**TD Etude de la structure matérielle associée à la fonction**

**« Emission-Réception Radio Fréquences »**

**Objectif**: étudier la structure matérielle associée à la fonction « Emission-Réception Radio Fréquences » afin d’être en mesure, ultérieurement, de concevoir le programme assurant la transmission d’une information depuis la carte End Device à destination de la passerelle et inversement, la réception et le décodage d’une information en provenance de la passerelle et à destination de la carte End Device.

**Consignes** : avant de répondre aux questions de ce TD, prendre connaissance, en s’aidant du logiciel de traduction en ligne DeepL si nécessaire, de la documentation :

* du module Radio Fréquences **RF-LORA-868-SO** intégré sur la carte End Device (<https://www.rfsolutions.co.uk/downloads/1538123141DS-RFLoRa-7.pdf>) ;
* du composant transceiver LoRa **SX1272** implanté sur le module RF-LORA-868-SO (<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/440000001NCE/v_VBhk1IolDgxwwnOpcS_vTFxPfSEPQbuneK3mWsXlU>) ;
* du coupleur Radiofréquences **ADC-10-4** (<https://www.minicircuits.com/pdfs/ADC-10-4.pdf>) ;
* du convertisseur I2C/GPIO **PCA9537** (<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9537.pdf>) ;
* de l’antenne **0868AT43A0020** intégrée à la carte End Device (<https://www.johansontechnology.com/datasheets/0868AT43A0020/0868AT43A0020.pdf>) ;
* du switch RF **PE4259** (<https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe4259ds.pdf>).

1. **Localisation de la fonction objet de l’étude**



1. **Schéma structurel associé**

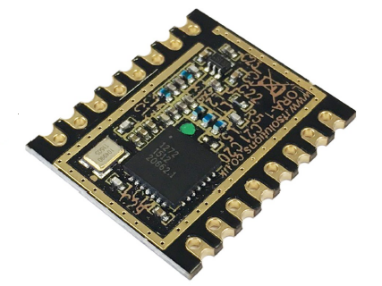
|  |
| --- |
|  |

1. **Présentation de la fonction Emission-Réception Radio Fréquences**

*(voir synoptique page 1 de ce TD)*

1. **Le module RF-LORA-868-SO**

Le cœur de la fonction Emission-Réception Radio Fréquences est réalisé à l’aide du module RF LoRa, de référence **RF-LORA-868-SO**.



Ce module effectue une conversion :

1. des données binaires que la carte End Device doit transmettre à destination de la passerelle, en ondes électromagnétiques du domaine des radiofréquences,
2. des ondes électromagnétiques réceptionnées par l’antenne de la carte End Device en provenance de la passerelle, en données binaires.

Il s’agit donc d’une conversion ***bidirectionnelle***.

Si l’on considère la conversion :

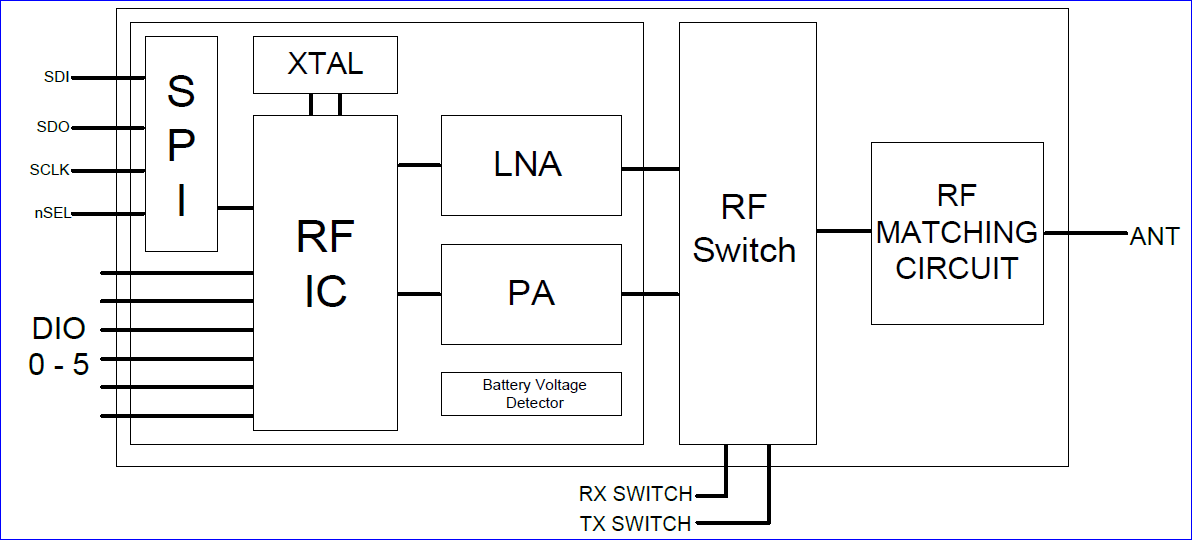
1. des données binaires en ondes électromagnétiques (fonction ***Emission***), on pourra considérer le module RF-LORA-868-SO comme un ***modulateur*** RF,
2. des ondes électromagnétiques en données (fonction ***Réception***), on pourra considérer le module RF-LORA-868-SO comme un ***démodulateur*** RF.

Ce module constitue donc un ***MODEM***.

La transmission des données entre le µC et le module RF s’effectue via une interface SPI :

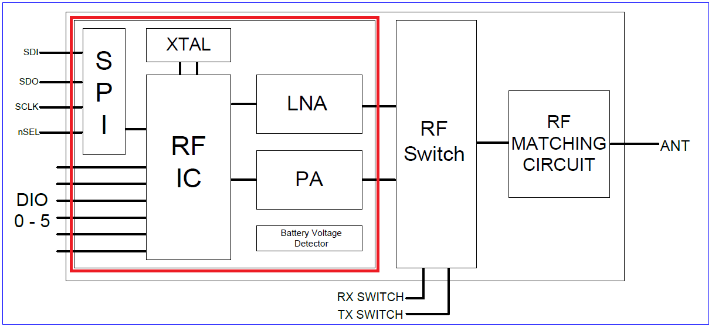
1. les données transmises par le µC au module RF en phase d’Emission sont associées au signal MOSI\_L,
2. les données réceptionnées par le µC en provenance du module RF en phase de Réception sont associées au signal MISO\_L.
3. **Le transceiver SX1272**

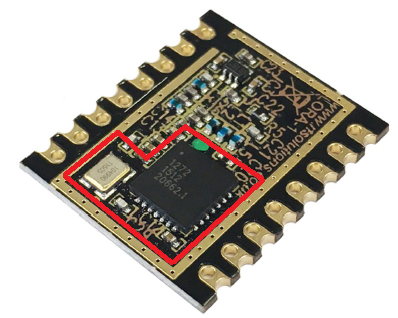
Le synoptique simplifié du module RF-LORA-868-SO est proposé en page 5 de sa documentation constructeur (**rfsolutions**) :



On retrouve une interface SPI destinée à être connectée à l’interface SPI du µC de commande (données binaires à transmettre à la passerelle (Emission) ou réceptionnées en provenance de la passerelle (Réception)), ainsi que la broche ANT sur laquelle sera connectée une antenne délivrant (Emission) ou réceptionnant (Réception) les ondes électromagnétiques significatives des données binaires.

Le bloc situé à gauche du synoptique (entouré en rouge), constitué des blocs SPI, RF IC, Battery Voltage Detector, LNA et PA correspond au synoptique du composant ***transceiver*** **SX1272** ainsi qu’au Quartz XTAL.





* 1. En consultant la documentation du composant SX1272, indiquer ce que signifient les abréviations **LNA** et **PA**, et rajouter aux fils situés de part et d’autre de chacun des blocs LNA et PA du synoptique, des flèches indiquant le sens de transit des informations.
  2. Rajouter de la même façon des flèches aux fils situés de part et d’autre du bloc « RF MATCHING CIRCUIT » du synoptique.

Le bloc RF Switch est un interrupteur auquel sont associés des filtres RF.

* 1. Justifier la présence de cet interrupteur et en déduire la nature (analogique ou numérique) ainsi que la fonction des signaux associés aux broches RX SWITCH et TX SWITCH. Ajouter des flèches aux fils associés à ces deux signaux. Préciser les labels des signaux choisis par le concepteur de la carte End Device associés aux signaux RX SWITCH et TX SWITCH.

1. **Le coupleur RF ADC-10-4** *(voir synoptique page 1 de ce TD)*

Ce composant permet de prélever une infime partie des ondes électromagnétiques transmises à la passerelle afin, après atténuation (40 dB) et via un connecteur SMA, de connecter une analyseur de spectre destiné à mesurer l’encombrement spectral du signal RF d’émission.

Il n’a donc d’autre fonction que celle d’instrumenter la carte End Device.

1. **Le convertisseur I2C/GPIO PCA9537** *(voir synoptique page 1 de ce TD)*

Comme l’indique le synoptique de la page 1 de ce TD, en plus des 4 signaux issus de la SPI du µC, le module RF-LORA-868-SO se pilote à l’aide des 3 signaux de commande RST\_L, RX\_SW et TX\_SW.

Le premier de ces signaux est un signal de réinitialisation du module RF-LORA-868-SO, et les deux autres sont désormais connus. Il s’agit donc de 3 signaux binaires qui auraient pu être élaborés avec des broches de port du µC configurées en sorties. Le concepteur de la carte a préféré élaborer ces 3 signaux à l’aide d’un convertisseur I2C/GPIO (PCA9537) afin d’économiser 3 broches de port d’E/S du µC et de les réserver pour un autre usage.

1. **Les caractéristiques du module RF-LORA-868-SO et du transceiver SX1272**

***Les caractéristiques électriques***

* 1. Relever dans la documentation du module, les valeurs recommandées de tension d’alimentation Vdd. Indiquer également la valeur typique.
  2. Indiquer, à partir de la documentation du transceiver SX1272 (plus précise que celle du module), les conditions de mesure des courants d’alimentation IDDST, IDDR et IDDT, préciser leurs valeurs typiques maximales. Comparer ces valeurs et justifier.

***Les caractéristiques de l’étage Radio Fréquences***

* 1. Indiquer, à partir de la documentation du module RF-LORA-868-SO, les différents procédés de modulation/démodulation numériques que le transceiver SX1272 est capable de mettre en œuvre (rappeler pour chacun d’entre eux la signification des abréviations).

On ne s’intéresse dans ce qui suit qu’au procédé de modulation/démodulation **LoRa**.

En radiofréquences, on peut exprimer la puissance d’un signal hertzien en **Watts** ou en **dBm**.

La référence **0 dBm** correspond à une puissance P de **1 mW**.

Par conséquent, la relation entre la *puissance* **P** en **mW** d’un signal et son *niveau de puissance* **x** en **dBm** est donnée par :

ou avec **x** en **dBm** et **P** en **mW**

* 1. Indiquer, en, dBm le niveau de puissance du signal modulé délivré par le module (ou le transceiver) en phase d’émission et calculer sa puissance en mW. Comparer cette dernière valeur à la puissance maximale d’émission d’une carte WiFi, d’un téléphone portable et d’un émetteur FM tel qu’on peut trouver en haut de la tour Eiffel. Conclure.
  2. Indiquer, en dBm, le niveau de puissance maximal admissible au niveau de l’antenne lorsque le module est en mode réception.

On définit, pour un récepteur radio, la notion de sensibilité permettant de caractériser sa capacité à démoduler des signaux radio de faible puissance avec un taux d’erreur inférieur à une valeur maximale admissible.

La sensibilité s’exprime en dBm et plus elle est faible, plus le récepteur parvient à démoduler des signaux hertziens de faible puissance.

* 1. Indiquer la sensibilité du module telle qu’annoncée dans sa documentation.
  2. Donner la définition de l’abréviation RSSI et indiquer comment il est possible d’en connaitre la valeur (voir page 111 de la documentation du transceiver SX1272).

Le constructeur du transceiver SX1272 indique dans sa documentation, page 34, comment fixer la fréquence porteuse du signal modulé.

* 1. Calculer en décimal et en hexadécimal, sachant que la fréquence du quartz Fxosc est égale dans notre cas à 32 MHz, la valeur de Frf afin que la fréquence de la porteuse FRF soit égale à 868 MHz.
  2. Calculer dans ces conditions, le pas de variation ΔFRF de réglage de la fréquence porteuse du signal modulé.

Le bilan de liaison d’une transmission par voie hertzienne

Le bilan de liaison (***link budget*** en anglais) permet, dans un système de transmission par voie hertzienne, de savoir si le niveau de puissance du signal reçu par le récepteur est suffisant pour que la démodulation s’effectue sans erreurs, c’est-à-dire s’il est supérieur à la sensibilité du récepteur.

On considère ci-dessous un dispositif de transmission par voie hertzienne unidirectionnel :



L’équation des télécommunications, ou équation de **Friis** permet d’exprimer la puissance PR du signal collecté au niveau du récepteur, en fonction de la puissance PE du signal émis par l’émetteur et des différents éléments susceptibles d’amplifier ou d’atténuer le signal entre le récepteur et l’émetteur.

Cette équation, sous sa forme logarithmique et simplifiée, est la suivante :

**PR = GAR + GR + GEL + GE + GEA + PE**, avec :

* **PE** : niveau de puissance du signal émis par l’émetteur, en **dBm**,
* **GEA** : gain de la liaison entre l’émetteur et l’antenne d’émission, en **dB**,
* **GE** : gain de l’antenne d’émission, en **dBi**,
* **GEL** : gain de la liaison en Espace Libre entre les deux antennes, en **dB**,
* **GR** : gain de l’antenne de réception, en **dBi**,
* **GAR** : gain de la liaison entre l’antenne de réception et le récepteur, en **dB**,
* **PR** : niveau de puissance du signal reçu par le récepteur, en **dBm**.

Les gains de liaison GEA et GAR sont liés aux câbles et connecteurs positionnés entre l’émetteur (ou le récepteur) et l’antenne d’émission (ou de réception). Ces gains sont négatifs car ces différents éléments agissent comme des atténuateurs.

Les termes GE et GR correspondent aux gains des antennes (exprimés en dBi) qui sont positifs pour des antennes actives et négatifs pour des antennes passives.

On montre que , avec **λ** : longueur d’onde du signal, en m,

**d** : distance entre les deux antennes en m.

Evidemment, ce gain est négatif.

Le constructeur Semtech indique, en page 1 de sa documentation, la valeur du bilan de liaison du transceiver SX1272.

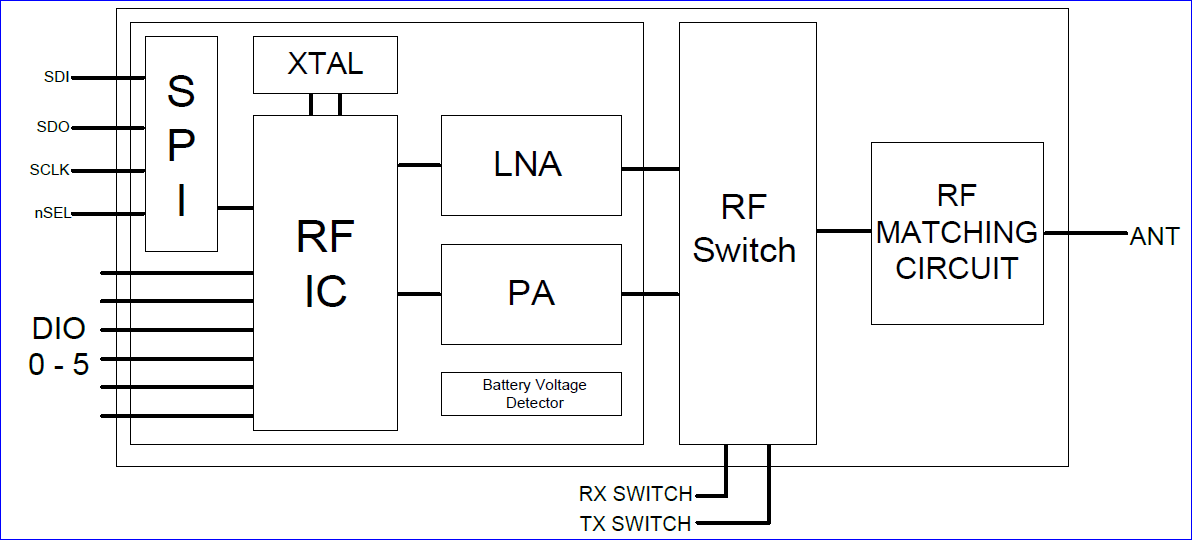
* 1. Indiquer et justifier cette valeur.
  2. En déduire, avec la valeur du bilan de liaison annoncé par le constructeur (question précédente), la portée du transceiver SX1272. Cette valeur est-elle crédible, sachant que la portée habituellement annoncée en technologie LoRa est de l’ordre de 15 à 20 km en environnement dégagé ? Indiquer alors le paramètre permettant de justifier un tel écart entre la portée théorique calculée et la portée annoncée par les constructeurs de modules de technologie LoRa.

Le constructeur du module RF-LORA-868-SO ne donne que le synoptique de son module, mais malheureusement pas le schéma structurel.

On propose néanmoins ci-après un extrait de schéma structurel représentant l’étage RF associé au transceiver SX1272 tel qu’il est réalisé sur le module RF-LORA-868-SO :

|  |
| --- |
|  |

On rappelle ci-dessous, le synoptique du module RF-LORA-868-SO :



* 1. Entourer sur le schéma structurel les structures correspondant au bloc « RF Switch » d’une part, et au bloc « RF MATCHING CIRCUIT » d’autre part.
  2. Indiquer la valeur de l’impédance de l’antenne.
  3. Indiquer l’atténuation introduite par le composant PE4259.

***La capacité du transceivever SX1272 à émettre/recevoir des signaux RF modulés selon le standard radio LoRa***

Nous allons dans ce paragraphe, lister l’ensemble des paramètres de transmission propres au standard radio LoRa que le transceiver SX1272 peut élaborer, c’est-à-dire :

* le nombre de canaux et les bandes de fréquences associées,
* la largeur de bande des canaux,
* le format des symboles transmis/reçus,
* la vitesse (ou rapidité) de modulation,
* la période symbole,
* le débit binaire,
* le format des paquets transmis/reçus.

Ces informations sont données dans la documentation du transceiver SX1272.

*Le nombre de canaux et les bandes de fréquences du signal modulé LoRa*

* 1. Indiquer la plage de variation des fréquences porteuses fc autour desquelles le transceiver SX1272 peut travailler ainsi que le pas de réglage (on associe au transceiver un quartz de fréquence FXOSC = 32 MHz).

*La largeur de bande des canaux*

* 1. Indiquer les différentes largeurs de bandes des canaux possibles.

*Le format des symboles transmis/reçus*

* 1. Indiquer le format des symboles que le composant est capable de transmettre et de décoder.

*La vitesse (ou rapidité) de modulation*

* 1. Donner l’expression de la vitesse de modulation.

*La période symbole*

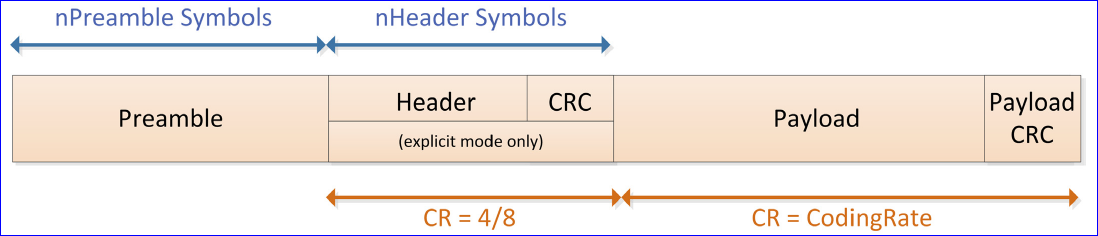
* 1. Exprimer la période symbole **Ts** en fonction de **SF** et de **BW**.

*Le débit binaire*

* 1. Exprimer le débit binaire en fonction de **SF** et de **BW**.

*Le format des paquets transmis/reçus*

La figure 6, page 27 de la documentation constructeur, précise le format des paquets transmis/reçus par le transceiver :



* 1. Indiquer ce que signifie l’abréviation **CR**, quel est son rôle et combien de valeurs elle peut prendre. Exprimer alors, en fonction de CR, la vitesse de modulation utile que l’on notera Rs**u** ainsi que le débit binaire utile Rb**u**.
  2. Préciser à quoi sert le préambule (**Preamble**) et indiquer sur combien de symboles il peut être codé.
  3. Préciser ce que signifie l’abréviation **CRC** et quel est son rôle.
  4. Indiquer ce que signifie le terme **Payload**.
  5. Indiquer à quoi correspond le terme **Payload CRC**.
  6. Préciser la différence entre les mode implicite et explicite.

*La durée de transmission (Time on Air)*

Comme on l’a vu précédemment (question 4.2), le courant IDD consommé par le composant SX1272 est beaucoup élevé lors de la transmission d’un message, et il est donc essentiel d’être en mesure de calculer la durée de transmission des messages.

C’est ce que propose le constructeur au paragraphe 4.1.1.7 de la page 29.

* 1. Exprimer la durée de transmission du préambule **Tpreamb** en fonction de **SF**, de **BW**, et de **Npreamb**, le nombre de symboles constituant le préambule.

On suppose le cas le plus défavorable en termes de consommation, c’est-à-dire celui où le message est transmis avec en-tête ainsi qu’avec le CRC du message (payload CRC).

* 1. Exprimer la durée de transmission **Tpayload** de l’ensemble [header + payload] en fonction de **SF**, de **CR**, de **BW** et de **PL**, le nombre d’octets du message utile à transmettre (on supposera que l’option « low data rate optimization » n’est pas active).
  2. Exprimer alors la durée totale de transmission que l’on notera **TOA** (Time On Air).
  3. Calculer alors, à titre d’exemple, la valeur de **TOA** correspondant à la transmission d’un message de 10 octets organisé en symboles de 10 bits, transmis avec un préambule de 20 symboles, une valeur de CR de 4/6 et une valeur de BW de 125 kHz.

Nous allons maintenant nous attacher à montrer que le composant SX1272 implanté sur le module RF-LORA-868-SO permet bien d’assurer une émission/réception de la carte End Device conformément aux spécifications du protocole LoRaWAN tel que définies en Europe.

Les spécifications du protocole LoRaWAN sont disponibles sur le site de l’hébergeur néerlandais **TTN** (**The Things Network**). Cet hébergeur est un acteur majeur de la communauté LoRaWAN dans la mesure où il propose gratuitement l’hébergement et la mise à disposition sur internet, d’informations issues d’« objets » et de passerelles fonctionnant selon le standard LoRaWAN.

On trouvera les spécifications du protocole LoRaWAN sur le portail de l’hébergeur TTN à l’adresse <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>.

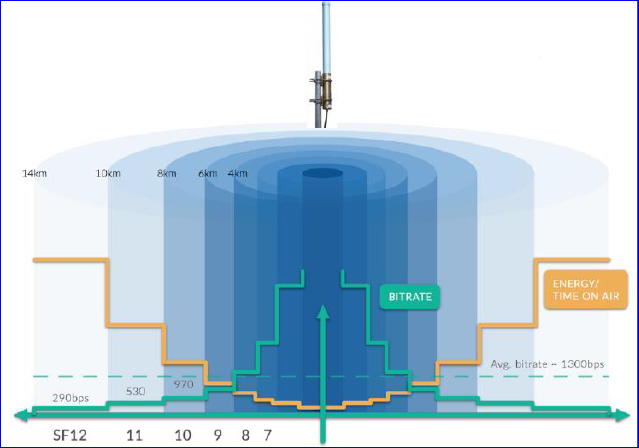
* 1. Indiquer, selon la norme **EU863-870**, le nombre de canaux d’émission/réception distincts (qu’on repèrera par leur numéro) en précisant pour chacun d’entre eux les valeurs de fréquence porteuse fc, de largeur de bande BW et de format de symboles SF qui peuvent leur être associés, et vérifier que le composant SX1272 est bien en mesure d’élaborer ces paramètres.
  2. Vérifier que les caractéristiques fréquentielles des signaux modulés se limitent bien à leur canal et n’empiètent pas sur les canaux adjacents.
  3. Indiquer, pour chaque valeur de SF et chaque valeur de CR possibles, les valeurs de Rsu, lorsque BW = 125 kHz d’une part, et lorsque BW = 250 kHz d’autre part.

Lorsqu’on se connecte à un réseau LoRaWAN public, accessible par définition à tout un chacun, on se doit de ne pas le monopoliser à ses propres fins, afin de permettre à chacun de se partager de façon équitable le canal de communication.

Pour cela, la législation impose un taux d’utilisation maximal du réseau LoRaWAN matérialisé par la notion de « Duty Cycle » ou rapport cyclique.

* 1. Donner, après consultation du portail de TTN, la définition du rapport cyclique ainsi que sa valeur maximale autorisée en Europe. Préciser la contrainte imposée supplémentaire imposée par TTN en matière de partage du canal de communication.
  2. Indiquer, pour être en conformité avec la législation en vigueur en matière de rapport cyclique, quelle devrait être la période T séparant deux émissions successives de données dans le cas décrit à la question 4.32. Indiquer, dans ces conditions, la consommation de courant et de puissance (électrique) moyenne du transceiver SX1272 alimenté sous 3,3 V (on supposera, pour simplifier, que la carte ne reçoit aucune information en retour de la part de la passerelle).

On donne ci-dessous et pour conclure ce paragraphe, un diagramme associé à un module LoRa tel que le module RF-LORA-868-SO associé au transceiver SX1272 qui équipe notre carte End Device :



* 1. Interpréter et justifier ce diagramme.

***La programmation du module RF-LORA-868-SO***

Programmer le module consiste en fait à programmer le transceiver SX1272.

Ce composant comporte 83 registres internes présentés aux pages 90 à 113 de la documentation du SX1272.

Il n’est pas question ici d’étudier l’ensemble de ces registres, d’autant que pour la programmation du transceiver, nous utiliserons une bibliothèque de fonctions permettant de s’affranchir -dans la plupart des cas- de la prise en compte de ces registres.

Toutefois, nous proposons ici de repérer les registres permettant de fixer les principaux paramètres de communication LoRa et d’en préciser leur contenu.

* 1. Indiquer la référence ainsi que le contenu (en décimal et en hexadécimal) des registres permettant de sélectionner les canaux, c’est-à-dire, plus précisément, de fixer la fréquence porteuse fc associée à chacun d’entre eux, sachant que le quartz associé au SX1272 présente une fréquence de 32 MHz.
  2. Indiquer la référence ainsi que le contenu du registre permettant de sélectionner la largeur de bande BW des canaux.
  3. Indiquer la référence ainsi que le contenu du registre permettant de sélectionner la valeur de CR.
  4. Indiquer la référence ainsi que le contenu du registre permettant de sélectionner la valeur de SF.
  5. Indiquer la référence ainsi que le contenu des registres permettant de configurer la communication conformément à l’exemple de la question 4.32.

1. **La structure associée à la fonction « Emission-Réception Radio Fréquences »**

**Etude de la structure associée au convertisseur I2C/GPIO PCA9537**

* 1. Préciser l’adresse I2C du composant PCA9537.
  2. Préciser la valeur de l’octet à mémoriser dans le registre « **Configuration Register** » du composant, lorsque le signal IO3 est transmis :

1. à la carte fille positionnée sur le connecteur d’extension,
2. par la carte fille positionnée sur le connecteur d’extension.

En déduire les 2 octets à transmettre successivement au PCA9537 pour configurer ce dernier selon les deux hypothèses i) et ii).

On précise que l’entrée de réinitialisation du module LoRa est active au niveau haut (ce qui explique que le concepteur de la carte End Device ait labellisé le signal de réinitialisation RST\_L et non /RST\_L).

* 1. Indiquer les octets à transmettre au PCA9537 si l’on souhaite configurer le module LoRa en mode émission.
  2. Indiquer les octets à transmettre au PCA9537 si l’on souhaite configurer le module LoRa en mode réception.
  3. Indiquer les octets à transmettre au PCA9537 si l’on souhaite réinitialiser le module LoRa.

On suppose que le signal I03 est transmis au PCA9537 par la carte fille positionnée sur le connecteur d’extension.

* 1. Expliquer la méthode permettant de lire le niveau logique du signal IO3.
  2. Relever dans la documentation constructeur les valeurs recommandées de tension d’alimentation et vérifier que le composant est correctement alimenté.

**Etude de la structure associée au module RF-868-LORA-SO**

* 1. Relever dans la documentation constructeur les valeurs recommandées de tension d’alimentation possibles et vérifier que le composant est correctement alimenté.
  2. Justifier sur le schéma structurel, la présence des résistances R25 et R26.

**Etude de la structure associée au coupleur RF ADC-10-4 et de l’atténuateur 40 dB**

Le concepteur de la carte End Device a souhaité se donner la possibilité de mesurer l’encombrement spectral des signaux RF délivrés par le module RF-868-LORA-SO.

Pour cela, il a intercalé entre la sortie RF du module et l’antenne, un composant permettant de « splitter » le signal RF en deux : une partie destinée à l’antenne, et une autre desinée au connecteur SMA à partir duquel il sera possible de mesurer l’encombrement spectral.

Afin de ne pas être perturbé par le signal RF de réception (en provenance de la passerelle), le concepteur a choisi un coupleur unidirectionnel, dont le schéma de principe proposé sur la documentation constructeur du coupleur ADC-10-4 (Electrical Schematic) est très parlant.

Ce composant est un composant passif, donc évidemment, la puissance du signal d’émission issu de la sortie RF du module RF-868-LORA-SO se répartit sur les deux sorties du coupleur : la sortie directe (RF Output) d’une part, et la sortie couplée (Coupled RF) d’autre part.

Pour savoir comment s’effectue la répartition de la puissance du signal RF appliqué en entrée du coupleur sur les deux sorties, on définit deux grandeurs fondamentales :

* la grandeur « **Main line insertion loss** », égale à , et qui permet de caractériser l’atténuation introduite par le coupleur entre sa sortie directe et son entrée,
* la grandeur « **Coupling loss** », égale à , et qui permet de caractériser l’atténuation introduite par le coupleur entre sa sortie couplée et son entrée.
  1. Relever dans la documentation du coupleur, la valeur du « **Main line insertion loss** » et calculer, en dB, l’atténuation introduite par le coupleur entre sa sortie directe et son entrée. En déduire, en dBm, le niveau de puissance du signal transmis à l’antenne lorsque le module RF émet avec un niveau de puissance maximal.
  2. Relever dans la documentation du coupleur, la valeur du « **Coupling loss** » et calculer, en dB, l’atténuation introduite par le coupleur entre sa sortie couplée et son entrée. En déduire, en dBm, le niveau de puissance du signal transmis à l’atténuateur +40 dB lorsque le module RF émet avec un niveau de puissance maximal.
  3. Montrer que la structure constituée par les résistances R6 à R11 réalise bien un atténuateur +40 dB. En déduire, en dBm, le niveau de puissance du signal de sortie de l’atténuateur, lorsque le module RF émet avec un niveau de puissance maximal.

L’analyseur de spectre que nous utilisons pour effectuer les mesures d’encombrement spectral est un FPL1000 (Rohde & Schwarz) dont on trouvera les spécifications à l’adresse suivante : <https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FPL1000_dat-sw_en_5214-6974-22_v0602.pdf>.

* 1. Vérifier que dans le cadre de notre expérimentation, le niveau de puissance maximal du signal appliqué sur l’entrée de l’analyseur de spectre sera bien inférieur à la valeur maximale admissible.