



un couteau suisse (1)

le protocole LoRa et ses avantages

Gilles Brocard (France)

Cet article propose la mise en pratique du protocole de transmission LoRa en utilisant des modules Ebyte exploitant le circuit LLCC68 de Semtech avec des moyens simples et un budget restreint. Cette première partie présentera le protocole LoRa et ses avantages.

Aujourd'hui, transmettre et recevoir des données par onde radio est devenue si courant que nous n'y prêtons plus vraiment attention. La 3G, 4G et maintenant 5G nous permettent d'émettre et de recevoir de l'information à grand débit, mais sur des distances relativement courtes, de quelques centaines de mètres tout au plus. Le wifi et le Bluetooth c'est encore un peu moins. Mais, certains domaines ont des besoins différents. Prenons l'exemple d'un agriculteur qui souhaite envoyer des données à une centrale collectrice d'info de comptage d'animaux, ou de température locale (surveillance des gelées) ou toute autre activité nécessitant d'utiliser des mesures fournies par un capteur éloigné de plusieurs kilomètres. Pour répondre à ces besoins, des solutions ont été développées avec des innovations intéressantes, voir [1][2][3]. En substance, LoRa est un protocole de transmission de signal radio

qui utilise un format multisymbole « chirpé » pour transmettre des données. Les puces LoRa fonctionnent dans les bandes ISM et elles convertissent les radiofréquences en données. Pour cela, elles utilisent la technologie LoRa qui est une couche physique de niveau bas. Nous reviendrons plus avant sur ces différents termes.

L'utilisation de modules câblés est une solution simple permettant la transmission des données à faible débit entre deux points distants. La société Semtech [4] possède les brevets de LoRa, ce qui lui a permis de développer toute une gamme de circuits émetteur-récepteur LoRa.

Des modules tout prêts

Actuellement, le circuit le plus performant est le LLCC68, mais il n'est pas facile de l'utiliser. Tout d'abord, c'est un CMS très petit, 4 mm de côté pour 24 pattes, et donc très difficile à souder. Par ailleurs, il a besoin d'être entouré de composants RF compatibles avec le gigahertz, le tout sur un circuit imprimé adapté aux contraintes de ces hautes fréquences. La société chinoise Ebyte, spécialisée dans le domaine RF, a développé toute une famille de petits modules intégrant les circuits de Semtech. La gamme Ebyte se décline en de nombreux modèles. Les modèles E220-900T22D (**figure 1**) et E220-900T30D (**figure 2**) contiennent un LLCC68 flanqué d'un microcontrôleur intercalé entre le seul accès, le port de communication UART et le LLCC68. Cependant, ce micro empêche la communication directe avec le LLCC68, ce qui limite considérablement les possibilités de paramétrage du LLCC68. La **figure 3** montre, une fois le blindage retiré, le LLCC68, le micro (ARM CX32L003), un régulateur et un aiguilleur RX/TX en sortie RF. Tous les autres composants sont des résistances ou des condensateurs et des selfs HF ainsi qu'un oscillateur 32 MHz, piloté par quartz.



Figure 1. Le module E220-900T22D d'Ebyte.



Figure 2. Le module E220-900T30D intègre un amplificateur de puissance de 8 dB qui porte la puissance d'émission à 30 dBm soit 1 W.

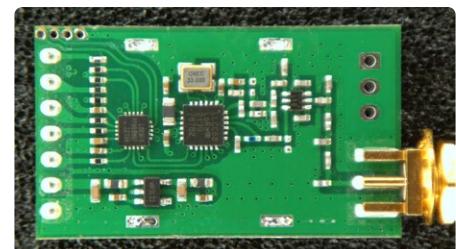


Figure 3. Le module E220-900T22D sans son blindage.



Figure 4. Les modules dont le nom se termine en 'S' offrent une sortie antenne IPEX / U.FL.

Les modules avec le radical '30' intègrent en plus un amplificateur de puissance de 8 dB qui porte la puissance d'émission à 30 dBm soit 1 W. Leurs dimensions sont légèrement supérieures et leur consommation nettement plus importante à pleine puissance (750 mA au lieu de 150 mA pour le modèle 22). Cette réserve de puissance peut être précieuse pour compenser les pertes de tout ordre apporté par les câbles et les raccords HF au voisinage du gigahertz.

Les deux modèles précédents ont une sortie antenne avec un connecteur SMA femelle, mais ces modules existent également avec une sortie antenne IPEX / U.FL, la référence se termine par 'S' à la place de 'D' (**figure 4**).

Sans microcontrôleur intégré

Le module que nous allons utiliser, le E220-900M30S, nous intéresse particulièrement, car il ne comporte aucun micro interposé sur les lignes de commandes. En effet, le LLCC68 est directement accessible via une liaison SPI, c'est ce qu'indique la lettre 'M'. Cela permet d'atteindre tous les paramètres du LLCC68, sans restriction, ce qui est essentiel pour exploiter pleinement tous les avantages de LoRa. Ce modèle, comme les précédents, existe pour différentes bandes de fréquence de 150 à 930 MHz. Nous avons fait le choix du modèle 900 qui couvre la bande 868 MHz, autorisée en France. Ce module peut facilement être acquis chez les principaux distributeurs pour un prix de l'ordre de 3 à 10 euros suivant le modèle, la puissance et le fournisseur. Nous combinons ce module, avec quelques composants périphériques, à un micro dont nous maîtrisons la programmation et pour

lequel nous pouvons créer des applications. Ainsi, nous allons pouvoir réaliser toute sorte de liaison LoRa et d'application intéressantes. Ce module deviendra votre couteau suisse LoRa.

Un peu plus sur LoRa

Le protocole LoRa permet des liaisons à des distances relativement importantes (plusieurs kilomètres) avec des puissances très faibles (quelques dizaines à centaines de milliwatts), mais, revers de la médaille, seulement pour des débits faibles. Dès que vous augmentez le débit (paramétrable), la portée se trouve réduite. Ce qui signifie que LoRa est très efficace pour des applications à faible débit telles que la transmission de commande de portail, la télécommande à très grande portée et la réception de capteurs distants qui ne demandent pas une réactualisation trop fréquente.

Nous avons fait le choix de la fréquence 868 MHz, car elle est libre en Europe sans être encombré comme l'est la bande 433 MHz. De plus, c'est la fréquence choisie pour le protocole LoRaWAN. Elle est réglementée comme toutes les bandes ISM (Industrielle, Scientifique et Médicale). L'avantage des bandes ISM est que, dans la mesure où vous respectez la réglementation européenne, l'émission de signaux radio peut être faite sans aucune déclaration préalable.

Le partage du spectre radioélectrique

Le spectre radioélectrique étant une ressource commune, il est donc nécessaire de le partager pour ne pas gêner les autres par nos transmissions et de ne pas être gêné par les leurs. LoRa utilise **trois** manières de partager une bande de fréquence :

Le partage fréquentiel : on divise la bande de fréquences disponibles en canaux contigus plus ou moins espacés (**figure 5**).

Le partage temporel : avec LoRa, les émissions peuvent et doivent être de courte durée et être espacées dans le temps. Dans ce cas, la même bande peut être utilisée successivement par plusieurs dispositifs.

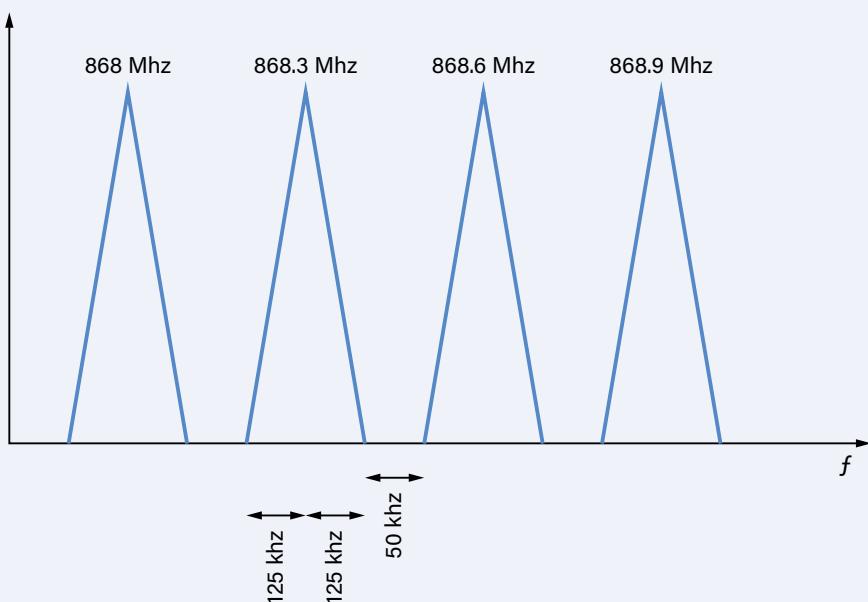


Figure 5. La modulation LoRa utilise une bande passante paramétrable. Cet exemple montre une bande passante BW de 250 kHz soit 125 kHz de part et d'autre de la fréquence centrale. L'excursion de la fréquence s'étendra donc de 868,175 MHz à 868,425 MHz pour la deuxième fréquence de 868,3 MHz.

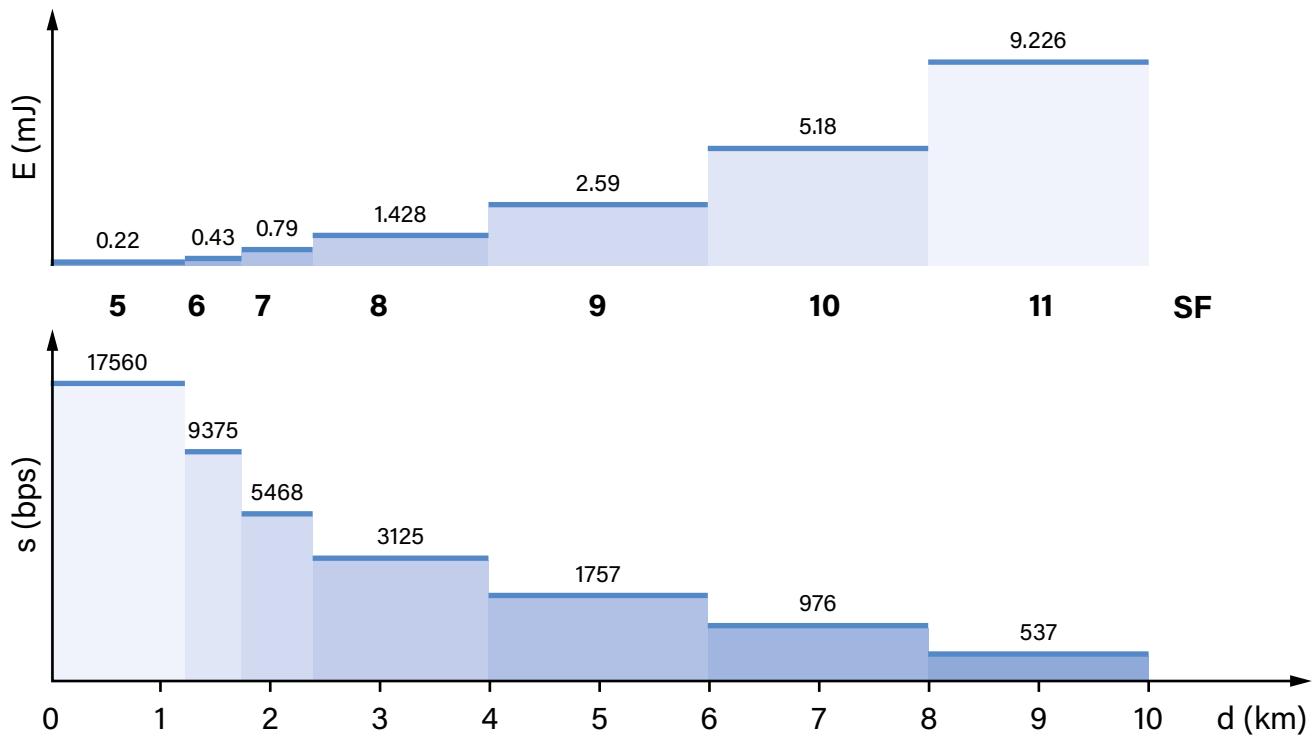


Figure 6. L'influence du Spreading Factor (SF, en gras) sur la vitesse de transmission et la portée (en bas), et la consommation (en haut).

Bien que cette technique soit sujette à des collisions, elle est très utilisée par la modulation LoRa. Une manière de limiter les collisions consiste à surveiller la bande de fréquence et n'émettre que lorsque la bande n'est pas utilisée avant de procéder à une émission. Le LLCC68 permet d'automatiser facilement cette procédure (voire RSSI plus loin).

Le partage par étalement du spectre : ce mode est spécifique à LoRa qui numérise le message à l'aide de *chirps* (excursions de fréquence) d'où le nom de cette modulation (CSS pour *Chirp Spread Spectrum*). Le LLCC68 permet de choisir entre sept codes d'étalement (*Spreading Factor*, SF dans la fiche technique). Les valeurs, de 5 à 11, dépendent de la bande passante choisie (figure 6). La SF est l'un des paramétrages importants de la modulation LoRa. Elle détermine notamment la portée, la vitesse de transmission et la consommation d'énergie lors de l'émission. La bande passante (BW) et le CR (*Code Rate*, redondance du codage) sont les deux autres paramétrages LoRa importants.

Le bilan de liaison

Le bilan de liaison (*link budget*) est l'écart entre la puissance d'émission maximum, ici 30 dBm, et le niveau minimal en entrée permettant la réception et le décodage d'un message (sensibilité), ici -129 dBm. Elle est valable pour le paramétrage le plus favorable avec BW = 125 kHz et avec le préampli de réception activé. Le budget de la liaison maximum est donc de $30 + 129 = 159$ dBm. La réglementation européenne limite la puissance d'émission à 14 dBm, ce qui produit, dans notre exemple, un bilan de liaison de $14 + 129 = 143$ dB.

Vous pouvez vous étonner que nous ayons choisi un module qui permette d'émettre avec une puissance de 30 dBm (1 W) alors que la réglementation européenne n'autorise que 14 dBm (25 mW). En fait, ces 14 dBm sont la puissance rayonnée par l'antenne. Mais, entre la sortie HF du module et l'antenne, il y a de nombreuses causes

d'atténuations qui réduiront la puissance atteignant l'antenne. Si par bonheur, il vous reste une puissance d'émission trop importante, et que vous pouvez la mesurer, le paramétrage du module LoRa vous permettra de la réduire.

Un exemple pratique

- Émission : 14 dBm de puissance (limitation due à votre paramétrage).
- Gain de l'antenne d'émission : +2,15 dBi (pour une antenne standard *ground plane* quart d'onde de 86 mm).
- Atténuation maximale du signal lors d'un parcours de 11 km dans l'air : -111,2 dB (voir la formule permettant le calcul de cette évaluation plus loin, la valeur négative indique l'atténuation).
- Gain de l'antenne de réception : +2,15 dBi (pour une antenne standard identique *ground plane* quart d'onde de 86 mm).
- Sensibilité du récepteur (LLCC68 pour BW = 125 kHz, SF = 7), gain max en réception : -124 dBm (fiche technique, page 19, à la première ligne du paragraphe *Sensitivity LoRa*).
- Ajoutons -5 dB pour les pertes dues aux liaisons (câbles, connexions, etc.) pour le module émetteur et -5 dB pour les pertes dues au récepteur.

Le bilan de liaison peut être obtenu simplement en additionnant les valeurs en dBm, dBi et dB, c'est tout l'intérêt des décibels :

$$14 + 2,15 - 111,2 + 2,15 - 5 - 5 = -102,9 \text{ dBm}$$

Cette valeur est largement supérieure au seuil de 124 dBm qui est le seuil de réception LoRa de ce module (sensibilité du récepteur). Nous avons une marge de 21,1 dBm entre les deux, ce qui doit nous permettre de recevoir un signal exploitable.



Une spécificité LoRa, le facteur d'étalement (Spreading Factor ou SF)

SF	Chirps	SNR	BW 125 kHz	BW 250 kHz	BW 500 kHz
5	32	-2,5	oui	oui	oui
6	64	-5	oui	oui	oui
7	128	-7,5	oui -124 dBm	oui -121 dBm	oui -117 dBm
8	256	-10	oui	oui	oui
9	512	-12,5	oui -129 dBm	oui	oui
10	1024	-15	non	oui -129 dBm	oui
11	2048	-17,5	non	non	oui -127 dBm

Tableau 1. La synthèse des mesures présentées sur la page 19 de la fiche technique du LLCC68 concernant le facteur d'étalement, *Spreading Factor* en anglais.

Première colonne

Le facteur d'étalement SF dépend de la bande passante BW. Par exemple, pour BW = 125 kHz, SF peut avoir une valeur comprise entre 5 et 9, pour BW = 250 kHz la valeur 10 peut également être utilisée et pour BW = 500 kHz la valeur 11.

Troisième colonne

Le rapport signal sur bruit (SNR) en fonction de la valeur du paramètre SF.

Ne soyez pas étonné de voir des rapports SNR négatifs, car le démodulateur LoRa est capable de récupérer un signal largement sous le niveau du bruit RF. Par exemple, à BW = 500 kHz et SF = 11, le signal récupérable peut-être 17,5 dB en dessous du bruit. Cela veut dire que le signal peut être 56 fois plus faible que le niveau du bruit radio...

Deuxième colonne

La deuxième colonne va limiter notre enthousiasme, car elle donne la taille du codage de la transmission pour atteindre ces performances. Le temps de transmission est directement proportionnel à ces valeurs, et donc la consommation d'énergie aussi. La consommation instantanée du module reste constante, elle se produit simplement pendant un temps plus long.

Quatrième, cinquième et sixième colonne

Pour BW = 125 kHz et pour SF = 7 le LLCC68 est capable d'extraire la partie utile (*payload*) à partir d'un signal reçu de -129 dBm (79 nV_{RMS}). Cette valeur est particulièrement faible, le LLCC68 est extrêmement sensible pour la partie analogique et très performante pour la partie numérique appliquant le protocole LoRa !

Évaluation de la portée

En faisant abstraction des parasites électromagnétiques ambients, ce qui n'est évidemment jamais totalement possible en pratique, il est possible de calculer la distance théorique maximum d'une liaison. La formule donnant la distance est :

$$\text{distance} = \sqrt{\frac{10^{\frac{(\text{Link Budget})}{10}}}{1755 \cdot \text{frequency}^2}}$$

Link budget est le budget de liaison du module utilisé pour notre exemple, en respectant la norme européenne est de 143 dBm.

Frequency est la fréquence du module : 868 MHz.

Distance est la portée en kilomètres (hors bruit HF).

En respectant la réglementation européenne, la valeur du bilan de liaison maximum de 143 dB avec notre E220-900M30S en 14 dBm, le calcul donne une portée de 388 km. Mais, arrêtons de rêver,

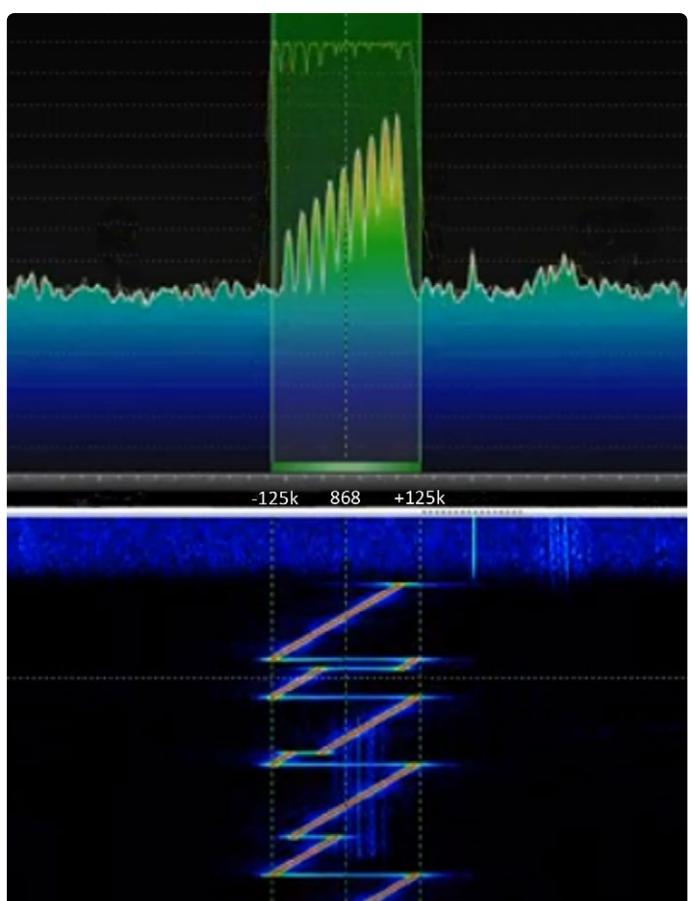


Figure 7. Il est possible de visualiser directement la modulation LoRa avec un logiciel SDR et une clé SDR associée. Ici, nous voyons la modulation pour une fréquence de 868 MHz avec une bande passante de 250 kHz. La lenteur de la transmission LoRa permet de voir la modulation du codage des symboles. Tout en haut de l'image, l'axe vertical est gradué en puissance moyenne du signal (dBm) et l'axe horizontal en fréquence. Dans la partie basse de l'image, on peut observer le déroulement de la transmission en fonction du temps avec les variations de fréquence caractéristiques de la modulation LoRa.

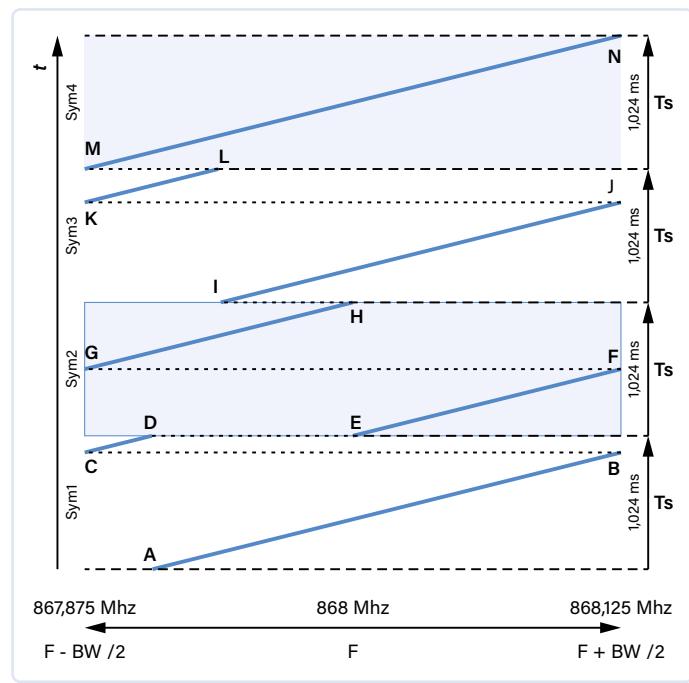


Figure 8. Ce chronogramme montre la transmission de quatre symboles avec SF = 8 et BW = 250 kHz. Attention, le temps est représenté par l'axe vertical, la fréquence occupe l'axe horizontal.

cette distance, toute théorique, ne sera jamais atteinte en pratique. Néanmoins, dans de bonnes conditions, une distance maximale entre 10 km et 20 km peut être atteinte, à vue et hors zones urbaines. À titre d'exemple, sachez qu'en avril 2020, une distance de 832 km a été atteinte par un module LoRa de performance tout à fait comparable au LLCC68. Toutefois, les conditions d'émission et de réception étaient très optimisées. En effet, à l'émission une antenne était accrochée à un ballon-sonde plafonnant à 38 km d'altitude et que la réception fut faite par une passerelle LoRaWAN située au milieu d'une zone montagneuse, donc plutôt bien isolée des parasites HF.

Transmission d'un symbole

Il est possible de visualiser directement la modulation LoRa avec un logiciel SDR et une clé SDR associée, comme le montre la **figure 7**. La **figure 8** est un chronogramme montrant la transmission de quatre symboles LoRa avec SF = 8 et BW = 250 kHz. Si notre fréquence centrale est 868 MHz, l'excursion de fréquence comporte $2^8 = 256$ incrément pour transiter de la fréquence minimum 867,875 MHz à la fréquence maximum 868,125 MHz.

Le codage de l'information de chaque symbole réside dans la valeur initiale de la fréquence du balayage linéaire de cette fréquence. Par exemple, pour le symbole 1, la fréquence de départ A, débute à 32/256 de l'excursion totale de la fréquence, le codage du symbole transmis sera donc 32. Pour le symbole 2, la fréquence de départ E, démarre à 128/256, le codage du symbole sera 128. Pour le symbole 3, la fréquence de départ I, commence à 64/256, le codage du symbole sera 64 et ainsi de suite. Pour le symbole 4, la fréquence de départ M débute à 0/256 et le codage du symbole est 0. Les valeurs des 4 symboles transmis sont donc successivement 32, 128, 64 puis 0.

L'excursion de fréquence est faite par de petits incrément qui ont une résolution qui dépend de la valeur de SF. Pour SF = 8, $2^8 = 256$, c'est-à-dire 256 intervalles, pour SF = 11, ils seraient au nombre de 2048. La durée de chaque incrément T_c dépend de la bande passante. Pour BW = 250 kHz, ils durent 4 µs, pour BW = 500 kHz leur valeur se réduit à 2 µs et 8 µs pour 125 kHz. C'est la raison pour laquelle, avec LoRa, le temps de transmission d'un message est inversement proportionnel à BW et, par contre, elle double pour chaque incrément de 1 de la valeur de SF.

Ce procédé de modulation, emprunté aux technologies RADAR, consiste en la transmission de symboles qui sont une excursion linéaire de fréquence d'une onde sinusoïdale autour d'une fréquence centrale. Ces balayages de fréquence sont appelés CHIRP (*Compressed High Intensity Radiated Pulse*). Pour LoRa seuls les chirps à croissance linéaire sont utilisés pour la transmission des symboles, comme celles qui relient les points M à N. Les chirps à décroissance linéaire de fréquence ne sont utilisés que pour la fin du préambule destiné à la synchronisation.

Le paquet LoRa

Le message transmis est intégré dans une trame physique qui est appelée paquet (*packet*). Elle se compose de quatre parties (**figure 9**) dont certaines sont optionnelles et/ou paramétrables :

1. Un préambule (preamble), toujours obligatoire, mais paramétrable. C'est une succession de plusieurs (en général huit) chirps croissants et de deux chirps décroissants. Ce préambule est indispensable pour que le récepteur puisse se synchroniser.
2. En-tête (header), optionnel. Il est présent par défaut si le mode explicite est choisi (absent avec le mode implicite). Il est toujours transmis avec un CR (*code rate*) de 4/8 pour avoir le maximum de chance d'être reçu. Il indique :
 - La taille des données (payload).
 - Le taux de code (*code rate* ou CR) utilisé pour le reste de la trame, entre 4/5 et 4/8, mais le taux 4/5 est le plus utilisé. Un taux de m/n veut dire que pour m bits d'information utile, le

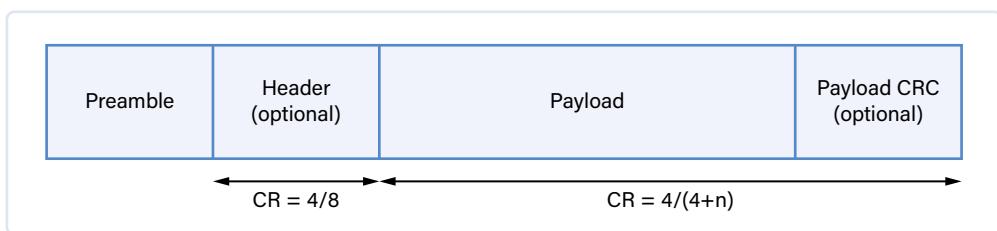


Figure 9. Le paquet LoRa est composé de quatre parties dont certaines sont optionnelles et/ou paramétrables.



codeur génère un total de n bits de données, dont $m-n$ bits sont redondants. Les bits redondants permettent de détecter des erreurs de transmission.

- - Il précise si un CRC (code d'erreur) est présent ou non.
- 3. Les données (payload). La taille maximale du paquet de données est de 256 octets. Elle dépend de la valeur du facteur d'étalement et du paramétrage du buffer. Plus SF a une forte valeur, plus la taille du paquet doit être faible. La durée maximum du message est limitée.
- 4. Un contrôle d'erreurs (CRC), optionnel. Il permet de savoir si les données, à la réception, sont complètes et sans erreur.

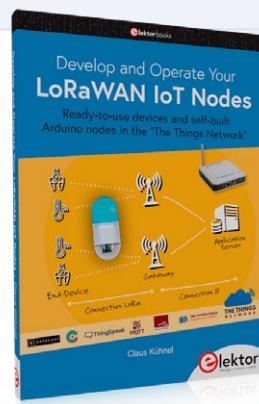
Dans la suite de cet article, nous présenterons le circuit imprimé intégrant le module LoRa E220-900M30S piloté par un Arduino Nano. Un programme C++ permet le paramétrage complet du LLCC68, mais surtout son utilisation en émission et réception pour la transmission de messages. Le réglage de la portée et de l'autonomie seront également détaillés avec SF, BW, CR, LDRO ainsi que les valeurs renvoyées par le récepteur, le RSSI, la sensibilité mesurée, le rapport signal sur bruit et les statistiques de réception (taux d'erreur). 

230140-04



Produits

- **Great Scott Gadgets HackRF One Software Defined Radio (1 MHz to 6 GHz)**
<https://www.elektor.fr/18306>
- **CircuitMess Chatter - DIY LoRa Communicator**
<https://www.elektor.fr/20407>
- **Claus Kühnel, Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes, Elektor 2023**
<https://www.elektor.fr/20147>



LIENS

- [1] R. Lacoste, « bruit et sensibilité des récepteurs - une introduction », Elektor 12/2016 :
<https://www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-201612/40006>
- [2] R. Lacoste, « LoRa - échange débit contre portée », Elektor 1/2017 :
<https://www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-201701/40060>
- [3] R. Lacoste, « LoRaWAN - architecture, protocole, sécurité et opérateurs », Elektor 3/2017 :
<https://www.elektormagazine.fr/magazine/elektor-201703/40245>
- [4] Semtech : <http://www.semtech.fr>

YOUR KEY TO
CELLULAR
TECHNOLOGY



WÜRTH
ELEKTRONIK
MORE THAN
YOU EXPECT

© eiSmart

Adrastea-I is a Cellular Module with High Performance, Ultra-Low Power Consumption, Multi-Band LTE-M and NB-IoT Module.

Despite its compact size, the module has integrated GNSS, integrated ARM Cortex M4 and 1MB Flash reserved for user application development. The module is based on the high-performance Sony Altair ALT1250 chipset. The Adrastea-I module, certified by Deutsche Telekom, enables rapid integration into end products without additional industry-specific certification (GCF) or operator approval. Provided that a Deutsche Telekom IoT connectivity (SIM card) is used. For all other operators the module offers the industry-specific certification (GCF) already.

www.we-online.com/gocellular

- Small form factor
- Security and encryption
- Long range/wordwide coverage
- Multi-band support

#GOCELLULAR