



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

**CENTRE UNIVERSITAIRE
D'INFORMATIQUE**

**Traçabilité et sûreté dans l'industrie
alimentaire : une solution basée sur le
Digital Twin**

Bagehri SYLLA

**Master en Systèmes et Services
Numériques**

Juin 2022

Table des matières

1	Introduction :	4
2	Définition de base :	5
2.1	Qu'est-ce que la sécurité alimentaire (Food Security) ?	5
2.2	Qu'est-ce que la sûreté alimentaire (Food Safety) ?	6
2.3	Comment est-ce qu'on définit la traçabilité ?	7
2.4	À quoi fait référence le Digital Twin ?	8
3	État de l'art :	9
3.1	Traçabilité dans l'industrie :	9
3.1.1	Technologie utilisée pour mettre en œuvre la traçabilité :	9
3.1.1.1	Technologies anciennes : de 1948 à 2003 :	9
3.1.1.2	Technologies nouvelles :	10
3.2	Traçabilité dans l'industrie : focus sur l'industrie alimentaire :	11
3.2.1	Objectif : assurer la sûreté alimentaire :	11
3.2.2	Technologie utilisée pour mettre en œuvre la traçabilité dans l'industrie alimentaire :	12
3.3	Utilisation de la technologie Digital Twin dans l'industrie alimentaire : quels sont les avantages ?	14
4	Problèmes liés à la sûreté dans l'industrie alimentaire :	15
5	Proposition d'une solution utilisant le Digital Twin pour la traçabilité dans l'industrie alimentaire :	16
6	Instanciation de la proposition pour un cas particulier : l'exemple du pot de miel :	19
7	Implémentation du cas particulier avec Microsoft Azure Digital Twins :	22
8	Résultats et impacts :	27
9	Critiques et remarques :	29
10	Conclusion et ouverture :	30
	Bibliographie	31

1 Introduction :

Dans le contexte actuel en France des problèmes de contaminations de produits alimentaires par différentes bactéries concernant les pizzas de la marque *Buitoni*, les chocolats *Kinder* du groupe *Ferrero* ou encore certains fromages du groupe *Lactalis* [1], nous observons à quel point nous sommes dans une urgence absolue en matière de sécurité alimentaire et plus particulièrement sur le point de la sécurité des aliments que nous produisons, soit la sûreté alimentaire .

Comme nous venons de le voir précédemment, nous vivons dans un monde de plus en plus frappé par des scandales sanitaires liés aux produits que nous consommons, qui malheureusement parfois font perdre la vie à des certaines personnes comme ce fut le cas avec les pizzas *Buitoni* ayant fait deux victimes en bas âge [1].

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), environ « 600 millions de personnes tomberaient malades chaque année après avoir consommé des produits alimentaires contaminés (soit près de 10% du total de la population mondiale) et parmi ce nombre, 420 000 personnes en meurent » [2]. Selon cette même institution, les maladies provenant des produits alimentaires que nous consommons représentent un frein au développement social et économique de nos sociétés, étant donné que ceci engendre un cercle vicieux dont il est souvent difficile de s'en sortir.

Ainsi, par rapport à tous ces problèmes rencontrés, les consommateurs sont de plus en plus soucieux de connaître la provenance des produits alimentaires qu'ils consomment ainsi que leur parcours de leur production à leur consommation : ceci est appelé la sûreté alimentaire (Food Safety en Anglais), qui représente un des points de la sécurité alimentaire. La sûreté alimentaire étant un concept intéressant - de plus en plus de personnes, de nombreuses techniques ont été développées au fil des années afin de permettre aux consommateurs d'avoir plus de transparence dans la provenance des produits qu'ils consomment et le plus souvent ceci s'est traduit à travers des solutions digitales [3].

Une des façons d'avoir une traçabilité plus complète des produits alimentaires est donc l'usage de technologies numériques, permettant d'avoir des informations très précises sur les produits. Mais comme nous venons de le voir précédemment, ceci n'est pas fiable à 100% et des problèmes peuvent parfois survenir. Une des technologies récentes de plus en plus utilisées en industrie pour la traçabilité des produits alimentaires est le Digital Twin. Officiellement apparue en 2011, cette solution se place comme étant un des moyens les plus efficaces pour assurer une bonne traçabilité en matière de produits.

À travers ce travail, nous allons donc répondre à la question suivante :

« Comment le Digital Twin peut améliorer la traçabilité de la sûreté alimentaire ? »

Pour répondre à ce questionnement, nous allons dans un premier temps définir ce qu'est la sécurité alimentaire (appelé plus communément en anglais « Food Security ») et la sûreté alimentaire (désignée par le terme « Food Safety ») en présentant la différence qu'il existe entre ces deux concepts. Ensuite, nous allons présenter la notion de traçabilité ainsi que la technologie Digital Twin. Nous poursuivrons par la partie État de l'Art pour présenter la traçabilité dans l'industrie en y joignant un focus sur l'industrie alimentaire. Ainsi, nous parlerons ensuite des avantages de l'utilisation de la technologie Digital Twin spécifique à l'alimentation. Par la suite, nous continuerons à présenter les problèmes liés à la sûreté dans l'industrie alimentaire en argumentant par une proposition de solution basée sur la technologie Digital Twin. Nous proposerons une instanciation de la solution mise

en avant pour un cas particulier en distinguant les technologies utilisées pour l'implémentation de notre aboutissement avant de montrer les résultats. Pour finir, nous allons faire quelques remarques et critiques par rapport à ce qui vient d'être vu avant de conclure.

2 Définition de base :

2.1 Qu'est-ce que la sécurité alimentaire (Food Security) ?

Le concept de sécurité alimentaire est présenté à travers plusieurs définitions qui ont évolué au cours du temps. Cependant, la définition la plus populaire est celle du Comité de la Sécurité Alimentaire Mondiale¹ adoptée par un consensus international, qui date de la conférence mondiale de l'alimentation de 1996 à Rome. Celle-ci stipule qu'il y a **sécurité alimentaire** « *lorsque tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive pour mener une vie saine et active* » [4].

Ce concept, pour être totalement respecté, doit être réalisé « *tout au long de l'année, en respectant les préférences culturelles des individus* » [5]. Plus simplement, il s'agit de la « *situation qui garantit à tout moment à une population, l'accès à une nourriture à la fois sur le plan qualitatif et quantitatif. Elle doit être suffisante pour assurer une vie saine et active, compte tenu des habitudes alimentaires* » [6].

La sécurité alimentaire existe selon 4 dimensions principales ou autrement dit piliers [7] [8] [9] qui sont :

1. L'**Accès**, faisant référence à l'aptitude des personnes à pouvoir posséder un accès physique (droits d'accès, infrastructure), économique (pouvoir d'achat) et social à des aliments pour un régime alimentaire nourrissant.
2. La **Disponibilité**, renvoie à la capacité à pouvoir avoir une quantité suffisante et de qualité appropriée d'aliments sur tout le territoire. Cette disponibilité doit provenir de la production antérieure, de stocks, de surface cultivable, etc.
3. La **Qualité**, désignant la compétence à respecter une qualité sanitaire et nutritionnelle des aliments, de l'eau et des régimes alimentaires. On doit également s'assurer à travers ce pilier que la consommation de ces aliments n'aura aucun effet néfaste sur la santé (infrastructure sanitaire).
4. La **Stabilité**, pointant l'habilité de pouvoir assurer la stabilité de l'accès à la nourriture (infrastructures, conditions climatiques, conditions politique). Ce dernier ne devrait pas être mis en cause par une quelconque situation.

La sécurité alimentaire est un droit humain fondamental reconnu dans l'article 25 de « La déclaration universelle des droits de l'homme »² de l'ONU [10] déclarant que « *Toute personne a droit à un niveau de vie suffisant pour assurer sa santé, son bien-être et ceux de sa famille, notamment pour l'alimentation, l'habillement, le logement, les soins médicaux ainsi que pour les services sociaux*

¹ La Comité de la Sécurité Mondiale, abrégée sous le sigle CSA, est une plateforme internationale et intergouvernementale.

² « La déclaration universelle des droits de l'homme » étant adoptée par l'Assemblée Générale le 10 décembre 1948 à Paris au palais de Chaillot, constitue les droits fondamentaux de l'homme.

nécessaires; ». Il est donc indispensable d'assurer la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale pour tendre à une cohésion sociale, un bien-être collectif et améliorer la santé de la population mondiale [11]. Ceci semble également fondamental pour garantir la stabilité économique et politique des nations étant donné qu'une insécurité alimentaire peut amener différents problèmes comme des guerres ou des maladies.

Aujourd'hui, les ressources alimentaires mondiales sont suffisantes pour nourrir tout le monde [11], mais malgré ce constat il y a tout de même des problèmes qui persistent. En effet, selon l'ONU, aujourd'hui, 1 personne sur 9 souffre de sous-alimentation (soit à peu près 815 millions de personnes) et ce chiffre ne fait qu'augmenter car les prévisions de 2050 montrent qu'il faudra à ce moment-là, nourrir près de 9 milliards de personnes [12]. Tous ces éléments permettent de mettre en évidence à quel point la question de la sécurité alimentaire est actuellement cruciale et pourquoi nous devons la prendre au sérieux.

La sécurité alimentaire concerne des produits de base utilisés dans un pays pour la fabrication de la nourriture traditionnelle locale globale. Pour prendre l'exemple de pays africain ou asiatique, une grande partie de la nourriture traditionnelle de ces pays est composée à base de riz. On considèrera donc qu'il y aura sécurité alimentaire à partir du moment où l'on s'assurera qu'il y aura suffisamment de quantité de riz de bonne qualité pouvant couvrir les besoins locaux (en plus des autres produits de base). On peut malheureusement constater que dans certains endroits du monde, il peut parfois y avoir des situations d'insécurité alimentaire survenant à cause de différentes problématiques souvent complexes. Pour ne citer que quelques causes de l'insécurité alimentaire, il y a par exemple : l'appauvrissement des sols, les pénuries d'eau, la pollution, le changement climatique, l'explosion démographique, les crises économiques et décisions politiques, la pauvreté, un faible niveau d'éducation, des ressources financières limitées, la distribution inadéquate des aliments et bien plus encore [5] [12] [13].

Après avoir présenté la sécurité alimentaire dans son ensemble et les enjeux en découlant, nous allons nous focaliser dans la partie suivante sur une des composantes principales de la sécurité alimentaire étant la sûreté alimentaire.

2.2 Qu'est-ce que la sûreté alimentaire (Food Safety) ?

Il existe une différence entre la « sécurité alimentaire » (Food Security) et la « sûreté alimentaire » (Food Safety) celle-ci également appelée « hygiène alimentaire » ou encore « sécurité sanitaire » des aliments. La sûreté alimentaire est une composante de la sécurité alimentaire faisant référence à la dimension « qualité » de cette dernière [14].

Par conséquent, on définit la sûreté alimentaire comme étant « *la garantie de l'innocuité des produits alimentaires, c'est-à-dire que leur consommation n'aura pas de conséquences néfastes sur la santé* » [6]. La sûreté alimentaire joue alors un rôle essentiel pour s'assurer que « *les aliments soient sains à tous les stades de la chaîne alimentaire, de la production à la récolte, en passant par la transformation, le stockage, la distribution, la préparation et la consommation* » [15] [16].

Comme dit précédemment, par rapport aux quatre dimensions de la sécurité alimentaire présentées précédemment, la sûreté alimentaire fait référence au pilier de « qualité » qui a pour vocation à assurer une qualité sanitaire suffisante pour assurer la consommation des aliments sans danger pour notre santé. Dans le cadre de ce rapport, c'est spécifiquement sur la sûreté alimentaire, composante de la sécurité alimentaire que nous allons nous focaliser.

Pour garantir que la sûreté alimentaire est bien effectuée, on utilise la traçabilité qui peut être mise en place à travers différentes façons, notamment en faisant usage de la technologie. Nous allons ainsi présenter plus précisément le concept de la traçabilité dans la partie suivante.

2.3 Comment est-ce qu'on définit la traçabilité ?

La définition générale de la traçabilité est définie selon la norme ISO 8402 de 1994 définissant la traçabilité comme étant « *l'aptitude à retrouver l'historique, l'utilisation ou la localisation d'une entité au moyen d'identifications enregistrées* » [17] [18].

Selon le domaine d'activité, la définition de la traçabilité peut être caractérisée de manière spécifique, plus particulièrement dans l'industrie alimentaire, on la définit comme « *la capacité à pouvoir suivre un aliment, un animal ou une substance productrice d'aliments à travers toutes les étapes de production et de distribution* » [19]. Dans le domaine des technologies de l'information, la traçabilité « *peut être utilisée pour répertorier toutes les activités sur un système en cours d'exécution* » [19].

On met en place la traçabilité pour « *donner pour un produit ou un service un état aussi précis que possible dans lequel il se trouvait à un instant donné de son existence au moyen d'une identification enregistrée* » [20]. De nos jours, cette traçabilité se veut être essentielle pour assurer la sûreté alimentaire. Il est important pour un consommateur de « *connaître l'origine des produits alimentaires qu'il s'apprête à acheter et à consommer* » [21].

Lorsqu'on se focalise dans le domaine alimentaire, on peut voir apparaître différents types de traçabilité :

- **La Traçabilité logistique** - également appelée « traçabilité descendante » ou « tracking » - qui fait référence à la capacité de pouvoir « *suivre le parcours d'un produit de sa fabrication à sa consommation* » [22]. On peut à travers ce type de traçabilité avoir des « *informations quantitatives relatives à la location d'un produit, ses origines et ses destinations* » [23]. Comme ce type de traçabilité permet aux entreprises de savoir l'emplacement exact d'un produit, ceci les facilite lorsqu'un rappel de produit est nécessaire lorsqu'une non-conformité est détectée dans le processus. De plus, ce type de traçabilité est celui qui est utilisé lors des achats en ligne nous permettant de « *connaître toutes les étapes suivies par un produit jusqu'à son lieu de destination finale* » [24].
- **La Traçabilité produit** - aussi nommée traçabilité ascendante ou tracing - qui fait référence à la capacité « *d'identifier les origines d'un produit* », c'est-à-dire à « *remonter d'un produit fini vers les matières premières utilisées pour sa production* » [25]. On peut à travers ce type de traçabilité « *explorer les étapes que le produit a traversées depuis sa transformation jusqu'à sa livraison finale* » [24]. Ce type permettant de reconstituer le parcours des produits de manière qualitative est celui qui est utilisé lorsqu'on est à la « *recherche de problème de qualité* » [26].
- **La Traçabilité en amont** qui fait référence à « *l'ensemble des procédures et des outils mis en place avant qu'un acteur prenne part à la chaîne de production* » [27]. Elle permet également « *d'identifier tous les fournisseurs et les matières premières* » [28].
- **La Traçabilité en aval** désigne la traçabilité « *représentant les procédures et les outils mis en place une fois que le produit fini est livré à un tiers* ». Celle-ci permet notamment « *d'identifier tous les clients et les produits fournis* » [27].

- **La Traçabilité interne** qui fait référence à l'ensemble des informations « *permettant de définir toutes les étapes réalisées entre la réception des matières premières et la fabrication du produit fini* » [27]. Ce type de traçabilité cherche à « *délimiter et identifier tous les mouvements et manipulations effectués pour un produit* » [24].
- **Traçabilité externe** qui fait référence à « *l'échange d'informations et de produits entre les différents maillons de la chaîne logistique* » [29]. Ce type de traçabilité inclut également « *tous les transits effectués dans différents pays* » [24].
- **La Traçabilité de la chaîne** fait référence à la possibilité de « *retracer l'historique depuis l'approvisionnement en matière première (ex : matière alimentaire) et en pièces jusqu'à la vente en passant par l'usinage, l'assemblage et la distribution* » [30]. Ceci permet notamment aux fabricants de savoir « *où est-ce que leurs produits ont été livrés* », et cela permet aux sociétés et consommateurs de connaître « *la provenance des produits* » qu'ils consomment [21].

Les deux types de traçabilité ascendante et descendante ont pour priorité toutes deux d'assurer la « *sécurité des consommateurs en détectant au plus vite les raisons d'un problème de non-conformité d'un produit* » [25]. C'est spécifiquement sur ces deux types de traçabilité que nous allons nous focaliser dans ce rapport. Parmi les différentes technologies existantes aujourd'hui pour mettre en place la traçabilité, il existe le Digital Twin. Nous allons présenter à quoi fait référence cette technologie dans la partie suivante.

2.4 [À quoi fait référence le Digital Twin ?](#)

Le Digital Twin - plus communément utilisé sous le sigle DT - peut être défini comme la représentation virtuelle d'un objet ou d'un système qui a pour but de nous communiquer des informations sur son cycle de vie [31]. Ceci est possible à travers des « *machines ou modèles informatiques qui simulent, émulent, reflètent ou dupliquent la vie de ces entités* » [32].

Une fois utilisé, le DT donne des informations précieuses sur l'entité dupliquée virtuellement, car il permet « *d'exécuter des simulations, étudier des problèmes de performance et proposer des améliorations possibles* » [33]. Cette technologie serait un des éléments clef de l'industrie 4.0 qui permettrait notamment de « *prévoir et optimiser le comportement du système de production à chaque phase du cycle de vie en temps réel* » [34] [35]. Elle peut également permettre « *d'optimiser les performances d'un système de production existant* », « *anticiper une organisation industrielle* » ou encore « *piloter les performances d'un outil de production* » [36].

En France, le CEA³ a développé en collaboration avec l'entreprise *Siemens* et l'équipementier *Guelte*, un Digital Twin intégré à une ligne de production. Ce dernier permettrait notamment de « *simuler de façon précise et réaliste la chaîne de production et d'anticiper de nombreux aléas sur l'ensemble du cycle de vie de la ligne (pannes, dérives process, gestion de crise, etc.), en intégrant les contraintes techniques et les exigences de qualité du secteur - et des sous-secteurs associés* » [37]. Ici, nous avons l'exemple du développement d'un Digital Twin pour une chaîne d'approvisionnement d'aliments biologiques. Étant un domaine où il est primordial de prouver aux consommateurs finaux l'origine des produits, cette technologie permet notamment dans ce type d'exemple de prévenir les problèmes, de connaître l'origine exacte d'un produit et tout en y fournissant des informations précises.

³ Le CEA désigne le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Pour parler plus précisément des technologies de traçabilité existante dans l'industrie, nous allons dans la partie suivante faire un historique de qui existe aujourd'hui en faisant un focus sur l'industrie alimentaire.

3 État de l'art :

3.1 Traçabilité dans l'industrie :

3.1.1 Technologie utilisée pour mettre en œuvre la traçabilité :

Plus le temps passe et plus de nouvelles technologies émergent dans le but de mettre en place la traçabilité. Nous constatons deux groupes principaux de technologie de traçabilité que nous allons appeler « *Technologies anciennes* » et « *Technologies nouvelles* » pour les différencier.

3.1.1.1 Technologies anciennes : de 1948 à 2003 :

Lorsqu'on parle de technologie ancienne, nous faisons référence aux technologies de traçabilité étant principalement apparues pendant la seconde moitié du XXe siècle et qui sont à l'heure actuelle toujours utilisées.

La technologie principale employée pour la traçabilité en industrie est la technologie RFID⁴. Celle-ci est utilisée pour récupérer des données à distance en plaçant une puce sur l'objet même. Cette technologie permet alors d'avoir accès à des informations sur le produit à une très grande vitesse, ce qui la rend particulièrement efficace [38]. En outre, les prémices de cette technologie ayant commencé à émerger pendant la seconde guerre mondiale pour un usage militaire à la base, se trouvant dans l'article scientifique « *Communications by Mean of Reflected Power* » d'Harry Stockman [39] est apparu en 1948. Cette date correspond donc à la naissance de la technologie RFID [40]. Cependant, c'est à partir des années 80 qu'on observe une utilisation commerciale de cette technologie, qui va connaître son point d'apogée dans les années 2000 [41]. Les domaines d'application de cette technologie sont vastes et variés. Pour ne citer que quelques exemples, on peut penser au domaine de la logistique, du transport, de la documentation, de l'alimentation, de l'identification et bien plus [42].

Les cartes à puce ou mentionnées aussi comme des cartes à microcircuit, que l'on peut retrouver sur une carte d'identité, une carte bancaire ou une carte SIM sont aussi utilisées dans l'industrie pour la traçabilité des produits. Cette puce contenant un circuit électrique intégré (ou encore un microprocesseur) peut contenir de l'information sur un produit [43]. Cette technologie serait sans doute apparue en 1974 par l'intermédiaire d'un français appelé Roland Moreno qui y aurait déposé le premier brevet cette même année [44]. À l'heure actuelle, les cartes à puces sont présentes sur les cartes bancaires et nous permettent notamment d'effectuer les paiements sans contact. Elle se retrouve également sur la carte SIM, les cartes de transport ou d'accès ou encore d'un simple ticket [45]. Les domaines d'application de cette technologie sont donc également vastes et variés.

⁴ RFID appelée « Radio Frequency Identification ».

Il existe aussi comme technologie de traçage dans l'industrie le code-barres pouvant être lu par une machine qui communique des informations sur un produit tout au long de son cycle de vie. Le code-barres fait référence à une technologie 1D, et a été introduit pour la première fois en 1949 par Joseph Woodland avant d'être breveté en 1952 [46]. C'est cependant le 26 juin 1974, soit plus de 20 ans après l'introduction de cette technologie qu'elle fut déployé en industrie [47]. Cette technologie, tout comme celle citée précédemment se voit être appliquée dans plusieurs domaines, tels que le transport, l'administration, l'alimentation, l'envoi postal et bien plus [48] [49].

Le QR-Code faisant référence à une technologie 2D est également utilisé en industrie pour la traçabilité des produits. Cette technologie a été créée en 1994 par Masahiro Hara [50]. L'utilisation de cette technologie se veut être très vaste : on peut penser au domaine médical avec le « *passport sanitaire* », dans le domaine de la mode, la logistique, la sécurité, la documentation, etc. Tout ce qui concerne du contenu numérique peut être représenté à travers cette technologie, ce qui la rend très célèbre.

Une autre technique de traçabilité, peu commune, mais tout de même utilisée est la traçabilité génétique. Cette dernière permet, à travers l'analyse ADN d'un produit issu du règne vivant, « *d'identifier l'origine d'un produit et de reconstituer son parcours depuis sa fabrication jusqu'à sa diffusion* » [51]. Les produits concernés par ce type de traçabilité sont par exemple les fruits, le poisson, la viande ou encore les champignons [28]. Cette technique, souvent appelée « *barcoding moléculaire* », est apparue en 2003 [52].

3.1.1.2 Technologies nouvelles :

Lorsqu'on parle de technologie nouvelle, nous faisons référence aux technologies de traçabilité moderne, c'est-à-dire étant récemment apparus, soit principalement au début de notre ère. Celles-ci jouent un rôle particulièrement important dans l'amélioration des processus de traçabilité en industrie. Aujourd'hui, l'émergence de nouvelles technologies est venue révolutionner la mise en place de la traçabilité de manière générale [53].

La technologie Blockchain, récemment créée, est de plus en plus usitée pour la traçabilité dans l'industrie. Cette technologie renvoie à un système de stockage et de transmission d'informations sans organe de contrôle qui est plus communément représenté comme une base de données protégées via des techniques cryptographiques [54] [55]. Cette innovation est apparue en 2008 dans l'article scientifique « *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system* » [56]. De plus, elle peut être utilisée dans un très large panel d'activités. Pour en citer quelques-unes, elle peut se retrouver en finance, dans le secteur médical, la logistique, la sécurité, la documentation, etc. Ces domaines d'application sont d'une très grande variété [57].

La technologie Digital Twin fait aussi parti de la liste des technologies nouvelles étant aujourd'hui utilisées pour effectuer la traçabilité dans l'industrie [58]. Même si les premiers concepts de cette innovation ont commencé à apparaître à partir de 2003 par l'intermédiaire de Michael Grieves, c'est plus particulièrement en 2011 qu'elle apparaît officiellement sous le nom de Digital Twin [59]. Concernant les domaines d'application de cette technologie, il y a par exemple le secteur de la santé, l'alimentation, la production d'énergie, l'automobile et bien plus [60].

Dans le tableau suivant, nous pouvons retrouver un récapitulatif de ce qui a été présenté précédemment :

	Nom de la technologie	Année d'apparition	Domaine d'application
Technologies anciennes	RFID (Radio Frequency Identification)	1948	Logistique, transport, documentation, alimentation, identification ...
	Code à barres	1952	Transport, administration, alimentation, envoi postal ...
	Carte à puce	1974	Transport, sécurité, téléphonie, logistique ...
	Quick Response Code (QR code)	1994	Médical, logistique, sécurité, documentation ...
	Barcoding moléculaire	2003	Tout produit issu du règne vivant (viande, poisson, fruits ...)
Technologies nouvelles	Blockchain	2008	<u>Finance, santé, logistique, sécurité, documentation ...</u>
	Digital Twin	2011	Santé, alimentation, production énergétique, automobile ...

Nous allons voir dans la partie suivante une application concrète de ces technologies dans l'industrie alimentaire, avec un exemple précis d'utilisation.

3.2 [Traçabilité dans l'industrie : focus sur l'industrie alimentaire :](#)

3.2.1 [Objectif : assurer la sûreté alimentaire :](#)

La traçabilité peut être appliquée dans plusieurs secteurs d'activité tels que l'industrie du textile, des bijoux, des produits électroniques et bien plus encore. Un des secteurs où la traçabilité a un rôle central est l'industrie alimentaire. Comme dit dans l'introduction, de plus en plus de consommateurs veulent savoir la provenance de leurs produits et son curieux de savoir le chemin que ces produits ont parcouru avant leur consommation. Étant donné que beaucoup de scandales ont eu lieu dans le passé de produit contaminé par exemple, une peur s'est installée chez les consommateurs voulant dorénavant davantage d'informations sur les produits. La traçabilité est actuellement un instrument permettant de mettre en place et d'assurer la sûreté alimentaire.

Ainsi, la traçabilité est et restera toujours un instrument permettant de mettre en place et d'assurer la sûreté alimentaire, car on essaie de s'assurer de la provenance des produits, et de tout le chemin parcouru avant leur consommation finale [61].

3.2.2 Technologie utilisée pour mettre en œuvre la traçabilité dans l'industrie alimentaire :

Un des moyens de mettre en place la traçabilité dans l'industrie alimentaire est de faire recours aux différentes technologies de traçabilité existantes que nous avons présentées précédemment.

Au sein de l'Union Européenne, c'est l'Autorité Européenne de sécurité des aliments soit l'AESA qui contrôle la traçabilité des aliments [62] [63]. Depuis le 1^{er} janvier 2005, les membres de l'union européenne ont l'obligation d'être dotés de système de traçabilité pour les produits alimentaires. Le Japon et les États-Unis ont également ce même type de système [64].

Selon l'organisme indépendant de surveillance de la sécurité alimentaire FSA (appelée Food Standard Agency), les systèmes de traçabilité pour les produits alimentaires devraient reposer sur trois piliers fondamentaux [65]:

- 1) L'identification des unités et lots de tous les ingrédients et produits
- 2) L'information sur le moment et l'endroit où les produits sont déplacés et transformés
- 3) Le système reliant ces données.

Parmi les diverses technologies présentées plus haut, chacune d'entre elles peut être utilisée à un niveau différent pour la mise en place de la traçabilité en industrie alimentaire. Pour commencer en parlant de la technologie RFID, beaucoup d'articles scientifiques nous montrent l'utilisation de cette technologie dans la gestion des processus de production en industrie ou encore pour assurer la sûreté alimentaire. Dans l'article scientifique « *Overview of RFID Technology and Its Applications in the Food Industry* » [66], les auteurs nous montrent que les tags RFID peuvent être utilisés pour « *suivre les produits alimentaires pendant la distribution et leur entreposage* ». Pour illustrer ceci, ils nous parlent du système « *BT Foodnet* » de l'entreprise *British Telecommunications* qui permet grâce à la technologie RFID d'avoir un système de traçabilité alimentaire en temps réel. Ce système permettrait par exemple de « *suivre les produits en temps réel pour accélérer et réduire le coût du rappel des produits* » en cas de problème, ou encore permettrait d'avoir accès à des « *données synchronisées en temps réel pour être informé sur l'état actuel de la chaîne d'approvisionnement* ». Toujours dans le même article, les auteurs nous mentionnent le système « *VarioSens* » de l'entreprise *KSW Microtech AG* basée sur la technologie RFID qui s'assure que les produits restent en permanence à la bonne température durant leur entreposage et leur transport. Ceci garantirait la sûreté alimentaire des produits et s'assurerait qu'il reste de bonne qualité tout au long du processus.

Pour parler de la technologie Code-barres, cette dernière est encore beaucoup utilisée pour la traçabilité des produits alimentaires. Pour prendre l'exemple des fruits, de plus en plus de vendeurs exigent une traçabilité complète des produits de leur récolte à leur consommation, et c'est souvent en utilisant la technologie Code-barres qu'ils vont pouvoir mettre en place ce système [67]. Dans l'article scientifique « *Traceability technologies for farm animals and their products in China* », les auteurs prennent l'exemple de l'industrie de la viande où dès l'abattoir on fait usage de cette technologie pour avoir un traçage complet du produit jusqu'à sa consommation finale. Cette méthode est donc efficace pour « *la collecte et la recherche de données* » et permet un « *faible coût et une facilité d'utilisation dans les systèmes de traçabilité des viandes* » [68]. Pour faire référence aux Cartes à puce, l'article « *Internet Smart Card for Perishable Food Cold Supply Chain* » nous montre qu'en faisant usage de cette technologie combinée avec celle de RFID, on peut construire un système permettant de contrôler en temps réel des éléments essentiels pour les produits alimentaires considérés comme périssables comme « *la température ou l'humidité* » [69]. Pour faire référence à la technologie QR-Code, l'article « *Food Traceability System Using Blockchain and QR Code* » nous mentionne que combinée à d'autres technologies telles que la Blockchain, cette innovation « *permet la traçabilité du produit* ». Il suffit

alors de scanner un QR-Code pour accéder à toutes les données de traçabilité relatives à un produit, ce qui « *augmente la transparence et la confiance dans la consommation des produits* » [70].

Pour aborder la technologie Barcoding moléculaire, nous pouvons évoquer l'exemple illustré dans l'article « *DNA barcoding as a new tool for food traceability* » qui montre comment cette technologie est utilisée pour « *identifier et certifier les matières premières* ». En se focalisant sur les fruits de mer, cette technologie est « *particulièrement efficace pour la traçabilité de ces produits* ». Étant donné que la consommation de fruits de mer ne fait qu'augmenter, il est parfois difficile d'identifier clairement avec quel type de produits nous faisons face, et cette technologie permet de particulièrement les identifier et distinguer [71].

Pour s'intéresser plus particulièrement à la Blockchain, de plus en plus de professionnels font recours à cette technologie puissante et innovante pour la traçabilité des produits alimentaires. Étant donné que cette technologie est considérée comme infalsifiable une fois qu'on y a enregistré les données, elle garantit l'intégrité des données enregistrées. Cette technologie permet une « *transparence et ouverture de la chaîne logistique* » et facilite également le traçage des produits [70]. Pour prendre l'exemple du système « *FoodTrack* » de l'entreprise *Nutrasign*, celui-ci permet notamment « *un enregistrement numérique unique, sécurisé et immuable de chaque produit, permettant aux utilisateurs d'identifier un lot de production et son cheminement dans un délai très court* » [72].

Enfin, pour parler de la technologie Digital Twin, même si c'est une technologie assez récente, elle est de plus en plus utilisée pour assurer la sûreté alimentaire. En effet, elle offre « *d'énormes possibilités pour déterminer la qualité des aliments, la traçabilité ou la conception d'aliments personnalisés* » [73]. Toutefois, cette technologie n'est pas toujours simple à mettre en place et reste encore très peu employée lors du processus de traçabilité des produits alimentaires.

Comme nous venons de le voir, chaque technologie présentée dans la partie précédente peut être utilisée à un moment dans le processus de traçabilité des produits alimentaires. Le tableau suivant résume ce qui vient d'être dit plus haut :

Nom de la technologie	Domaine de l'industrie alimentaire concernée	Exemple d'utilisation
RFID	Chaîne logistique, sûreté alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Système « BT Foodnet » de l'entreprise British Telecommunications • Système « VarioSens » de l'entreprise KSW Microtech AG
Code à barres	Chaîne logistique, sûreté alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie de la viande pour la traçabilité de l'abattoir à la consommation
Carte à puce	Chaîne logistique, sûreté alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Système de contrôle en temps réel des conditions environnementales pour produits périssables

QR-Code	Chaîne logistique, sûreté alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Accès pour le consommateur final à toutes les données de traçabilité relatives à un produit
Barcoding moléculaire	Chaîne logistique, sûreté alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Système d'identification et de certification des fruits de mer
Blockchain	Chaîne logistique, sûreté alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • Système « FoodTrack » de l'entreprise Nutrasign
Digital Twin	Chaîne logistique, sûreté alimentaire	

Nous allons maintenant dans la partie suivante nous focaliser plus spécifiquement sur l'utilisation de la technologie Digital Twin dans l'industrie alimentaire.

3.3 Utilisation de la technologie Digital Twin dans l'industrie alimentaire : quels sont les avantages ?

Étant en grande partie à l'origine de l'industrie 4.0, la technologie DT est de plus en plus présente dans l'industrie de manière générale et apporte un rôle considérable dans la transformation des processus de production spécifique à l'industrie alimentaire. On peut de ce fait, lister plusieurs avantages de l'utilisation de cette technologie dans l'industrie alimentaire [74].

Tout d'abord, cette technologie permet une accélération considérable des processus de production alimentaire, notamment en rendant plus efficace la chaîne logistique. Ceci permet donc une réduction des coûts de production et des coûts de maintenance. De plus, étant donné que cette technologie permet notamment d'avoir des informations très précises sur les produits, elle procure une réduction des risques liés à l'insalubrité des aliments, car les problèmes peuvent être détectés à l'avance. Le consommateur final pouvant accéder à plus de données relatives aux produits (lieu de provenance, date de fabrication, etc.), on peut garantir une plus grande transparence des produits alimentaires. Il existe bien évidemment beaucoup plus d'avantages de l'application de la technologie Digital Twin au domaine de l'industrie alimentaire, et nous venons d'en lister quelques-uns. Cette liste est donc non-exhaustive.

Nous pouvons voir dans le tableau suivant un récapitulatif ce qui vient d'être vu précédemment :

Avantages de l'utilisation des DT dans l'industrie alimentaire
Accélération et amélioration des processus de production
Réduction des coûts de production
Réduction des coûts de maintenance
Réduction des risques sanitaires
Transparence de la production alimentaire

Nous pouvons donc dire que l'application de cette technologie à l'industrie alimentaire exerce une influence très positive dans la stabilité de cette dernière.

Mais malgré toutes ces technologies existantes pour permettre la traçabilité des produits que l'on consomme, il existe toujours des manquements, et nous observons, hélas, très régulièrement des problèmes de sûreté alimentaire.

4 Problèmes liés à la sûreté dans l'industrie alimentaire :

Malgré tout ce qui est mis en place pour assurer la sûreté alimentaire et par conséquent la qualité des aliments, on constate qu'il y a malheureusement très souvent des problèmes sanitaires liés à la contamination de certains produits. Parmi les nombreux scandales existants, on peut penser à celui de la vente de viande avariée en provenance de Pologne qui a été vendue en France [75], celui de la contamination du lait du fromage *Morbier* de la société *Perrin* ayant causé l'émergence de cas de Salmonellose [76], ou encore celui des lasagnes à la viande de cheval ayant été présenté comme « *produit pur bœuf* » [77].

Beaucoup de scandales qui nous rappellent à quel point le problème est sérieux et l'urgence de trouver des solutions afin de minimiser au maximum les risques. Dans ce sens, le gouvernement français a mis en place un site web pour le rappel des produits concernés comme dangereux pour la santé une fois qu'ils ont été vendus. Il répertorie notamment le nom du produit, sa marque ou encore le nom du magasin ou ce dernier était accessible [78]. De ce point de vue, il semble anormal que ce soit une fois le produit vendu et parfois consommé que l'on se rende compte qu'il est porteur de substances nocives pour la santé, qui parfois fait perdre la vie à certaines personnes. On peut aussi s'interroger sur la responsabilité lors d'un scandale sanitaire faisant des victimes : qui sera responsable ? L'entreprise ayant commercialisé le produit ? Celle l'ayant produit ? Les pays d'importation de ces produits ? Le consommateur ne peut s'en prendre qu'à soi-même ? En ce sens, nous comprenons la complexité derrière ce problème, notamment par le fait que les applications juridiques divergent d'une instance à une autre. La plupart du temps, ces problèmes viennent du fait qu'un moment donné de la chaîne d'approvisionnement, la traçabilité devant assurer la sûreté alimentaire a mal été effectuée. Mais ces difficultés proviennent aussi d'autres raisons, à ce moment-là politiques. En effet, selon les pays, les lois réglementaires en vigueur pour assurer la sûreté alimentaire sont très différentes. Étant dans un monde particulièrement impacté par la mondialisation, les produits alimentaires que nous consommons au quotidien proviennent des quatre coins du monde. Étant donné que les ingrédients peuvent provenir de partout dans le monde, et souvent de pays où le règlement sanitaire n'est pas le même, il est difficile de mettre en place des solutions fiables pour assurer la traçabilité.

En France, c'est « *l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments, un établissement public de l'État, placé sous la tutelle des ministres chargés de l'agriculture, de la consommation et de la santé* » qui régit les lois afin d'assurer « *la sécurité sanitaire dans le domaine de l'alimentation, depuis la production des matières premières jusqu'à la distribution au consommateur final* » [79]. En Suisse, c'est « *l'Office fédéral de la santé publique* » qui s'occupe de cette fonction, en collaboration avec « *l'Office vétérinaire fédéral, l'Office fédéral de l'agriculture, les chimistes et les vétérinaires cantonaux* » [80].

Malgré les lois internationales en matière de sécurité alimentaire, il n'existe à l'heure actuelle aucune politique commune entre les différents pays du monde en matière de sûreté alimentaire. Chaque pays applique alors la loi selon sa propre législation, et il n'y a donc pas de collaboration commune. Pour

prendre l'exemple d'un plat préparé que nous pouvons facilement acquérir et consommer, il y a de fortes chances que tous les ingrédients ayant permis la confection de ce plat proviennent de différents endroits du monde. Par exemple, pour un plat préparé de pâte à la bolognaise, on peut cibler trois ingrédients principaux qui sont les pâtes, la sauce tomate elle-même composée avec de la viande hachée. Les pâtes peuvent provenir d'un pays, la sauce tomate préparée dans un autre pays et la viande encore d'un autre endroit. Pour la préparation de la sauce tomate, on a pu importer les tomates d'un pays différent du pays la préparant. Pour la viande, l'animal a pu être élevé dans un pays, mais abattu dans un autre. Et pour finir, le plat final a pu lui être fait dans un autre pays, avant qu'il soit consommable. On peut donc s'interroger : avec toutes ces étapes de fabrication du produit final lui-même composé de sous-produits, comment pouvons-nous nous assurer que chaque produit n'est pas à un moment nuisible pour la santé ? En cas de contamination, à quel moment de la chaîne de production y'a-t-il eu un manquement ? Quel produit est concerné ? Les pâtes ? La viande hachée ? La sauce tomate ?

De plus, on peut imaginer qu'au départ, chaque produit est soumis à la loi de son pays d'origine. Mais une fois ce dernier transformé ou transporté ailleurs, quelle loi fait office ? Celle de son pays de destination ou toujours celle de pays de provenance ? Comme il n'existe pas de politique commune entre tous les pays du monde, la réponse à cette interrogation reste floue. Mais encore, avec la sortie du Royaume-Uni de l'Union Européenne (UE) lors du Brexit, il existe dorénavant des problèmes de traçabilité alimentaire entre ce pays et l'UE. En effet, malgré sa décision de se détacher de la politique commune de l'UE, le Royaume-Uni reste tout de même un important producteur en Europe et exportateur de matière première alimentaire au sein des pays de l'UE. Mais n'étant plus membre de cette organisation, ces exportations alimentaires dans l'UE ne sont plus spécifiquement régies par les lois de l'UE, ce qui rend la traçabilité des aliments difficiles. Ce problème est donc spécifique à l'UE. Ainsi, nous venons de voir à travers un simple exemple à quel point il peut être difficile de remonter à l'origine de la contamination d'un produit alimentaire et d'assurer de manière fiable l'innocuité de chaque aliment, étant donné la complexité et les différents acteurs pouvant intervenir à un moment de la chaîne de production d'un produit.

Même si de nombreuses technologies existent pour assurer la traçabilité des aliments, nous constatons qu'il y a tout de même des manquements et que le risque zéro n'existe pas. Avec tout ceci, on comprend à quel point il est difficile de mettre en place des systèmes de traçabilité pouvant déterminer la provenance de chaque produit utilisé pour la confection d'un produit final. Pour apporter une solution à ce problème, une des choses qui peut être faite est de renforcer le système de traçabilité d'une chaîne de production, et c'est ce que l'on va démontrer dans la partie suivante en faisant usage de la technologie Digital Twin.

5 Proposition d'une solution utilisant le Digital Twin pour la traçabilité dans l'industrie alimentaire :

Comme dit précédemment, la technologie est probablement le moyen le plus efficace pour mettre en place la traçabilité en termes de sûreté alimentaire. Plusieurs d'entre elles ont été utilisées par le passé et le sont toujours à l'heure actuelle. Cependant, elles ne permettent pas à elles seules d'assurer une traçabilité complète de la production à la consommation.

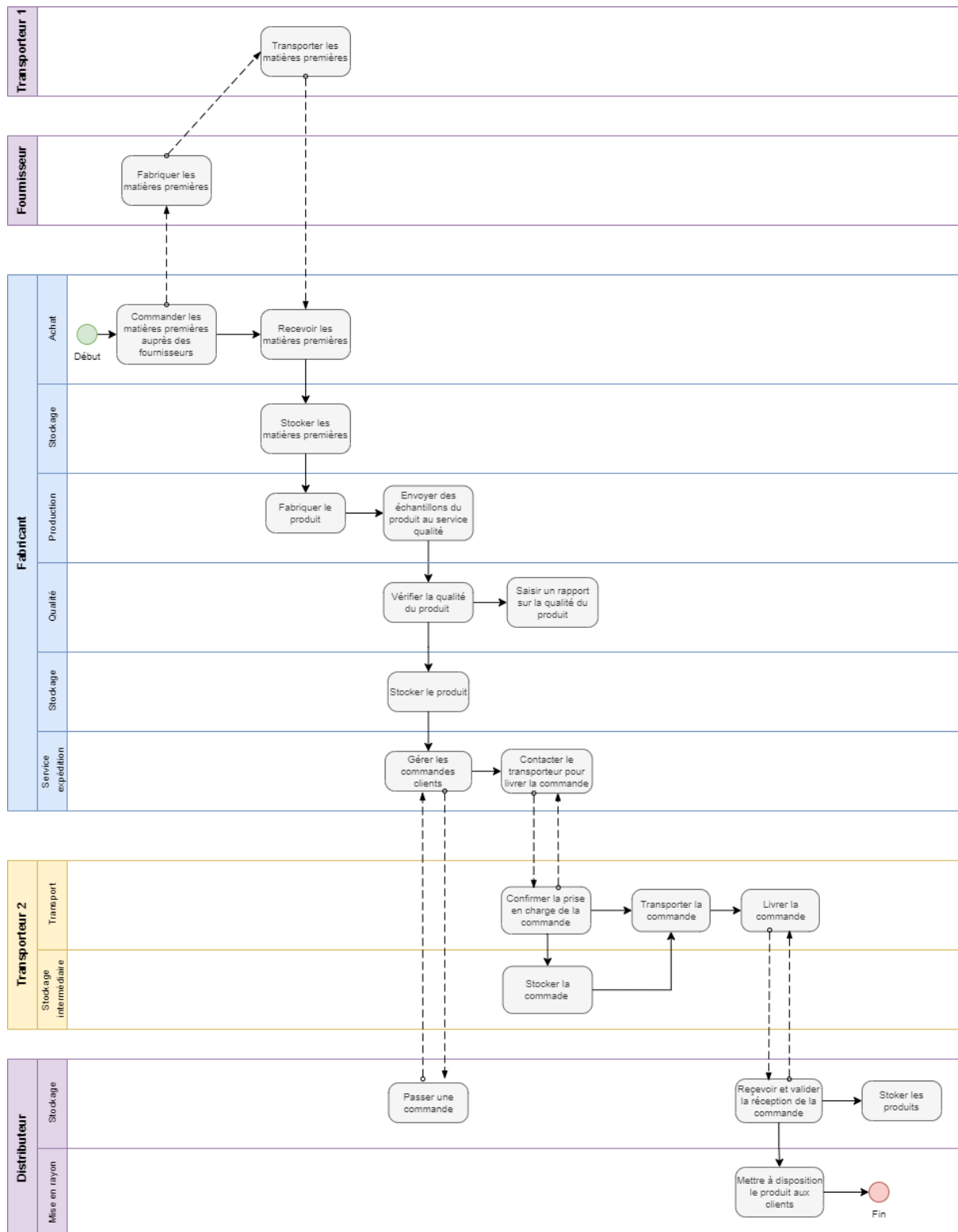
Dans l'idée de moderniser et renforcer la traçabilité des produits alimentaires, nous proposons d'inclure dans le processus de la chaîne d'approvisionnement la technologie Digital Twin. Plusieurs

choses nous poussent à choisir spécifiquement cette innovation et non une autre : c'est une technologie récente - officiellement apparue en 2011 - dont les domaines d'applications sont la chaîne logistique ou encore la sûreté alimentaire et son utilisation dans l'industrie alimentaire possèdent plusieurs avantages comme nous l'avons vu précédemment. Ainsi, nous pouvons à travers cette technologie faire de la traçabilité alimentaire de manière efficace en ajoutant une couche supplémentaire de traçabilité dans le processus complet de la chaîne d'approvisionnement. Cette proposition se veut également être originale, car peu de personnes à l'heure actuelle ne l'ont encore fait.

Avec l'utilisation de la technologie Digital Twin, on va pouvoir par exemple vérifier la fabrication d'un produit en retraçant la provenance de chaque composant qui constitue le produit final, le stockage d'un produit en s'assurant que le produit est bien conservé à une certaine température par exemple, le transport du produit pour s'assurer par exemple que la chaîne du froid n'a pas été rompue lors de cette étape, ou encore la mise à disposition du produit.

Ainsi, cette technologie serait utilisée comme une composition du processus de fabrication, du processus de stockage, du processus de transport et du processus de mise à disposition. Lors de chaque étape, on pourra alors avec le DT faire la vérification, la mise en œuvre et la validité de la traçabilité, dans le but de renforcer cette dernière lors du processus de la chaîne d'approvisionnement. On pourra alors retracer avec un DT tous les composants d'un produit séparément ainsi que son processus.

Le but à la fin serait de faire combiner les DT utilisés lors de chaque étape entre eux afin d'avoir suffisamment d'information pour s'assurer de l'origine du produit et de tout son parcours. Pour illustrer plus précisément ce que nous souhaitons mettre en place, nous avons réalisé une modélisation à l'aide du langage Business process model and notation (BPMN) pour montrer l'ensemble des processus que nous souhaitons cibler pour notre traçabilité. Nous avons entre autres décidé d'utiliser ce langage de modélisation, car il nous permet de montrer clairement les flux existants entre les différentes entités d'une chaîne de production et ceci est spécifiquement intéressant pour avoir une vue globale de l'utilisation des DT. Il semble aussi important et original d'utiliser le langage BPMN pour modéliser les DT car pas beaucoup d'articles scientifiques ne semblent l'avoir fait.



Dans notre schéma de modélisation, nous avons représenté le processus de manière général sans spécifiquement détailler chaque étape pour une meilleure visibilité de notre modélisation. Ainsi, les phases de transport et de fabrication n'ont pas été détaillées et sont uniquement représentées par un carré, ce qui nous permet tout de même d'avoir une vue d'ensemble.

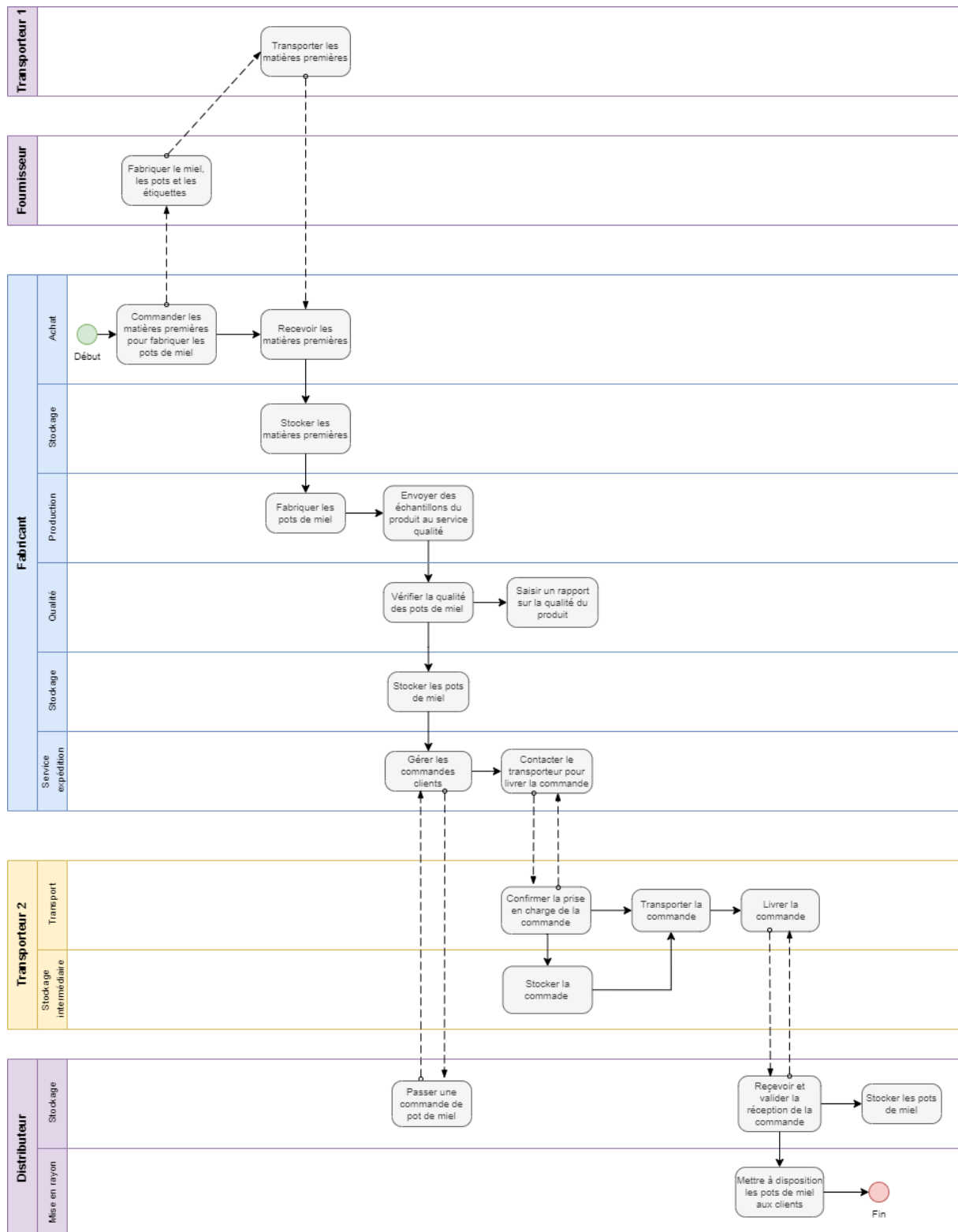
6 Instanciation de la proposition pour un cas particulier : l'exemple du pot de miel :

Nous avons pris l'exemple de la fabrication d'un pot de miel pour l'illustration de la solution que nous proposons. Nous avons décidé de prendre cet exemple, car il est relativement simple de produire un pot de miel (il ne faut pas beaucoup de matière première) et ceci était meilleur pour notre schématisation. Dans notre exemple, on considère que le pot de miel est fabriqué à partir de trois matières principales qui sont : le miel, le pot contenant le miel et l'étiquette communiquant des informations sur le produit. Ainsi, sur la base de la modélisation BPMN précédente, nous avons illustré l'exemple de la fabrication du pot de miel avec toutes ces étapes de la production à la mise à disposition finale.

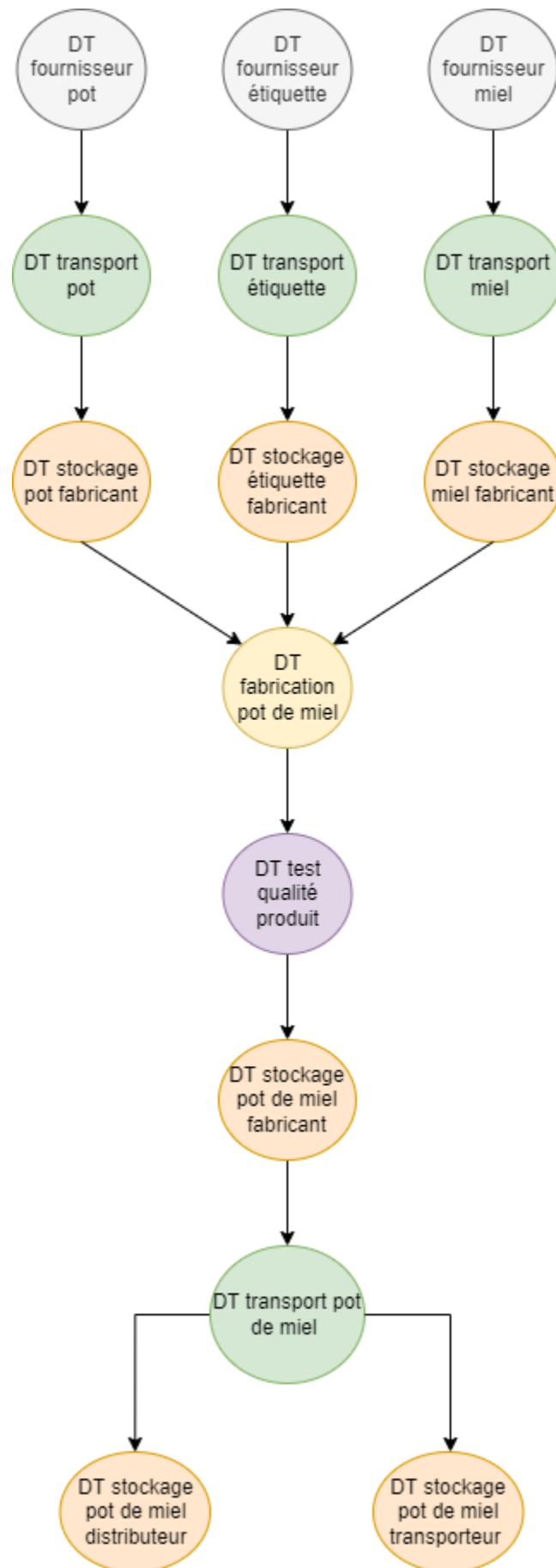
On peut également observer à travers cette modélisation tous les acteurs pouvant intervenir dans une chaîne d'approvisionnement. Dans ce cas, cette dernière ne semble pas faire intervenir énormément de partis prenants, mais dans certains cas, ces acteurs peuvent être très nombreux (et par conséquent, la modélisation beaucoup plus complexe). Ici, les acteurs principaux de la chaîne d'approvisionnement sont au nombre de cinq. Ainsi, dans l'ordre, on a :

1. Le fournisseur de matière première (Fournisseur),
2. Le transporteur de matière première (Transporteur1),
3. Le fabricant du produit final (Fabricant),
4. Le transporteur du produit final (Transporteur2),
5. Le distributeur du produit final (Distributeur).

Chacun de ces acteurs représente un élément de la chaîne d'approvisionnement qui fournira des informations sur le processus de production du produit à travers des Digital Twin.



En nous basant sur la représentation BPMN précédente, nous avons illustré à travers le graphe suivant les Digital Twin qui existeront pour le cas de la fabrication des pots de miel ainsi que les relations qui existeront entre chaque Twin. Nous avons, à l'aide du logiciel Microsoft Azure Digital Twin, implémenté notre exemple de la fabrication de pot de miel. Nous allons présenter ceci plus en détail dans la prochaine partie.



7 Implémentation du cas particulier avec Microsoft Azure Digital Twins :

Microsoft Azure Digital Twins est un logiciel créé par l'entreprise Microsoft permettant de créer des instances de Digital Twin, de les connecter à des applications et de voir les informations relatives à des Twin par le biais de graphes. À ce jour, seule Microsoft donne la possibilité de pouvoir réellement créer des Digital Twin et d'interagir avec eux. Pour utiliser ce logiciel, il faut dans un premier temps créer un compte Microsoft Azure en ligne pour accéder à toutes les ressources proposées par l'entreprise et en créer une nouvelle appelée Digital Twin. Une fois l'instance fondée, il est possible de mettre en place les Digital Twin et de les observer directement à travers Azure Digital Twin Explorer, ou encore de les implémenter à travers une application externe directement connectée à notre instance. Dans notre cas, nous avons créé notre graphe de Digital Twin à l'aide d'une application externe Visual Studio directement connectée à notre instance Microsoft Azure Digital Twin. Notre graphe est une illustration de notre cas de fabrication de pot de miel présenté précédemment.

Le tableau suivant illustre toutes les informations relatives à notre graphe de Twin créé à partir du logiciel pour l'illustration de notre exemple de pot de miel. Nous pouvons y observer les informations relatives à chaque Twin, à savoir :

- L'identifiant du modèle utilisé pour la création du Twin, qui est comparable à une classe dans un langage de programmation (ID modèle)
- L'identifiant du Digital Twin créé, à savoir son nom (ID digital Twins)
- Le nom de la relation, si un digital Twin est relié à un autre (Nom de la relation)
- L'identifiant du digital Twin cible dans le cas d'une relation (ID digital Twins cible)
- Toutes les données relatives à un digital Twin (Données Digital Twins).

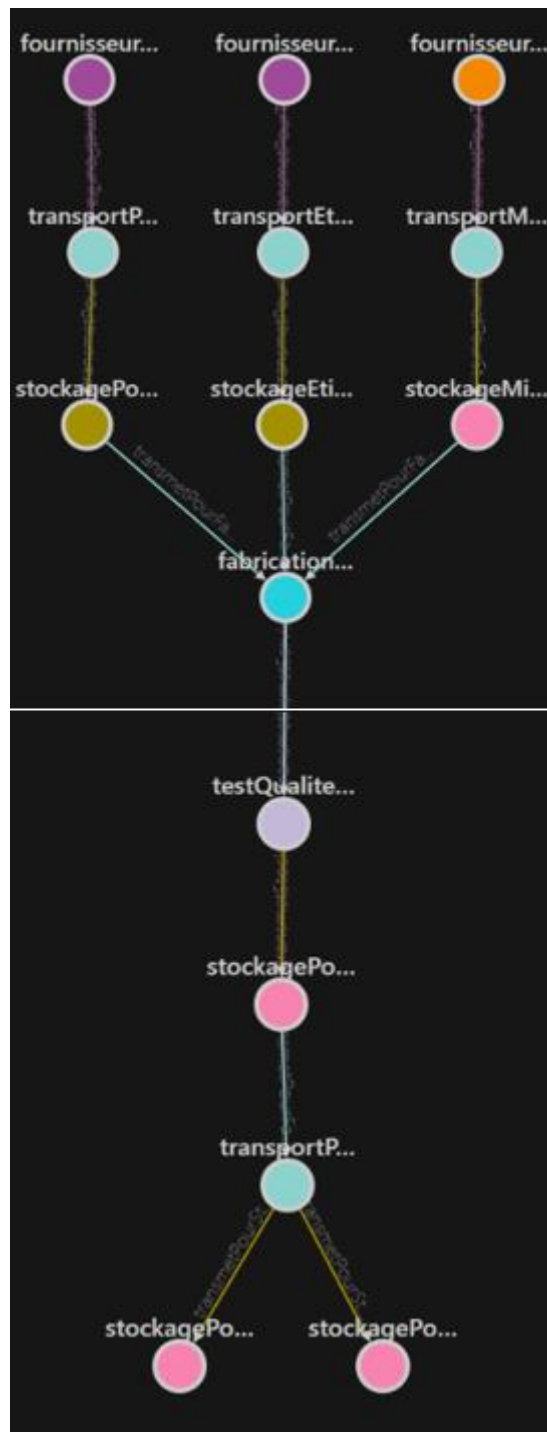
ID modèle	ID digital twins	Nom de la relation	ID digital twins cible	Données digital twins
dtmi:MatierePremiere;1	fournisseurMiel	transmetPourTransport	transportMiel	{"CodeProduit": PN0001}, {"DateAndTime": dateTime}, {"NomIngredient": Miel}, {"Temperature": 10}, {"Commentaire": String}
dtmi:Conditionnement;1	fournisseurPot	transmetPourTransport	transportPot	{"CodeProduit": PN0002}, {"DateAndTime": dateTime}, {"Matiere": Plastique}, {"NomConditionnement ": Pot}, {"Commentaire": String}
dtmi:Conditionnement;1	fournisseurEtiquette	transmetPourTransport	transportEtiquette	{"CodeProduit": PN0003}, {"DateAndTime": dateTime}, {"Matiere": Autocollant}, {"NomConditionnement ": Etiquette}, {"Commentaire": String}
dtmi:Transport;1	transportMiel	transmetPourStockage	stockageMiel	{"CodeProduit": PN0001}, {"DateAndTime": dateTime}, {"IdTwinsFournisseurOuStockage": fournisseurMiel }, {"MarchandiseTransporte": Miel}, {"Temperature": 12}, {"Commentaire": String}

dtmi:Transport;1	transportPot	transmetPourStockage	stockagePot	{ "CodeProduit": PN0002}, { "DateAndTime": dateTime}, { "IdTwinsFournisseurOuStockage": fournisseurPot}, { " MarchandiseTransporte": Pot}, { "Temperature": 13}, { "Commentaire": String}
dtmi:Transport;1	transportEtiquette	transmetPourStockage	stockageEtiquette	{ "CodeProduit": PN0003}, { "DateAndTime": dateTime}, { "IdTwinsFournisseurOuStockage": fournisseurEtiquette}, { "MarchandiseTransporte": Etiquette}, { "Temperature": 13}, { "Commentaire": String}
dtmi:StockageMarchandise;1	stockageMiel	transmetPourFabricationOuTransport	fabricationPotDeMiel	{ "CodeProduit": PN0001}, { "DateAndTime": dateTime}, { "IdTwinsTransporteur": transportMiel}, { " MarchandiseStockee": Miel}, { "Temperature": 12}, { "Commentaire": String}
dtmi:StockageConditionnement;1	stockagePot	transmetPourFabricationOuTransport	fabricationPotDeMiel	{ "CodeProduit": PN0002}, { " ConditionnementStockee ": Pot}, { "DateAndTime": dateTime}, { "IdTwinsTransporteur": transportPot}, { "Commentaire": String}
dtmi:StockageConditionnement;1	stockageEtiquette	transmetPourFabricationOuTransport	fabricationPotDeMiel	{ "CodeProduit": PN0003}, { " ConditionnementStockee ": Etiquette}, { "DateAndTime": dateTime}, { "IdTwinsTransporteur": transportEtiquette}, { "Commentaire": String}
dtmi:Fabrication;1	fabricationPotDeMiel	transmetServiceQualite	testQualiteProduit	{ "CodeProduit": PN0004}, { "DateAndTime": dateTime}, { " ProduitFabrique ": PotDeMiel}, { "Temperature": 11}, { "Commentaire": String}
dtmi:TestQualite;1	testQualiteProduit	transmetStockagePotDeMiel	stockagePotDeMiel	{ "CodeProduit": PN0004}, { "DateAndTime": dateTime}, { " QualiteProduit ": bonne}, { "Commentaire": String}
dtmi:StockageMarchandise;1	stockagePotDeMiel	transmetPourFabricationOuTransport	transportPotDeMiel	{ "CodeProduit": PN0004}, { "DateAndTime": dateTime}, { " MarchandiseStockee ": PotDeMiel }, { "Temperature": 10}, { "Commentaire": String}
dtmi:Transport;1	transportPotDeMiel	transmetPourStockage	stockagePotDeMielTransporteur, stockagePotDeMielDistributeur	{ "CodeProduit": PN0004}, { "DateAndTime": dateTime}, { "IdTwinsFournisseurOuStockage": stockagePotDeMiel}, { " MarchandiseTransporte": PotDeMiel }, { "Temperature": 12}, { "Commentaire": String}

dtmi:StockageMarchandise;1	stockagePotDeMielTransporteur			{"CodeProduit": PN0004}, {"DateAndTime": dateTime}, {"IdTwinsTransporteur": transportPotDeMiel }, {" MarchandiseStockee ": PotDeMiel }, {"Temperature": 14}, {"Commentaire": String}
dtmi:StockageMarchandise;1	stockagePotDeMielDistributeur			{"CodeProduit": PN0004}, {"DateAndTime": dateTime}, {"IdTwinsTransporteur": transportPotDeMiel}, {" MarchandiseStockee ": PotDeMiel }, {"Temperature": 14}, {"Commentaire": String}

Une fois notre graphe de Digital Twin créé sur la base des informations du tableau précédent, le logiciel nous a automatiquement affiché notre graphe avec ses relations. La visualisation du graphe est disponible en cliquant sur Azure Digital Twins explorer.

Ainsi, l’image suivante nous montre la visualisation de notre graphe dans le logiciel. On peut y observer que notre graphe est similaire à celui présenté dans la partie 6 du rapport. Les Digital Twins ont donc bien été créés, et possèdent toutes les informations relatives à notre exemple.



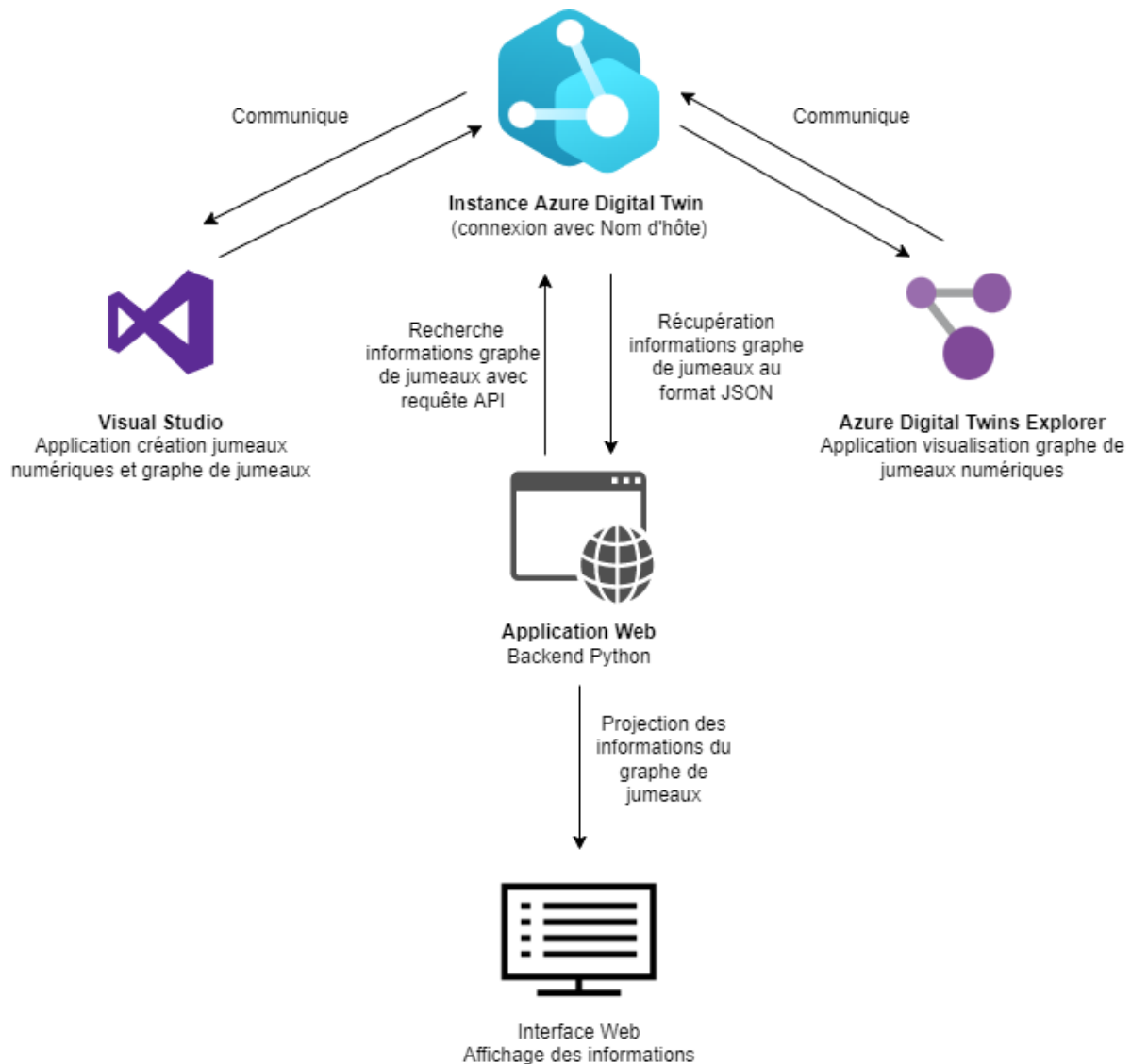
Dans l'image suivante, on peut voir les informations relatives au Twin « fournisseurMiel » qui sont affichées par le logiciel. On peut y observer que c'est bien les mêmes informations que dans le tableau précédent.

The image shows a 'TWIN PROPERTIES' window with a dark background and light text. It contains several input fields, some of which are pre-filled with data. The fields are as follows:

- \$dtId:** fournisseurMiel
- CodeProduit:** PN0001 (with a small 'X' icon to the right)
- DateAndTime:** 2022-04-20T20:01:15 (with an information icon to the left)
- NomIngredient:** Miel (with a small 'X' icon to the right)
- Temperature:** 10 (with a small 'X' icon to the right)
- Commentaire:** (empty field with a small 'X' icon to the right and the text '(not set)' to the right)
- \$etag:** W/"adb9f59f-3f6e-4f3f-8ef6-c26c5459723b"
- \$metadata:** (indicated by a right-pointing arrow)

Dans ce cas, les informations ont été préremplies pour démontrer que ce que l'on souhaite proposer est réalisable. Mais dans la réalité, on peut imaginer que les informations seront renseignées en temps réel par le biais de capteurs ou encore d'applications externes possédées par les différents acteurs de notre chaîne d'approvisionnement.

Quant à l'observation des informations du graphe de Digital Twin, nous avons développé une application web qui affiche les données selon le rôle que l'on occupe dans la chaîne d'approvisionnement. L'image suivante nous démontre la représentation de l'architecture de notre implémentation. Les indications concernant le fonctionnement de l'application web sont disponibles en annexe.



8 Résultats et impacts :

En combinant le logiciel Microsoft Azure Digital Twins avec notre application web, nous pouvons avoir l'ensemble des informations de notre « Supply Chain » travers un « dashboard ». Selon le rôle que l'on va occuper dans cette « Supply Chain », nous aurons accès à un certain nombre d'informations : il peut s'agir d'informations nous concernant directement ou encore d'informations relatives à d'autres acteurs de la « Supply Chain ». La traçabilité est notamment possible dans l'accès à l'information de certains acteurs de la « Supply Chain ». Par exemple, lorsque le fabricant a accès aux informations du transporteur des matières premières qui lui a livré la marchandise.

L'image suivante nous montre l'affichage des informations de notre application lorsqu'on est le fournisseur de matière première.

Informations fournisseur matière première

Matière première

Show 10 entries

Search:

Date et Heure (UTC+2)	Nom ingredient	Code produit	Temperature (°C)	Commentaire
2022-04-20T20:01:15	Miel	PN0001	10	

Showing 1 to 1 of 1 entries

Previous 1 Next

Conditionnement

Show 10 entries

Search:

Date et Heure (UTC+2)	Nom Conditionnement	Code produit	Matiere	Commentaire
2022-04-20T20:06:26	Etiquette	PN0003	Autocollant	
2022-04-20T20:11:39	Pot	PN0002	Plastique	

Showing 1 to 2 of 2 entries

Previous 1 Next

L'image suivante quant à elle, affiche les informations de notre application lorsqu'on est le distributeur du produit. Contrairement à l'image précédente, nous voyons que dans ce cas, un historique est disponible, car comme expliqué précédemment, l'affichage dépendra du rôle que l'on occupera dans la « Supply Chain ».

Informations distributeur produit

Stockage marchandise

Show 10 entries

Search:

Date et Heure (UTC+2)	Marchandise stockee	Code produit	Temperature (°C) ★	Commentaire
2022-04-23T15:02:46	PotDeMiel	PN0004	14	

Showing 1 to 1 of 1 entries

Previous 1 Next

Afficher l'historique du transporteur de produit

Transport

Show 10 entries

Search:

Date et Heure (UTC+2)	Marchandise transportee	Code produit	Temperature (°C)	Commentaire
2022-04-23T09:48:20	PotDeMiel	PN0004	12	

Showing 1 to 1 of 1 entries

Previous 1 Next

Ainsi, à travers cette implémentation, différents points peuvent être soulevés. Pour commencer, nous voyons que nous avons eu la capacité d'effectuer la traçabilité complète d'un produit de sa fabrication à la commercialisation. La traçabilité se manifeste notamment par le fait que toutes les étapes qu'a traversées le produit sont répertoriées à travers l'application. De plus, il existe un lien direct entre les différentes entités présentes. De ce fait, si un problème apparaît, ce dernier sera rapidement détecté grâce à la technologie Digital Twin et l'information sera distribuée aux autres acteurs pour qu'il soit au courant.

Par exemple, en observant l'image précédente, on voit que la température de « *stockage marchandise* » est à 14 degrés. Par rapport à notre implémentation, on considère que le produit est bien conservé s'il reste entre 10 et 15 degrés. Si un moment le Digital Twin, connecté avec un objet IoT détecte une température sortant de cette limite, alors l'application nous avertira au travers d'une alerte et un commentaire pourra être affiché comme on peut le voir sur l'image suivante.

Informations distributeur produit

Stockage marchandise

Show 10 entries Search:

Date et Heure (UTC+2)	Marchandise stockee	Code produit	Temperature (°C)	Commentaire
2022-04-23T15:02:46	PotDeMiel	PN0004	16	La temperature doit être entre 10°C et 15°C

Showing 1 to 1 of 1 entries Previous 1 Next

De plus, nous pouvons voir que les informations importantes concernant le produit sont présentes, à savoir la date et l'heure de prise en charge ou encore le code du produit concerné par exemple. Il est donc possible de faire le suivi et la gestion de la traçabilité à travers cette solution proposée. De ce fait, la confiance sera rétablie au niveau de la sûreté alimentaire étant donné qu'on aura toutes les informations concernant le produit. Cette application représente uniquement un prototype d'une application pouvant contenir beaucoup plus d'information ou encore d'entité interagissant dans la « Supply Chain ».

9 Critiques et remarques :

Lors de la phase de recherche pour la réalisation de ce projet, très peu de solutions basées sur la technologie Digital Twin étaient proposées pour pallier les problèmes concernant la sûreté alimentaire. Ainsi, nous faisons partie des premiers à proposer une solution de ce type.

Il est dommage qu'à ce jour, une technologie aussi puissante et avantageuse soit peu connue des professionnels et peu fonctionnelle. Très peu de plateformes proposent de pouvoir l'utiliser : la seule trouvée à ce jour est Microsoft Azure Digital Twin. Ceci est probablement lié au fait que cette technologie est relativement jeune. Il serait donc bien à l'avenir de mettre en place plus de solutions utilisant cette innovation.

Cette implémentation mentionnée est la première phase d'un projet pouvant être beaucoup plus riche. Dans le cadre de la réalisation de ce dernier, nous avons essayé d'être le plus clairs possible en essayant de mettre le minimum d'information pouvant apparaître dans une « Supply Chain ». Il est donc possible de partir de ce projet pour le développer et l'enrichir.

Personnellement, je considère ce projet comme la première pierre apportée à l'édifice d'un projet futur global. Ce travail m'a particulièrement permis de prendre conscience de l'importance de la réalisation d'un tel projet ambitieux et de tous les enjeux qu'il soulève. Avec volonté et détermination, nous pouvons tous individuellement contribuer à l'amélioration de nos habitudes pour vivre dans un

monde meilleur – sujet très sensible à l’heure actuelle du fait de nos problèmes de sociétés (réchauffement climatique, société de surconsommation...).

10 Conclusion et ouverture :

Nous ne pouvons affirmer que la solution que nous proposons va régler tous les problèmes de traçabilité relatifs à la sûreté alimentaire. Cependant, nous essayons par notre approche de minimiser les risques en renforçant le système de traçabilité à l’aide de la technologie Digital Twin. Ainsi, on peut améliorer le processus global de traçabilité existant actuellement en industrie.

Comme nous l’avons vu tout au long de ce rapport, la traçabilité dans la sûreté alimentaire représente un point très critique devant être pris très au sérieux pour éviter que d’autres scandales sanitaires ne surviennent à l’avenir.

Pour améliorer l’efficacité de nos Twin dans un futur plus ou moins proche, nous pourrions considérer ces derniers comme des agents logiciels proactifs qui exécuteront des actions par rapport à des événements spécifiques tels qu’un problème technique qui pourrait survenir dans le processus de production d’une chaîne d’approvisionnement. Dans ce cas, la communication entre nos Twin sera donc d’une meilleure qualité.

Par ailleurs, pour améliorer la crédibilité des informations générées par nos Digital Twin, on peut imaginer que ce dernier pourrait collaborer avec une Blockchain pour l’enregistrement des informations de traçabilité. Dans ce cas, nous pourrions nous assurer de l’authenticité des informations partagées au sein de notre réseau de collaboration étant donné que cette innovation est considérée comme infalsifiable. Effectivement, elle garantit en plus la transparence de l’information.

Bibliographie

- [1] « Listeria, Salmonelle... Ces bactéries dangereuses pour la santé qui contaminent notre nourriture ». https://www.bfmtv.com/sante/listeria-salmonelle-ces-bacteries-dangereuses-pour-la-sante-qui-contaminent-notre-nourriture_AN-202204060484.html (consulté le 22 mai 2022).
- [2] « Principaux repères de l'OMS sur la sécurité sanitaire des aliments ». <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/food-safety> (consulté le 22 mai 2022).
- [3] K. Chambers, « How Digitization Accelerates Agility and Transparency in Food and Beverage Next-Generation Industries », *Schneider Electric Blog*, 11 février 2021. <https://blog.se.com/sustainability/2021/02/11/how-digital-accelerates-agility-and-transparency-in-food-and-beverage-next-generation-industries/> (consulté le 22 mai 2022).
- [4] U. Nations, « La faim : une menace à la sécurité nationale | Nations Unies », *United Nations*. <https://www.un.org/fr/chronicle/article/la-faim-une-menace-la-securite-nationale> (consulté le 24 mai 2022).
- [5] « Sécurité alimentaire et moyens d'existence », *Action contre la Faim*. <https://www.actioncontrelafaim.org/notre-expertise/securite-alimentaire-et-moyens-dexistence/> (consulté le 24 mai 2022).
- [6] « Définition : Sécurité alimentaire ». https://www.toupie.org/Dictionnaire/Securite_alimentaire.htm (consulté le 24 mai 2022).
- [7] « Sécurité alimentaire, nutrition, résilience : quelques définitions - Inter-réseaux », <https://www.inter-reseaux.org/>. <https://www.inter-reseaux.org/publication/59-62-quelles-politiques-pour-les-populations-rurales-pauvres-du-sahel/securite-alimentaire-nutrition-resilience-quelques-definitions/> (consulté le 26 mai 2022).
- [8] « al936F.pdf ». Consulté le: 26 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/3/al936F/al936F.pdf>
- [9] « Sécurité alimentaire », *Wikipédia*. 13 novembre 2021. Consulté le: 26 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=S%C3%A9curit%C3%A9_alimentaire&oldid=187968779
- [10] « La Déclaration universelle des droits de l'homme », 6 octobre 2015. <https://www.un.org/fr/universal-declaration-human-rights/> (consulté le 26 mai 2022).
- [11] « Pourquoi est-ce important de viser la sécurité alimentaire? | CIUSSSCN ». <https://www.ciusss-capitalenationale.gouv.qc.ca/sante-publique/inegalites-sociales-sante/vivre-sans-faim/informer/pourquoi> (consulté le 26 mai 2022).
- [12] « Pourquoi la securite alimentaire est si importante La securite ». <https://ziphacp.com/fr/food-security.html> (consulté le 27 mai 2022).
- [13] « Sécurité alimentaire », *Action Contre La Faim*. <https://actionagainsthunger.ca/fr/529-2/securite-alimentaire/> (consulté le 27 mai 2022).
- [14] « Qu'est-ce que la sécurité alimentaire | CIUSSSCN ». <https://www.ciusss-capitalenationale.gouv.qc.ca/sante-publique/inegalites-sociales-sante/vivre-sans-faim/informer/securite-alimentaire> (consulté le 29 mai 2022).
- [15] U. Nations, « Journée internationale de la sécurité sanitaire des aliments | Nations Unies », *United Nations*. <https://www.un.org/fr/observances/food-safety-day> (consulté le 29 mai 2022).
- [16] « La qualité des aliments et la sécurité sanitaire ». https://lafaimexpliquee.org/La_faim_expliquee/Qualite_et_securite_des_aliments.html (consulté le 29 mai 2022).
- [17] P. Olsen et M. Borit, « How to define traceability », *Trends in Food Science & Technology*, vol. 29, n° 2, p. 142-150, févr. 2013, doi: 10.1016/j.tifs.2012.10.003.
- [18] R. Green et M. Hy, « La traçabilité: un instrument de la securité alimentaire », *Agroalimentaria*, vol. 7, n° 15, p. 19-28, juill. 2002.

- [19] K. Souali, O. Rahmaoui, et M. Ouzzif, « An overview of traceability: Definitions and techniques », in *2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt)*, oct. 2016, p. 789-793. doi: 10.1109/CIST.2016.7804995.
- [20] « TRACABILITE ». <http://jm.prive.pagesperso-orange.fr/docpro/tracabilite.htm> (consulté le 29 mai 2022).
- [21] « Qu'est-ce que la traçabilité ? Définition, types, enjeux », *Picomto*, 16 décembre 2021. <https://www.picomto.com/pourquoi-la-tracabilite-est-elle-importante/> (consulté le 29 mai 2022).
- [22] « Rappel de produits : tout savoir sur la traçabilité descendante », *Ooreka.fr*. <http://rfid.ooreka.fr/comprendre/rappel-de-produits> (consulté le 29 mai 2022).
- [23] la rédaction de Futura, « Définition | Traçabilité | Futura Planète », *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/zoologie-tracabilite-269/> (consulté le 29 mai 2022).
- [24] Mecalux, « L'importance de la traçabilité des produits en logistique ». <https://www.mecalux.fr/blog/tracabilite-produits-logistique> (consulté le 29 mai 2022).
- [25] « Traçabilité ascendante : principe de la traçabilité ascendante », *Ooreka.fr*. <http://rfid.ooreka.fr/comprendre/tracabilite-ascendante> (consulté le 29 mai 2022).
- [26] « Traçabilité, méthodes et impacts sur la logistique », *Portail Logistique, Transport et Supply Chain*. <https://www.faq-logistique.com/tracabilite.htm> (consulté le 29 mai 2022).
- [27] « Définition traçabilité : tout savoir sur la traçabilité », *Ooreka.fr*. <http://rfid.ooreka.fr/comprendre/definition-tracabilite> (consulté le 29 mai 2022).
- [28] « EDT : Les formes de traçabilité », *EDT*, 28 mai 2019. <https://www.group-edt.fr/les-formes-de-tracabilite/> (consulté le 29 mai 2022).
- [29] Mecalux, « La traçabilité interne garantit la qualité et la sécurité dans l'entrepôt ». <https://www.mecalux.fr/blog/tracabilite-interne> (consulté le 29 mai 2022).
- [30] « Qu'est-ce que la traçabilité ? | Les bases de la traçabilité | KEYENCE France ». https://www.keyence.fr/ss/products/marketing/traceability/basic_about.jsp (consulté le 29 mai 2022).
- [31] « Cheat sheet: What is Digital Twin? Internet of Things blog », *IBM Business Operations Blog*, 4 décembre 2020. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iot-cheat-sheet-digital-twin/> (consulté le 29 mai 2022).
- [32] B. R. Barricelli, E. Casiraghi, et D. Fogli, « A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications », *IEEE Access*, vol. 7, p. 167653-167671, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.
- [33] « What is a digital twin? | IBM ». <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin> (consulté le 29 mai 2022).
- [34] Y. Tchana de Tchana, G. Ducellier, et R. Sébastien, *Conception d'un jumeau numérique unique pour la gestion du cycle de vie d'une infrastructure linéaire*. 2019.
- [35] L. Nouvelle, « Le jumeau numérique donne vie à l'industrie 4.0 », avr. 2020, Consulté le: 29 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.usinenouvelle.com/article/le-jumeau-numerique-donne-vie-a-l-industrie-4-0.N953871>
- [36] « Jumeau numérique dans l'industrie : le dossier complet ! - Inoprod ». <https://www.inoprod.com/jumeau-numerique-industrie/> (consulté le 29 mai 2022).
- [37] « Espace Presse - Le jumeau numérique pour l'usine agroalimentaire de demain ». <https://www.cea.fr/presse/Pages/actualites-communiques/ntic/jumeau-numerique-usine-agroalimentaire-demain.aspx> (consulté le 29 mai 2022).
- [38] « Radio-identification », *Wikipédia*. 16 mai 2022. Consulté le: 29 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio-identification&oldid=193732091>
- [39] H. Stockman, « Communication by Means of Reflected Power », *Proceedings of the IRE*, vol. 36, n° 10, p. 1196-1204, oct. 1948, doi: 10.1109/JRPROC.1948.226245.
- [40] « L'histoire de la RFID ». <https://market.ier.com/blog/l-histoire-de-la-rfid-n4> (consulté le 29 mai 2022).
- [41] « RFID - Histoire ». http://monge.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2012/RFID_Modbus/RFID/histoire.html (consulté le 29 mai 2022).

- [42] Dipole, « Étiquettes RFID : que sont et dans quels domaines s'appliquent-elles », *DipoleRFID*. <https://www.dipolerfid.fr/blog-rfid/etiquettes-rfid-et-dans-quels-domaines-appliquent-elles> (consulté le 29 mai 2022).
- [43] « Carte à puce », *Wikipédia*. 21 avril 2022. Consulté le: 29 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Carte_%C3%A0_puce&oldid=193031407
- [44] « Invention de la carte à puce (Roland Moreno, 1974) ». <https://www.histoire-pour-tous.fr/inventions/5465-invention-carte-a-puce-1974.html> (consulté le 29 mai 2022).
- [45] C. B. I. 4 rue P. L. 35220 C. F. N. situer C. +33 02 99 00 89 97 F. de contact, « Applications et domaines des cartes à puces et badges RFID », *BG Ingénierie*. <https://www.bgi-cartes.fr> (consulté le 29 mai 2022).
- [46] « IBM100 - Le code-barres ». <https://www.ibm.com/ibm/history/ibm100/fr/fr/icons/upc/> (consulté le 29 mai 2022).
- [47] « L'invention du code-barres, une révolution oubliée ». <https://ici.radio-canada.ca/ohdio/premiere/emissions/les-annees-lumiere/segments/chronique/122039/histoire-code-barres-science> (consulté le 29 mai 2022).
- [48] « Définition d'un code-barres – Lecture industrielle des codes-barres | Cognex ». <https://www.cognex.com/fr-ch/what-is/industrial-barcode-reading/what-is-a-barcode> (consulté le 29 mai 2022).
- [49] « Définition | Code-barres - Code à barres - CAB | Futura Tech ». <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/technologie-code-barres-11112/> (consulté le 29 mai 2022).
- [50] « Code QR », *Wikipédia*. 7 mai 2022. Consulté le: 29 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Code_QR&oldid=193486157
- [51] « Fiche métier : Expert·e en traçabilité génétique », *Métiers.be*. <https://metiers.siep.be/metier/expert-tracabilite-genetique/> (consulté le 29 mai 2022).
- [52] « Barcoding moléculaire », *Wikipédia*. 7 février 2022. Consulté le: 29 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Barcoding_mol%C3%A9culaire&oldid=190637492
- [53] « 5 ways traceability technologies can lead to a safer, more sustainable world », *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2019/09/5-ways-traceability-technology-can-lead-to-a-safer-more-sustainable-world/> (consulté le 29 mai 2022).
- [54] « Blockchain », *Wikipédia*. 23 mai 2022. Consulté le: 29 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Blockchain&oldid=193912765>
- [55] G. Author, « How Technology Is Changing Traceability and Safety », *Food Industry Executive*, 26 janvier 2021. <https://foodindustryexecutive.com/2021/01/how-technology-is-changing-traceability-and-safety/> (consulté le 29 mai 2022).
- [56] S. Nakamoto, « Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System », p. 9.
- [57] « Les principales applications de la technologie blockchain ». <https://www.kokkinizita.net/domaines-dapplication-blockchain/> (consulté le 29 mai 2022).
- [58] « Traceability platform », *Kezzler*. <https://kezzler.com/traceability-platform/> (consulté le 29 mai 2022).
- [59] Z. Wang, *Digital Twin Technology*. IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.80974.
- [60] « Qu'est-ce qu'un jumeau numérique ? | IBM ». <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/what-is-a-digital-twin> (consulté le 29 mai 2022).
- [61] « How can digital traceability increase trust in the agrifood industry? - EIT Food ». <https://www.eitfood.eu/blog/how-can-digital-traceability-increase-trust-in-the-agrifood-industry> (consulté le 29 mai 2022).
- [62] Futura, « Définition | AESA - Autorité européenne de sécurité des aliments - EFSA | Futura Santé », *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/medecine-aesa-5443/> (consulté le 29 mai 2022).
- [63] « Traçabilité », *Wikipédia*. 30 mars 2022. Consulté le: 29 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tra%C3%A7abilit%C3%A9&oldid=192385997>

- [64] M. Bevilacqua, F. Ciarapica, et G. Giacchetta, « Business process reengineering of a supply chain and a traceability system: A case study », *Journal of Food Engineering*, vol. 93, p. 13-22, juill. 2009, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.12.020.
- [65] M. M. Aung et Y. S. Chang, « Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives », *Food Control*, vol. 39, p. 172-184, mai 2014, doi: 10.1016/j.foodcont.2013.11.007.
- [66] P. Kumar, H. w. Reinitz, J. Simunovic, K. p. Sandeep, et P. d. Franzon, « Overview of RFID Technology and Its Applications in the Food Industry », *Journal of Food Science*, vol. 74, n° 8, p. R101-R106, 2009, doi: 10.1111/j.1750-3841.2009.01323.x.
- [67] « How Barcoding Is Helping Traceability In Fresh Foods ». <https://www.foodonline.com/doc/how-barcoding-is-helping-traceability-in-fresh-foods-0001> (consulté le 29 mai 2022).
- [68] H. Bai *et al.*, « Traceability technologies for farm animals and their products in China », *Food Control*, vol. 79, p. 35-43, sept. 2017, doi: 10.1016/j.foodcont.2017.02.040.
- [69] P. Urien et S. Piramuthu, « Internet Smart Card for perishable food cold supply chain », in *2013 IEEE Eighth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, avr. 2013, p. 83-88. doi: 10.1109/ISSNIP.2013.6529769.
- [70] N. Mishra, S. Mistry, S. Choudhary, S. Kudu, et R. Mishra, « Food Traceability System Using Blockchain and QR Code », in *IC-BCT 2019*, Singapore, 2020, p. 33-43. doi: 10.1007/978-981-15-4542-9_4.
- [71] A. Galimberti *et al.*, « DNA barcoding as a new tool for food traceability », *Food Research International*, vol. 50, n° 1, p. 55-63, janv. 2013, doi: 10.1016/j.foodres.2012.09.036.
- [72] « Discover 5 Top Tech-Driven Food Traceability Solutions », *StartUs Insights*, 30 juillet 2021. <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/discover-5-top-tech-driven-food-traceability-solutions/> (consulté le 29 mai 2022).
- [73] E. Henrichs, T. Noack, A. M. Pinzon Piedrahita, M. A. Salem, J. Stolz, et C. Krupitzer, « Can a Byte Improve Our Bite? An Analysis of Digital Twins in the Food Industry », *Sensors*, vol. 22, n° 1, Art. n° 1, janv. 2022, doi: 10.3390/s22010115.
- [74] « Digital Twin | Qu'est-ce que c'est, quel sont ses avantages? », 14 janvier 2021. <https://www.cadlog.fr/key-topics/digital-twin/> (consulté le 30 mai 2022).
- [75] « France: toute la viande avariée polonaise retrouvée », *LExpress.fr*, 3 février 2019. https://www.lexpress.fr/actualite/societe/france-toute-la-viande-avariee-polonaise-retrouvee_2060559.html (consulté le 30 mai 2022).
- [76] « Salmonellose : retrait et rappel de morbier au lait cru », *LExpress.fr*, 8 février 2020. https://www.lexpress.fr/actualite/societe/sante/salmonellose-retrait-et-rappel-de-morbier-au-lait-cru_2117682.html (consulté le 30 mai 2022).
- [77] « Le scandale alimentaire, scénario à répétition du secteur agroalimentaire et de la grande distribution », *Le Monde.fr*, 11 août 2017. Consulté le: 30 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.lemonde.fr/planete/article/2017/08/11/le-scandale-alimentaire-scenario-a-repetition-de-l-agroalimentation-mondialisee_5171473_3244.html
- [78] « Rappel Consommateur - Accueil ». <https://rappel.conso.gouv.fr/> (consulté le 30 mai 2022).
- [79] « Titre II : Sécurité sanitaire des eaux et des aliments (Articles L1321-1 à L1324-4) - Légifrance ». https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072665/LEGISCTA000006154994/#LEGISCTA000006154994 (consulté le 30 mai 2022).
- [80] « ko-au-pvk-lebensmittel-f.pdf ». Consulté le: 30 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.parlament.ch/centers/documents/fr/ko-au-pvk-lebensmittel-f.pdf>