



ENAC
TLS-SEC
Sécurisation des Communications
Drones

Jean-Christophe Schiel

DEFENCE AND SPACE

Jean-Christophe.Schiel@airbus.com

AIRBUS

Sommaire

- Introduction
- Missions & technologies
 - Drones civils
 - Drones militaires
- Éléments de Base en Télécom / technique
 - Propagation
 - Chaîne Télécom
 - Fréquences
 - Normalisation
 - Modems
- Architecture
- Menaces
- Sécurisation / Protection contre le brouillage
- Conclusion / discussions

Sommaire

- **Introduction**
- Missions & technologies
 - Drones civils
 - Drones militaires
- Éléments de Base en Télécom / technique
 - Propagation
 - Chaîne Télécom
 - Fréquences
 - Normalisation
 - Modems
- Architecture
- Menaces
- Sécurisation / Protection contre le brouillage
- Conclusion / discussions

Introduction

- Les systèmes de communication dans les UAVs:
- **Liaisons de données**
 - Transmission de données nécessaires au fonctionnement du drone: télécommandes et téléméasures
 - Transmission vers un centre d'exploitation des données recueillies pendant la mission
- **Charges utiles**
 - Fourniture sur une zone ou théâtre d'opérations, d'un service de communication (routeur, point d'accès ...)
 - Relais radio dans le but d'augmenter la portée ou résoudre les problèmes d'inter-visibilité d'un système de drone

USAGE PRINCIPAL

USAGES MILITAIRES & SECURITE CIVILE



Introduction

- Types de liaisons de données:
- **LOS (Line Of Sight) : Utilisable quand les conditions de visibilité radio sont établies. Caractérisé par:**
 - Très haut débit, jusqu'à 300Mbps
 - Portées jusqu'à 300 km
 - Discrétion et résistance au brouillage
- **BLOS (Below Line Of Sight): Utilisation d'un relais par satellite. Caractérisé par:**
 - Portée quasi-illimitée
 - Débit limité à quelques Mbps(sauf optique)
 - Faible discrétion et forte sensibilité au brouillage
 - Dépendance des opérateurs civils

Introduction

- LOS vs BLOS:
- **LOS et BLOS (relais satellite radio) régis par les mêmes lois. Quelques spécificités:**
 - BLOS -Satellite:
 - Propagation quasi «espace libre»
 - Pointage de l'antenne embarquée critique pour se conformer aux prescriptions de l'opérateur
 - LOS:
 - Nécessite pour la propagation la prise en compte de l'atmosphère et de la proximité de la terre -> distorsions possibles du canal qui doivent être compensées

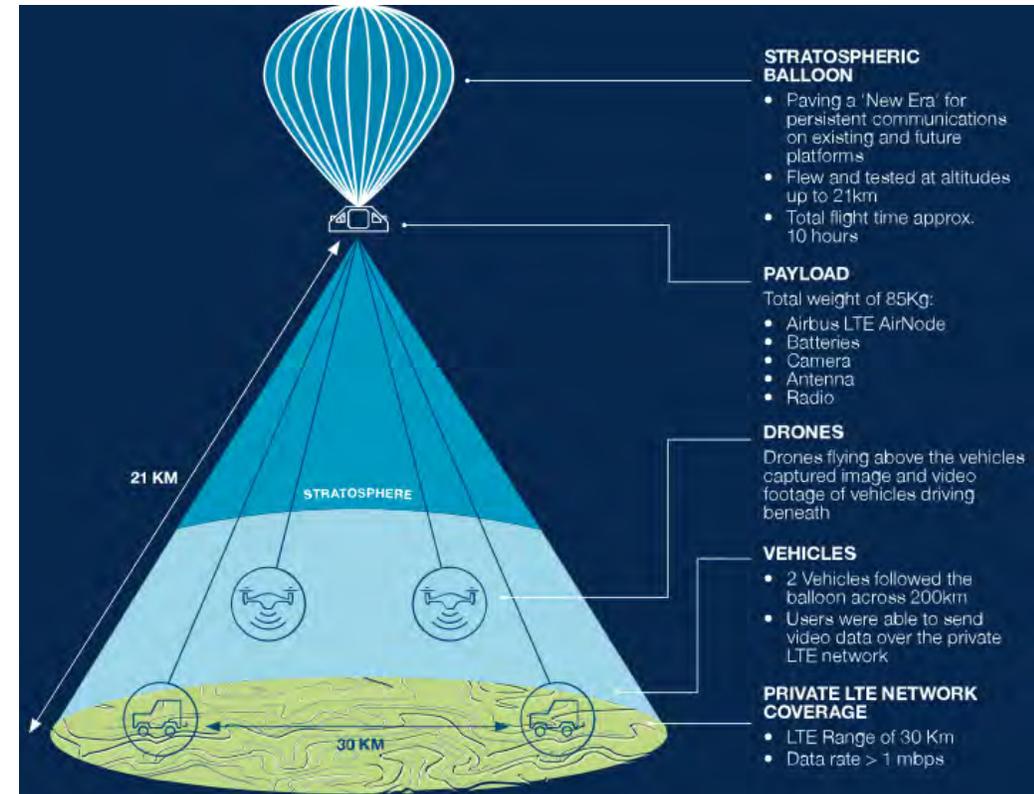
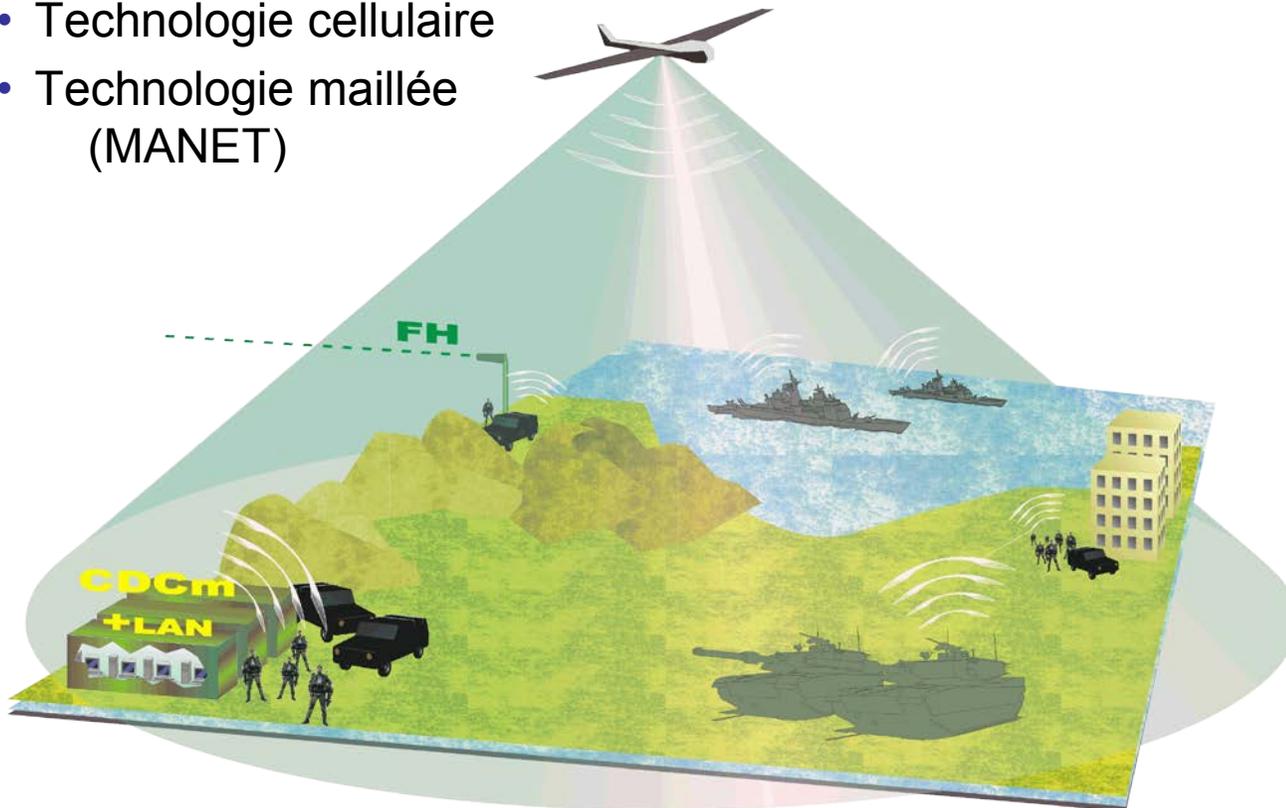
Introduction

- Pourquoi une liaison de donnée:
- **Fonction de « transmission »**
 - Dans le sens montant: Télécommande (TC) de quelques dizaines de kbps
 - Dans le sens descendant:
 - Télémétrie (TM) de quelques dizaines de kbps
 - Données de mission de quelques Mbps à quelques dizaines de Mbps
- **Fonction de localisation du drone (LOS uniquement & à usage principalement militaire):**
 - GPS pas systématiquement utilisé
 - Mode «backup» souvent exigé en cas de panne ou d'indisponibilité du GPS



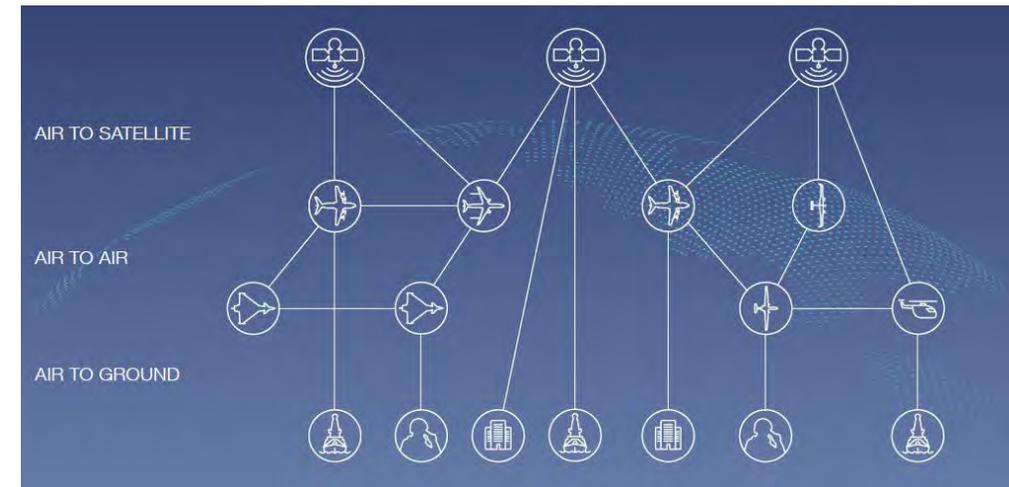
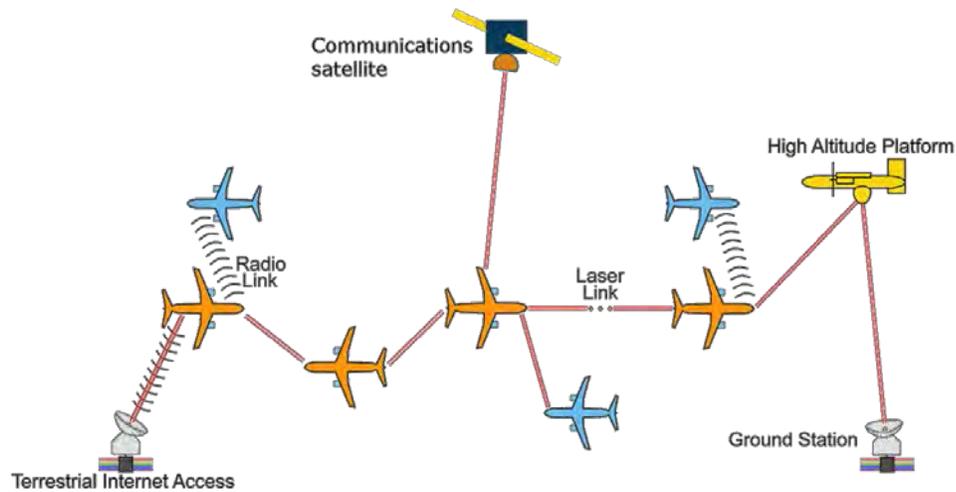
Introduction

- Fonction de communication comme charge utile:
- « Nœud de communication aéroporté »
 - Technologie cellulaire
 - Technologie maillée (MANET)



Introduction

- Fonction de communication comme charge utile:
- « **Nœud de communication aéroporté** »
 - Technologie cellulaire
 - Technologie maillée (MANET)



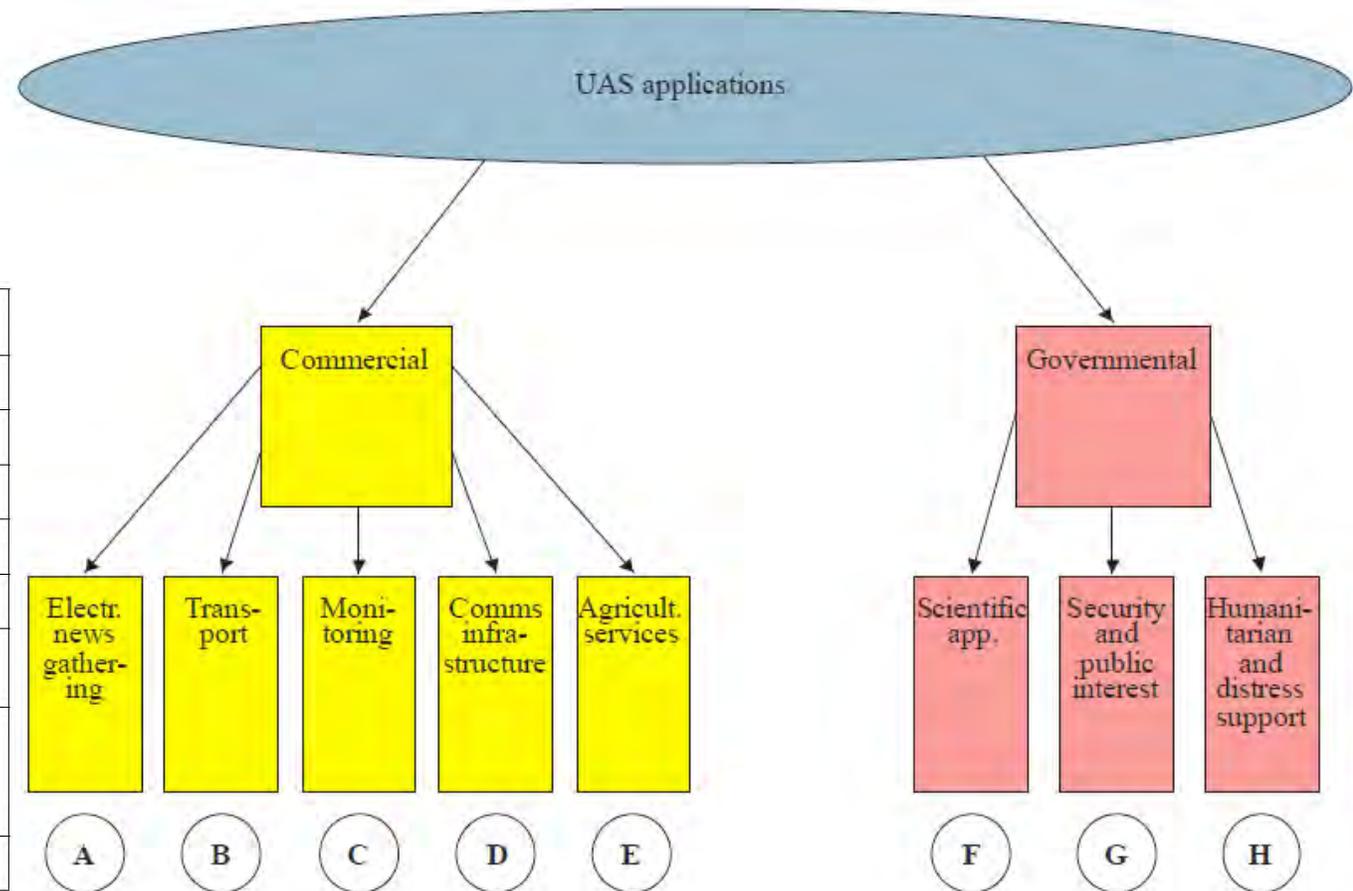
Sommaire

- Introduction
- **Missions & technologies**
 - Drones civils
 - **Drones militaires**
- **Eléments de Base en Télécom / technique**
 - Propagation
 - Chaîne Télécom
 - Fréquences
 - Normalisation
 - Modems
- Architecture
- Menaces
- Sécurisation / Protection contre le brouillage
- Conclusion / discussions

Missions et Technologies

- Missions civiles:

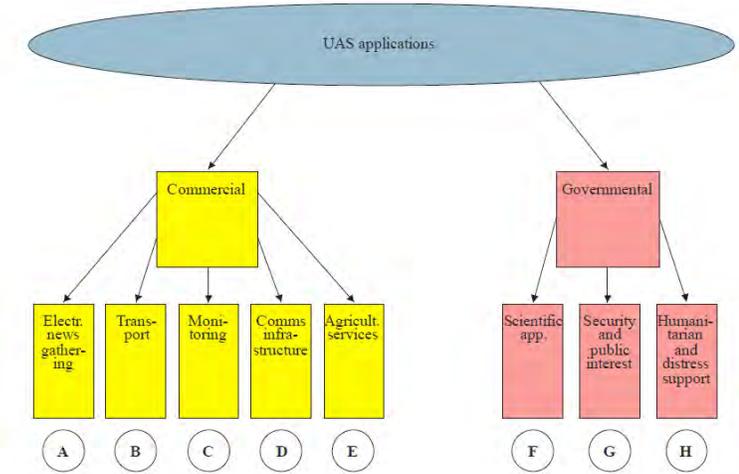
Mission type	Example description
A	Movie making, sports games, popular events like concerts.
B	Cargo planes with reduced man power (one-man-cockpit).
C	Inspections for industries, e.g. oil fields, oil platforms, oil pipelines, power line, rail line.
D	Provision of airborne relays for cell phones in the future.
E	Commercial agricultural services like crop dusting.
F	Earth science and geographic missions (e.g. mapping and surveying, aerial photography) biological, environmental missions (e.g. animal monitoring, crop spraying, volcano monitoring, biomass surveys, livestock monitoring, tree fertilization).
G	Coast line inspection, preventive border surveillance, drug control, anti-terrorism operations, strike events, search and rescue of people in distress, and national security. Public interest missions like remote weather monitoring, avalanche prediction and control, hurricane monitoring, forest fires prevention surveillance, insurance claims during disasters and traffic surveillance.
H	Famine relief, medical support, aid delivery. Search and rescue activities.



Report M.2171-01

Missions et Technologies

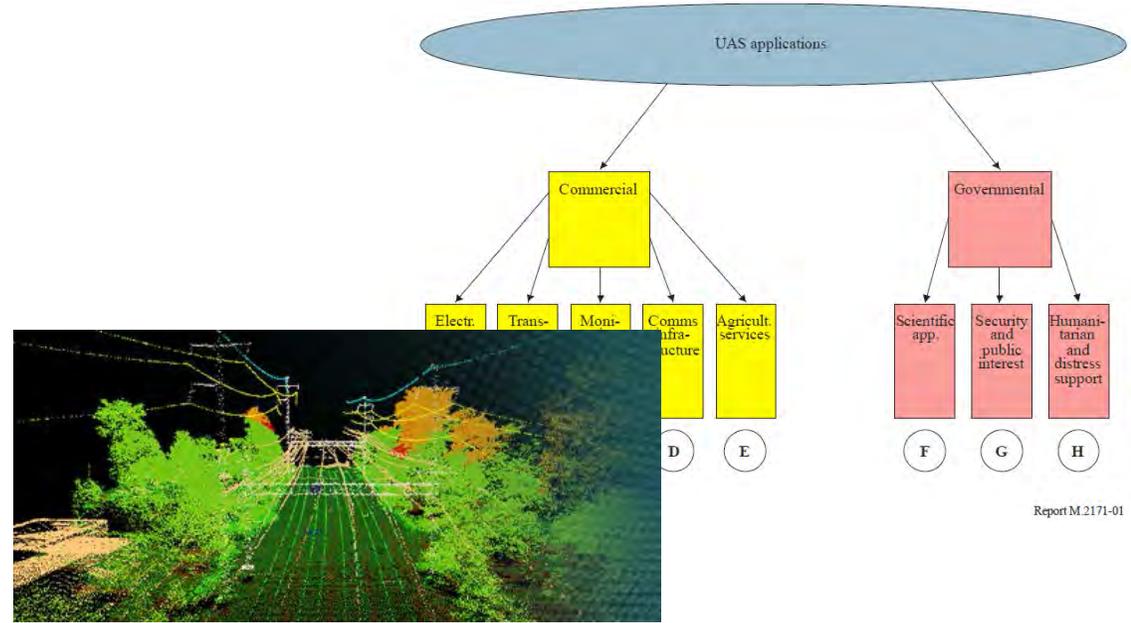
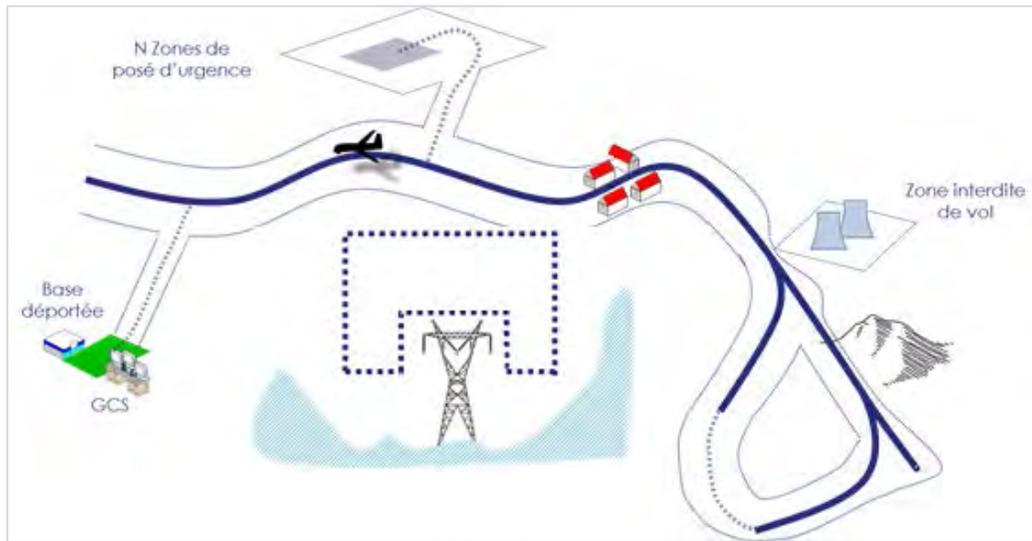
- Missions civiles:



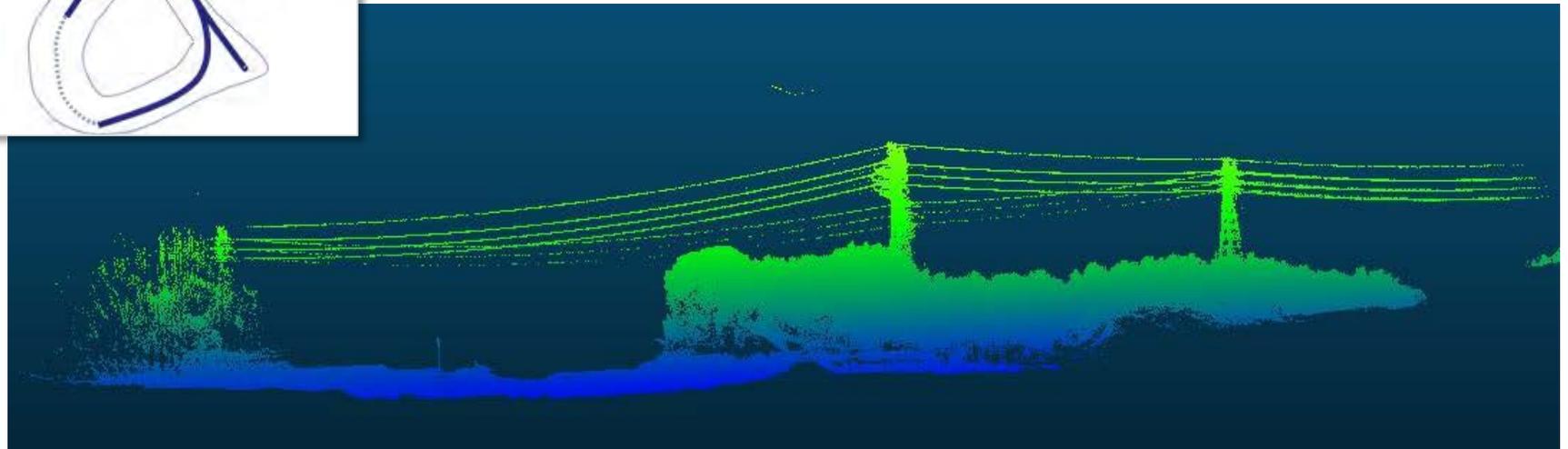
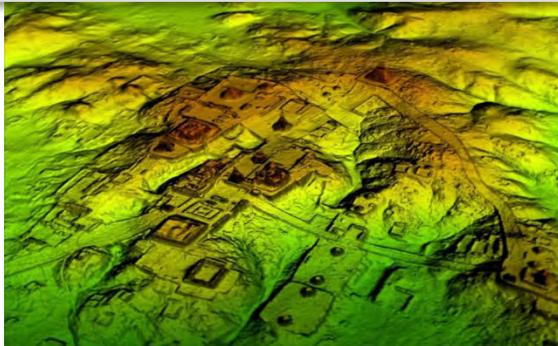
Report M.2171-01

Missions et Technologies

- Missions civiles: grande élongation

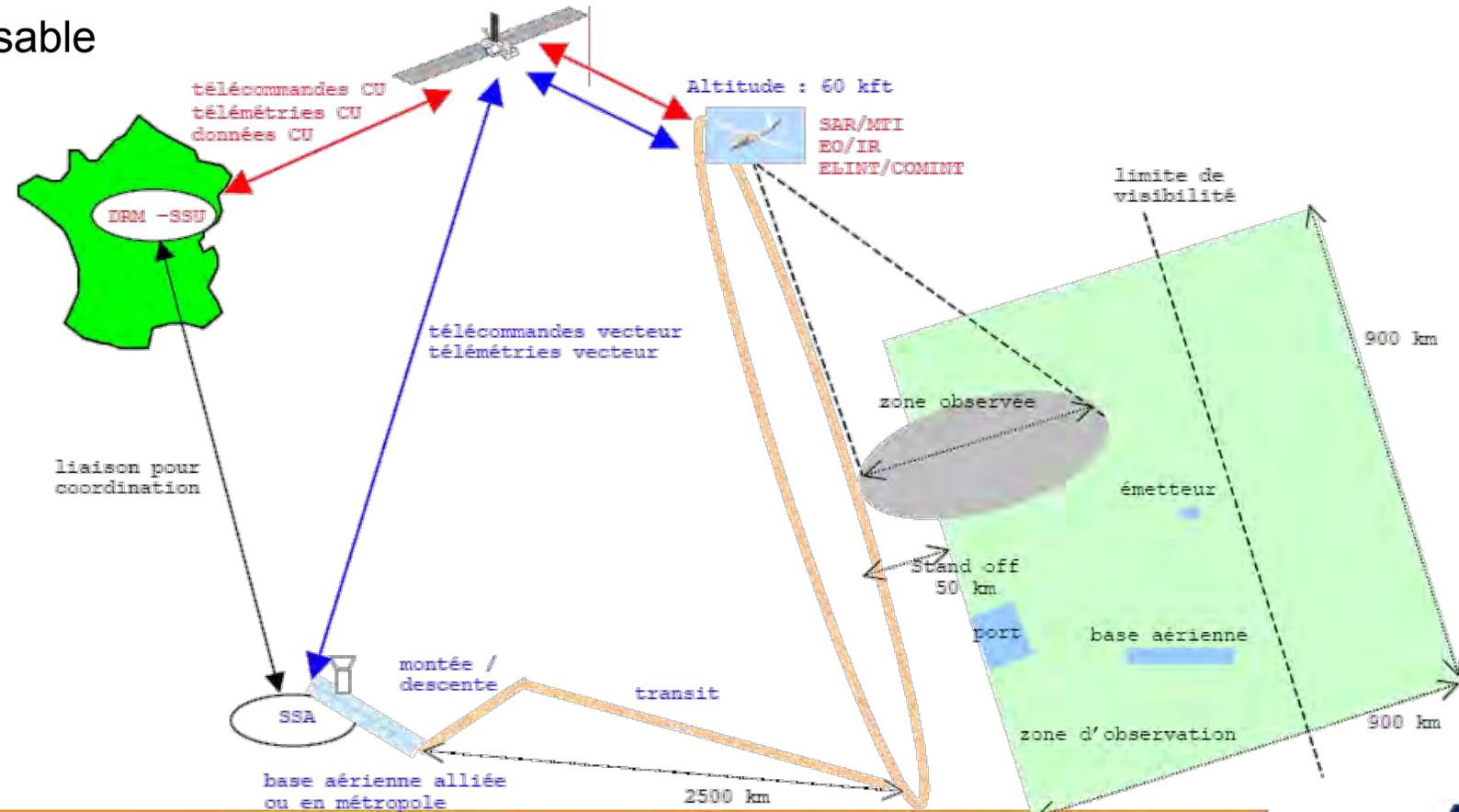


Report M.2171-01



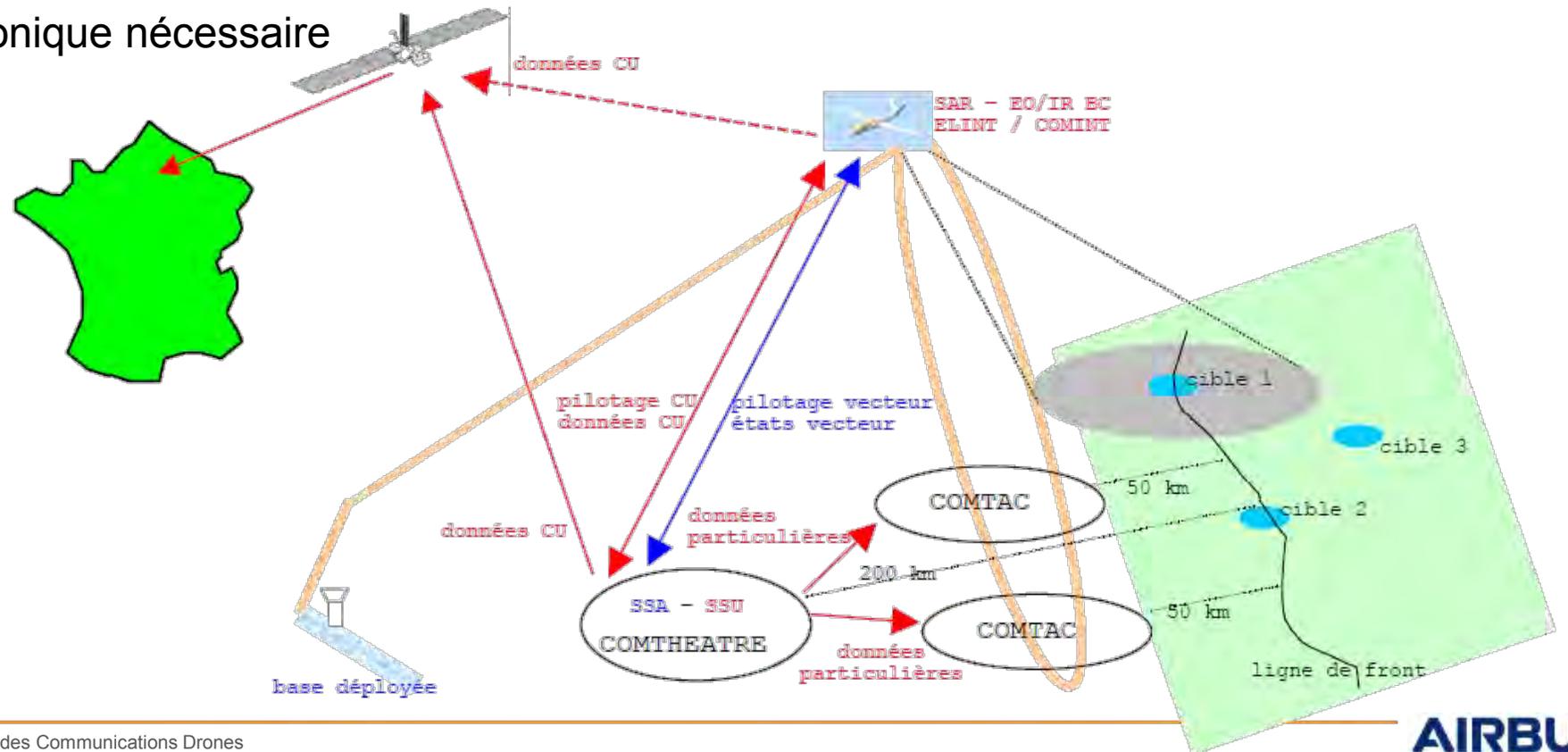
Missions et Technologies

- Missions militaires:
- **Surveillance de zone étendue en temps de paix ou de pré-crise:**
 - Temps réel non indispensable
 - LOS facultative



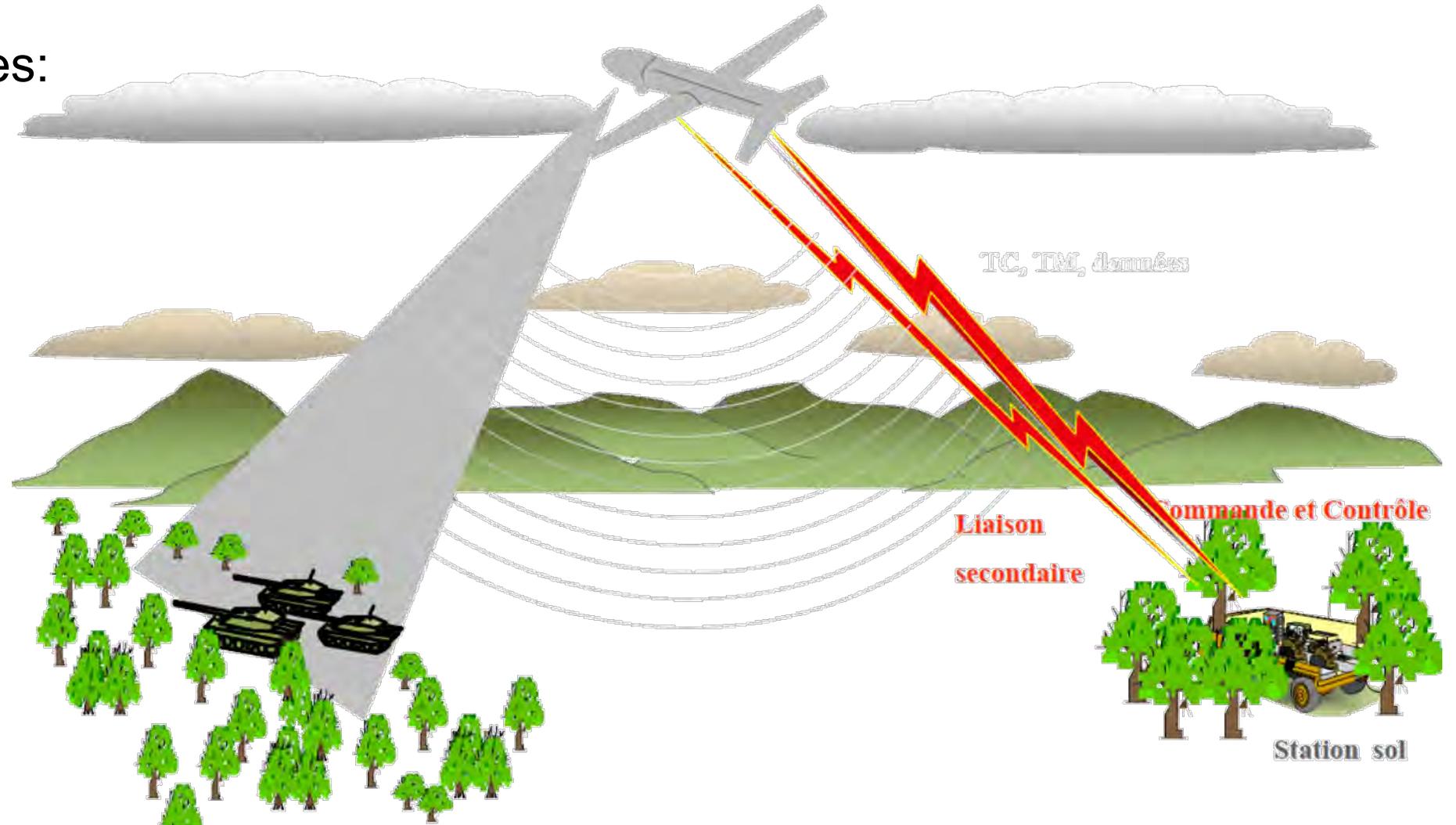
Missions et Technologies

- Missions militaires:
- **Surveillance de zone étendue en temps de crise ou de conflit:**
 - Temps réel et haut débit indispensables (Time Sensitive Targets)
 - Protection guerre électronique nécessaire
 - LOS indispensable



Missions et Technologies

- Missions militaires:



Missions et Technologies

- Missions militaires: exemples



Partie Sol GDT (LOS)



Missions et Technologies

- Missions militaires: exemples *Harfang*



Partie Bord ADT (LOS)

Missions et Technologies

- Missions militaires: exemples *Harfang*



ANTENNE

HEXAPODE



FCU



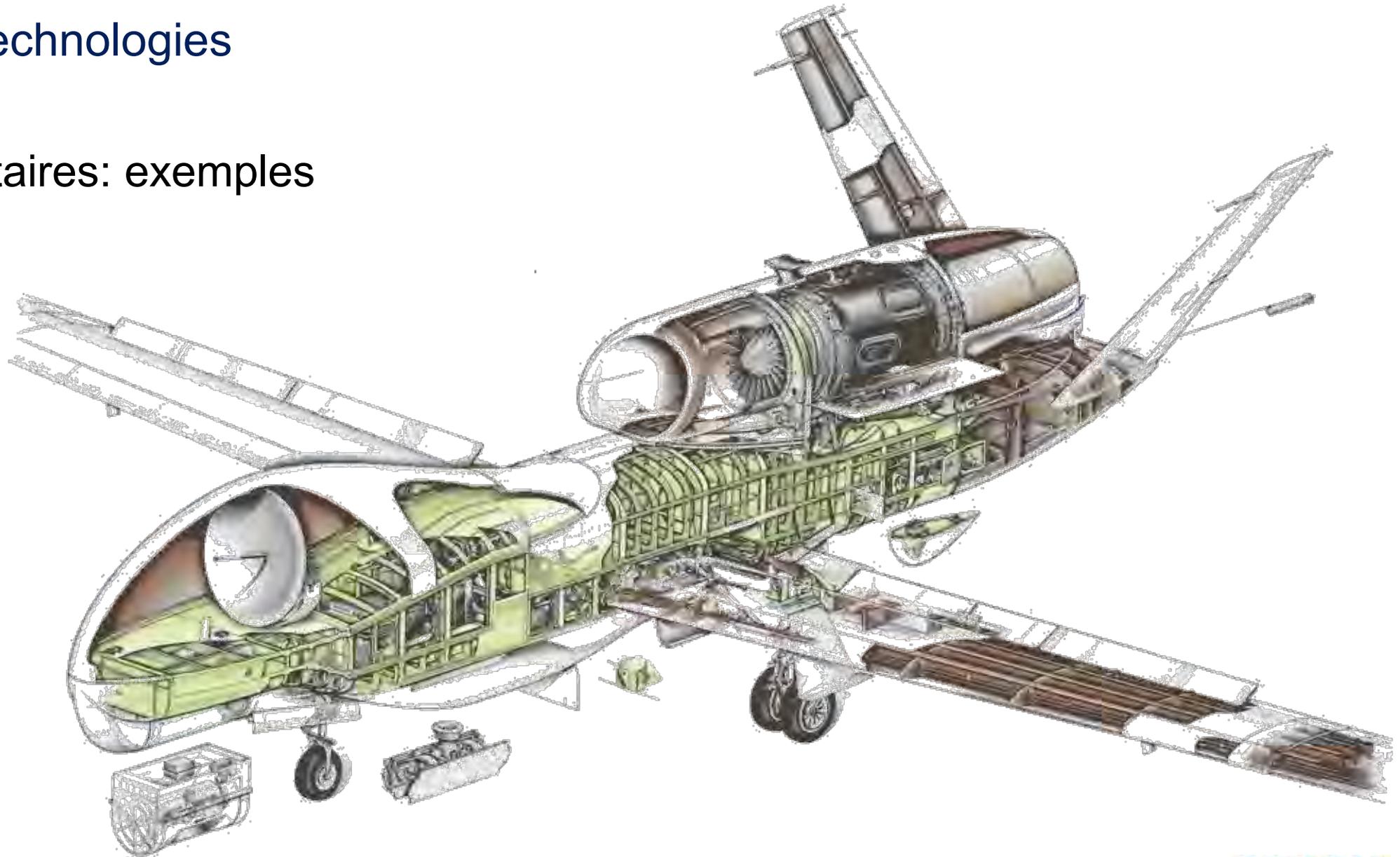
CPU

Partie Bord Satcom (BLOS)



Missions et Technologies

- Missions militaires: exemples



Missions et Technologies

- Technologies:

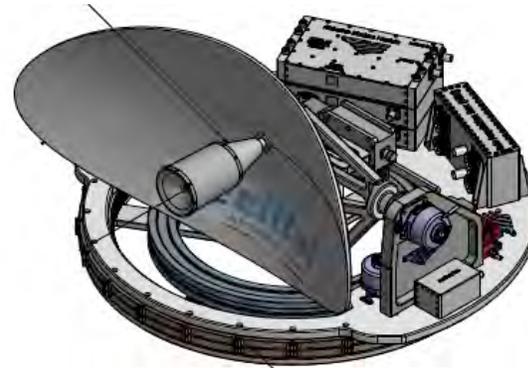
- Communications drones ?

- BLOS: Relais via satellite

- LOS: Relais via station dédiée au sol

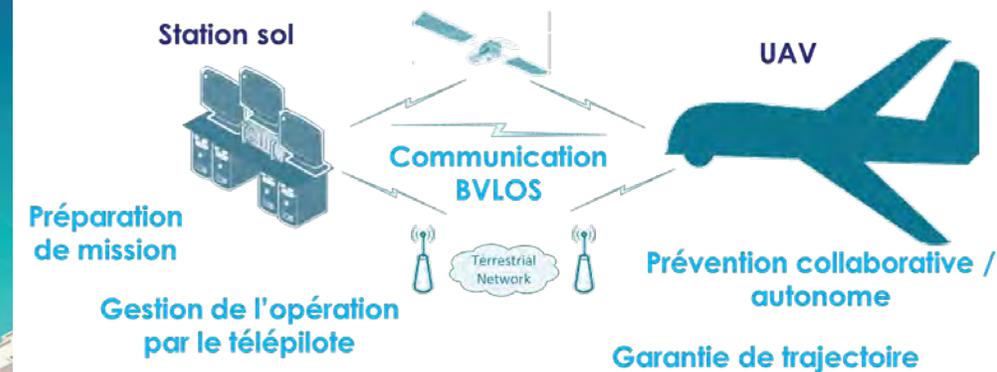
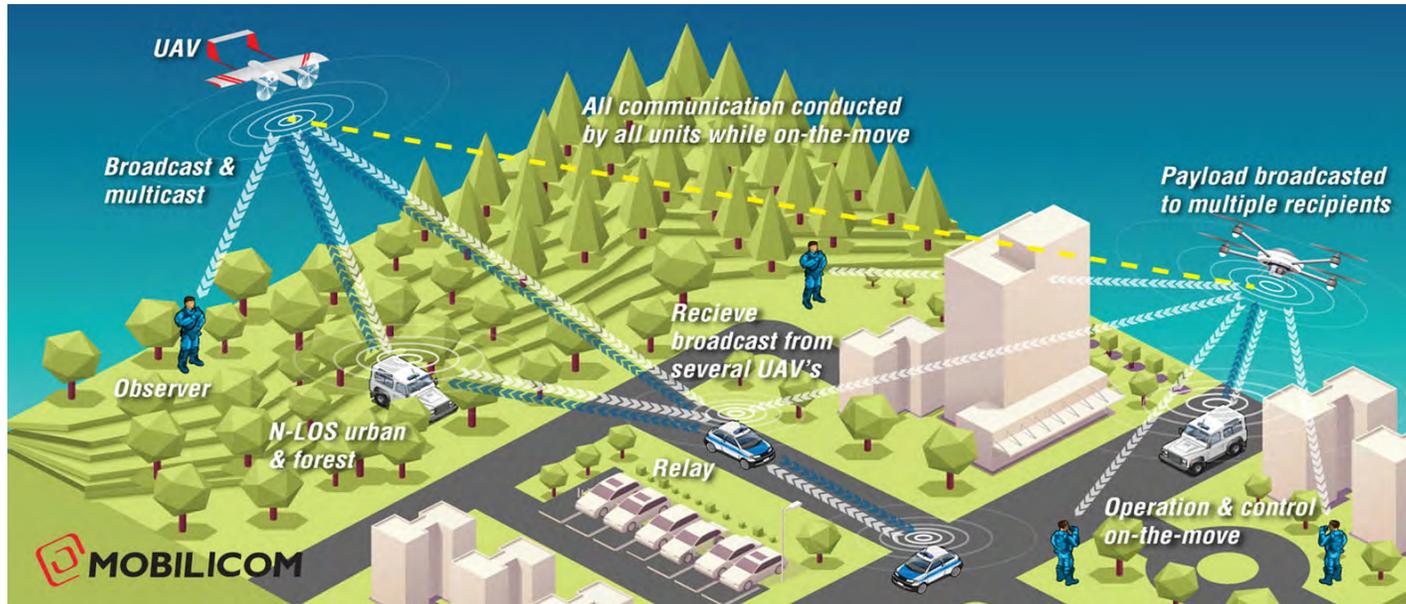
- *LOS: Relais via réseau dédié au sol / aérien*

- *LOS: Relais via réseaux des opérateurs mobiles*



Missions et Technologies

- Technologies:
 - Communications drones ?
 - LOS: Relais via réseau dédié au sol / aérien
 - LOS: Relais via réseaux des opérateurs mobiles



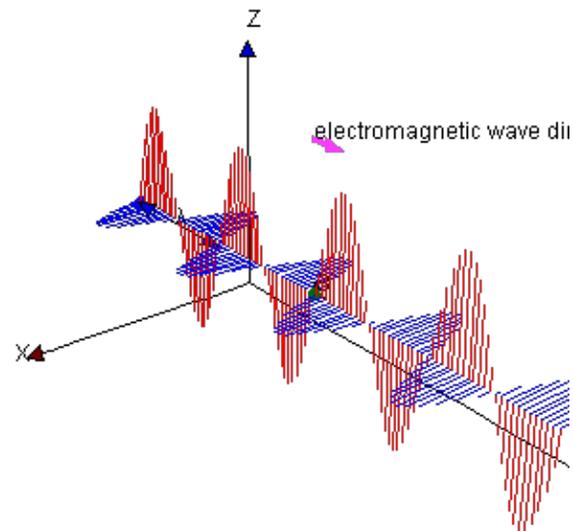
Sommaire

- Introduction
- Missions & technologies
 - Drones civils
 - Drones militaires
- **Éléments de Base en Télécom / technique**
 - Propagation
 - Chaîne Télécom
 - Fréquences
 - Normalisation
 - Modems
- Architecture
- Menaces
- Sécurisation / Protection contre le brouillage
- Conclusion / discussions

Base Télécom

Propagation des ondes radio

Behaviour of electromagnetic waves when they are transmitted, propagated from one point to another travelling through different medium and/or environments



= a world of adventures !

Base Télécom

Propagation des ondes radio

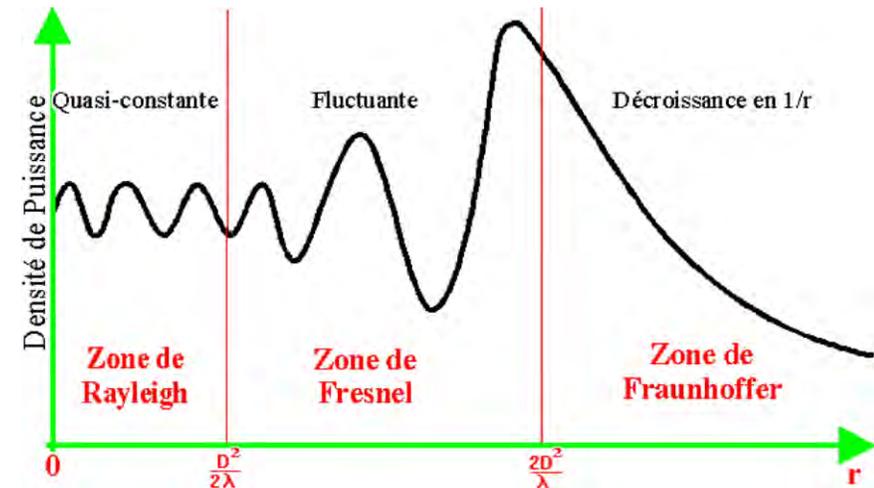
Free Space propagation:

- In free space, all electromagnetic waves (radio, light, X-rays, etc.) obey the inverse-square law which states that the power density of an electromagnetic wave is proportional to the inverse of the square of the distance from a point source or:

Free Space Path Loss or FSPL

$$\begin{aligned} \text{FSPL} &= \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \\ &= \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\text{FSPL}_{dB} = 20 \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \log_{10}(d_{km}) + 32.44$$

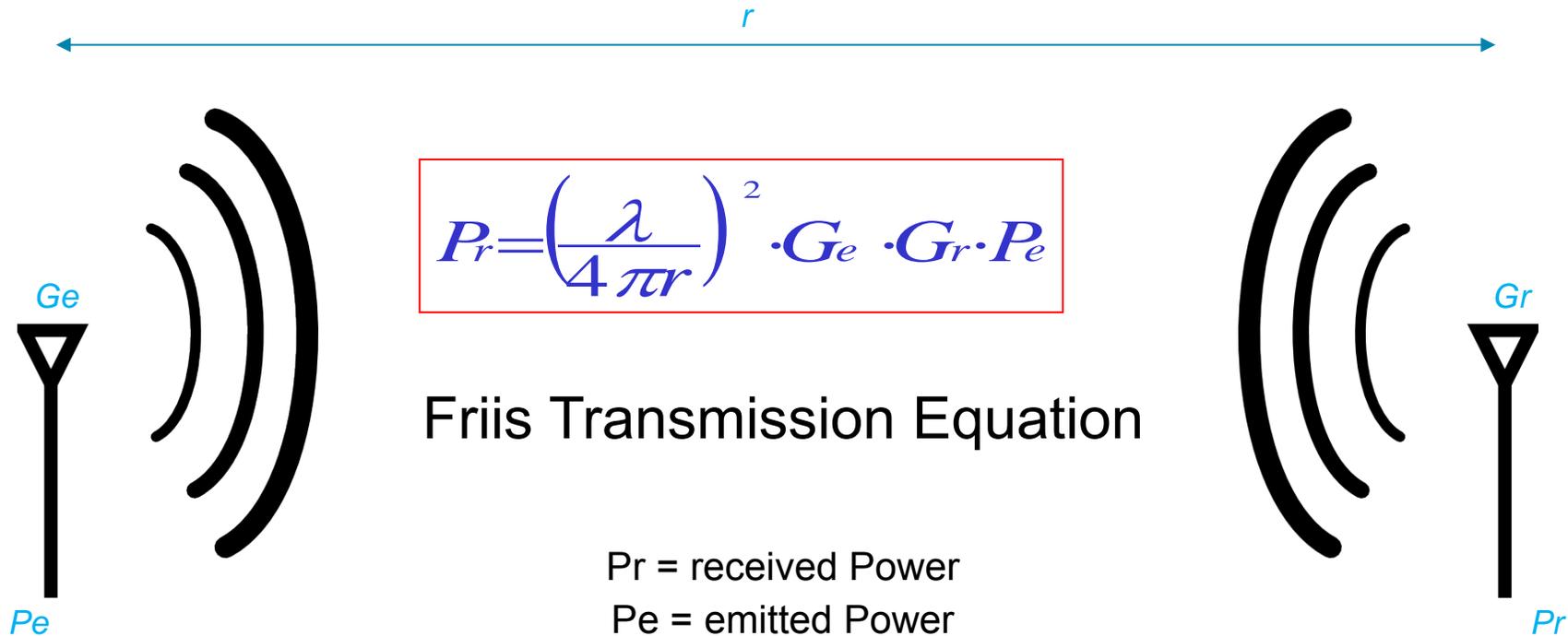


$D =$ hauteur d'antenne

Base Télécom

Propagation des ondes radio

- Transmission \leftrightarrow Réception



Ge = Antenna Gain – emitting side

Gr = Antenna Gain – receiving side

λ = wavelength ($\lambda = 2\pi f$)

r = distance

Base Télécom

Propagation des ondes radio

- Transmission \leftrightarrow Réception – *version dB*

- En expression logarithmique, donc en dB:

$$Pr = Pt + Gt + Gr + FSPL$$

- Avec :

- Pr, Pt : Puissance reçue/émise en dBm ou dBW
- Gr, Gt : gain de l'antenne de réception/d'émission en dBi
- $FSPL$: pertes de propagation en dB

$$FSPL = 20 \log(c/4\pi f d)$$

- c : vitesse de la lumière en ms^{-1}
- f : fréquence radioélectrique en Hz
- d : distance en m

- En changeant les unités, on trouve

$$FSPL = -20 \log\left(\frac{40\pi}{3}\right) - 20 \log(f_{\text{MHz}}) - 20 \log(d_{\text{km}})$$

$$FSPL = -32,44 - 20 \log(f_{\text{MHz}}) - 20 \log(d_{\text{km}})$$

Base Télécom

Propagation des ondes radio

- Transmission \leftrightarrow Réception – *version dB*

The diagram illustrates the equation for received power P_r in dB, categorized into system characteristics and propagation effects.

Caractéristiques système (System Characteristics):

$$P_r = P_t + G_t + G_r$$

Propagation (Propagation):

$$- 32,44 - 20 \log(f_{MHz}) - 20 \log(d_{km})$$

The full equation is:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 32,44 - 20 \log(f_{MHz}) - 20 \log(d_{km})$$

The propagation terms are further detailed as follows:

- Terme géométrique : constante** (Geometric term: constant) points to the $- 32,44$ term.
- Terme dépendant de la fréquence** (Term dependent on frequency) points to the $- 20 \log(f_{MHz})$ term.
- Terme dépendant de la distance** (Term dependent on distance) points to the $- 20 \log(d_{km})$ term.

Base Télécom

Propagation des ondes radio

- Transmission \leftrightarrow Réception – *version dB*

Passage vers le monde réel ...

$$Pr = Pt + Gt + Gr - 32,44 - 20 \log(f_{MHz}) - 20 \log(d_{km}) - P1 - P2$$

Avec :

- **P1**: Pertes de propagation supplémentaires (monde réel)
- **P2**: Pertes système (système réel)

P1 ne dépend pas de la conception système, mais des lois physiques de propagation dans un monde qui n'est pas idéal (absorption, diffraction, réflexions multiples, masquages, ...). Ce terme est difficile à appréhender et à quantifier

P2 dépend de la conception système: type et longueurs de câbles, choix de la connectique, placement des antennes, désadaptations, ...

Base Télécom

Propagation des ondes radio

- **Pertes (Impairments & Losses)**

1. *Free Space Loss* $FSPL_{dB} = 20 \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \log_{10}(d_{km}) + 32.44$
2. *Impedance (mis) matching: antenna efficiency*
3. *Noise: device (electronics) & environment (atmospherical noise, cosmical noise + interferences)*
4. *Obstacles*
5. *Multiple / Multipath Reflections*
6. *Diffraction*
7. *Climate: humidity, rain, dust particles, ...*
8. *Environment: materials, vegetation, ...*
9. *Doppler effect*

Base Télécom

Propagation des ondes radio

- Pertes (Impairments & Losses) Impedance (mis) matching: antenna efficiency

- *Isotropic Radiator*

A_{er} is the effective area of the emitting/receiving antenna.

The effective area A_{er} is linked with the physical surface A_p :

$$A_{er} = \eta A_p$$

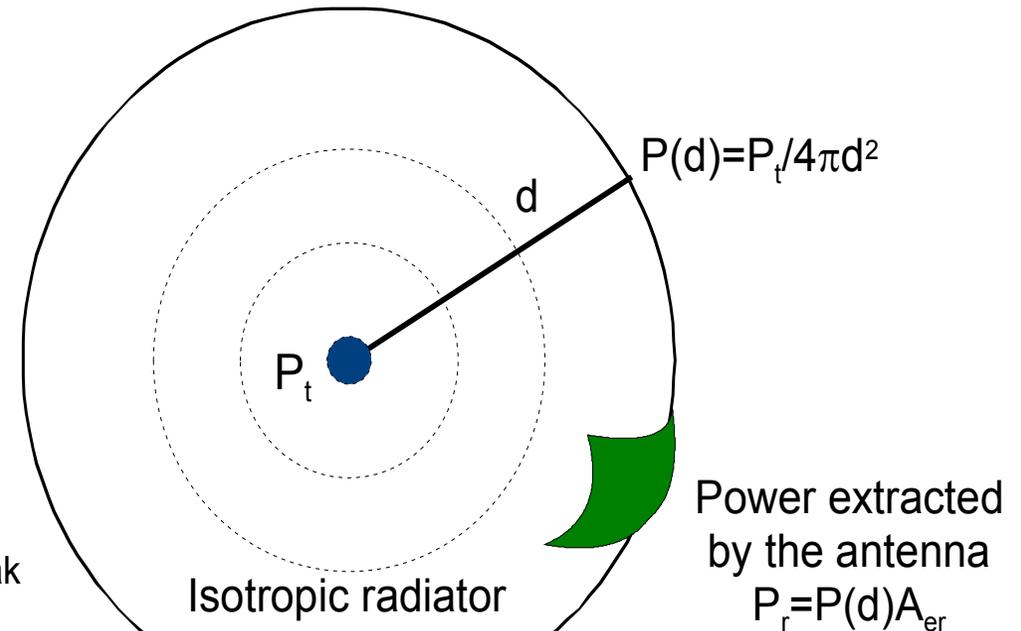
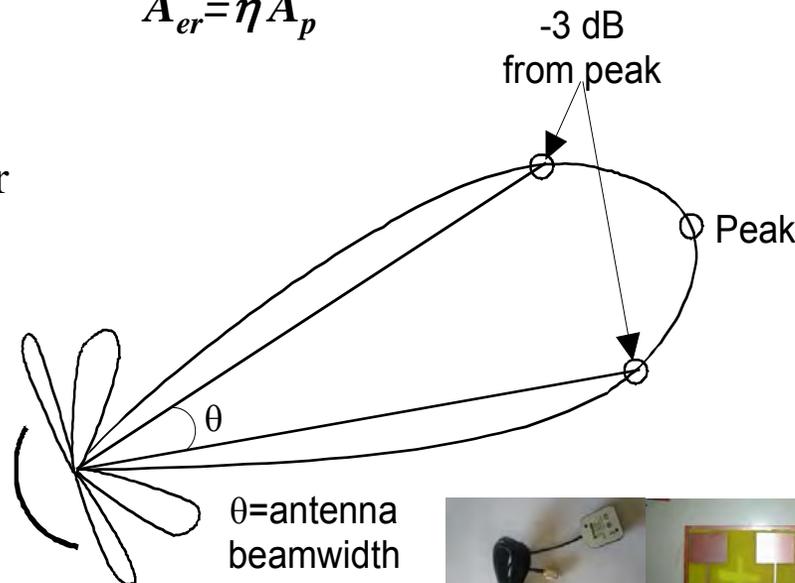
with η the antenna efficiency.

$\eta = 0.55$ for a parabolic reflector

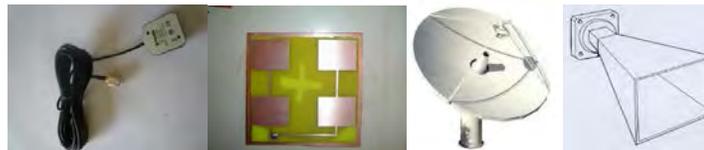
$\eta = 0.75$ for a horn antenna

$$G = A_{er} / A_{ei} = 4\pi A_e / \lambda^2$$

PIRE = Pt G



Power Density: $p(d) = \frac{P_t}{4\pi d^2}$ W/m²



Base Télécom

Propagation des ondes radio

- Pertes (Impairments & Losses) Impedance (mis) matching: antenna efficiency

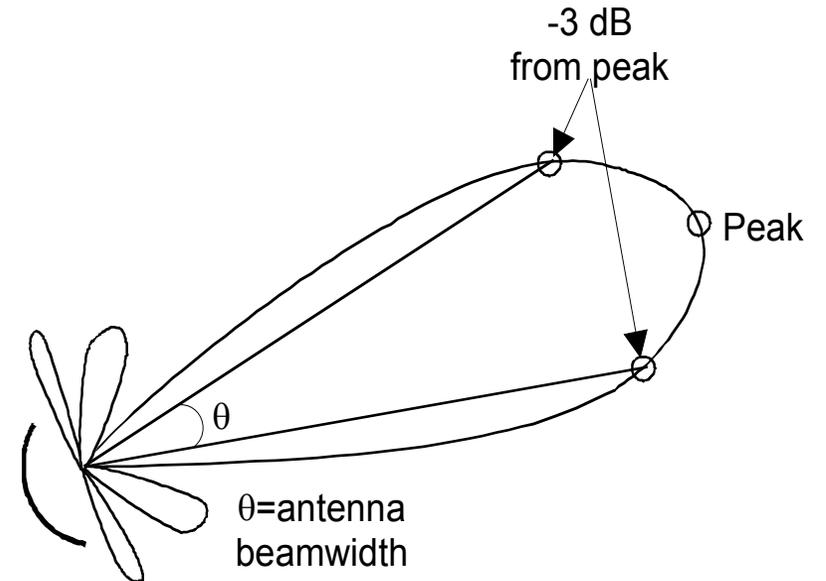
- *Pertes de pointage*

- *Pertes de polarisation*

- la perte de polarisation est de la forme:

$$P_{polar} = -20 \log(\cos \theta)$$

- θ étant l'angle entre les deux antennes
- En pratique pour $\theta=20^\circ$, $P_{polar} = -0,5\text{dB}$



Base Télécom

Propagation des ondes radio

• Pertes (Impairments & Losses)

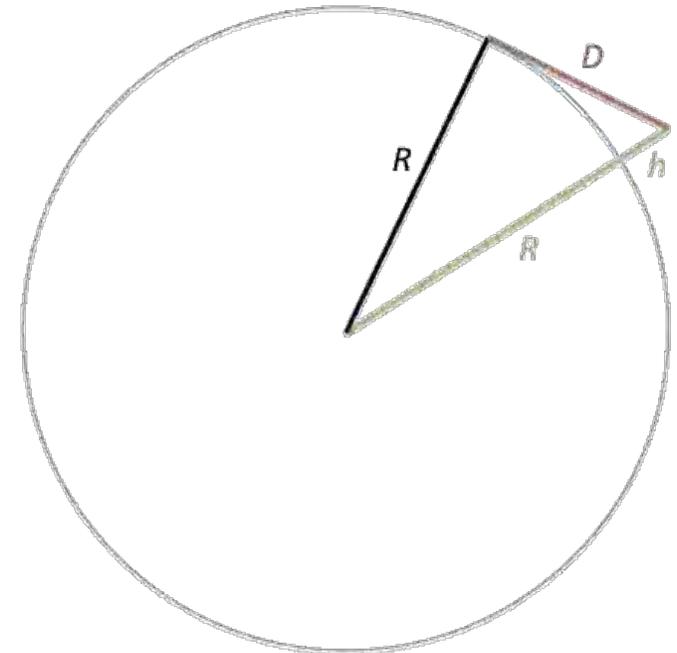
Noise: device (electronics) & environment (atmospherical noise, cosmical noise + interferences)

Obstacles

Condition de visibilité géométrique: $dm = \sqrt{2Rt}(\sqrt{h1} + \sqrt{h2})$

- h1: hauteur de l'émetteur
- h2: hauteur du récepteur
- Rt: rayon terrestre
- Dm: distance maximale

• C'est une condition nécessaire mais pas suffisante



$$R^2 + D^2 = (R + h)^2 = R^2 + 2Rh + h^2$$

$$D = \sqrt{2Rh + h^2} \simeq \sqrt{2Rh}$$

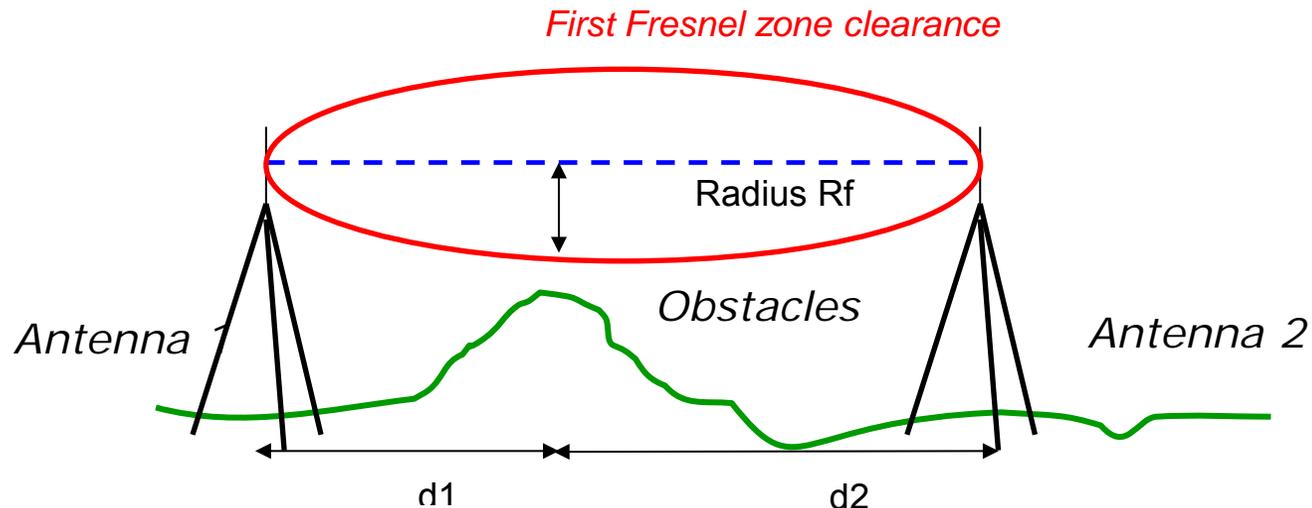
Base Télécom

Propagation des ondes radio

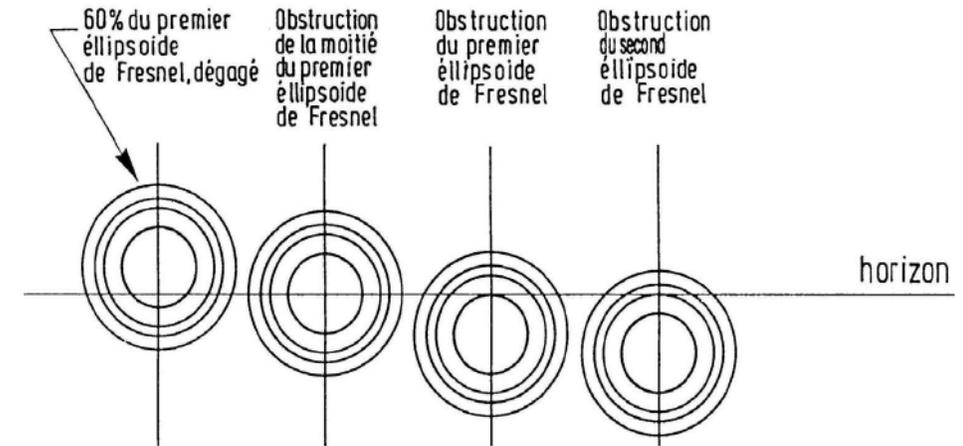
- Pertes (Impairments & Losses)

Obstacles

- Visibilité en ligne de vue (LOS) de 2 antennes si respect de la non-obstruction du 1^{er} ellipsoïde de Fresnel



$$R_f = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$



λ	F	$d = 50 \text{ km}$	r
0.5 μm	600 THz	Visible light (green)	0.08 m
5 cm	6 GHz	Centimetric waves	25 m
5 m	60 MHz	Metric waves	250 m
500m	600 kHz	Hectometric waves	2500 m

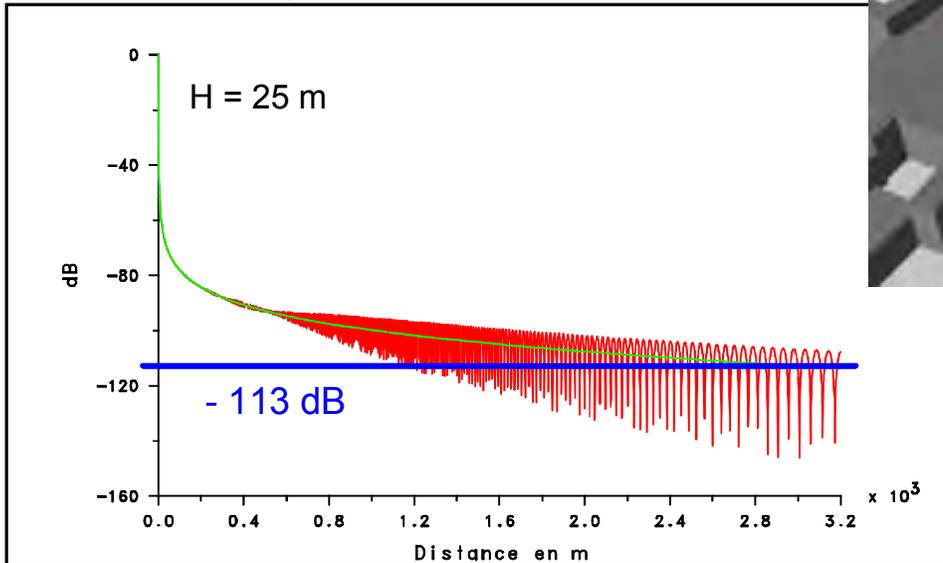
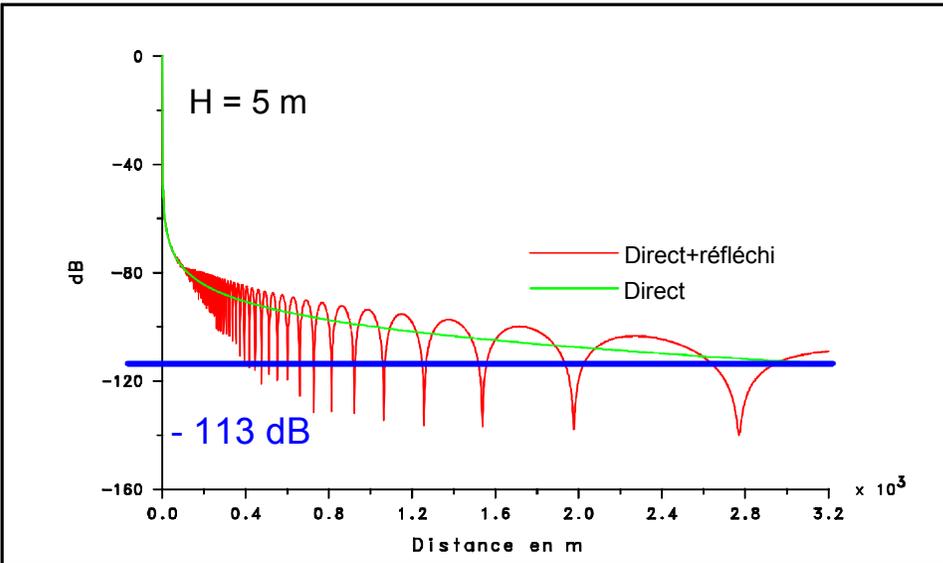
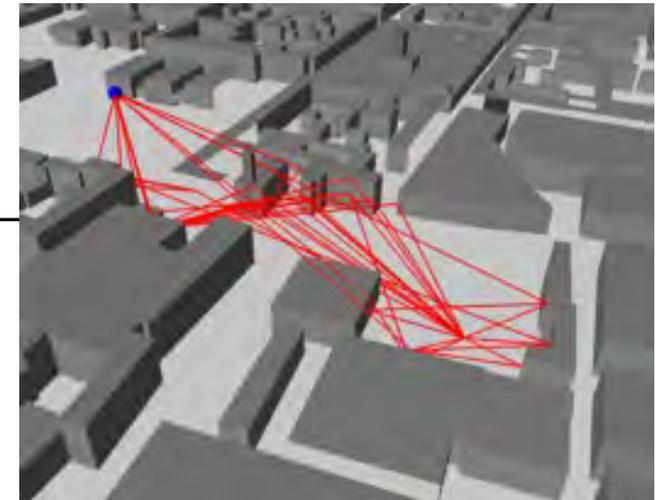
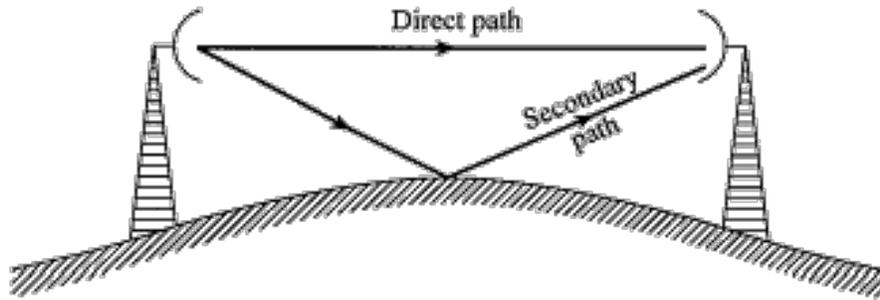
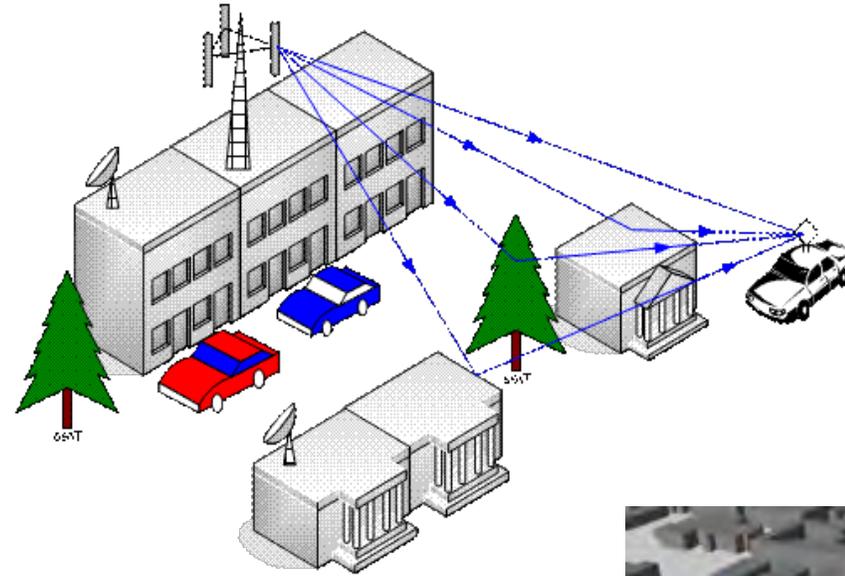
2 antennes @ 1km @ 2GHz
 Obstacle à 500m
 R_f vaut 6,124 mètres.

Base Télécom

Propagation des ondes radio

- Pertes (Impairments & Losses)

Multiple / Multipath Reflections



Base Télécom

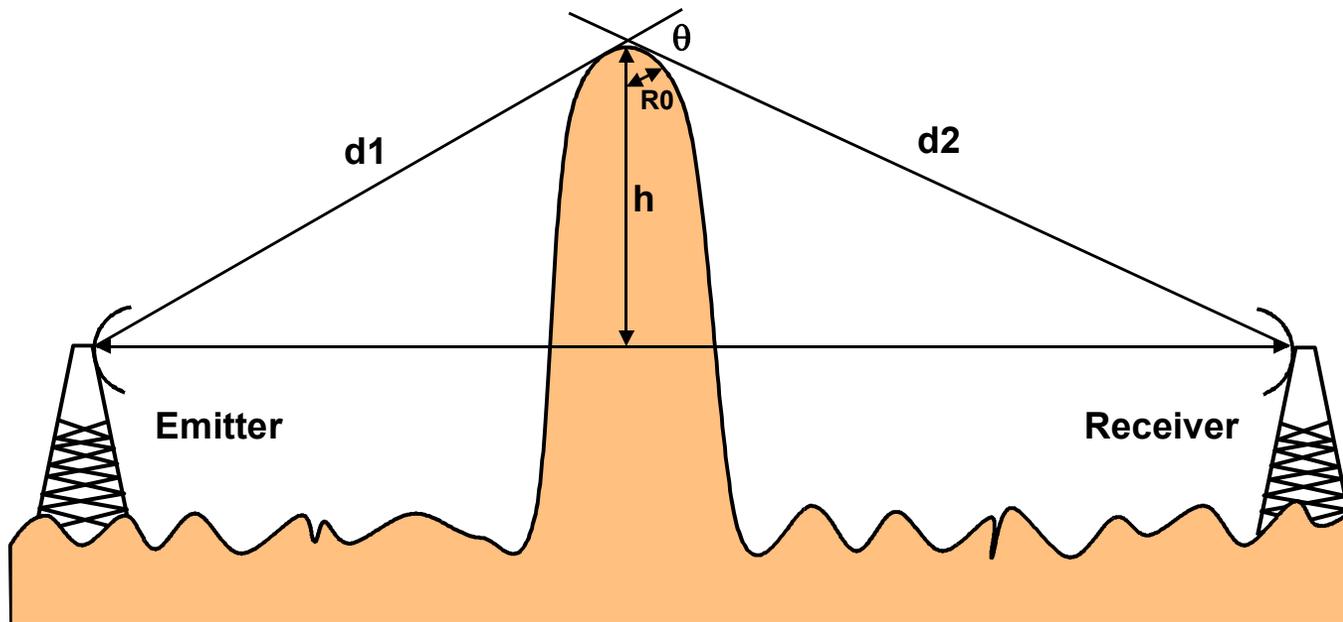
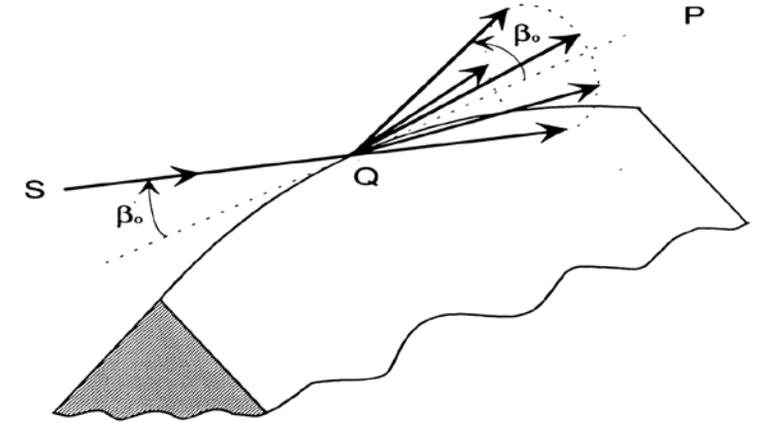
Propagation des ondes radio

• Pertes (Impairments & Losses)

Diffraction

La diffraction arrive lorsque le chemin de l'onde est partiellement ou totalement obstrué

Le principe de Huygens dit : chaque point touché par l'onde devient une source d'ondes sphériques



$$v = h \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \left(\frac{1}{d1} + \frac{1}{d2} \right)} = \theta \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{d1 \cdot d2}{d}}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{d1} + \frac{1}{d2}} \cdot \left(\frac{\lambda \cdot R0^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{6}}$$

Base Télécom

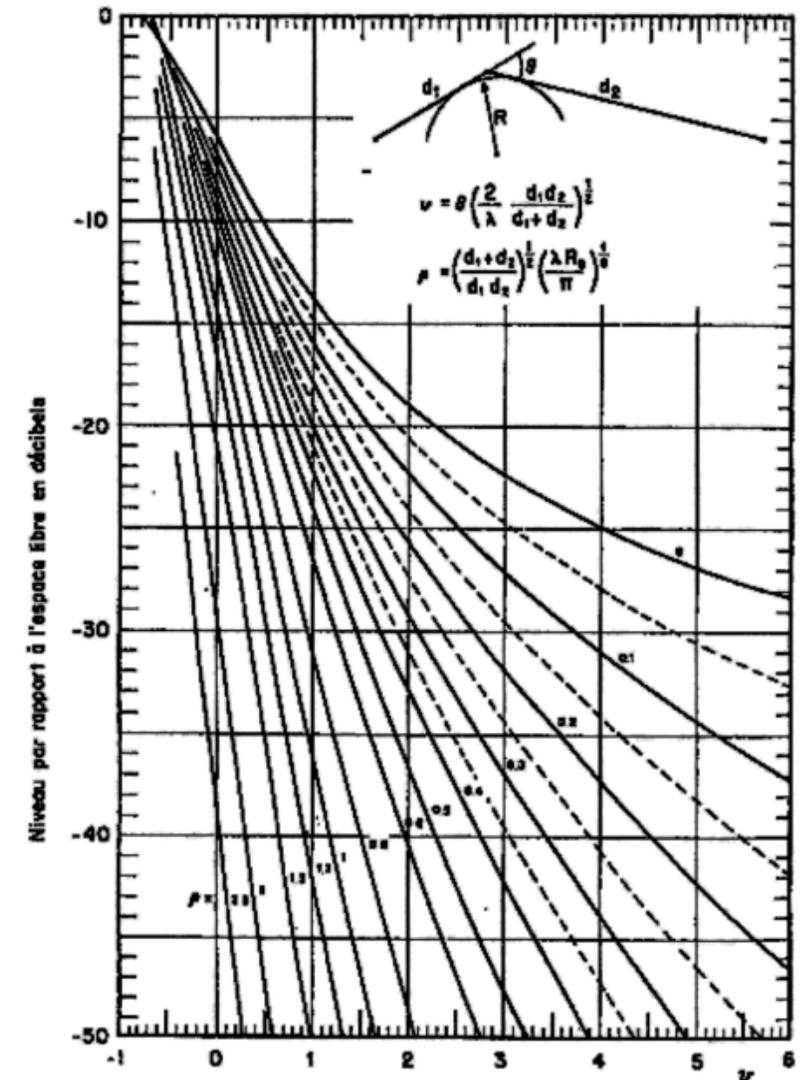
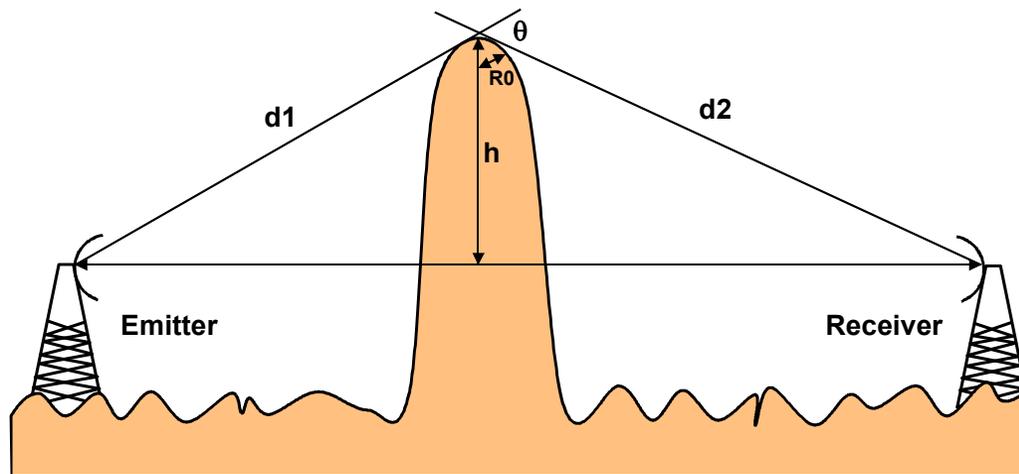
Propagation des ondes radio

• Pertes (Impairments & Losses)

Diffraction

La diffraction arrive lorsque le chemin de l'onde est partiellement ou totalement obstrué
Lorsque R_0 est proche de 0: (effet pointe)

$$A_{dB} = 6.9 - 20 \log(\sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} - v + 0.1)$$



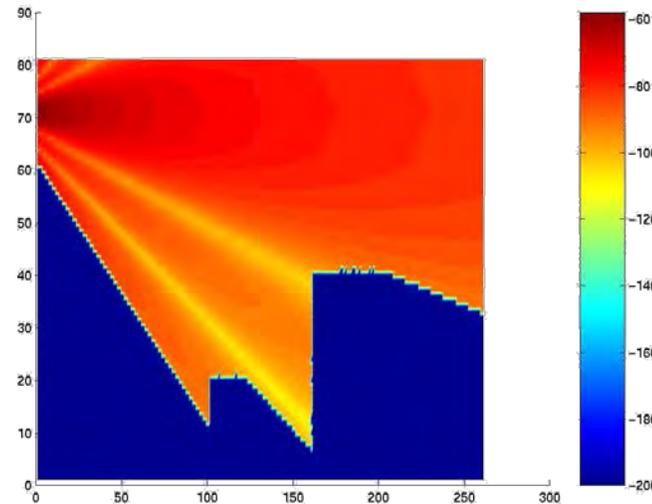
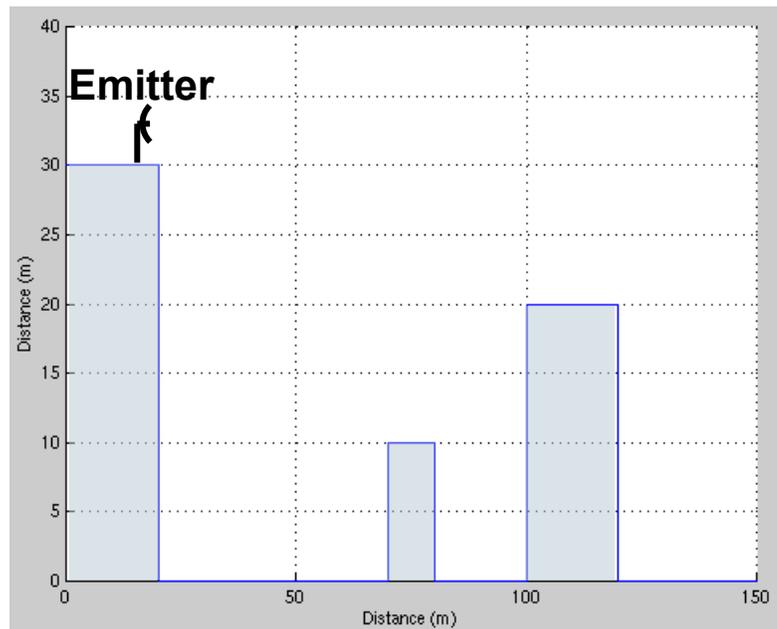
Base Télécom

Propagation des ondes radio

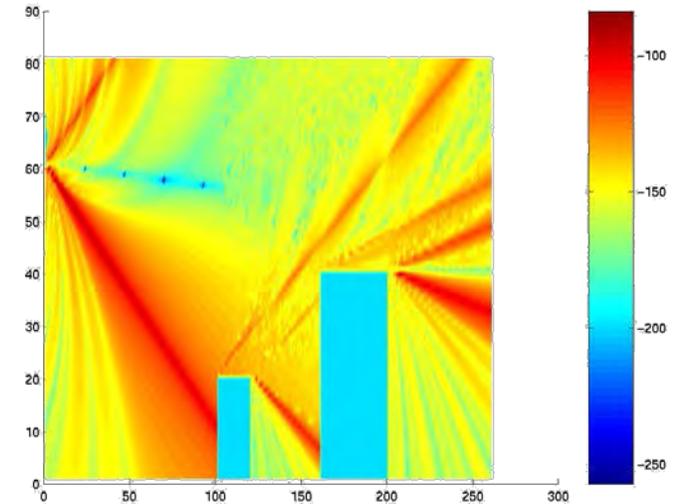
- Pertes (Impairments & Losses)

Diffraction

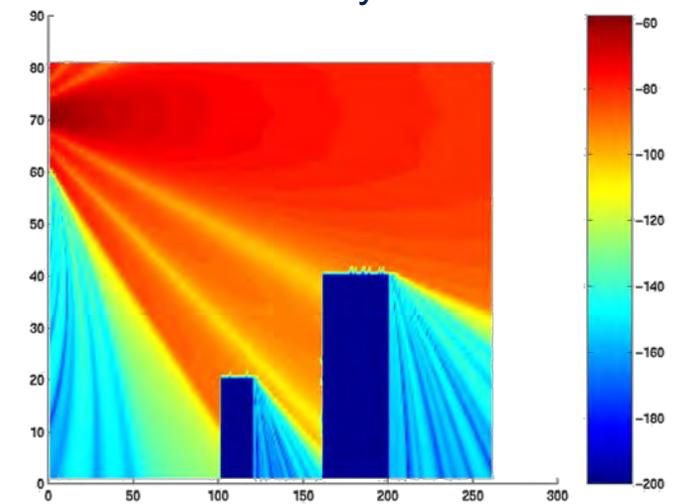
La diffraction arrive lorsque le chemin de l'onde est partiellement ou totalement obstrué
Lorsque R_0 est proche de 0: (effet pointe)



Direct waves only



Diffracted waves only



All waves

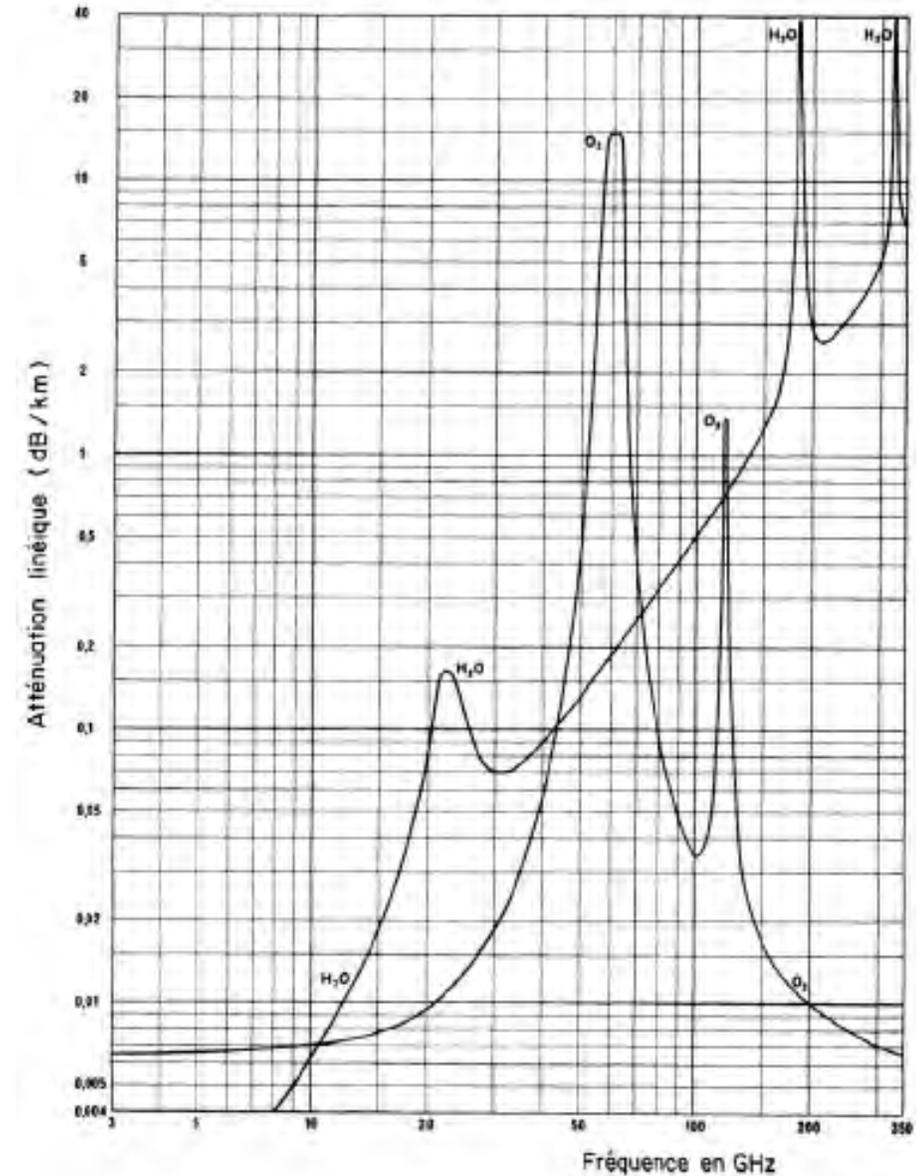
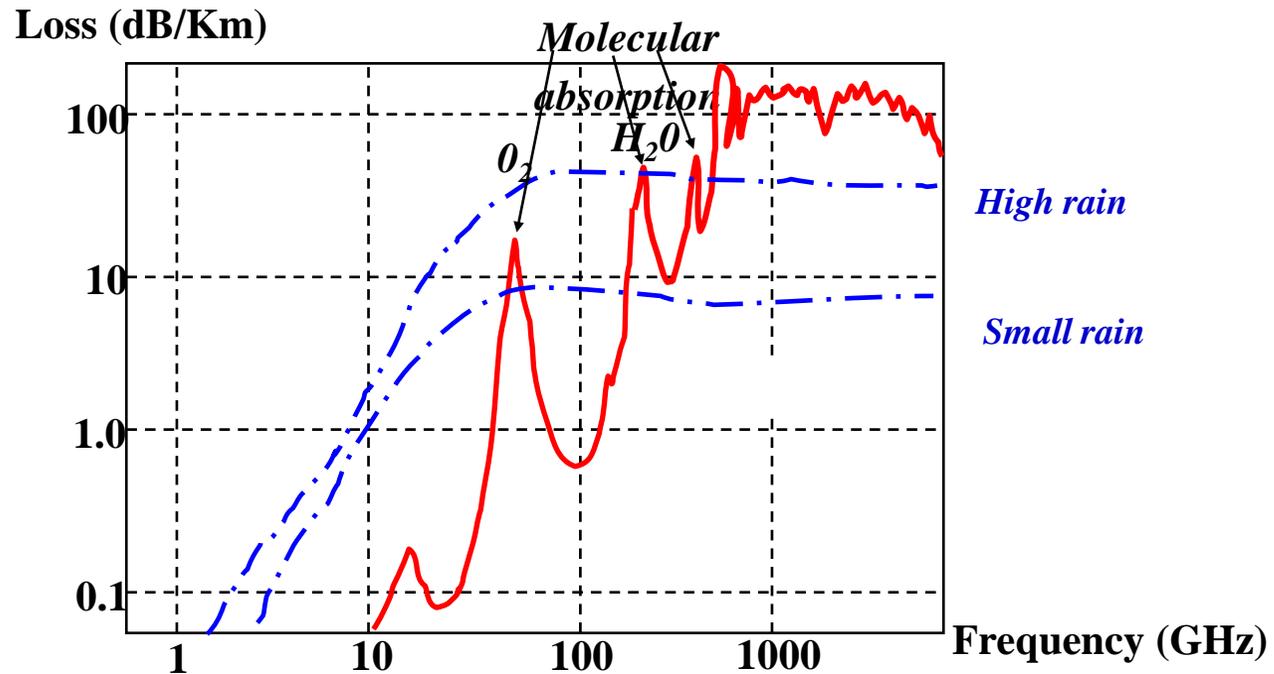
Base Télécom

Propagation des ondes radio

• Pertes (Impairments & Losses)

Climate: humidity, rain, dust particles, ...

- L'absorption dépend du matériaux
- L'absorption dépend de la fréquence



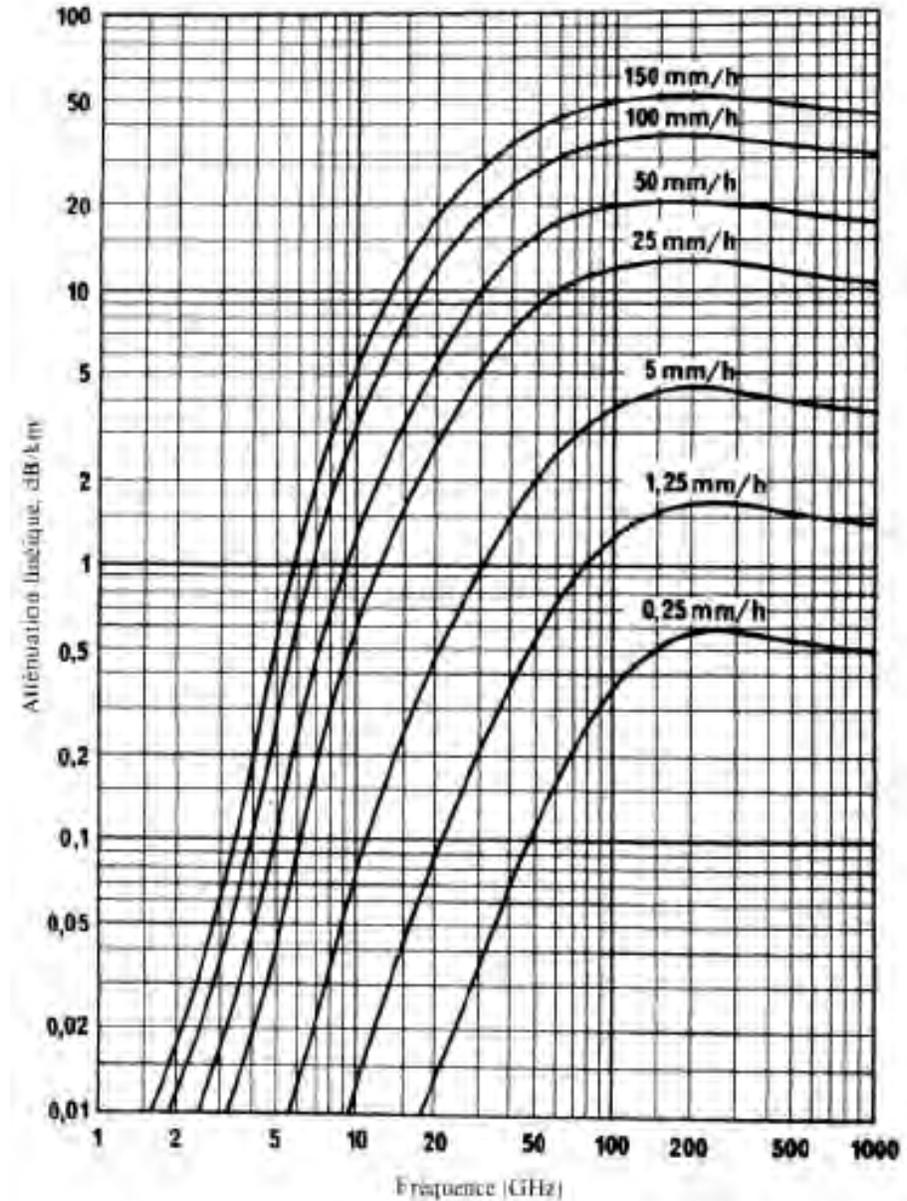
Base Télécom

Propagation des ondes radio

- Pertes (Impairments & Losses)

Climate: humidity, rain, dust particles, ...

- L'absorption dépend du matériaux
- L'absorption dépend de la fréquence
- Pluie



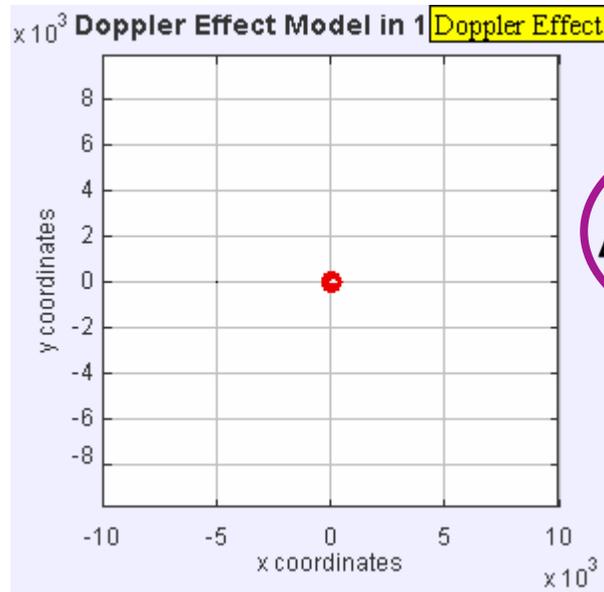
Base Télécom

Propagation des ondes radio

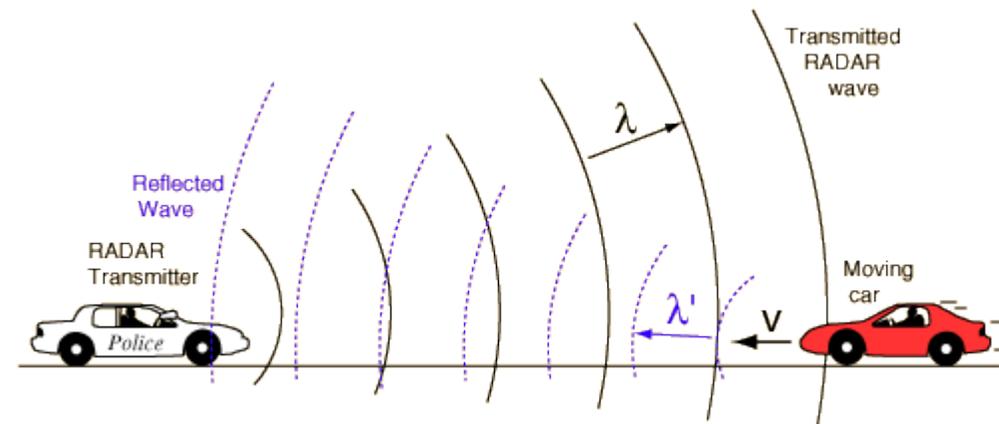
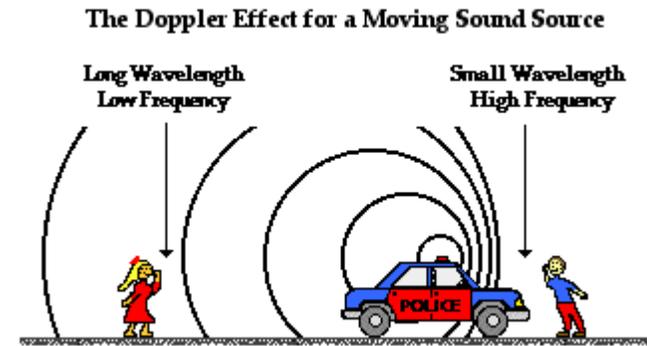
- Pertes (Impairments & Losses)

Doppler effect

Effet Doppler = décalage en fréquence dû à la différence de vitesse



$$\Delta f = \frac{\Delta v}{c} f_0$$



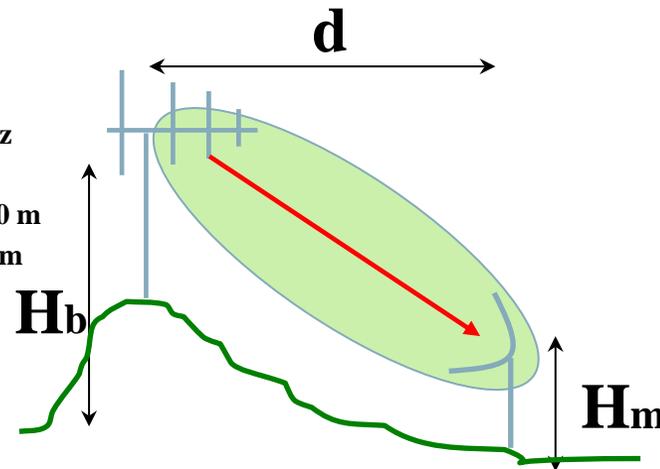
Base Télécom

Propagation des ondes radio

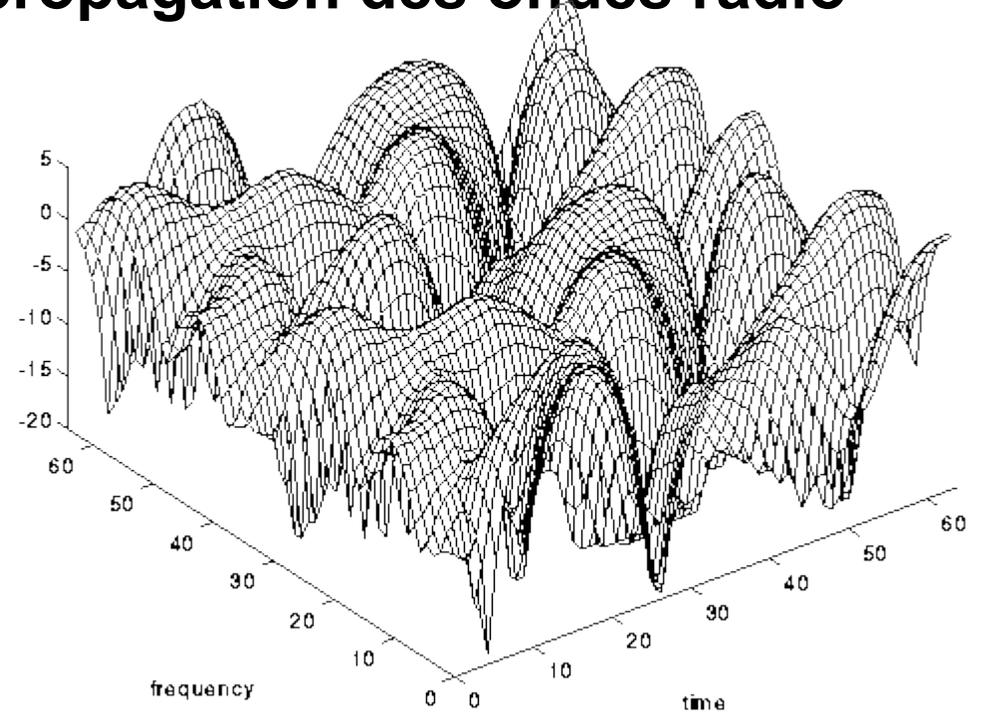
- Pertes (Impairments & Losses)
- **La combinaison de tous ces effets rend la propagation des ondes radio hautement complexes et peu prédictible**

➤ **Input parameters :**

- f : frequency (MHz) between 100 & 1500 MHz
- d : distance in km entre, from 1 to 20 km
- H_b : height in m of the emitter, from 30 to 300 m
- H_m : height in m of the receiver, from 1 to 20m



Okumura-Hata Model – COST231 - Hata

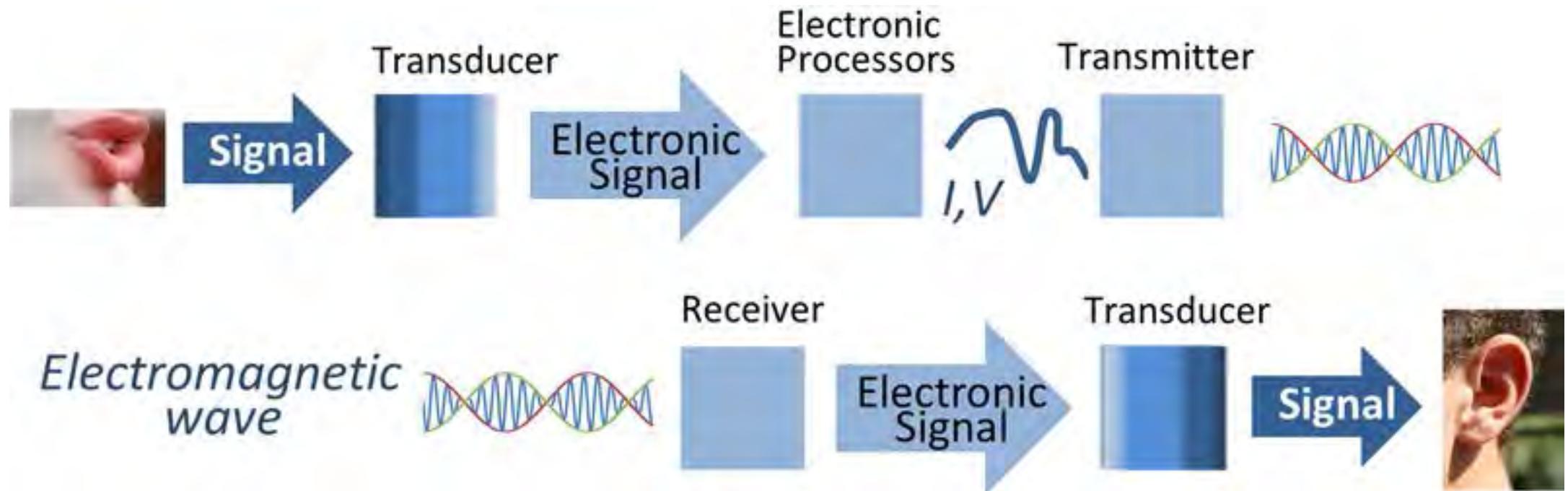


$$L_u(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(H_b) - A(H_m) + (44.9 - 6.55 \log(H_b)) \times \log(d)$$

Base Télécom

Chaîne de transmission

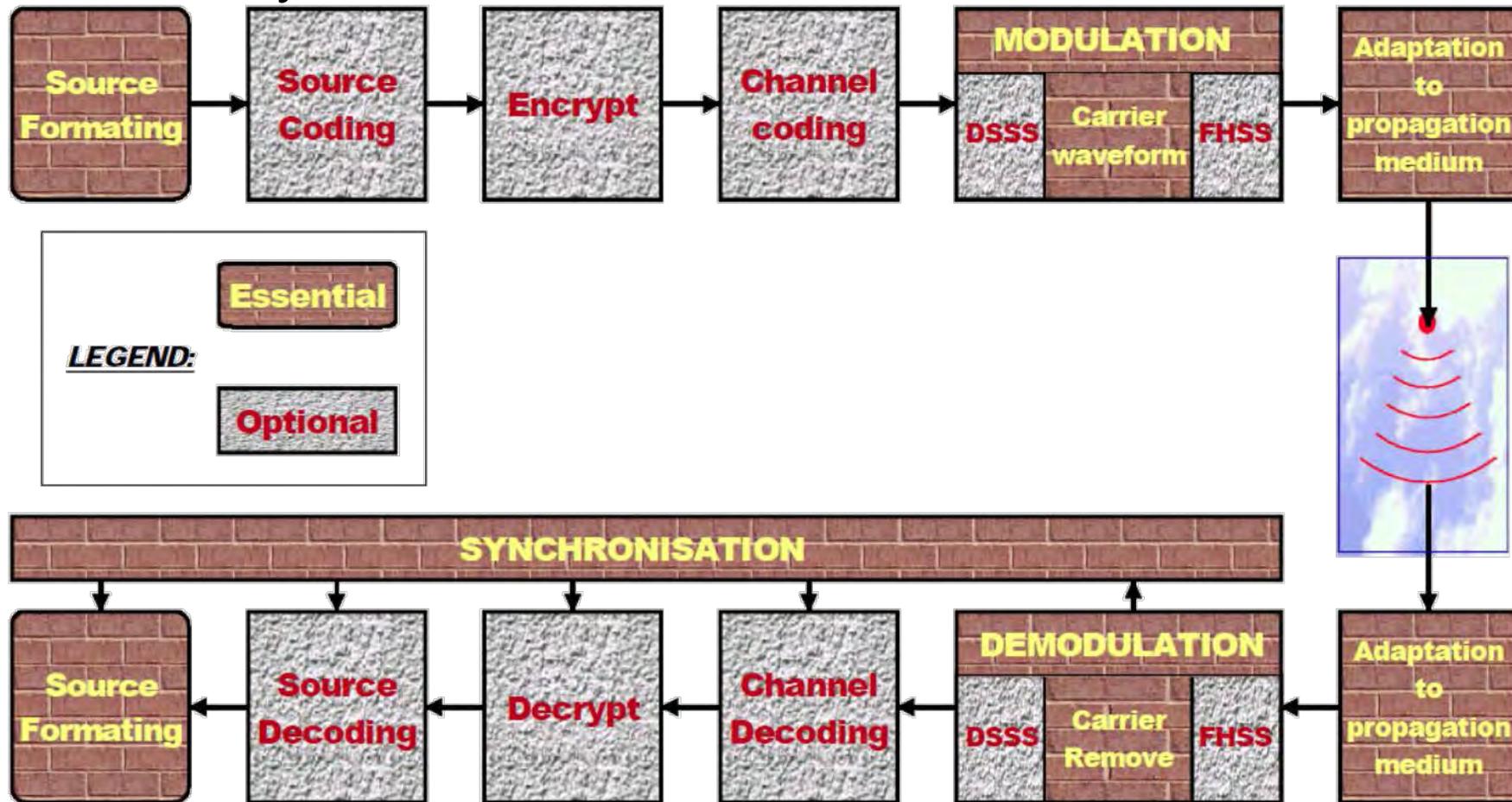
- Schéma d'un système de télécommunication sans fil pour la voix



Base Télécom

Chaîne de transmission

- Composants d'un système de télécommunication sans fil

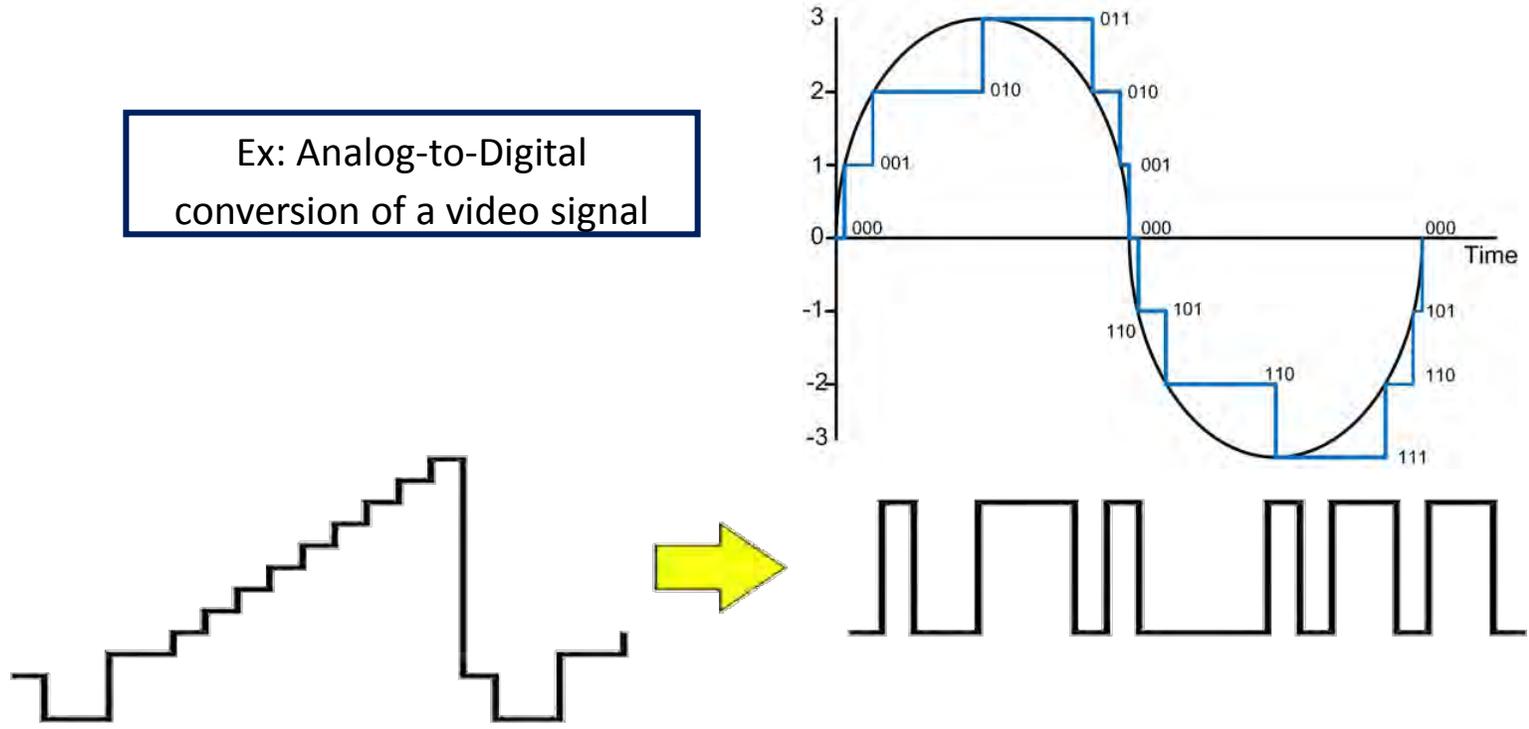


Base Télécom

Chaîne de transmission



- Source formatting:
- Converts the signals from the source into signals that can be transmitted (typically bits)



Base Télécom

Chaîne de transmission

- Source Coding & Decoding:
- Goal: to reduce the data rate of the source !
- Removal of redundancies (Lossless compressions)
- Entropy reduction by the removal of non-necessary information (lossy compressions)

Ex: Winzip / 7Zip / WinRar / TIFF / FLAC lossless compressions

Ex: MP3 lossy compression using psycho-acoustic criterions
Jpeg / Divx / H264 & h265 (HEVC) lossy compression using psycho-visual criterions



Base Télécom

Chaîne de transmission

- Cyphering / Encryption / Scrambling:
- Turns the information scrambled or « non-readable » for un-authorized users / devices



Ex: AES 256 bits / SSL like



Base Télécom

Chaîne de transmission



- Channel Coding:
- Adds redundancies to the signal to make it more robust to interferences (noise, ...). Thus 2 advantages:
- Less power needed for transmission as the signal is more robust
- Adds integrity to received information

Ex 1: Hamming code transforms a byte into a 12 bit word
→ 1 error can be completely corrected

Ex 2: Convolutional Code with rate $\frac{1}{2}$ and length 7 adds a bit to each input bit
as a function of the previous 7 ones.

Ex 3: Turbo-codes

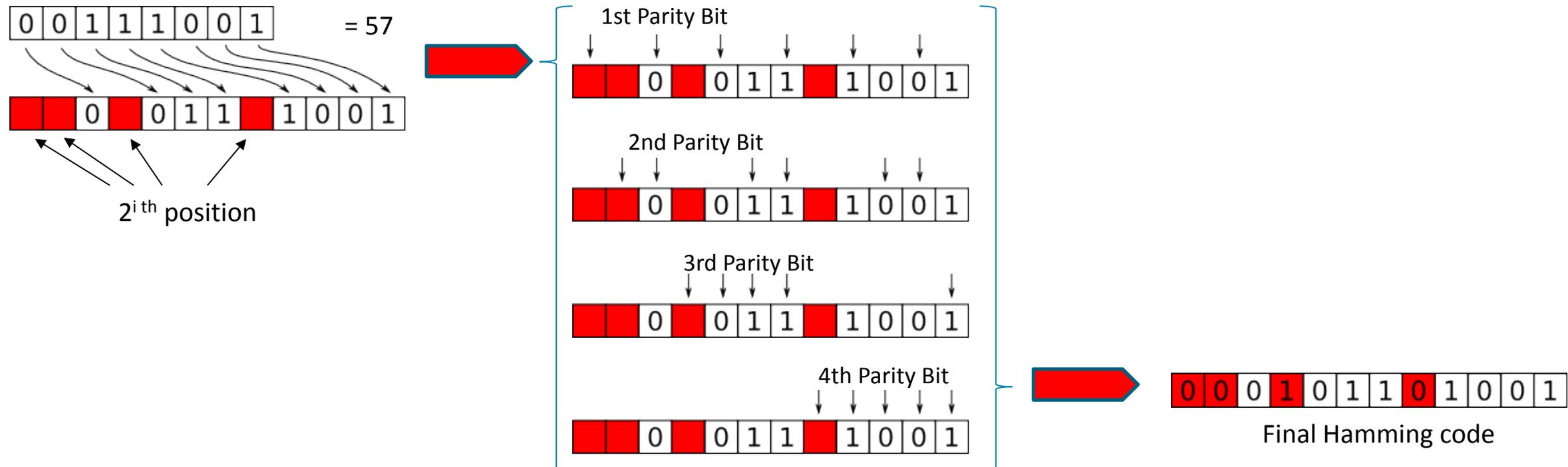
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Channel Coding:



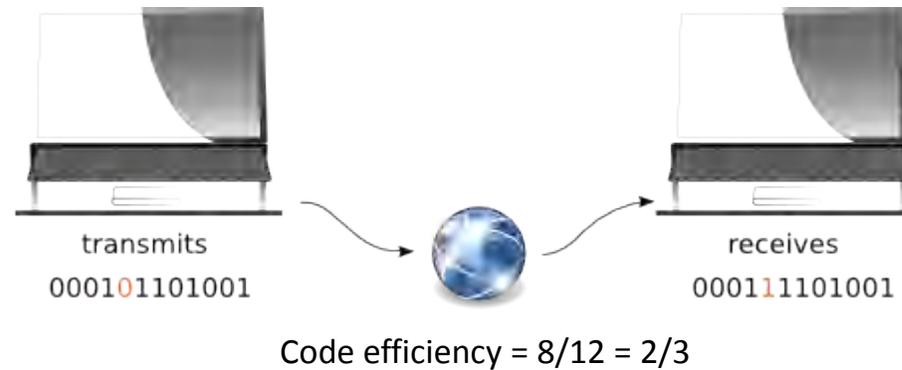
- Ex 1: Hamming code transforms a byte into a 12 bit word (Block Code)



Base Télécom

Chaîne de transmission

- Channel Coding:
- Ex 1: Hamming code transforms a byte into a 12 bit word (Block Code)



Without coding a Corrupted byte is received !
(=121)

0	1	1	1	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

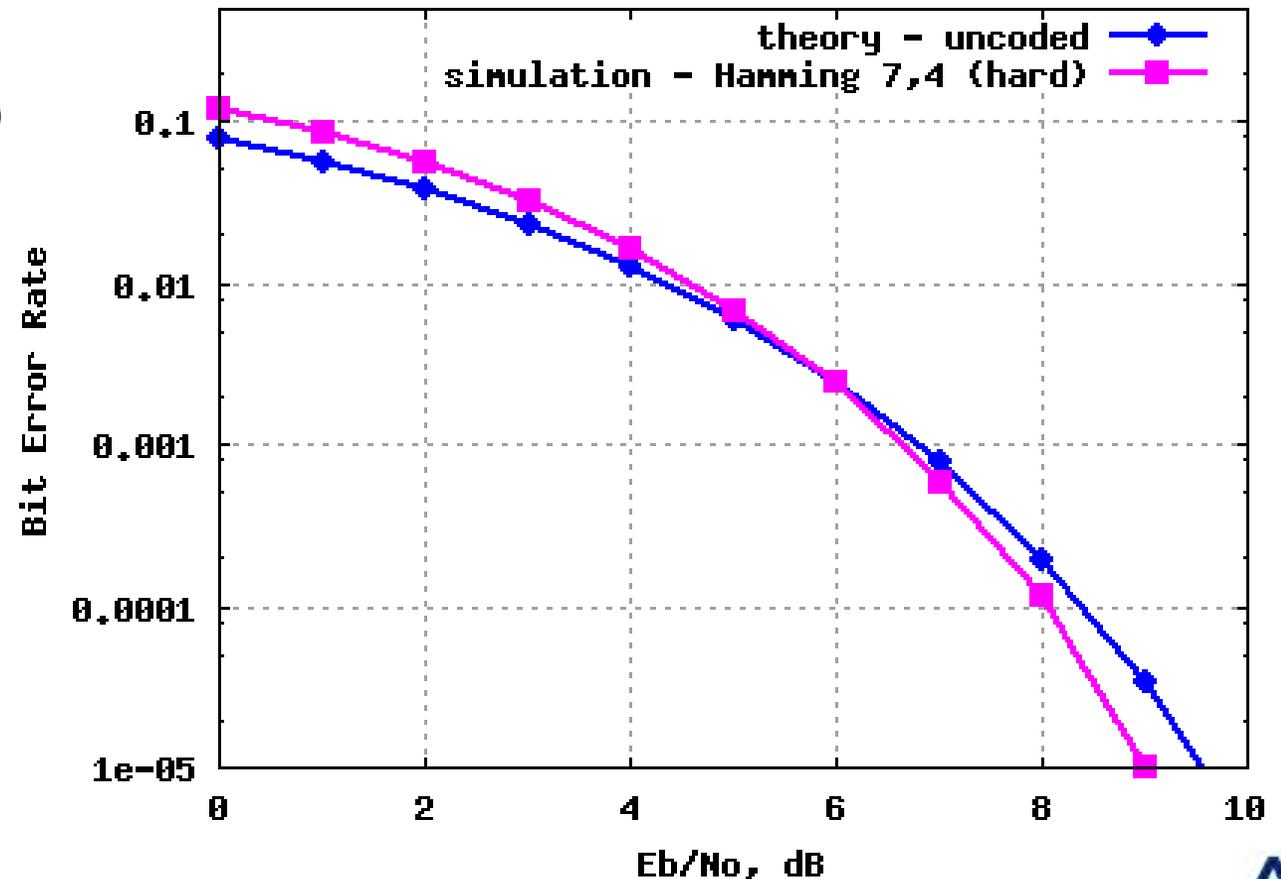
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Channel Coding:
- Ex 1: Hamming code transforms a byte into a 12 bit word (Block Code)



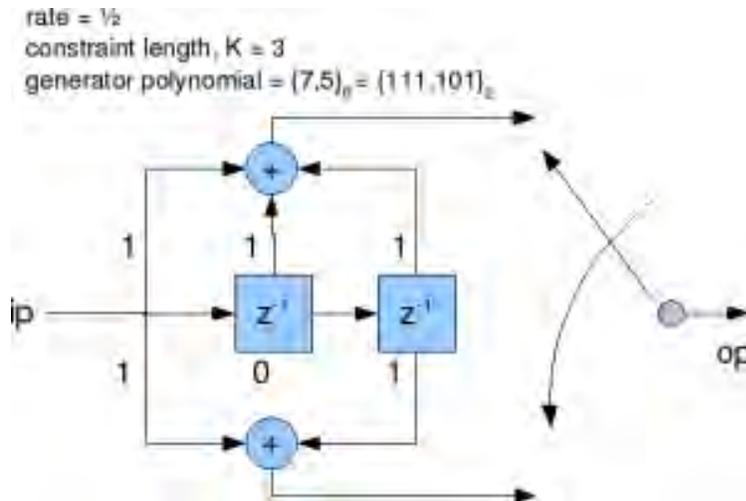
BER for BPSK in AWGN with Hamming (7,4) code



Base Télécom

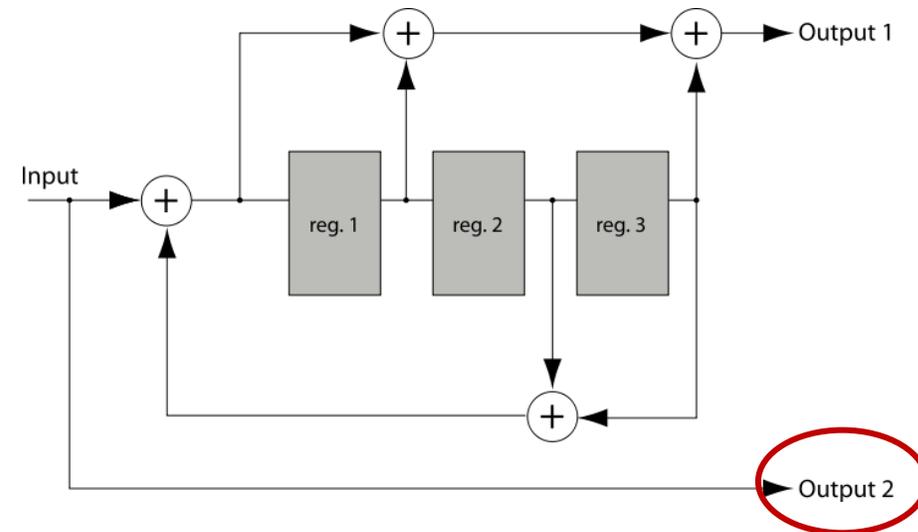
Chaîne de transmission

- Channel Coding:
- Ex 2: Convolutional Code with rate $\frac{1}{2}$



Non recursive

= non systematic



Recursive

= systematic

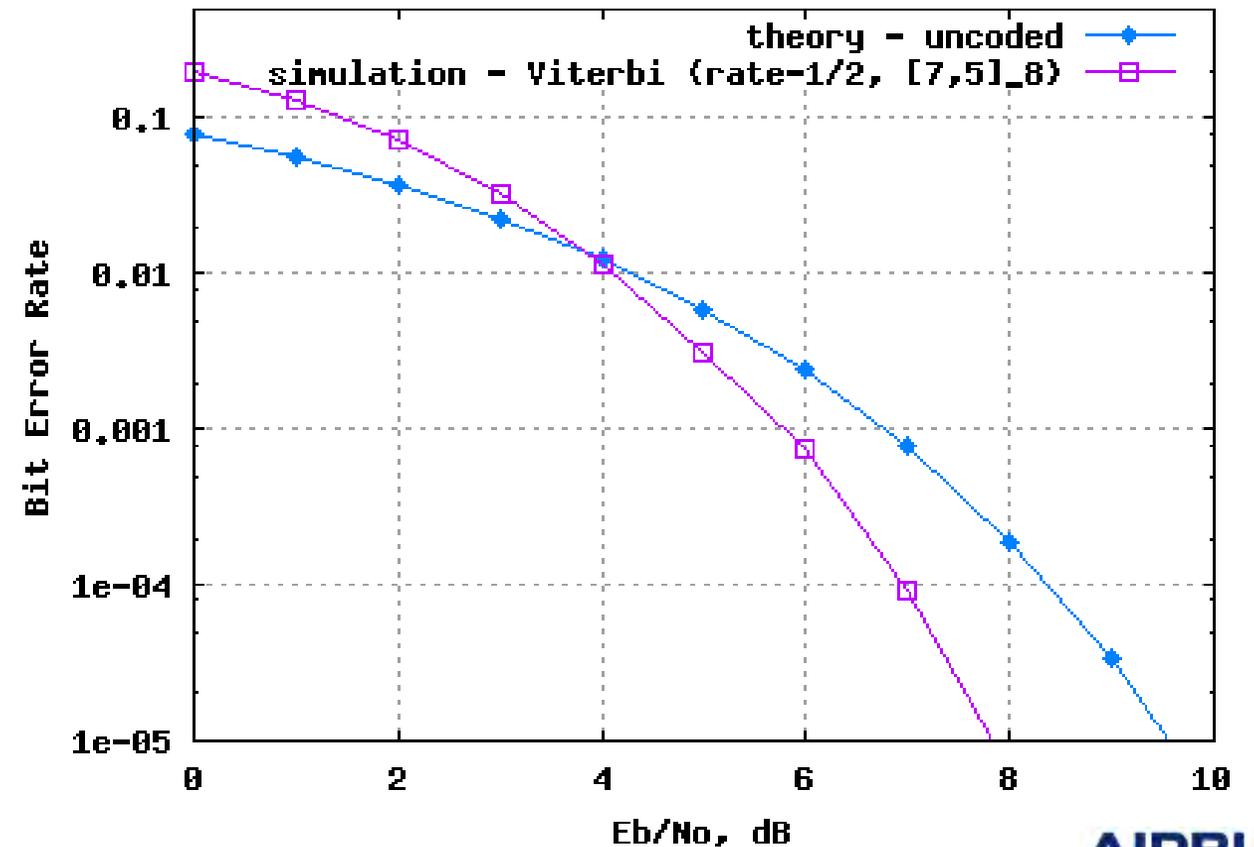
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Channel Coding:
- Ex 2: Convolutional Code with rate $\frac{1}{2}$



BER for BCC with Viterbi decoding for BPSK in AWGN



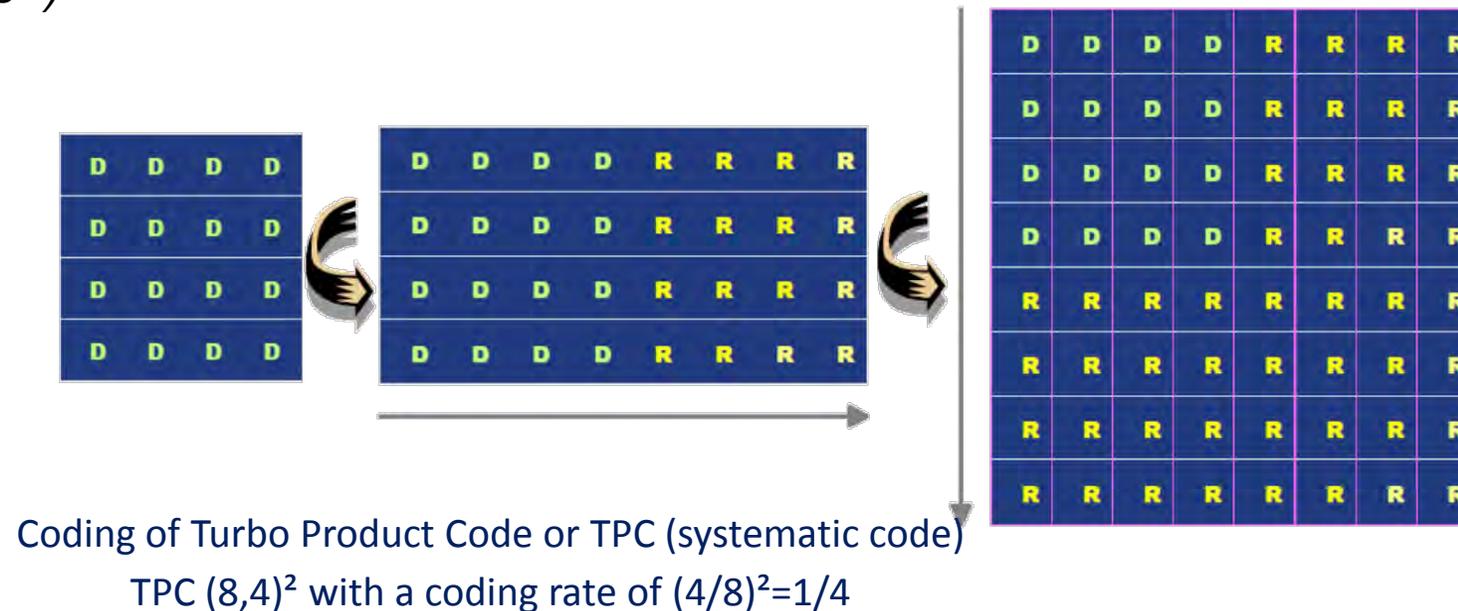
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Channel Coding:

- Ex 3: Turbo-code

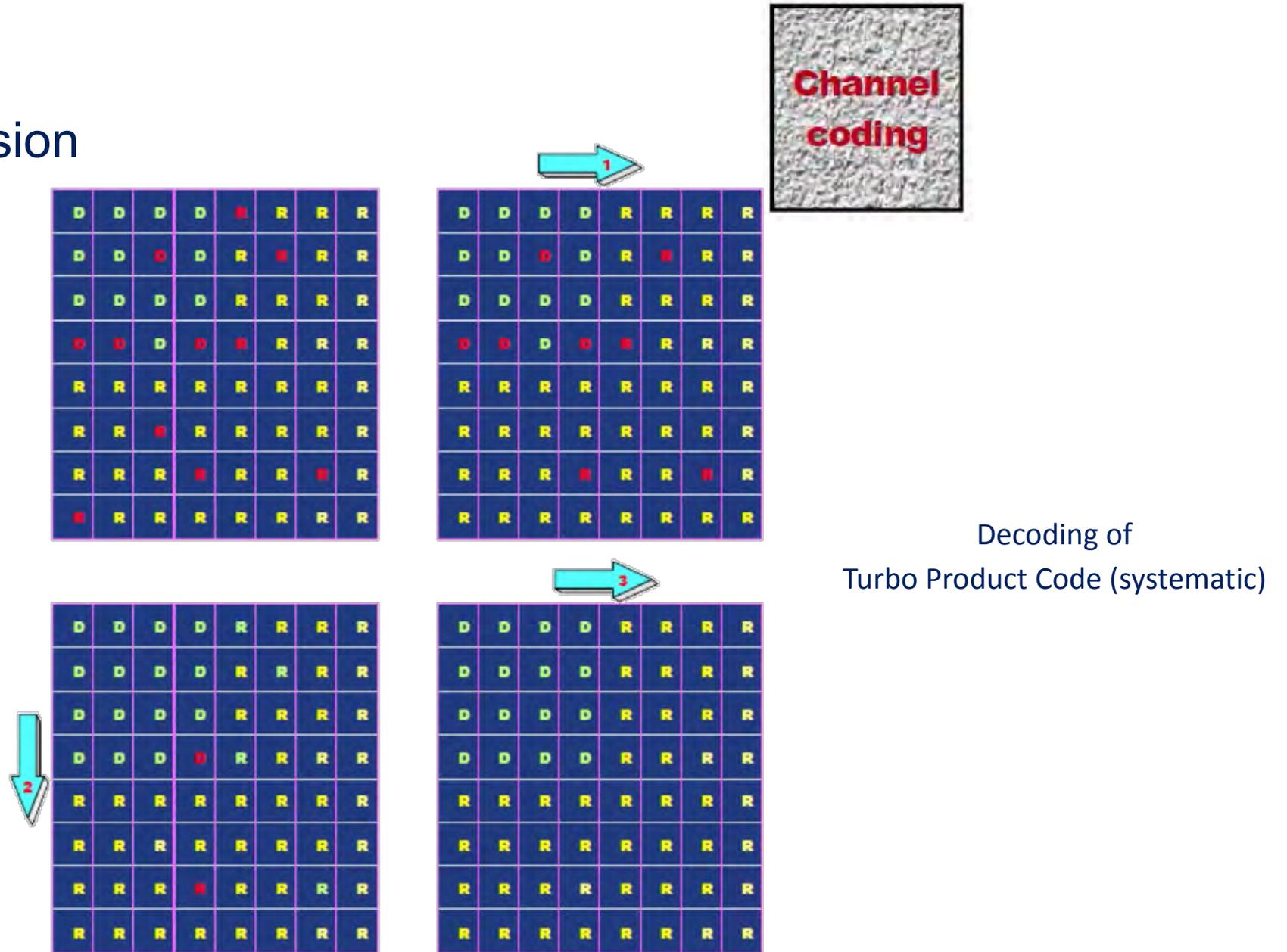
(french innovation & Patent – 1993- by Berrou & Glavieux "Near Shannon Limit Error-correcting Coding and Decoding: Turbo-codes")



Base Télécom

Chaîne de transmission

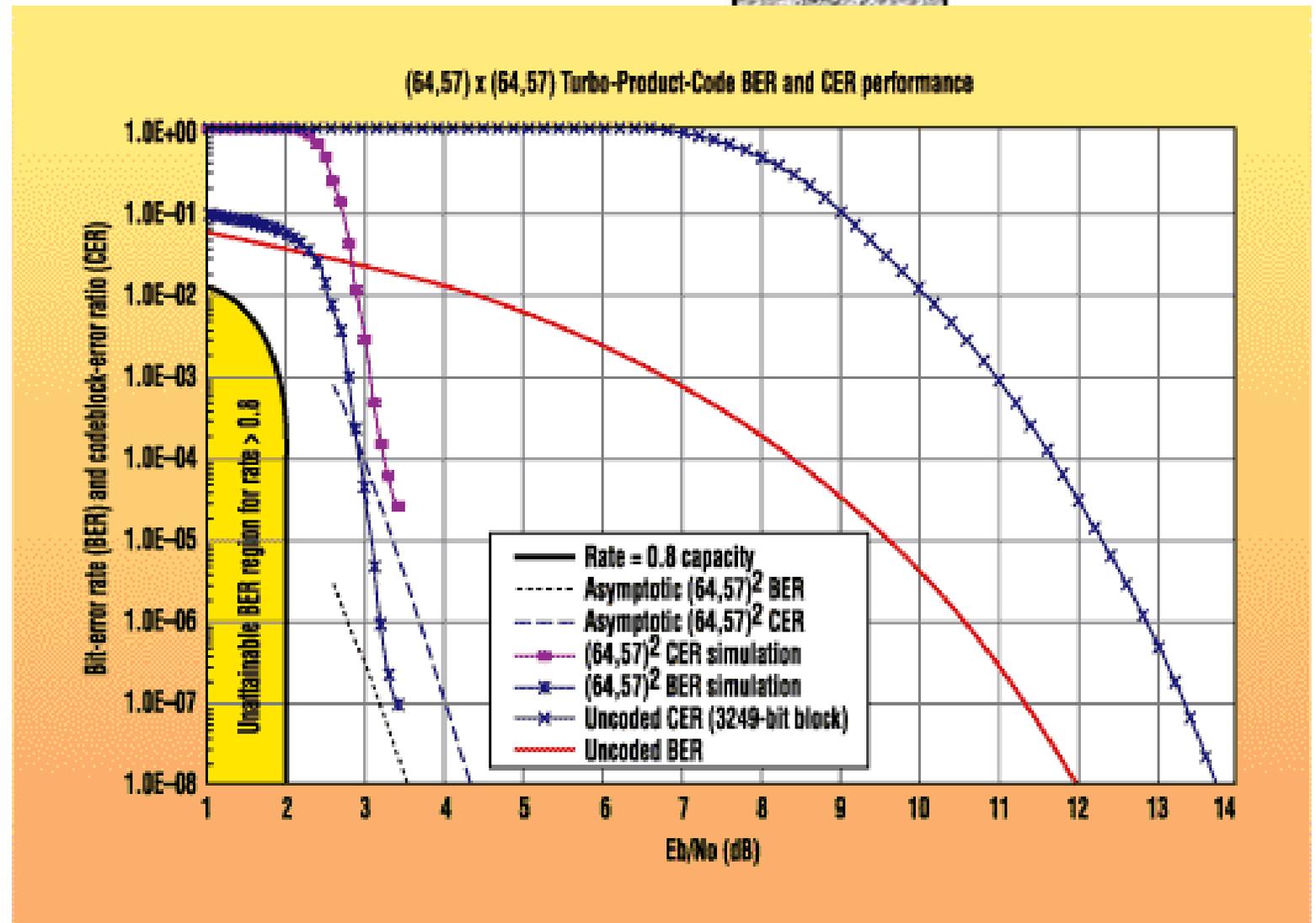
- Channel Coding:
- Ex 3: Turbo-code



Base Télécom

Chaîne de transmission

- Channel Coding:
- Ex 3: Turbo-code



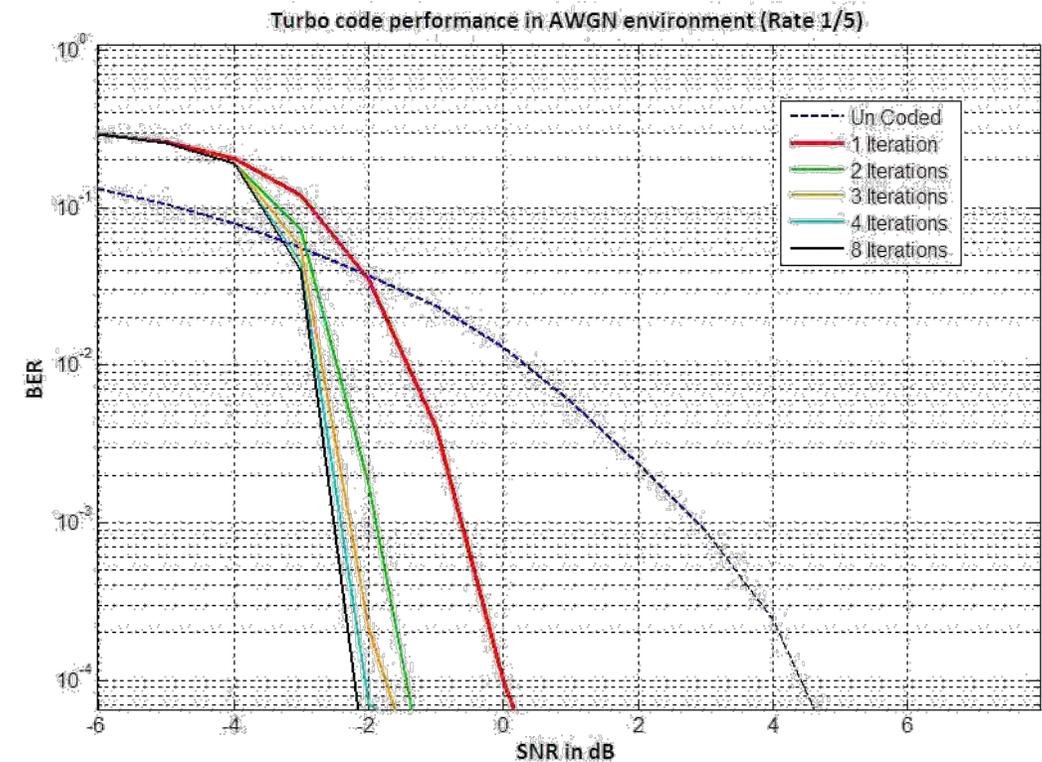
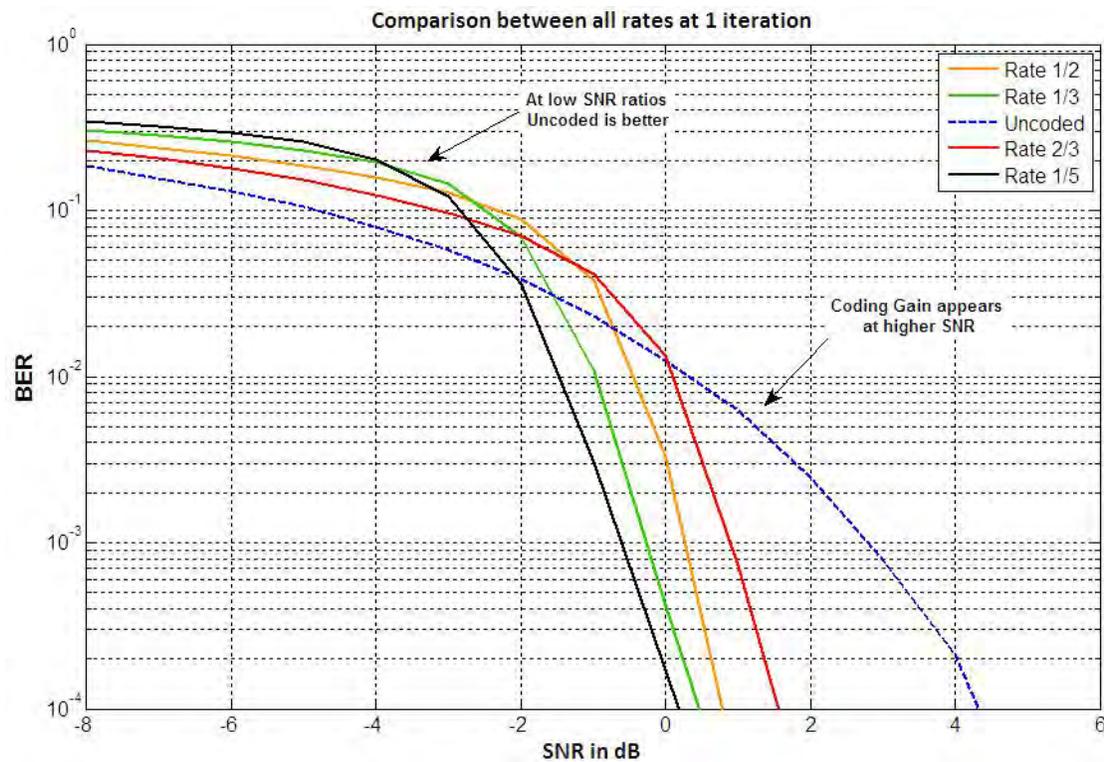
4. This graph shows the performance of a Turbo Product Code built from the (64,57) code used in both the x and y dimensions. Also included is a bit-error-rate plot of data transmitted without coding on the AWGN channel.

Base Télécom

Chaîne de transmission

- Channel Coding:

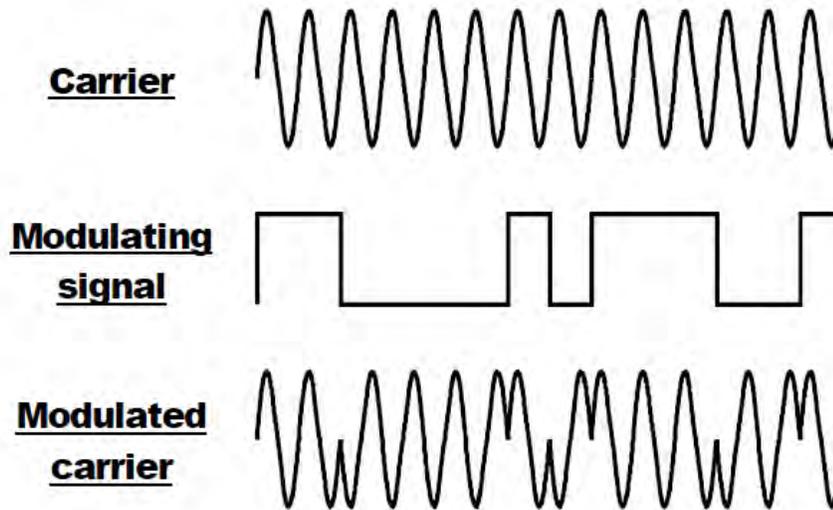
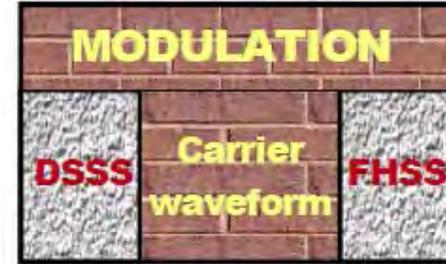
- Ex 3: Turbo-code



Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation:
- Converts the coded signal into an electrical waveform on a frequency carrier

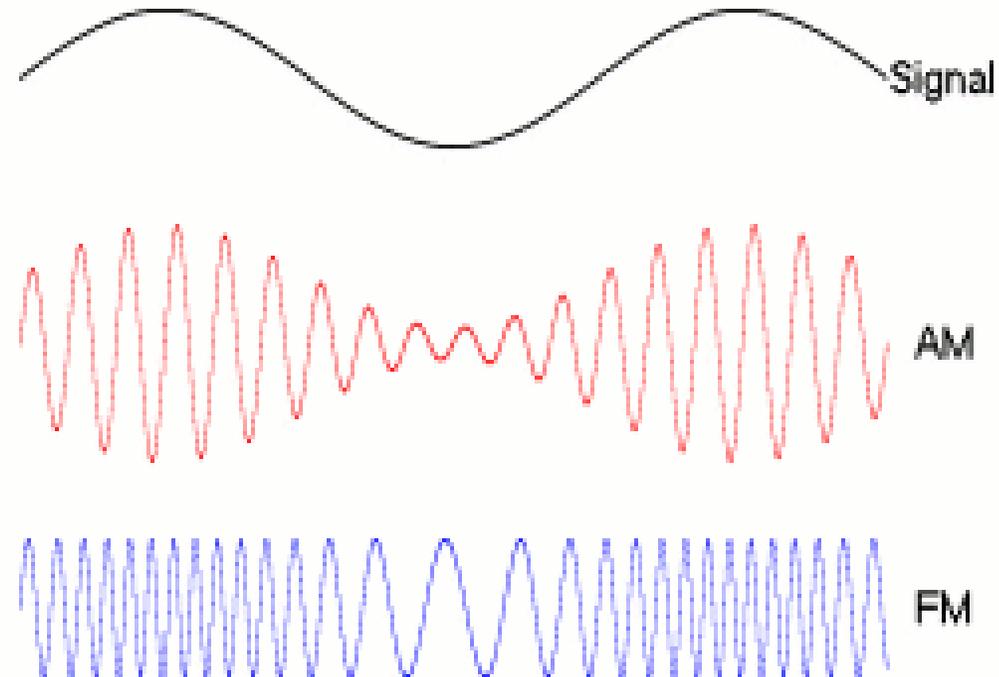
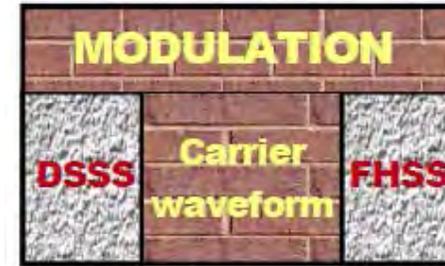


Ex : Phase modulation

Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation:
- Before, it was analog ... like AM/FM radios



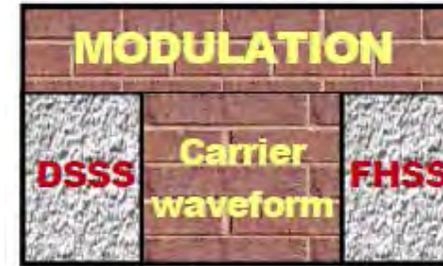
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation:
- Then digital ... but still on a « carrier » = single frequency $e^{i\omega t}$

4 « best » Choices to convert 0/1 bits into « analog » signal:

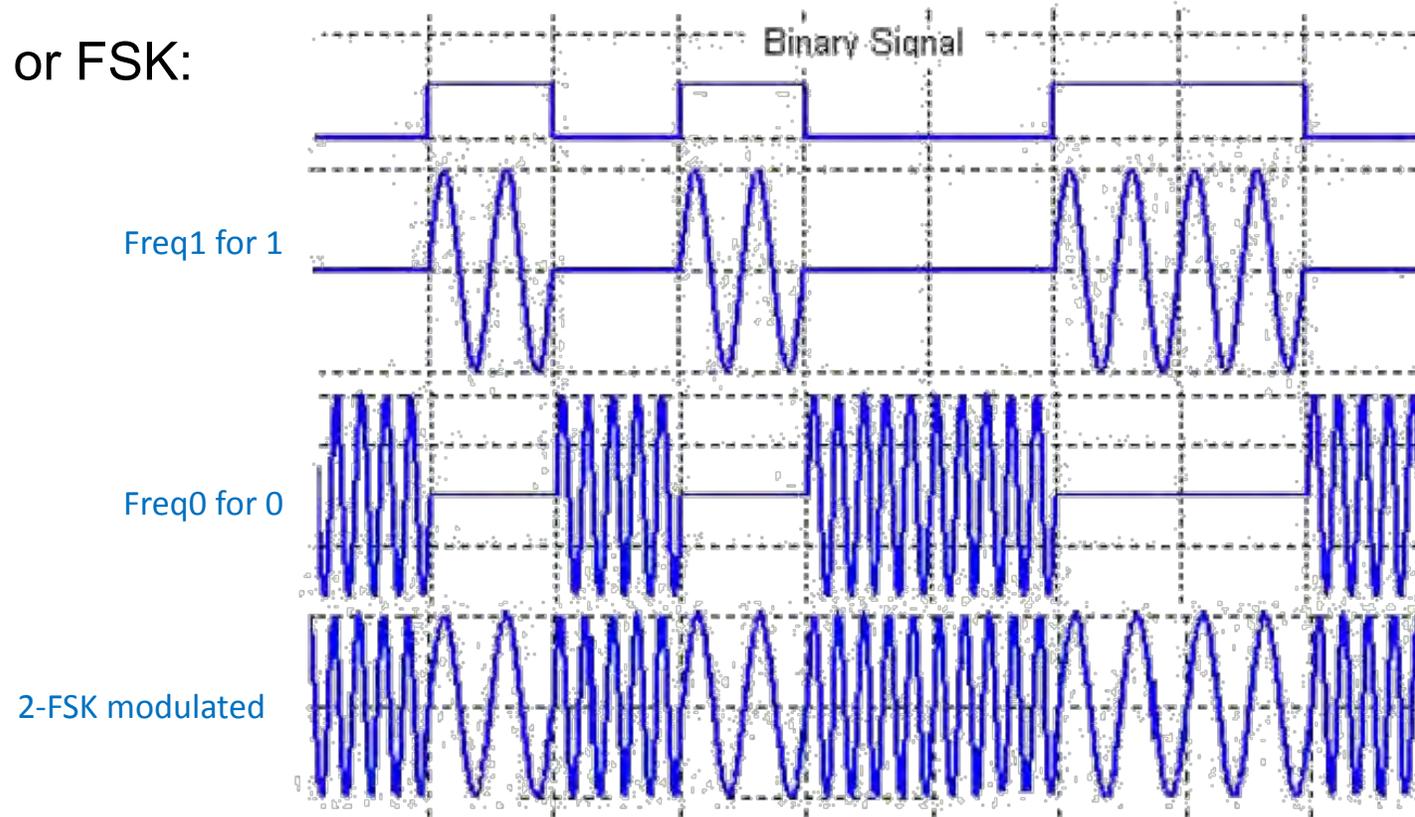
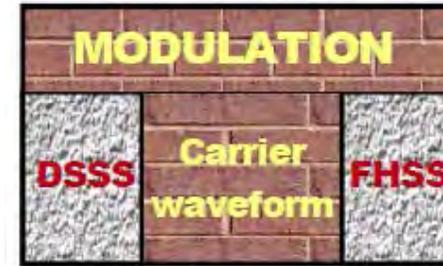
- The uses of phases – **Phase Shift Keying or PSK**
- The uses of different frequencies – **Frequency Shift Keying or FSK**
- The uses of different amplitudes – **Amplitude Shift Keying or ASK**
- The uses of amplitudes and phases combination – **Quadrature Amplitude Modulation or QAM**



Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation:
- Frequency Shift Keying or FSK:



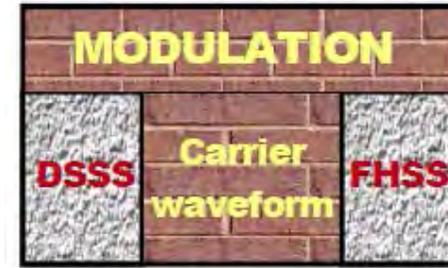
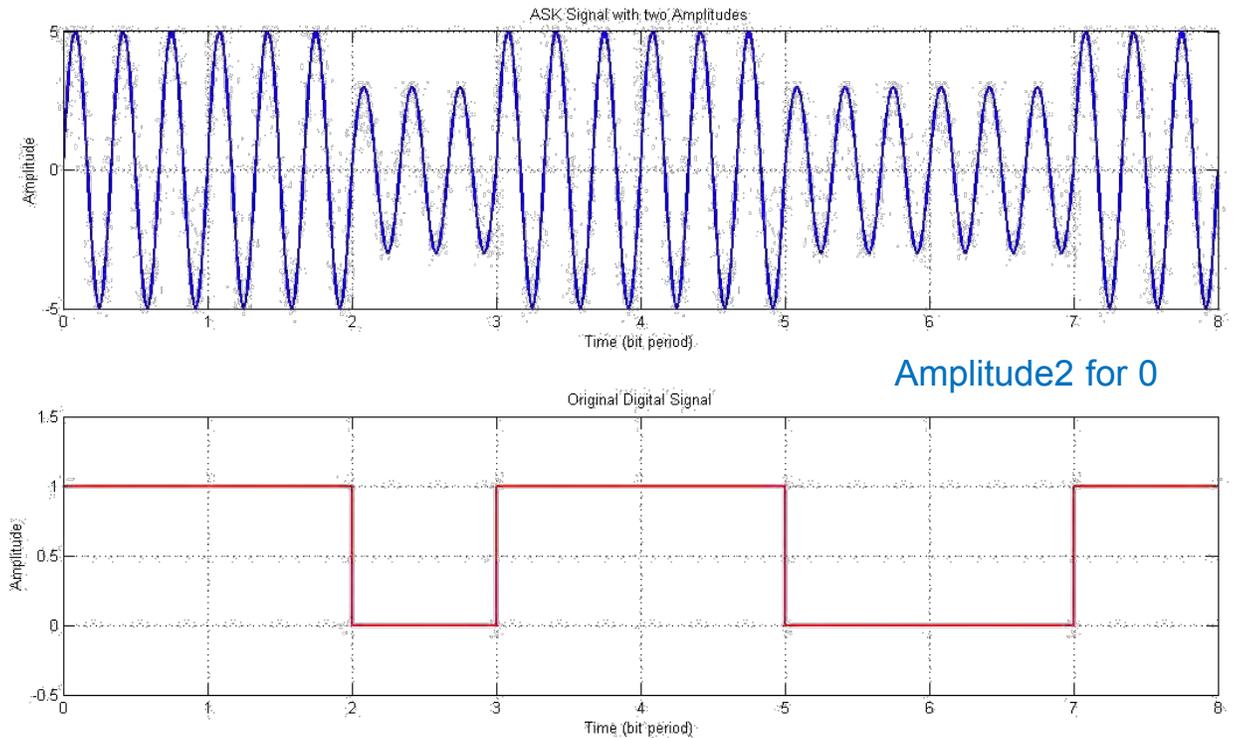
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation:

- Amplitude Shift Keying or ASK: $\underline{A} \cdot e^{i\omega t}$

Amplitude1 for 1

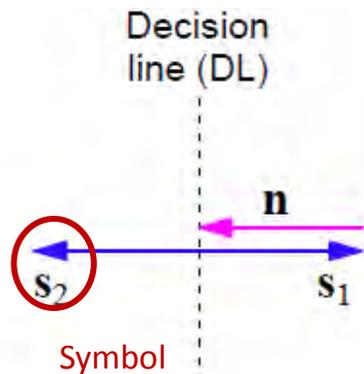
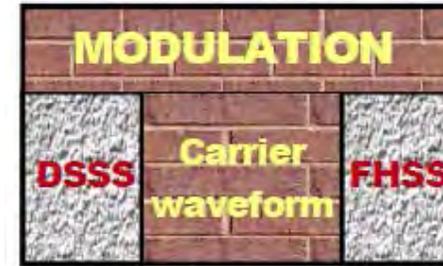


Base Télécom

Chaîne de transmission

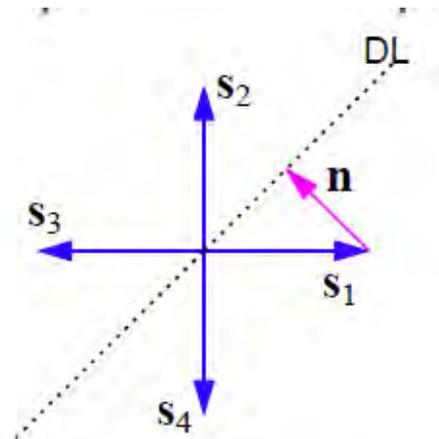
- Modulation:

- Phase Shift Keying or PSK: $A \cdot e^{i\omega t + \underline{\varphi}}$



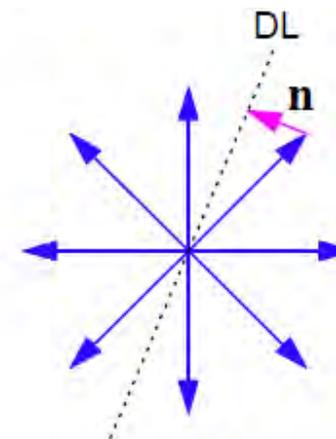
$M = 2$

BPSK



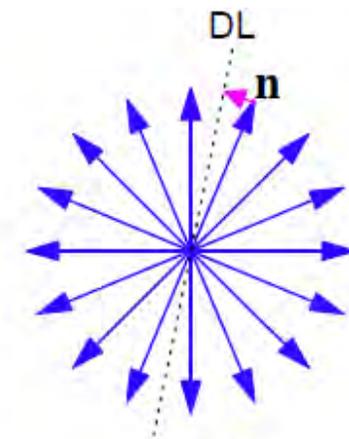
$M = 4$

QPSK



$M = 8$

8-PSK



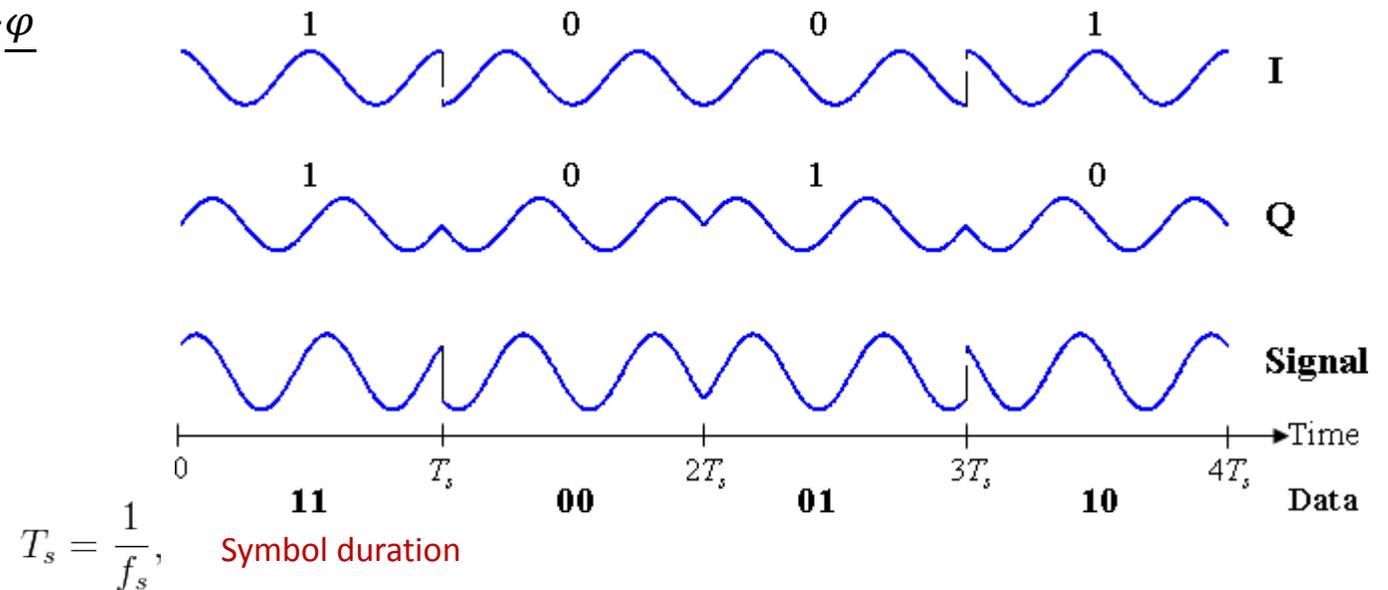
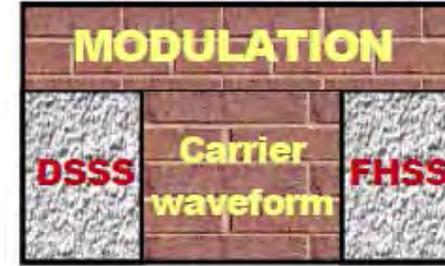
$M = 16$

Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation:

- Phase Shift Keying or PSK: $A \cdot e^{i\omega t + \underline{\varphi}}$

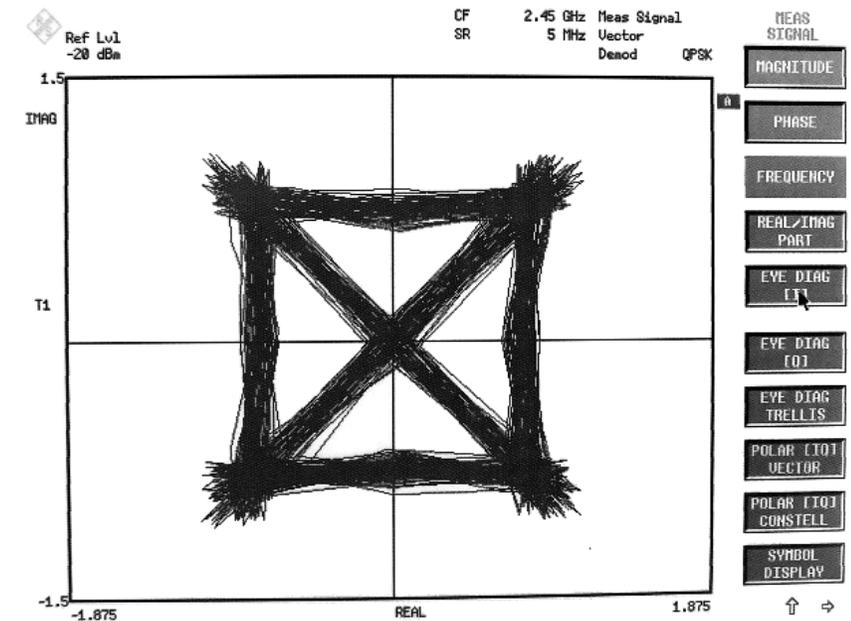
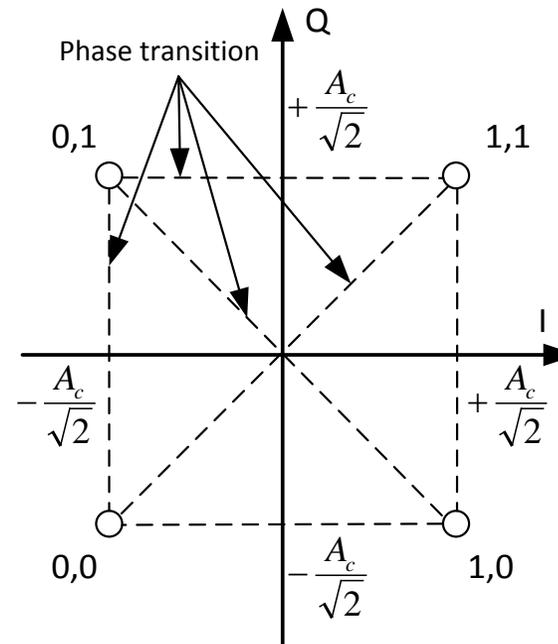
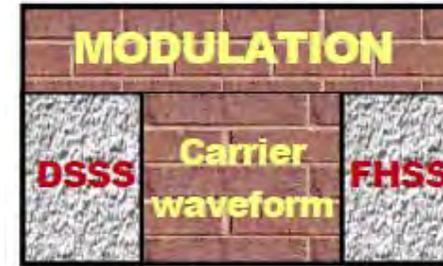


QPSK timing diagram

Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation:
- Phase Shift Keying or PSK: $A \cdot e^{i\omega t + \underline{\varphi}}$



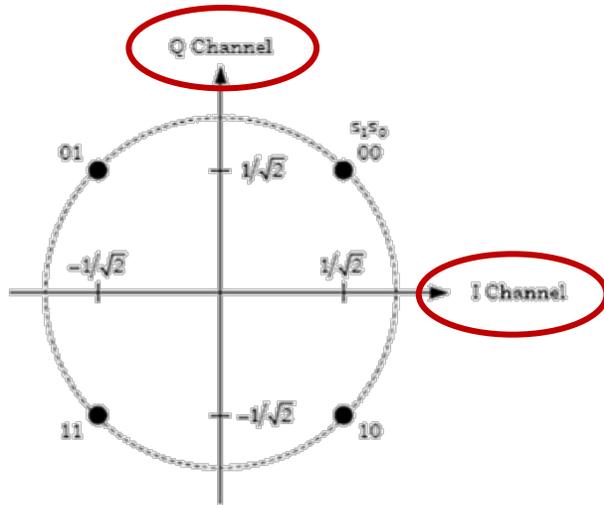
QPSK constellation

Base Télécom

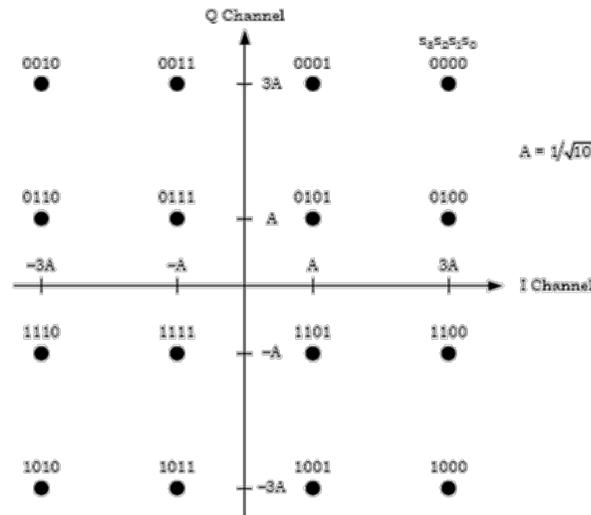
Chaîne de transmission

- Modulation:

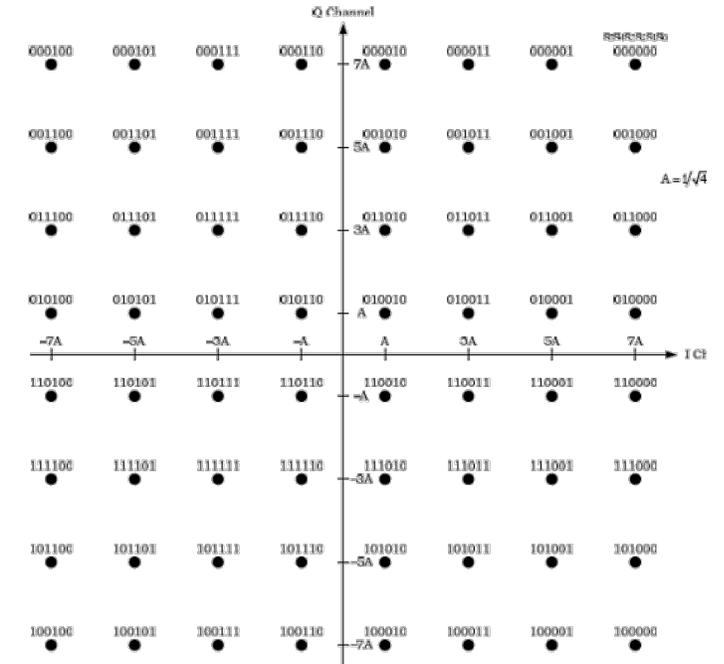
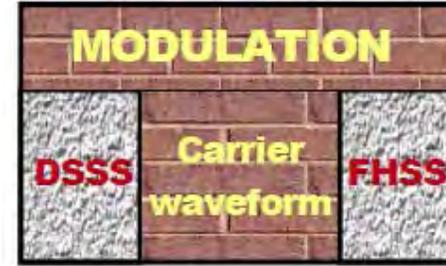
- Quadrature Amplitude Modulation: $\underline{A} \cdot e^{i\omega t + \underline{\varphi}}$



QPSK or 4-QAM



16-QAM



64-QAM

Base Télécom

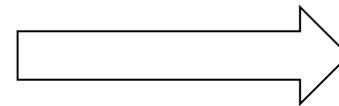
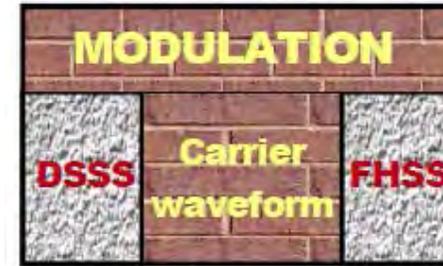
Chaîne de transmission

- Modulation:

- Options:

- DSSS

- FHSS

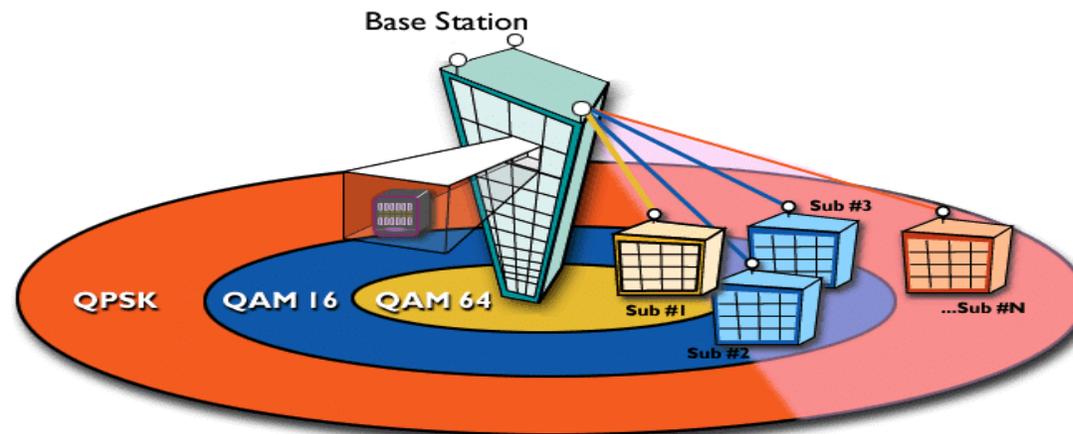
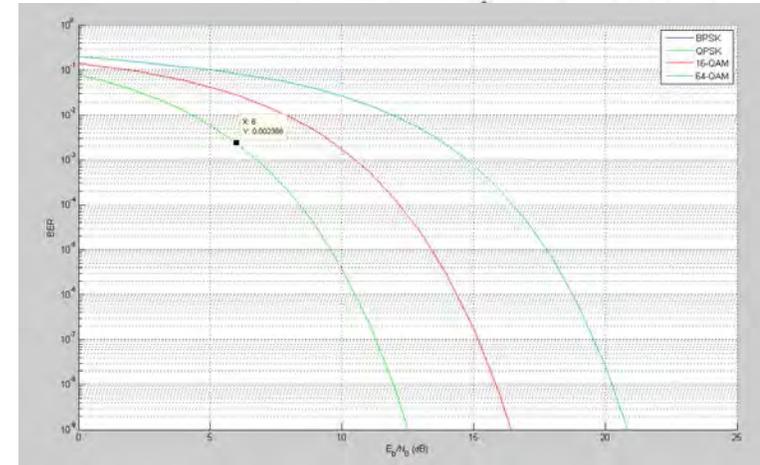
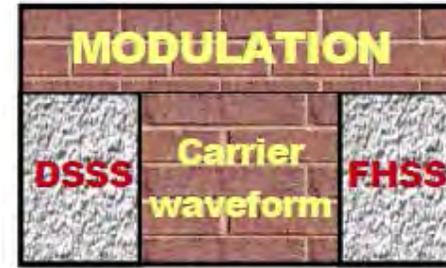
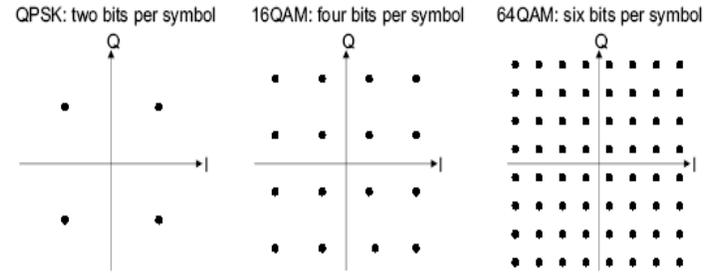


Chap. Sécurisation

Base Télécom Chaîne de transmission

- Modulation:

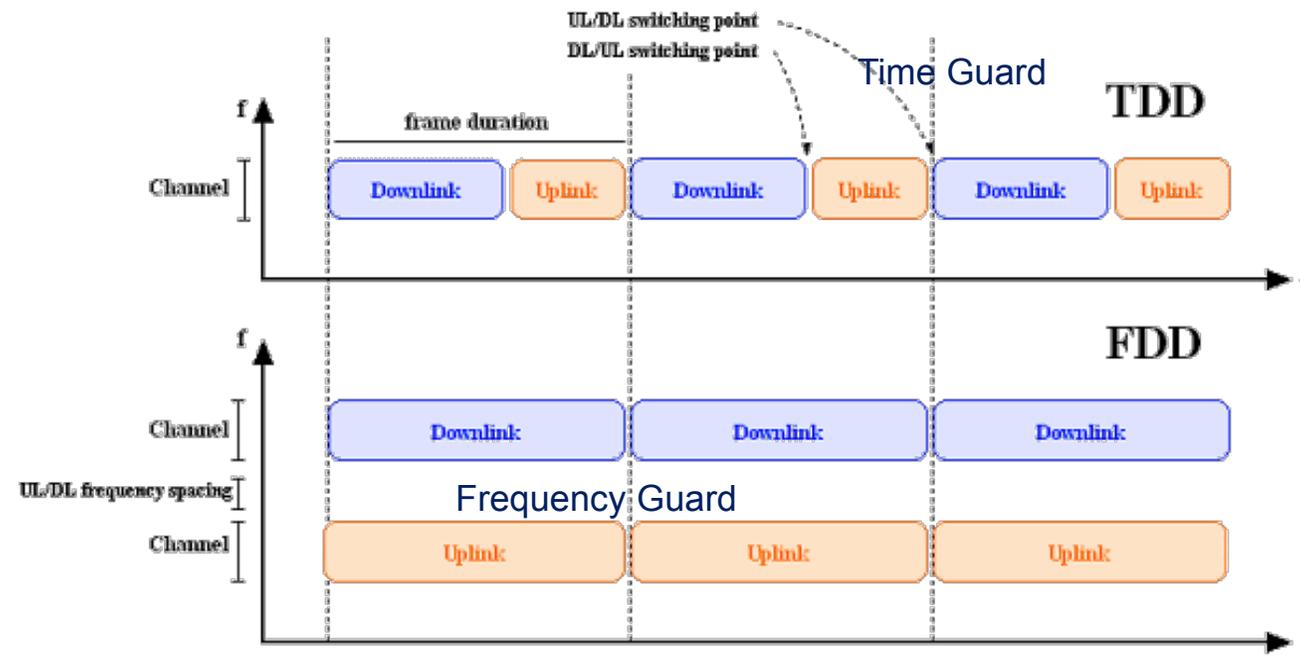
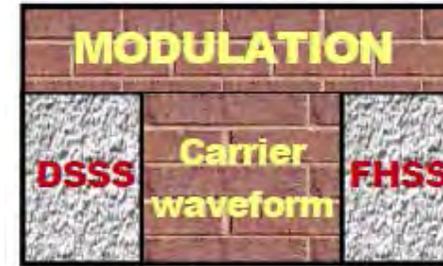
- Link adaptation:



Base Télécom

Chaîne de transmission

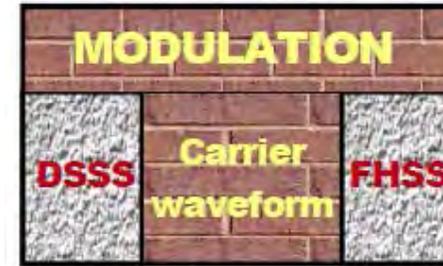
- Modulation: Duplexing
- Uplink / Downlink sharing of the channel = **duplexing**:
2 main solutions:
 - 2 frequencies one for Uplink, one for Downlink = **FDD**
 - Time share of the radio channel: one time for Uplink, one time for Downlink = **TDD**



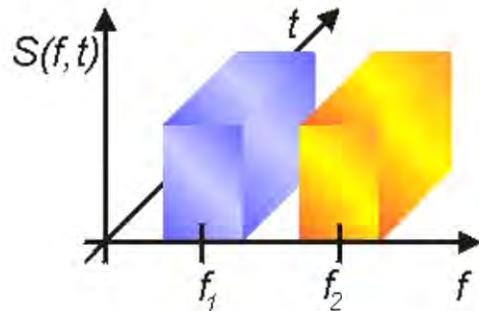
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation: Multiple Access Techniques

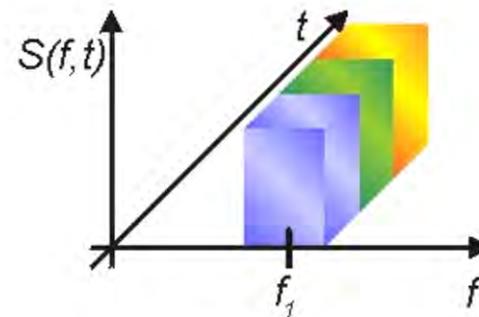


FDMA
Frequency Division
Multiple Access



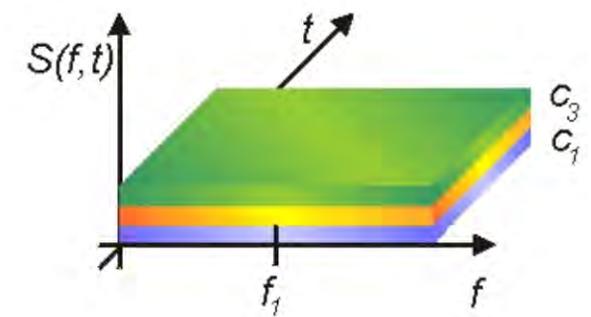
Organized Access with different frequencies for the different users

TDMA
Time Division
Multiple Access



Organized Access with time share between users

WCDMA
Wideband Code Division
Multiple Access

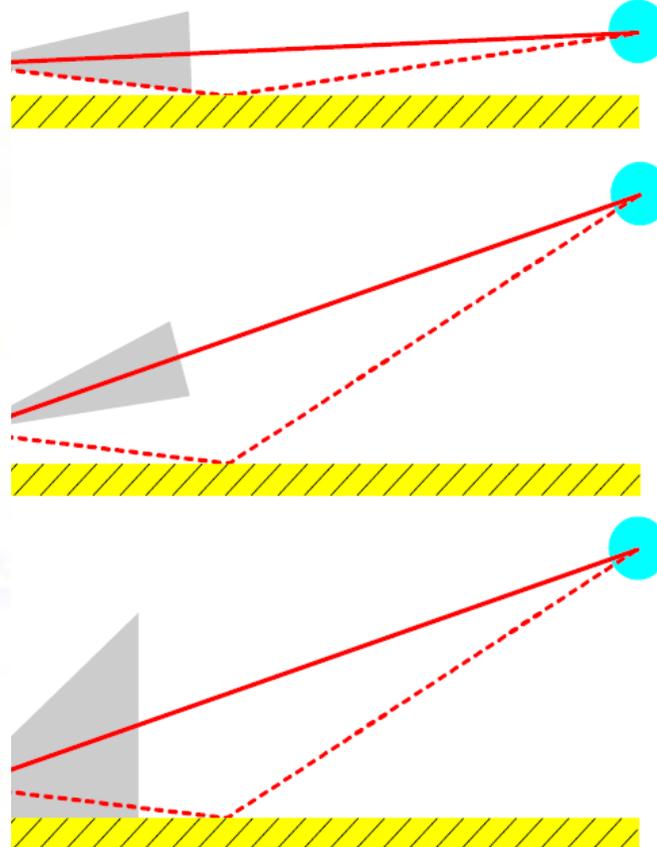
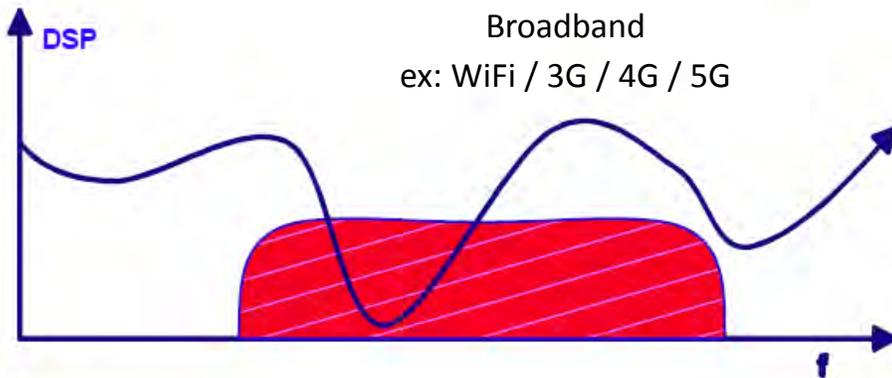
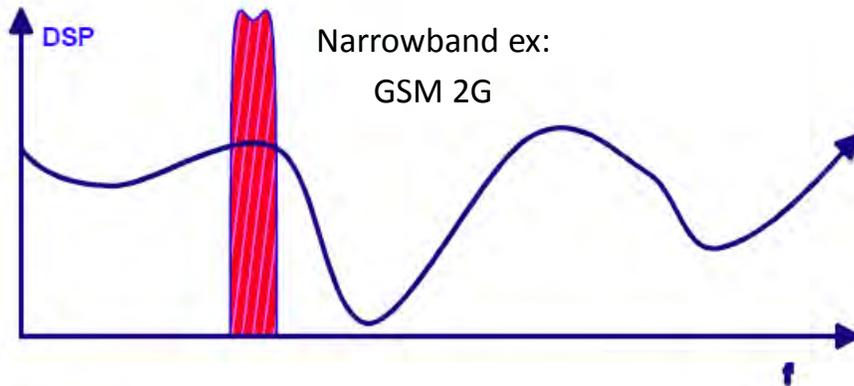
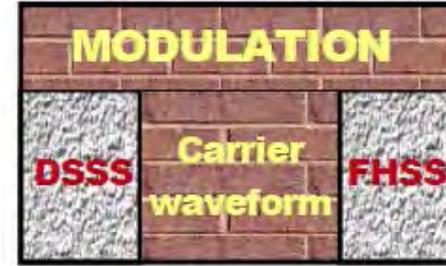


Organized Access with code division between users

Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation: OFDM



Cas 1
Longue portée point à point:
Sélectivité moyenne
origine atmosphérique

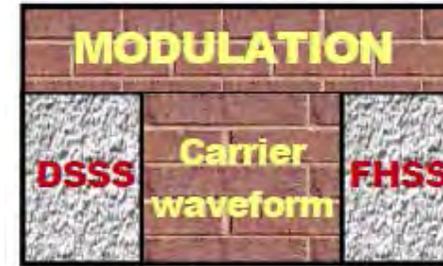
Cas 2
Courte portée point à point:
Pas de sélectivité

Cas 3
BROADCAST:
Sélectivité intense
origine réflexion du sol

Base Télécom

Chaîne de transmission

- Modulation: OFDM

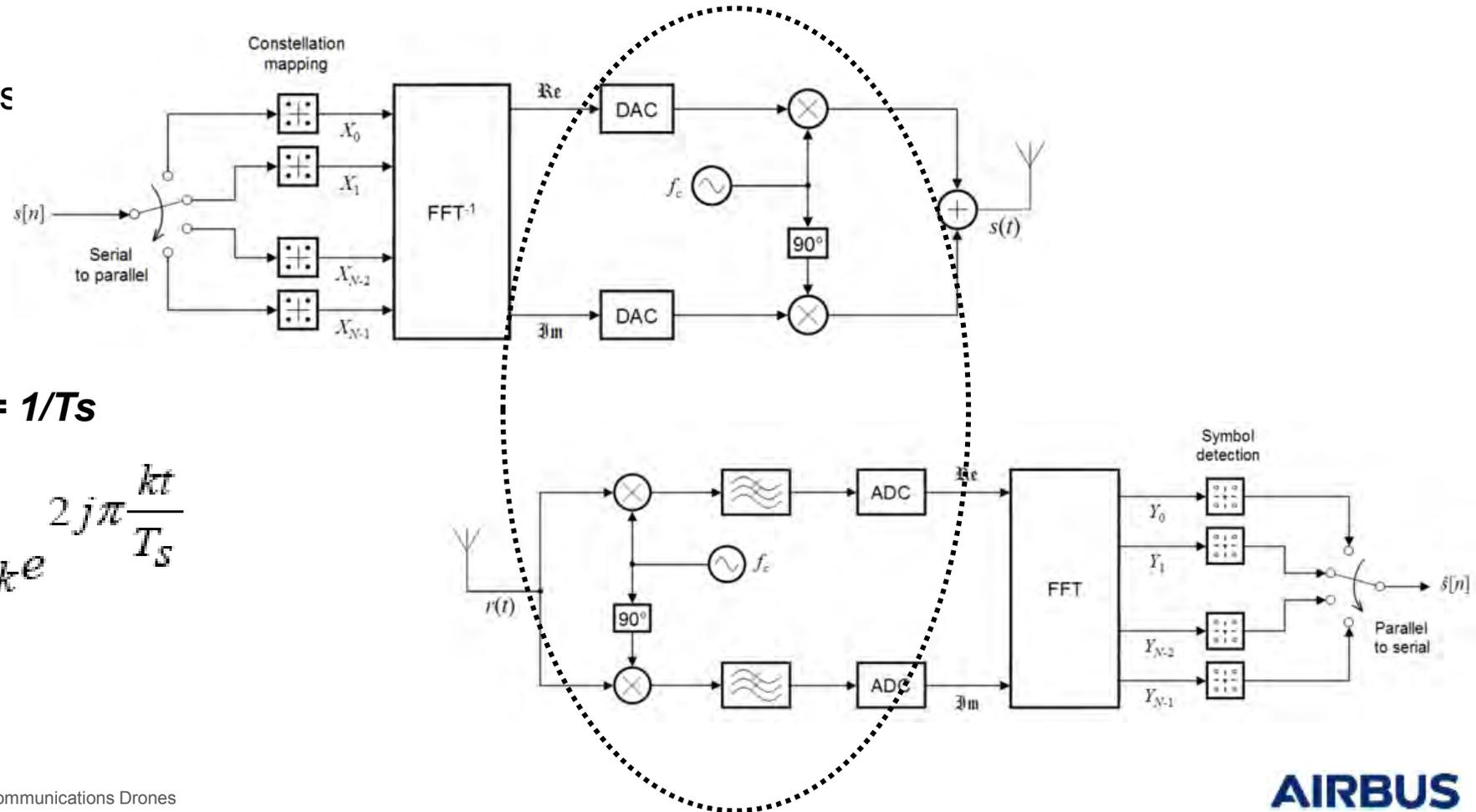


Somme de porteuses modulées

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi f_k t}$$

- Choix $f_k = f_0 + k\Delta f$ and $\Delta f = 1/T_s$

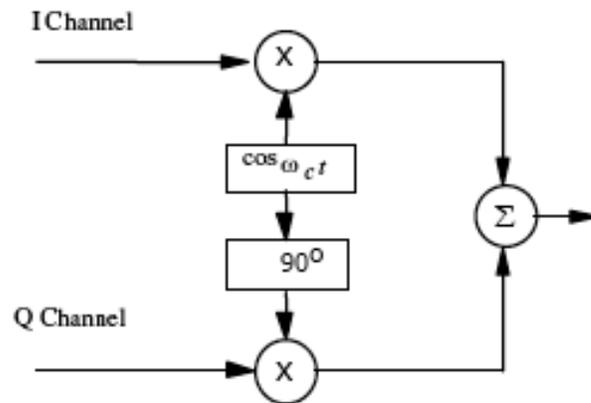
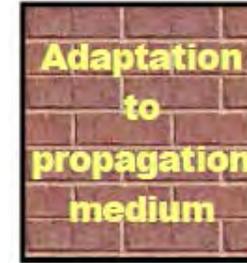
$$s(t) = e^{2j\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{2j\pi \frac{kt}{T_s}}$$



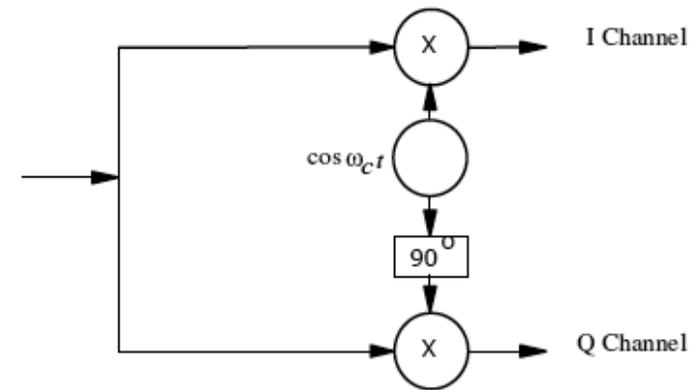
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Adaptation to propagation medium:
- Converts the electrical waveform to an electromagnetic wave by the mean of:
 - *Quadrature modulator / demodulator*



Quadrature Modulator

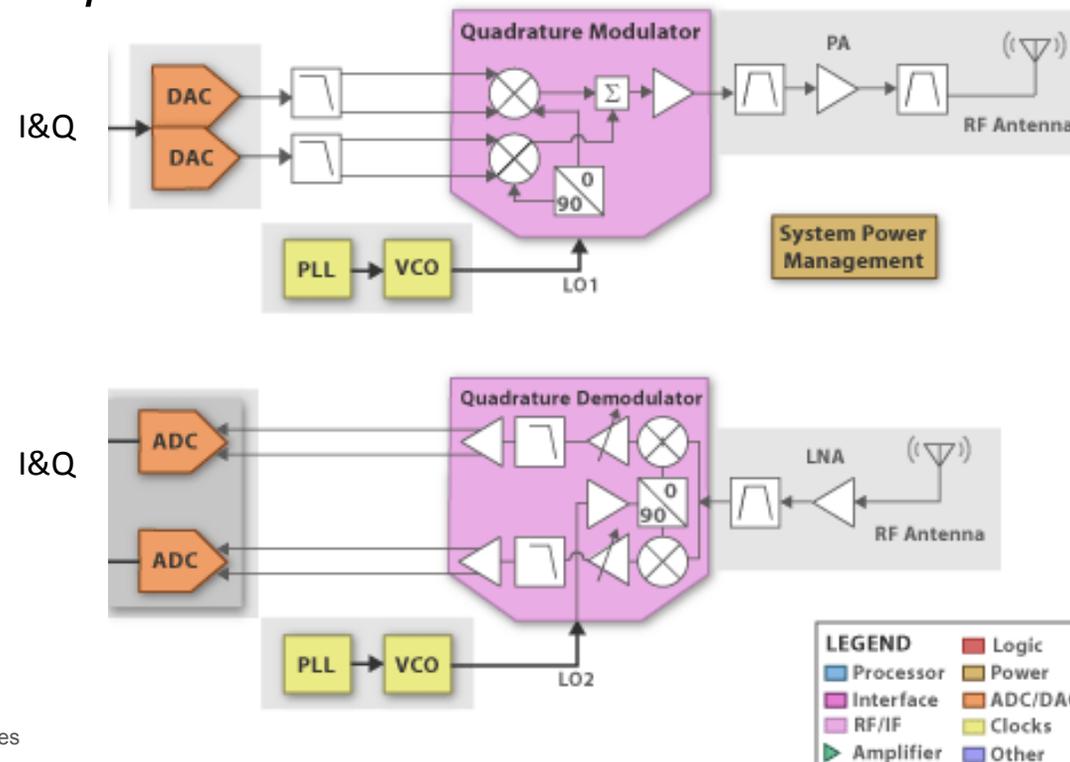
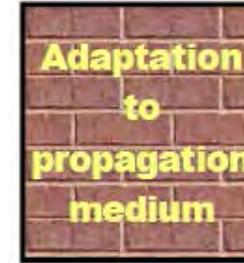


Quadrature Demodulator

Base Télécom

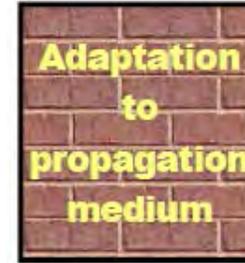
Chaîne de transmission

- Adaptation to propagation medium:
- Converts the electrical waveform to an electromagnetic wave by the mean of:
 - *Microwave electronics or Radio Frequency electronics*
 - *Antenna*

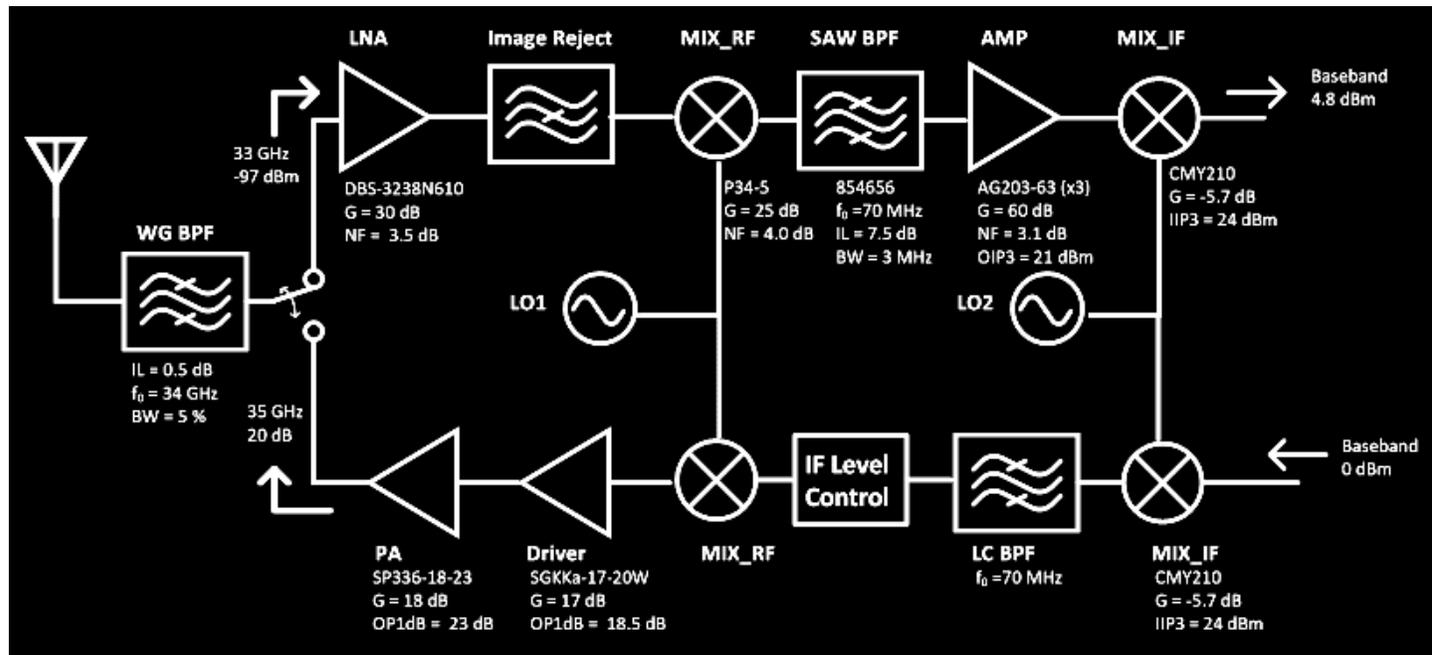


Base Télécom

Chaîne de transmission



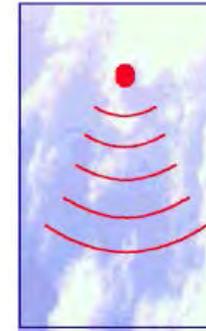
- Adaptation to propagation medium:
- Converts the electrical waveform to an electromagnetic wave by the mean of:
 - *Microwave electronics or Radio Frequency electronics*
 - *Antenna*



Base Télécom

Chaîne de transmission

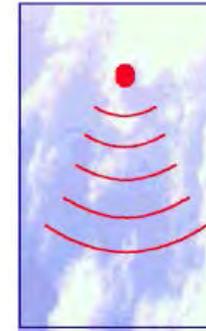
- Propagation medium or Channel:
- Space between the emitter and the receiver
- Home for a **link budget** !



$$P_{received} = P_{emitted} + Gain_{emission} + Gain_{reception} - Losses - PathLoss$$

Base Télécom

Chaîne de transmission



- Propagation medium or Channel: terminology
 - **BER** or Bit-Error Rate, for measurement of performance
 - **SNR** (S/N) or Signal to Noise Ratio: $SNR = (\text{Signal Power } S) / (\text{Noise Power } N)$

- **SINR** or Signal to Interferences + Noise Ratio:

$$SINR = (\text{Signal Power } S) / (\text{Noise Power } N + \text{Interferences Power } I)$$

- **E_b/N₀** or Energy per Bit to Noise power spectral Density & **E_s** or Energy per Symbol :

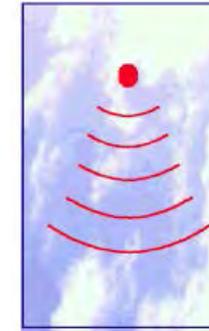
$$SNR = E_b / N_0 \cdot f_b / B \quad \& \quad E_s / N_0 = E_b / N_0 \log_2 M$$

- **B** is the channel bandwidth / **f_b** is the channel data rate
M is the number of modulation symbols

Base Télécom

Chaîne de transmission

- Propagation medium or Channel: link budget



Link Budget :

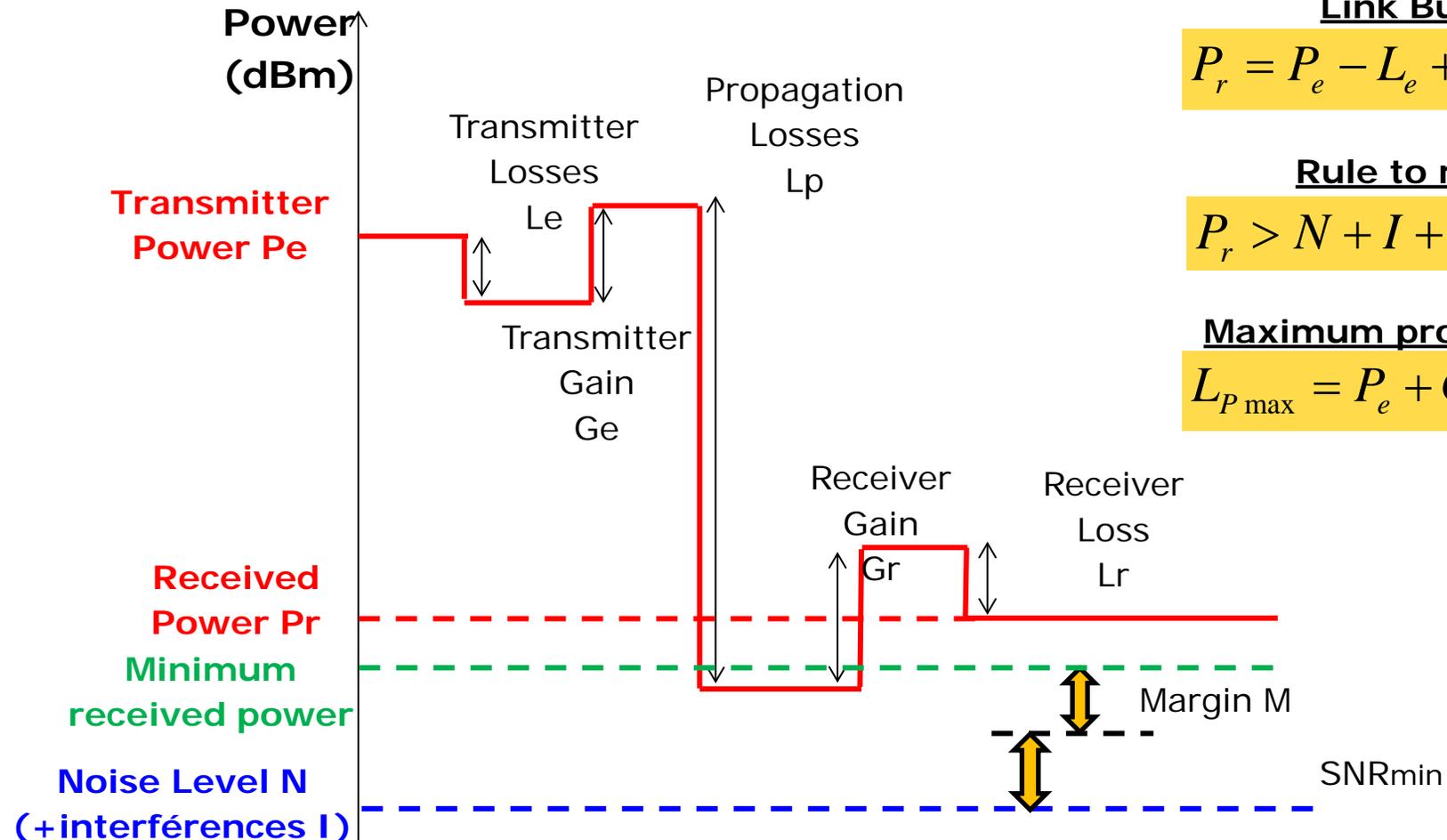
$$P_r = P_e - L_e + G_e - L_p + G_r - L_r$$

Rule to respect :

$$P_r > N + I + SNR_{min} + M$$

Maximum propagation losses :

$$L_{P_{max}} = P_e + G_e - L_e - P_{r_{min}} - L_r + G_r$$



→ Propagation

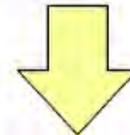
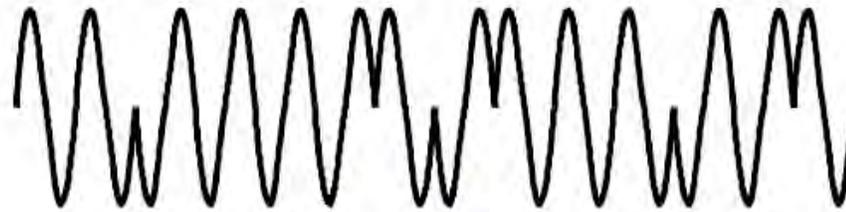
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Demodulation:
- Converts the signal on a carrier into an information signal



Modulated carrier



Modulation

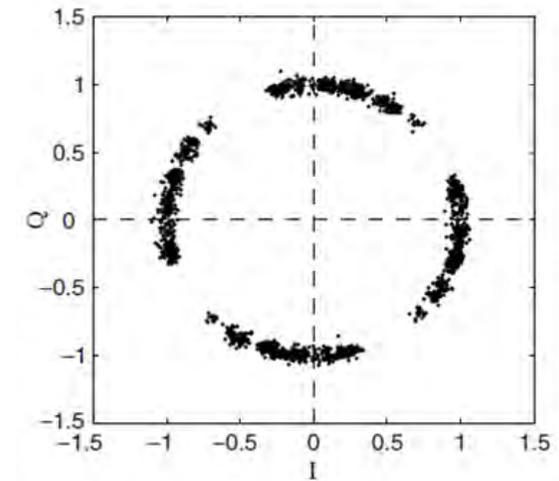
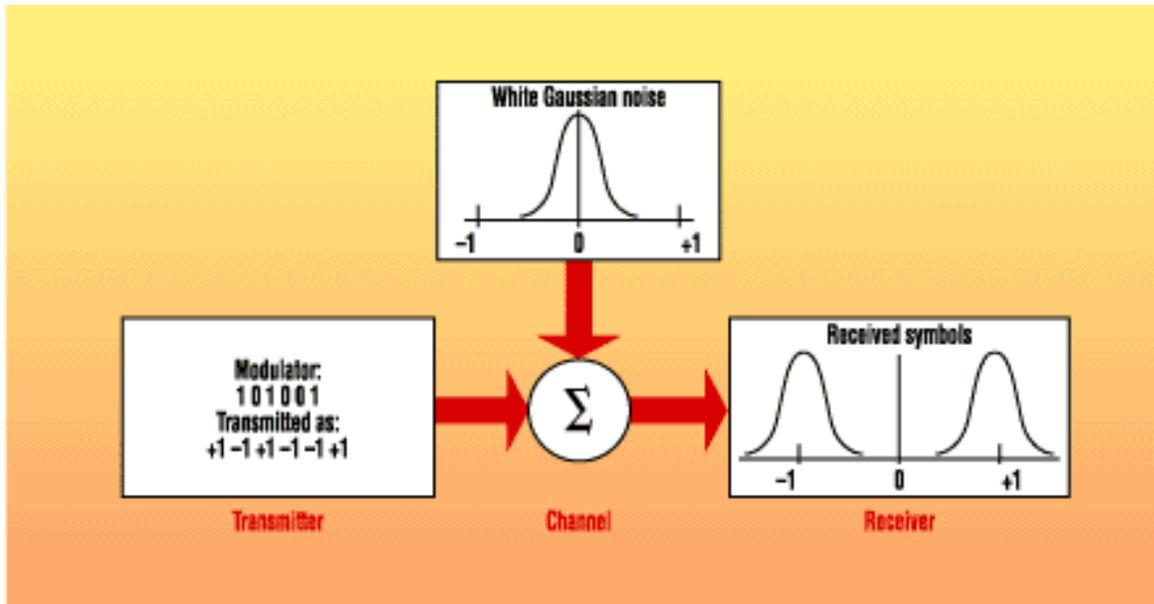


... But that is not so easy, as the propagation channel is the troublemaker in-between !

Base Télécom

Chaîne de transmission

- Demodulation:
- Apart the amplitude problem, the propagation channel introduces random phase shifts AND noise

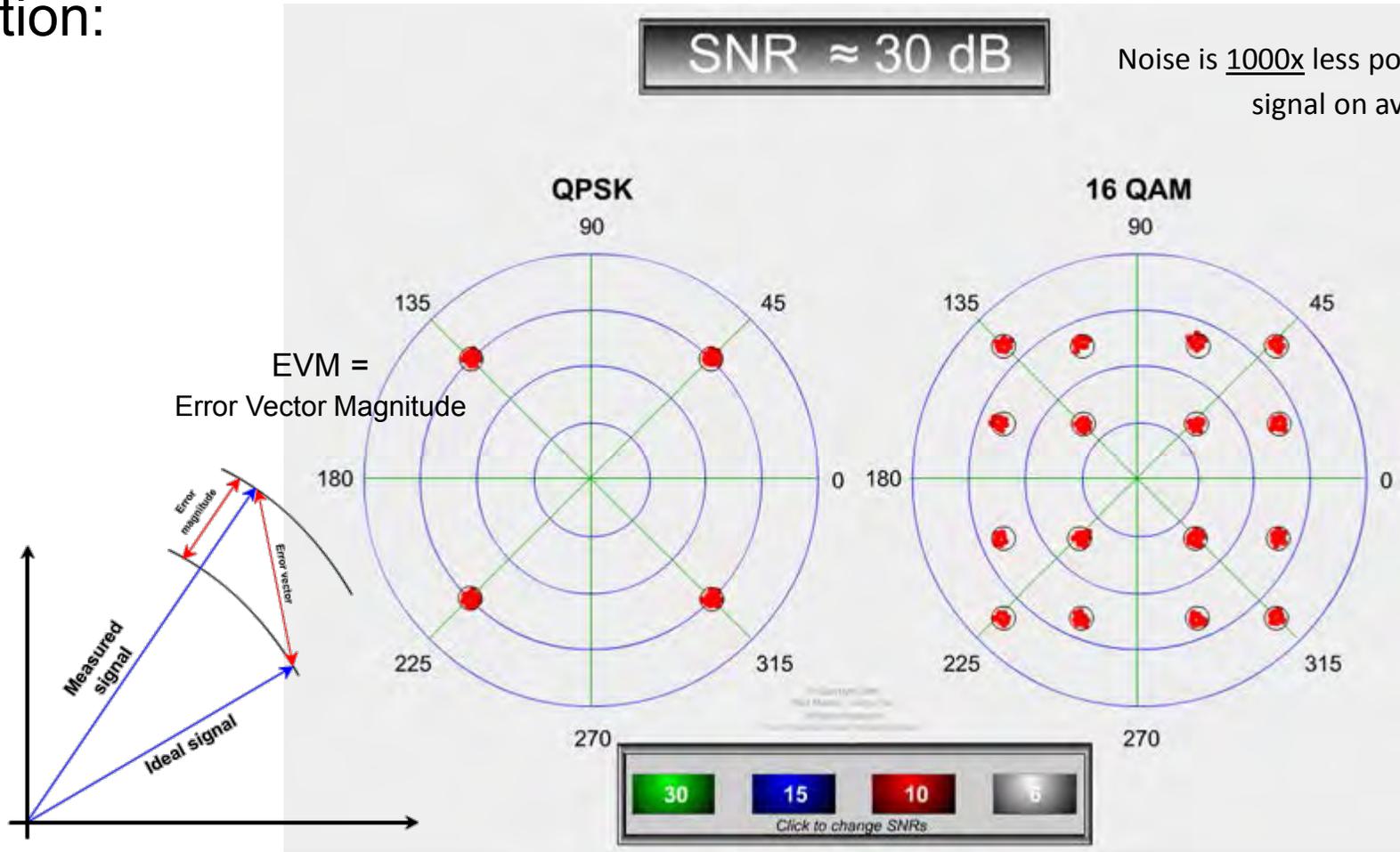


Effect of Phase Noise

Base Télécom

Chaîne de transmission

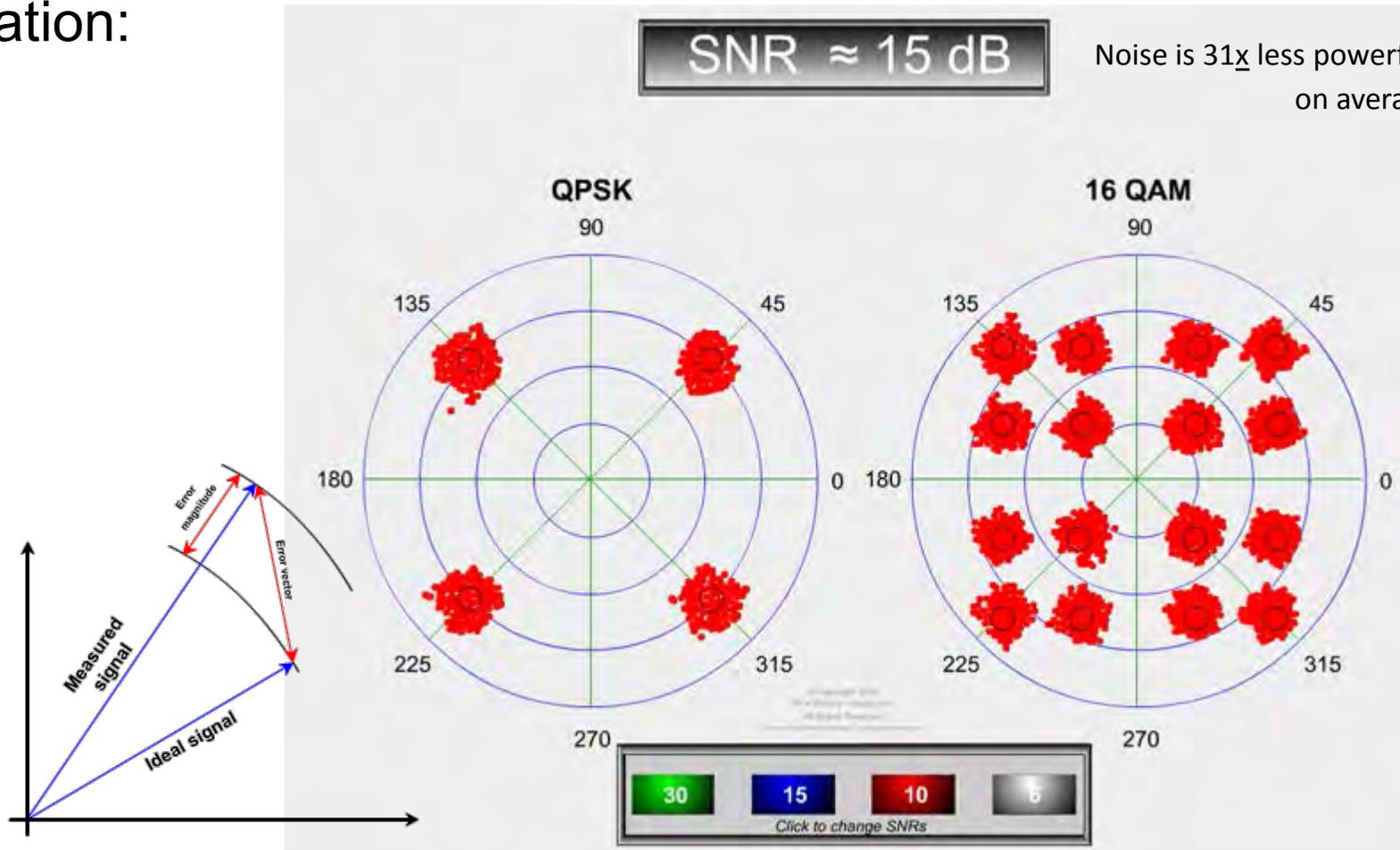
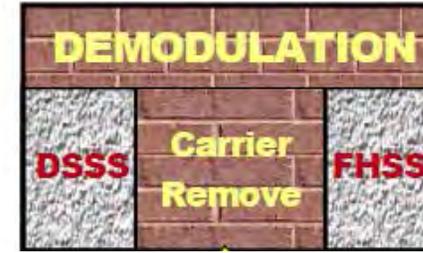
- Demodulation:



Base Télécom

Chaîne de transmission

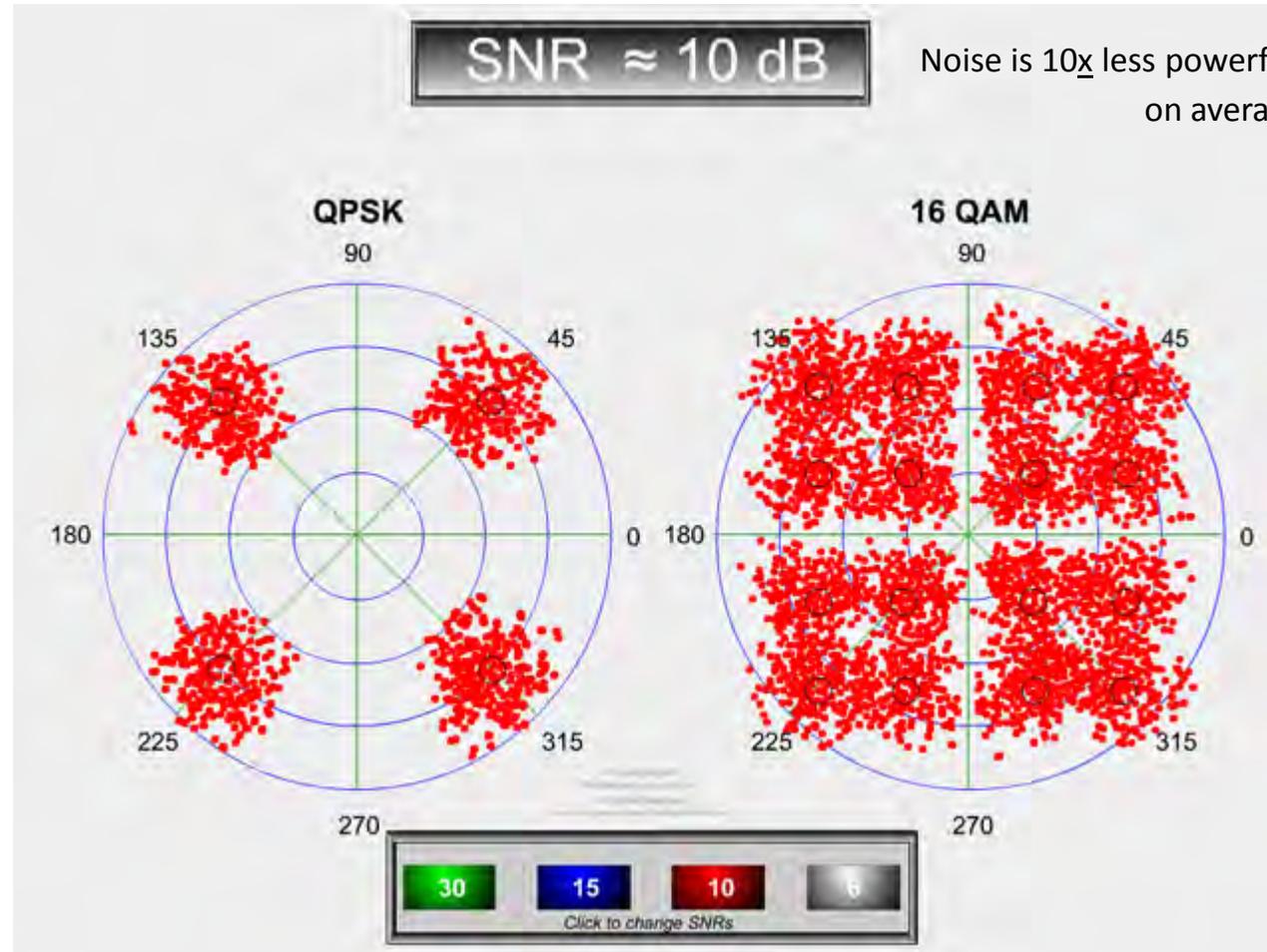
- Demodulation:



Base Télécom

Chaîne de transmission

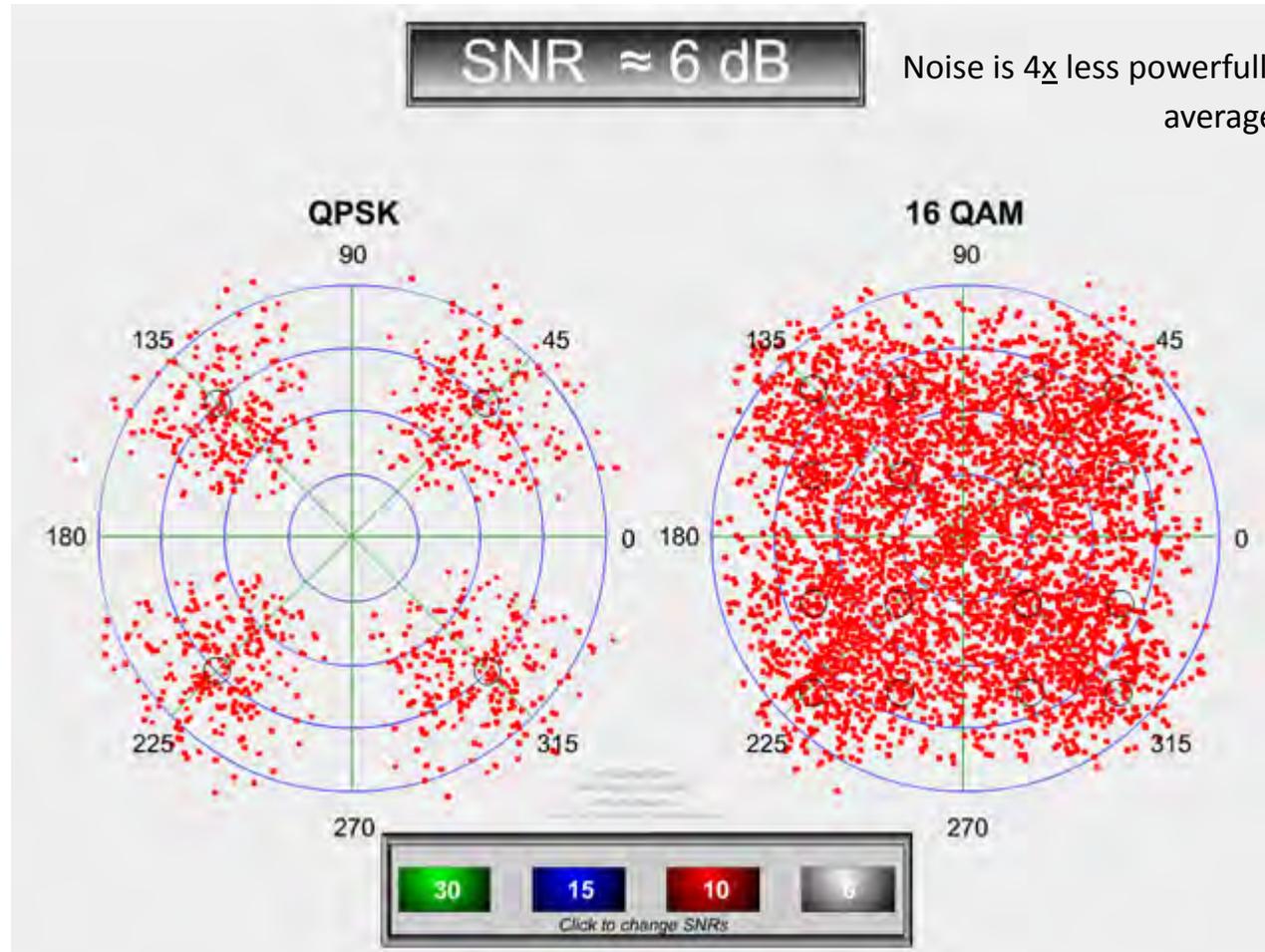
- Demodulation:



Base Télécom

Chaîne de transmission

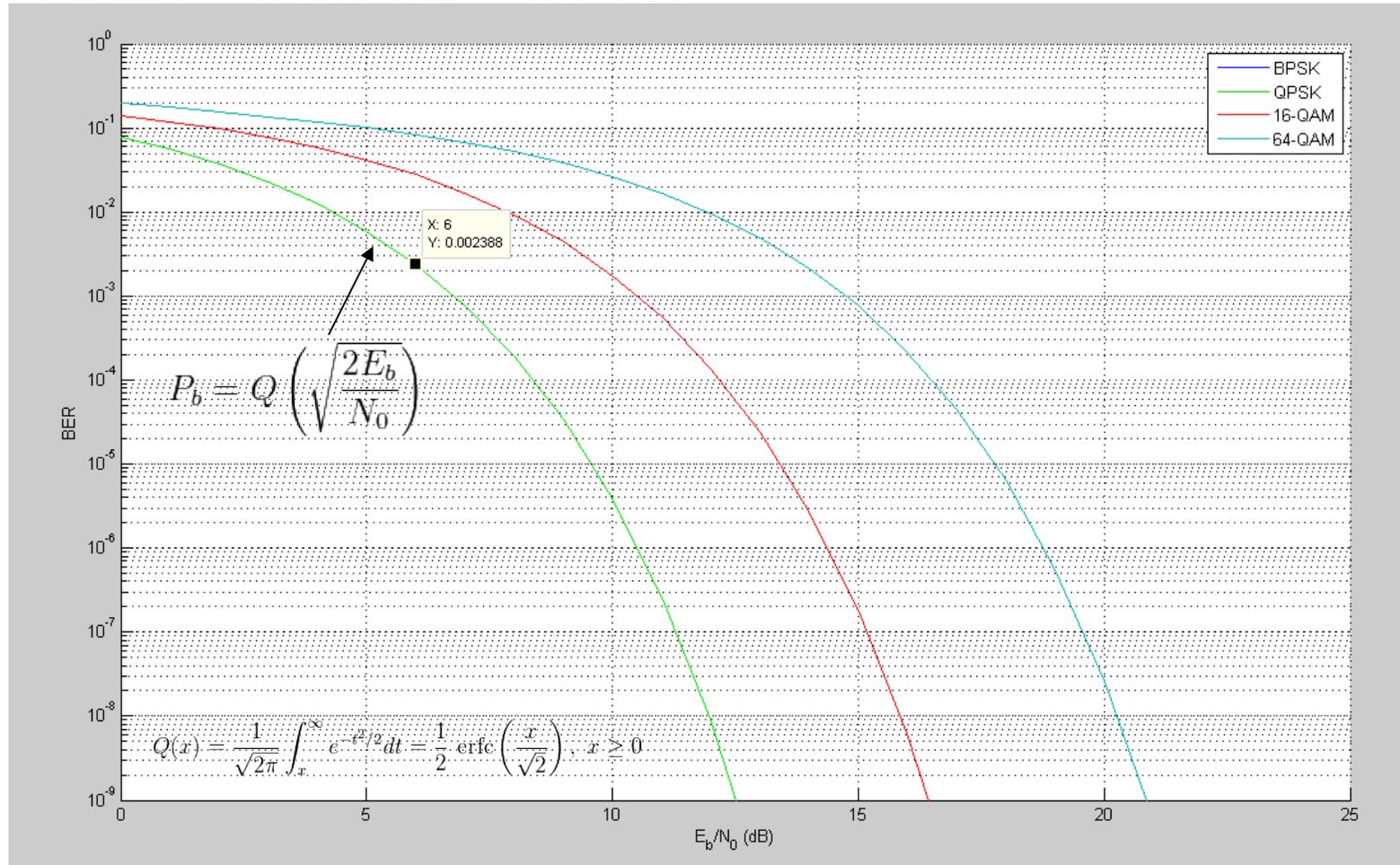
- Demodulation:



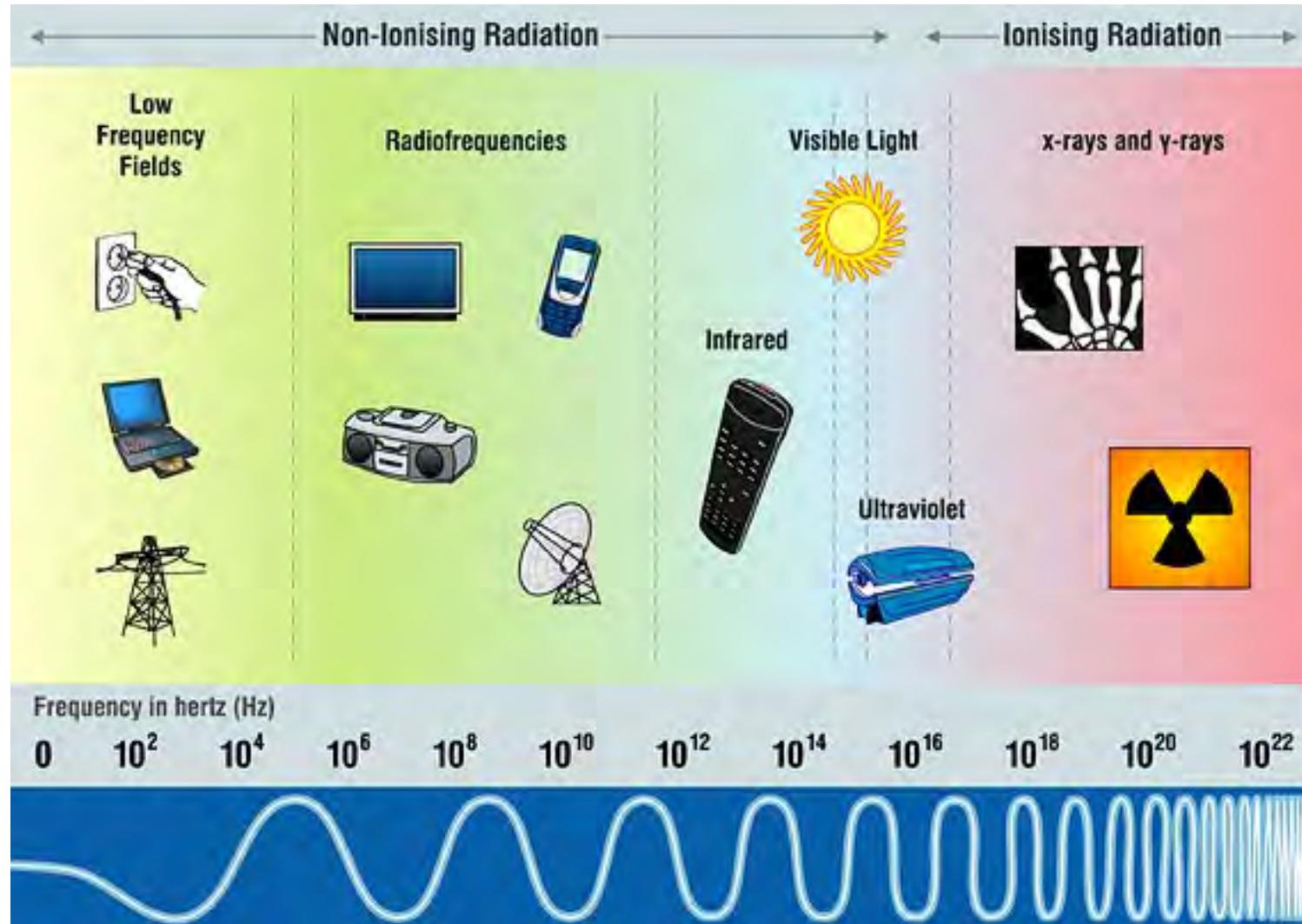
Base Télécom

Chaîne de transmission

- Demodulation: : BER « waterfall » curves

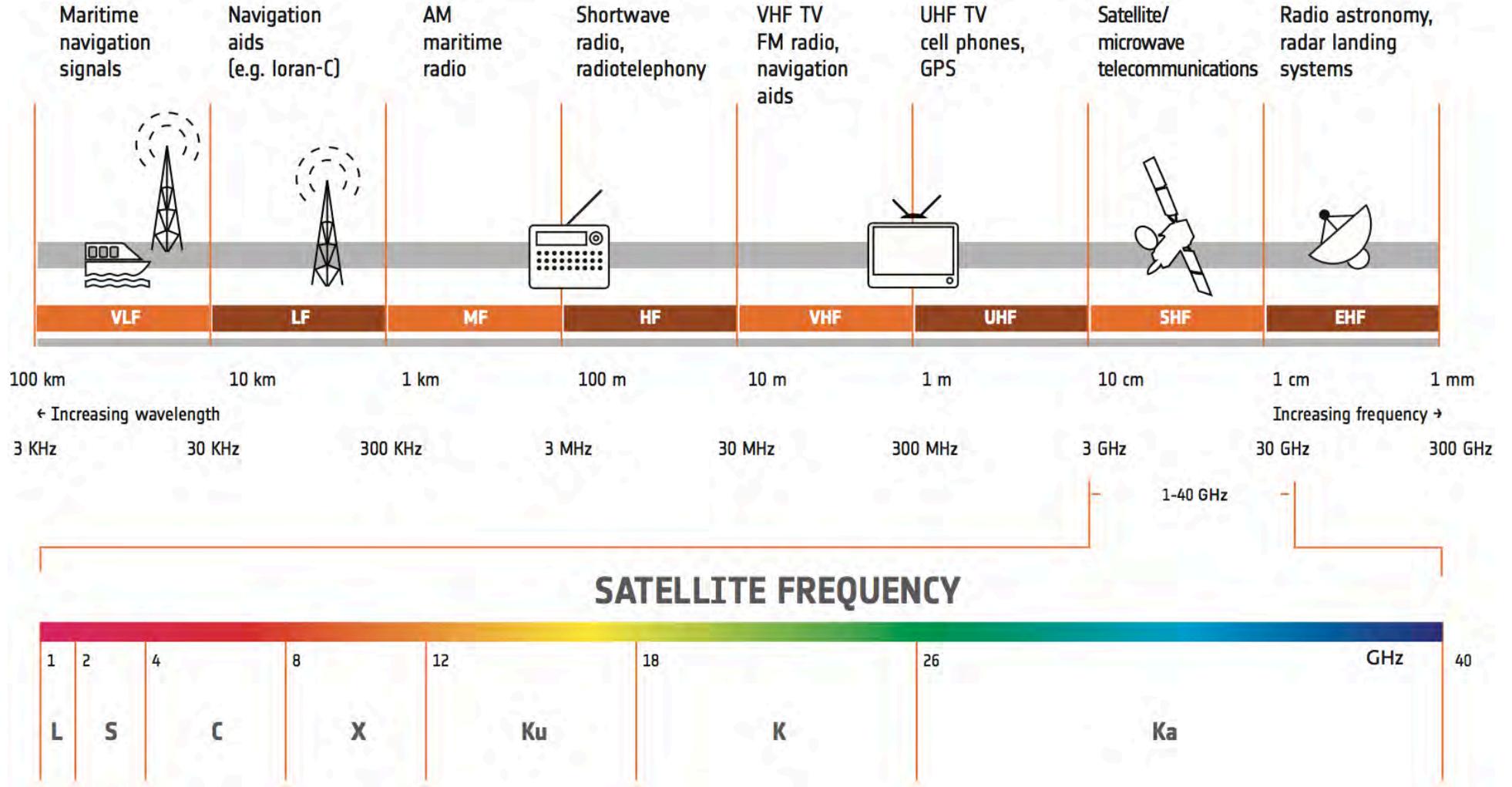


Base Télécom Fréquences



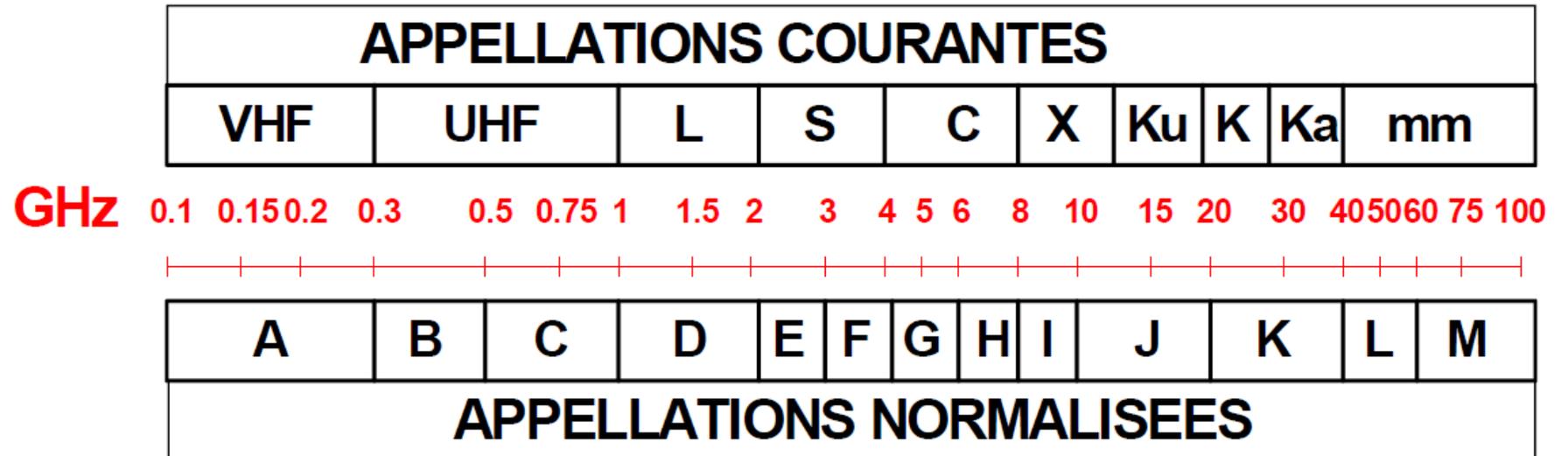
Base Télécom

Fréquences



Base Télécom

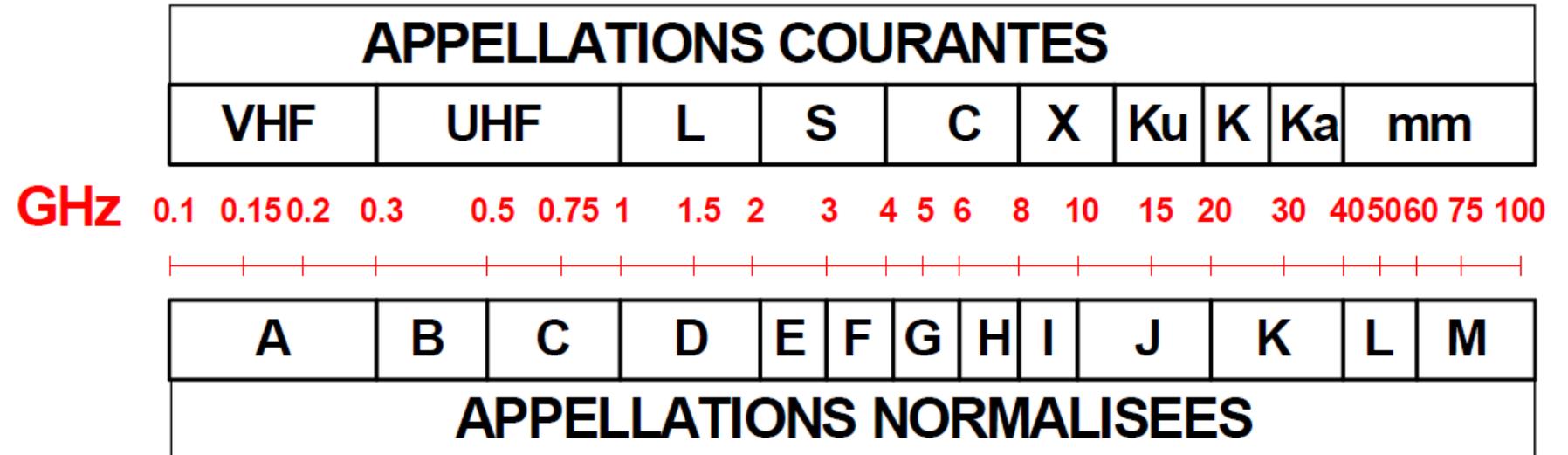
Fréquences



- Drones MIL:
 - STANAG 7085 & 4660 & 4606 (antibrouillage) pour les bandes réservées aux UAV (LOS)
 - X interdite en France
 - Ku 14,5-15,25 GHz autorisée en France

Base Télécom

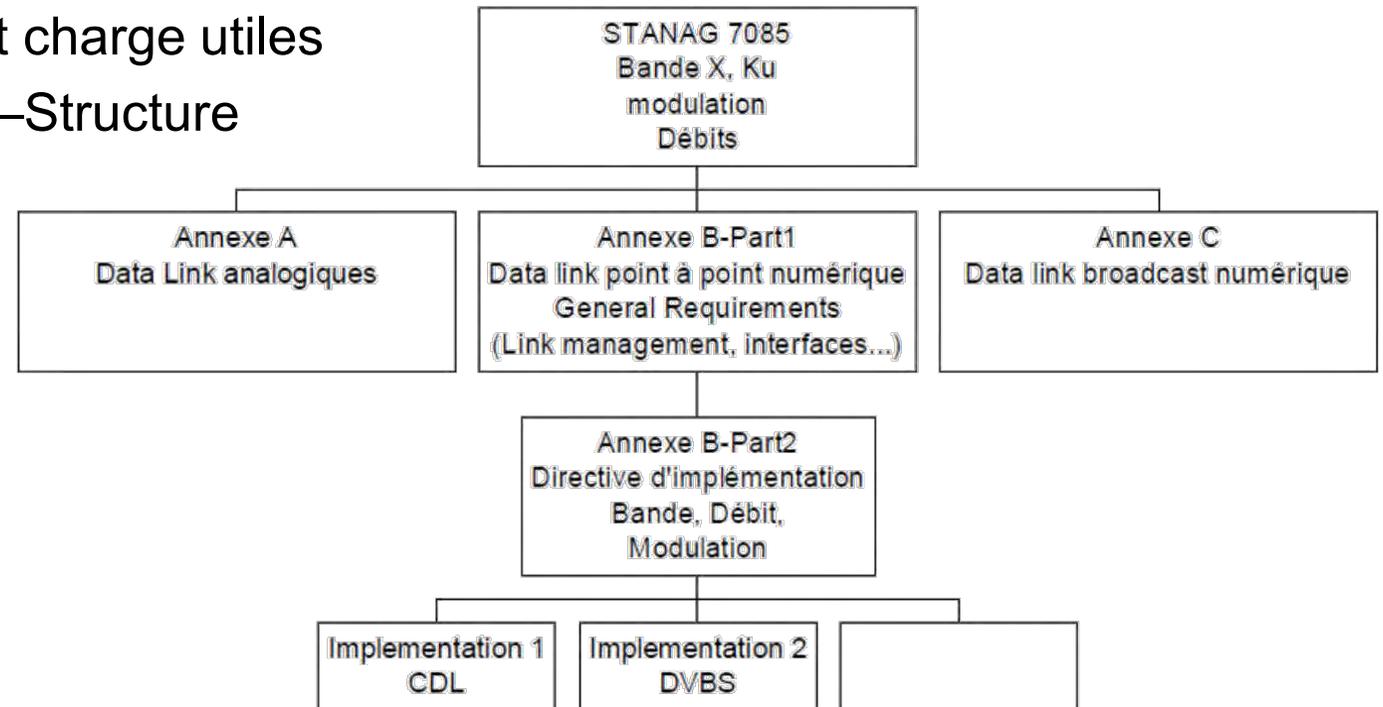
Fréquences



- Drones Civils: dépend du type de drone professionnel ou non (grand public)
 - **Professionnel:**
 - Bandes non licenciées et 5GHz (WRC-12) !
L'utilisation des technologies cellulaires (4G/5G) est à l'étude ...
 - **Grand Public:**
 - Bandes non licenciées (ISM 2,4GHz & 5,5GHz)

Base Télécom Normalisation

- Ex:
- STANAG 4586 : Architecture drone et charge utiles
- STANAG 7085 : Liaison de données –Structure



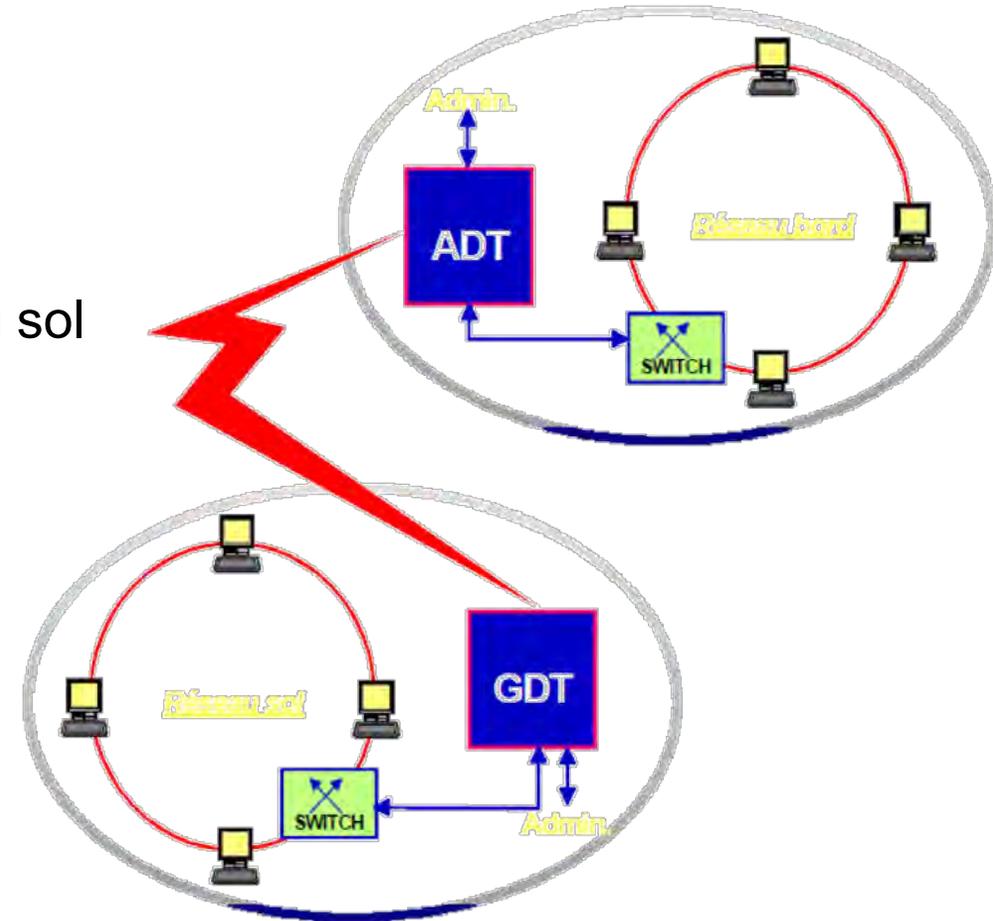
Base Télécom

Normalisation

- Le **STANAG 7085** définit la forme d'onde du canal descendant.
- Pas de convergence sur un mode unique au niveau mondial rendant difficile voire impossible l'interopérabilité.
- Plusieurs implémentations d'un mode minimal non compatibles:
 - Implémentation américaine «CDL»: OQPSK + Reed Solomon (10,7Mbps)
 - Implémentation Française: basée sur le standard DVBS (QPSK + Convolutionnel-Viterbi) (10,7Mbps)

Base Télécom Normalisation

- Tendances:
 - Réutilisation de l'acquis **IP** du monde civil.
 - Interopérabilité au niveau 3 très facile.
 - Organisation en réseau des parties embarquées et au sol



Base Télécom Modems

- Exemples:
- Drone loisir moyenne gamme

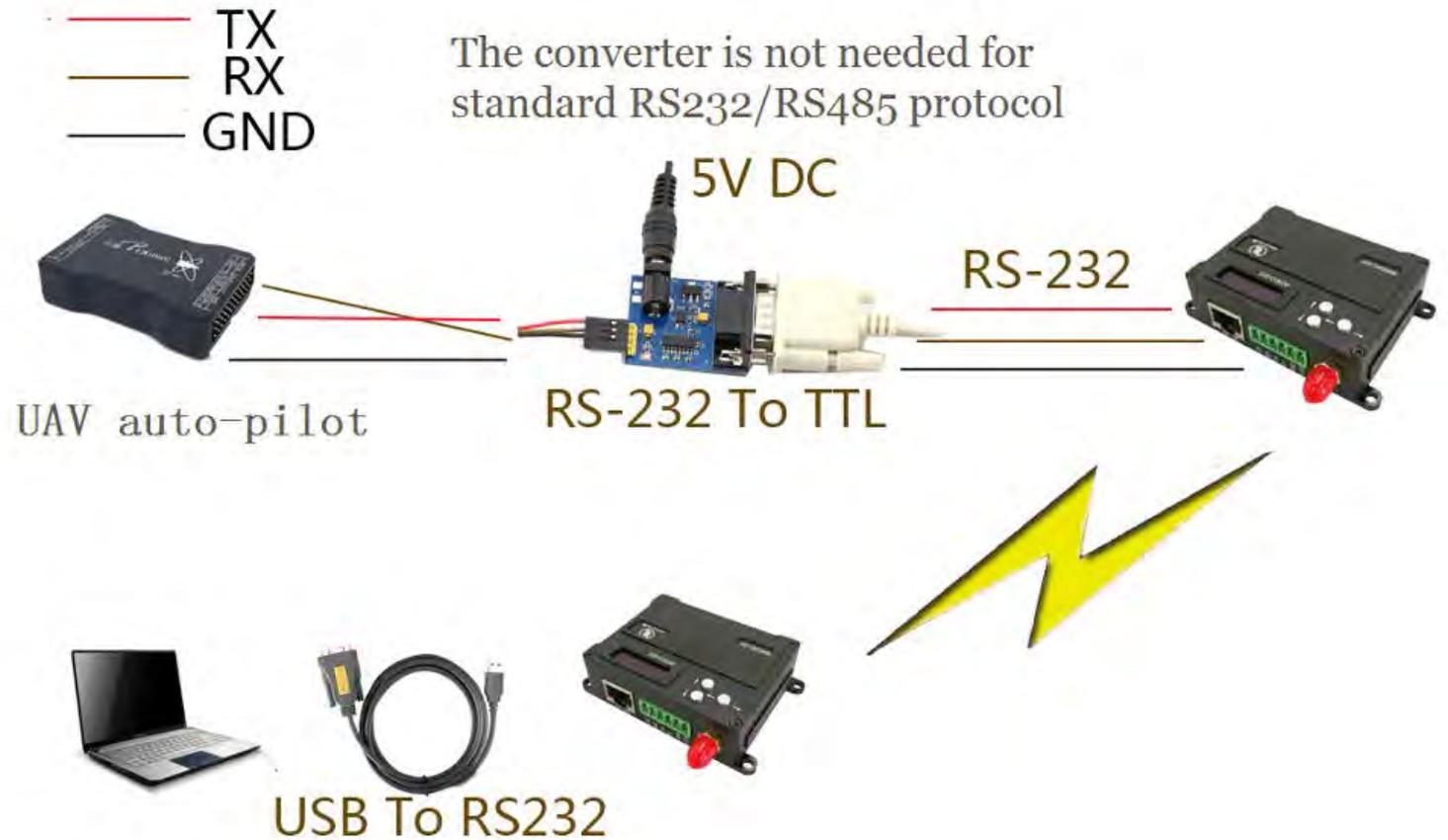


Base Télécom Modems

- Exemples:
- Drone loisir haut de gamme
- Portée <2 km

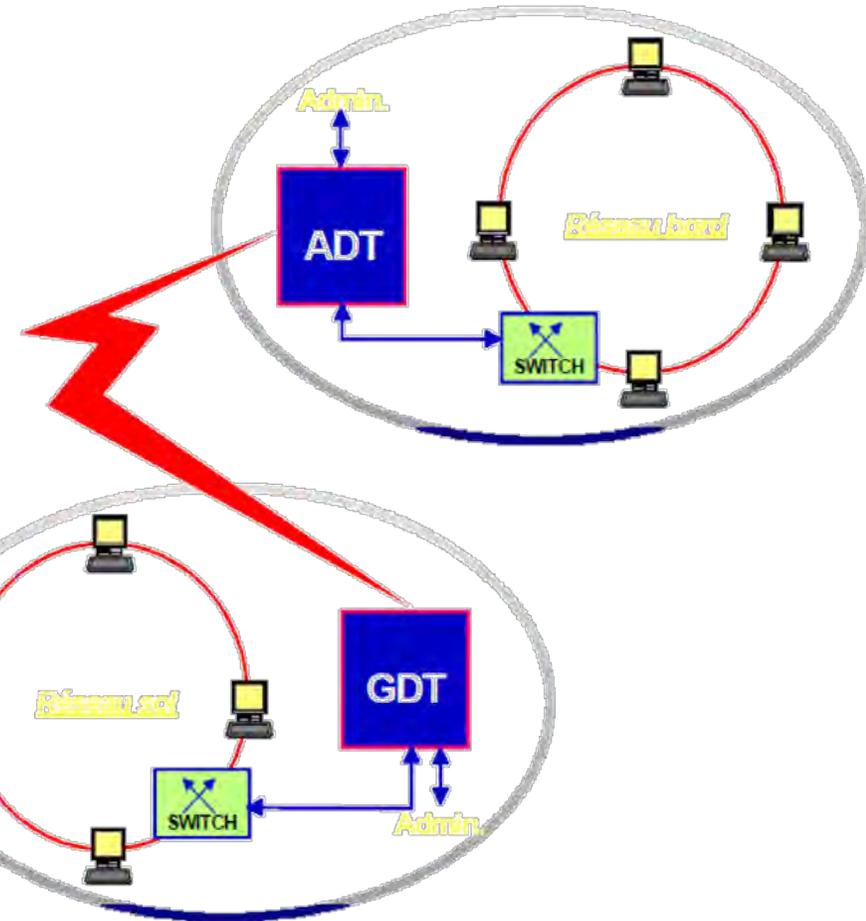


MAVLINK



Base Télécom Modems

- Exemples:
- Drone env. 25kg
- Portée 1-50km



Base Télécom Modems

- Exemples:
- Drone militaires €€€



Base Télécom Modems

- Exemples:
- Drone militaires €€€

General

- **Waveform** Mobile Networked MIMO (MN-MIMO™)
- **Modulation** C-OFDM; BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
- **Channel Bandwidth** 5, 10 & 20 MHz (1.25*, 2.5*)
- **Encryption** DES Standard, AES 128/256 Optional (FIPS 140-2)
- **Frequency Stability** 1 PPM over temp -40° - +85° C
- **Tuning Step Size** 1 KHz
- **Data Rates** Max 85 Mbps UDP & 70 Mbps TCP
- **Error Correction** 1/2, 2/3, 3/4, 5/6
- **MIMO Diversity** 2x2
- **MIMO Techniques** Spatial Multiplexing, Space-Time Coding, Eigen Beam Forming
- **No. of Spatial Streams** 1-2
- **No. of Antennas** 2
- **Total Power Output** 10mW – 500mW (variable)

Performance

- **Latency** 7 ms average (20MHz BW)
- **Sensitivity** Varies with MCS index and BW
Maximum = -99 dBm (5 MHz BW, MCS 0)
- **Frequency Bands** Dual Band; Bands from 400MHz to 6GHz Available

Low Band		High Band	
Band (Freq. Code)	Frequency Range	Band (Freq. Code)	Frequency Range
UHF (042)	400-450	Low C Band (455)	4400-4700
ISM 900 (091)	902-928	High C Band (485)	4700-5000
L Band (137)	1350-1390	5.2GHz ISM (520)	5150-5250
Broadcast A (209)	1980-2200	5.8GHz ISM (580)	5725-5875
Broadcast B (206)	2025-2110		
Federal 'S' (225)	2200-2300		
Federal 'S' +	2200-2500		
2.4GHz ISM (235)			
2.4GHz ISM (245)	2400-2500		

Environmental

- | | | |
|---|--|-----------------------------|
| | Standard Temperature | Extended Temperature |
| • Ambient Temp. | -40° - +55° C | -40° - +65° C |
| • IP Rating (Ingress Protection) | IP-67 (Dust / Immersion in water up to 1m) * | |
| | *Must have all connectors mated and use IP67 or better cables/antennas | |

Mechanical - Chassis

In addition to the physical system package described here, Silvus offers the core board-stack for integration into an OEM product

- | | | |
|------------------------|--|-----------------------------|
| | Standard Temperature | Extended Temperature |
| • Dimensions | 4.4" x 3.4" x 1.3" | 4.4" x 3.4" x 2.0" |
| • Weight | 1.0 Pounds | 1.2 Pounds |
| • Color Options | a. Black anodized
b. FED-STD-595B-34094 (Green 383) | |
| • Mounting | 4-hole mounting patterns (Through-hole) | |



Base Télécom Modems

- Exemples:
- Drone militaires €€€

- Débit maximal 12 Mbps utiles.
- Antennes mobiles embarquées :
 - > Hélice, Quadrifilaire
 - > Zeppelin
- Puissance 30 dBm
- Service -40° à + 85° ambiant
- Alimentation 7 - 17 VDC
- Consommation 6 watts
- Fréquences OEM : 902-928MHz/2304-2364MHz/5.0-5.8GHz
- Fréquences Standard 2405/2470 MHz



* Portée selon les antennes utilisées



Base Télécom Modems

- Exemples:
- Drone militaires €€€

- **Emetteur Récepteur IP TDD COFDM** ultra léger en boîtier aluminium usiné.
- **Full Duplex** transmet et reçoit de la vidéo HD ou SD en H264 et des data.
- Configuration du menu pour opérations en temps réel avec préréglages.
- Hautes performances de la modulation COFDM et de la polarisation RHCP
- Longue portée sans pointage d'antennes (Quadrifilaires Omnidirectionnelles)
- Récepteurs Emetteurs multiples en PMPT et monitoring selon les applications.
- Fonctionne en mode non à vue en mobiles à haute vitesse de déplacement .



HYC-540 est intégré en Région Languedoc Roussillon -CEE-
 Hypercable -Innoeuem -74 Avenue Paul Sabatier-11100 NARBONNE
www.hypercable.fr
info@hypercable.fr

Hypercable
 Telecommunications & Broadcast

Fréquences: 2405 – 2470 MHz (Autres sur demande)
Puissance: 30 dBm – 1 watt
Seuil de sensibilité: -99 dBm
Alimentation: 7/17 VDC 6 watts
Modulation: COFDM Time Division Duplex mode
Canaux: 4 ou 8 MHz au pas de 1 MHz
Canaux: 4 et 8 MHz au pas de 1 MHz
Ethernet: 10/100 BaseT Auto-MDI/X IEEE 802.3 TCP ,
 UDP,TCP/IP,TFTP,ARP,ICMP,DHCP,HTTP,SNMP,FTP,DNS
Encryption: AES 128 bit et AES 256 bits
Correction d'erreurs: CRC-ARQ 32 bits
Température de service: -40° +85° C
Dimensions poids: 75x51x22 mm 120 grammes
Réglages: écran de contrôle OLCD

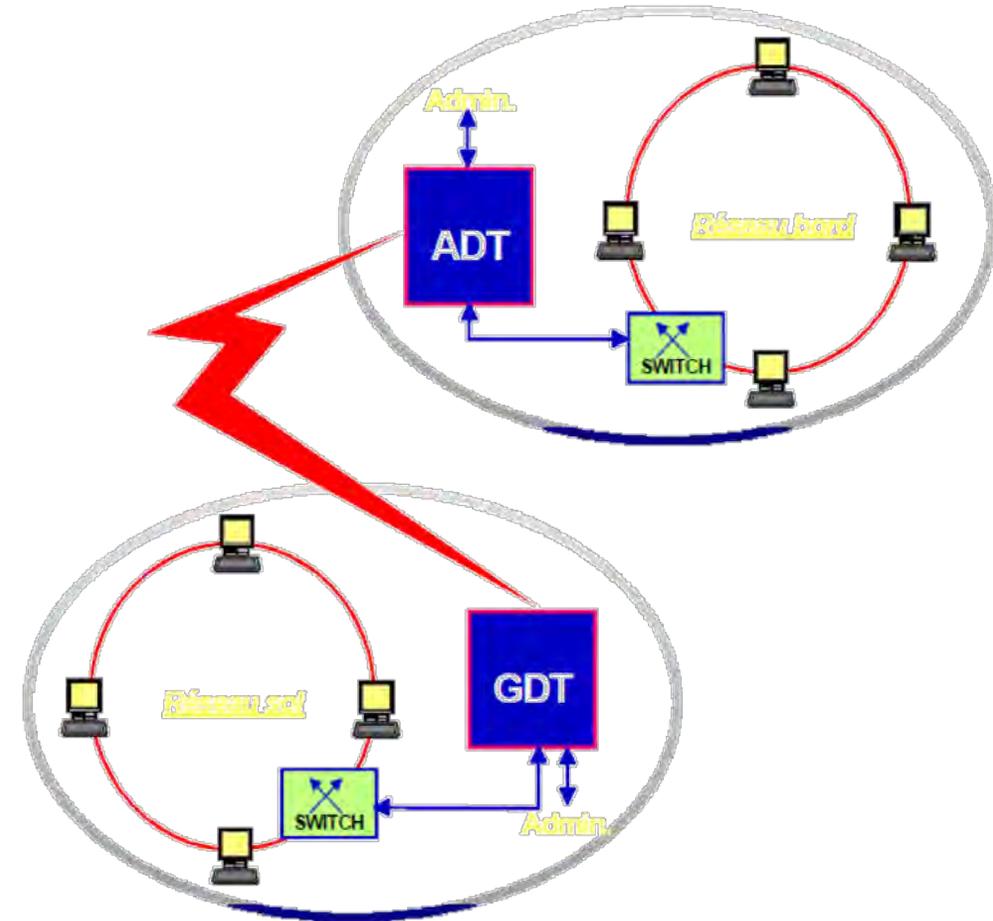
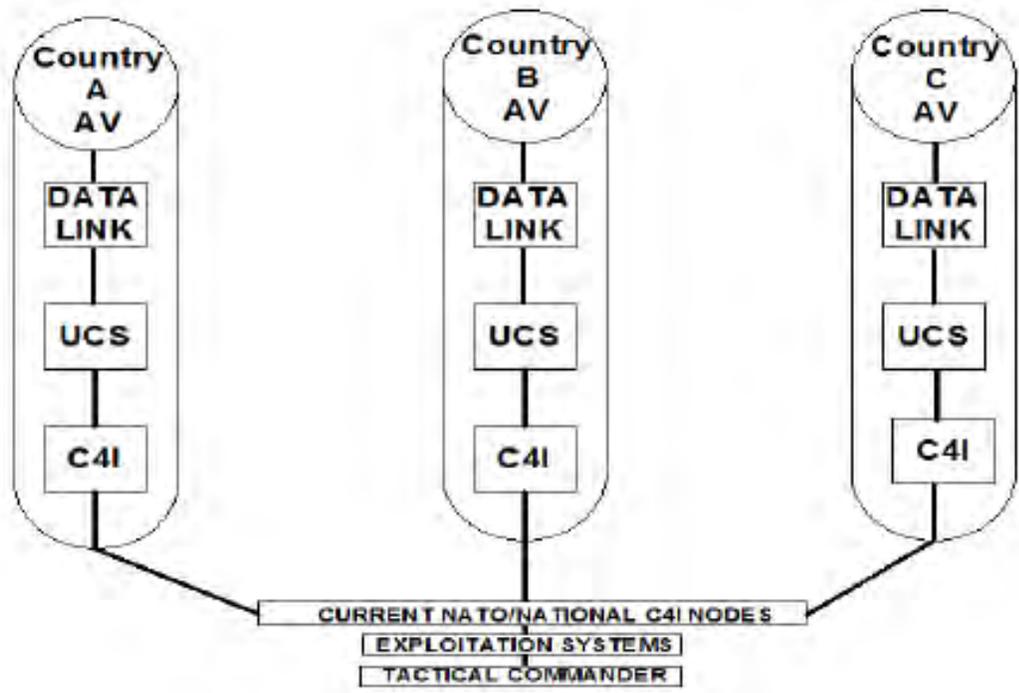
Product features:

- Provide up to 12Mbps data stream, dynamic adaptive rate allocation technology
- Support transparent PMPT network technology
- Support for non line of sight (NLOS) ,high-speed mobile transmission
- Provide standard RS-232&RS-485 + RJ45
- Support high standard industrial applications
- Small volume, light weight, easy to carry, fin type aluminum chassis
- High definition OLED panel digital display, simple interface and easy to operation

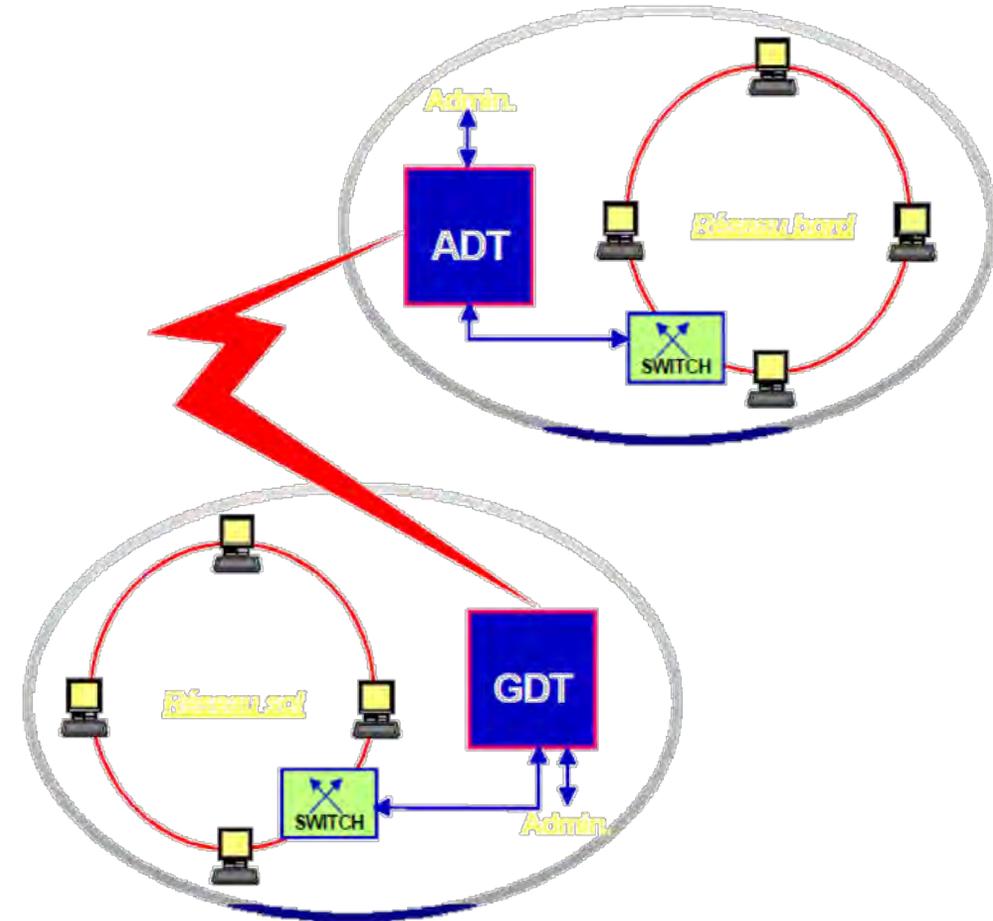
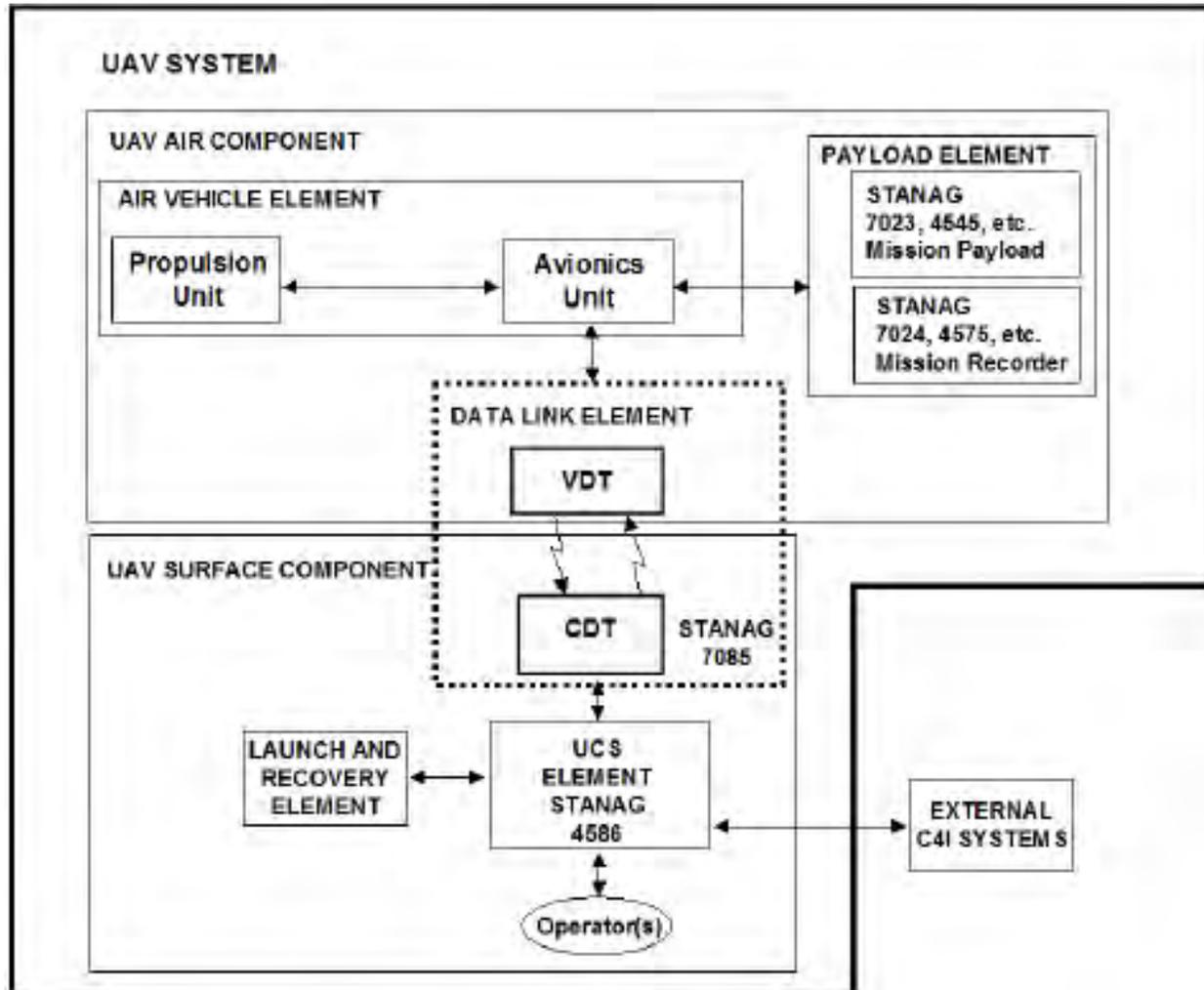
Sommaire

- Introduction
- Missions & technologies
 - Drones civils
 - Drones militaires
- Éléments de Base en Télécom / technique
 - Propagation
 - Chaîne Télécom
 - Fréquences
 - Normalisation
 - Modems
- **Architecture**
- Menaces
- Sécurisation / Protection contre le brouillage
- Conclusion / discussions

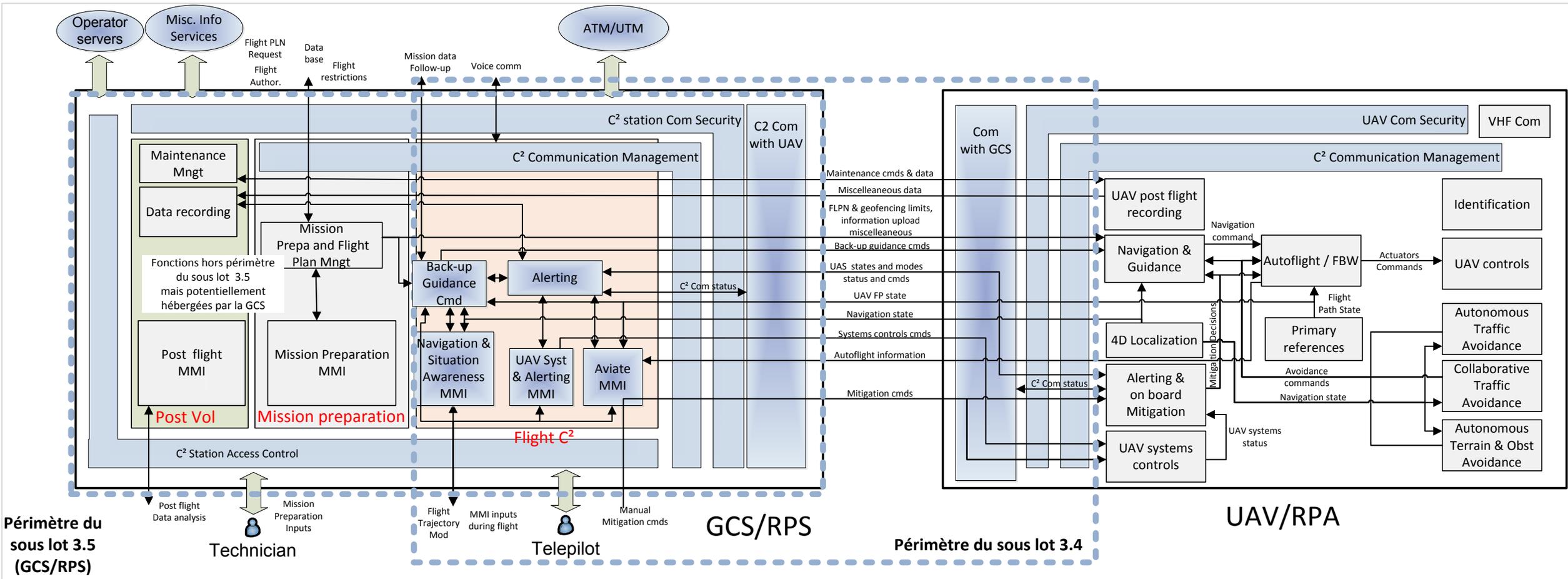
Architecture



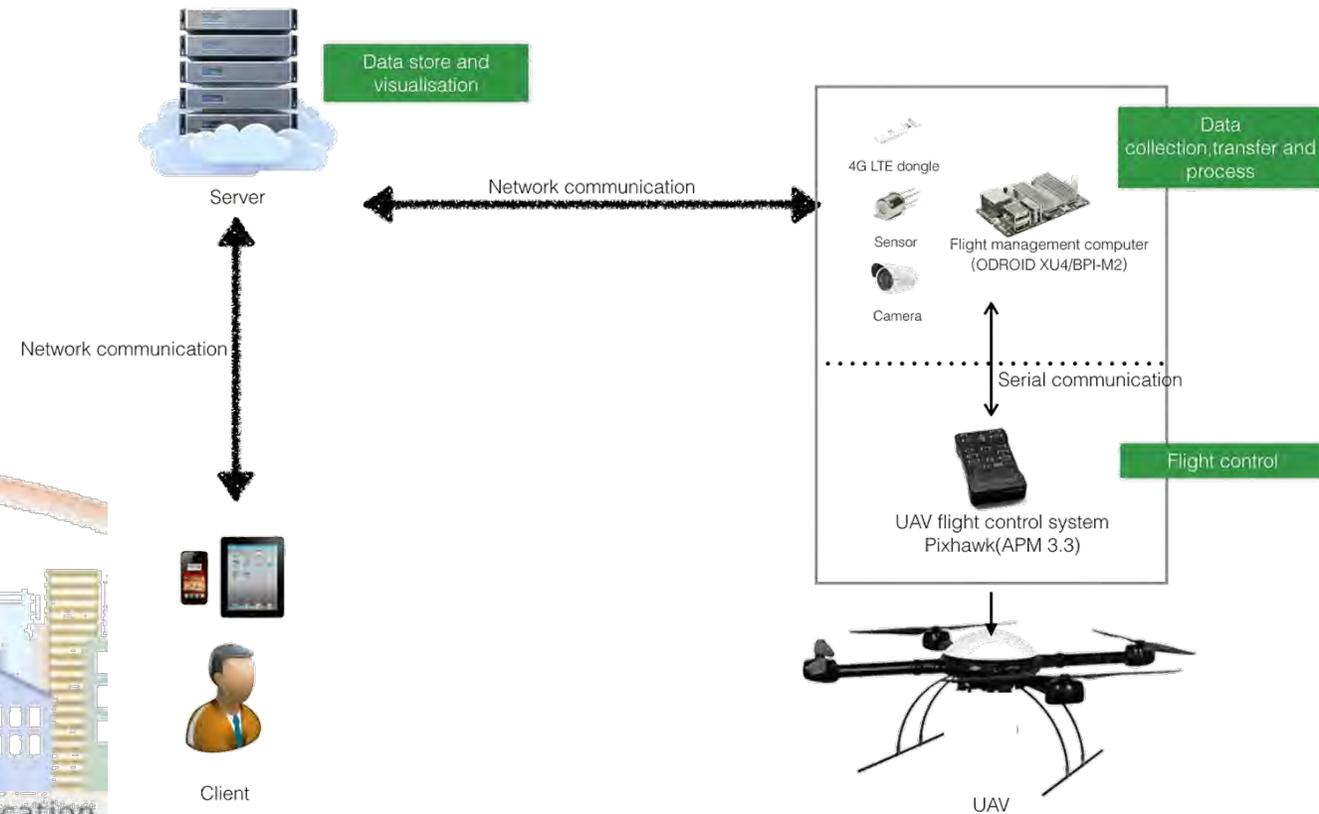
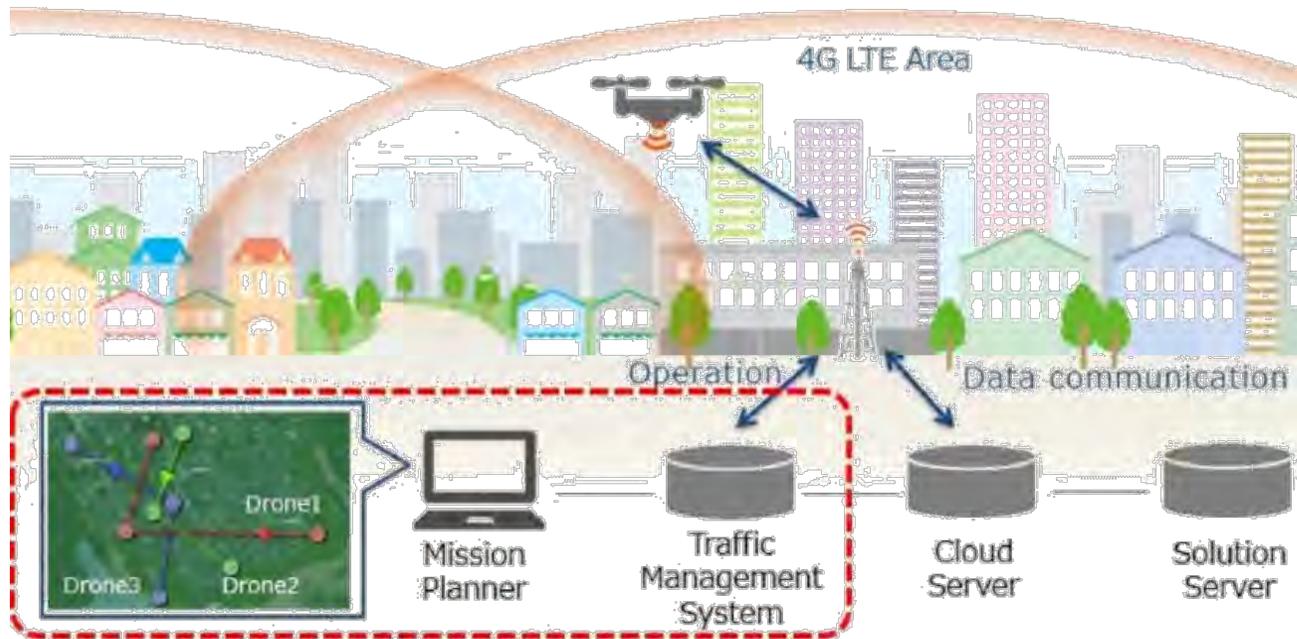
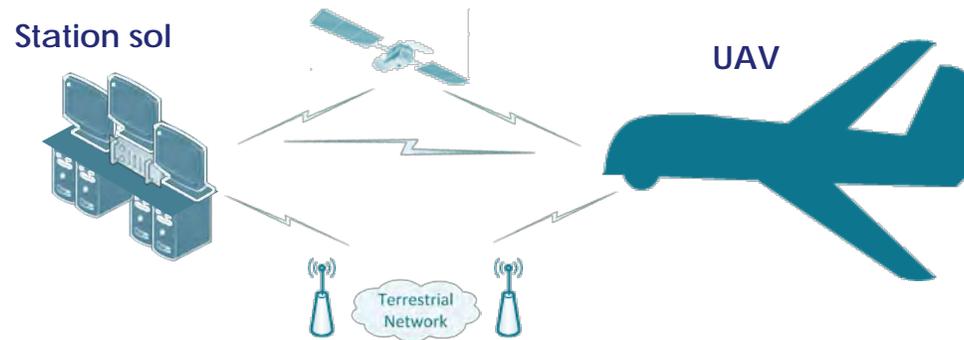
Architecture



Architecture



Architecture



Sommaire

- Introduction
- Missions & technologies
 - Drones civils
 - Drones militaires
- Éléments de Base en Télécom / technique
 - Propagation
 - Chaîne Télécom
 - Fréquences
 - Normalisation
 - Modems
- Architecture
- **Menaces**
- Sécurisation / Protection contre le brouillage
- Conclusion / discussions

Menaces

- Menaces cyber « classiques » : liaisons IP
- Menaces « radio »
 - Lutte anti-drone civile
 - Lutte anti-drone militaire

Les dispositifs anti-drones

Ces systèmes sont encore peu répandus ou à l'essai.

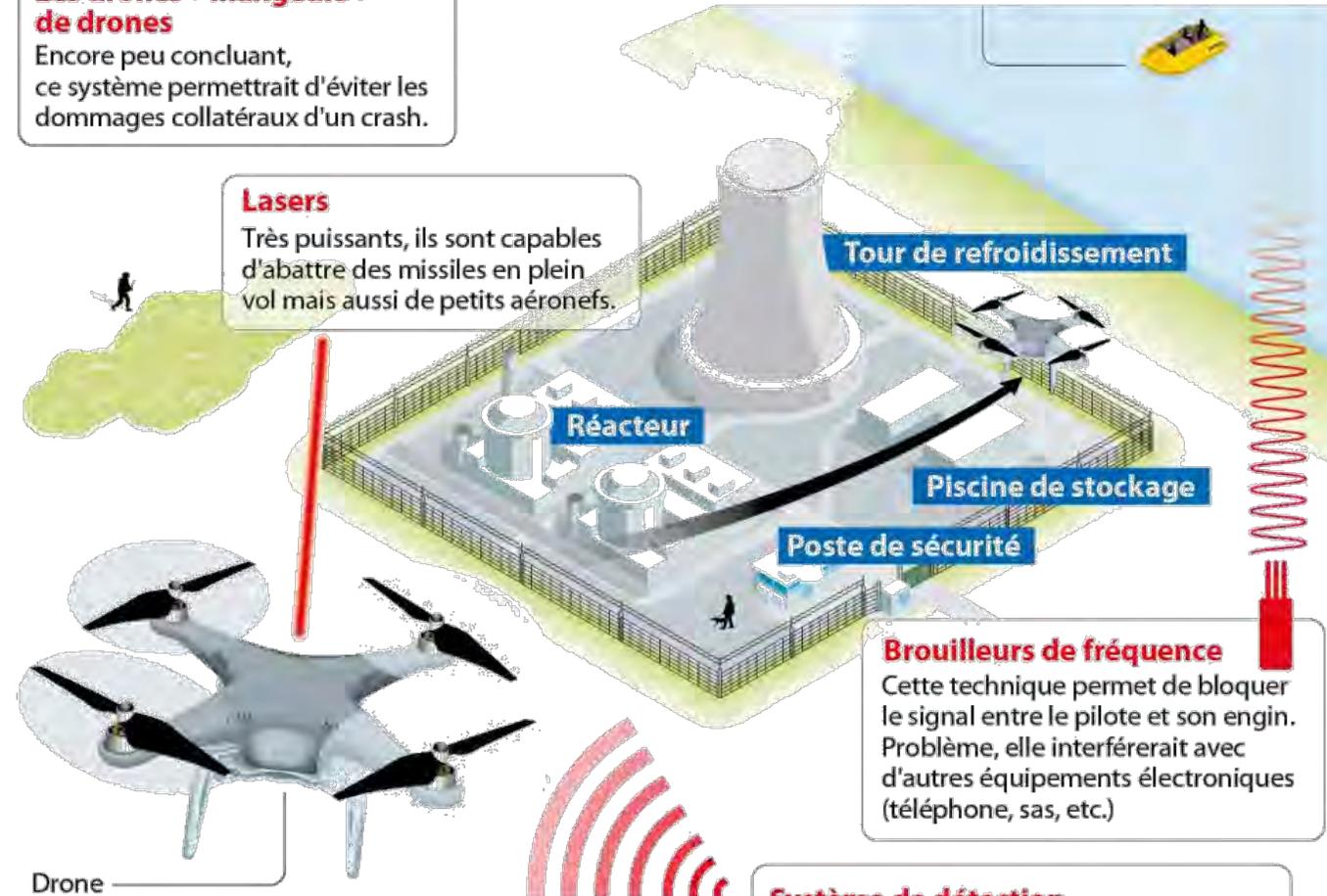
Les drones « mangeurs » de drones

Encore peu concluant, ce système permettrait d'éviter les dommages collatéraux d'un crash.

Lasers

Très puissants, ils sont capables d'abattre des missiles en plein vol mais aussi de petits aéronefs.

Certains drones paramilitaires peuvent être pilotés à 300 km de distance.



Drone

Brouilleurs de fréquence

Cette technique permet de bloquer le signal entre le pilote et son engin. Problème, elle interférerait avec d'autres équipements électroniques (téléphone, sas, etc.)

Système de détection

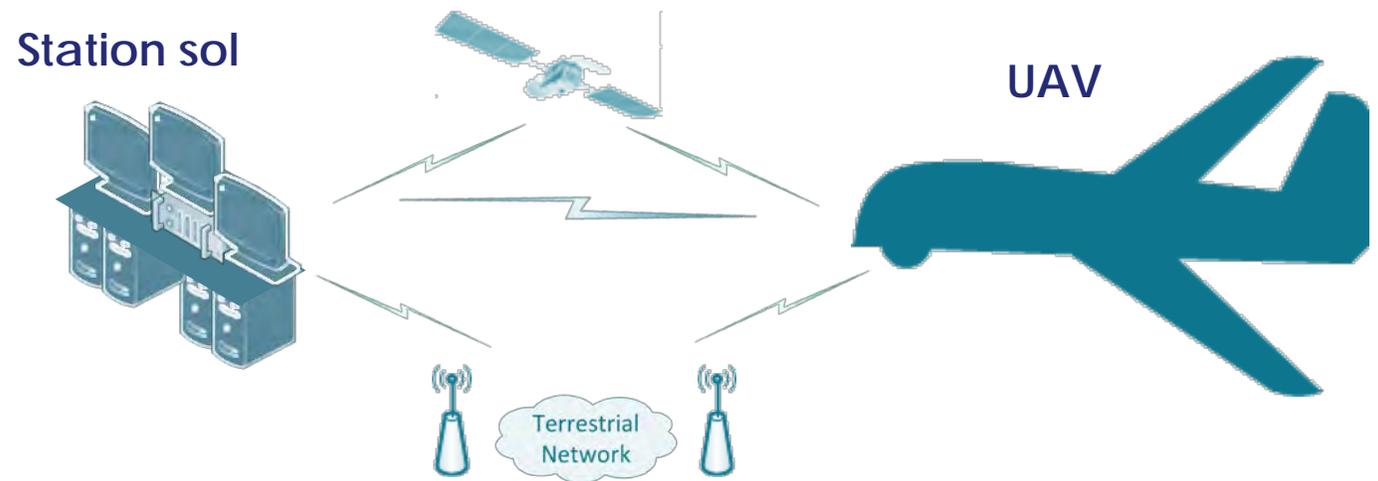
Ce dispositif est capable d'identifier un bruit suspect dans les airs, notamment un drone, en repérant sa signature acoustique.

Sécurité des centrales

- Zone de protection aérienne
- Rondes au sol (détection visuelle)
- Point faible : les piscines, où sont entreposés les combustibles usagés encore radioactifs, ne sont protégées que par de simples hangars

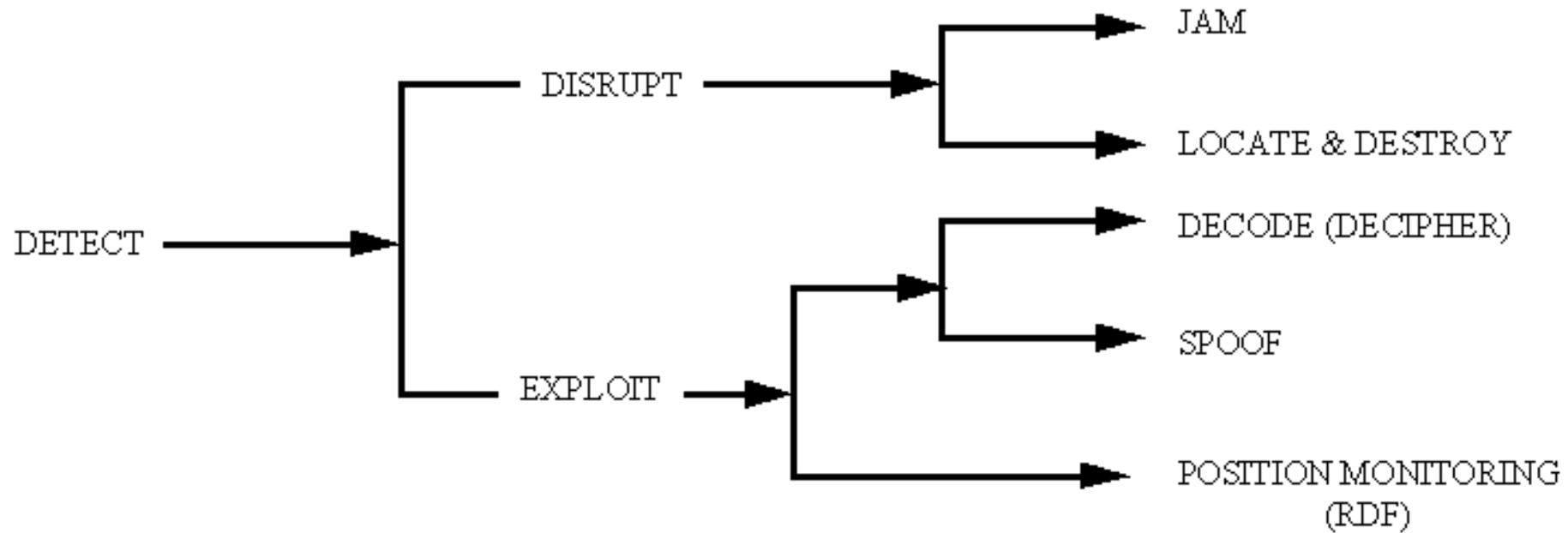
Menaces

- Menaces cyber « classiques »: liaisons IP
- Attaques sur le lien sol de contrôle via entrée IP
 - Encore plus évident si utilisation d'un réseau commercial 3G/4G/5G



Menaces

- Menaces « radio »
- Stratégies



Electronic Warfare Overview for Military Systems

(c) 1996 Steve F. Russell

Menaces

- Menaces « radio »
- Au niveau du drone émissions radio très faibles:
 - Antenne(s) petite(s) donc faible gain
 - Puissance électrique limitée à bord, donc RF
 - Puissance RF en fonction de leur domaine de vol / évolution
 - Loin (>10km) pour les gros drones militaires
 - Moyenne portée pour les drones de taille moyenne
 - Courte portée pour les drones civil et de loisir



→ Détection visuelle et radio peu aisée

Menaces

- Menaces « radio »
 - Tout comme les stations sol de pilotage, il faut une antenne à fort gain et donc directive pour repérer le signal TC du drone
 - scan du ciel en permanence
 - Aide des radars pour les drones militaires
-
- Mesures de discrétion pour les gros drones militaires rendant presque impossible leur détection



Menaces

- Menaces « radio »
- Radars pour le moment limités pour les drones 25kg et moins: env. 1km max



Menaces

- Menaces « radio »
- Brouillage possible via connaissance à priori de la position du drone
 - Plus la position sera connue avec précision plus on pourra concentrer de la puissance de brouillage
 - Présence de beaucoup de puissance RF sur brouilleur militaire



Menaces

- Menaces « radio »
- Brouillage possible via connaissance à priori de la position du drone
 - Ciblage fusil sniper pour les petits drones



Sommaire

- Introduction
- Missions & technologies
 - Drones civils
 - Drones militaires
- Éléments de Base en Télécom / technique
 - Propagation
 - Chaîne Télécom
 - Fréquences
 - Normalisation
 - Modems
- Architecture
- Menaces
- **Sécurisation / Protection contre le brouillage**
- Conclusion / discussions

Sécurisation

- Sécurisation réseau



- Sécurisation radio



Sécurisation

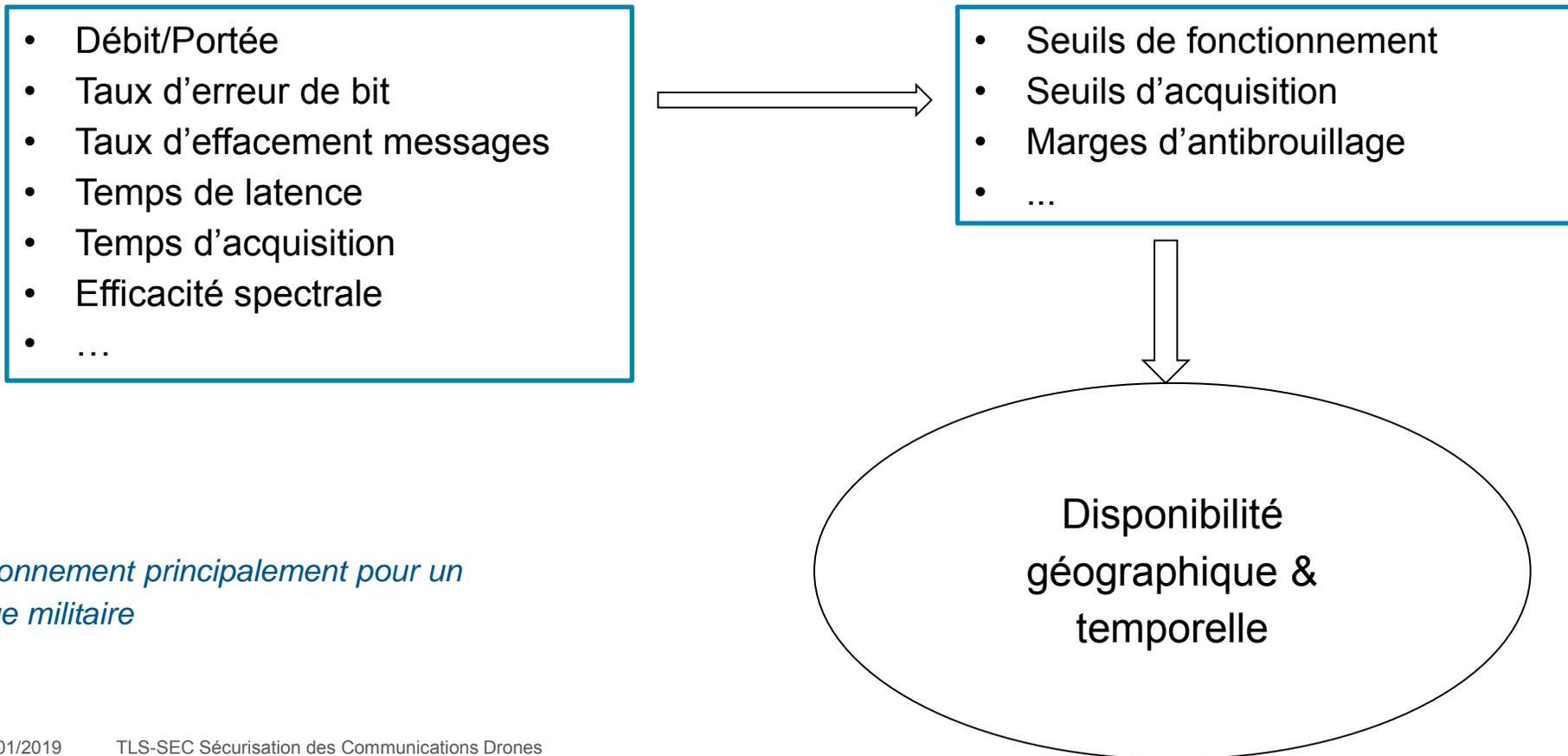
- **Sécurisation réseau : moyens classiques**
 - Les machines informatiques destinées à héberger les applications de la station sol doivent être durcies afin de réduire la surface d'attaque de ces serveurs. Le durcissement sera réalisé en suivant les guides applicables aux éléments concernés, a minima :
 - Couches protocolaires réseau
 - Système d'exploitation
 - Logiciels mutualisés (gestionnaires de bases de données, services de messagerie, serveurs d'application...)
 - L'ouverture de session sur la station sol doit inclure l'identification et l'authentification des utilisateurs
 - Les droits d'accès aux ressources de la station sol doivent être définis pour chaque groupe d'utilisateurs et contrôlés. Notamment il convient de distinguer les rôles de :
 - Télépilote, en charge de la conduite du drone
 - Technicien, en charge du maintien en condition opérationnelle du système de drone, segment bord et sol.
 - Administrateur, en charge du maintien en condition opérationnelle de la plateforme informatique de la station sol.

Sécurisation

- **Sécurisation réseau : moyens classiques**
 - Les interfaces réseau de la station sol doivent être protégées contre l'intrusion et les connexions non autorisées
 - Seules les machines authentifiées par des mécanismes cryptographiques reconnus sont autorisées à ouvrir une connexion avec la station sol
 - La station sol doit élaborer et conserver de manière sécurisée un historique des évènements opérationnels et de sécurité
 - La station sol doit faciliter la validation des données entrant dans le dossier de vol, en provenance de fournisseurs de service non approuvés (untrusted).
 - La station accepte uniquement le transfert de données de/vers un support physique préalablement authentifié.

Sécurisation

- Sécurisation radio
- Spécifications de la liaison de donnée:



Raisonnement principalement pour un usage militaire

Sécurisation

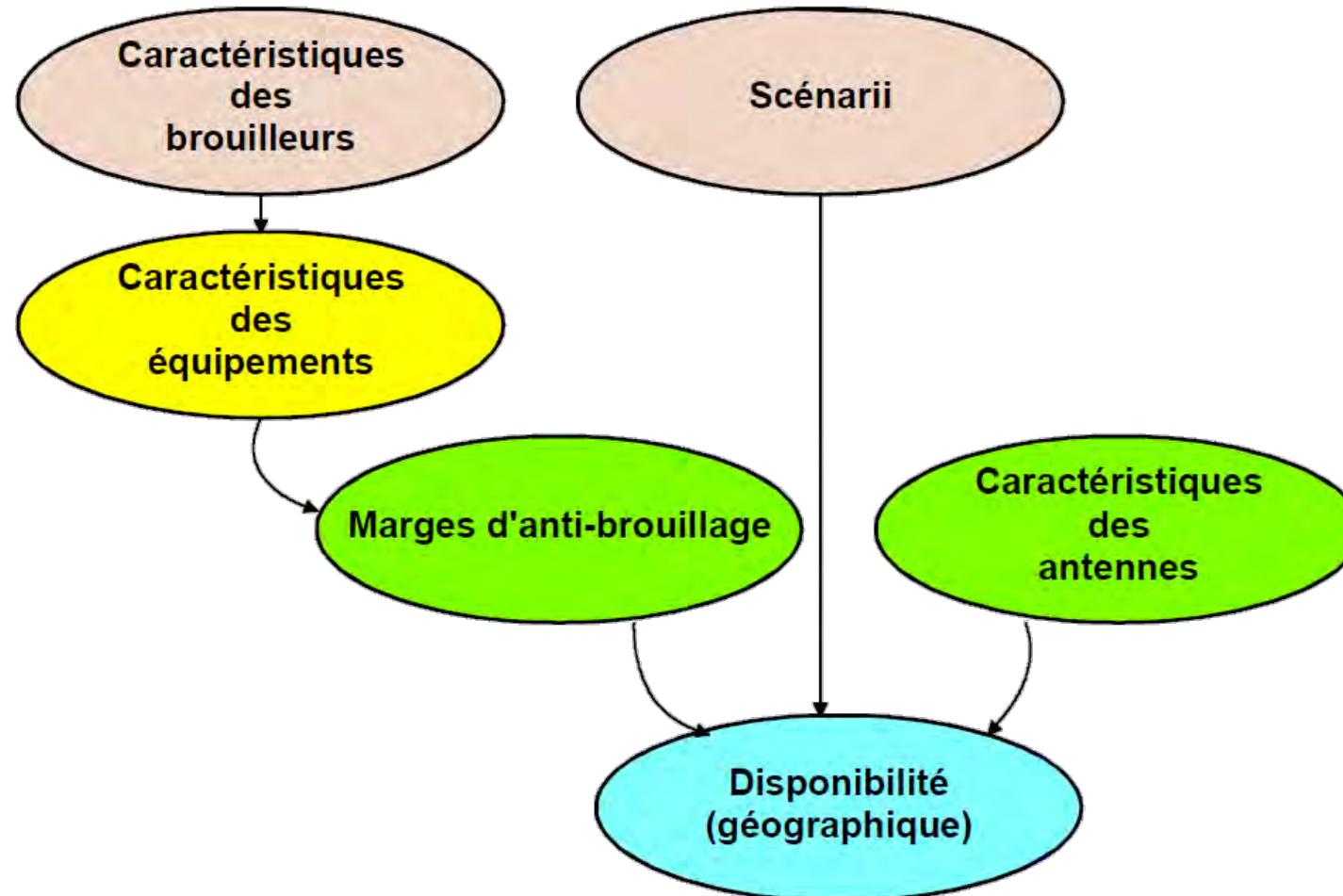
- Sécurisation radio
 - Transec – Transmission Security
 - Partie radio pure
- Comsec – Communication Security
 - Partie radio + protocolaire + cryptographique + réseau

Sécurisation

- **Exemples:**
- Performances de transmission (temps clair)
 - TC, TM: Disponibilité temporelle > 99 %
 - Données: Disponibilité temporelle > 90 %
 - Remarque: Les disponibilités TM et Données étant différentes, le multiplexage temporel est à éviter. Un multiplexage par codes d'étalement par exemple est préférable
- Performances de transmission (brouillage)
 - TC, TM: Disponibilité géographique > 90 %
 - Données: Disponibilité géographique > 80 %
- Performances de localisation
 - Distance: < 20 m
 - Angle : < 5 mrad

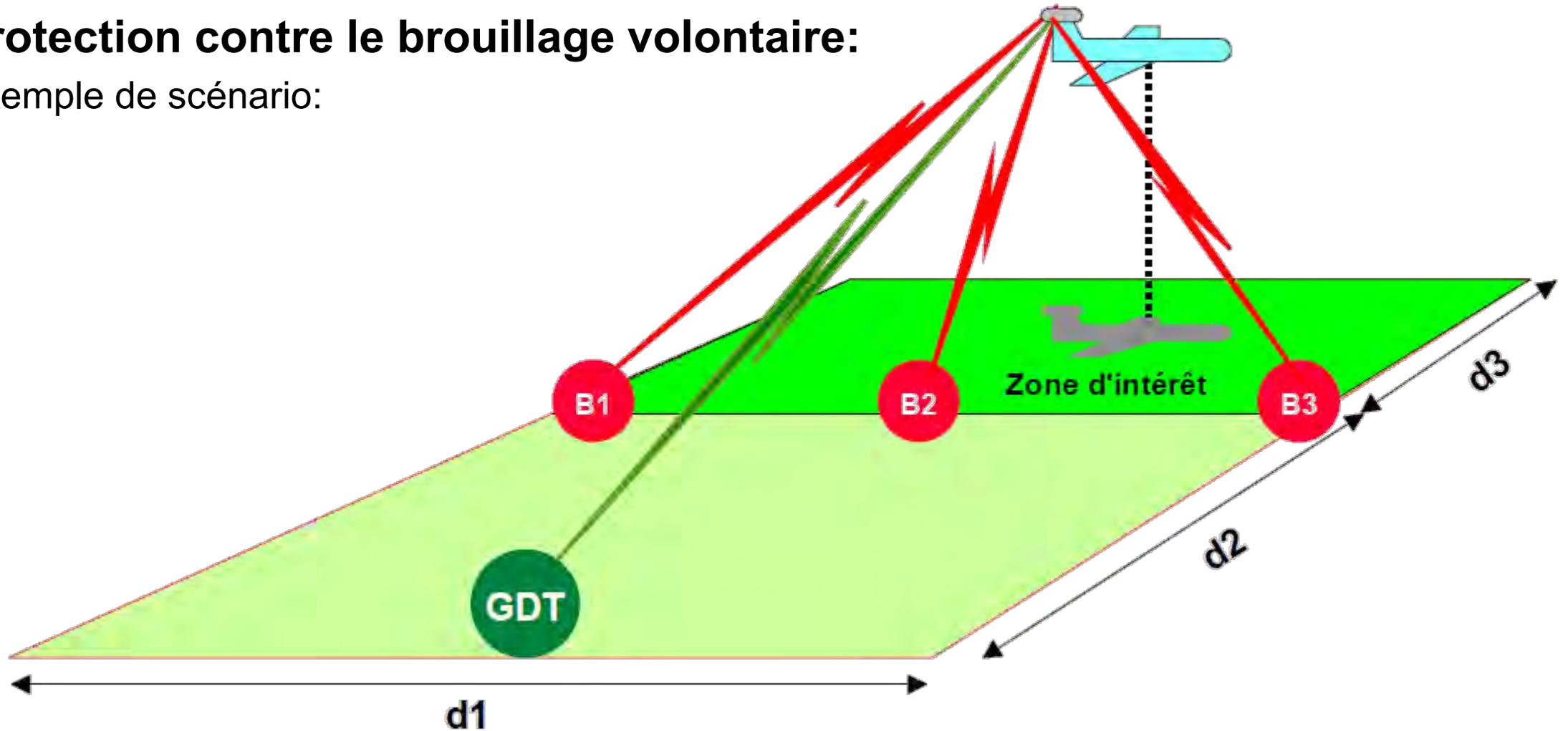
Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**
- Méthode d'analyse:



Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**
- Exemple de scénario:



Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**
- Différentes classes de brouilleurs potentiels
- La conception de la liaison doit anticiper la stratégie adaptative du brouilleur. La caractéristique stable étant la puissance moyenne du brouilleur. Celui-ci est en effet capable de:
 - Adapter sa bande de fréquence à la liaison à brouiller
 - Adapter son facteur de forme et sa fréquence de répétition
 - Eventuellement déterminer en temps réel le canal fréquentiel utilisé par la liaison
- Le niveau de résistance de la liaison est déterminé par l'AJM (Anti Jamming Margin – Puissance brouilleur / Puissance liaison) mesuré quand le brouilleur s'est adapté pour une efficacité maximale

Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**
- Niveaux de protection (classification non normalisée)
 - Niveau 0 : Comportement non prédictible en présence de brouillage
 - Niveau 1 : Comportement prédictible
 - Niveau 2 : Comportement prédictible avec prise en compte en conception de moyens de protection

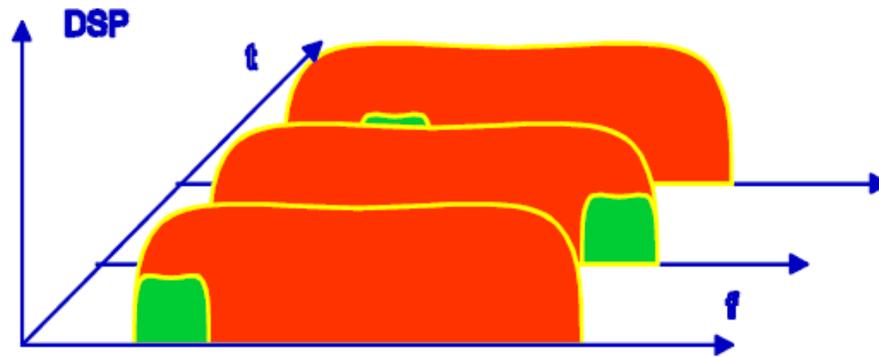
Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**
- La performance système se chiffre en **pourcentage de disponibilité géographique** sur une zone d'intérêt. Elle prend en compte:
 - Un scénario géographique: zone d'intérêt, disposition des brouilleurs.
 - Les caractéristiques des brouilleurs:
 - Puissance
 - Forme d'onde
 - Capacités d'adaptation
- Les performances non chiffrés se traduisent par une mention LPI / LPD
 - **LPD**: Low Probability of Detection: émissions radio peu détectables
 - **LPI**: Low Probability of Interception: SI détection, quasi impossibilité à retrouver l'information

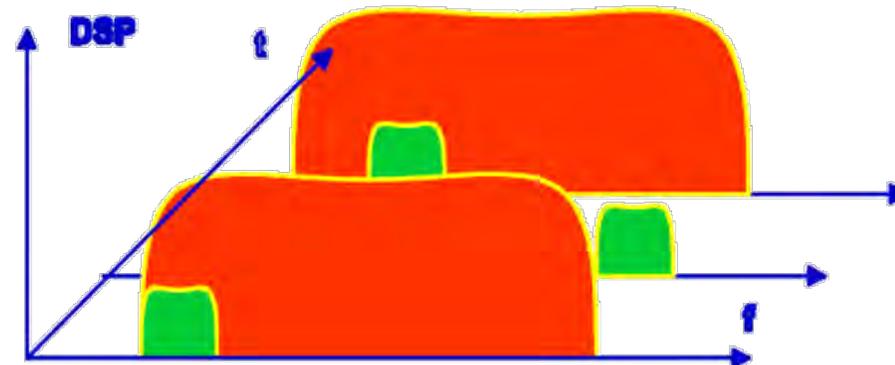
Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**

- Classes de brouilleurs:



Brouilleur Continu
Adaptatif

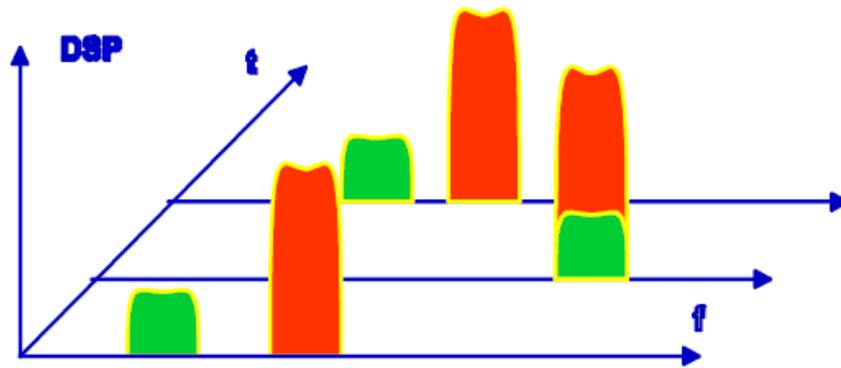


Brouilleur Impulsionnel
Adaptatif

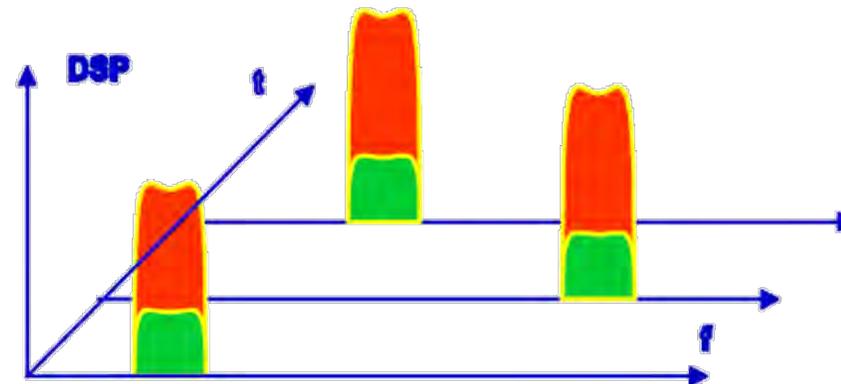
Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**

- Classes de brouilleurs:



Brouilleur Bande Etroite
Agile



Brouilleur Intelligent

Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**
- L'amélioration apportée par un choix judicieux du couple *modulation / codage* étant limité par l'asymptote de SHANNON, la seule solution pertinente est l'augmentation artificielle de la bande utilisée de façon à obliger le brouilleur à disperser son énergie et donc à réduire le bruit N_0 .
Les techniques usuelles sont:
 - **FHSS** (sauts de fréquence aléatoires). Nécessite un codage de canal spécifique contre les effacements
 - **DSSS** (étalement par séquence directe). S'accommode d'un codage de canal optimisé pour le temps clair
 - Combinaison des deux
 - **Bursts**: transmissions « flash » impromptues
 - **Directivité**

Sécurisation

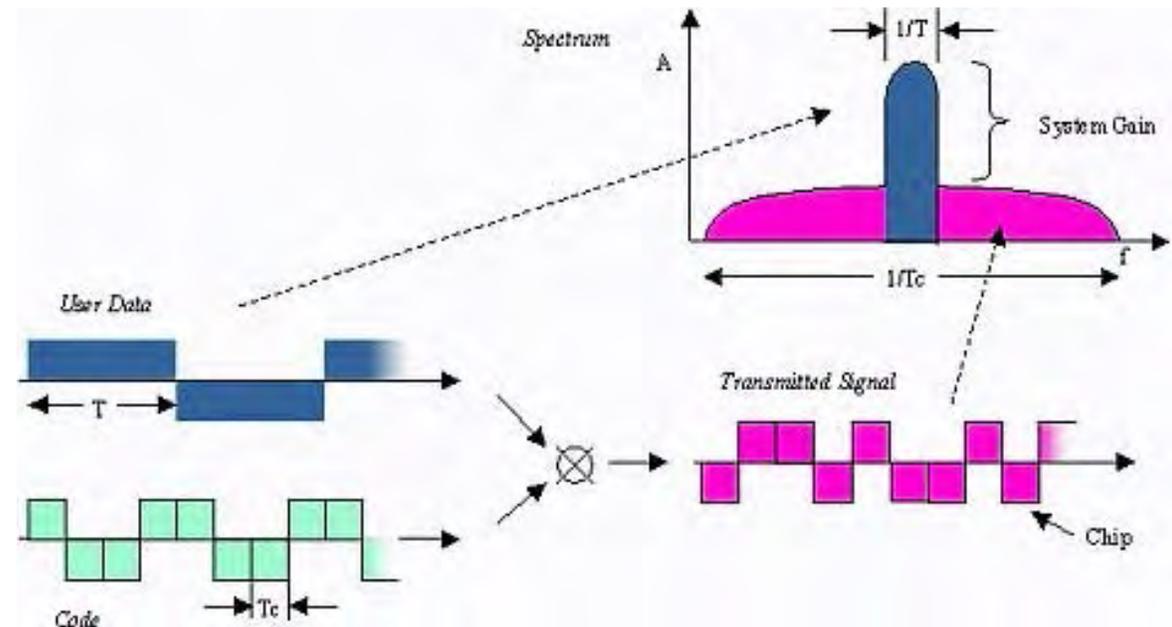
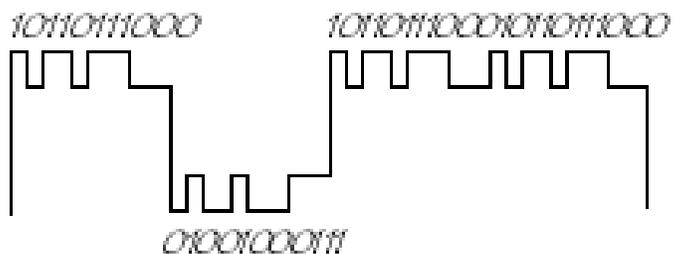
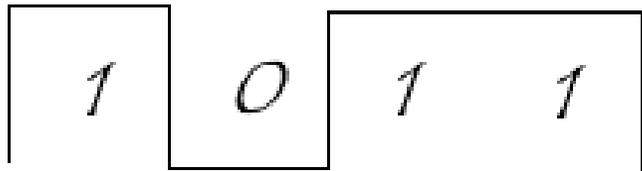
- **Protection contre le brouillage volontaire:**
 - **FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum** (sauts de fréquence aléatoires). Nécessite un codage de canal spécifique contre les effacements

Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**

*Utilisé aussi pour
de l'accès multiple
= CDMA comme
pour la 3G*

- **DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum** (étalement par séquence directe).
S'accommode d'un codage de canal optimisé pour le temps clair

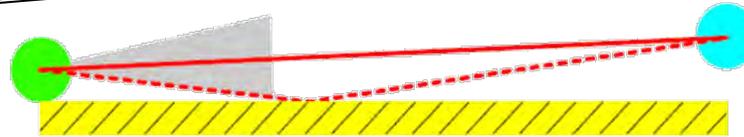


Sécurisation

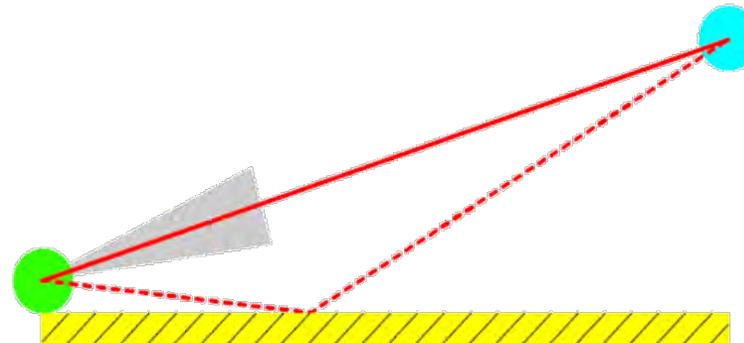
- **Protection contre le brouillage volontaire:**

Utilisé aussi pour
les faisceaux
hertziens
terrestres

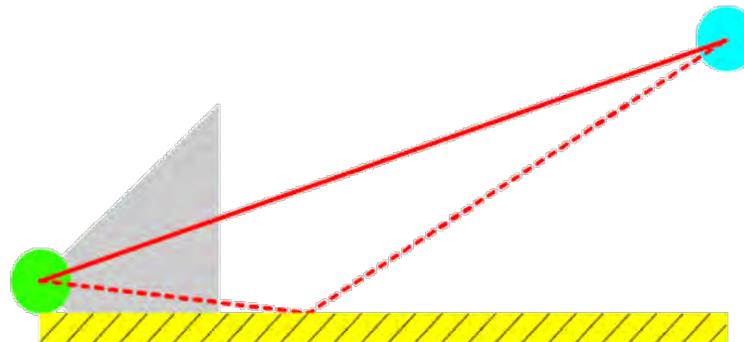
- **Directivité (antenne).**



Cas 1
Longue portée point à point:
Sélectivité moyenne
origine atmosphérique



Cas 2
Courte portée point à point:
Pas de sélectivité



Cas 3
BROADCAST:
Sélectivité intense
origine réflexion du sol

Sécurisation

- **Protection contre le brouillage volontaire:**

- **Synthèse et protections adaptées:**

TYPE DE BROUILLEUR	PIRE MOYENNE	PIRE CRETE	Type de Protection adaptée			
			Agilité de fréquence	Séquence directe	Codage de canal	Discrétion
CW Adaptatif	** kW	** kW	●●●	●●●	●	●
Pulsé Adaptatif	** kW	*** kW	●●●	●●●	●●●	●
Bande étroite à saut	** kW	** kW	●●	●●●	●●●	●
Intelligent	** kW	** kW	●	●●●	●	●●●

Sommaire

- Introduction
- Missions & technologies
 - Drones civils
 - Drones militaires
- Éléments de Base en Télécom / technique
 - Propagation
 - Chaîne Télécom
 - Fréquences
 - Normalisation
 - Modems
- Architecture
- Menaces
- Sécurisation / Protection contre le brouillage
- **Conclusion / discussions**

Conclusion

- **Drones militaires:**
 - Moyens €€€ pour de gros brouilleurs
 - Moyens pour du matériel adapté anti-brouillage
 - Moyens pour la protection des réseaux militaires
- **Drones civils:**
 - Liens radio plus simples :
 - vulnérable à du brouillage
 - Vulnérable à du hacking de protocole
 - Hacking possible de la commande:
 - Réseau commerciaux 3G/4G/5G
 - smartphone

Thank you