sous forme de lots de yaourts, ce qui sera donc la première représentation. Pour atteindre cet objectif, nous avons organisé des visioconférences avec les différentes parties prenantes impliquées directement dans le processus de production. Ces échanges nous ont permis de recueillir des informations précieuses que nous avons ensuite tenté de modéliser de manière organisée et méthodique sur BPMN (Business Process Model and Notation), en respectant les règles et conventions propres à cette norme. Le résultat de cette modélisation est le schéma suivant :

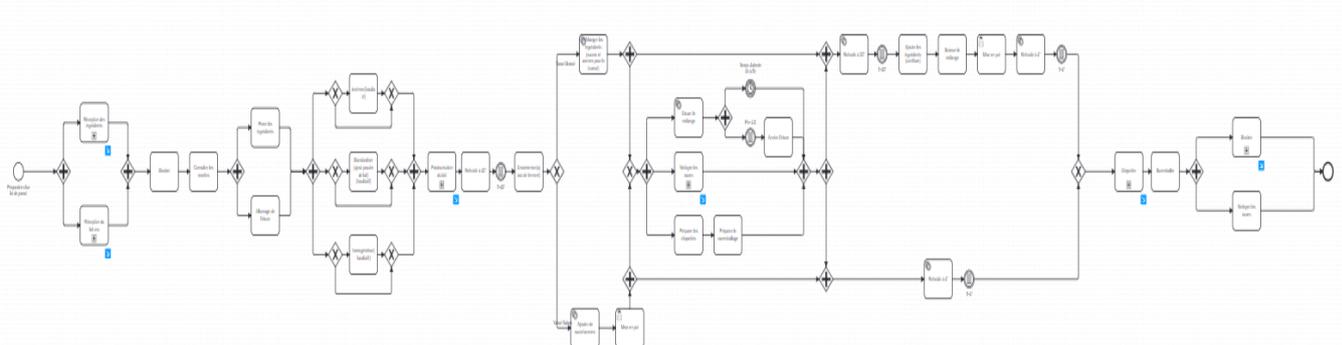


Figure 3.1: Représentation globale en BPMN de la ligne de production de yaourts brassé et nature

Dans la première partie du BPMN, représentée sur la figure 3.2, le cercle indique un événement de début, marquant le démarrage du processus de production. Ce processus commence par deux sous-processus parallèles : la réception du lait cru, où l'on contrôle simultanément l'extrait sec, le pH et la température, tout en assurant la traçabilité comme montré sur la figure 3.3, et la réception d'autres ingrédients/matières premières nécessaires à la fabrication du yaourt, avec contrôle de la température des ingrédients devant être conservés au froid, ainsi que leur traçabilité, comme illustré sur la figure 3.4

Une fois ces deux sous-processus terminés, les ingrédients sont stockés. Pour débiter la production, il est nécessaire de consulter les recettes, ce qui conduit au pesage des ingrédients et à l'allumage préalable de l'étuve, qui se font en parallèle.

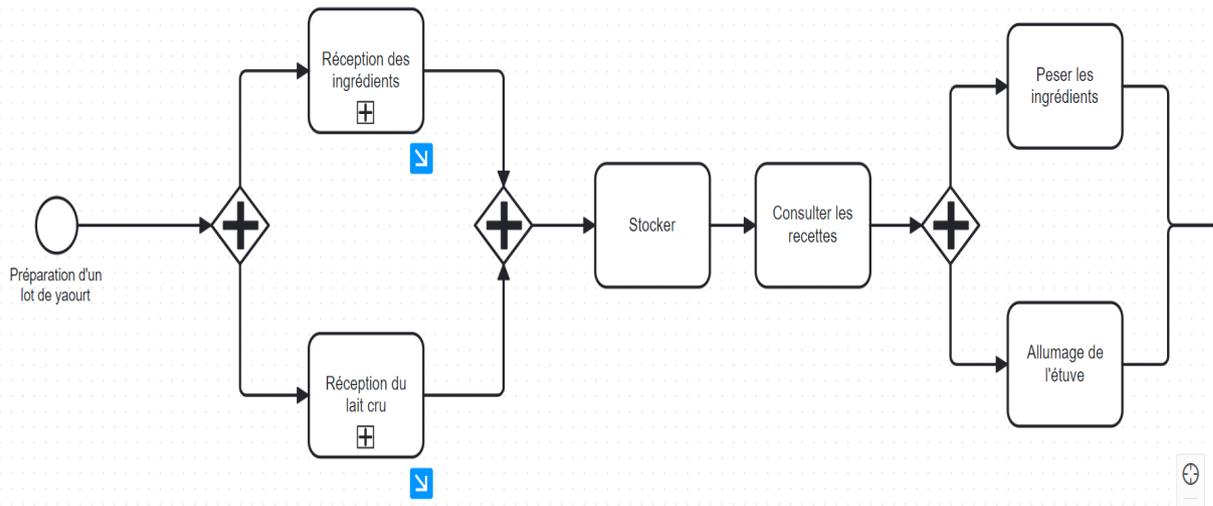


Figure 3.2: Représentation de la première partie en BPMN de la ligne de production de yaourts brassé et nature

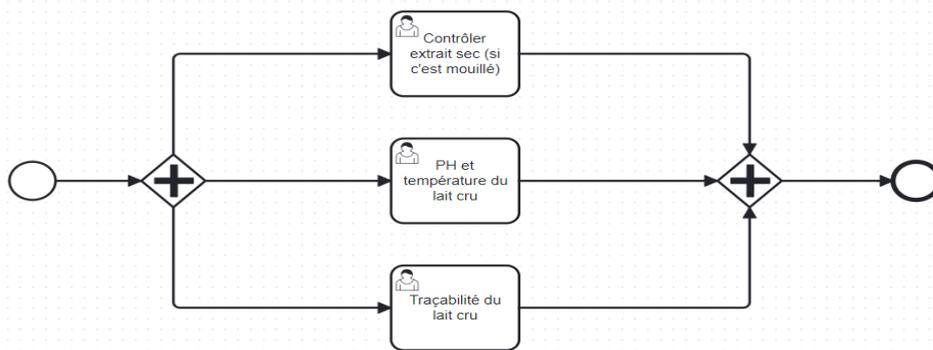


Figure 3.3: Représentation du sous-processus de réception de lait

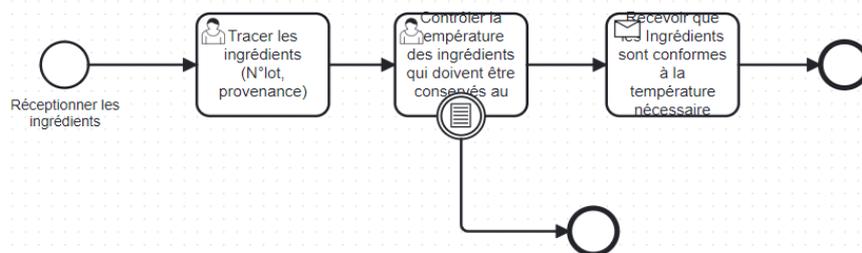


Figure 3.4: Représentation du sous-processus de réception des ingrédients

La deuxième partie du processus sur la figure 3.5 inclut des actions facultatives, permettant soit d'écrémer, standardiser ou homogénéiser, soit de réaliser deux de ces tâches, une seule ou aucune, avant de passer directement au sous-processus de pasteurisation du lait.

Lors de la pasteurisation, il y a un contrôle préalable des cuves et la consultation du barème de pasteurisation (temps et température) 3.6. Le temps d'attente pour la montée en température est modélisé par un événement timer, et d'autres actions peuvent être réalisées en parallèle si nécessaire. Après la pasteurisation, le lait est refroidi jusqu'à 43°C, modélisé par un événement conditionnel. Après avoir refroidi le lait à 43°, on procède à l'ensemencement, qui consiste en l'ajout de ferments.

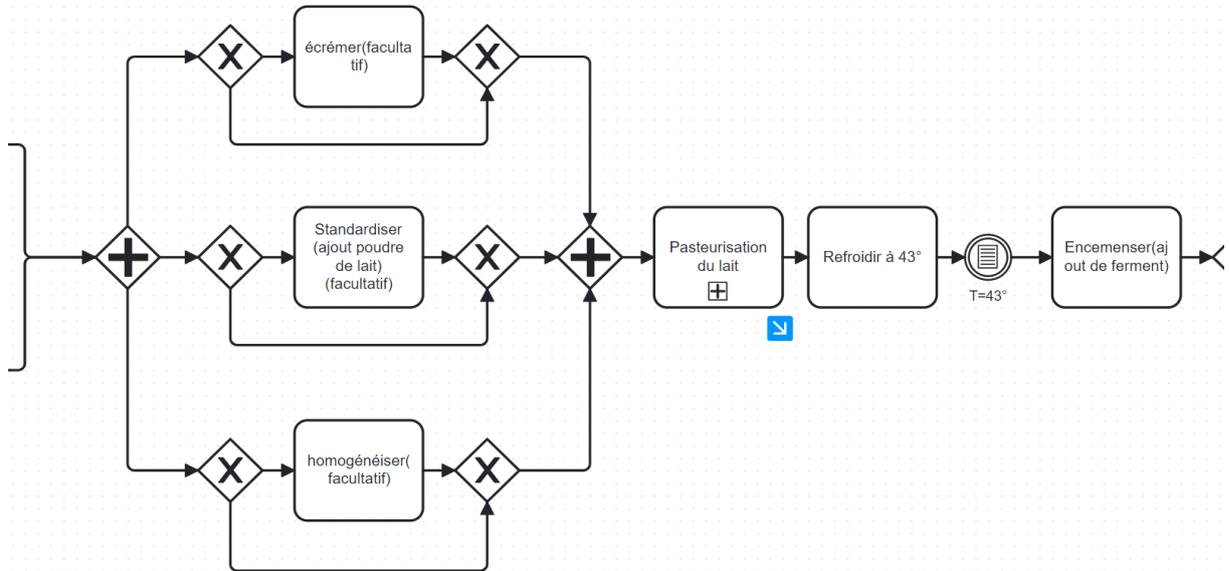


Figure 3.5: Représentation de la deuxième partie en BPMN de la ligne de production de yaourts brassé et nature

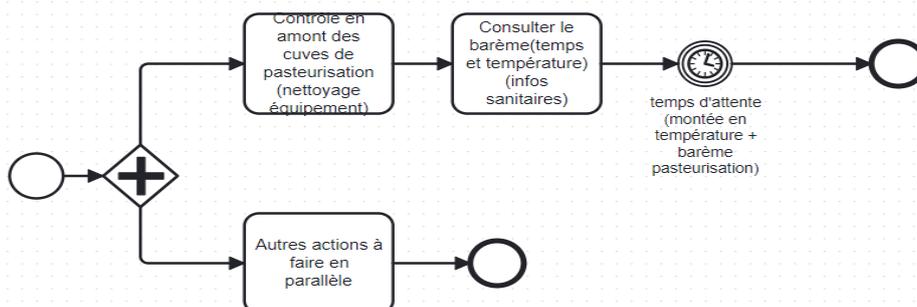


Figure 3.6: Représentation du sous-processus de pasteurisation du lait

Dans la troisième partie notre BPMN qui figure dans 3.7 se décompose en deux branches distinctes : une pour le yaourt brassé et une autre pour le yaourt nature.

Pour le yaourt brassé, les étapes incluent le mélange des ingrédients tels que le sucre et les arômes. Pour le yaourt nature, si nécessaire, on ajoute également le sucre et les arômes avant de passer à la

mise en pot. Les deux branches convergent ensuite vers des tâches communes effectuées en parallèle : l'étuvage du mélange, où l'on attend que le pH atteigne 4,5, ce qui prend généralement 4 à 5 heures, et le sous-processus de nettoyage des cuves. Ce dernier suit une séquence de pré-lavage, de nettoyage au détergent, de rinçage et enfin de désinfection, comme illustré dans la figure 3.8

Ensuite, les tâches communes comprennent également la préparation des étiquettes et du suremballage.

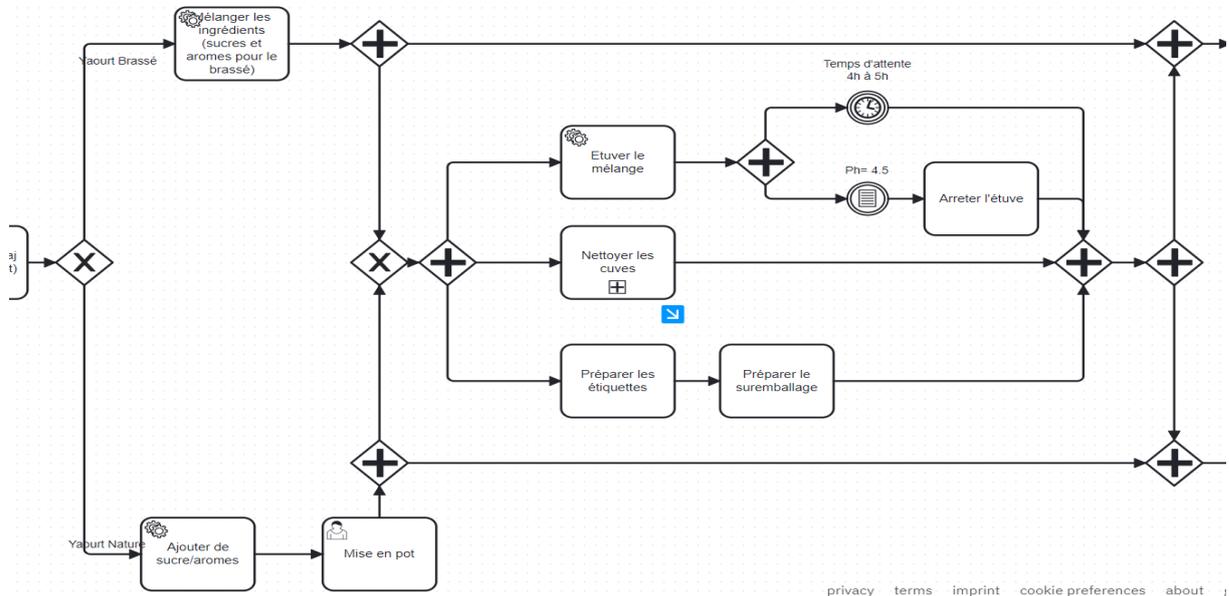


Figure 3.7: Représentation de la troisième partie en BPMN des processus de production des yaourts brassé et nature

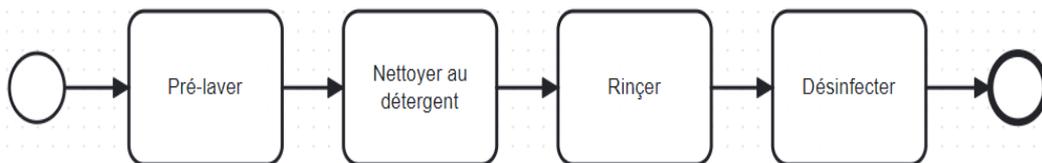


Figure 3.8: Représentation du sous-processus de nettoyage des cuves

Une fois ces tâches terminées, La quatrième partie de notre BPMN montre comment chaque processus suit son propre chemin. Pour le yaourt brassé, cela inclut le refroidissement du mélange à 20° (modélisé par un événement conditionnel), l'ajout d'ingrédients tels que la confiture, le brassage du mélange, la mise en pot et enfin le refroidissement du lait jusqu'à 4°, ce refroidissement se fera aussi dans le cas du yaourt nature comme illustré dans la figure 3.9

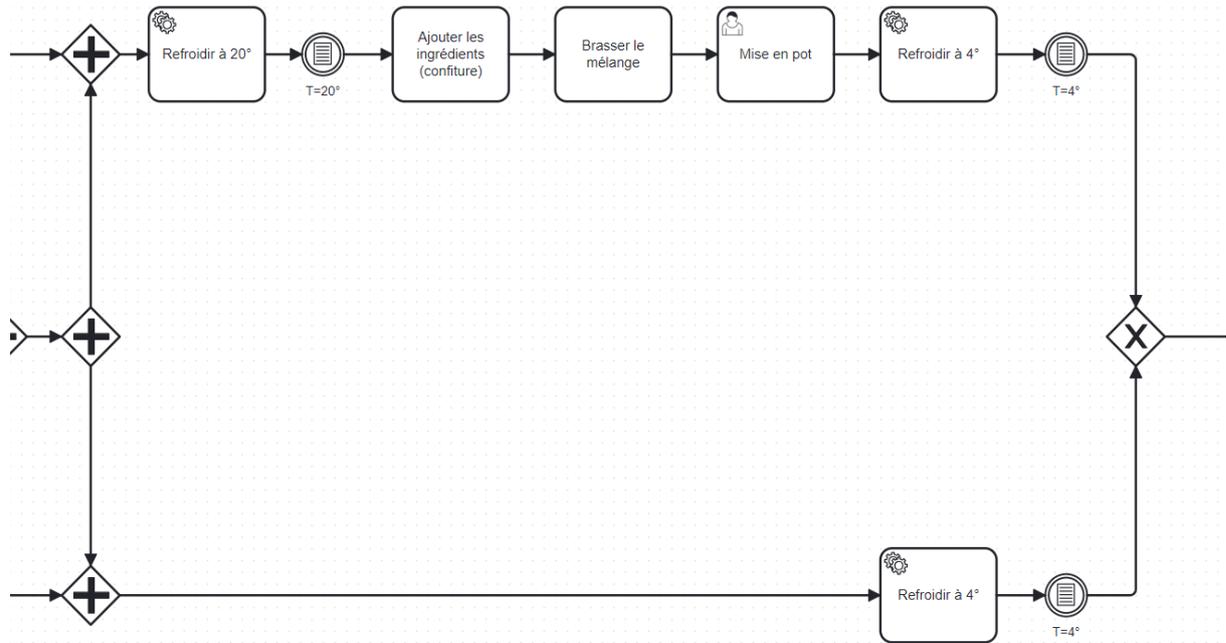


Figure 3.9: Représentation de la quatrième partie du BPMN des processus de production des yaourts brassé et nature

Maintenant que le yaourt, qu'il soit brassé ou nature, est mis en pot et refroidi à 4°C, nous passons au sous-processus de l'étiquetage. Cette étape inclut la traçabilité des produits comme montré dans la figure 3.13 suivie du suremballage et du stockage. Avant la mise en cartons, un contrôle de température est effectué pour garantir la qualité du produit, comme illustré dans la figure 3.14 En parallèle, les cuves sont nettoyées une seconde fois comme vu sur la figure 3.10

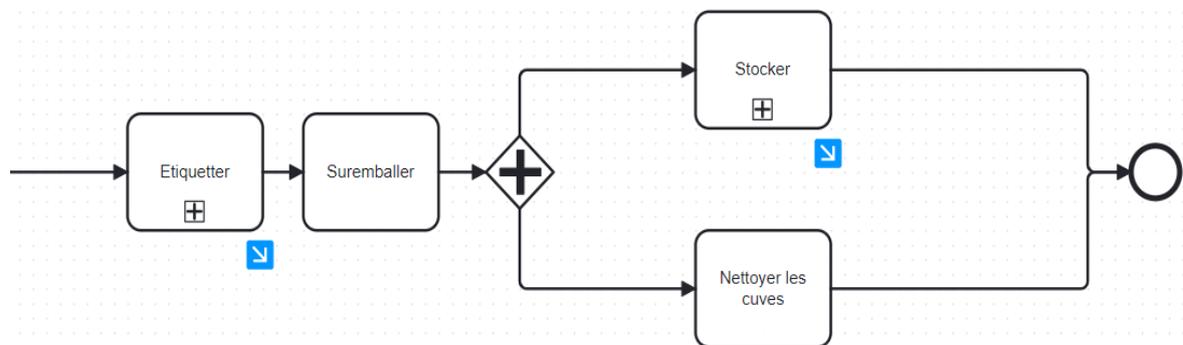


Figure 3.10: Représentation de la cinquième partie du BPMN des processus de production des yaourts brassé et nature



Figure 3.11: Représentation du sous-processus d'étiquetage



Figure 3.12: Représentation du sous-processus de stockage

Après avoir dressé cette première représentation globale de la ligne de production de yaourt, nous entamons maintenant la phase suivante de notre étude. Cette étape cruciale consiste à décomposer le processus de production en éléments distincts, chacun représentant une facette essentielle de l'ensemble. Nous allons diviser les tâches entre l'humain, le jumeau numérique et la partie physique de la ligne. L'humain apporte son expertise, sa capacité d'adaptation et sa faculté à résoudre les problèmes complexes. Le jumeau numérique, fruit des avancées technologiques, offre une représentation virtuelle du processus, permettant une simulation précise et des analyses prédictives. Enfin, la partie physique de la ligne, constituée des machines et des équipements, assure l'exécution concrète des opérations. Cette approche multidimensionnelle nous permettra de mieux comprendre les interactions entre ces différents acteurs et de déterminer comment optimiser leur collaboration pour améliorer l'efficacité et la qualité de la production de yaourt.

Pour ce faire, chacun aura sa propre piscine sur BPMN, une représentation visuelle qui encapsule les activités et les processus spécifiques à chaque acteur : l'humain, le jumeau numérique et la partie physique. Ces piscines agiront comme des environnements distincts dans lesquels chaque entité peut opérer efficacement. Cependant, puisque BPMN ne permet pas directement de définir des suites de processus entre les piscines, les interactions entre ces acteurs se feront par l'échange de messages. Cette communication entre les piscines permettra de coordonner les activités et d'assurer une exécution fluide du processus global de production de yaourt.

Dans la représentation qui suit, nous adopterons un système de codage visuel pour faciliter la compréhension et la distinction entre les différents éléments. Les passerelles, qui indiqueront les décisions ou les points de bifurcation dans le processus, seront marquées en vert. Les envois de messages entre les piscines, qui représentent les interactions entre les acteurs, seront mis en évidence en rouge pour souligner leur importance dans la coordination des activités. Enfin, les événements conditionnels ou temporisés, qui déclenchent des actions spécifiques dans le processus, seront identifiés en jaune pour une meilleure visibilité et compréhension. Cette approche de codage visuel aidera à clarifier les étapes du processus et à mettre en évidence les points clés où l'intervention humaine,

l'interaction avec le jumeau numérique et les actions des machines physiques convergent pour assurer un fonctionnement optimal de la ligne de production de yaourt.

Le processus lui-même restera inchangé ; seule la répartition des tâches entre les différents acteurs sera ajustée. Chacun des protagonistes - l'humain, le jumeau numérique et la partie physique - se verra attribuer des responsabilités spécifiques dans l'exécution du processus global de production de yaourt. En assignant des rôles clairs à chaque entité, nous visons à optimiser l'efficacité et la coordination de l'ensemble du système, tout en maintenant une cohérence dans le déroulement du processus de fabrication.

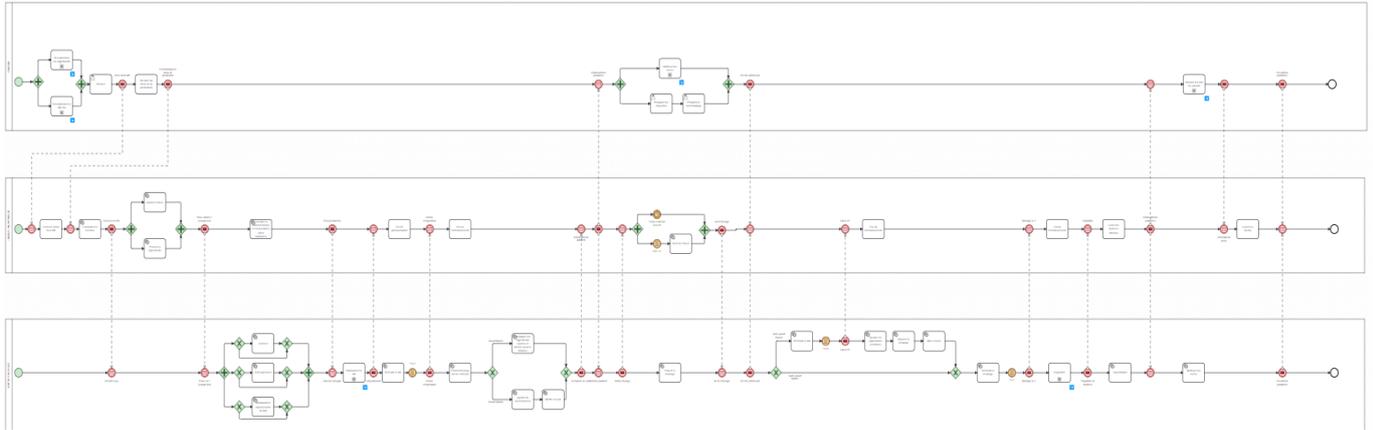


Figure 3.13: Représentation BPMN de la ligne de production de yaourt avec les 3 couches (Humain-Jumeau numérique-Partie physique)

Notre processus démarre avec l'intervention de l'humain, chargé de recevoir les ingrédients et le lait cru. Après leur réception, il assure leur traçabilité et les stocke dans les conditions appropriées. Ensuite, il transmet au jumeau numérique toutes les données relatives à ces entrées. Il procède ensuite à la sélection du produit à fabriquer, qu'il s'agisse de yaourt brassé aux fraises, aux abricots ou simplement de yaourt nature. Ce choix est également communiqué au jumeau numérique, qui lance le processus, comme illustré dans la figure 3.14 :

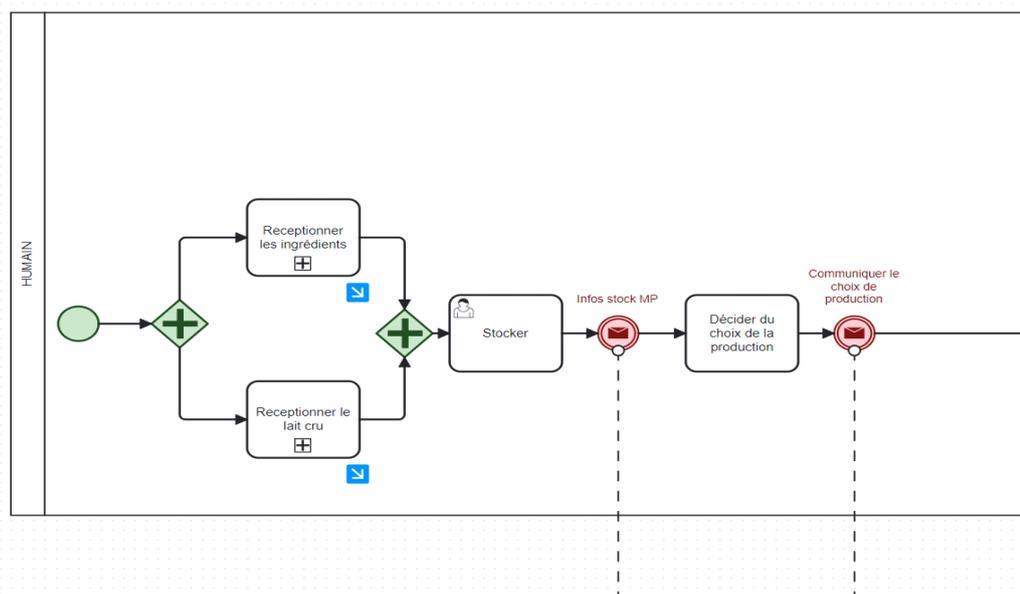


Figure 3.14: Représentation BPMN du rôle de l'humain au début du processus

Ensuite, conformément à ce qui a été mentionné précédemment, le jumeau numérique reçoit toutes les données relatives aux entrées des matières premières, qu'il utilise pour gérer les stocks. Après

quoi, il reçoit également le choix de production émis par l'humain, ce qui le conduit à consulter la recette programmée. Il transmet ensuite cette recette à la partie physique, afin que les machines soient configurées pour cette fabrication spécifique. Cela marque le début effectif de la production, avec l'activation de l'étuve et le dosage précis des ingrédients selon la recette sélectionnée. Une fois le dosage terminé, le jumeau numérique envoie un message à la partie physique pour confirmer la conformité du pesage, comme illustré dans la figure 3.16

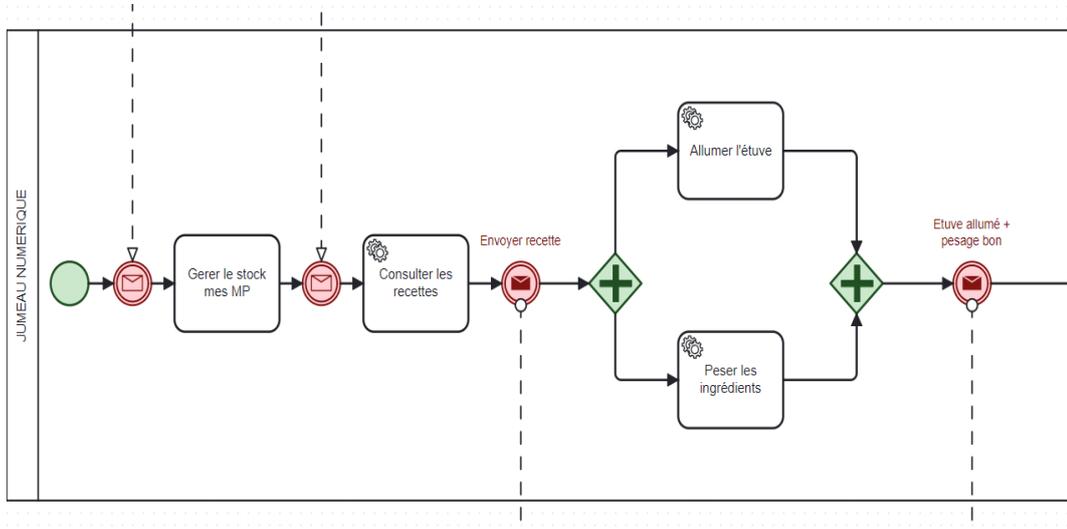


Figure 3.15: Représentation BPMN du rôle du jumeau numérique au début du processus

Pour la partie physique, elle reçoit la recette programmée ainsi que la confirmation du pesage correct, ce qui la motive à entamer le processus de production. Cela implique le démarrage des machines spécifiquement conçues pour cette tâche.

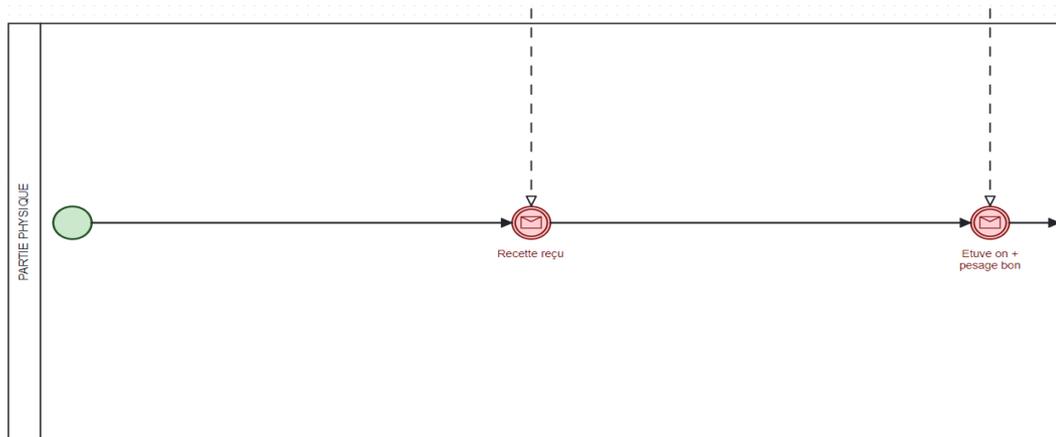


Figure 3.16: Représentation BPMN du rôle de la partie physique au début du processus

Toujours dans la partie physique, une fois que le pesage est validé, nous passons à l'étape suivante, qui comprend l'écémage, l'homogénéisation et la standardisation. Comme souligné dans la première représentation, ces étapes sont facultatives, ce qui signifie que nous pouvons choisir de les effectuer toutes, seulement deux d'entre elles, une seule ou aucune, en fonction des besoins spécifiques de production comme illustré dans la figure 3.17

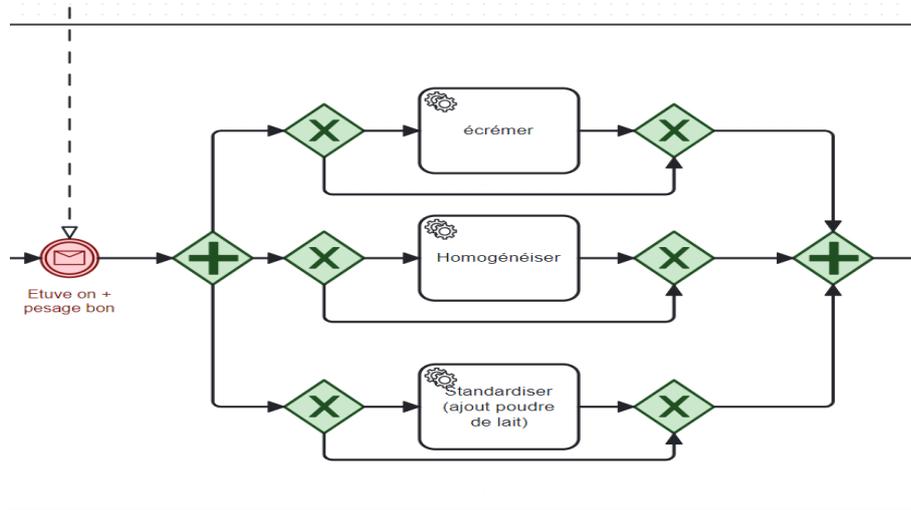


Figure 3.17: Représentation BPMN du rôle de la partie physique

Pour passer à l'étape de la pasteurisation, le jumeau numérique devra d'abord consulter le barème adéquat de temps et de température selon la recette choisie. Il enverra ensuite ces informations à la partie physique, qui suivra ces directives pour pasteuriser le lait. Une fois la pasteurisation terminée, la partie physique enverra un message au jumeau numérique pour l'informer de la fin de cette étape. En parallèle, la partie physique passera au refroidissement du lait. De manière similaire, une fois le lait refroidi à la température souhaitée, elle enverra un message au jumeau numérique pour l'informer que cette tâche est terminée. Ces échanges sont illustrés dans la figure 3.18.

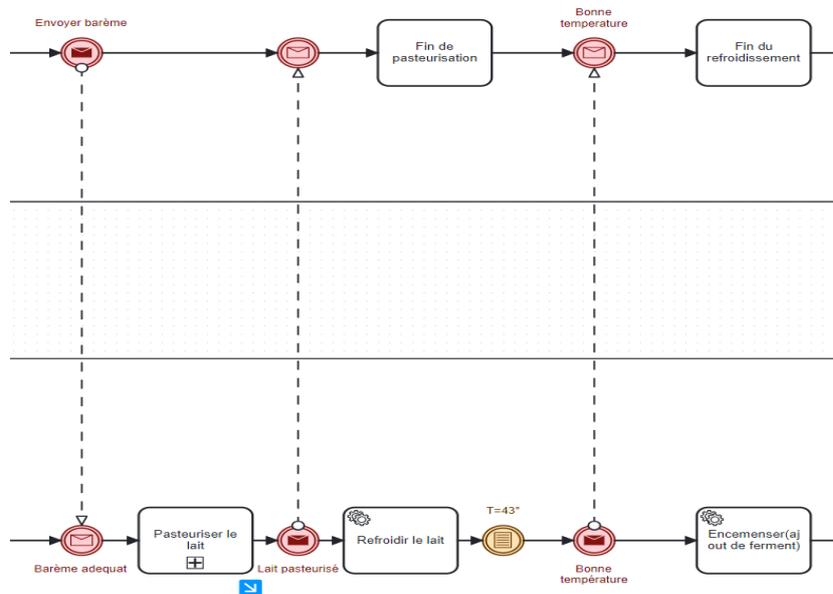


Figure 3.18: Représentation BPMN des échanges entre le jumeau numérique et la partie physique

La partie physique poursuivra ensuite avec l'ensemencement du lait. À ce stade, une passerelle déterminera si le produit final sera un yaourt brassé ou nature, suivant le choix initial. Comme dans la première représentation, la production suivra le chemin approprié en fonction du type de yaourt désiré comme montré dans la figure 3.19

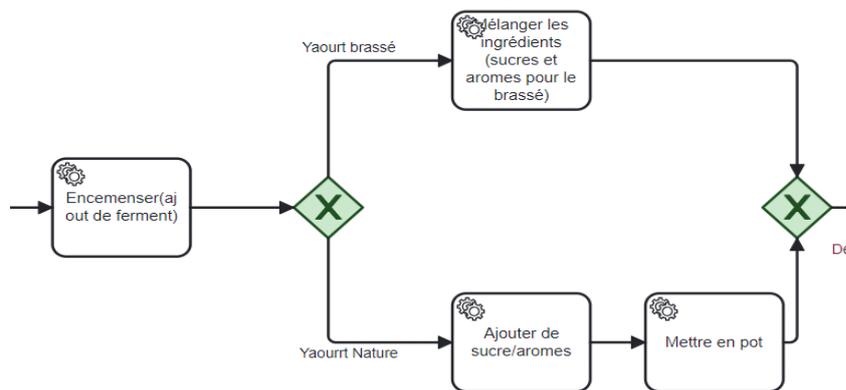


Figure 3.19: Représentation BPMN de la suite des tâche pour la partie physique

A partir de là et comme vu dans la première représentation des actions parallèles vont se faire, on aura une partie qui sera faire par l'humain, une autre par le jumeau numérique et aussi par la partie physique, l'idée c'est qu'une fois que la partie physique termine ce qu'elle avait à faire elle va envoyer un message à au jumeau numérique pour lui demander la suite des evenements, du coup le jumeau numérique une fois qu'il recevra ce message il va envoyer un message commun pour l'humain et le jumeau numérique en même temps afin que ces tâches là se réalisent en parallèle comme montré dans la figure 3.20

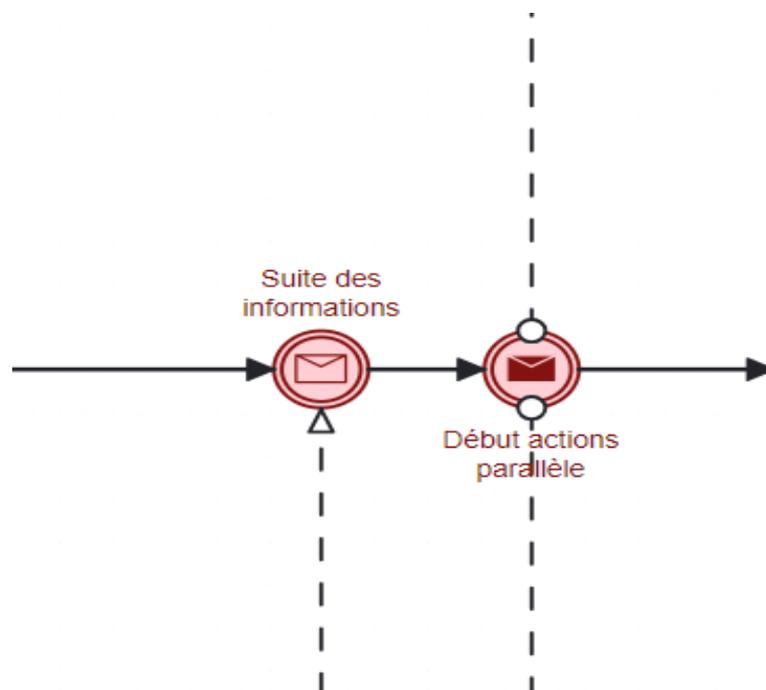


Figure 3.20: Représentation BPMN de l'envoi de message du jumeau numérique au autre parties pour le début des actions parallèle

Ainsi, l'humain recevra un message l'informant qu'il est temps de débiter les tâches parallèles aux autres processus en cours. Il procédera alors au nettoyage des cuves et à la préparation des étiquettes ainsi que du suremballage. Une fois ces tâches terminées, il informera le jumeau numérique, assurant

ainsi la coordination et la continuité des opérations.[3.21](#)

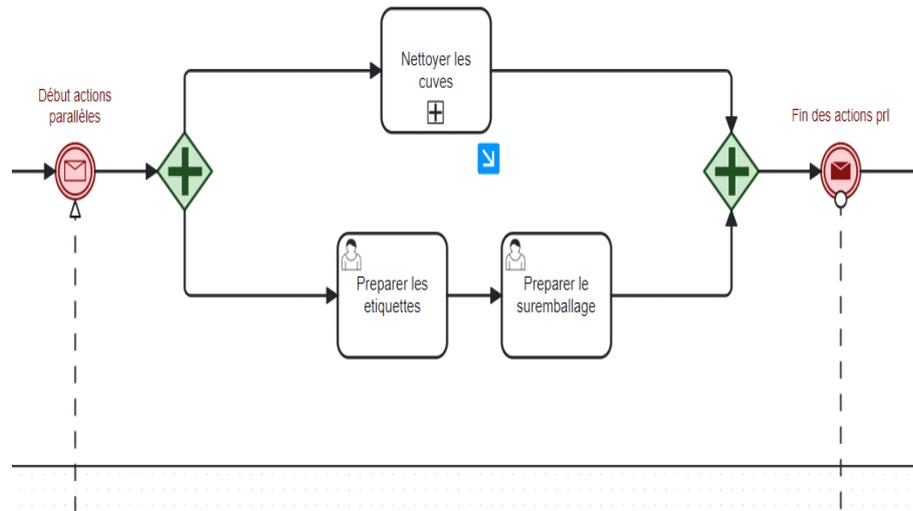


Figure 3.21: Représentation BPMN des tâches parallèles de l'humain

De même, la partie physique informera le jumeau numérique du début de l'étuvage, permettant ainsi au jumeau de démarrer un chronomètre de 4 à 5 heures et de définir une condition d'atteinte d'un pH égal à 4,5. Une fois ces conditions remplies, le jumeau numérique mettra fin à l'étape de l'étuvage, garantissant la conformité et la qualité du produit. [3.22](#)

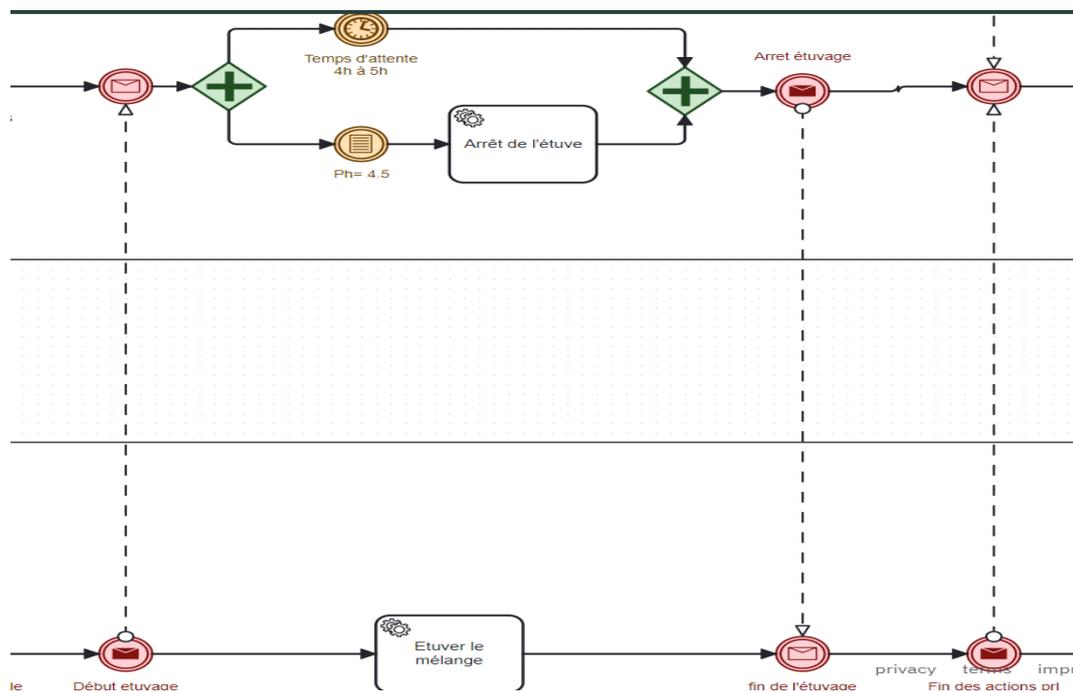


Figure 3.22: Représentation BPMN des tâches parallèles du jumeau numérique et la partie physique

Ainsi le jumeau numérique mettra fin aux actions parallèle en envoyant un message à chacune des parties, ce qui poussera alors la partie physique a continuer son travail qui sont donc la suite des tâche réalisées pour soit le yaourt nature soit le brassé

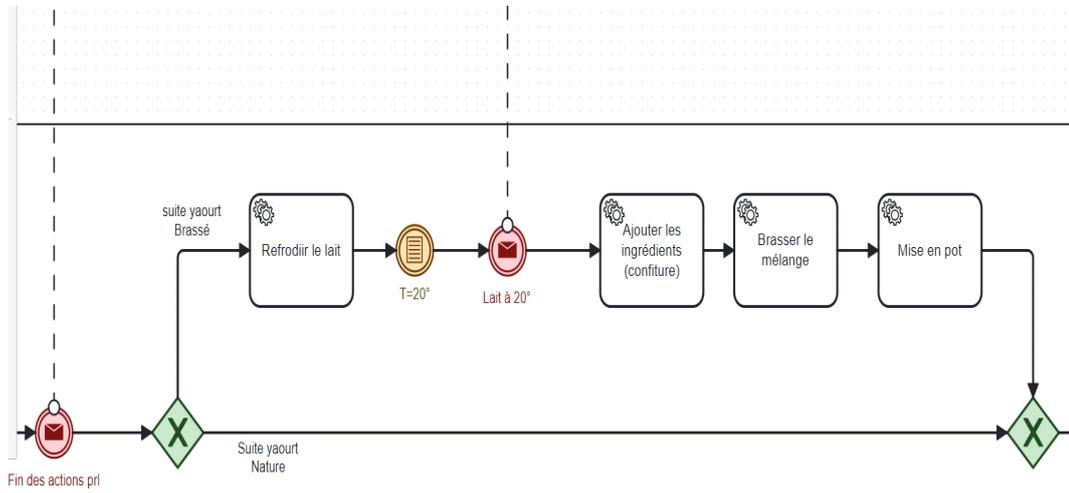


Figure 3.23: Représentation BPMN de la suite des tâches de la partie physique

Après cela, le mélange sera refroidi. Comme au début du processus, une fois le refroidissement effectué, la partie physique informera le jumeau numérique, qui mettra alors fin à cette tâche. Ensuite, l'étiquetage et le suremballage seront réalisés par la partie physique. L'étiquetage fournira des informations essentielles sur le produit, qui seront également envoyées au jumeau numérique pour permettre la gestion et le stockage de ces données. 3.24

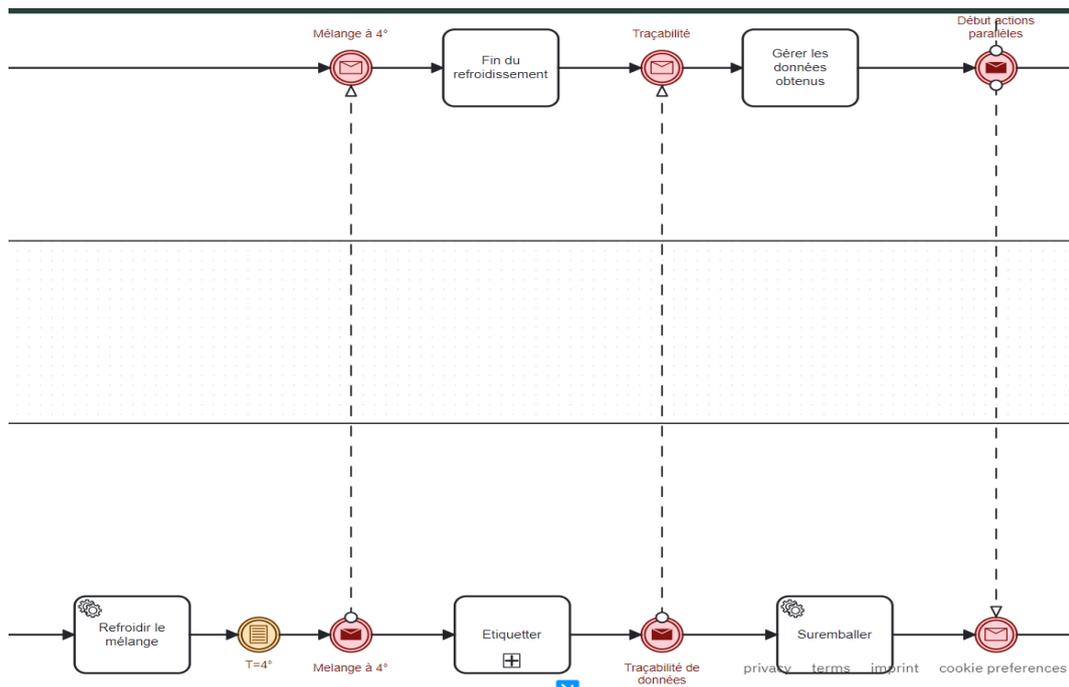


Figure 3.24: Représentation BPMN de la suite des tâches du jumeau numérique et la partie physique

Ensuite, nous aurons encore une fois des actions parallèles entre l'humain et la partie physique. Pour ce faire, c'est le jumeau numérique qui harmonisera ces tâches en envoyant simultanément un message aux deux acteurs pour leur indiquer qu'ils peuvent continuer à travailler. Ainsi, l'humain se chargera du stockage des lots de yaourts et enverra ensuite ces informations au jumeau numérique pour permettre une gestion efficace des stocks, comme montré dans la figure 3.25 Parallèlement, la partie physique procédera au nettoyage des cuves, comme illustré dans la figure 3.26 C'est ainsi que se termine le processus de fabrication de yaourt.

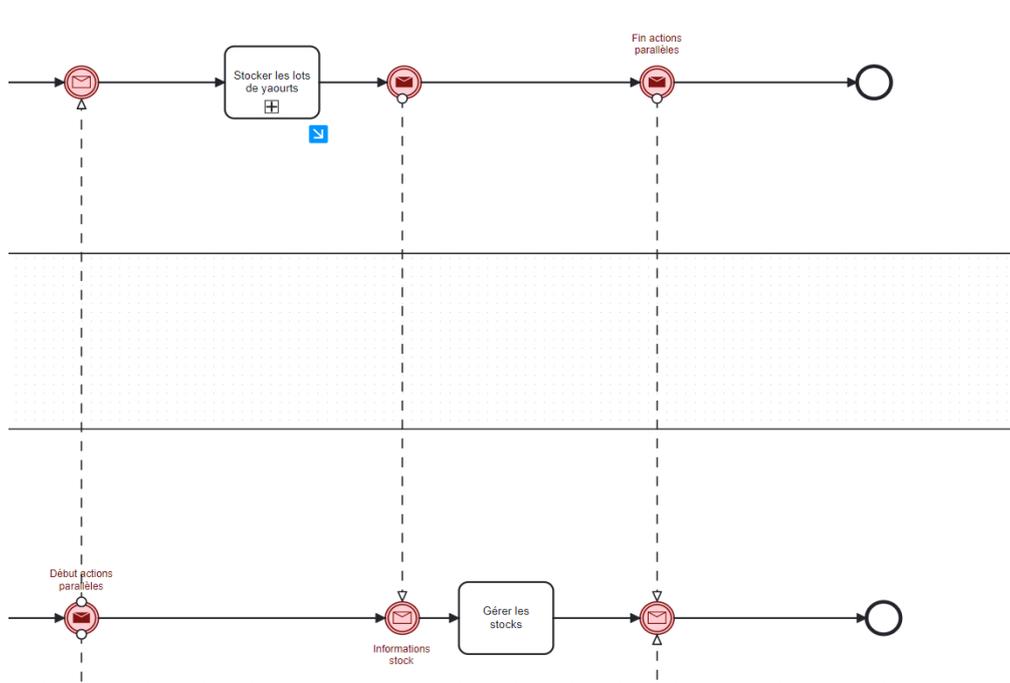


Figure 3.25: Représentation BPMN de la fin des tâches de l'humain et du jumeau numérique

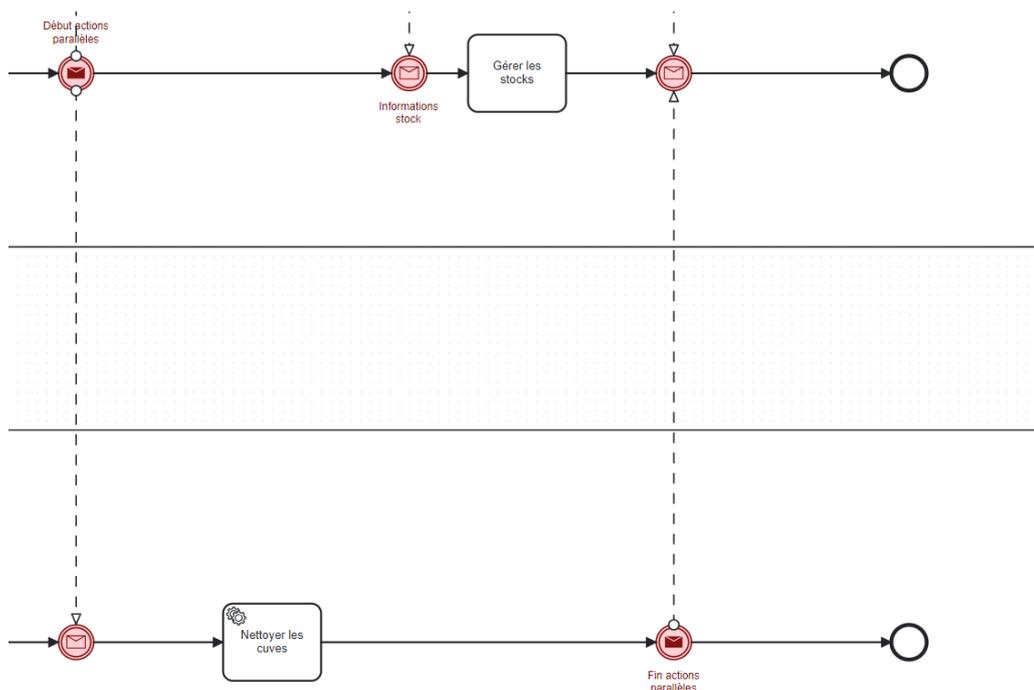


Figure 3.26: Représentation BPMN de la fin des tâches du jumeau numérique et la partie physique

3.3 Étude de cas sur une ligne de production de yaourt avec SADT

:

SADT (Structured Analysis and Design Technique) est un outil puissant pour modéliser, visualiser et analyser les systèmes complexes en se concentrant sur les fonctions principales et les relations entre les différentes entités. Contrairement à BPMN qui se concentre sur les processus métiers, SADT permet de détailler les opérations fonctionnelles et les interactions entre les différentes composantes d'un système.

Après avoir utilisé BPMN.Demo pour représenter en détail chaque étape du processus de production de yaourt, identifier les interactions entre les différents acteurs et flux de travail, et évaluer la

performance globale du processus, nous nous tournerons vers l'utilisation de SADT pour approfondir cette analyse. Avec SADT, nous pourrions décomposer les opérations fonctionnelles de la ligne de production de yaourt et examiner les relations entre les différentes parties prenantes.

L'approche SADT nous permettra de créer des diagrammes qui montrent non seulement les fonctions principales de la ligne de production, mais aussi comment ces fonctions sont interconnectées. Nous pourrions identifier les entrées nécessaires, les contrôles à appliquer, les mécanismes utilisés et les sorties produites pour chaque fonction. Cela nous fournira une vision claire et structurée du système, facilitant ainsi l'identification des points faibles, des inefficacités potentielles et des opportunités d'amélioration.

En combinant les forces de BPMN et de SADT, nous serons en mesure de modéliser de manière exhaustive la ligne de production de yaourt. BPMN nous aidera à visualiser les processus métiers et les flux de travail, tandis que SADT nous permettra de modéliser de manière plus générique les différentes fonctions du processus de production de yaourt comme suit :

- Réceptionner les ingrédients :** La figure 3.27 illustre l'étape de "Réceptionner les ingrédients" dans le processus de fabrication de yaourt. Les matières premières nécessaires pour cette étape incluent le lait cru ou pasteurisé, les arômes, les ferments, la confiture et les sucres. L'énergie requise pour alimenter les équipements provient principalement de l'électricité. Les réglages impliquent le contrôle de la température, la traçabilité, le pH et l'extrait sec (contrôle lait cru) afin de garantir la conformité des ingrédients aux normes établies. Les consignes consistent à n'envoyer que les ingrédients conformes. Les sorties de cette étape sont constituées des matières premières conformes, prêtes pour les étapes suivantes, ainsi que des feuilles de traçabilité, qui enregistrent les informations relatives aux ingrédients reçus.

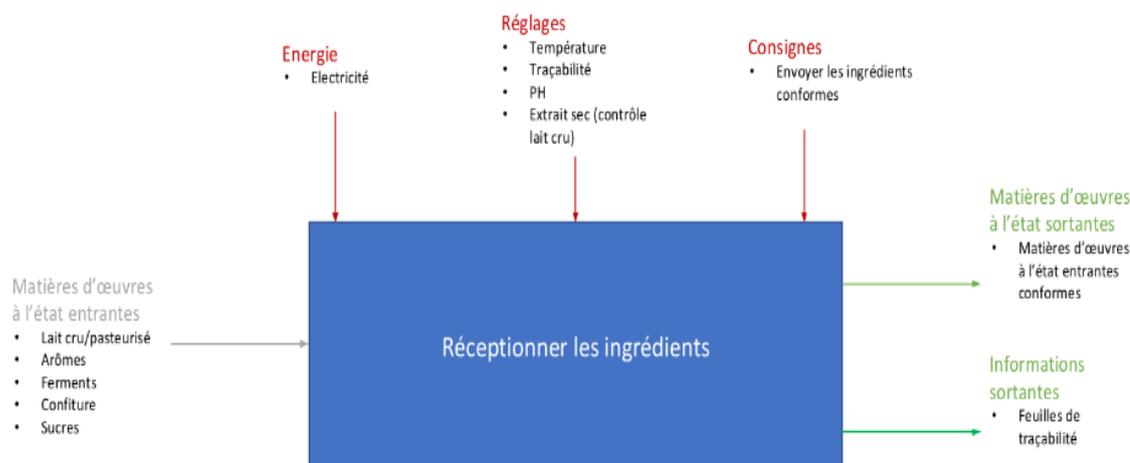


Figure 3.27: Représentation SADT de la réception des ingrédients

- Préparation de la fabrication :** La figure 3.28 illustre l'étape de "Préparation de la fabrication" dans le processus de production de yaourt. Les ingrédients conformes constituent les matières premières entrantes nécessaires pour cette étape. L'énergie requise provient de l'électricité et de la chaleur, indispensables au bon fonctionnement des équipements. Les réglages incluent le contrôle de la température, du pH, la standardisation, l'écémage et l'homogénéisation, afin d'assurer une préparation optimale des ingrédients. Les consignes comprennent la pesée des ingrédients et l'allumage de l'étuve. Les sorties de cette étape sont les ingrédients prêts à être mélangés, ainsi que les feuilles de traçabilité et les données de recette, qui enregistrent les informations cruciales pour le suivi du processus de fabrication.



Figure 3.28: Représentation SADT de la préparation de la fabrication

- Action mécanique :** La figure 3.29 illustre l'étape d' "Action mécanique", telle que le mélange. rencontrée dans le processus de fabrication de yaourt. Pour cette étape, les matières premières nécessaires comprennent le lait pasteurisé, les ingrédients conformes, et les ferments. L'énergie requise provient de l'électricité et de l'eau. Les réglages comprennent le contrôle de la température, les quantités spécifiées dans la recette, et l'ensemencement en amont. Les consignes incluent la recette à suivre, les procédures d'hygiène, et les réglementations alimentaires à respecter. En sortie de cette étape, on obtient un mélange des ingrédients et du lait pasteurisé. De plus, les feuilles de traçabilité et les données de recette enregistrent les informations essentielles pour le suivi du processus de production.

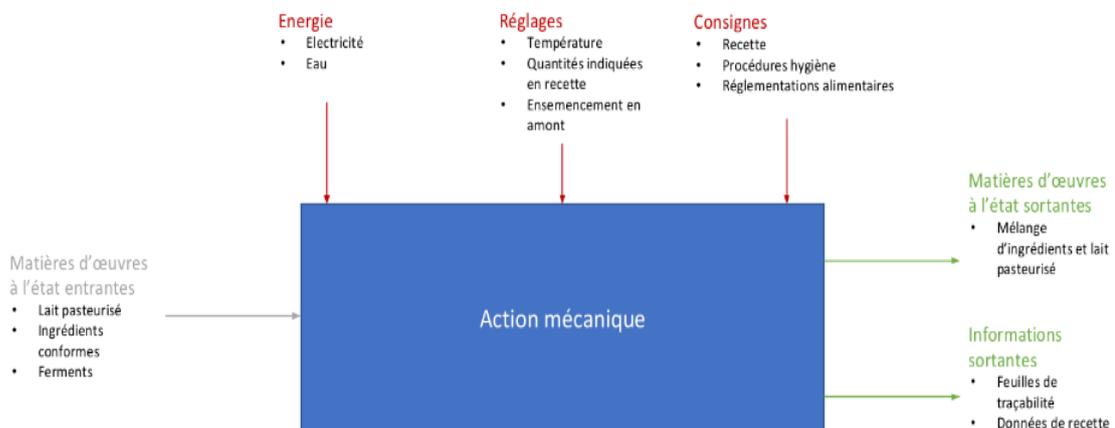


Figure 3.29: Représentation SADT de l'action mécanique

- Traitement thermique :** La figure 3.30 illustre l'étape de "Traitement thermique" dans le processus de fabrication de yaourt qui sera l'étuve. La matière d'œuvre entrante est le mélange de lait pasteurisé et d'ingrédients. L'énergie utilisée provient de l'eau et de l'électricité. Les réglages incluent une fois de plus le contrôle de la température, du pH et des temps d'attente. Les consignes comprennent la recette à suivre, les procédures d'hygiène, les réglementations alimentaires à respecter, ainsi qu'un refroidissement en aval nécessaire. En sortie de cette étape, nous obtenons notre mélange étuvé. En termes d'informations, nous disposons des feuilles de traçabilité et des données de recette.

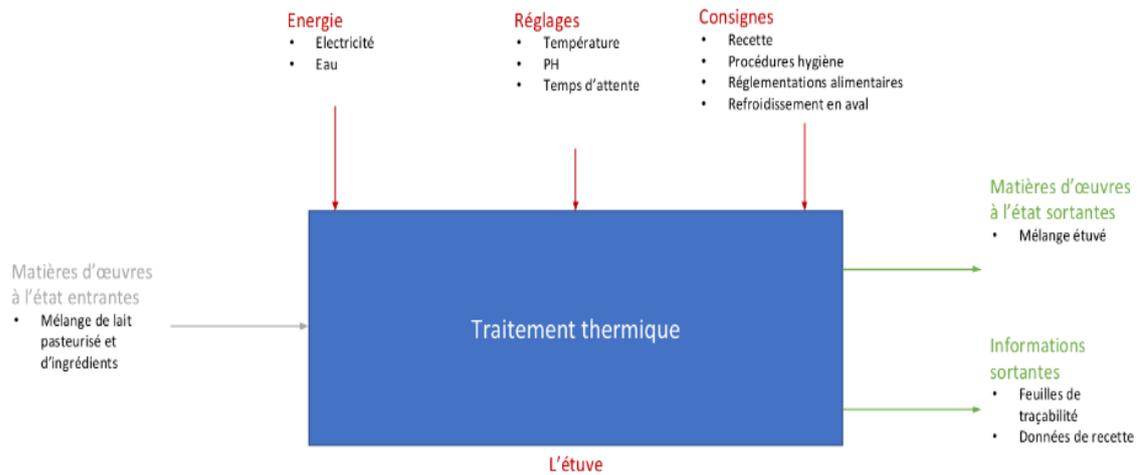


Figure 3.30: Représentation SADT du traitement thermique

- Emballer et suremballer :** La figure 3.31 montre l'étape de "Emballer et suremballer" dans le processus de fabrication de yaourt. Le mélange étuvé constitue notre matière première d'entrée pour cette étape. L'énergie utilisée provient de l'électricité et de la chaleur. Les réglages incluent le contrôle de la température, les temps d'attente, la mise en pot et l'étiquetage. Les consignes comprennent la recette à suivre, les procédures d'hygiène, de stockage, et les réglementations alimentaires à respecter. En sortie de cette étape, notre matière d'œuvre sera un produit ou un lot de yaourt prêt à être stocké. De plus, les feuilles de traçabilité et les données de stockage constitueront le flux informationnel, assurant le suivi et la gestion du produit fini.

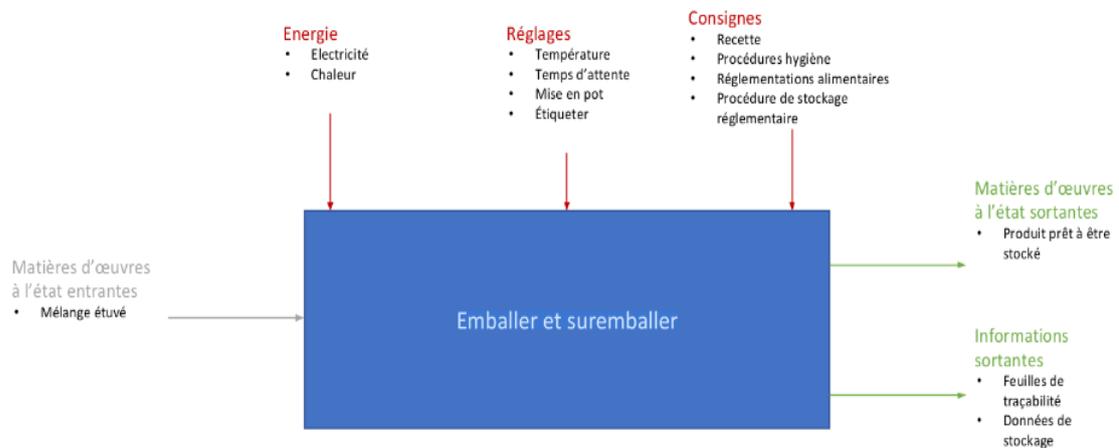


Figure 3.31: Représentation SADT de l'emballage et le suremballage

Après avoir modélisé toutes les étapes qui sont donc les composants de notre système de processus de production de yaourt, nous procéderons à la représentation des interactions entre elles. Il est important de noter que la matière première de sortie de chaque étape correspond à la matière première d'entrée de l'étape suivante. Cette représentation constitue le niveau A-0 du SADT. Ainsi, nous aurons la réception des ingrédients, suivie de la préparation de la fabrication, puis de l'action mécanique, du traitement thermique, et enfin de l'emballage et du suremballage, comme illustré dans la figure 3.32.

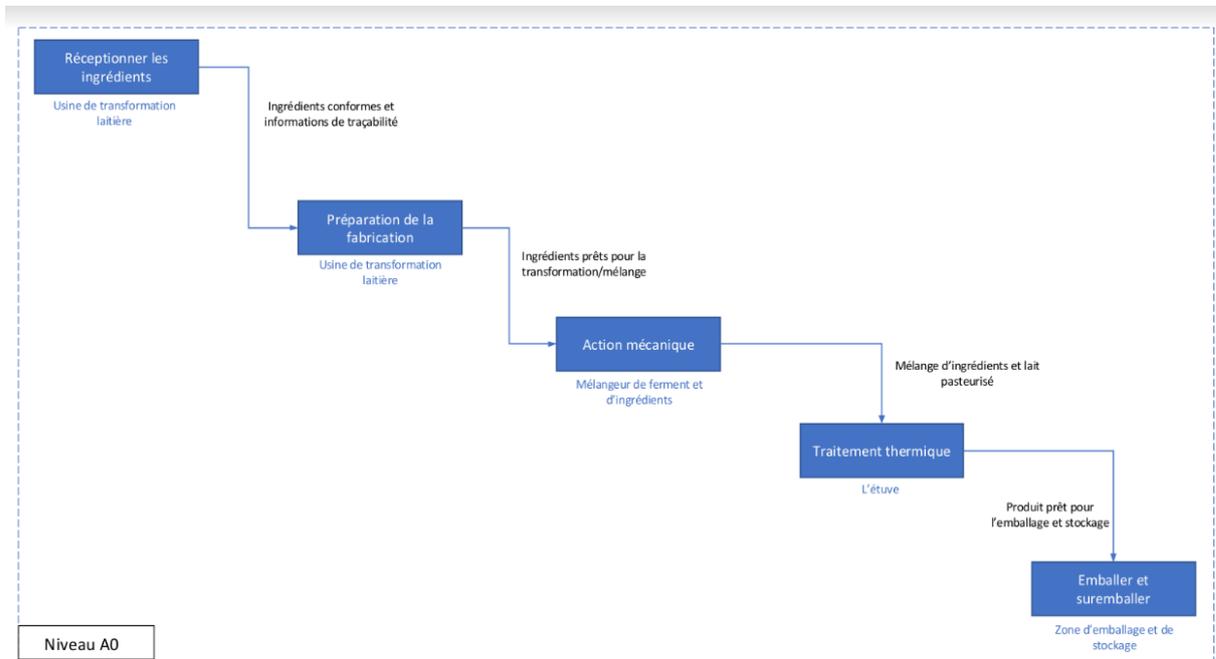


Figure 3.32: Représentation SADT du système global et les interactions entre les composants du système

3.4 Étude de cas sur une ligne de production de yaourt avec AMDEC

:

AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode structurée et méthodique utilisée pour évaluer et améliorer la fiabilité des processus, produits ou systèmes en identifiant les modes potentiels de défaillance, leurs effets sur le système et leur criticité respective. Contrairement à d'autres méthodes comme le diagramme de Pareto qui se concentre sur l'identification des causes fondamentales, l'AMDEC se focalise sur les modes de défaillance eux-mêmes et leurs impacts.

Avant d'appliquer l'AMDEC au processus de production de yaourt, nous avons utilisé BPMN (Business Process Model and Notation) pour représenter chaque étape de manière détaillée. Cela nous a permis d'identifier précisément les interactions entre les différents acteurs et les flux de travail, tout en évaluant la performance globale du processus. BPMN nous a offert une vue claire et spécifique des processus métiers impliqués dans la production de yaourt.

Par la suite, nous avons utilisé SADT (Structured Analysis and Design Technique) pour approfondir notre analyse. Contrairement à BPMN qui se concentre sur les processus métiers, SADT nous a permis de modéliser de manière plus générale et systématique les opérations fonctionnelles de la ligne de production de yaourt, en examinant les relations entre les différentes parties prenantes et en détaillant les interactions fonctionnelles essentielles.

Maintenant, avec l'introduction de l'AMDEC, nous allons aborder le côté dysfonctionnel du processus de production de yaourt. L'AMDEC nous permettra d'identifier les modes de défaillance potentiels à chaque étape du processus, les effets de ces défaillances sur la qualité et la fiabilité du produit final, ainsi que la criticité de ces effets. Contrairement à BPMN et SADT qui mettent l'accent sur les aspects fonctionnels et les interactions entre les composants du système, l'AMDEC se concentre sur l'identification et la prévention des défaillances potentielles qui pourraient compromettre la qualité ou la sécurité du produit.

En combinant les approches de BPMN, SADT et AMDEC, nous serons en mesure de modéliser de manière exhaustive et holistique le processus de production de yaourt. BPMN nous a permis de

visualiser les processus métiers spécifiques, SADT nous a aidés à comprendre les interactions fonctionnelles générales, et maintenant l'AMDEC nous guidera dans l'identification proactive des risques et des défaillances, renforçant ainsi la robustesse et la fiabilité de notre processus de production.

Après une séance de brainstorming sur la mise en place de l'AMDEC, Madame Nathalie Julien a eu l'idée d'intégrer la méthode des 5M (Milieu, Matériel, Main-d'œuvre, Matière première, Méthode) avec l'AMDEC, en y ajoutant trois autres éléments : Management, Mesures, et Moyens financiers. Cette nouvelle approche, appelée la méthode des 8M, nous permettra de classer les différents types de dysfonctionnements présents dans notre ligne de production de yaourt.

Pour l'aspect quantitatif de cette analyse, en plus de la fréquence et de la détection, nous prendrons en compte la gravité, qui sera divisée en deux parties : la gravité par rapport à la qualité du produit et la gravité par rapport au processus / équipement pour chaque défaillance. Cela nous donnera ainsi deux criticités : criticité qualité produit et criticité processus ou équipement qui seront calculés ainsi :

- **Criticité Q.Produit = Gravité Q.Produit x Fréquence x Détection.**

- **Criticité Processus = Gravité Processus x Fréquence x Détection.**

Un autre élément crucial de notre analyse sera l'indice d'évaluation de la sécurité. Cet indice a une importance considérable car il nous permet d'évaluer l'impact potentiel de chaque défaillance sur la sécurité des opérateurs, des consommateurs et de l'environnement. Il nous aide à prioriser les actions correctives en fonction des risques de sécurité identifiés.

L'échelle de gravité mentionnée va de 1 à 4, du moins grave au plus grave. En tenant compte de ces différents indices, nous pourrions ainsi améliorer la fiabilité et la sécurité de notre ligne de production, en réduisant au maximum les risques de dysfonctionnement.

Selon cette description, le tableau se présentera comme suit :

Classes d'aléas	Définition de l'aléa	Fréquence	Gravité de qualité de produit	Gravité process	Sécurité	Détection	Criticité Produit = F * Gqp * D	Criticité Equipement = F * Gp * D
Matériel								
Matière								
Main d'œuvre								
Milieu								
Méthode								
Management								
Mesure								
Moyens financiers								

F = Fréquence = {1 = Rare, 2 = Régulier, 3 = Fréquent, 4 = Systématique}

Gravité Process = {1 = Aucun, 2 = Degrade, 3 = Arrêt temporaire, 4 = Arrêt prolongé}

Gravité Q produit = {1 = Aucun impact, 2 = Facilement rattrapable, 3 = Rattrapable, 4 = Rebut}

Détection = {1 = Automatique, 2 = Capteur, 3 = Contrôle humain, 4 = Aucun}

Sécurité = {1 = Aucun, 2 = Incident - Presqu'accident, 3 = Risque blessure, 4 = Risque mort}

Figure 3.33: Représentation du tableau pour l'AMDEC

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) que nous avons réalisée sur la ligne de production de yaourt de la fromagerie bio nous permet de cibler et de prioriser les risques potentiels liés aux défaillances comme illustré dans la figure . Cette analyse couvre plusieurs classes d'aléas : Matériel, Matière, Main d'œuvre, Milieu, Méthode, Management, et Mesure. Pour chaque classe, des défaillances spécifiques ont été identifiées, et leurs causes, effets et indices de criticité ont été évalués.

Classes d'aléas	Déf de l'aléa	Les causes	Les effets	Gravité produit	Gravité process	Fréquence	Détection	Sécurité	Criticité produit	Criticité process	Actions correctives
Matériel	Pannes de machines	• Maintenance insuffisante • Utilisation intensive	Arrêts de production, Coûts élevés de réparation	1	4	2	1	1	2	8	Mettre en place un programme de maintenance préventive régulier.
	Mauvais calibrage	• Erreur humaine • Absence de procédures	Inexactitude des quantités d'ingrédients, Augmentation des rebuts et des	3	3	1	2	1	6	6	Établir des procédures documentées pour la calibration régulière des équipements de mesure.
Matière	Mauvaise qualité	• Absence de contrôle qualité • Fournisseurs non fiables	Yaourts de mauvaise qualité, Risques de contamination alimentaire	4	3	2	3	2	24	18	Mettre en place des procédures d'inspection à réception pour s'assurer de la qualité des matières
	Fourniture irrégulière	• Problèmes logistiques • Contrats mal négociés	Interruptions de la production, Risques de rupture de stock	1	3	3	1	1	3	9	Diversifier les sources d'approvisionnement pour réduire le risque de rupture de stock.
Main d'oeuvre	Erreur humaine	• Stress ou fatigue excessive • Procédures complexes	Non-conformité des produits, Accidents et blessures, Réduction de l'efficacité globale	2	2	3	1	3	6	6	Mettre en place des check-lists et des procédures standardisées pour réduire les erreurs humaines.
	Manque de personnel	• Absences non planifiées • Mauvaises conditions de travail	Surcharge de travail pour le personnel existant, Retards dans la production et la livraison	1	2	1	3	2	3	6	Automatiser les tâches répétitives lorsque cela est possible pour soulager la pression sur le personnel
Milieu	Manque d'hygiène	• Manque de formation du personnel • Fréquence de nettoyage insuffisante	Contamination du produit final, Image de marque ternie et perte de confiance des clients	4	3	1	1	2	4	3	Renforcer les programmes de nettoyage et de désinfection avec des produits appropriés.
	Température inappropriée	• Système de chauffage/climatisation défaillant • Mauvaise isolation des locaux	Détérioration de la qualité du yaourt, Problèmes de fermentation et de croissance des	4	3	1	1	2	4	3	Installer des systèmes de surveillance et de contrôle automatiques de la température.
Méthode	Procédures non suivies	• Documentation des procédures insuffisante • Manque de formation sur les protocoles	Variabilité dans la qualité du produit final, Non-conformité aux normes de qualité et de sécurité	3	1	1	3	2	9	3	Renforcer la formation et la supervision pour s'assurer que toutes les procédures sont suivies de
	Manque de documentation	• Mauvaise gestion de la documentation • Personnel non formé à faire de la documentation	Difficulté à identifier les causes des problèmes et à mettre en place des actions correctives	2	1	1	3	1	6	3	Mettre à jour et maintenir des manuels opérationnels détaillés et accessibles.
Management	Problème de communication	• Absence de réunions régulières • Structures de communication complexes	erreurs et des retards, Mauvaise coordination entre les équipes, Informations critiques non partagées	1	1	1	1	1	1	1	Établir des canaux de communication clairs et efficaces à tous les niveaux de l'organisation.
	Mauvaise planification	• Prévisions de production inexactes • Absence de coordination entre les départements	Goulots d'étranglement et surproduction, entraînant des pertes de temps et de	1	2	1	1	2	1	2	Implémenter des outils de planification avancés pour une meilleure gestion
Mesure	Contrôle qualité insuffisant	• Manque d'équipements de contrôle • Ressources humaines insuffisantes	lots de produits défectueux, Non-conformité aux standards de qualité	4	1	1	3	2	12	3	Réviser et renforcer les procédures de contrôle qualité à toutes les étapes de la production.
	Analyse incorrecte	• Erreurs dans l'interprétation des résultats • Équipement d'analyse défectueux ou inadapté	Risques de non-conformité des produits, Mauvaises décisions basées sur des données	3	1	1	2	1	6	2	Mettre en place des processus robustes pour la collecte, l'analyse et l'interprétation des données.
Moyens financiers	Budget insuffisant	• Mauvaise gestion financière de l'entreprise • Coûts imprévus absorbant le budget initial	Difficulté à maintenir une production de haute qualité	1	3	1	1	1	1	3	Élaborer des budgets plus réalistes en tenant compte des besoins en investissements à long terme.

Figure 3.34: L'AMDEC réalisée pour la ligne de production de yaourt

Pour le matériel, nous avons identifié des pannes de machines dues à une maintenance insuffisante et à une utilisation intensive, ainsi qu'un mauvais calibrage causé par des erreurs humaines et l'absence de procédures documentées. Concernant la matière, la mauvaise qualité des matières premières est souvent due à des fournisseurs non fiables et à l'absence de contrôle qualité, tandis que les fournitures irrégulières sont causées par des problèmes logistiques et des contrats mal négociés. En ce qui concerne la main-d'œuvre, les erreurs humaines dues à un stress excessif et à des procédures complexes, ainsi que le manque de personnel et d'hygiène, influencent directement la productivité et la qualité.

Dans le milieu de production, une température inappropriée causée par un système de chauffage/climatisation défaillant et un manque d'hygiène dû à une fréquence de nettoyage insuffisante ont été identifiés comme des risques. Pour les méthodes de travail, des procédures non suivies et un manque de documentation entraînent une non-conformité aux normes de qualité et de sécurité. Du côté du management, des problèmes de communication interne et une mauvaise planification, ainsi que l'absence de coordination entre les départements, ont été notés. Concernant les mesures, un contrôle qualité insuffisant et une analyse incorrecte des données influencent directement la conformité des produits. Enfin, le budget insuffisant affecte les capacités d'investissement dans les équipements et la maintenance.

L'indice de sécurité, avec une échelle de gravité de 1 à 4 (1 étant le moins grave et 4 le plus grave), est crucial pour évaluer l'impact potentiel de chaque défaillance sur la sécurité des opérateurs, des consommateurs et de l'environnement. Les indices de criticité sont calculés en tenant compte de la gravité du produit et du processus, de la fréquence d'occurrence, de la capacité de détection, et de l'impact sur la sécurité. Par exemple, la mauvaise qualité des matières a un indice de criticité produit de 24, indiquant un impact élevé sur la qualité du yaourt et la sécurité alimentaire, tandis que le manque d'hygiène a un indice de criticité produit de 4 et un indice de criticité process de 3, soulignant l'importance de maintenir des standards d'hygiène stricts.

Les actions correctives proposées visent à réduire les risques identifiés. Pour le matériel, il est suggéré de mettre en place un programme de maintenance préventive régulier. Pour la matière, il est recommandé de diversifier les sources d'approvisionnement. En ce qui concerne la main-d'œuvre, l'automatisation des tâches répétitives est suggérée pour réduire le stress et les erreurs humaines. Dans le milieu de production, il est conseillé de renforcer les programmes de nettoyage et de désinfection. Pour les méthodes de travail, il est recommandé de mettre à jour et de maintenir des manuels opérationnels détaillés et accessibles. En termes de management, il est essentiel d'établir des canaux de communication clairs et efficaces. Concernant les mesures, il est nécessaire de réviser et de renforcer les procédures de contrôle qualité. Enfin, pour les moyens financiers, il est crucial d'élaborer des budgets plus réalistes en tenant compte des besoins en investissements.

En conclusion, cette analyse AMDEC nous permet d'identifier et de prioriser les défaillances potentielles sur la ligne de production de yaourt. En mettant en œuvre les actions correctives proposées,

nous améliorerons la fiabilité et la sécurité de notre production, assurant ainsi une meilleure qualité du produit final et une protection optimale des opérateurs, des consommateurs et de l'environnement.

3.5 L'intégration de l'ergonomie au jumeau numérique :

L'intégration de l'ergonomie dans la technologie des jumeaux numériques représente une avancée cruciale dans le domaine de l'ingénierie et de la conception virtuelle. Alors que les jumeaux numériques évoluent pour devenir des représentations de plus en plus fidèles de systèmes complexes, il devient essentiel de comprendre et d'intégrer l'aspect humain dans leur conception et leur utilisation. Cette démarche vise à optimiser les interactions entre les utilisateurs et les modèles virtuels, en tenant compte des besoins ergonomiques spécifiques pour améliorer l'efficacité, la sécurité et la convivialité des systèmes technologiques. Une étude approfondie de l'ergonomie dans le contexte des jumeaux numériques offre donc une perspective critique pour développer des solutions innovantes qui répondent aux exigences humaines tout en exploitant pleinement le potentiel des technologies numériques avancées.

L'intégration de l'ergonomie dans la technologie des jumeaux numériques, comme le projet TERRA le démontre clairement, représente bien plus qu'une simple nécessité technique : c'est une philosophie fondamentale. Terra se concentre sur la modélisation et la conception d'un jumeau numérique logistique au sein d'une fromagerie bio, où chaque décision technique est imprégnée d'une compréhension profonde des interactions humaines. Leur objectif est de placer l'aspect humain au cœur de cette implémentation technologique, accordant ainsi aux opérateurs et aux utilisateurs un rôle crucial dans l'optimisation et la validation des modèles virtuels. En mettant l'accent sur l'ergonomie, TERRA vise à créer des environnements numériques non seulement efficaces sur le plan technique, mais également intuitifs et sécurisés pour ceux qui les utilisent au quotidien. Cette approche enrichit la conception des jumeaux numériques en les rendant plus réactifs aux besoins humains et en garantissant une adoption plus fluide et plus efficace des technologies numériques avancées.

3.5.1 Définition de l'ergonomie :

L'ergonomie tire son origine des mots grecs "ergon" (travail) et "nomos" (loi), et se définit comme une discipline scientifique étudiant l'activité humaine, notamment le travail, sous tous ses aspects. [45]

Cette discipline évolue en fonction des conditions de travail, de la conception des outils et des avancées scientifiques. Multidisciplinaire et enrichie par les progrès techniques et les sciences cognitives, l'ergonomie vise à améliorer le bien-être humain. En favorisant une meilleure adaptation des environnements de travail aux capacités et aux besoins des individus, les ergonomes contribuent ainsi à accroître la performance globale des systèmes et des entreprises. [45]

3.5.2 La démarche de conception ergonomique :

Barcellini, Van Belleghem et Daniellou [6] soulignent que l'efficacité de l'intervention des ergonomes dans les projets de conception repose à la fois sur leur capacité à enrichir la prise de décision avec des données sur l'activité et sur leur aptitude à créer les conditions favorables au développement de l'activité des concepteurs. Ces chercheurs ont développé un modèle illustrant les différentes phases de l'intervention ergonomique [15]

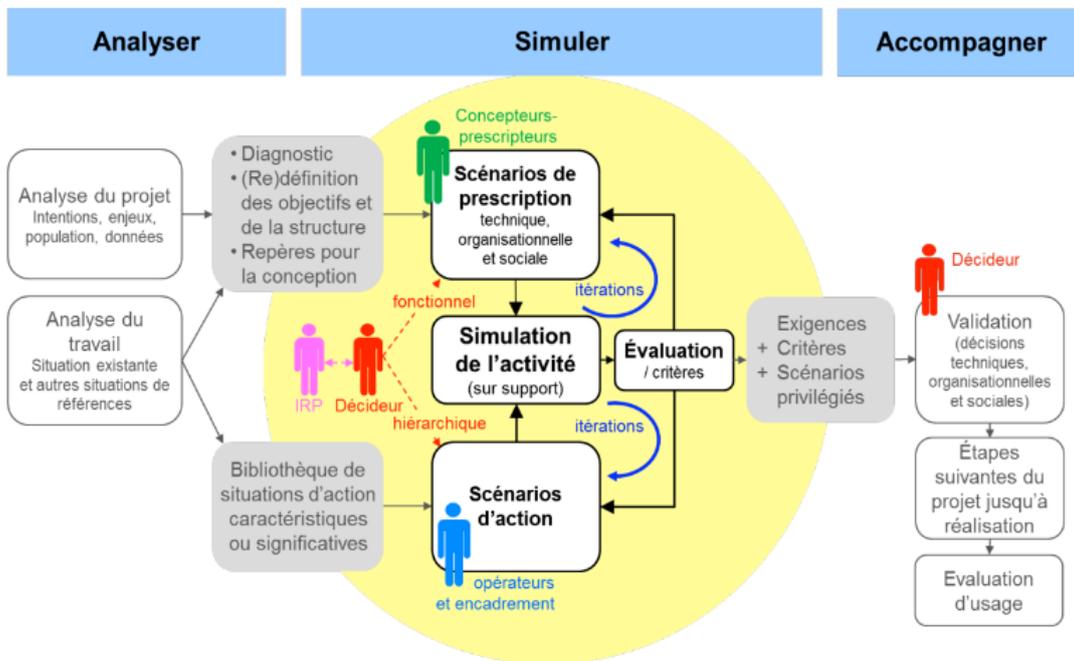


Figure 3.35: Démarche de conduite de projet proposée par l'ergonomie de l'activité [6]

- **Analyser : construire des connaissances sur le projet et le travail réel**

1. **Analyse du projet :**

- **Objectifs et Enjeux** : Se concentre sur les intentions initiales et les enjeux du projet, qu'ils soient économiques, liés à la production ou aux conditions de travail. Ces enjeux peuvent être explicites (clairement définis) ou implicites (non clairement exprimés).
- **Structure du projet** : Examine comment la maîtrise d'ouvrage (les décideurs) et la maîtrise d'œuvre (les concepteurs) collaborent pour rechercher des solutions.
- **Population concernée** : Identifie les personnes qui seront affectées par les futures situations de travail et collecte des données sur la santé et la performance du système. Cette analyse permet de poser un diagnostic pour les décideurs et aide à structurer et redéfinir les objectifs du projet.

2. **Analyse du travail :**

- **Production de connaissances** : Première étape de la gestion du projet, vise à produire des connaissances sur le travail réel. Ces connaissances sont essentielles pour informer les choix du projet et guider l'ensemble de la démarche.
- **Applications** : S'applique à toute situation de travail pertinente, actuelle ou future, pour enrichir le projet et produire des connaissances nécessaires à la suite de la démarche.
- **Formalisation des connaissances** :
 - Pour les décideurs : Fournir des informations pour potentiellement ajuster les objectifs du projet.
 - Pour les concepteurs-prescripteurs : Offrir des repères pour élaborer les premières solutions de conception, sous forme de scénarios de prescription.
 - Pour l'ergonome : Construire des bibliothèques de situations d'action caractéristiques qui illustrent la variabilité des conditions de travail, facilitant l'élaboration de scénarios d'action à tester lors des simulations.

- **Simuler : évaluer et enrichir les propositions des concepteurs**

1. **Scénarios de prescription** : Concepteurs-prescripteurs élaborent des scénarios techniques, organisationnels et sociaux qui seront testés dans la phase de simulation.

2. **Simulation de l'activité** :

- Support de simulation : Utilise des prototypes ou des modèles réduits pour simuler l'activité future. Les opérateurs et le personnel encadrant jouent des scénarios d'action pour évaluer la faisabilité des propositions.
- Évaluation et itérations : Les résultats de ces simulations sont évalués pour affiner les scénarios et les critères, permettant des itérations entre les simulations et les ajustements nécessaires.

- **Accompagner : "transformer l'essai" de la simulation**

- 1. Validation :**

- **Décideurs** : Prennent des décisions sur les choix techniques, organisationnels et sociaux en se basant sur les scénarios privilégiés et les critères évalués lors des simulations.
- **Mise en œuvre** : Les scénarios validés sont ensuite déployés dans les étapes suivantes du projet, avec une évaluation continue de leur usage pour garantir l'adéquation avec les objectifs initiaux et les besoins réels des utilisateurs.

Ce schéma illustre comment l'analyse ergonomique et la simulation de l'activité jouent un rôle central dans la conception de solutions pratiques et efficaces, tout en intégrant les retours des utilisateurs et des décideurs pour assurer le succès du projet.

3.5.3 Étapes de conception génériques pour le jumeau numérique intégrant l'ergonomie dès le départ:

L'approche générique de développement de jumeaux numériques est basée sur l'approche 5C présentée précédemment. Nous la faisons évoluer avec deux objectifs en tête : avoir une structure de projet claire qui favorise le dialogue entre le décideur, le concepteur et l'ergonome, et proposer une approche qui encourage la conception d'un outil permettant le développement de l'activité des futurs utilisateurs. Pour y parvenir, on va ajouter une phase d'analyse du projet et enrichir les phases de configuration et de cognition par l'analyse des activités et des besoins [15]. Les contributions à ce modèle sont détaillées dans la figure 3.36

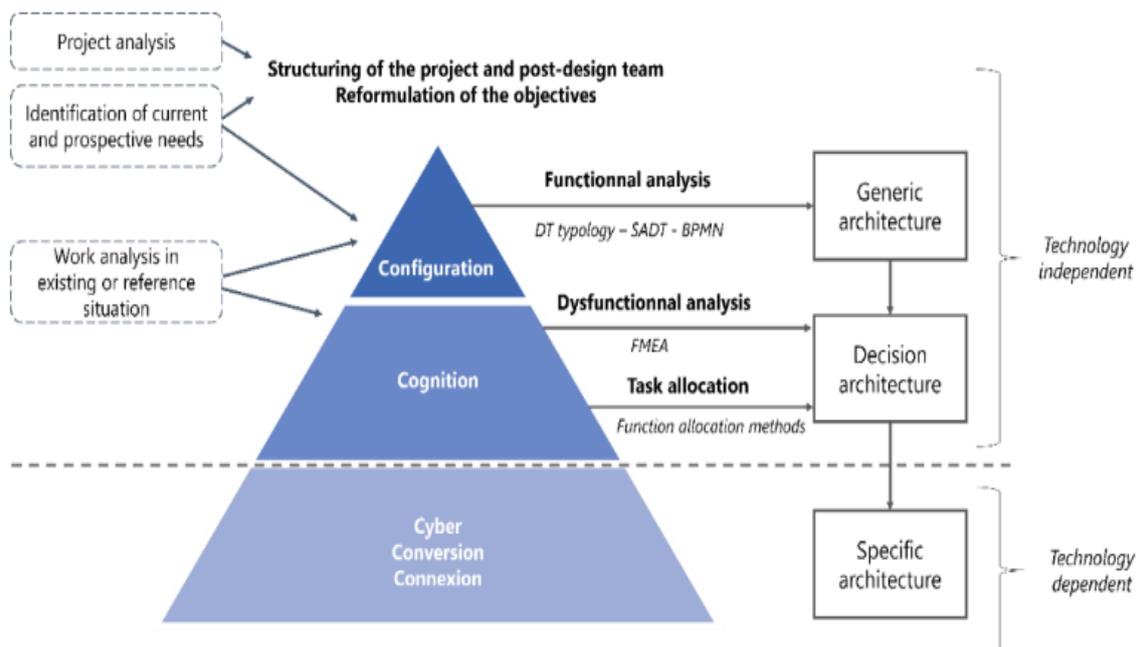


Figure 3.36: Méthodologie de déploiement basée sur l'architecture 5C CPS et incluant une approche ergonomique[15]

Les projets de développement de jumeaux numériques doivent surmonter les mêmes pièges que tout autre projet, tout en faisant face à des défis spécifiques comme l'accès aux données et la durabilité des outils. Une structure de projet robuste est essentielle dès le départ. L'accès aux données repose sur des contraintes techniques (capteurs), économiques (investissement dans de nouveaux équipements) et légales (propriété des données et des connecteurs). Un autre enjeu majeur est l'exploitation du jumeau numérique, c'est-à-dire sa gestion après le développement, ce qui est crucial pour assurer sa continuité et sa résilience, comme souligné par la "Structuration du projet et de l'équipe post-conception" et la "Reformulation des objectifs" qui seront fait par une analyse de projet et l'identification des besoins actuels et futurs.

Le schéma illustre également les différentes phases du développement, notamment la "Configuration" et la "Cognition". Durant la phase de configuration, une analyse fonctionnelle est effectuée pour définir une architecture générique, en utilisant des outils standardisés tels que SADT et BPMN. La phase de cognition, quant à elle, se concentre sur l'allocation des tâches et l'analyse des dysfonctionnements potentiels, en appliquant des méthodes reconnues comme l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité).

L'ergonome joue un rôle clé dans l'identification des besoins prospectifs et l'analyse des situations de travail actuelles ou de référence. Dans le projet TERRA, l'ergonome a analysé l'historique du projet et le contexte des partenaires, ce qui a amélioré la communication entre les membres du projet et a permis une meilleure prise en compte des souhaits et des craintes des partenaires. Cette analyse a facilité la définition des exigences et des critères de conception, alignant ainsi le développement du DT avec les besoins réels des utilisateurs.

En résumé, le schéma et le texte soulignent l'importance d'une structure de projet bien définie dès le départ, intégrant les contributions de l'ergonome pour assurer une conception et une exploitation efficaces du jumeau numérique.

3.6 Conclusion :

En conclusion, notre exploration détaillée de la ligne de production de yaourt à travers les lentilles de BPMN, SADT et AMDEC a révélé une compréhension approfondie de ses processus fonctionnels et dysfonctionnels. À travers BPMN, nous avons pu cartographier avec précision les flux et interactions, offrant une vision claire des opérations quotidiennes. L'analyse SADT a permis une étude approfondie des fonctions principales et des relations entre les parties prenantes, soulignant les dynamiques opérationnelles essentielles.

L'AMDEC a joué un rôle crucial en identifiant les risques potentiels et en proposant des mesures préventives pour renforcer la fiabilité et la sécurité de la ligne de production. En parallèle, l'intégration de l'ergonomie au sein du projet Terra a illustré l'importance de l'interaction harmonieuse entre l'homme, les équipements et les processus, visant à améliorer à la fois la productivité et le bien-être des opérateurs.

Enfin, cette approche méthodique et exhaustive nous a permis de mettre en lumière les forces à capitaliser, les faiblesses à corriger et les opportunités d'amélioration à explorer pour optimiser davantage cette chaîne de production de yaourt. En intégrant ces perspectives, nous sommes mieux équipés pour préparer le terrain vers une performance opérationnelle optimale et durable.

Conclusion générale

Ce mémoire a exploré en profondeur l'application du jumeau numérique dans le cadre du projet TERRA, focalisé sur les circuits courts alimentaires et spécifiquement adapté à une fromagerie bio. À travers trois chapitres distincts, nous avons abordé les fondements théoriques du jumeau numérique, exploré les outils de modélisation clés tels que BPMN, SADT et l'AMDEC, et mené une étude de cas détaillée sur une ligne de production de yaourt.

Le premier chapitre a posé les bases en décrivant l'évolution et les diverses applications de l'industrie 4.0, mettant en lumière le rôle central du jumeau numérique comme levier de transformation digitale. Nous avons examiné sa définition variée, de simples modèles virtuels à des entités autonomes complexes, tout en soulignant son potentiel pour optimiser les performances et promouvoir l'innovation.

Le deuxième chapitre a ensuite approfondi l'utilisation de BPMN, SADT et l'AMDEC dans le cadre du projet TERRA. Ces outils de modélisation ont été cruciaux pour structurer et analyser les processus de fabrication de la fromagerie bio, en identifiant les forces à renforcer et les risques à anticiper. Ils ont permis de poser les fondations d'un jumeau numérique robuste, adapté aux besoins spécifiques de l'industrie agroalimentaire.

Enfin, le troisième chapitre a réalisé une analyse approfondie de la ligne de production de yaourt, en utilisant les méthodologies précédemment introduites. À travers BPMN, nous avons cartographié les flux opérationnels, tandis que l'analyse SADT a examiné les fonctions principales et les dynamiques opérationnelles. L'AMDEC a joué un rôle crucial en identifiant les risques potentiels. De plus, l'intégration de l'ergonomie a souligné l'importance de l'interaction harmonieuse entre les opérateurs humains, les équipements et les processus.

En conclusion, ce mémoire démontre comment le jumeau numérique peut révolutionner les pratiques industrielles dans les circuits courts alimentaires. En combinant une approche méthodologique rigoureuse avec une vision prospective, le projet TERRA s'affirme comme un exemple de réussite dans l'application des technologies avancées pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la durabilité environnementale. Il offre des perspectives prometteuses pour l'avenir de l'industrie agroalimentaire, en facilitant la transition vers des processus plus intelligents, plus sûrs et plus durables.

Bibliographie

- [1] Younes ELGHAZI Abdelkrim Ramzi YELLES CHAOUICHE. Implémentation d'un digital twin des stations commandées par automates de la mps500, 2018.
- [2] Farah ABDOUNE. Implémentation d'un digital twin des stations de la chaîne mps 500 sous flexsim, 2020.
- [3] Khadidja Abdoune. *Vers un jumeau numérique soutenable pour la surveillance et la détection robuste d'anomalies dans les systèmes de production*. PhD thesis, Nantes Université, 2023.
- [4] RM Asimov, SV Chernoshey, I Kruse, and VS Osipovich. Digital twin in the analysis of a big data. 2018.
- [5] Axelor. Qu'est-ce que la norme bpmn 2.0 ? 2024, from <https://axelor.com/fr/la-norme-bpmn/>.
- [6] Flore Barcellini, Laurent Van Belleghem, and François Daniellou. Les projets de conception comme opportunité de développements des activités. *Ergonomie constructive*, pages pp–191, 2013.
- [7] Thibaut Bidet-Mayer. *L'industrie du futur: une compétition mondiale*, volume 14. Presses des MINES, 2016.
- [8] Société Bonitasoft. Bpmn2 l'essentiel. 2024, from <https://fr.bonitasoft.com/bibliotheque/bpmn2-lessentiel>.
- [9] Beate Brenner and Vera Hummel. Digital twin as enabler for an innovative digital shopfloor management system in the esb logistics learning factory at reutlingen-university. *Procedia Manufacturing*, 9:198–205, 2017.
- [10] CEGELEM. Amdec : définition et mise en place de la méthode. 2024, from <https://www.cegelem.fr/actualites/annee-2022/amdec-definition-et-mise-en-place-de-la-methode/>.
- [11] K Dohrmann, B Gesing, and J Ward. Digital twins in logistics: a dhl perspective on the impact of digital twins on the logistics industry. *DHL Customer Solutions & Innovation, Troisdorf*, 2019.
- [12] Luiz Fernando CS Durão, Sebastian Haag, Reiner Anderl, Klaus Schützer, and Eduardo Zancul. Digital twin requirements in the context of industry 4.0. In *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018, Proceedings 15*, pages 204–214. Springer, 2018.
- [13] Tolga Erol, Arif Furkan Mendi, and Dilara Doğan. The digital twin revolution in healthcare. In *2020 4th international symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, pages 1–7. IEEE, 2020.
- [14] Université Virtuelle Environnement et Développement Durable. Analyse fonctionnelle. 2024, from [http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteK/co/K3_P.html#:~:text=Rep%C3%A8res&text=La%20m%C3%A9thode%20SADT%20\(Structured%20Analysis,la%20r%C3%A9alit%C3%A9\)%20du%20syst%C3%A8me%20r%C3%A9el](http://stockage.univ-valenciennes.fr/EcoPEM/BoiteK/co/K3_P.html#:~:text=Rep%C3%A8res&text=La%20m%C3%A9thode%20SADT%20(Structured%20Analysis,la%20r%C3%A9alit%C3%A9)%20du%20syst%C3%A8me%20r%C3%A9el).

- [15] Clément Guerin Nathalie Julien Fanny Guennoc, Naomi Kamoise. Integrating ergonomics into the early stages of digital twin design from the design of a digital twin for short-distance dairy producers to the definition of a generic and tool-based method.
- [16] Autodesk Video FR. Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ? comment les modèles de données intelligents façonnent le btp. Septembre 2021. Retrieved April 17, 2024, from <https://www.autodesk.com/fr/design-make/articles/qu-est-ce-qu-un-jumeau-numerique>.
- [17] Edward Glaessgen and David Stargel. The digital twin paradigm for future nasa and us air force vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*, page 1818, 2012.
- [18] Michael Grieves. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 1(2014):1–7, 2014.
- [19] Michael Grieves and John Vickers. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*, pages 85–113, 2017.
- [20] Mohammed Adel Hamzaoui and Nathalie Julien. A generic deployment methodology for digital twins—first building blocks. In *Handbook of Digital Twins*, pages 102–121. CRC Press.
- [21] Mohammed Adel Hamzaoui and Nathalie Julien. Social cyber-physical systems and digital twins networks: A perspective about the future digital twin ecosystems. *IFAC-PapersOnLine*, 55(8):31–36, 2022.
- [22] Mario Hermann, Tobias Pentek, and Boris Otto. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)*, pages 3928–3937. IEEE, 2016.
- [23] Plattform industrie 4.0. What is industrie 4.0? 2024, from <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>.
- [24] Jackadit. Analyse fonctionnelle interne. 2024, from <https://jackadit.com/index.php?p=ecoconception3>.
- [25] Nathalie Julien and Éric Martin. *Le jumeau numérique: de l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Dunod, 2020.
- [26] Sakdirat Kaewunruen, Panrawee Rungskunroch, and Joshua Welsh. A digital-twin evaluation of net zero energy building for existing buildings. *Sustainability*, 11(1):159, 2018.
- [27] Jay Lee, Behrad Bagheri, and Hung-An Kao. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3:18–23, 2015.
- [28] Jay Lee, Edzel Lapira, Shanhu Yang, and Ann Kao. Predictive manufacturing system-trends of next-generation production systems. *Ifac proceedings volumes*, 46(7):150–156, 2013.
- [29] Zheng Liu, Norbert Meyendorf, and Nezih Mrad. The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. In *AIP conference proceedings*, volume 1949. AIP Publishing, 2018.
- [30] Elisa Negri, Luca Fumagalli, and Marco Macchi. A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. *Procedia manufacturing*, 11:939–948, 2017.
- [31] Object Management Group (OMG). Business process model and notation (bpmn). 2013.
- [32] Colin Parris. What is the industrial internet of things (iiot) ? 2024, from <https://www.ge.com/digital/blog/what-industrial-internet-things-iiot>.
- [33] Roland Rosen, Georg Von Wichert, George Lo, and Kurt D Bettenhausen. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *Ifac-papersonline*, 48(3):567–572, 2015.

- [34] Michael Rüßmann, Markus Lorenz, Philipp Gerbert, Manuela Waldner, Jan Justus, Pascal Engel, and Michael Harnisch. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston consulting group*, 9(1):54–89, 2015.
- [35] Farid Saifutdinov, Ilya Jackson, Jurijs Tolujevs, and Tatjana Zmanovska. Digital twin as a decision support tool for airport traffic control. In *2020 61st International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS)*, pages 1–5. IEEE, 2020.
- [36] Benjamin Schleich, Nabil Anwer, Luc Mathieu, and Sandro Wartzack. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP annals*, 66(1):141–144, 2017.
- [37] Michael Schluse, Linus Atorf, and Juergen Rossmann. Experimentable digital twins for model-based systems engineering and simulation-based development. In *2017 annual ieee international systems conference (syscon)*, pages 1–8. IEEE, 2017.
- [38] Concetta Semeraro, Mario Lezoche, Hervé Panetto, and Michele Dassisti. Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130:103469, 2021.
- [39] Ehab Shahat, Chang T Hyun, and Chunho Yeom. City digital twin potentials: A review and research agenda. *Sustainability*, 13(6):3386, 2021.
- [40] JIANGPENG SHU, KAMYAB ZANDI, TANAY TOPAC, RUIQI CHEN, and CHUN FAN. Automated generation of fe model for digital twin of concrete structures from segmented 3d point cloud. *Structural Health Monitoring 2019*, 2019.
- [41] Bruce Silver and Bruce Richard. *BPMN method and style*, volume 2. Cody-Cassidy Press Aptos, 2009.
- [42] Maulshree Singh, Evert Fuenmayor, Eoin P Hinchy, Yuansong Qiao, Niall Murray, and Declan Devine. Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2):36, 2021.
- [43] Jan Smit, Stephan Kreutzer, Carolin Moeller, and Malin Carlberg. Industry 4.0. *Study for the ITRE Committee, Policy Department A: Economic and Scientific Policy, European Parliament, Brussels*, 2016.
- [44] Fei Tao, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi, Meng Zhang, He Zhang, and Fangyuan Sui. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94:3563–3576, 2018.
- [45] Usabilis. Qu'est-ce que l'ergonomie ? 2024, from <https://www.usabilis.com/qu-est-ce-que-l-ergonomie/>.
- [46] Gary White, Anna Zink, Lara Codecá, and Siobhán Clarke. A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110:103064, 2021.
- [47] Haijun Zhang, Guohui Zhang, and Qiong Yan. Dynamic resource allocation optimization for digital twin-driven smart shopfloor. In *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pages 1–5. IEEE, 2018.
- [48] Cunbo Zhuang, Jianhua Liu, and Hui Xiong. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 96:1149–1163, 2018.

Resumé

Ce mémoire explore des approches méthodologiques pour le développement de jumeaux numériques pour une fromagerie bio dans le cadre du projet TERRA. L'Industrie 4.0, caractérisée par la fusion progressive du monde physique et numérique, est au cœur de cette étude. Le jumeau numérique, une réplique virtuelle d'un processus ou d'un produit physique, permet de simuler, analyser et optimiser les opérations logistiques. Cette recherche s'attache à démontrer comment un jumeau numérique peut améliorer la traçabilité, l'efficacité et la durabilité des opérations d'une fromagerie bio. En utilisant des outils de modélisation comme BPMN, SADT et AMDEC, nous avons développé un prototype de jumeau numérique qui intègre des aspects ergonomiques pour améliorer l'interaction utilisateur et la performance globale du système.

Summary

This thesis explores methodological approaches for the development of digital twins for an organic cheese factory within the TERRA project. Industry 4.0, characterized by the gradual merging of the physical and digital worlds, is at the core of this study. The digital twin, a virtual replica of a physical process or product, allows for the simulation, analysis, and optimization of logistical operations. This research aims to demonstrate how a digital twin can improve the traceability, efficiency, and sustainability of an organic cheese factory's operations. Using modeling tools such as BPMN, SADT, and AMDEC, we have developed a digital twin prototype that integrates ergonomic aspects to enhance user interaction and the overall performance of the system.

ملخص

يستكشف هذا البحث منهجيات تطوير التوائم الرقمية لمصنع أجبان عضوي في إطار مشروع تيرا. تشكل الصناعة 4.0 التي تتميز بالاندماج التدريجي بين العوالم الفيزيائية والرقمية، جوهر هذه الدراسة. التوأم الرقمي، وهو نسخة افتراضية من عملية أو منتج مادي، يتيح المحاكاة والتحليل وتحسين العمليات اللوجستية. تركز هذه البحث على كيفية تحسين التوأم SADT و BPMN الرقمي لتتبع العمليات وكفاءتها واستدامتها في مصنع الأجبان العضوي. باستخدام أدوات النمذجة مثل AMDEC، قمنا بتطوير نموذج أولي لتوأم رقمي يدمج الجوانب المريحة لتحسين التفاعل مع المستخدم والأداء العام، للنظام.

Resumé

Ce mémoire explore des approches méthodologiques pour le développement de jumeaux numériques pour une fromagerie bio dans le cadre du projet TERRA. L'Industrie 4.0, caractérisée par la fusion progressive du monde physique et numérique, est au cœur de cette étude. Le jumeau numérique, une réplique virtuelle d'un processus ou d'un produit physique, permet de simuler, analyser et optimiser les opérations logistiques. Cette recherche s'attache à démontrer comment un jumeau numérique peut améliorer la traçabilité, l'efficacité et la durabilité des opérations d'une fromagerie bio. En utilisant des outils de modélisation comme BPMN, SADT et AMDEC, nous avons développé un prototype de jumeau numérique qui intègre des aspects ergonomiques pour améliorer l'interaction utilisateur et la performance globale du système.

Summary

This thesis explores methodological approaches for the development of digital twins for an organic cheese factory within the TERRA project. Industry 4.0, characterized by the gradual merging of the physical and digital worlds, is at the core of this study. The digital twin, a virtual replica of a physical process or product, allows for the simulation, analysis, and optimization of logistical operations. This research aims to demonstrate how a digital twin can improve the traceability, efficiency, and sustainability of an organic cheese factory's operations. Using modeling tools such as BPMN, SADT, and AMDEC, we have developed a digital twin prototype that integrates ergonomic aspects to enhance user interaction and the overall performance of the system.

ملخص

يستكشف هذا البحث منهجيات تطوير التوائم الرقمية لمصنع ألبان عضوي في إطار مشروع تيرا. تشكل الصناعة 4.0، التي تتميز بالاندماج التدريجي بين العوالم الفيزيائية والرقمية، جوهر هذه الدراسة. التوأم الرقمي، وهو نسخة افتراضية من عملية أو منتج مادي، يتيح المحاكاة والتحليل وتحسين العمليات اللوجستية. تركز هذه البحث على كيفية تحسين التوأم الرقمي لتتبع العمليات وكفاءتها واستدامتها في مصنع الألبان العضوي. باستخدام أدوات النمذجة مثل BPMN و SADT و AMDEC، قمنا بتطوير نموذج أولي لتوأم رقمي يدمج الجوانب المريحة لتحسين التفاعل مع المستخدم والأداء العام للنظام.