

NB-IoT

**Boukouiss Samia
Benchekroun Amine
Diani Badr**

5 ISS

Introduction

Le Narrowband Internet of Things (NB-IoT) est une technologie sans fil spécialisée, conçue pour répondre aux exigences uniques des applications de l'Internet des Objets (IoT). Fonctionnant sur des fréquences radio spécifiques et utilisant des techniques de modulation de signal adaptées, le NB-IoT est optimisé pour une faible consommation d'énergie et une large couverture, offrant une connectivité efficace et fiable pour une grande variété d'appareils IoT.

Dans le paysage en pleine expansion de l'IoT, où des dispositifs allant des capteurs aux appareils intelligents sont interconnectés, le besoin de communication fiable et fluide est devenu essentiel. Les réseaux cellulaires traditionnels s'avèrent souvent insuffisants dans les scénarios IoT, en raison de préoccupations liées à l'efficacité énergétique et à la nécessité d'une couverture étendue, en particulier dans les zones éloignées ou difficiles d'accès.

Le NB-IoT se présente comme une solution conçue spécifiquement pour relever ces défis. Alors que le nombre d'appareils connectés continue de croître de manière exponentielle, le besoin d'une option de connectivité à la fois économe en énergie et capable de fournir une communication longue portée devient crucial. Le NB-IoT répond à cette demande en offrant une solution rentable, économe en énergie et évolutive, se positionnant comme un acteur clé dans l'expansion continue des écosystèmes IoT.

Dans cette exploration, nous plongerons dans les principales couches du NB-IoT, incluant ses couches physique, MAC et réseau. Ce faisant, nous découvrirons comment le NB-IoT atteint un équilibre parfait entre efficacité énergétique et connectivité robuste, facilitant un futur où les appareils IoT sont plus interconnectés et intégrés de manière transparente.

I. Principales caractéristiques et fonctionnalités du NB-IoT

1) Faible consommation d'énergie

L'efficacité énergétique du NB-IoT est obtenue grâce à des fonctionnalités telles que le mode d'économie d'énergie (PSM) et la réception discontinue étendue (eDRX). Le PSM, introduit dans la version 12, permet aux appareils de rester enregistrés sur le réseau tout en entrant en sommeil profond, ce qui réduit la consommation d'énergie. Par ailleurs, l'eDRX, ajouté dans la version 13, allonge le cycle de sommeil de l'appareil et réduit les réveils inutiles, améliorant ainsi l'accessibilité en réception. Ensemble, ces fonctionnalités prolongent la durée de vie de la batterie des appareils IoT, avec des simulations montrant qu'une batterie de 5 Wh peut durer jusqu'à 12,8 ans dans des conditions optimales.

2) Couverture améliorée et faible sensibilité à la latence

Le NB-IoT offre une couverture supérieure, atteignant jusqu'à 164 dB de perte de couplage pour les modes de déploiement indépendants. La couverture est encore renforcée par des mécanismes tels que les retransmissions et la modulation à basse fréquence, garantissant une transmission de données fiable même dans des environnements difficiles. Bien que l'augmentation des retransmissions puisse accroître la latence, le NB-IoT peut tout de même prendre en charge des scénarios à faible latence, atteignant une latence de seulement 6 secondes pour une perte de couplage élevée, avec un taux de fiabilité de 99 % dans des scénarios de transmission irrégulière.

3) Réseau NB-IoT

Le réseau NB-IoT (illustré dans la Fig. 1) est composé de cinq composants principaux :

- Terminal NB-IoT: Les appareils IoT dans divers secteurs peuvent se connecter au réseau à l'aide d'une carte SIM compatible.
- Station de base NB-IoT: Les stations de base existantes des opérateurs de télécommunications prennent en charge le NB-IoT, y compris tous les modes de déploiement.
- Réseau central NB-IoT: La station de base se connecte au cloud NB-IoT via ce réseau central.
- Plateforme cloud NB-IoT: Cette plateforme traite les données et les transmet au centre d'affaires ou au terminal approprié.
- Centre d'affaires vertical: Ce centre gère les données de service et contrôle le terminal NB-IoT.

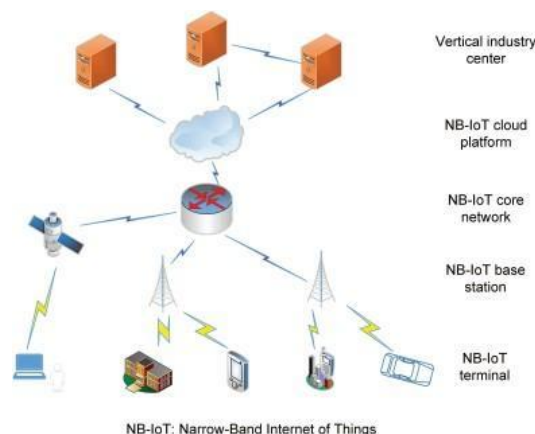


Figure 1 - Réseau NB-IoT

4) Puissance de couverture supérieure

Le NB-IoT excelle en termes de couverture en offrant une connectivité améliorée pour les applications IoT pouvant tolérer une latence plus élevée. La technologie utilise l'Amélioration de la Couverture (CE), un mécanisme basé sur la répétition qui prolonge sa portée de couverture. Son fonctionnement en bande étroite garantit une utilisation efficace du spectre et crée un environnement de communication stable. De plus, une puissance de transmission accrue renforce davantage la connectivité, assurant la livraison fiable et sécurisée des messages, ce qui est essentiel pour les applications IoT critiques.

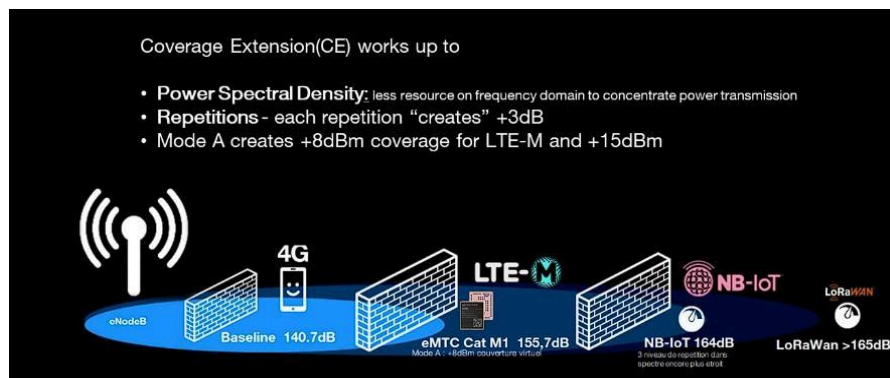


Figure 2 - Amélioration de la Couverture

II. Architecture du réseau NB-IoT

1) Pile de protocoles

Le NB-IoT est une technologie qui repose sur une pile de protocoles divisée en deux plans : le plan utilisateur et le plan de contrôle. Le plan utilisateur (Figure 3) assure le transport des données entre les couches supérieures (applications) et la couche physique. Cette dernière facilite l'échange de données entre l'appareil et la station de base, avec des fonctions de détection, correction d'erreurs et synchronisation. La couche MAC gère l'accès au réseau en organisant l'envoi des données et en corrigeant les erreurs via des retransmissions automatiques, tandis que la couche RLC est responsable du transfert, de la segmentation et du réassemblage des données, ainsi que de la détection des doublons. La couche PDCP s'occupe de la gestion des en-têtes, de la compression, du chiffrement et de la protection des communications. Le plan de contrôle (Figure 4), quant à lui, gère la signalisation et la gestion des connexions, y compris l'authentification, la mobilité et la sécurité des communications. La couche RRC établit et configure les connexions radio nécessaires pour échanger des données, tandis que la couche NAS prend en charge l'authentification, la gestion des sessions de données et la mobilité entre l'appareil et le cœur du réseau.

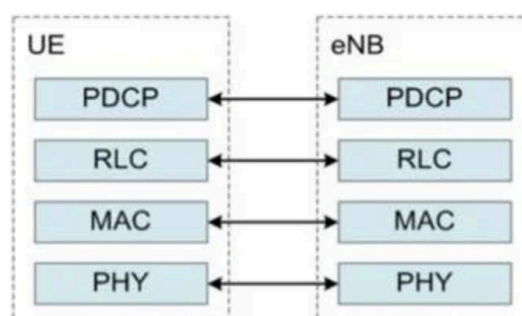


Figure 3 - Pile de protocoles NB-IoT - Plan utilisateur

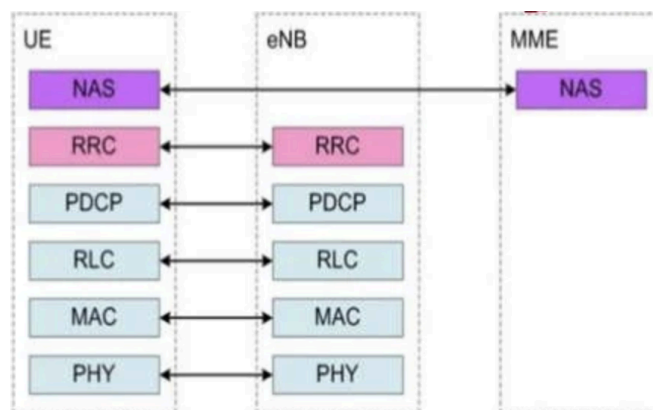


Figure 4 - Pile de protocoles NB-IoT - Plan de contrôle

2) Couche physique

Le NPUSCH (Narrowband Physical Uplink Shared Channel) en NB-IoT est responsable de la transmission des données utilisateur en liaison montante et des informations de contrôle dans le système LTE NB-IoT, ainsi que du transport des accusés de réception HARQ pour le NPDSCH. Le NPUSCH fonctionne selon deux formats :

- Format-1 : conçu pour la transmission de données en liaison montante, il prend en charge les transmissions multi-tons (avec 3 ou 6 tons) et monotone (à 3,75 kHz ou 15 kHz). Il utilise la correction d'erreurs via le codage turbo LTE, avec une taille maximale de bloc de transport de 1000 bits. Les schémas de modulation utilisés incluent le $\pi/2$ -BPSK et le $\pi/4$ -QPSK pour la transmission monotone afin de réduire le PAPR (rapport de puissance crête à puissance moyenne).
- Format-2 : utilisé pour le signalement des accusés de réception HARQ, il emploie un code à répétition pour la correction d'erreurs. Il prend également en charge la transmission monotone et utilise les trois symboles du milieu pour l'estimation de canal.

Les deux formats utilisent la même numéroteur et la même structure OFDM avec 7 symboles par slot, bien qu'ils diffèrent dans la gestion des signaux de données et de contrôle.

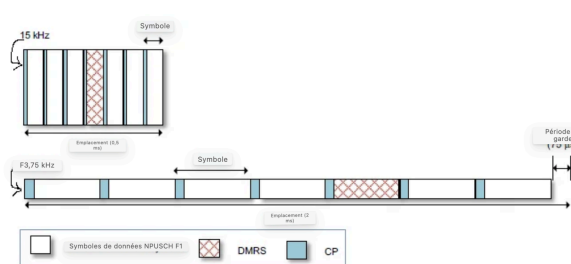


Figure 5 - NPUSCH Format-1

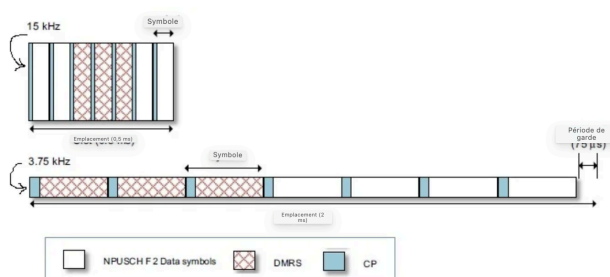


Figure 6 - NPUSCH Format-2

3) Couche MAC

La couche MAC (Contrôle d'Accès au Support) est responsable de la gestion des échanges de données entre l'UE (équipement utilisateur) et le réseau, facilitant ainsi l'accès aux cellules et la connexion avec la couche RRC. Elle utilise l'OFDMA pour le lien descendant, avec un espacement de sous-porteuses de 15 kHz, et le SC-FDMA pour le lien montant, avec des espacements de 3,75 kHz en monotonal et 15 kHz en multi-tonal. Elle assure la fiabilité des données via la gestion des retransmissions HARQ en cas d'erreur. Le multiplexage permet la

transmission simultanée de plusieurs canaux logiques sur un même canal physique, tandis que le RACH gère l'accès initial au réseau. L'ajustement temporel compense les délais pour maintenir la synchronisation des transmissions. Enfin, la couche MAC optimise les transmissions avec la sélection des formats de blocs et la gestion des priorités, tout en planifiant l'allocation des ressources pour les canaux partagés entre l'UE et le réseau.

4) Topologie de réseau

La topologie en étoile présente des avantages majeurs comme la communication directe entre chaque nœud et un hub central, ce qui permet une transmission rapide et des performances réseau prévisibles. Cela facilite également la gestion des nœuds défectueux grâce à des connexions distinctes pour chaque dispositif. Cependant, elle souffre d'un point de défaillance unique qui signifie que si le hub tombe en panne, tout le réseau est affecté. De plus, cette topologie impose que tous les nœuds soient à portée du hub, limitant ainsi la taille du réseau et le rendant rigide face aux interférences radio. À l'inverse, la topologie maillée est plus résiliente grâce à ses multiples chemins de communication, ce qui permet de contourner les défaillances et d'étendre la portée du réseau. Elle est également plus adaptable aux environnements complexes avec des obstacles ou interférences RF. Toutefois, les communications multi-sauts augmentent la latence et rendent la gestion du réseau plus complexe, avec des nœuds nécessitant plus de puissance de traitement pour assurer le routage des données, ce qui élève la complexité et les coûts.

III. Modes de fonctionnement

Le système NB-IoT a été conçu avec une forte dépendance au système LTE, permettant d'optimiser l'interface radio du NB-IoT pour assurer une coexistence harmonieuse avec les porteuses LTE tout en maintenant les standards de performance du LTE. Dans ce cadre, le 3GPP a défini trois modes de fonctionnement distincts pour le NB-IoT :

1. **Mode In-Band** : Dans ce mode, le signal NB-IoT utilise un bloc de ressources physiques (PRB) de la bande passante LTE. Cette approche facilite l'intégration transparente avec les réseaux LTE existants et permet des économies de coûts.
2. **Mode Guard-Band** : En mode Guard-Band, le signal NB-IoT occupe un PRB dans la bande de garde inutilisée de la bande passante LTE. Ce mode est conçu pour optimiser l'utilisation spectrale tout en évitant les interférences avec les canaux LTE.
3. **Mode Stand-Alone** : Dans le mode Stand-Alone, le signal NB-IoT utilise le spectre libéré du système de communication mobile mondial (GSM). Plus précisément, le signal NB-IoT occupe 180 kHz au sein de la porteuse GSM de 200 kHz, avec une bande de garde de 10 kHz de chaque côté du spectre.

Le mode de fonctionnement In-Band se distingue comme le plus avantageux. Il présente des avantages tels que des économies de coûts et une intégration facile dans les réseaux LTE existants. Cependant, il comporte une contrainte : la porteuse d'ancrage NB-IoT est limitée à un ensemble prédéfini de porteuses possibles. De plus, une restriction s'applique dans tous les modes : les six PRBs centraux du système LTE sont systématiquement interdits à l'utilisation par le NB-IoT. Cette limitation est mise en place pour éviter les conflits entre les transmissions NB-IoT et les canaux et signaux critiques de LTE, y compris le canal de diffusion physique et les signaux de synchronisation. Cette allocation prudente garantit l'intégrité et le bon fonctionnement du NB-IoT et de LTE au sein du spectre partagé.

IV. Sécurité dans le NB-IoT

La sécurité du NB-IoT est cruciale pour assurer la robustesse de son infrastructure IoT. Elle repose sur plusieurs protocoles couvrant divers aspects essentiels.

Confidentialité des données et cryptographie : Le NB-IoT utilise l'Advanced Encryption Standard (AES) pour chiffrer les données, protégeant ainsi leur intégrité et empêchant les accès non autorisés.

Authentification des appareils : Des protocoles comme EAP et EAP-TLS assurent l'authentification sécurisée des appareils via des certificats X.509, garantissant l'intégrité des appareils connectés.

Protection contre les attaques : Le NB-IoT utilise IPsec pour sécuriser les communications IP et DNSSEC pour renforcer l'intégrité des systèmes de noms de domaine, protégeant contre les attaques de type déni de service (DoS).

Gestion des clés et identités : La PKI gère l'émission des certificats et des clés cryptographiques, assurant l'authentification sécurisée, tandis que OAuth garantit des échanges de données protégés.

Conformité aux normes : Le NB-IoT respecte les standards de sécurité définis par le 3GPP, renforçant la sécurité contre les vulnérabilités potentielles.

V. Applications pratiques, consommation d'énergie et défis

1) Applications pratiques

Le NB-IoT démontre une adaptabilité exceptionnelle dans divers cas d'usage IoT. Sa combinaison de faible consommation d'énergie, de large couverture et de connectivité optimisée en fait une solution polyvalente pour une gamme étendue d'applications, notamment :

- **Surveillance de la santé à distance** : Permet de suivre en temps réel les paramètres vitaux des patients via des dispositifs médicaux connectés, offrant une surveillance continue et une réactivité accrue en cas d'anomalie.
- **Gestion des compteurs intelligents** : Utilisé pour la lecture et la gestion à distance des compteurs de gaz, d'eau et d'électricité, ce qui réduit les erreurs et améliore l'efficacité sans intervention manuelle.

2) Consommation d'énergie

La technologie NB-IoT offre une connectivité à faible consommation d'énergie sur un réseau étendu (LPWAN) pour les appareils IoT, permettant ainsi une autonomie de plusieurs années avec une seule batterie. La consommation d'énergie varie selon les conditions du réseau, les caractéristiques de l'appareil et les besoins de l'application.

Parameter	Typical Value
Transmit power	20-23 dBm
Receiver sensitivity	-129 to -139 dBm
Data rate	20-250 kbps
Sleep current	2-3 uA
Idle current	6-12 mA
Active current	150-180 mA

Figure 7 - Paramètres de consommation d'énergie du NB-IoT

En NB-IoT, il existe trois modes clés d'économie d'énergie : le mode d'économie d'énergie (PSM), la réception discontinue étendue (eDRX) évoqués à la partie I et le mode inactif RRC (RAI). Chaque mode offre différents niveaux d'efficacité énergétique en fonction de l'activité de l'appareil et de ses besoins en communication.

3) Power Saving Mode (PSM)

En NB-IoT, le mode d'économie d'énergie (PSM) est largement utilisé pour réduire la consommation d'énergie en mettant l'appareil en veille profonde, avec un réveil occasionnel pour vérifier les messages. Ce mode est idéal pour des applications telles que la télérelève et la surveillance environnementale, où les transmissions sont peu fréquentes, permettant des économies d'énergie significatives en maintenant l'appareil inactif la majorité du temps.

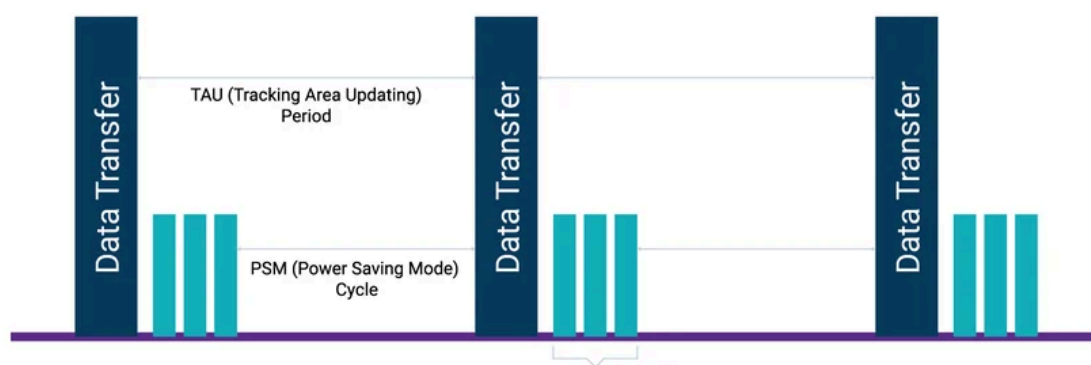


Figure 8 - Représentation du cycle PSM

4) Extended Discontinuous Reception (eDRX):

Le mode de réception discontinue étendue (eDRX) en NB-IoT permet à un appareil de rester en veille tout en vérifiant périodiquement la présence de nouvelles données. Contrairement au PSM, l'eDRX offre des périodes de veille plus longues, avec des réveils intermittents pour analyser les données entrantes. Ce mode convient aux applications nécessitant des réceptions de données plus fréquentes, sans nécessiter une connexion continue, comme les systèmes de stationnement intelligent qui vérifient régulièrement la disponibilité des places.

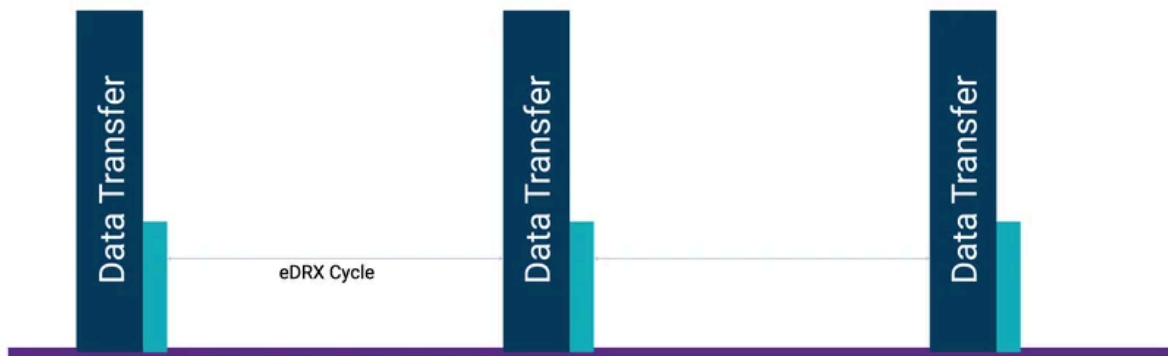


Figure 9 - Representation of eDRX cycle

5) RRC Inactive (RAI):

Le mode RRC Inactive (RAI) en NB-IoT est le plus économe en énergie, permettant à l'appareil de désactiver toutes les fonctions radio et de se mettre en veille prolongée. Il ne se réveille qu'à des intervalles prédéfinis pour vérifier les messages, avec des périodes de sommeil plus longues que le PSM ou l'eDRX. Ce mode est adapté aux usages tels que le suivi des actifs ou l'agriculture intelligente, nécessitant des transmissions peu fréquentes. Cependant, il peut entraîner une latence accrue, car l'appareil doit se reconnecter au réseau à chaque réveil.

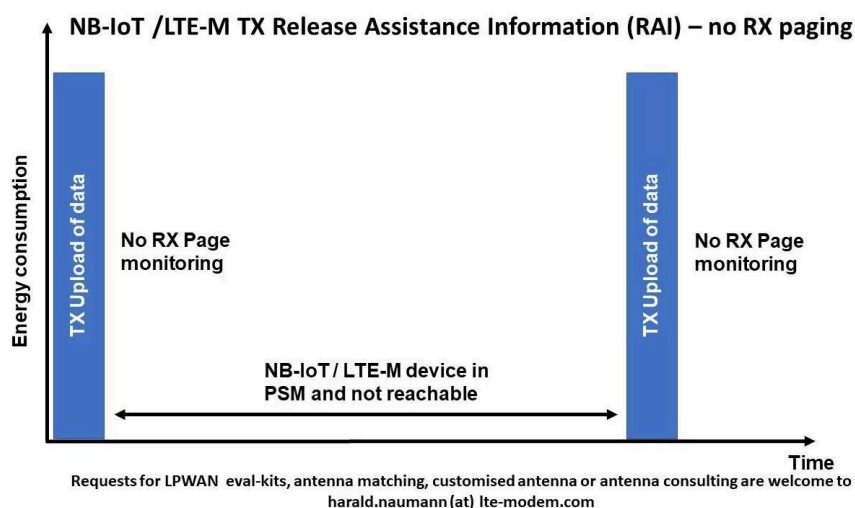


Figure 10 - Representation of RAI cycle

En fin de compte, les appareils NB-IoT offrent divers compromis entre latence et consommation d'énergie en fonction du mode d'économie d'énergie sélectionné. En comprenant les détails techniques de chaque mode, les fabricants d'appareils IoT peuvent

concevoir des dispositifs NB-IoT écoénergétiques qui équilibrent la durée de vie prolongée de la batterie avec une communication fiable, en choisissant le mode approprié en fonction des besoins spécifiques de communication de l'appareil.

Mode	Description	Power consumption mW)	Latency (ms)
PSM	Puts the device into a deep sleep mode when it is not actively transmitting or receiving data.	0.1 – 1	2 – 10
eDRX	Extends the sleep duration of the device to reduce power consumption.	1 – 10	50 – 1000
RAI	Allows the device to release the radio resources after transmission to save power.	5 – 50	10 – 100

Figure 11 - Modes d'économie d'énergie dans les dispositifs NB-IoT

Le NB-IoT se distingue par son efficacité énergétique, ne nécessitant que 1,51 mJ/B pour transmettre 100 bits et environ 0,32 mJ/B pour des volumes de données plus importants, comme 1000 octets. Cette performance énergétique en fait une solution idéale pour les applications IoT nécessitant une faible consommation d'énergie.

6) Identification des défis potentiels dans la mise en œuvre du NB-IoT

Le NB-IoT présente de nombreux avantages, mais plusieurs défis doivent être surmontés pour une mise en œuvre réussie. La couverture réseau doit être fiable pour garantir des performances optimales, notamment dans les zones éloignées ou difficiles d'accès. L'interopérabilité entre différents appareils IoT reste un enjeu complexe, malgré les efforts pour établir des normes. De plus, les coûts initiaux de déploiement peuvent être élevés, bien que compensés par des gains d'efficacité et de réduction des coûts à long terme. Surmonter ces défis est crucial pour exploiter pleinement le potentiel du NB-IoT et répondre aux besoins variés de l'écosystème IoT.

VI. Solutions et perspectives futures

Comme dit précédemment, le NB-IoT transforme l'Internet des objets grâce à sa connectivité étendue et sa faible consommation d'énergie. Toutefois, des défis restent à surmonter :

- **Extension de la couverture réseau** : La couverture reste un obstacle dans les environnements complexes. L'intégration de technologies de transmission à faible puissance et de solutions hybrides peut renforcer la portée des signaux et assurer une transition fluide entre différents réseaux.
- **Interopérabilité et sécurité des appareils** : Les défis d'interopérabilité et de sécurité nécessitent des standards avancés et des protocoles de chiffrement robustes. Les passerelles multi-protocoles facilitent la communication entre divers appareils.
- **Optimisation des coûts de déploiement et de maintenance** : Les coûts de maintenance et d'exploitation peuvent être réduits par l'automatisation des configurations et l'utilisation de dispositifs modulaires et évolutifs.
- **Perspectives d'avenir** : L'optimisation énergétique avec des capteurs solaires et la miniaturisation des composants ouvrent la voie à des dispositifs plus performants et diversifiés. Les collaborations dans les secteurs de l'énergie et de la logistique favoriseront l'intégration du NB-IoT pour la gestion des infrastructures critiques et des chaînes d'approvisionnement.

Conclusion

En conclusion, le NB-IoT se positionne comme une solution innovante et efficace pour répondre aux besoins de l'Internet des Objets, grâce à sa faible consommation d'énergie, sa couverture étendue et sa capacité à supporter un grand nombre de connexions. Malgré les défis liés à la couverture réseau, à l'interopérabilité des appareils et aux coûts initiaux de déploiement, ses avantages en termes de fiabilité et d'efficacité énergétique en font une technologie incontournable pour les applications IoT. Avec des améliorations continues et des efforts pour surmonter ces obstacles, le NB-IoT est bien placé pour jouer un rôle clé dans l'avenir des écosystèmes IoT, contribuant ainsi à une meilleure connectivité et à des applications diversifiées et durables.

VI. Références

- [1] NB-IoT Protocol Stack | LTE-NB Protocol Stack. (s. d.).
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LTE-NB-IoT-Protocol-Stack.html>
- [2] Emmanuel M. Migabo et al, The narrowband Internet of Things (NB-IoT) resources management performance state of art, challenges, and opportunities. (2020). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9097268?denied=>
- [3] Matthieu Kanj, Vincent Savaux, Mathieu Le Guen. A Tutorial on NB-IoT Physical Layer Design. Communications Surveys and Tutorials, IEEE Communications Society, 2020,10.1109/COMST.2020.3022751 . hal-02952155
- [4] Security Features of LTE-M and NB-IoT
<https://www.narrowband.com/nbiot-glossary/security-features-of-lte-m-and-nb-iot>
- [5] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9968879>
- [6] Security Features of LTE-M and NB-IoT Network
<https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/internet-of-things/wp-content/uploads/2019/09/Security-Features-of-LTE-M-and-NB-IoT-Networks.pdf>
- [7] An empirical study of Cellular-IoT Master's thesis in Communication Engineering
TIM EKMAN SAMUEL JÖNSSON
<https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/2a0fdb3e-cdeb-4d92-b17a-0f633b37bb49/content>
- [8] Optimizing Power Consumption in NB-IoT Devices: A Deep Dive into Power Saving Modes by Mohamed Idrissi
<https://5ghub.us/optimizing-power-consumption-in-nb-iot-devices-a-deep-dive-into-power-saving-modes>
- [9] What are PSM and eDRX features in LTE-M and NB-IoT?
- [10] Fonction LTE NB-IoT NPUSCH, LTE NB NPUSCH Format-1, NPUSCH Format-2
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LTE-NB-IoT-NPUSCH.html>
- [11] Topologie de mise en réseau Star vs. Mesh : Principes fondamentaux de la connectivité sans fil IoT
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/star-vs-mesh-networking-topology-internet-of-things-wireless-connectivity-fundamentals/>
- [12] LTE MAC Layer Overview
<https://techlteworld.com/lte-mac-layer-overview/>
- [13] <https://www.giga-concept.fr/technologies/reseau-nb-iot/>