

SAE 22 : Projet LoRa

Travail de la séance 4 (non encadrée)

Projet de diagnostic embarqué via LoRa : Crédit d'un système sans fil qui analyse les accélérations et vibrations d'un véhicule à l'aide d'un accéléromètre. Les données sont transmises via LoRa à un récepteur pour analyser les performances. (Utilisation sur circuit pour l'analyse pilote/ingénierie)

I - Attribution des rôles

- Dorian : Chef de projet
- Yoann : Débit
- Mattéo : Consommation
- Thibault : Portée

II - Cahier des charges du projet : partie client

Définir le plus précisément possible l'application visée :

- A quel besoin répond votre application ? (Rappel : inutile de faire une étude de marché pour vérifier si une solution existe déjà, l'idée prioritaire n'est pas d'être innovant, mais uniquement d'étudier la viabilité d'un projet de transmission Sans Fil LoRa)

Notre application répond aux besoins d'afficher, calculer et vérifier : la décélération savoir si les freins sont usés, l'état du moteur grâce à son accélération, vibration vérification du moteur, mais aussi connaître l'état de la température du moteur.

- Que doit mesurer chaque capteur ?

- Accéléromètre (vibration, accélération, décélération) : il permet de calculer la vibration, mais aussi l'accélération et décélération du véhicule.
- Thermomètre : il permet de capter la température du moteur.

- Combien de fois par seconde (ou par minute ou par heure) devraient idéalement être envoyées les données ?

Idéalement il faudrait envoyer les données une fois toutes les 100 millisecondes.

- Dans quel environnement le capteur sera-t-il déployé ? y aura-t-il accès à une source d'énergie électrique ? Sinon quel type d'énergie (batterie ? renouvelable ?) peut être utilisée pour l'alimenter ?

Le capteur sera déployé dans une voiture de course soit un environnement assez chaud et avec beaucoup de secousses, il y aura accès à une source d'énergie électrique, le type d'énergie est la batterie de la voiture utilisée, elle n'est donc pas renouvelable.

- Dans quel environnement le récepteur de données sera-t-il déployé ? y aura-t-il accès à une source d'énergie électrique ? Sinon quel type d'énergie (batterie ? renouvelable ?) peut être utilisée pour l'alimenter ?

Le récepteur sera déployé dans le stand d'écurie de la voiture de course soit un environnement plus stable, il y aura un accès à une source d'énergie électrique, le type d'énergie sera branché à une prise ou un ordinateur.

- Estimer la distance entre le capteur et le récepteur ainsi que le type d'environnement (indoor, outdoor, milieu urbain, suburbain, campagne, vue directe, etc...)

Le type d'environnement est sur un véhicule de course toute catégorie confondue (outdoor), la distance entre les capteurs est du véhicule jusqu'au stand avec les ingénieurs pour les vérifications des données.

Donc la distance entre le capteur et le récepteur va varier pendant la course, le maximum atteignable est d'environ 6km.

- Ajouter tout autre élément que vous jugerez utile

Les capteurs devront s'adapter selon la distance du véhicule avec le stand, il sera difficile au capteur sur la voiture de course de ne pas s'endommager pendant les courses.

Le vocabulaire dans cette partie « client » ne sera pas nécessairement technique, mais elle doit être suffisamment précise pour vous permettre par la suite de déterminer les performances techniques que votre système de transmission sans fil devra avoir (débit de données nécessaire, consommation, portée)

III - Analyse technique du projet

- **3.1 Débit de données**

- **3.1.a – estimation du payload**

Q.1 : Nous allons transmettre les données brutes, pour l'accéléromètre il contient 3 axes : x, y et z chaque axe sont sur 2 octets soit 16 bits. Il nous faut donc déjà 48 bits pour l'accéléromètre.

Pour le capteur de vibration (v), il est lui aussi codé sur 2 octets soit 16 bits.

Pour le thermomètre (t), il est également codé sur 2 octets, 16 bits, ce qui nous fait un total de 80 bits.

Le payload sera : xyzvt.

- **3.1.b – Estimation du débit binaire nécessaire à votre application**

Q.2 : En supposant un payload de 80 bits (données brutes X, Y, Z + vibration + température) et en choisissant un niveau de sûreté de CRC 4/6, la trame LoRa est majorée d'un facteur 1,5; soit un total de 120 bits pour le bloc payload + sécurité.

En ajoutant les 100 bits de préambule et synchronisation, la taille totale estimée de chaque trame LoRa est de 220 bits.

Q.3 : Nous avons estimé la taille totale d'une trame LoRa à 196 bits (payload + sécurité + préambule).

Dans notre application, une transmission est effectuée toutes les 100 millisecondes. Soit : $\frac{220 \text{ bits}}{0.1 \text{ secondes}} = 2.2 \text{ kbps}$.

- **3.1.c – Choix de la bande passante et du SF adaptés à votre projet**

Q.4 : Dans des conditions idéales et en prenant BW = 500 kHz et SF = 7 on aurait un débit de 27 kbps.

Q.5 : Pour notre projet on pourrait prendre plusieurs valeurs de BW et SF, par exemple le minimum de BW serait 125 kHz et le max serait 500 kHz.

Pour le SF on pourrait prendre au minimum SF = 7 mais au maximum SF = 8.

Q.6 : Lorsque le spreading factor (SF) augmente, la sensibilité du récepteur s'améliore significativement, ce qui permet de capter des signaux plus faibles. En revanche, lorsque la bande passante (BW) augmente, la sensibilité diminue, rendant la réception plus difficile pour les signaux faibles.

Q.7 : Plus le SF est grand et plus on peut transmettre à grande portée. Idem avec la BW plus il est petit et plus on peut transmettre à grande portée.

Pour maximiser la portée, il faut donc combiner SF élevé et BW faible, au prix d'un débit plus lent.

Q.8 : Parmi les couples possibles, nous retenons SF = 8 et BW = 125 kHz comme réglage optimal. Il fournit un débit largement suffisant (~4 kbps), une bonne portée grâce à une sensibilité correcte.

- Synthèse :

Après avoir fait notre série de test on en conclut que les 3 BW peuvent être choisis dans notre projet avec un SF à 7 cependant il nous faut quand même une portée assez grande, donc on a préféré choisir un SF à 8 avec la plus grande BW possible en fonction de la vitesse, pour conclure : BW = 250. Pour le CRC les 3 ont l'air de fonctionner à distance rapprochée cependant dans notre cas réel la distance sera plus importante et donc plus de données seront perdues, on choisit donc CRC 4/6. Pour limiter le temps de transmission. Pour le préambule Length, lorsqu'on le met à 10 cela semble satisfaisant avec une vitesse intéressante.

- 3.2 Consommation d'énergie

- 3.2.a – consommation d'une carte LoRa

1)

Def Puissance : la puissance correspond à un débit d'énergie, souvent comptabilisé par unité de temps. Elle est généralement exprimée en Watt (W) ou en kilowatt (kW). $P=U\times I$ (Watts).

Def énergie : l'énergie est une mesure de la capacité d'un système à modifier un état, en particulier à produire un travail entraînant un mouvement, un rayonnement électromagnétique ou de la chaleur. $E=P\times t$ (Joules ou Wh).

2) Calcul de Puissance :

Mode	Courant (mA)	Puissance (W)
Réception	17	0.0561
Emission	82	0.2706
Normal	7.2	0.02376
Veille	95 µA	0.00031

3) Calcul de la durée, tout d'abord : $1\text{ms} = \frac{1}{3\,600\,000}$ heures

Phase	Durée (ms)	Energie consommée (Wh)
Réception	1.6	2.5 e^{-8}
Emission	2.1	15.8 e^{-8}
Normal	2.4	1.6 e^{-8}
Veille	4.2	0.04 e^{-8}
Cycle total	10.3	19.9 e^{-8}

- 3.2.b – consommation de votre carte LoRa dans le cadre de votre application

$$T_b = \frac{2^{SF}}{BW \cdot SF}$$

4) T_b est la formule pour 1 bit, nous en avons 220 bits par trame en émission !

Durée max : (BW = 125 kHz, SF = 8) | $T_b = 2.56 \text{ e}^{-4}$ | $T_b * 220 = 56.32 \text{ ms}$

Durée min : (BW = 500 kHz, SF = 7) | $T_b = 3.66 \text{ e}^{-5}$ | $T_b * 220 = 8.05 \text{ ms}$

Pour la réception le nombre de bits est identique.

5) Émission :

Min : Comme l'on transmet seulement pendant 8.05 ms toutes les 100 ms, on a un facteur de 8.05% donc : $0.2706 * 0.0805 = 0.0217833 \text{ Wh}$

Max : Comme l'on transmet seulement pendant 56.32 ms toutes les 100 ms, on a un facteur de 56.32% donc : $0.2706 * 0.5632 = 0.15240192 \text{ Wh}$

6) Réception :

Min : Comme l'on transmet seulement pendant 8.05 ms toutes les 100 ms, on a un facteur de 8.05% donc : $0.0561 * 0.0805 = 0.00451605 \text{ Wh}$

Max : Comme l'on transmet seulement pendant 56.32 ms toutes les 100 ms, on a un facteur de 56.32% donc : $0.0561 * 0.5632 = 0.03159552 \text{ Wh}$

- 3.2.c – dimensionnement de la source d'alimentation

7) $E = P \times t$

$$E = 3.7 \times 2.6 = 9.62 \text{ Wh}$$

8) Émission :

Condition	Energie par trame	Nb de trames possible	Autonomie (1 trame toutes les 100 ms)
Min	21.8 mWh	15 876 000	441 h
Max	152 mWh	2 268 000	63 h

9) Réception :

Condition	Energie par trame	Nb de trames possible	Autonomie (1 trame toutes les 100 ms)
Min	4.6 mWh	75 276 000	2091 h
Max	31.6 mWh	10 944 000	304 h

○ Synthèse :

Après avoir testé l'ensemble des paramètres, on observe que l'on peut négliger la consommation car pour notre projet ce sera une batterie de voiture qui sera utilisée donc la carte Lora fournie une puissance bien inférieure à celle de la batterie. J'ai pu observer avec les tests que plus on augmenté la bande passante moins on consomme car la trame est réduite et quand on augmente le SF on consomme plus donc une plus grande trame. Alors on peut voir d'après les tests effectués que le meilleur cas possible serait de 500 kHz avec un SF égale à 7 et une longueur de trame de 10 ms. Pour le moment, l'idéal serait de prendre une bande passante de 250 kHz avec un SF égale 8 et une longueur de trame de 40 ms. Ce qui est le meilleur compromis sans avoir fait les tests de portées.

Séance encadré n°5 :

Projet LoRa

2 – Test de transmission

Demander à l'enseignant de vous allouer une fréquence porteuse. Selon vous, quel est l'intérêt de cette allocation de fréquence par projet ?

- L'intérêt de cette allocation de fréquence par projet permet d'éviter de capter les trames des autres projets et donc de ne pas avoir des interférences sur la fréquence.

Fixer la puissance d'émission à 14 dBm (puissance maximale autorisée) dans la bande ISM utilisée. A votre avis, pourquoi choisir cette puissance ?

- Aller au-delà de 14 dBm serait illégal sans licence, car cela risque d'interférer avec d'autres systèmes sans fil dans cette bande libre.
- Cette puissance est idéale pour les applications IoT avec autonomie sur batterie, comme les capteurs LoRa car on atteint une bonne portée, surtout en zone dégagée, sans consommer trop d'énergie.

Faites un test de transmission émetteur/récepteur :

en émission conserver les réglages par défaut de la modulation LoRa (hormis la fréquence d'émission bien sûr !). Vous mettrez en payload « Test et nom de l'émetteur »

Vous allez à présent tester les effets du préambule sur votre transmission. A priori, comment auriez-vous tendance à faire évoluer la longueur de préambule afin d'optimiser votre transmission (consommation, taux de bits « utiles » par transmission) ?

On va la laisser comme elle est par défaut, pour permettre un haut taux de bits utiles contrairement à la consommation qui n'est pas très nécessaire.

Band Wigth (kHz)	SF	Réception du payload ?	Avec ou sans erreur ?	Commentaire
1	7	Oui	Sans	rapide
	8	Oui	Sans	- rapide
	9	Oui	Sans	moyen
	10	Oui	Sans	lent
250	7	Oui	Sans	rapide
	8	Oui	Sans	- rapide
	9	Oui	Sans	moyen
	10	Oui	Sans	lent
500	7	Oui	Sans	rapide
	8	Oui	Sans	moyen
	9	Oui	Sans	moyen
	10	Oui	Sans	lent

- Modifier la longueur du préambule dans ce sens. Quels effets constatez-vous sur les transmissions ? Fixez une valeur de préambule qui vous semble optimale. Justifiez votre choix.

La valeur fixée pour le préambule est de 8, elle nous semble optimale pour rentrer 10 trames par seconde, les effets constatés sur la transmission est qu'elle devient plus lente si l'on modifie son préambule.

Vous allez à présent fixer le CRC de votre transmission.

- Avez-vous constaté des erreurs de transmission parmi les tests effectués à différents SF et BW ? Modifier le CRC afin de garantir une bonne qualité de transmission tout en optimisant votre transmission (consommation taux de bits « utiles » par transmission). Fixez une valeur de CRC qui vous semble optimale. Justifiez votre choix.

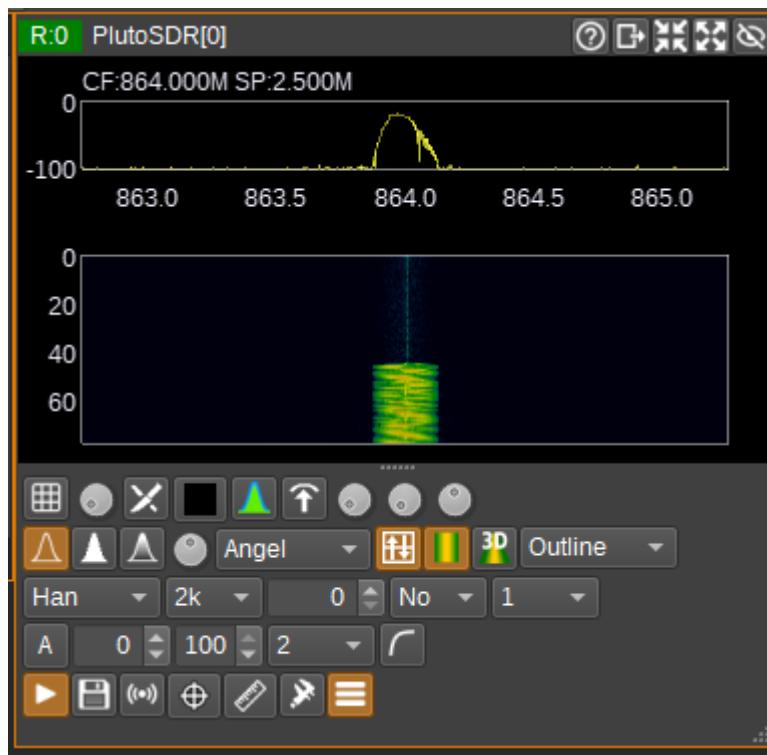
Non on a pas remarqué des erreurs pour différentes SF et BW, on a testé tous les CRC mais le meilleur reste celui à 6.

Conclure cette partie sur les choix de préambule, de CRC et les valeurs de Bande passante et de SF que vous ne souhaitez pas continuer à utiliser dans la suite du projet. Si vous décidez d'écartez certaines valeurs BW/SF, justifier ces choix. Dans tous les cas, conserver au moins deux valeurs de BW et deux valeurs de SF (elles peuvent être différentes de celles initialement prévues dans le travail préparatoire à cette séance)

Pour conclure les choix choisis pour les valeurs sont SF= 7, SB = 500k, CRC = 6, préambule = 10, ces choix sont les plus intéressants pour optimiser la batterie !

3 – Mesures de trames LoRa avec SDRangel

1)



- 2) On observe que plus la bande passante augmente, moins ça consomme.
- 3) On observe que plus le SF augmente, plus ça consomme.
- 4) On prend SF= 8 et Bande Passante = 250 on est encore dans les temps. Celle choisie.

BandWidth (kHz)	SF	Longueur de la trame (ms)	Temps de silence	Validité C.C du projet
125	7	40	60	Oui
	8	90	10	Oui
	9	140	x	Non
	10	280	x	Non
250	7	20	80	Oui
	8	40	60	Oui
	9	70	30	Oui

	10	140	x	Non
500	7	10	90	Oui
	8	20	80	Oui
	9	30	70	Oui
	10	70	30	Oui

5) Ce n'est pas possible car si on prend la longueur de trame de 40 ms et qu'on la multiplie par 100 qui le temps de silence on a 4000 ms ce qui est beaucoup trop.

Solution : Négliger le débit.

6) Conso = Puissance * Temps utilisé par trame
 Durée de vie de la batterie = ConsoB / Conso

BandWidth (kHz)	SF	Longueur de la trame (ms)	Conso énergie par trame (mWh)	Durée de vie de la batterie (h)
125	7	40	108.24	89
	8	90	243.54	40
	9	140	x	x
	10	280	x	x
250	7	20	54.12	178
	8	40	108.24	89
	9	70	189.42	51
	10	140	x	x
500	7	10	27.06	356
	8	20	54.12	178
	9	30	81.18	119
	10	70	189.42	51

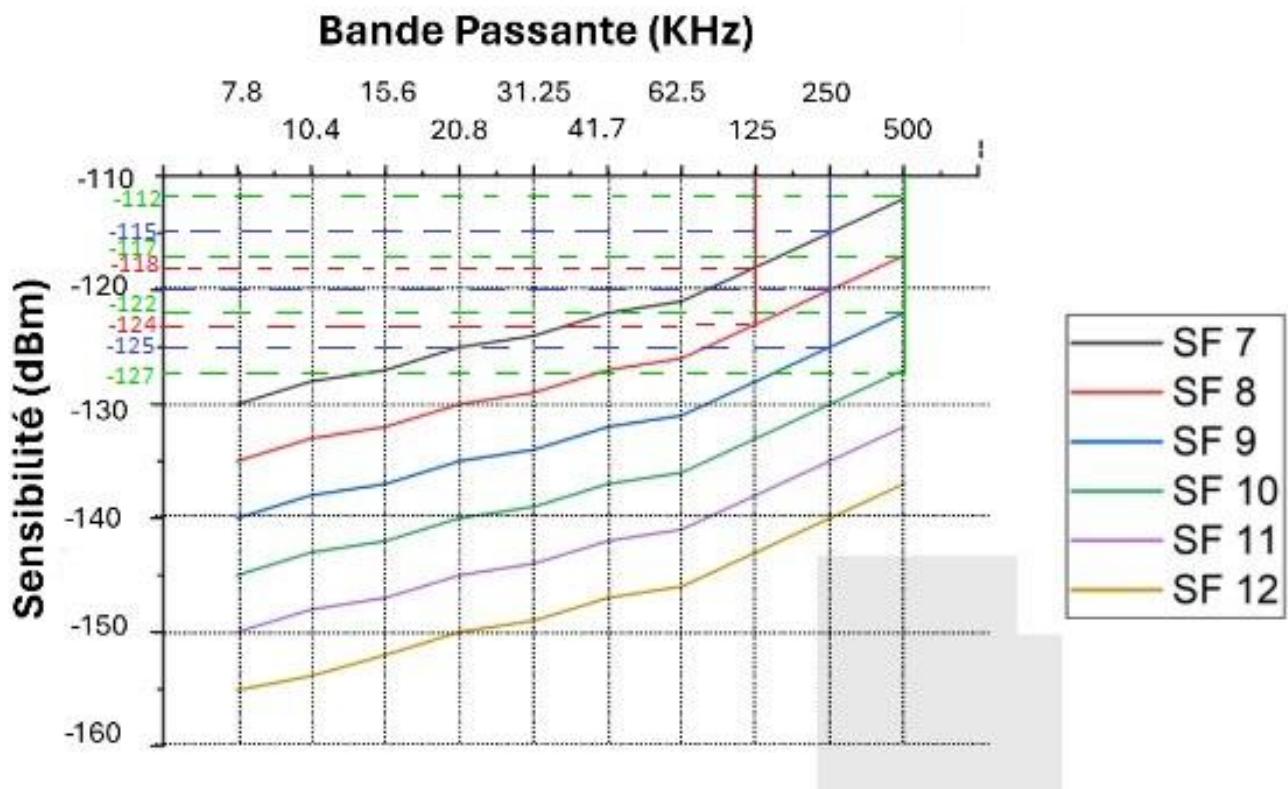
Séance non encadré n°6 :

Projet LoRa

3 – Etude théorique de la portée d'une transmission LoRa

a) Pour rappel, la puissance d'émission maximale que l'on peut émettre dans la bande ISM (868 MHz) en Europe est de 14 dBm. (Pourquoi ? : Voir “2 – Test de transmission”)

b)



Par lecture graphique on obtient le tableau suivant :

BandWidth (kHz)	SF	Sensibilité (dBm)
125	7	-118
	8	-124
250	7	-115
	8	-120
	9	-125

500	7	-112
	8	-117
	9	-122
	10	-127

c) Pertes maximales = Puissance d'émission - Sensibilité du récepteur

Pour notre application avec SF=7 ; BP=250 kHz, les pertes maximales que nous pouvons tolérer pour que notre transmission fonctionne sont de : $14 - (-115) = 129$ dBm

BandWidth (kHz)	SF	Sensibilité (dBm)	Pertes maximales (dBm)
125	7	-118	$14 - (-118) = 132$
	8	-124	$14 - (-124) = 138$
250	7	-115	$14 - (-115) = 129$
	8	-120	$14 - (-120) = 134$
	9	-125	$14 - (-125) = 139$
500	7	-112	$14 - (-112) = 126$
	8	-117	$14 - (-117) = 131$
	9	-122	$14 - (-122) = 136$
	10	-127	$14 - (-127) = 141$

d) Notre application (BP = 250 kHz ; SF = 7 ; sensibilité = -115 ; pertes max = 129) :

$$\text{Pertes max} = 146,4 + 44,9 \cdot \log(R) + C$$

$$\Leftrightarrow \log(R) = \frac{129 - 146,4 - C}{44,9} = \frac{-17,4 - C}{44,9}$$

$$\Leftrightarrow R = 10^{\frac{-17,4 - C}{44,9}}$$

- milieu urbain ($C = 0$) : $R = 10^{\frac{-17,4}{44,9}} \approx 0,41$ km
- milieu suburbain ($C = -9,85$) : $R = 10^{\frac{-17,4 - (-9,85)}{44,9}} \approx 0,68$ km
- milieu rural ($C = -28,35$) : $R = 10^{\frac{-17,4 - (-28,35)}{44,9}} \approx 1,75$ km

La portée maximale pour notre application varie de 410 mètres à 1,75 km en fonction du milieu dans lequel on se trouve, pour un SF à 7 et un BP à 250 kHz.

BandWidth (kHz)	SF	Pertes maximales (dBm)	Portée (m)
125	7	$14 - (-118) = 132$	478 - 2045
	8	$14 - (-124) = 138$	650 - 2781
250	7	$14 - (-115) = 129$	410 - 1750
	8	$14 - (-120) = 134$	529 - 2266
	9	$14 - (-125) = 139$	684 - 2928
500	7	$14 - (-112) = 126$	351 - 1503
	8	$14 - (-117) = 131$	454 - 1943
	9	$14 - (-122) = 136$	587 - 2511
	10	$14 - (-127) = 141$	758 - 3244

e) Méthode d'extrapolation de la portée LoRa au-delà de 100 m :

1. Mesurer le RSSI jusqu'à 100 m :

Réaliser des mesures de la puissance du signal (RSSI) à différentes distances (ex : 10, 20, 50, 75, 100 m) pour établir une base expérimentale.

2. Utiliser un modèle de propagation log-normale :

Le modèle :

$$Pr(d) = Pt - 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d)$$

permet d'estimer le RSSI à une distance d, où :

- $Pr(d)$: puissance reçue à d,
- Pt : puissance d'émission,
- n : coefficient de perte (à déterminer à partir des mesures),
- $\log_{10}(d)$: logarithme de la distance.

3. Déterminer le coefficient n :

En comparant deux mesures (ex : -40 dBm à 10 m, -70 dBm à 100 m), on calcule n. Ici, la perte est de 30 dB pour un facteur 10 → n=3.

4. Extrapoler la portée :

En utilisant ce modèle, on peut estimer le RSSI à 500 m, 1 km, etc., tant que le RSSI reste au-dessus du seuil de réception (ex. -120 dBm)

4 – Synthèse

D'après les données théorique reçu pour un $BW = 500$ avec un $SF = 10$ est la meilleure solution pour optimiser la portée, en revanche il va sacrifier la consommation mais de notre point de vue pour ce projet de système embarqué il est négligeable grâce à la batterie directement dans le véhicule et l'autre capteur dans le stand d'écurie de la voiture.

SaE 22

Mesurer et caractériser un signal ou un système

3ème séance encadrée

2.2 Mesures de transmission

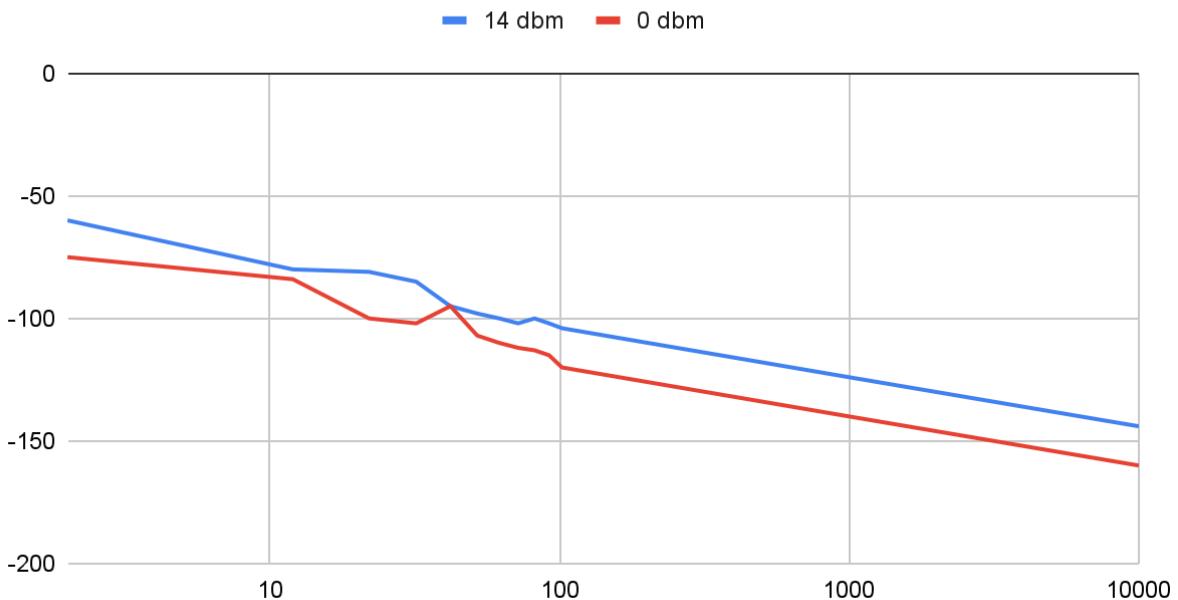
2.2.1 Mesures en extérieur

Mesure faites en extérieur, avec pour référentiel l'émetteur :

Distance (m)	Emission à 14 dbm (dbm)	Émission à 0 dbm (dbm)	Influence du batiment à 0 dbm (dbm)
2	-60	-75	X
12	-80	-84	X
22	-81	-100	X
32	-85	-102	X
42	-95	-100	-110
52	-98	-107	X
62	-100	-110	X
72	-102	-112	X
82	-100	-113	X
92	-102	-115	X
102	-104	-120	X

On à un facteur de -20 dbm toutes les puissances de 10 en extérieur.

Courbes d'atténuation en extérieur



2.2.2 Mesures en intérieur

Toutes ces mesures ont été faites à 14 dbm en émission et le référentiel est la salle qui contient l'émetteur, SF = 7 :

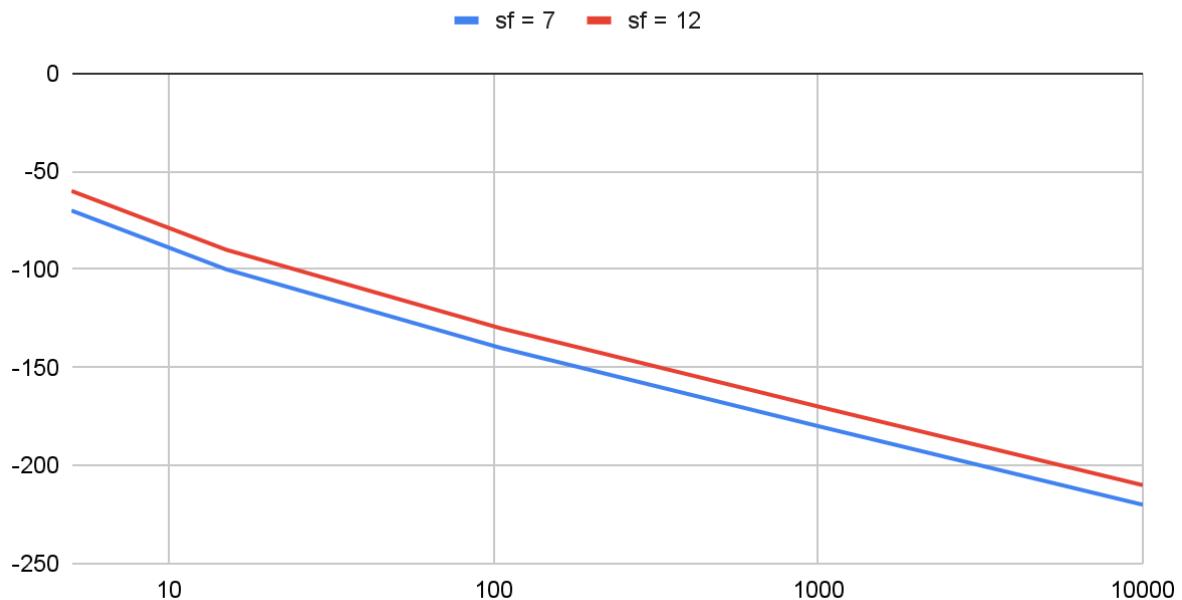
Porte ouverte	-65 dbm
Porte fermée	-70 dbm
Derrière le mur	-70 dbm
1er étage	-80 dbm

Toutes ces mesures ont été faites à 14 dbm en émission et le référentiel est la salle qui contient l'émetteur, SF = 12 :

Porte ouverte	-60 dbm
Porte fermée	-65 dbm
Derrière le mur	-65 dbm
1er étage	-70 dbm

On à un facteur de -40 dbm toutes les puissances de 10 en intérieur.

Courbes d'atténuation en intérieur



2.2.3 Validation de la portée de votre projet

Formule de Friis car on estime que sur circuit nous serons dans un espace libre :
 $\text{Pertes(dB)}=20\log_{10}(d)+20\log_{10}(f)+32.44$ avec d la distance en km et f la fréquence en MHz.

Configuration	Static à 100m (dbm)	En Mouvement à 100m (dbm)
SF = 8 ; BW = 125kHz	-80	-90
SF = 7 ; BW = 250kHz	-90	-100
SF = 8 ; BW = 250kHz	-100	-103
SF = 7 ; BW = 500kHz	-90	-95

2.2.4 Conclusion

Lorsque l'on regarde le plancher max possible on voit que le plus intéressant serait pour la portée : SF = 8 et BW = 125 kHz avec un temps d'émission de 90 ms ce qui est suffisant pour notre cas.

Avec un SF = 8 et un BW = 125 kHz notre plancher max est de : -125 dbm.

Pour 1 km on a environ 15 db de pertes soit $-90 - 15 = -105$ dbm on est au dessus des -125 dbm ce qui est parfait et nous permet d'avoir une communication possible dans un espace libre sur 1 km !

La solution qu'on a adapté pour notre problème est d'installer des antennes tout les kilomètres, parce que la portée de la carte n'est pas prévue pour transmettre sur de longue distance comme des courses de voiture, le choix fait est un bon compromis entre débit, consommation et portée.

Cependant nous avons quand même besoin de débit pour envoyer assez rapidement les trames pour informer le conducteur, mais aussi avec une portée conséquente.

Donc pour conclure la configuration finale utilisée en rouge est la meilleure solution pour notre système embarqué sur une voiture de course.