République Tunisienne
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tunis El Manar
École Nationale d'Ingénieurs de Tunis

Département Technologies de l'Information et de la Communication

MINI-PROJET : 5G SOLUTIONS

5G pour l' Internet des Objets Industriel (IIoT)

Enjeux, apports technologiques et application
à une supervision industrielle standardisée MQTT / Sparkplug B

Élaboré par :
Belsem JEMAI
Mohamed Ramez MABROUK
Classe : 3ATEL1.DSIC

Encadré par :
M. Mahmoud AMMAR

Année Universitaire : 2026 / 2027

Résumé

L'industrie manufacturière connaît une transformation profonde sous l'impulsion de l'*Industrie 4.0*, qui repose sur la numérisation et l'interconnexion massive des équipements de production. Les technologies de communication traditionnelles (réseaux filaires rigides, Wi-Fi non déterministe ou réseaux bas débit) peinent à satisfaire simultanément les exigences de latence, de fiabilité et de densité propres à l'Internet des Objets Industriel (IIoT). Ce chapitre présente comment la cinquième génération de réseaux mobiles (5G) répond à ces besoins à travers ses trois piliers (eMBB, URLLC, mMTC), le découpage réseau en tranches (*network slicing*), la convergence avec le Time-Sensitive Networking (TSN), les réseaux privés et l'informatique en périphérie (MEC). Une dernière partie illustre ces apports à travers une application concrète : une plateforme de supervision de production standardisée en *MQTT / Sparkplug B*, réalisée dans le cadre du mini-projet, dont nous montrons comment elle pourrait être transportée sur un réseau privé 5G.

Mots-clés : 5G, IIoT, Industrie 4.0, URLLC, mMTC, network slicing, TSN, réseau privé 5G, MEC, MQTT, Sparkplug B.

Table des matières

Résumé **1**

1 Introduction **2**

2 L'IIoT et ses exigences de communication **2**

3 Les apports de la 5G pour l'IIoT **2**
- 3.1 Les trois piliers de services . . . 3
- 3.2 URLLC : la communication ultra-fiable à faible latence . . . 3
- 3.3 mMTC et RedCap : la connexion massive . . . 3
- 3.4 Le découpage réseau en tranches (network slicing) . . . 3
- 3.5 La convergence 5G et TSN . . . 3
- 3.6 Les réseaux privés 5G (NPN) . . . 3
- 3.7 L'informatique en périphérie (MEC) . . . 4

4 Architecture 5G pour un déploiement industriel **4**

5 Cas d'usage en Usine 4.0 **4**

6 Application : une supervision MQTT/Sparkplug B sur réseau 5G **5**
- 6.1 Rappel de l'architecture logicielle . . . 5
- 6.2 Transport sur un réseau privé 5G . . . 5
- 6.3 Résultats et scénarios de test . . . 6

7 Défis et perspectives **7**

8 Conclusion **7**

Références **8**

1. Introduction

La quatrième révolution industrielle, ou *Industrie 4.0*, consiste à doter les usines d'une couche numérique capable de collecter, transmettre et exploiter en temps réel les données issues des machines. Cette vision suppose une connectivité à la fois **fiable**, **réactive** et **massive**, reliant des milliers de capteurs, actionneurs, robots et systèmes de supervision.

Or les solutions historiques montrent leurs limites. Les réseaux **filaires** (bus de terrain, Ethernet industriel) offrent du déterminisme mais au prix d'un câblage coûteux et rigide, incompatible avec la mobilité des robots et la reconfiguration fréquente des lignes. Le **Wi-Fi** apporte la mobilité mais souffre d'interférences et d'une latence non garantie. Enfin, les réseaux **bas débit** (LPWAN) conviennent aux capteurs peu bavards mais ne supportent ni le débit ni la latence du temps réel industriel.

La **5G** se présente comme la première technologie sans fil pensée dès l'origine pour couvrir *simultanément* ces besoins hétérogènes. Ce chapitre analyse ses apports pour l'IIoT. Après avoir caractérisé les exigences de communication industrielle (section 2), nous détaillons les briques technologiques de la 5G (section 3), puis l'architecture d'un déploiement industriel (section 4) et les cas d'usage de l'Usine 4.0 (section 5). La section 6 illustre concrètement ces apports à travers notre plateforme de supervision *Sparkplug B*. Nous concluons par les défis et perspectives (section 7).

2. L'IIoT et ses exigences de communication

L'**Internet des Objets Industriel** (IIoT) se distingue de l'IoT grand public par sa *criticité* : une communication perdue ou retardée peut provoquer un arrêt de production, un rebut, voire un accident. Là où une montre connectée tolère plusieurs secondes de latence, une cellule robotisée exige une réaction en quelques millisecondes, avec une disponibilité proche de 100 %.

Les principales exigences de la communication industrielle sont :

— **Latence déterministe** : non seulement faible, mais surtout *bornée* (gigue, ou *jitter*, maîtrisée) pour les boucles de régulation.

— **Ultra-fiabilité** : taux de livraison des messages pouvant atteindre 99,999 % voire 99,9999 %.

— **Synchronisation temporelle** entre équipements distribués (coordination d'axes, horodatage cohérent).

— **Densité** : jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de capteurs par kilomètre carré.

— **Sécurité et souveraineté** des données de production, qui doivent souvent rester dans l'enceinte de l'usine.

Ces exigences varient fortement selon le type d'application, comme le résume le tableau 1.

TABLE 1 – Exigences de communication selon la classe d'application industrielle.

Application	Latence	Fiabilité	Débit	Caractéristique dominante
Contrôle de mouvement	< 1 ms	99,9999 %	faible	déterminisme extrême
AGV / robots mobiles	1 à 10 ms	99,999 %	moyen	mobilité + fiabilité
Télémétrie de capteurs	10 à 100 ms	99,9 %	faible	très forte densité
Vidéo / réalité augmentée	10 à 50 ms	99,9 %	élevé	débit montant élevé
Maintenance prédictive	~ 1 s	99 %	variable	volume de données

3. Les apports de la 5G pour l'IIoT

La 5G, standardisée par le 3GPP et répondant aux exigences IMT-2020 de l'UIT [1], introduit un ensemble de technologies qui adressent directement les besoins précédents.

3.1 Les trois piliers de services

La 5G définit trois familles de services (tableau 2). L'IIoT s'appuie surtout sur les deux dernières : l'**URLLC** pour le temps réel critique et la **mMTC** pour la connexion massive de capteurs.

TABLE 2 – Les trois piliers de la 5G et leur pertinence pour l'IIoT.

Pilier	Objectif principal	Pertinence IIoT
eMBB	très haut débit (jusqu'à plusieurs Gbit/s)	vidéo, réalité augmentée, jumeau numérique
URLLC	latence < 1 ms, fiabilité $\geq 99{,}999$ %	contrôle temps réel, sécurité machine
mMTC	jusqu'à 10^6 objets/km^2	réseaux denses de capteurs

3.2 URLLC : la communication ultra-fiable à faible latence

L'**URLLC** (*Ultra-Reliable Low-Latency Communications*) vise une latence sur l'interface radio inférieure à la milliseconde avec une fiabilité de 99,999 %. Pour y parvenir, la 5G NR introduit des **numérologies flexibles** (espacements de sous-porteuses élargis réduisant la durée des symboles), des **mini-slots** autorisant une transmission sans attendre le début d'un créneau complet, ainsi que des mécanismes de **fiabilisation** comme la duplication de paquets (PDCP duplication). L'URLLC est la brique qui rend envisageable le contrôle sans fil d'automatismes jusque-là réservé au filaire.

3.3 mMTC et RedCap : la connexion massive

La **mMTC** (*massive Machine-Type Communications*) cible la connexion d'un très grand nombre d'objets à faible consommation. Entre les réseaux bas débit (NB-IoT, LTE-M) et la pleine 5G, la **Release 17** du 3GPP a introduit **RedCap** (*Reduced Capability*), une catégorie d'équipements de complexité réduite, adaptée aux capteurs industriels, caméras de surveillance ou wearables, qui comble le fossé entre débit modéré et faible coût.

3.4 Le découpage réseau en tranches (network slicing)

Le **network slicing** permet de créer, sur une même infrastructure physique, plusieurs réseaux logiques *isolés*, chacun identifié par un S-NSSAI et doté de ses propres garanties. Une usine peut ainsi dédier une tranche *URLLC* aux commandes critiques et une tranche *mMTC* à la télémétrie, sans que l'une ne dégrade l'autre.

3.5 La convergence 5G et TSN

Pour atteindre un déterminisme de bout en bout, la 5G s'intègre au **Time-Sensitive Networking** (TSN, famille IEEE 802.1). Depuis la Release 16, le système 5G peut se comporter comme un *pont TSN logique* : des traducteurs côté équipement (DS-TT) et côté réseau (NW-TT) assurent la synchronisation et l'ordonnancement temporel, garantissant une gigue maîtrisée indispensable au contrôle de mouvement.

3.6 Les réseaux privés 5G (NPN)

Les **réseaux privés** ou *Non-Public Networks* (NPN) permettent de déployer la 5G à l'échelle d'un site industriel. On distingue les réseaux autonomes (*SNPN*), totalement indépendants, et les réseaux intégrés à un opérateur (*PNI-NPN*). Ils offrent la maîtrise de la couverture, une sécurité renforcée et surtout la **souveraineté des données**, qui ne quittent pas l'usine.

3.7 L'informatique en périphérie (MEC)

Le **Multi-access Edge Computing** (MEC) rapproche la capacité de calcul du réseau d'accès. En hébergeant les applications (broker, supervision, intelligence) *au bord* du réseau plutôt que dans un cloud distant, le MEC réduit drastiquement la latence de bout en bout et évite l'exposition des données sensibles.

Le tableau 3 situe la 5G face aux autres technologies de connectivité industrielle.

TABLE 3 – Comparaison des technologies de connectivité industrielle.

Critère	Filaire (TSN)	Wi-Fi	4G	5G
Latence faible	✓✓	∼	∼	✓✓
Déterminisme	✓✓	✗	✗	✓
Mobilité	✗	✓	✓✓	✓✓
Densité d'objets	∼	∼	✓	✓✓
Déploiement souple	✗	✓	✓	✓✓

4. Architecture 5G pour un déploiement industriel

Pour bénéficier pleinement de l'URLLC et du slicing, un déploiement industriel repose sur une 5G **autonome** (SA, *Standalone*), c'est-à-dire s'appuyant sur un cœur 5G natif (*5G Core*, 5GC) et non sur un cœur 4G hérité comme dans le mode NSA.

L'architecture type d'une usine connectée (figure 1) comprend :

— un **réseau d'accès radio** (RAN) composé de stations de base *gNB* couvrant les ateliers ;

— un **cœur 5G** (5GC) regroupant les fonctions de gestion de l'accès (AMF), de session (SMF) et surtout la fonction de plan utilisateur (*UPF*), qui peut être déployée *localement* pour minimiser la latence ;

— une plateforme **MEC** hébergeant les applications métier au plus près des équipements ;

— une intégration entre le monde **OT** (technologies opérationnelles, automatismes) et **IT** (systèmes d'information).

5. Cas d'usage en Usine 4.0

Les apports de la 5G se concrétisent dans de nombreux scénarios industriels :

— **Contrôle de mouvement et boucles fermées** : pilotage sans fil d'axes et de robots, exigeant l'URLLC et la convergence TSN.

— **Robots mobiles autonomes (AGV/AMR)** : véhicules de logistique interne qui nécessitent une connectivité continue en mobilité, impossible en filaire.

— **Maintenance prédictive** : collecte massive de données vibratoires, thermiques ou acoustiques (mMTC) pour anticiper les pannes.

— **Jumeau numérique** : réplique virtuelle temps réel de la ligne, alimentée par un flux de données continu à faible latence.

— **Réalité augmentée** : assistance et formation des opérateurs par superposition d'informations, gourmande en débit montant (eMBB).

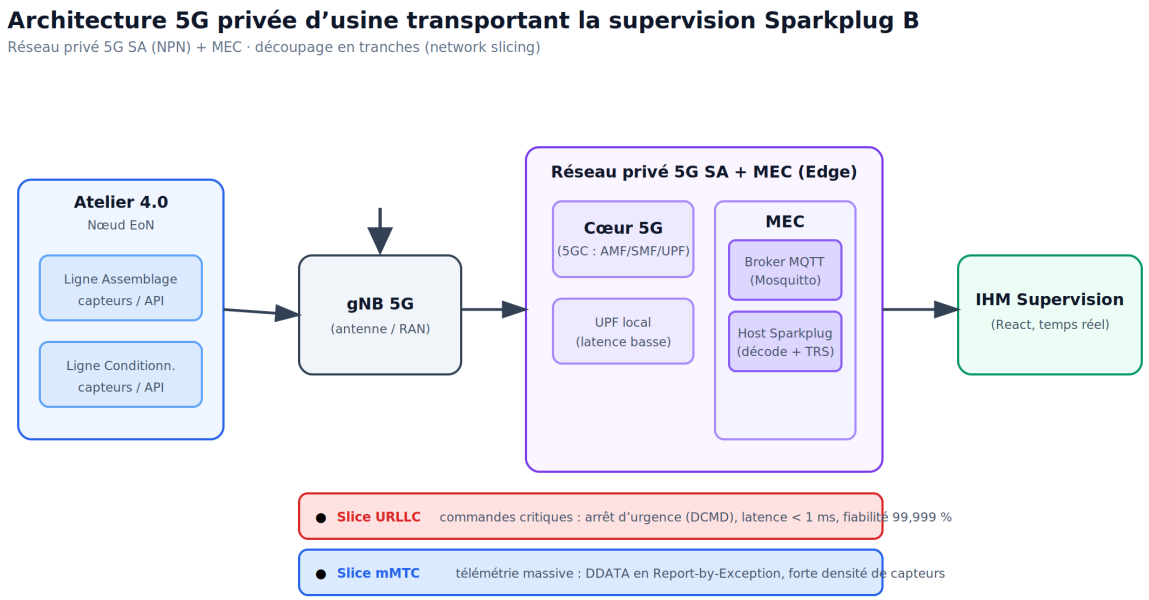


FIGURE 1 – Architecture d'un réseau privé 5G d'usine transportant une supervision Sparkplug B, avec découpage en tranches URLLC et mMTC.

6. Application : une supervision MQTT/Sparkplug B sur réseau 5G

Pour ancrer ces concepts, nous nous appuyons sur la plateforme de supervision réalisée dans le cadre du mini-projet pratique. Celle-ci émule un atelier dont les lignes de production publient leur état (statut machine, pièces produites, rebuts, ordre de fabrication) selon la spécification industrielle **Sparkplug B** [8] par-dessus le protocole **MQTT** [9], avec un encodage binaire *Protocol Buffers*.

6.1 Rappel de l'architecture logicielle

Le système se compose d'un **nœud Edge** (EoN) émulant l'atelier, d'un **broker MQTT**, d'une **application hôte** (*Primary Application*) qui décode les trames, gère l'état de connexion et calcule le **TRS** (Taux de Rendement Synthétique : qualité, cadence, disponibilité), et enfin d'une **IHM** web de supervision. Le cycle de vie Sparkplug B, qui comprend les certificats de naissance (NBIRTH/DBIRTH), les données en *Report-by-Exception* (DDATA) et le testament de déconnexion (NDEATH), est illustré par le chronogramme de la figure 2.

6.2 Transport sur un réseau privé 5G

Déployée sur un réseau privé 5G, cette plateforme tirerait parti de plusieurs apports de la 5G. Le **broker** et l'**hôte** seraient hébergés sur le **MEC**, au bord du réseau, pour une latence minimale. Le trafic serait réparti sur deux **tranches** distinctes, selon sa criticité, comme le montre le tableau 4.

Ainsi, le mécanisme de *Report-by-Exception*, qui ne publie une variable que lorsqu'elle change, s'accorde idéalement avec la logique mMTC en minimisant le trafic et en permettant une plus forte densité de capteurs. À l'inverse, la commande d'arrêt d'urgence, dont dépend la sécurité des opérateurs, relève typiquement d'une tranche URLLC où latence et fiabilité sont garanties. Cette application illustre concrètement comment une architecture IIoT standardisée peut exploiter chaque pilier de la 5G.

TABLE 4 – Correspondance entre les besoins de la plateforme et les technologies 5G.

Besoin de la plateforme	Justification	Techno 5G
Arrêt d'urgence (DCMD)	commande critique, réaction immédiate requise	Slice **URLLC**
Télémétrie DDATA	nombreux capteurs, flux continu	Slice **mMTC**
Report-by-Exception	réduit le trafic → densité accrue	efficacité mMTC
Détection de panne (NDEATH)	fiabilité de détection de déconnexion	fiabilité URLLC
IHM temps réel	rafraîchissement sans délai perceptible	**MEC** (edge)
Données de production	doivent rester dans l'usine	**NPN** privé

6.3 Résultats et scénarios de test

L'interface de supervision (figure 3) affiche en temps réel l'état de chaque ligne : feu de couleur (vert, orange, rouge), avancement de l'ordre de fabrication et indicateurs de performance (pièces, rebuts, qualité, cadence, disponibilité, TRS).



FIGURE 3 – IHM de supervision en fonctionnement nominal : les deux lignes en marche.

Deux scénarios valident le comportement du système. Le premier (figure 4) déclenche un **arrêt d'urgence** depuis l'IHM : la commande DCMD parcourt la chaîne IHM, hôte, broker puis nœud, et la ligne concernée passe à l'état « Arrêté ».



FIGURE 4 – Scénario d'arrêt d'urgence (DCMD) : la ligne d'assemblage est arrêtée.

Le second scénario (figure 5) coupe brutalement l'émulateur : le broker publie alors de lui-même le testament **NDEATH**, et l'IHM bascule le nœud hors ligne (feux gris, boutons désactivés). Ce test valide le mécanisme de testament MQTT natif.



FIGURE 5 – Scénario de déconnexion brutale : réception du testament NDEATH, nœud hors ligne.

7. Défis et perspectives

Malgré ses promesses, l'adoption de la 5G industrielle soulève des défis : le **coût** de déploiement d'un réseau privé, la **maturité** encore inégale de l'écosystème, la question du **spectre** (bandes dédiées à l'industrie), la **cybersécurité** des environnements OT, et l'**intégration** avec les systèmes existants qui requiert de nouvelles compétences.

Les perspectives sont néanmoins prometteuses. La **5G-Advanced** (Release 18 et au-delà) renforce l'URLLC, le positionnement précis et l'efficacité énergétique, tandis que les travaux vers la **6G** visent un déterminisme et une intelligence réseau encore accrus, consolidant le rôle du sans-fil au cœur de l'usine du futur.

8. Conclusion

La 5G constitue un tournant pour l'Internet des Objets Industriel : pour la première fois, une technologie sans fil unique adresse conjointement le temps réel critique (URLLC), la connexion massive (mMTC) et le très haut débit (eMBB), tout en offrant, grâce au slicing, au TSN, aux réseaux privés et au MEC, le déterminisme et la souveraineté qu'exige l'industrie. Notre plateforme de supervision Sparkplug B illustre comment une architecture IIoT standardisée peut concrètement s'appuyer sur ces apports. Loin d'être une simple évolution du débit mobile, la 5G se révèle être un *facilitateur structurant* de l'Usine 4.0.

Références

[1] UIT-R, *Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*, Rapport M.2410-0, 2017.

[2] 3GPP, *TS 22.261 : Service requirements for the 5G system.*

[3] 3GPP, *TS 23.501 : System architecture for the 5G System (5GS).*

[4] 3GPP, *Release 16 : URLLC enhancements, 5G-TSN integration, Non-Public Networks*, 2020.

[5] 3GPP, *Release 17 : Reduced Capability (RedCap) devices*, 2022.

[6] 5G-ACIA, *5G for Connected Industries and Automation*, White Paper, 2e éd.

[7] IEEE 802.1, *Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group.*

[8] Eclipse Foundation, *Sparkplug Specification*, version 3.0, 2022.

[9] OASIS, *MQTT Version 5.0*, Standard, 2019.

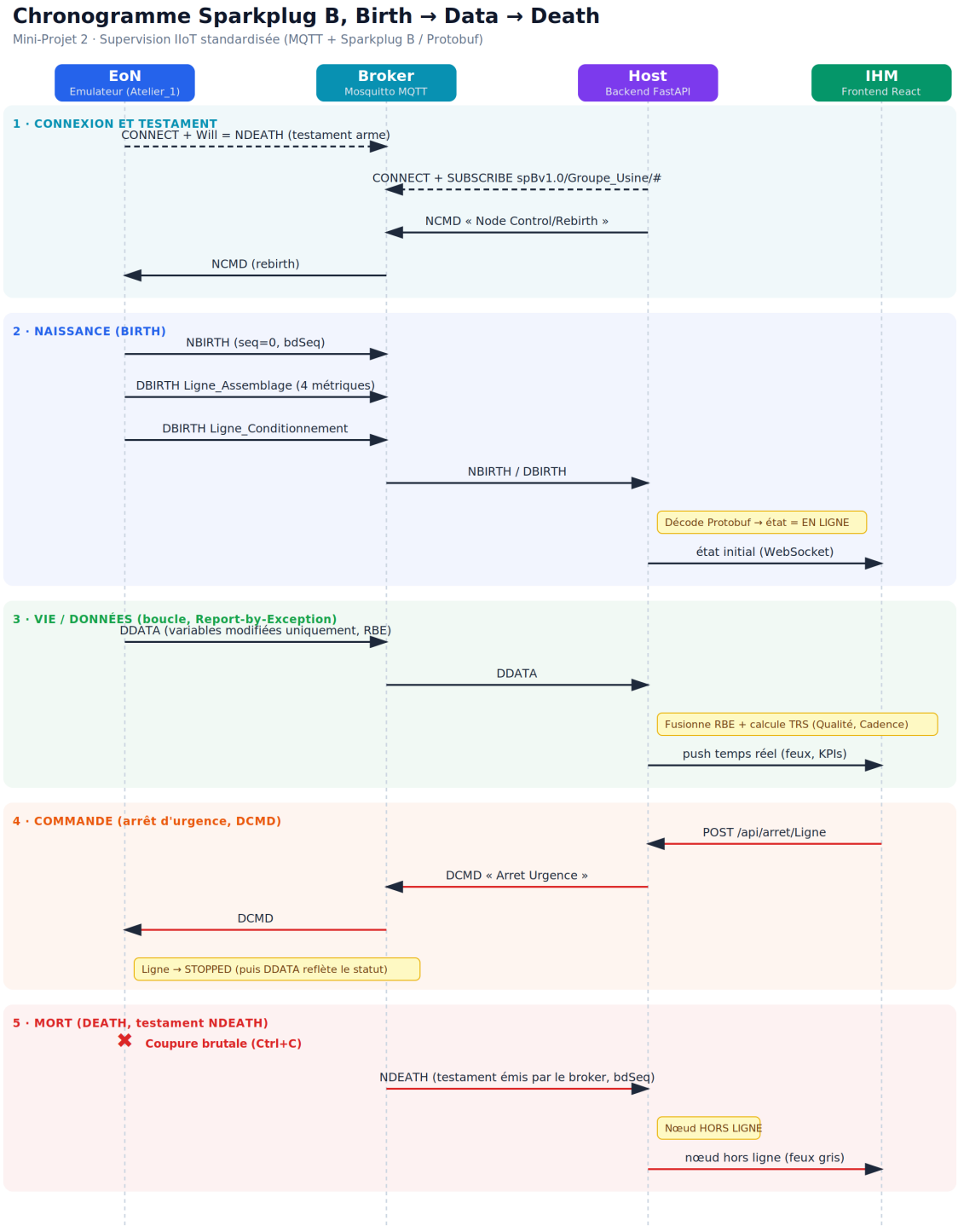


FIGURE 2 – Chronogramme des messages Sparkplug B échangés : naissance, données et mort.