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

**« Emission-Réception Radio Fréquences »**

**CORRECTION**

**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**

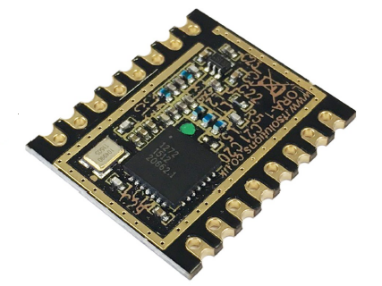
|  |
| --- |
|  |

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 :

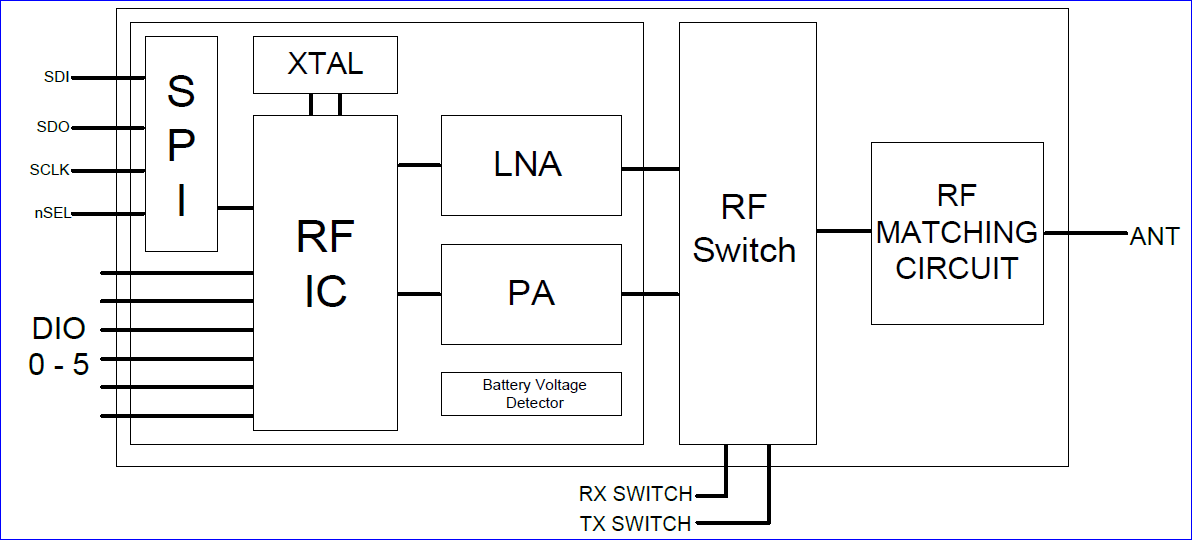
1. des données binaires en ondes électromagnétiques (fonction ***Emission***), on pourra considérer le module RF-LORA-868-SO comme un ***modulateur*** RF,
2. des ondes électromagnétiques en données (fonction ***Réception***), on pourra considérer le module RF-LORA-868-SO comme un ***démodulateur*** RF.

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

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

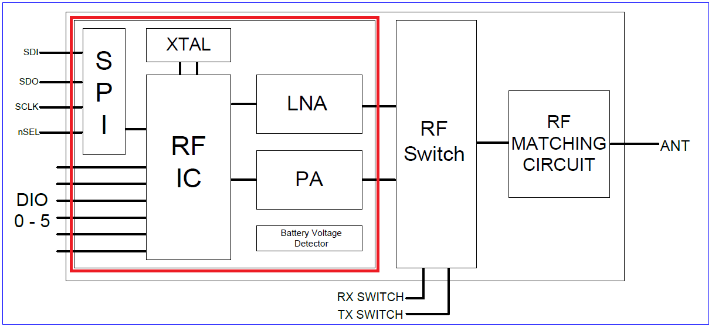
1. les données transmises par le µC au module RF en phase d’Emission sont associées au signal MOSI\_L,
2. les données réceptionnées par le µC en provenance du module RF en phase de Réception sont associées au signal MISO\_L.
3. **Le transceiver SX1272**

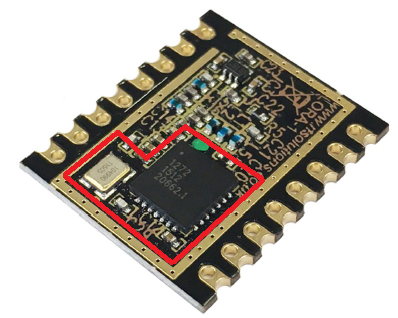
Le synoptique simplifié du module RF-LORA-868-SO est proposé en page 5 de sa documentation constructeur (**rfsolutions**) :



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.



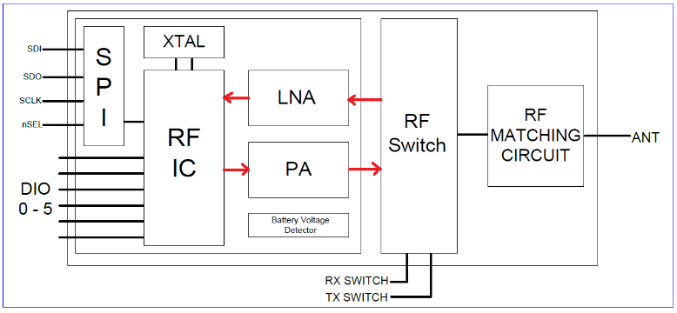


* 1. En consultant la documentation du composant SX1272, indiquer ce que signifient les abréviations **LNA** et **PA**, et rajouter aux fils situés de part et d’autre de chacun des blocs LNA et PA du synoptique, des flèches indiquant le sens de transit des informations.

**La page 21 de la documentation du SX1272 explique à quoi correspondent ces 2 blocs :**

* **LNA (Low Noise Amplifier) : c’est un amplificateur faible bruit qui se situe en aval (derrière) la broche d’entrée RFI (Radio Frequency Input),**
* **PA (Power Amplifier) : c’est un amplificateur de puissance (en réalité, selon la figure 4, on trouve deux blocs amplificateurs de puissance distincts : PA0 et PA1&2) positionné en amont (devant) de la broche de sortie RFO (Radio Frequency Output) ou PA\_BOOST.**

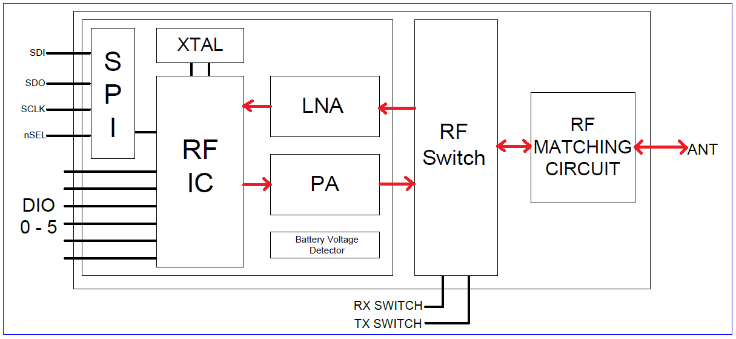
**D’où :**

****

* 1. Rajouter de la même façon des flèches aux fils situés de part et d’autre du bloc « RF MATCHING CIRCUIT » du synoptique.

**On peut en déduire que les signaux positionnés de part et d’autre du bloc « RF MATCHING CIRCUIT », même sans savoir à quoi sert précisément ce bloc, sont forcément bidirectionnels.**

**D’où :**



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.

**L’interrupteur permet d’aiguiller le signal Radio Fréquence :**

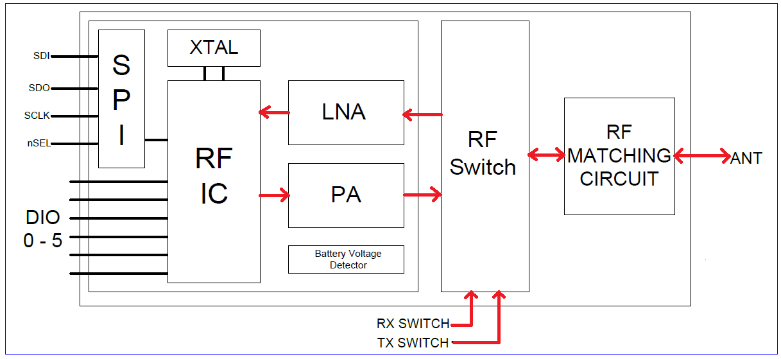
* **de la sortie du bloc Power Amplifier vers l’antenne en phase d’Emission,**
* **de l’antenne vers l’entrée du bloc Low Noise Amplifier en phase de Réception.**

**Sachant que TX et RX signifient respectivement Transmit et Receive, on en déduit que :**

* **TX SWITCH est un signal de commande binaire qui, lorsqu’il est actif, configure le module RF-LORA-868-SO en mode** **Emission,**
* **le signal appliqué sur la broche RX SWITCH est un signal de commande binaire qui, lorsqu’il est actif, configure le module RF-LORA-868-SO en mode** **Réception.**

**C’est ce que confirme la documentation du module, page 4, précisant de plus que ces signaux de commande sont actifs au niveau haut.**

**D’où :**



**Le concepteur de la carte End Device a choisi de labéliser les signaux RX\_SW et TX\_SW.**

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.

**Il y a une ambiguïté sur la documentation, page 7, dans la mesure où l’un des tableaux indique 2,2 V < Vdd < 3,7 V et l’autre 1,8 V < VDD < 3,6 V (2 appellations Vdd et VDD distinctes pour une même broche d’alimentation …). On considèrera donc 2,2 V < Vdd < 3,6 V.**

**La valeur typique de Vdd pour laquelle les mesures sont effectuées est de 3,3 V.**

* 1. 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.
* **IDDST correspond au courant de repos : IDDSTtyp = 1,4 mA ;**
* **IDDR correspond au courant en phase de réception : IDDRtyp = 11,2 mA ;**
* **IDDT correspond au courant en phase d’émission : IDDTtyp = 125 mA.**

**Les courants consommés par le module sont élevés en mode réception et en mode transmission, car il faut dans ces cas alimenter les amplificateurs LNA et PA, alors qu’en mode Standby (pas d’émission ni de réception), ces amplificateurs ne sont pas activés.**

**On note qu’en émission, le courant consommé est environ 10 fois plus élevé qu’en mode réception (en considérant le cas le plus défavorable pour lequel le gain de l’amplificateur PA est maximal et égal à +20 dBm).**

***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).

**Les procédés de modulation/démodulation sont (page 1 de la documentation) :**

* **FSK (Frequency Shift Keying) : modulation à déplacement de fréquence élémentaire ;**
* **GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) : variante de la FSK avec filtrage gaussien ;**
* **MSK (Minimum Shift Keying) : modulation de fréquence à phase continue ;**
* **GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying): modulation de fréquence à phase continue et avec filtrage gaussien ;**
* **OOK (On-Off Keying) : modulation à déplacement d’amplitude ;**
* **LoRa (Long Range) : modulation à variation linéaire de fréquence.**

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.

**Le constructeur du module annonce en page 1 de la documentation, « +14 dBm high efficiency PA », soit une puissance de 1014/10 = 25 mW.**

**Si on regarde plus attentivement la documentation du transceiver SX1272, on note, page 21, qu’en utilisant non pas la sortie RFO mais la sortie PA\_BOOST, le niveau de puissance passe à +20 dBm, soit une puissance d’émission de 100 mW.**

**Pour comparaison, la puissance maximale d’émission d’une carte WiFi est de 32 mW, celle d’un téléphone portable de 125 mW, et celle d’un émetteur FM de portée 50 km de 100 kW.**

**On pourra conclure que le procédé de modulation/démodulation LoRa est extrêmement efficace, en termes de portée, puisqu’à puissance d’émission sensiblement identique, on obtient une portée de l’ordre d’une quinzaine de kms avec le procédé LoRa contre quelques dizaines de mètres seulement avec le standard WiFi.**

* 1. Indiquer, en dBm, le niveau de puissance maximal admissible au niveau de l’antenne lorsque le module est en mode réception.

**Le constructeur du module indique, page 7, « Max Rx input power : +10 dBm », ce qui correspond à une puissance maximale admissible de 10 mW.**

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.

**On note, en page 1, une sensibilité de -130 dBm, soit une puissance de 10-13 mW.**

**Malheureusement, le constructeur n’indique pas les conditions dans lesquelles cette mesure de sensibilité est effectuée (selon toute vraisemblance, cette valeur est définie pour un BER (Bit Error Rate) garanti inférieur à une valeur maximale admissible).**

**Attention : le constructeur précise « High Sensitivity: down to -130 dBm », ce qui signifie que cette sensibilité *peut descendre* jusqu’à -130 dBm, mais aussi qu’elle *peut être plus élevée* ! Il en s’agit donc pas d’une valeur maximale garantie !**

**Si on prend en compte la documentation du transceiver SX1272, on constate en effet, page 19, que les valeurs typiques de sensibilité varient entre -137 dBm et -111 dBm, ce qui signifie que la sensibilité réelle, mesurée, peut s’avérer supérieure à -110 dBm.**

* 1. 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).

**RSSI signifie “Received Signal Strenght Indication” et caractérise la puissance du signal de réception au niveau de l’antenne.**

**Dans notre cas, il se calcule directement en dBm par la formule RSSI[dBm]= -139 + rssi, où rssi correspond à l’octet mémorisé dans le registre RegRssiValue d’adresse 0x1B.**

**Il peut donc en théorie prendre 256 valeurs distinctes comprises entre -139 et +116 dBm,**

**mais il ne devrait pas dépasser +10 dBm (Max Rx input power).**

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.

**On obtient soit Frf = 14 221 312 = 0xD90000.**

* 1. Calculer dans ces conditions, le pas de variation ΔFRF de réglage de la fréquence porteuse du signal modulé.

**, soit ΔFRF = 61 Hz (on retrouve la valeur donnée en page 1 de la documentation du transceiver SX1272 : « Fully integrated synthesiser with a resolution of 61 Hz »).**

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.

**Le bilan de liaison annoncé est de 157 dB.**

**Cette valeur correspond à la soustraction suivante :**

**Niveau de puissance d’émission maximal sur la broche PA\_BOOST (+20 dBm)**

* **Niveau de puissance de réception minimal sur la broche RFI -(-137 dBm)**

**= Bilan de liaison du transciever SX1272 +157 dB**

**Le bilan de liaison annoncé correspond donc, par extension, au cas particulier où l’on fait communiquer deux transceiver SX1272 l’un avec l’autre, l’un étant configuré en émetteur et le second en récepteur.**

**On remarquera que ce bilan de liaison est exprimé en dB et non en dBm, ce qui est logique, puisqu’il ne caractérise donc pas un niveau de puissance, mais un gain.**

**Attention : là encore, il faut rester prudent avec ce bilan de liaison annoncé, dans la mesure où il est calculé dans le cas où la sensibilité du module récepteur est optimale et égale à -137 dBm, ce qui n’est absolument pas garanti (voir question 4.6).**

* 1. 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.

**En toute logique, on peut calculer la portée maximale du transceiver SX1272.**

**En effet, en considérant une sensibilité de -137 dBm et une fréquence f de 868 MHz, sachant que , on obtient , soit d = 1947 km !**

**Cette valeur est énorme et irréaliste, car la valeur de la sensibilité du module récepteur est en réalité, comme on l’a vu à la question 4.6, supérieure à -137 dBm.**

**Par ailleurs, il est nécessaire, dans notre bilan de liaison, de prendre en compte le gain introduit par l’antenne de référence 0868AT43A0020 intégrée sur chacun des modules. Or, le gain de l’antenne est de -4 dBi (page 1 de la documentation constructeur).**

**On a donc GEL = PR - PE - GR - GE = - 137 - 20 + 4 + 4, soit -149 dB (cas optimal).**

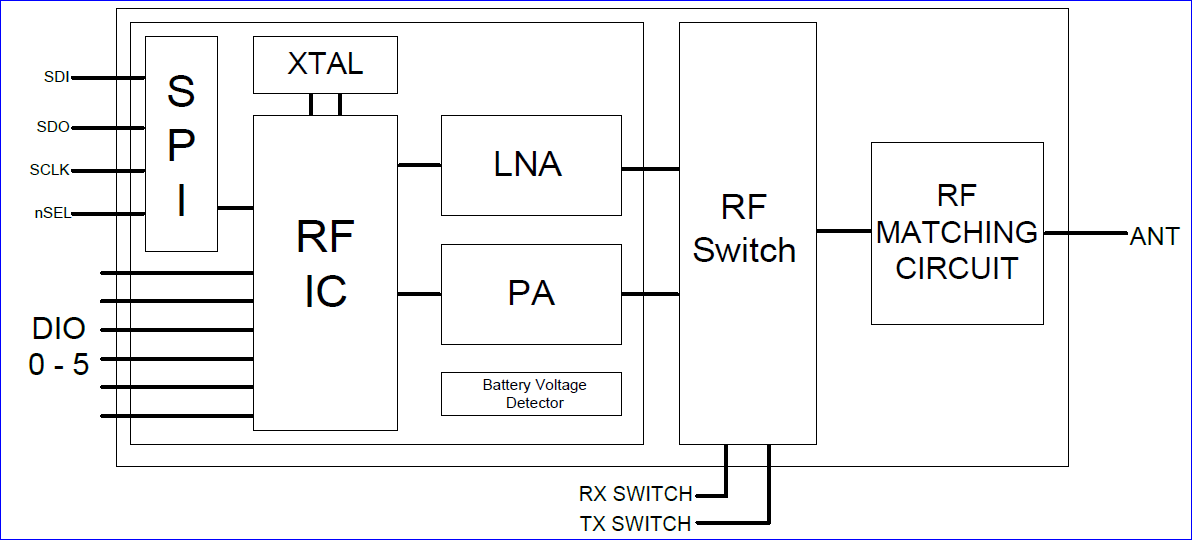
**Et si l’on considère maintenant le cas plus crédible où le récepteur présente une sensibilité de -104 dBm (au lieu de -137 dBm), on obtient alors GEL = -116 dB, ce qui conduit à soit d = 17 km, c’est-à-dire une valeur tout à fait cohérente.**

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

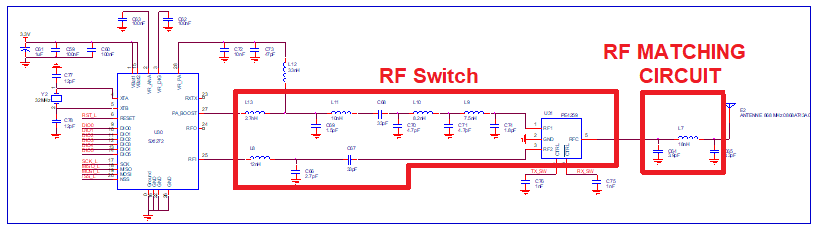
On propose néanmoins ci-après un extrait de schéma structurel représentant l’étage RF associé au transceiver SX1272 tel qu’il est réalisé sur le module RF-LORA-868-SO :

|  |
| --- |
|  |

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.

****

* 1. Indiquer la valeur de l’impédance de l’antenne.

**L’impédance de l’antenne est de 50 Ω (page 1 de la documentation).**

* 1. Indiquer l’atténuation introduite par le composant PE4259.

**Elle est inférieure à 0,35 dB à 868 MHz, d’après la page 1 de la documentation.**

***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).

**D’après la page 34 de la documentation, où Frf(23,0) est un nombre non signé codé sur 24 bits, d’où (la page 1 de la documentation du transceiver indique une bande de fréquences comprise entre 860 MHz et 1020 MHz).**

**Le pas de réglage est de 61 Hz (voir question 4.9).**

**Le constructeur du composant laisse à l’utilisateur le soin de choisir sa fréquence porteuse fc comme il le souhaite, donc on ne peut pas parler de canaux centrés autour de fréquences porteuses prédéfinis.**

*La largeur de bande des canaux*

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

**Le composant a la possibilité d’élaborer des canaux de largeur notée BW (BandWidth) et pouvant prendre les valeurs 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz (page 26 de la documentation), centrés autour d’une fréquence porteuse fc pouvant varier par pas de 61 Hz, entre 860 et 1020 MHz.**

*Le format des symboles transmis/reçus*

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

**Les symboles sont codés sur un nombre de bits noté SF (Spreading Factor).**

**Le composant prévoit 7 valeurs de SF distinctes comprises entre 6 et 12 (table 13, page 25 de la documentation), autorisant ainsi une transmission ou un décodage de symboles exprimés sur 6 à 12 bits.**

*La vitesse (ou rapidité) de modulation*

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

**La vitesse de modulation, que les anglo-saxons notent Rs pour « symbol rate » que l’on peut traduire en français par débit symbolique, est donnée par la relation , et s’exprime en Bauds (Bd). Elle dépend donc des valeurs de SF et de BW.**

*La période symbole*

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

**Evidemment, , d’où .**

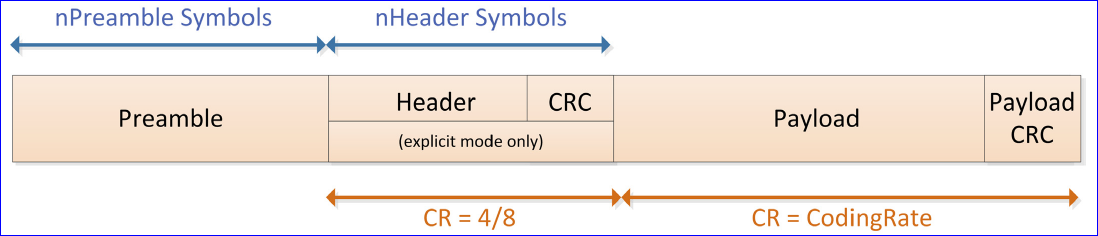
*Le débit binaire*

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

**Puisqu’un symbole est constitué de SF bits et que la vitesse de modulation est égale à , on obtient un débit binaire (bit rate) Rb = SF.Rs, soit (en bits/s).**

*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**.

**Lorsqu’on transmet des données sur un support quelconque, celles-ci peuvent subir des altérations durant leur transit, et ne pas être décodées correctement par le récepteur.**

**Afin d’améliorer la robustesse de la transmission, on va ajouter au message à transmettre, des informations supplémentaires qui permettront au récepteur de détecter la présence d’erreurs de transmission et de les réparer automatiquement, sans avoir besoin de demander à l’émetteur de retransmettre à nouveau le message.**

**On peut faire l’analogie avec les aviateurs qui, lorsqu’ils signalaient l’immatriculation d’un avion, prononçaient « Alfa Tango Charlie » au lieu de ATC : même en présence de bruit, le récepteur parvenait à décoder le message transmis (ATC) grâce à l’introduction par l’émetteur, des informations supplémentaires « lfa », « ango » et « harlie ».**

**Pour une transmission numérique :**

* **le codage du message (ici l’alphabet radio international) s’appelle le *codage canal*,**
* **les informations rajoutées au message à transmettre sont des bits dits « redondants », élaborés à partir d’algorithmes communs à l’émetteur et au récepteur, évidemment.**

**L’abréviation CR pour Code Rate indique, dans un message codé, la proportion de bits utiles (le message) par rapport à la totalité des bits transmis (le message + le code correcteur d’erreurs).**

**D’après la documentation (page 25), il est possible de sélectionner 4 valeurs de CR distinctes, égales respectivement à 4/5, 4/6, 4/7 et 4/8.**

**Evidemment, plus le nombre de bits redondants est élevé, c’est-à-dire plus la valeur de CR est faible (dans notre cas, 4/8), et plus la transmission sera robuste.**

**Les expressions de Rb et Rs proposées en réponse aux questions 4.20 et 4.22 deviennent :**

* **en Bd,**
* **en bits/s.**

* 1. Préciser à quoi sert le préambule (**Preamble**) et indiquer sur combien de symboles il peut être codé.

**Le préambule est une séquence d’initialisation transmise par l’émetteur en tout début de transmission, de façon que le récepteur puisse se synchroniser lorsqu’arrive un nouveau message.**

**La longueur du préambule est programmable ; il peut être constitué de 10 à 65539 symboles distincts (page 27 de la documentation).**

* 1. Préciser ce que signifie l’abréviation **CRC** et quel est son rôle.

**Le CRC (Cyclic Redundancy Check en anglais ou Code de Redondance Cyclique en français) correspond précisément au code correcteur d’erreurs permettant, à la réception, de détecter et de réparer les erreurs de transmission.**

* 1. Indiquer ce que signifie le terme **Payload**.

**Le Payload correspond au message à transmettre, *incluant les bits redondants*, et organisé en symboles de SF bits.**

* 1. Indiquer à quoi correspond le terme **Payload CRC**.

**Il s’agit du message transmis, incluant les bits redondants ainsi que le code CRC de détection d’erreurs.**

* 1. Préciser la différence entre les mode implicite et explicite.

**Le mode explicite consiste à transmettre au récepteur, juste après le préambule et avant le payload, les 3 informations d’en-tête suivantes :**

* **le nombre d’octets du message (payload) qui va suivre,**
* **la valeur de CR avec laquelle le message sera transmis,**
* **l’indication selon laquelle le message inclura ou non un CRC,**

**suivies de la valeur du code CRC calculé à partir des 3 informations constitutives de l’en-tête.**

**Cet en-tête est systématiquement transmis avec un CR de 4/8 (transmission la plus robuste).**

**Dans le mode implicite, on ne transmet pas d’en-tête, ce qui suppose que l’émetteur et le récepteur soient configurés pour fonctionner avec une même valeur de CR.**

*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 obtient** **.**

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).

**On obtient .**

* 1. Exprimer alors la durée totale de transmission que l’on notera **TOA** (Time On Air).

**On obtient finalement .**

* 1. 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.

**On obtient soit TOA = 335 ms.**

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.

**L’onglet « Frequency Plans » du portail de TTN permet de remplir le tableau suivant :**



**Le composant permet effectivement d’obtenir ces valeurs puisqu’il propose :**

* **3 valeurs de BW distinctes (question 4.18) : 125, 250 et 500 kHz ✓**
* **7 valeurs de SF distinctes (question 4.19) : de 6 à 12 ✓**
* **x valeurs de fréquences porteuses réglables par pas de 61 Hz (question 4.17) ✓**
  1. Vérifier que les caractéristiques fréquentielles des signaux modulés se limitent bien à leur canal et n’empiètent pas sur les canaux adjacents.

**Il n’y a jamais chevauchement des canaux (même dans le cas le plus problématique concernant les canaux 1, 2 et 3 lorsque la largeur de bande du canal 2 est de 250 kHz).**

* 1. 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.

**D’après la question 4.23, on peut calculer les valeurs suivantes :**





**On notera que ces valeurs utiles sont supérieures aux valeurs réelles car leur calcul ne tient compte ni du préambule, ni de l’en-tête (le cas échéant), ni du payload CRC.**

**Là encore, on vérifie (question 4.23) que le composant propose bien les 4 valeurs de CR souhaitées.**

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.

**Le rapport cyclique d’émission (ou de réception) se définit lorsqu’une carte End Device émet périodiquement une information, et correspond au rapport TES/T où TES correspond à la durée pendant laquelle elle émet (ou reçoit) et T à la période d’émission (ou de réception) qui sépare deux émissions (ou réceptions) successives.**

**En Europe, la valeur maximale autorisée pour ce rapport cyclique est fixé à 1%.**

**L’hébergeur TTN impose une contrainte plus claire, dans la mesure où chaque carte End Device doit :**

* **émettre des données à destination de la passerelle pendant 30 s maxi par jour,**
* **recevoir au plus 10 messages par jour en provenance de la passerelle.**

**Ces limitations ne s’appliquent que pour un réseau public, et en aucune façon au réseau privé que nous réalisons avec le système Did@LoRaWAN, même si en toute rigueur, nous devrions respecter la contrainte de rapport cyclique inférieur à 1%.**

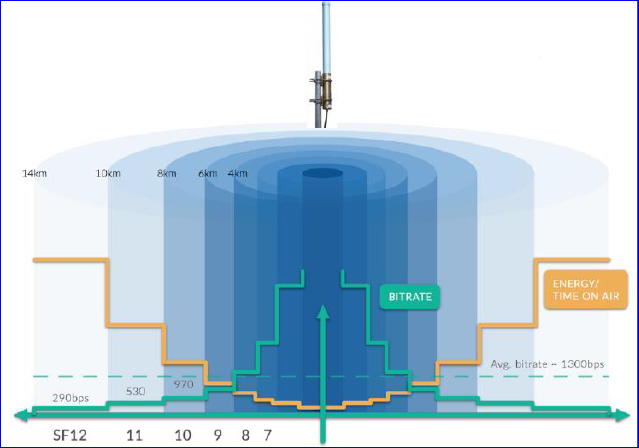
* 1. Indiquer, pour être en conformité avec la législation en vigueur en matière de rapport cyclique, quelle devrait être la période T séparant deux émissions successives de données dans le cas décrit à la question 4.32. Indiquer, dans ces conditions, la consommation de courant et de puissance (électrique) 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).

**La durée d’émission (Time On Air) étant de 335 ms, on doit limiter la période T à 33,5 s.**

**D’où les calculs de consommations et de puissances moyennes suivants :**



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.

**Ce diagramme met en évidence l’interaction entre les grandeurs débit, consommation et portée d’une transmission radio de type LoRa.**

**Plus précisément, il montre que plus la valeur de SF est élevée, plus :**

1. **le débit est faible,**
2. **l’énergie nécessaire au fonctionnement du module est élevée,**
3. **la portée est élevée.**

**Le point a) a été mis en évidence à la question 4.35**

**Pour ce qui concerne le point b) : plus la valeur de SF est élevée, plus le débit est faible, donc plus la durée d’émission ou de réception (Time On Air) est élevée, donc plus la consommation du module sera élevée (question 4.2).**

**Enfin pour ce qui concerne le point c), si on consulte la ligne RFS\_L125 du tableau de la page 19 de la documentation du transceiver SX1272, on constate que plus la valeur de SF est élevée, et plus la sensibilité du récepteur diminue, donc plus, à puissance d’émission constante, la distance entre l’émetteur et le récepteur (c’est-à-dire entre la carte End Device et la passerelle) peut être élevée.**

**On conclura que le réglage du paramètre SF est fondamental, dans un réseau de communications LoRaWAN, et que la valeur choisie est le résultat d’un compromis entre les grandeurs débit, consommation et portée.**

***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.

**La fréquence de la porteuse fc est fixée par une opération d’écriture de la valeur Frf(23,0) codée sur 24 bits, dans les 3 registres [RegFrfMsb:RegFrfMid:RegFrfLsb] concaténés, selon l’expression suivante (voir documentation pages 107 et 108) :**

**On obtient alors les valeurs de Frf suivantes :**



* 1. Indiquer la référence ainsi que le contenu du registre permettant de sélectionner la largeur de bande BW des canaux.

**La sélection de la largeur de bande BW s’effectue par une opération d’écriture des 2 bits de poids faible du registre RegModemConfig1 (documentation page 111) :**

* **00 🡪 BW = 125 kHz,**
* **01 🡪 BW = 250 kHz.**
  1. Indiquer la référence ainsi que le contenu du registre permettant de sélectionner la valeur de CR.

**La sélection de la valeur de CR s’effectue par une opération d’écriture des bits 3 à 5 du registre RegModemConfig1 (documentation page 111) :**

* **001 🡪 CR = 4/5,**
* **010 🡪 CR = 4/6,**
* **011 🡪 CR = 4/7,**
* **100 🡪 CR = 4/8.**
  1. Indiquer la référence ainsi que le contenu du registre permettant de sélectionner la valeur de SF.

**La sélection de la valeur de SF s’effectue par une opération d’écriture des bits 4 à 7 du registre RegModemConfig2 (documentation page 112) :**



* 1. Indiquer la référence ainsi que le contenu des registres permettant de configurer la communication conformément à l’exemple de la question 4.32.

**Cet exemple impose l’initialisation des registres suivants :**

* **RegModemConfig1 = 00010010 = 0x12 ;**
* **RegModemConfig2 = 1010xxxx (x : bits non déterminés compte tenu du cdc) ;**
* **RegPreambleMsb = 00000000 = 0x00 ;**
* **RegPreambleLsb = 00010000 = 0x10 ;**
* **RegPayloadLength = 00001010 = 0x0A.**

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.

**L’adresse du composant I2C est 1001001, soit 0x49 (documentation page 4).**

* 1. 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).

**Les 3 signaux RST\_L, RX\_SW et TX\_SW sont des signaux de commande du module LoRa, par conséquent les broches 1, 2 et 3 du PCA9537 doivent être configurées en sorties. Pour ce qui concerne le signal IO3, tout dépend de l’application i) ou ii).**

**D’où (documentation page 6) :**

1. **Configuration Register = 11110000 = 0xF0,**
2. **Configuration Register = 11111000 = 0xF8.**

**Il faudra donc transmettre via l’interface I2C du µC, les 3 octets successifs (figure 6 page 8 de la documentation) :**

1. **0x92 (adresse de 7 bits 0x49 puis ajout du LSB R/W = 0), 0x03, puis 0xF0,**
2. **0x92, 0x03, puis 0xF8.**

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.

**Il faut transmettre les 3 octets successifs 0x92, 0x01 et 0xFA ou 0xF2 (figure 5 page 8).**

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

**Il faut transmettre les 3 octets successifs 0x92, 0x01 et 0xFC ou 0xF4 (figure 5 page 8).**

* 1. Indiquer les octets à transmettre au PCA9537 si l’on souhaite réinitialiser le module LoRa.

**Il faut transmettre les 3 octets successifs 0x92, 0x01 et 0xF9 ou 0xF1 (figure 5 page 8).**

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.

**Il faut successivement (d’abord figure 6 page 8, puis figure 8 page 9) :**

* **transmettre les 2 octets successifs 0x92 puis 0x00 (figure 6),**
* **transmettre l’octet 0x93 (adresse de 7 bits 0x49 puis ajout de LSB R/W=1),**
* **lire l’octet réceptionné puis récupérer le niveau logique de IO3 par une opération en isolant le bit 3 par une opération de masquage.**
  1. Relever dans la documentation constructeur les valeurs recommandées de tension d’alimentation et vérifier que le composant est correctement alimenté.

**Le constructeur indique 2,3 V < VDD < 5,5 V (pages 1 et 11 de la documentation), donc pas de problèmes pour l’alimenter sous 3,3V.**

**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.

**Le constructeur indique 2,2 V < VDD < 3,6 V (voir question 4.1), donc pas de problèmes pour l’alimenter sous 3,3 V.**

* 1. Justifier sur le schéma structurel, la présence des résistances R25 et R26.

**Il s’agit de résistances de Pull Down qui forcent les signaux RX\_TW et TX\_SW au niveau bas durant la mise sous tension et avant que le PCA9537 ne soit initialisé (les broches associées à ces signaux sont configurées par défaut en entrées), configurant automatiquement le module RF-868-LORA-SO en mode standby.**

**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.

**On note , d’où une atténuation de +1,07 dB (ou un gain de -1,07 dB) entre la sortie directe du coupleur et son entrée.**

**Le niveau de puissance du signal transmis à l’antenne est donc égal à 20 dBm – 1,07 dB, soit 18,93 dBm.**

* 1. 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.

**On note , d’où une atténuation de , soit une atténuation de +0,34 dB entre la sortie couplée du coupleur et son entrée.**

**Le niveau de puissance du signal transmis à l’atténuateur +40 dB est donc égal à 20 dBm – 0,34 dB, soit 19,66 dBm.**

* 1. 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.

**On obtiendra en sortie +19,66 dBm – 40 dB, soit -20,34 dBm.**

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.

**La documentation indique, page 6, rubrique Level, que la valeur maximale du niveau de puissance du signal RF appliqué sur l’entrée est de 20 dBm. Aucun problème, donc.**