

Chapitre V : Liaison optique

I. La fibre optique

La fibre optique est structure de silice très fine à géométrie cylindrique qui a la propriété de guider la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques..

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur : les fibres monomodes représentées dans la Figure V-1 et les fibres multimodes.

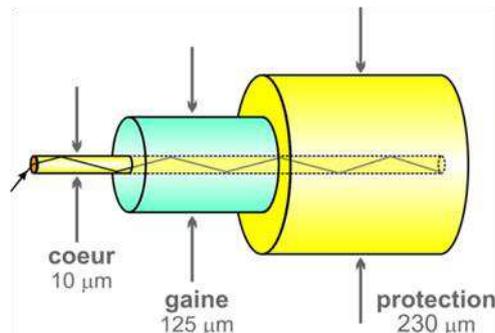


Figure V-1 : Schéma de la fibre monomode.

Les fibres multimodes ont été les premières sur le marché. Elles ont pour caractéristiques de transporter plusieurs modes (trajets lumineux). Elles sont caractérisées par un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres (les cœurs en multimodes sont de 50 ou 62,5 µm pour le bas débit). Du fait de la dispersion modale, on constate un étalement temporel du signal proportionnel à la longueur de la fibre. En conséquence, elles sont utilisées uniquement pour des bas débits ou de courtes distances. Les plus récentes permettent d'atteindre le Gbit/s sur des distances de l'ordre du kilomètre.

Pour de plus longues distances et/ou de plus hauts débits, on préfère utiliser des fibres monomodes (dites SMF, pour Single Mode Fiber), qui sont technologiquement plus avancées car plus fines. Leur cœur très fin n'admet ainsi qu'un mode de propagation, le plus direct possible c'est-à-dire dans l'axe de la fibre. Grâce aux procédés technologiques utilisés et la pureté du matériau, les pertes sont donc minimales que cela soit pour de très hauts débits et de très longues distances. Ces fibres monomodes sont caractérisées par un diamètre de cœur de

seulement quelques micromètres (le cœur monomode est de $9\ \mu\text{m}$ pour le haut débit). Une fibre monomode n'a pas de dispersion intermodale. En revanche, il existe d'autres types de dispersion : la dispersion intramodale du guide d'onde et la dispersion matériau. Ensemble ils forment la dispersion chromatique qui s'exprime en $\text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ et caractérise l'étalement du signal lié à sa largeur spectrale dans la base temporelle (pour une fibre standard opérant pour les longueurs d'onde autour du $1.55\ \mu\text{m}$ la dispersion est de $17\text{ps}/\text{nm}\cdot\text{km}$).

Ainsi, la dispersion chromatique se traduit par un élargissement de la durée d'une impulsion lors de son passage à travers la fibre (Figure V-2). Comme l'impulsion s'élargit, elle peut interférer avec les impulsions voisines, ce qui conduit à des interférences inter-symboles.

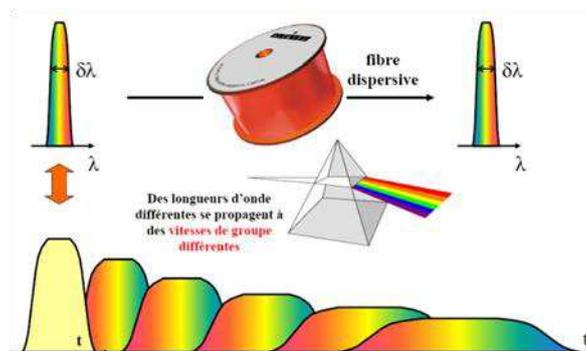


Figure V-2 : dispersion chromatique sur la fibre monomode

La dispersion chromatique est due au fait que l'indice de réfraction varie en fonction de la longueur d'onde. Alors, si le signal transmis est constitué de plusieurs longueurs d'ondes (ou d'un paquet d'ondes), certaines d'entre elles vont se propager plus rapidement que les autres. Étant donné qu'aucun laser ne peut créer un signal composé d'une seule longueur d'onde précise, la dispersion chromatique se produit dans la plupart des systèmes.

Dans notre cas, on choisit d'utiliser des fibres monomode pour transférer le signal GNSS. Les longueurs utilisées varient de 200 m à 1850 m. Par conséquent l'effet de la dispersion chromatique est négligeable. Ainsi on bénéficie de tous les avantages de la fibre optique notamment sa légèreté, sa souplesse, ses faibles pertes de puissance et sa faible sensibilité aux changements climatiques.

II. Synoptique de la liaison optique dans une transmission Radio-sur-Fibre

Pour transmettre des données sur une fibre optique, le signal contenant les informations doit moduler une source laser, et ceci soit d'une manière directe soit par le biais d'un modulateur externe. Ce signal peut être modulé au préalable (modulation analogique ou

numérique) ou en bande de base. Les techniques de modulation analogique comprennent la modulation d'amplitude (AM), la modulation de fréquence (FM), et la modulation de phase (PM). Les techniques numériques comprennent les modulations ASK (amplitude), FSK (fréquence) et PSK (phase).

Pour passer sur fibre, le signal RF a principalement besoin de trois blocs : émetteur ou modulateur, fibre optique et récepteur ou démodulateur qui peut être simplement une photodiode comme dans Figure V-3. Il y a, éventuellement, des amplificateurs qui servent à compenser ou augmenter la puissance en sortie en cas de besoin. Dans le cas de la figure ci-dessous, le signal en entrée module directement la source Laser. Il est aussi possible d'intercaler un modulateur externe entre la diode laser et la fibre, et celui-ci module la sortie optique du laser suivant la variation du signal de contrôle.

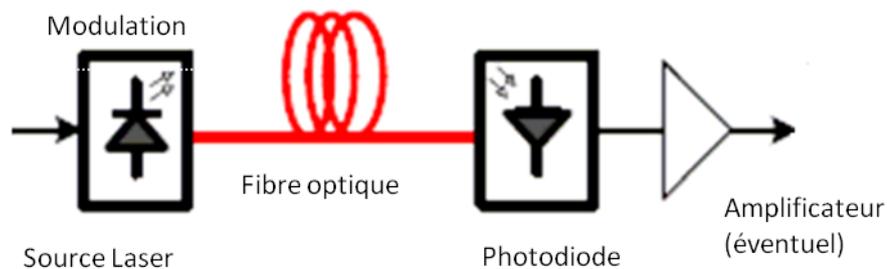


Figure V-3 : montage de transmission sur fibre optique

Dans la suite on détaillera les deux boîtes émettrice et réceptrice présentées Figure V-3 et on décrira les bruits et la distorsion non linéaire que chacune peut introduire dans la liaison optique.

1. Émetteur ou modulateur

Comme indiqué précédemment, on distingue deux types de modulation : interne (ou directe) et externe. Une des techniques les plus utilisées dans le domaine des signaux RF est la « Modulation d'intensité avec une détection directe (IM-DD) » (Ng'oma 2005). Le signal module l'intensité d'une porteuse optique, puis on utilise la détection directe par une photodiode pour le récupérer. L'émission est réalisée par l'une des deux méthodes de modulation interne ou externe.

a. Modulation interne / directe

Cette méthode consiste à laisser le signal radiofréquence directement moduler le courant de la source laser comme illustré dans la Figure V-4. En effet, la variation du signal RF modifie la

quantité de porteurs injectée dans la cavité laser et par conséquent le nombre de photons générés. Ainsi la variation du signal RF induit celle de la puissance optique en sortie.

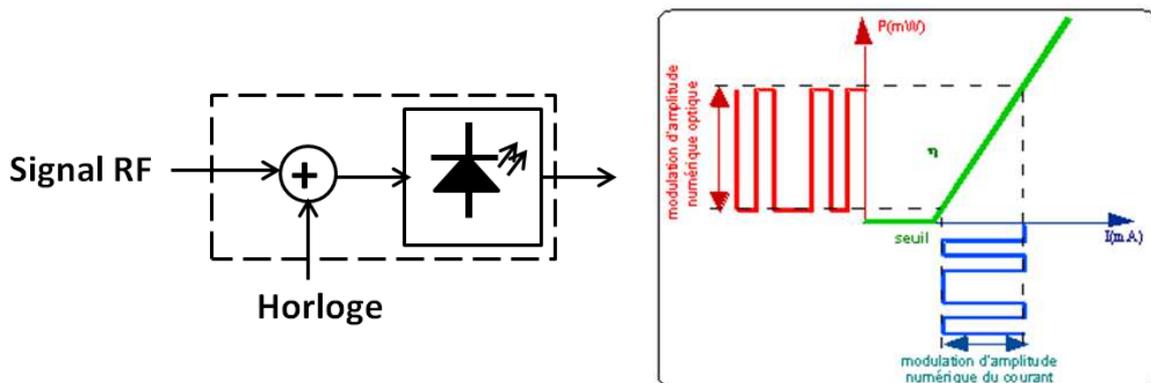


Figure V-4 : la modulation directe

Pour la démodulation, une photodiode est utilisée pour retrouver le signal modulant. C'est une technique qui ne nécessite aucun composant supplémentaire et qui est efficace jusqu'à plusieurs GHz. mais qui présente beaucoup de distorsions dans le système (conversion électro-optique). Ceci limite la fréquence de modulation du système à quelques GHz. Toutefois suivant le type de modulation choisie, certains effets doivent être considérés. Par exemple, pour une méthode de modulation numérique simple comme l'ASK une approche de modulation directe peut conduire (selon la longueur de la fibre) au phénomène de « chirps » (Akrouit et al. 2008).

Ce type de dégradation apparaît dans la source laser. Elle se manifeste par un couplage phase-intensité et induit une variation de la fréquence instantanée de la source en fonction du temps. Et dans ce cas, le signal modulé s'écrit en fonction du signal modulant $s(t)$ sous la forme : $s(t) \cdot \exp(i\omega t + \varphi(s(t)))$.

En effet, quand la source laser est modulée directement par un signal de données, il en résulte une variation de la quantité de porteurs dans la cavité du laser, d'où la modification de l'indice n du matériau. Ceci est dû au fait que l'indice n est directement lié au nombre de porteurs dans le semi-conducteur. Dès lors, on obtient une impulsion « chirpée » comme celle présentée dans Figure V-5. Dans ce cas le signal transmis peut subir les effets de distorsion linéaire (VERGNOL 1999) (qui sont rectifiables) dus seulement à la source laser ou non linéaire (VERGNOL 1999) quand le phénomène de « chirp » est couplé avec la dispersion chromatique le long de la fibre. L'impact du « chirp » dépend de la distance parcourue par le signal et de son débit. Par exemple, pour une fibre standard transmettant un signal à 2.5 Gbps,

on peut aller jusqu'à 100 km et pour un débit de 10 Gbps, la distance est limitée à 6 km. Ces valeurs ne servent que pour donner un ordre de grandeur puisque cette technologie s'améliore très vite au fil des années.

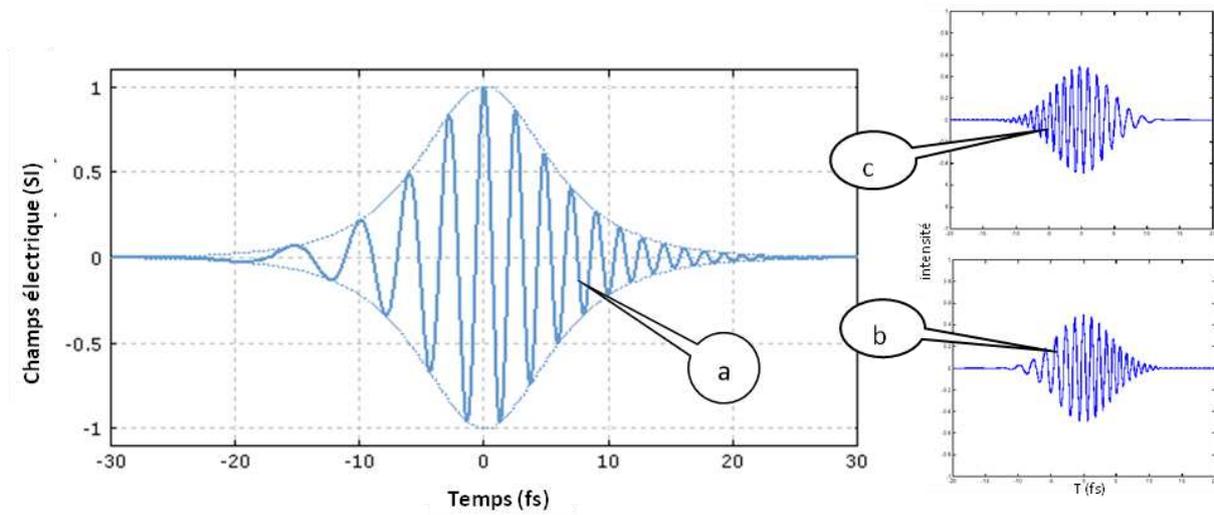


Figure V-5 : exemples de pulses « chirpés » positivement (pulses a et b) ou négativement (pulse c)

Mais pour des longues distances, il y a principalement deux solutions pour éliminer ces distorsions :

- La technique de la bande latérale unique (Single Side-Bande “SSB”) où on ne garde dans le signal transmis qu’un des deux cotés latéraux par rapport à la porteuse optique.
- L’utilisation des fibres à compensation avec un « chirp » négatif pour corriger les effets linéaires du « chirp ».

Une approche privilégiée, pour contourner ces problèmes ou du moins les minimiser, est la modulation externe qu’on présente dans le paragraphe suivant.

b. Modulation externe

Le principe de la modulation externe consiste à faire varier le nombre de photons transmis à travers le modulateur. Alors, on n’agit pas directement sur la quantité de photons fabriqués mais sur le flux transmis à la fibre. Cette méthode est préférable quand on a besoin d’une large bande de transmission ou de transmettre sur une longue distance de fibre. Sa mise en œuvre se fait par l’intermédiaire d’un modulateur externe comme présenté dans le schéma de la Figure V-4.

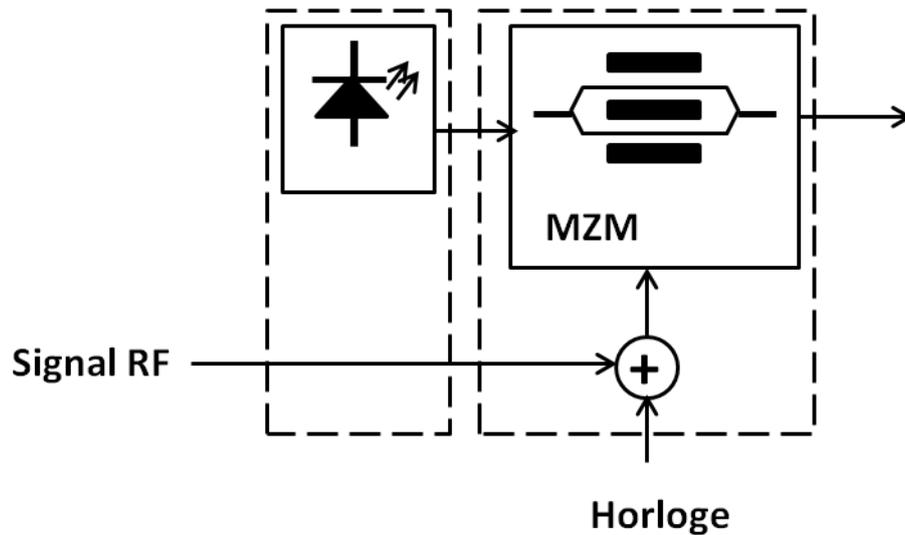


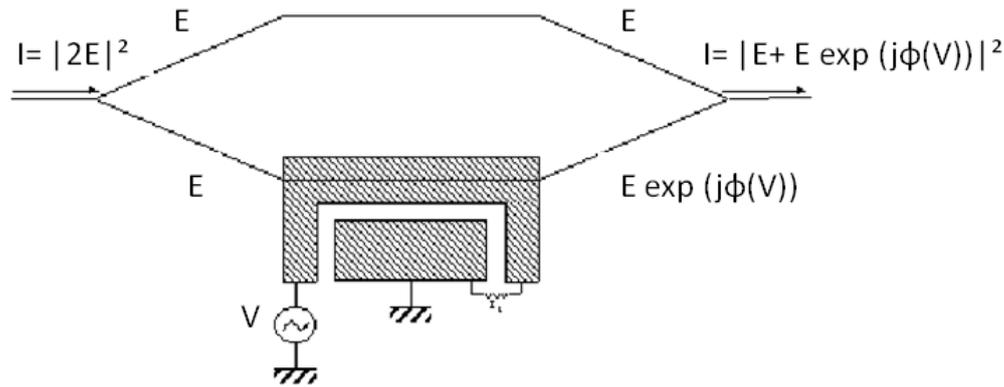
Figure V-6 : montage de la modulation externe

Il y a trois types de modulateurs externes possibles :

- électro-optique
- électro-absorption
- interféromètre optique.

Pour illustration, on présentera l'exemple du modulateur Mach-Zehnder (*Al-Raweshidy & Komaki 2002; VERNEUIL 2003*).

Les effets électro-optiques sont la base du fonctionnement de l'interféromètre Mach-Zehnder, à savoir que l'indice de réfraction de certains matériaux peut être modifié par l'application d'un champ électrique, variant selon la modulation des données. La technique utilisée pour moduler l'amplitude d'un faisceau consiste à lui faire traverser un interféromètre de Mach-Zehnder dans lequel il est possible de commander la différence de phase entre les deux bras.



I : intensité du signal à l'entrée
 E : le champ électromagnétique du signal optique
 V : la tension du champs électrique modulant

Figure V-7 : Schéma d'un interféromètre de Mach-Zehnder

La lumière est couplée dans deux guides par un embranchement en Y. la deuxième branche est commandée en phase par la tension appliquée V . Les deux faisceaux se recombinaient ensuite dans un deuxième embranchement de même type. Ils interfèrent de manière constructive (toute la puissance optique est disponible en sortie), ou destructive (aucune lumière n'est injectée dans le guide de sortie). Entre ces deux extrêmes, tous les états intermédiaires sont possibles et la modulation de la lumière reproduit celle de la tension appliquée. L'absence de modulation de phase parasite évite ainsi tout problème de transmission lié au « chirp », mais le laser peut introduire d'autres bruits tel que le bruit relatif d'intensité (Relative Intensity Noise "RIN") c'est à dire des fluctuations aléatoires de la puissance émise.

L'origine physique du RIN est l'émission spontanée s'ajoutant aléatoirement en phase avec l'émission stimulée. Les fluctuations résultantes de la puissance émise limitent la dynamique de la transmission de signaux analogiques. Elles sont habituellement caractérisées après photodétection par le RIN exprimé par les deux équations suivantes :

$$RIN(f) = 10 \log(rin(f))$$

$$rin(f) = \frac{\langle \Delta P(f) \rangle^2}{P(f)^2}$$

Où $\langle \Delta P \rangle$ est la densité spectrale des fluctuations de la puissance optique P .

Le RIN se mesure en principe en seconde (Hz^{-1}) mais il est souvent donné en dB/Hz, la bande passante de la mesure étant supposée de 1 Hz. De façon générale, il décroît quand la puissance en sortie du laser augmente et il dépend de la fréquence avec un maximum à la fréquence de résonance. Sa valeur peut atteindre 10^{-16} s soit un RIN = -160 dB/Hz.

Le RIN est le bruit prépondérant dans la liaison optique. Un faible RIN est nécessaire pour une haute performance de la modulation analogique.

En comparant les deux techniques de conversion électrique/optique, on choisit d'appliquer la plus simple des deux à savoir la modulation interne. Malgré les limitations indiquées précédemment, cette approche devrait convenir à nos besoins. En effet, la porteuse (à 1,575 GHz pour les signaux GNSS) et la largeur de bande des signaux GNSS à transmettre (inférieure à quelques MHz) est assez faible (comparés aux ordres de grandeurs des fréquences utilisées dans le domaine optique). Dès lors, le problème du « chirp » (contraignant pour la modulation interne) devrait être sans effet majeur sur le signal GNSS. Par ailleurs, les distorsions attendues lors de la propagation des signaux optiques doivent également être négligeable du fait de la faible longueur des fibres visées (inférieures à 2 kilomètres). Notons que la technique retenue présente les avantages suivants : Elle est aisée de mise en œuvre et est également bas coût.

2. Le photodétecteur

L'interface optique de réception, dans une liaison à fibre optique, est chargée de convertir le signal lumineux en signal électrique, en lui apportant le minimum de dégradation. Ce rôle est tenu par le photodétecteur, qui pour simplifier, se comporte comme un compteur de photons et un générateur de courant. La première propriété requise est une sensibilité importante pour la longueur d'onde utilisée. La deuxième est la rapidité : il est utilisé dans des systèmes fonctionnant à 10 Gbits/s voire même 40 Gbits/s. La troisième propriété demandée est un apport minimum de bruit. Afin de satisfaire la plupart de ces conditions, le choix se porte sur les photodiodes à semi-conducteur, qui présentent les avantages d'être très rapides et faciles à utiliser, bien que d'autres dispositifs soient plus sensibles.

La méthode classique de démodulation sur un lien optique est la détection directe par une photodiode qui a la capacité de transformer un rayonnement optique en un signal électrique.

Une deuxième technique de détection qui repose sur le principe de cohérence de mélange dans la photodiode est désignée par le terme « Détection Hétérodyne ». Le principe de mélange peut être illustré comme suit. Deux signaux optiques de fréquences angulaires ω_1 et ω_2 peuvent être représentés par leurs champs électriques respectifs sous la forme suivante

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega_1 t) \quad \text{et} \quad E_2 = E_{02} \cos(\omega_2 t)$$

Le photo-courant résultant est proportionnel au carré de la somme des champs électriques.

Ainsi, le photo-courant i_{pd} , sera : $i_{pd} \sim (E_1 + E_2)^2$

On trouve : $i_{pd} \sim E_{01}E_{02} \cos((\omega_1 - \omega_2)t) + E_{01}E_{02} \cos((\omega_1 + \omega_2)t) + \text{autres termes}$

Le terme d'intérêt est : $E_{01}E_{02} \cos((\omega_1 - \omega_2)t)$ nous permet par le contrôle de la différence de la fréquence entre les deux champs électriques de générer la fréquence souhaitée. La seule limite de la fréquence du signal à générer reste la bande passante de la photodiode.

Étant donné que la fréquence d'émission laser est très sensible aux variations de température, il est nécessaire de maintenir la différence de fréquence entre les deux lasers en utilisant par exemple une boucle à verrouillage de phase optique (Optical Phase-Locked Loop "OPLL").

L'utilisation de la détection optique hétérodyne permet la génération de très hautes fréquences. En outre, cette technique conduit à un bon rapport de puissance détectée et de rapport signal sur bruit (SNR) étant donné que les deux champs optiques contribuent à la puissance RF générée. La détection hétérodyne est peu affectée par le phénomène de la dispersion chromatique. En effet si une seule des deux porteuses optiques est modulée par les données, la sensibilité du système à la dispersion chromatique peut être réduite considérablement.

L'inconvénient majeur de la détection hétérodyne est la forte influence du bruit de phase du laser et l'influence de la variation de fréquence sur la stabilité du signal RF généré.

De plus, il y a d'autres types de bruits qui proviennent de la photodiode et qui peuvent diminuer le rapport signal sur bruit dans les deux méthodes de détection. Ce sont principalement le bruit de grenaille et le bruit thermique qui sont capables de dégrader la qualité du signal dans une liaison optique.

Le bruit de grenaille apparaît dans les dispositifs à semi-conducteurs pour lesquels le courant électrique résulte du transport individuel des porteurs de charges (électrons et trous) sous l'action d'un champ électrique. La densité de courant s'exprime par $j = N.e.v$, où N représente le nombre de porteurs impliqués dans le transport, e la charge de l'électron, et v la vitesse des porteurs.

Ce type de bruit dérive de la fluctuation poissonnienne du nombre de porteurs N . Il est donc directement lié au courant électrique auquel il se superpose. On peut l'exprimer par la variance du courant électrique qui vaut : $2eIB$ où I est le courant défini par le nombre de charges intégrées pendant une durée τ ($I = ne / \tau$) et B la bande passante.

Le deuxième type de bruit est généré par l'agitation thermique des porteurs de charges sous l'action de la température. C'est le bruit thermique également nommé bruit de résistance ou bruit Johnson. La densité de puissance de ce bruit s'exprime en Watt par Hertz, et est constante avec la fréquence : ce bruit est "blanc". Ceci est parfaitement vrai pour les domaines de fréquences habituellement utilisés en transmission radio.

Dans des systèmes où l'impédance est adaptée, la puissance de bruit s'écrit alors :

$$N_0 = k T DF$$

avec la constante de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$
 T température du conducteur en degrés Kelvin
 DF la bande passante en Hertz

Dans le but de simplifier la structure du système à répélites, on décide d'utiliser une détection optique directe au moyen d'une photodiode. De plus la robustesse du signal GNSS au bruit nous affranchit des contraintes liées aux sources de distorsion (du signal) dans la photodiode.