

Communication Satellite

Eitan Altman

INRIA Sophia-Antipolis
2004 route des Lucioles, BP 93
06902 Sophia-Antipolis Cedex

URL:

<http://www-sop.inria.fr/mistral/personnel/Eitan.Altman/moi.html>

E-mail: `altman@sophia.inria.fr`

Cours présenté au DEA RSD, ESSI

OUTLINE

I. Le lien satellite

Le lien satellite

Ionosphère - gaz ionisé et électrons libres à cause des rayons UV et X du soleil.

A partir de 100km d'altitude.

Densité max: environ 10^6 elect/cm³. (Plus le jour, moins la nuit).
Le max est atteint à 250km la nuit, 350km le jour.

Durant la nuit: recombinaison du gaz ionisé et des électrons libres.

Mais plus on monte, moins le gaz est dense, donc moins il y a de collisions et de recombinaisons.

La ionosphère a une très grande influence sur les ondes radios.
Des réflexions des ondes moyennes MW (500KHz) déjà à 100km (couche E),
et des ondes courtes SW (2-8MHz) plus haut (couche F).
Des fréquences plus élevées ne sont pas réfléchies: VHF (30MHz),
UHF(300MHz, longueur d'onde 1m - antenne dipôle optimale: 2m).

Puissance Électromagnétique

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r c^2}{(4\pi)^2 D^2 F^2}$$

où

P_r est la puissance qui atteint l'antenne du récepteur,

P_t est la puissance du signal transmis,

G_t est le gain de l'antenne du transmetteur,

G_r est le gain de l'antenne du récepteur,

c est la vitesse de la lumière ($3 \times 10^8 m/sec$)

D est la distance en mètres,

F est la fréquence en Hz.

Les calculs se font en dB:

$$X[dB] = 10 \log_{10} X$$

Ex: 10W s'écrit 10 dBW, 100W s'écrit 20 dBW.

$$P_r = P_t + G_t + G_r - A_0,$$

où

$$A_0 \stackrel{\text{def}}{=} 10 \log_{10}(F^2 D^2) - 147.6 \quad (1)$$

représente l'atténuation due au lien dans le vide - "free space attenuation".

Ex:

$F = 1GHz$, GEO ($D = 35778Km$). Alors $A_0 = -183.5$.

Influence de l'angle:

— FIG — (p. 32)

$$D = R_0 \left[\sqrt{\left(\frac{R}{R_0}\right)^2 - \cos^2 \theta} - \sin^2 \theta \right]$$

$R_0 = 6378Km$, $R :=$ la distance du satellite par rapport au centre de la terre. Ex: GEO - 42166 Km.

Typiquement, on calcule en utilisant R à la place de D en (1), et on corrige après

Causes de pertes de puissance

- Absorption par l'air et la vapeur Dans des fréquences supérieures à 15GHz. Est presque constante pour des angles larges.
- Réfraction, multi-chemin Sensibilité pour des angles petits: quand on transmet vers l'horizon.
- Scintillation: Une onde avec une polarisation linéaire peut se représenter comme la somme de deux ondes avec polarisations elliptiques dans des sens opposés.
Dans la présence de champ magnétique, chaque onde a un coefficient de réflexion différent.
Les ondes se somment à la destination avec des phases aléatoires.
Quand les phases sont opposées, les ondes s'annulent.
- Rotation de Faraday:
Les deux composantes ont une vitesse un peu différente (à cause des coefficients différents de réflexion). Le résultat est que la polarisation de la somme des composantes tourne progressivement.
Solution: envoyer en polarisation circulaire (plus compliqué).
Les deux phénomènes sont importants dans la bande L (1-2 GHz) et deviennent moins importants dans des bandes plus élevées; ils sont négligeables dans la bande Ku (12.5-18 GHz).

- Atténuation de pluie:

Son influence croît avec la fréquence. Devient importante au dessus de 7 GHz. Des régions avec des orages ont des problèmes même avec des fréquences inférieures, surtout dans les zones tropicales.

- Problèmes des mobiles

Pertes quand il y a des blocages physiques, transmission d'une voiture sous des arbres, transmission près de grands immeubles.

Exemple de calcul de puissance

Ex. de transmission de vidéo numérique de débit de 40 Mbps, 3.95 GHz, bande C.

Satellite Galaxy VI, localisée à la longitude de 74° à l'est, GEO. Mesures par rapport à Los-Angeles, où l'angle d'élévation est 30° . [Elbert, 97, Chap. 2].

Transmission du satellite

- 1. Puissance de transmission (10W): 10dBW
- 2. Pertes dans le guide d'onde du transmetteur: 1.5 dB (environs 40% de pertes).
- 3. Gain de l'antenne: 27.0 dBi
Plus la surface couverte par l'antenne est grande, plus le gain est petit. Le "i" dans l'unité dBi est pour "isotrope": le gain par rapport à une antenne qui transmet uniformément. 27 dBi correspond à un gain de 500.
- 4. EIRP (Effective isotropique radiated power) $\stackrel{\text{def}}{=} 1-2+3 = 35.5\text{dB}$. (En pratique, seule une partie peut être utilisée selon le mode d'accès)
- 5. Perte A_0 : 196 dB.
Pour GEO, et pour des fréquences de 1 GHz à 30 GHz, on a A_0

entre 183 dB et 213 dB.

A cela s'ajoute la correction due à l'angle (correction max à 0° est 1.6 dB).

■ 6. Absorption atmosphérique: 0.1 dB

Augmente quand l'angle décroît, car l'onde traverse une couche plus large d'atmosphère.

Augmente avec l'humidité et la pluie.

■ 7. Gain de l'antenne de réception (diam. 3.2 m) 40.2 dBi

$G = 10 \log(108\eta f^2 d^2)$, où f est en GHz, d (diamètre) en m, η l'efficacité de l'antenne ≤ 1 .

Dans notre cas $\eta = 0.6$.

■ 8. Pertes dans le guide d'onde du récepteur: 0.5 dB

■ 9. Puissance reçue: -121.7 dBW (4-5-6+7-8)

Ce chiffre ne suffit pas pour déterminer la qualité de la réception. Il faut calculer aussi les bruits, et le rapport de puissance signal/bruit.

Le bruit est proportionnel à la bande passante.

- T := Température effective pour calcul de bruit au récepteur:
21.5 dBK
(140°K)
- Calcul de bruit: kTB , (en dB on prend la somme) où
 $k = -228.6 \text{ dB/Hz/K}$ est la constante de Boltzmann,
 B = la bande passante du bruit: 74 dB (correspond à 25MHz
nécessaire pour transmettre 40 Mbps).
En tout: -133.1 dB.

Conclusion: rapport signal bruit: 11.4 dB.
(Ne suffit pas encore pour savoir la qualité)

Transmission au satellite

Transmission de Boston, 6.175 GHz, bande *C*.

- 16. Puissance transmise (850W): 29.3 dBW
- 17. Pertes dans le guide d'onde du transmetteur: 2 dB
- 18. Gain de l'antenne de transmission (7m): 50.6 dBi
- 19. EIRP (=16-17+18) 77.9 dBW
- 20. Pertes de diffusion: 162.2 dBm^2

Calculé par

$$10 \log_{10}(4\pi D^2)$$

(*D* est la distance).

- 21. Pertes atmosphérique: 0.1 dB
- 22. Densité du flux au satellite: -84.4 dBW/m^2

En pratique, on peut calculer la densité de flux reçue au satellite, *en fonction de l'endroit duquel on transmet*, qui est *nécessaire pour un signal maximal*.

(Un signal plus faible ne peut pas être amplifié suffisamment pour avoir la puissance dans (1)).

On appelle cette quantité le SFD - saturation flux density.

- 23. Pertes A_0
- 24. Gain de l'antenne de réception: 26.3 dBi
- 25. Pertes dans le guide d'onde du récepteur: 0.5 dB

Considération de bruit thermique:

- 26. Température effective de bruit: 26.5 dBK
(450°K) typique à la bande C .
- 27. $G/T \stackrel{\text{def}}{=} 24-25-26$: -0.7 dB/K
- 28. $C/T \stackrel{\text{def}}{=} 19 -23 -21 + 27$: -122.9 dBW/K
- 29. Constante de Boltzmann: -288.6 dBW/Hz/K
- 30. Bande passante: 74 dB Hz
- 31. Relation porteuse/bruit (28-29-30) - 31.7 dB
(Puissance du bruit: kBT , même calcul qu'avant).

Considérations globales

Ce qui compte c'est le rapport signal/bruit global.

Au bruit thermique il faut ajouter les *Interférences* (env. 18 dB), causées par des problèmes' de polarisation, et de transmission d'autres satellites.

On obtient 10.5 dB.

Relation S/B nécessaire: 8 dB.

(Meilleur pour des récepteurs numériques, qui peuvent utiliser des FECs).

Marge: 2.5 dB (la différence entre le S/B et le minimum permis).

Ceinture de radiation de Van Allen: ("radiation belt")

Des protons très énergétiques dus au rayons cosmiques.

Van Allen: le nom d'un satellite envoyé sur la lune, qui a échoué et retombé. En tombant, il est repassé par cette zone et a transmis beaucoup de données. On évite de mettre des satellites dans cette zone.

2 zones:

1500km-5000km,

13000km - 20000km.

Les LEO sont plus bas que la 1ère zone,

Les MEO sont entre les zones.

Les orbites elliptiques MOLNYIA traversent les 2 zones (c.f. Archimedes, Ellipso).

Durée de vie de ces satellites est réduite.

Bandes fréquences

Les bandes radio et télé:

- AM - autour de 1 MHz,
- HF - autour de 10 MHz,
- VHF - autour de 100 MHz,
- UHF - à partir de 300 MHz, jusqu'à 900 MHz.

Les bandes satellites:

- L: 1-2 GHz
- S: 2-4 GHz
- C: 4-8 GHz
- X: 8-12.5 GHz
- Ku: 12.5-18 GHz
- K: 18-26.5 GHz
- Ka 26.5 - 40 GHz

Comparaisons:

- Plus la fréquence est élevée, plus l'antenne est petite (ordre de la taille de la longueur d'onde. Même phénomène que dans les haut-parleurs). D'où l'avantage de fréquences élevées.
- Plus la fréquence est élevée, plus les bandes passantes disponibles pour les applications sont grandes.
- La propagation se détériore en augmentant les fréquences.
- Les meilleures propriétés de propagation: entre 1 et 2.5 GHz (bandes L et S), utilisées pour les MSS (Mobile satellite service: communications entre avions, communication pour les voitures, navigation) et autres applications.
- Des services large-bande (DTH - Direct to Home TV, et B-ISDN) utilisent de bandes plus élevées, traditionnellement *C*, et de plus en plus - Ku et Ka.

Bande *L*

Service:

MSS (terminaux mobiles etc)

TV UHF

Téléphones cellulaires (c.f. Iridium)

Liens de télévision pour les studios.

1 GHz à 2 GHz. Utilisée depuis début 1970.

Initialement, seuls 30MHz de “uplink” et “downlink” ont été alloués pour les applications mobiles.

Les premiers MSS avaient des paraboles (antenne en forme d’assiette) qui devaient pointer directement sur le satellite, et demandaient des équipements larges, ou bien des antennes d’une longueur de 1m.

Aujourd’hui: équipements de la taille d’un cartable, et téléphones portables. L’antenne n’a pas besoin de pointer dans la direction du satellite.

Pas d’atténuation due à la pluie. Mais dégradation du lien à cause du ionosphère.

Bande S

2-4 GHz. Utilisée pour des activités de recherches gouvernementales autour du globe, surtout NASA. En particulier, des activités de recherche dans l'espace profond.

Récemment adoptée par le ITU pour des applications futures de MSS et de mobiles.

Plus de pertes atmosphériques que la bande L.

Bande C

4-8 GHz. La première bande à être utilisée pour des applications commerciales.

Applications: Fixed Satellite Service (FSS) ex: DTH, services micro-ondes terrestres.

La bande passante totale:

Multiplions par 2 en utilisant les 2 polarisations,

Multiplions par 180 en supposons 2° d'écart entre des satellites adjacents.

Facteur de 2-5 de réutilisation spatiale

On obtient 568 GHz à 1.44 THz, comparable aux bandes passantes dans les réseaux terrestres.

Aux USA: 35 satellites GEO sur la bande C occupent 70° orbitales.

Celà a entraîné les restrictions de 2° d'espacement (par la FCC - Federal Communications Commission).

Situation meilleure en Europe où la réglementation de communications domestiques est par la bande Ku.

Les pays asiatiques préfèrent la bande C car elle est moins sensible à la pluie.

Des bonnes propriétés de propagation (scintillation, pluie).

Problème: grandes antennes: au moins 1m de diam., typique-

ment 3m.

Des transmetteurs terrestres vidéos puissants utilisent souvent des antennes de 7m à 13m de diam.

Bande X

8-12.5 GHz.

Surtout des applications FSS militaires, ainsi que météorologiques.

Les équipements sont plus chers que ceux de la bande C.

Bande Ku

12.5-18GHz.

Applications: FSS (surtout DTH) et BSS (Broadcast Satellite Service)

services micro-ondes terrestres

applications interactives de communications de voix et de donnés.

Antène de 45cm de diamètre. VSAT (Very Small Aperture Terminal).

En tenant compte la polarisation, des satellites espacés par 2° et la réutilisation spatial (facteur de 10), on obtient une bande passante de 4 THz.

Plus vulnérable à la pluie.

Bande Ka

Beaucoup de bande passante disponible.

On peut utiliser des antennes plus petites, ce qui permettrait une densité plus grande (que 1 sur 2°) de satellites.

Meilleure utilisation spatiale, car il est plus facile de créer des faisceaux concentrés.

Très vulnérable à la pluie.

Des antennes très petites: USAT (Ultrasmall aperture terminals) permettent la transmission bidirectionnelle de débit de 384 Kbps - 2 Mbps.

Le lien entre Bande passante et débit

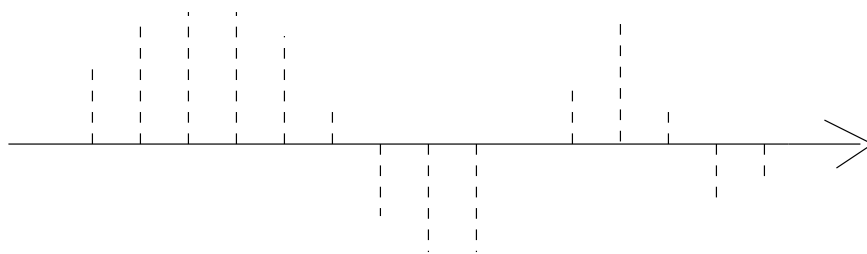
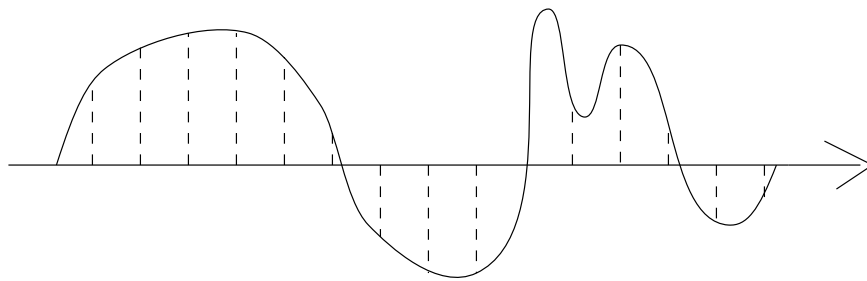
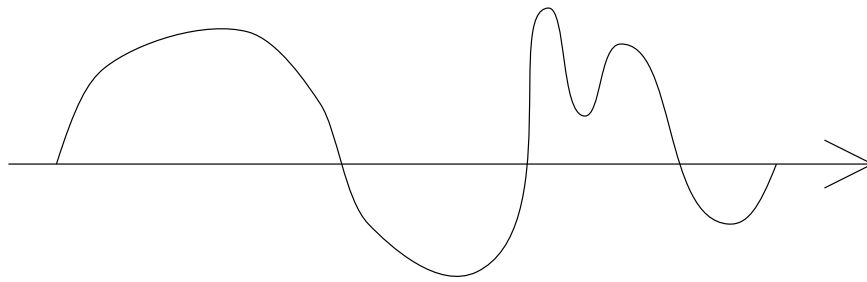
Considérons une source qui transmet dans une bande de fréquences $[f_1, f_2]$. Combien de bit/s peut elle transmettre?

Pour convertir un signal continue en signal numérique il faut l'échantillonner à une fréquence supérieure à 2Δ , où $\Delta = f_2 - f_1$.

Cela permet de reconstituer exactement le signal continu.

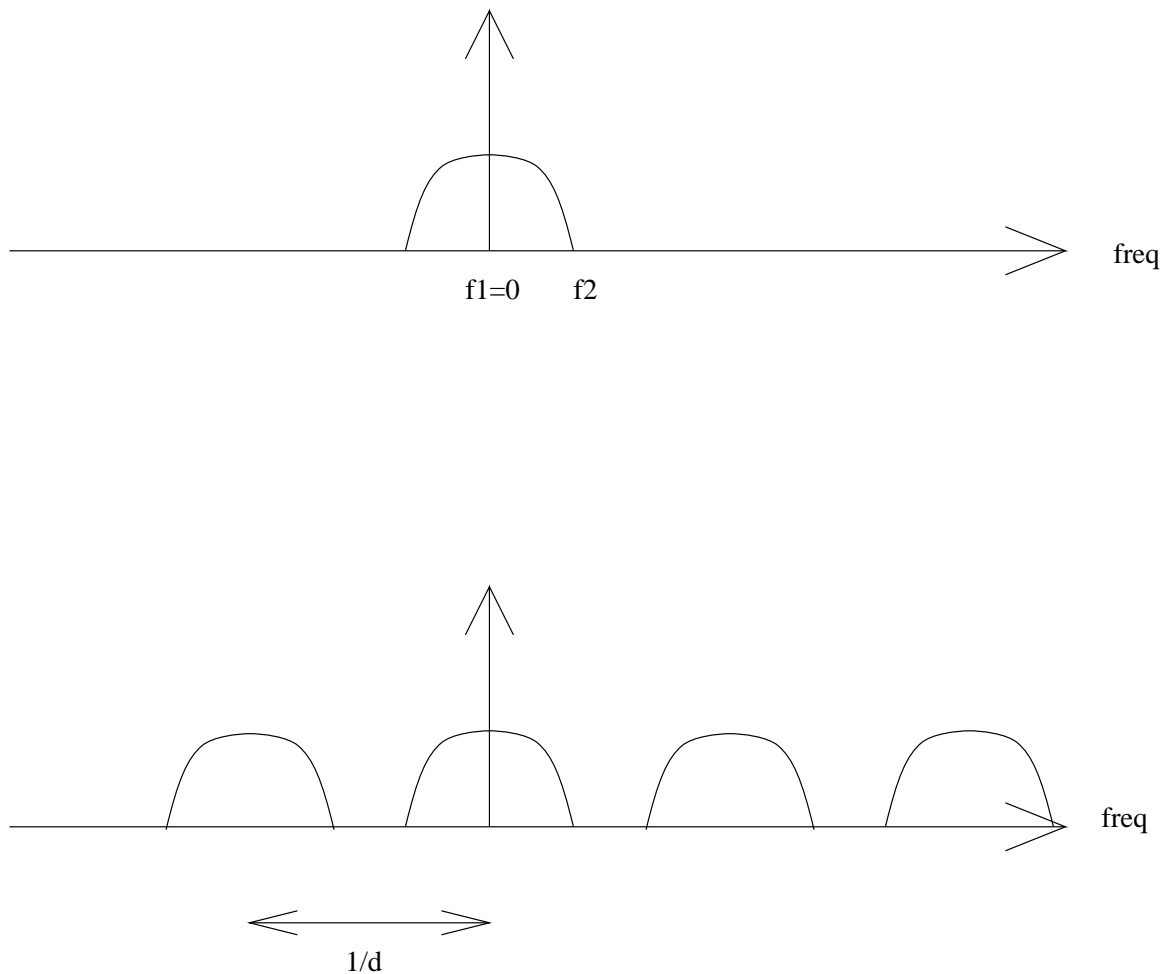
On appelle 2Δ la fréquence de Nyquist.

Le signal en fonction du temps:



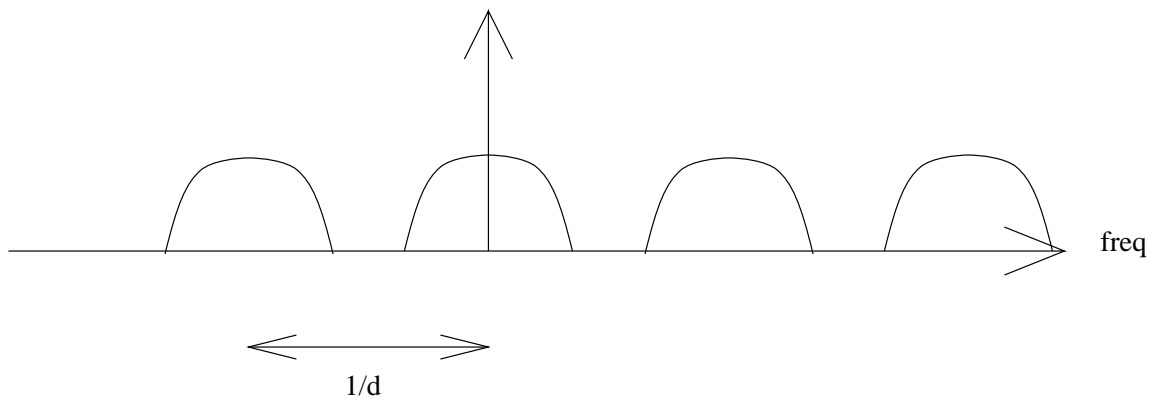
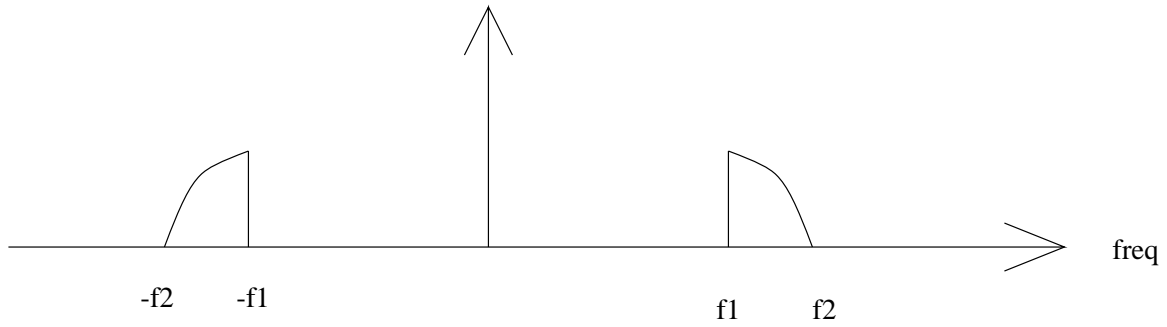
Le spectre du signal

Le spectre du signal original et du signal échantillonné à une fréquence $1/d$ (d est le temps entre les échantillons):



Le spectre du signal échantillonné est périodique de période $1/d$.

Le cas $f_1 \neq 0$:



Ref: Misha Schwartz, Information, transmission, modulation and noise, 3ème édition.

Capacité:

combien de bits/sec on peut transmettre. C'est une propriété du lien.

Supposons que

- le signal d'origine a une bande passante de B Hertz, (il pourra être transmis avec une autre bande passante W)
- Le signal est quantisé à M valeurs possibles avant l'échantillonnage.

Pour une transmissions binaire, le nombre de bits nécessaire pour coder un échantillon est

$$n = \log_2 M.$$

Le débit en bits/sec est

$$f_{ech} \log_2 M \geq 2B \log_2 M = 2nB =: C \text{ bits/sec.}$$

C'est le débit minimal (en bits/sec) qui permet de reconstituer le signal quantisé.

Au lieu de coder en binaire supposons qu'on code en utilisant un alphabet de m symboles, avec $M = m^{\hat{n}}$. (Il faut \hat{n} symboles pour reconstituer un échantillon). Pour le même débit de $C \text{ bits/sec}$, on a

$$C = 2B \log_2 M = 2\hat{n}B \log_2 m \text{ bits/sec,}$$

et on transmet $2W = 2\hat{n}B$ symboles/sec. Donc

$$C = W \log_2 m^2 \text{ bits/sec.}$$

Choix du nombre de niveaux de quantification m

- Supposons qu'on a S Watts disponibles de puissance de transmission.
- On choisit m niveaux espacés par le même intervalle a .
Les niveaux transmis sont:

$$\pm \frac{a}{2}, \pm \frac{3a}{2}, \dots, \pm \frac{(m-1)a}{2}.$$

- Supposons que chaque niveau a la même probabilité d'être transmis.

La puissance moyenne est

$$S = a^2 \frac{m^2 - 1}{12}.$$

Donc, $m^2 = 1 + 12S/a^2$, et

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{12S}{a^2} \right).$$

Pour a et W donnés, on peut augmenter C en augmentant S .

a est choisi en fonction de l'amplitude σ du bruit

$$a = K\sigma$$

K est choisit en fonction de la probabilité d'erreur tolérée. Donc

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{12}{K^2} \frac{S}{N} \right),$$

$$N := \sigma^2.$$

Conclusion:

Il faut augmenter la puissance exponentiellement pour obtenir une augmentation linéaire du débit.

En pratique, on pourrait essayer de diminuer les probabilités d'erreur, par exemple en ajoutant des redondances dans la transmission.

On peut coder des blocs de symboles:

pour chaque groupe de n symboles originaux, on transmet un bloc de k nouveaux symboles correspondants.

On peut choisir des codes robustes, moins sensibles aux erreurs.

On peut donc espérer transmettre autant de débit qu'on veut sur une bande passante W .

Limite théorique de bande passante des liens

Capacité de Shannon:

On peut atteindre une probabilité d'erreur qui tend vers zéro quand la taille des blocs est grande, tant que le débit de transmission ne dépasse pas la **capacité du lien**:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right).$$

Un autre problème dans les codes: délais.