

Réseaux sans fil

Master Technologies de l'Internet

C. Pham

Université de Pau et des Pays de l'Adour

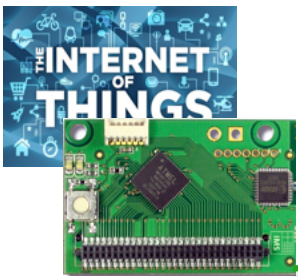
Département Informatique

<http://www.univ-pau.fr/~cpham>

Congduc.Pham@univ-pau.fr



Introduction



WiFi

802.11ac HOW DID WE GET HERE?

1973

Ethernet developed at Xerox's Palo Alto Research Center (PARC)

1977

Ethernet patented by Xerox

1997

802.11 Standard

The 802.11 standard is created. Products using the 2.4 GHz band have a maximum data rate of 2 Mbps

2.40 GHz

Max Data Rate

2 Mbps

1999

802.11a Standard

The 802.11b and 802.11a standards are created. 802.11b drives the implementation of widespread use of WLAN technology. It is considered the first generation of wireless local area network technology. Products use 2.4 GHz and have a maximum data rate of 11 Mbps. 802.11a is considered the second generation. Products use the 5 GHz band and have a maximum data rate of 54 Mbps.

5.0 GHz

Max Data Rate

54 Mbps

2003

802.11g Standard

The 802.11g standard is considered third generation; this standard permits products to use the 2.4 GHz band and match the 54 Mbps throughput of 5 GHz devices.

2.40 GHz

Max Data Rate

54 Mbps

>> Throughput of 5 GHz devices

2005

802.11e Standard

The 802.11e standard is created. It is intended to take 11b and 11a to the next level with quality of service (QoS) features capable of prioritizing data, talk and video transmissions. Networks using 11e operate at radio frequencies of up to 5.850 GHz. It is most suitable for networks with multimedia capabilities.

5.85 GHz

2007

802.11n Standard (I)

The 802.11n standard is considered the fourth generation. Products are created for 2.4 GHz and 5 GHz bands and both have a maximum data rate of 450 Mbps.

5.0 GHz

Max Data Rate

450 Mbps

2009

802.11 Standard (II)

The second wave of 802.11n is created and products operating in both the 2.4 GHz and 5 GHz bands now support a maximum data rate of 600 Mbps.

5.0 GHz

Max Data Rate

600 Mbps

2013

802.11ac Standard (I)

The 802.11ac standard, so-called gigabit Wi-Fi, is ratified. In the first wave, Wi-Fi certified products have a maximum data rate of 1.3 Gbps and operate only in the 5 GHz band. Among other technological enhancements, this standard allows APs to send multiple streams to one client at a time. It is considered the fifth generation.

5.0 GHz

Max Data Rate

1.3 Gbps

2014

802.11ac Standard (II)

Second-wave 802.11ac products hit the market. These products also use the 5 GHz band, but at a speed of 6.93 Gbps. It expands AP capabilities through the support of multiple input, multiple output (MIMO) technology, which enables APs to send multiple streams to multiple clients instead of just one at a time. The second wave also employs wider 160 MHz channels that can be used to give high-throughput applications their own exclusive pathways, thus further improving performance.

5.0 GHz

Max Data Rate

6.93 Gbps

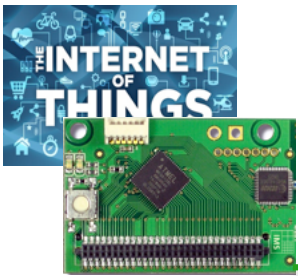
2011

The 802.11v, 802.11k and 802.11u standards are created. 11k is designed to improve the way wireless traffic is distributed through a network by determining which access points (APs) have available capacity. 11u allows users to know what wireless services a network offers before they are connected to it. It is most beneficial in crowded areas with multiple wireless services.

TechTarget

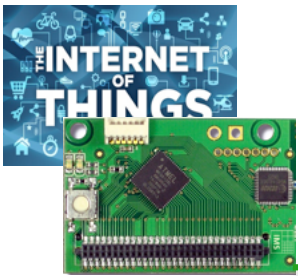
For up-to-date news, analysis and advice on networking, visit SearchNetworking.com.

Information by: Sonia Greff/TechTarget
Design by: Brian Linnahay/TechTarget



2G/3G/4G/5G/...

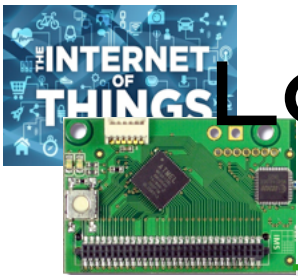




BLUETOOTH

How Bluetooth is Transforming Consumer Electronics

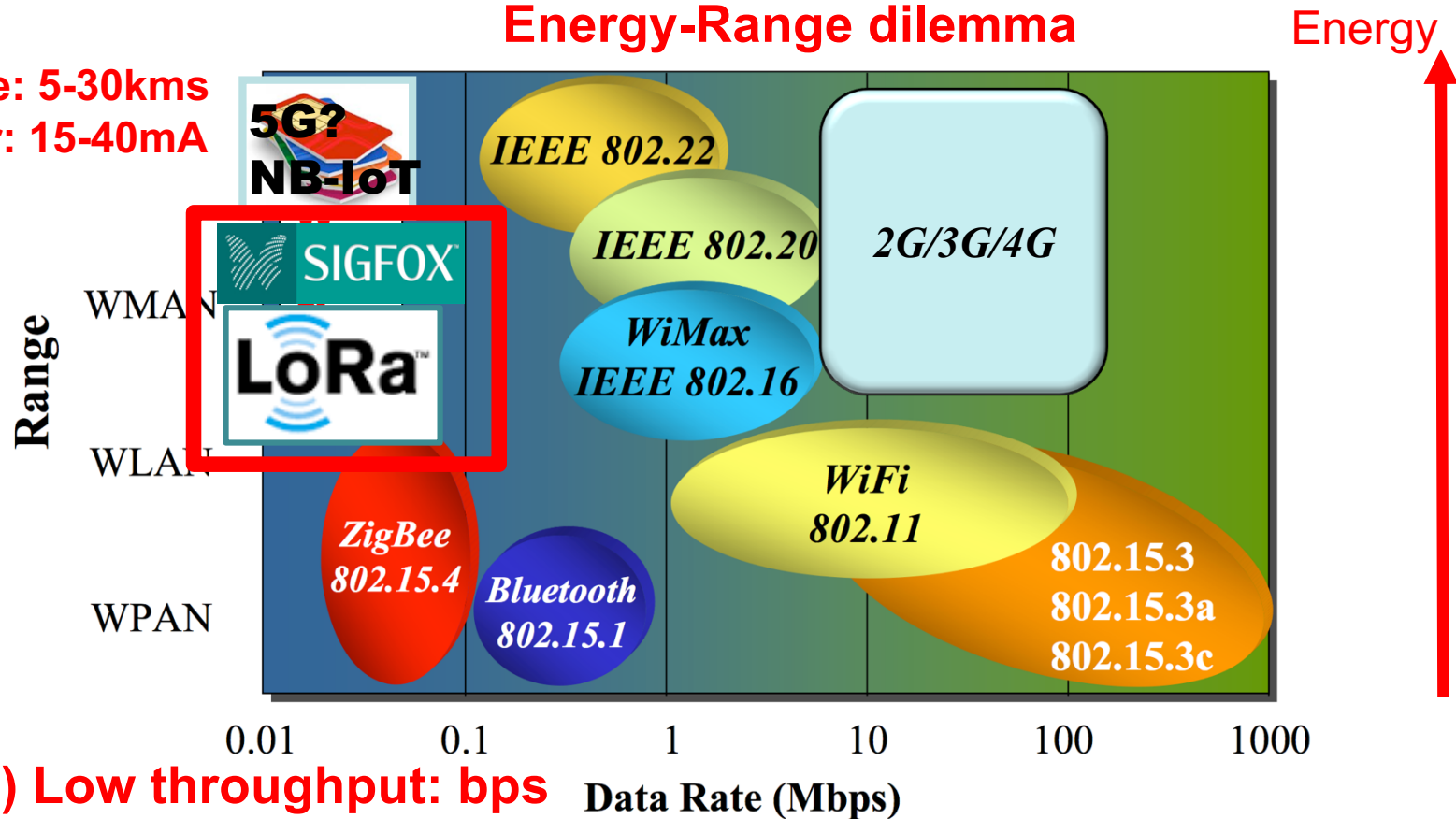




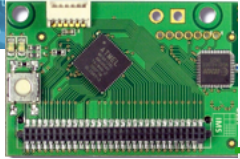
LOW-POWER & LONG-RANGE RADIOS

Long-range: 5-30kms
Low-power: 15-40mA

Energy-Range dilemma



Transmitting: TC/22.5/HUM/67.7 ; about 20 bytes with packet header
Time on air can be 1.44s with LoRa



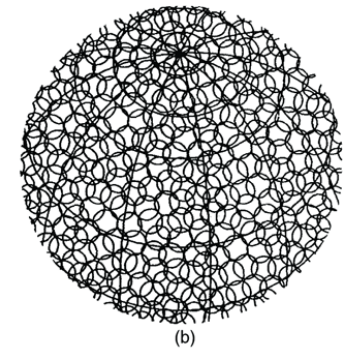
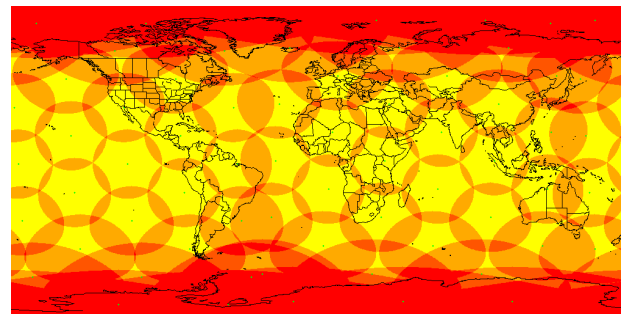
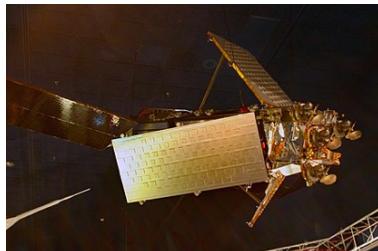
SATELLITES

| Altitude (km) | Type | Latence (ms) | Satellites nécessaires |
|-----------------|------|--------------|------------------------|
| 35 000 | GEO | 270 | 3 |
| 10 000 - 20 000 | MEO | 35-85 | 10 |
| 1 000 - 2 000 | LEO | 1-7 | 50 |

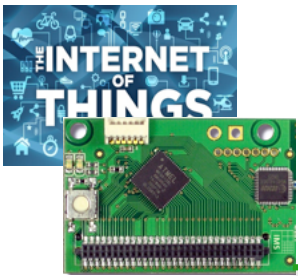
Ceinture de Van Allen extérieure (between 10 000 and 20 000 km)
 Ceinture de Van Allen intérieure (between 1 000 and 2 000 km)



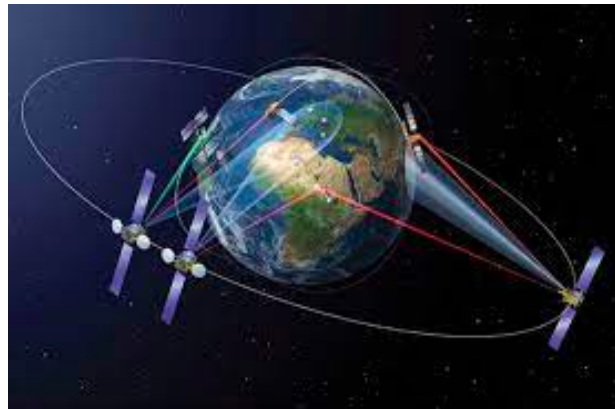
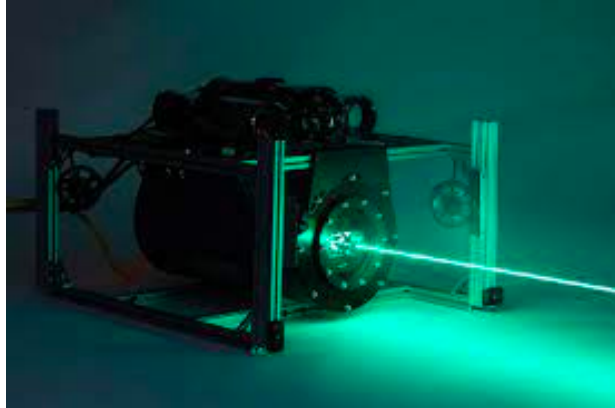
Iridium, 66 satellites
Initialement 77

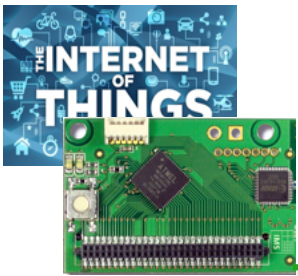


© Pearson Education France

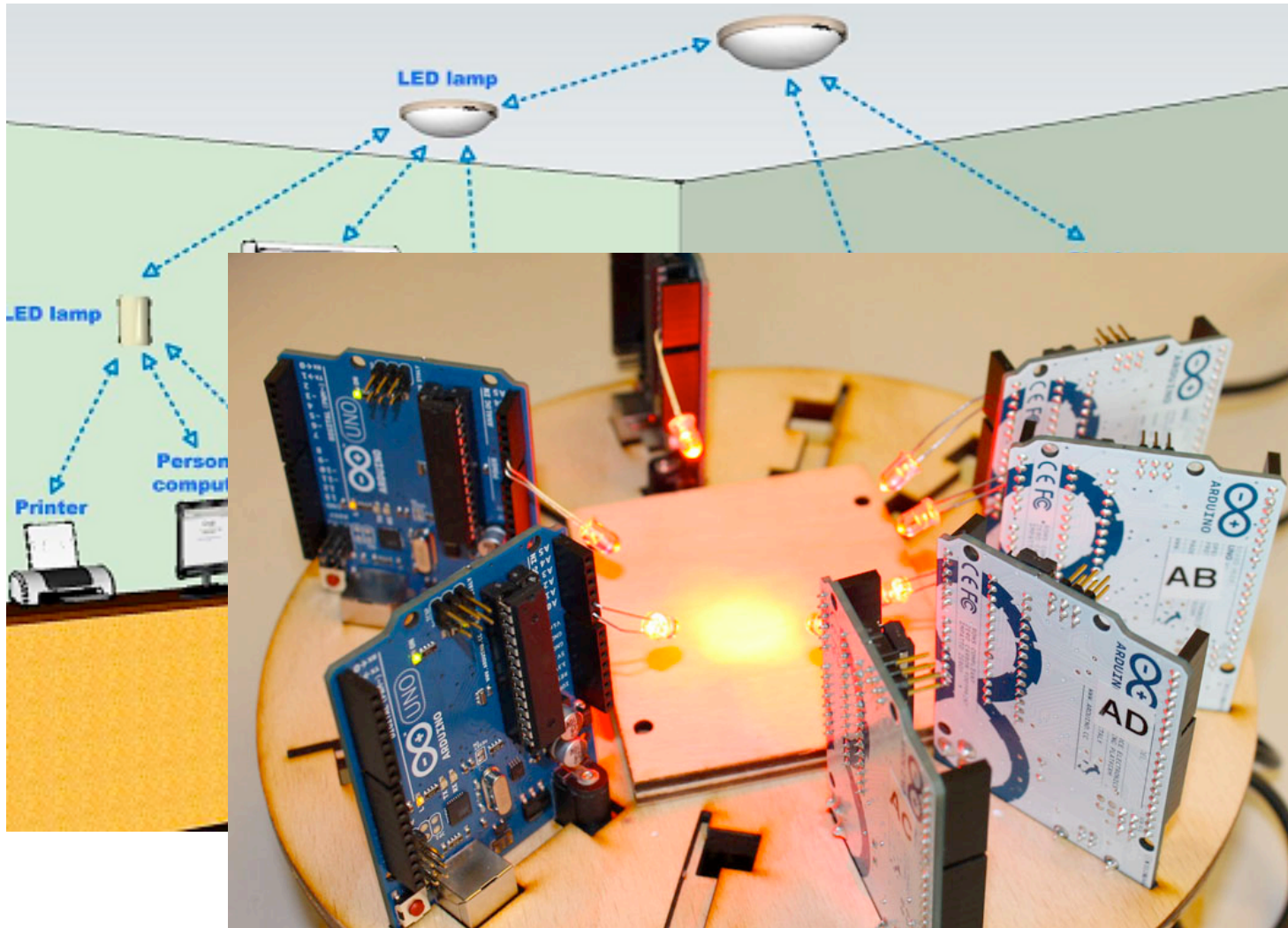


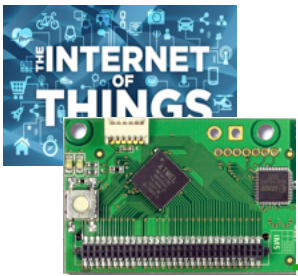
LASER/OPTICAL COMMUNICATIONS





VISIBLE LIGHT COMMUNICATION, VLC





VLC, CON'T

- ❑ HIGH THROUGHPUT IS "EASY"
- ❑ BI-DIRECTIONALITY IS STILL AN ISSUE
- ❑ VR IS A PERFECT APPLICATION FOR VLC

How li-fi sends data

The visible light spectrum is 10,000 times larger than the radio waves we use for wi-fi today. Information can be encoded in light pulses, just like in traditional TV remote controls.



Modern LEDs, however, could transmit enough data for a stable broadband connection - but still look like normal white light



*bits per second

Source: Professor Harald Haas

BBC



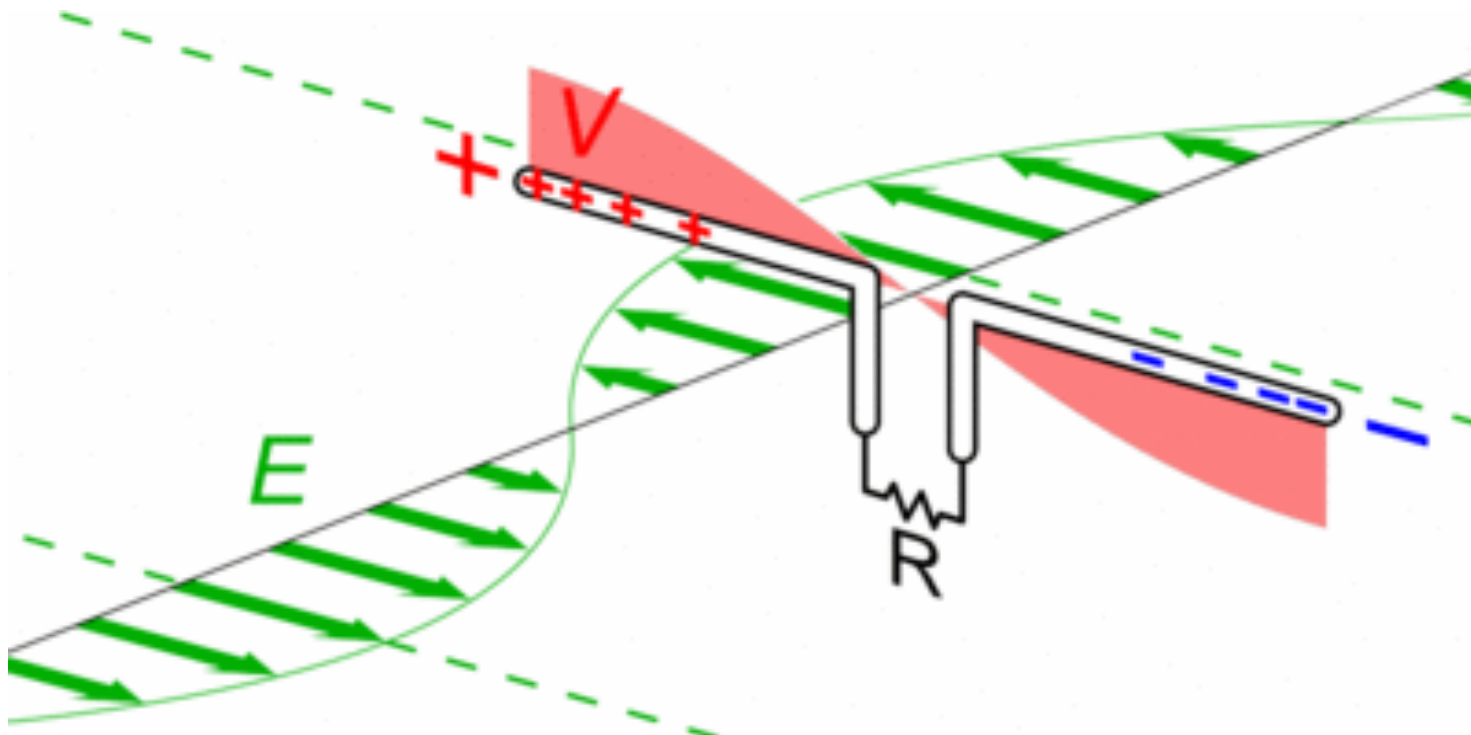
Développement du sans-fil

- ❖ La déréglementation a joué un rôle important...
- ❖ Progrès en électronique :
 - miniaturisation des équipements
 - augmentation de l'autonomie (batteries)
 - réduction du prix des équipements
- ❖ Moyen le plus rapide et le moins coûteux pour couvrir un territoire sans "re-câbler"
- ❖ Intérêt de la mobilité
 - ne pas confondre sans-fil et mobile

Principes fondamentaux

Transmission sans fil

- Génération d'une onde électromagnétique variant en fonction de la variation électrique dans un conducteur, e.g. antenne



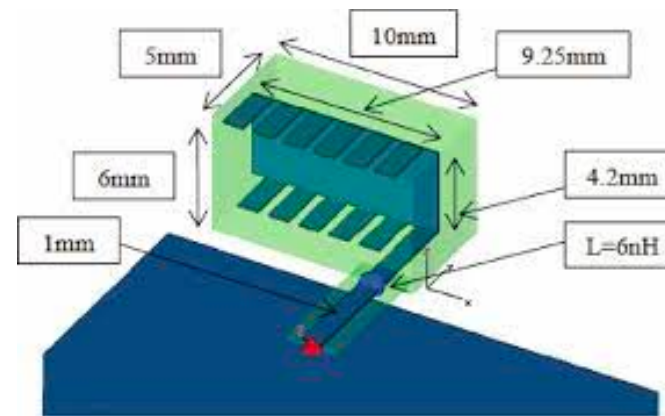
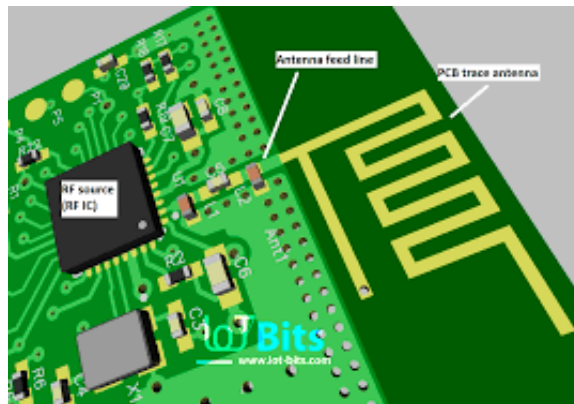
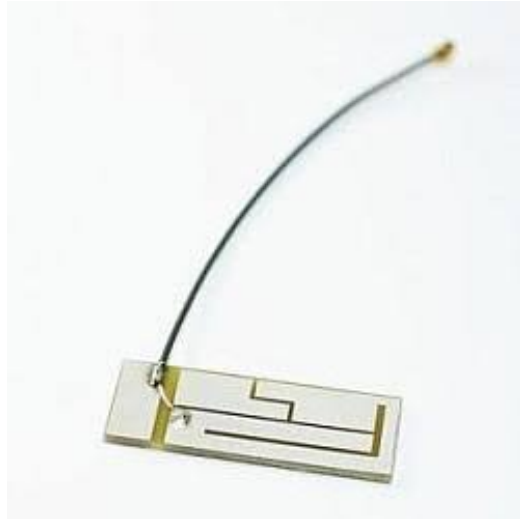
Antenne



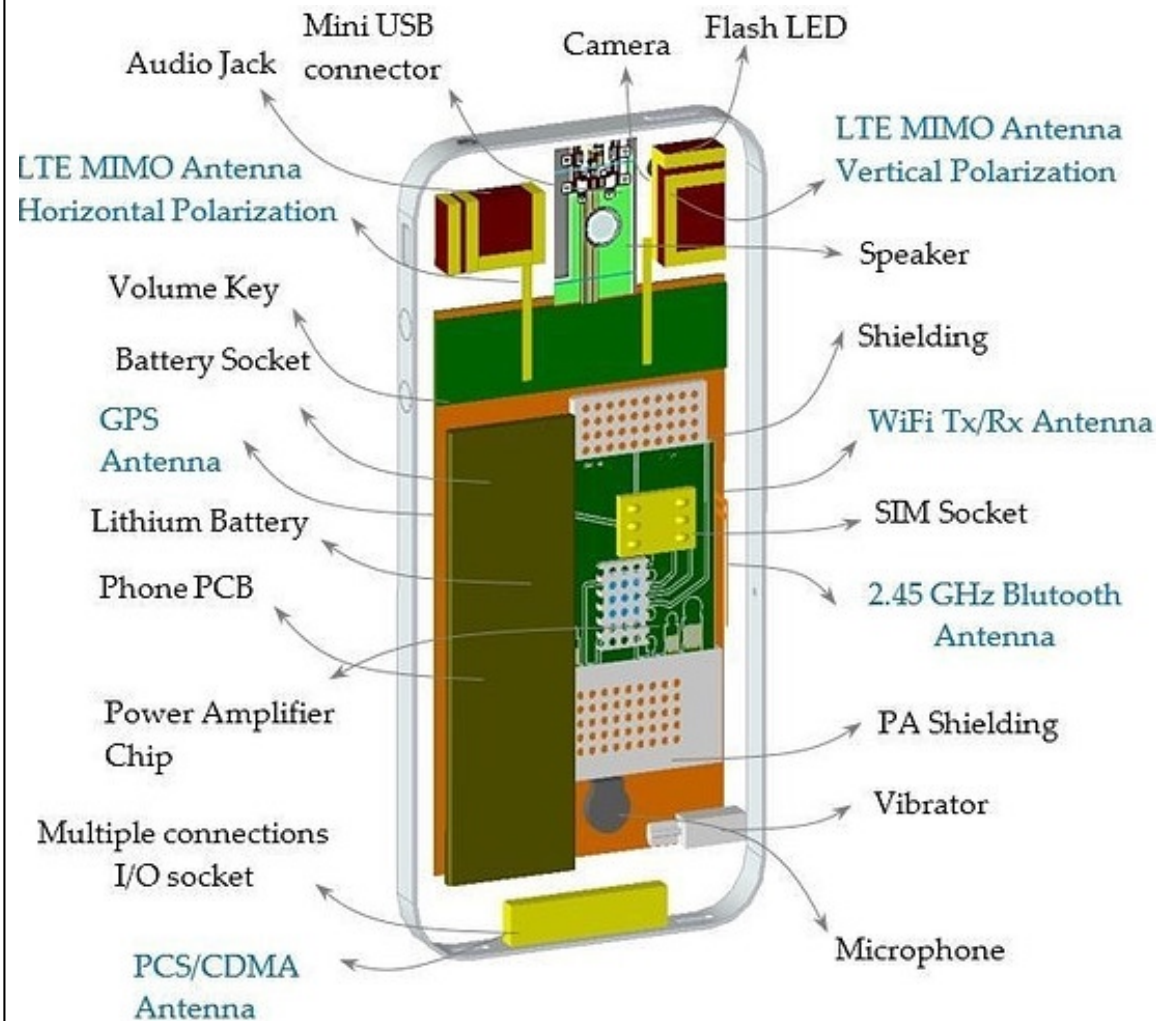
Antennes directionnelles

Antennes
omni-directionnelles

Antennes (2)



How many antennas in smartphones?



Gain d'antenne

- Relation entre le gain d'antenne et la surface effective de l'antenne :

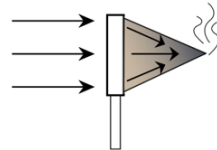
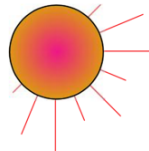
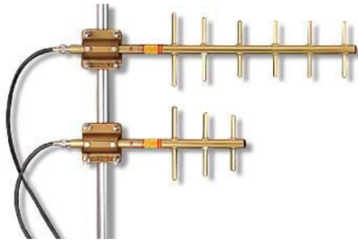
$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} = \frac{4\pi f A_e}{c^2}$$

- G = gain
- A_e = surface effective
- f = fréquence de la porteuse
- c = vitesse de la lumière $3 \cdot 10^8$ m/s
- λ = longueur d'onde de la porteuse

Gain d'antenne

- Antenna gain

- Directional antennas FOCUS energy:
they DO NOT ADD energy

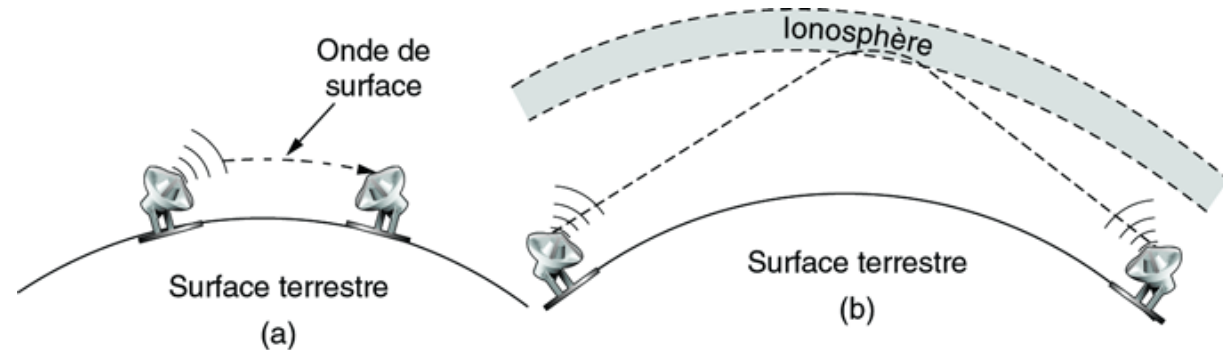


- Antenna Gain

- Omni-directional antennas FOCUS energy:
they DO NOT ADD energy

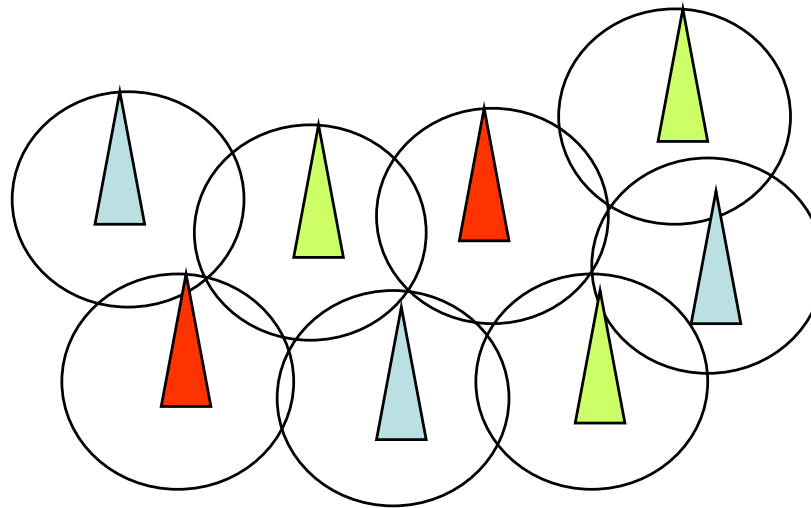


Liaisons radio et utilisation des fréquences



© Pearson Education France

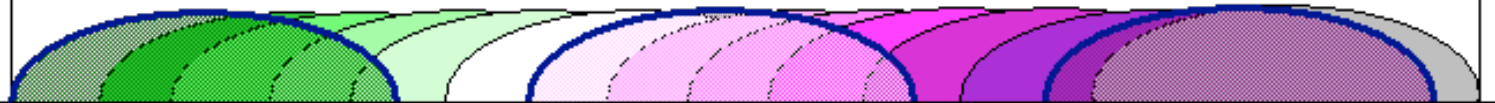
- Sans fils
 - infrastructure moins coûteuse, mais
 - erreurs plus fréquentes et dépendantes des conditions climatiques.



AM, FM (radio)
UHF (TV)
GSM
UMTS
WIFI-WIMAX
...

Canaux WIFI

22Mhz



Canal 1

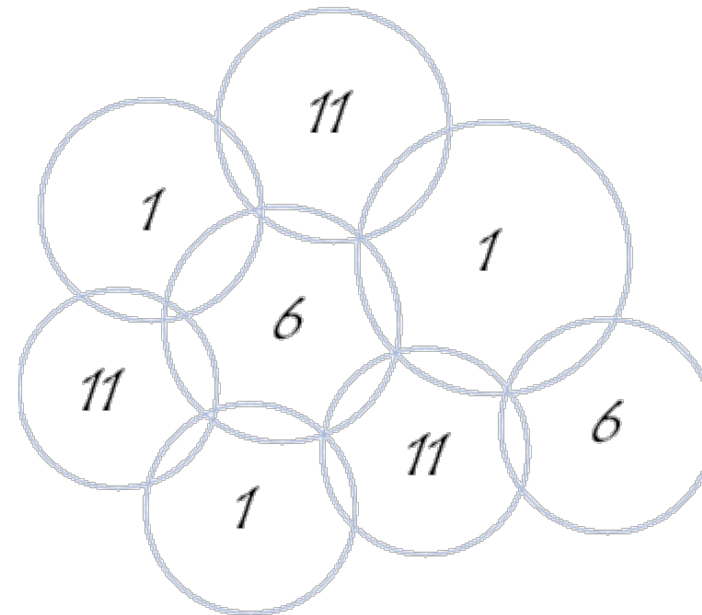
Canal 7

Canal 13

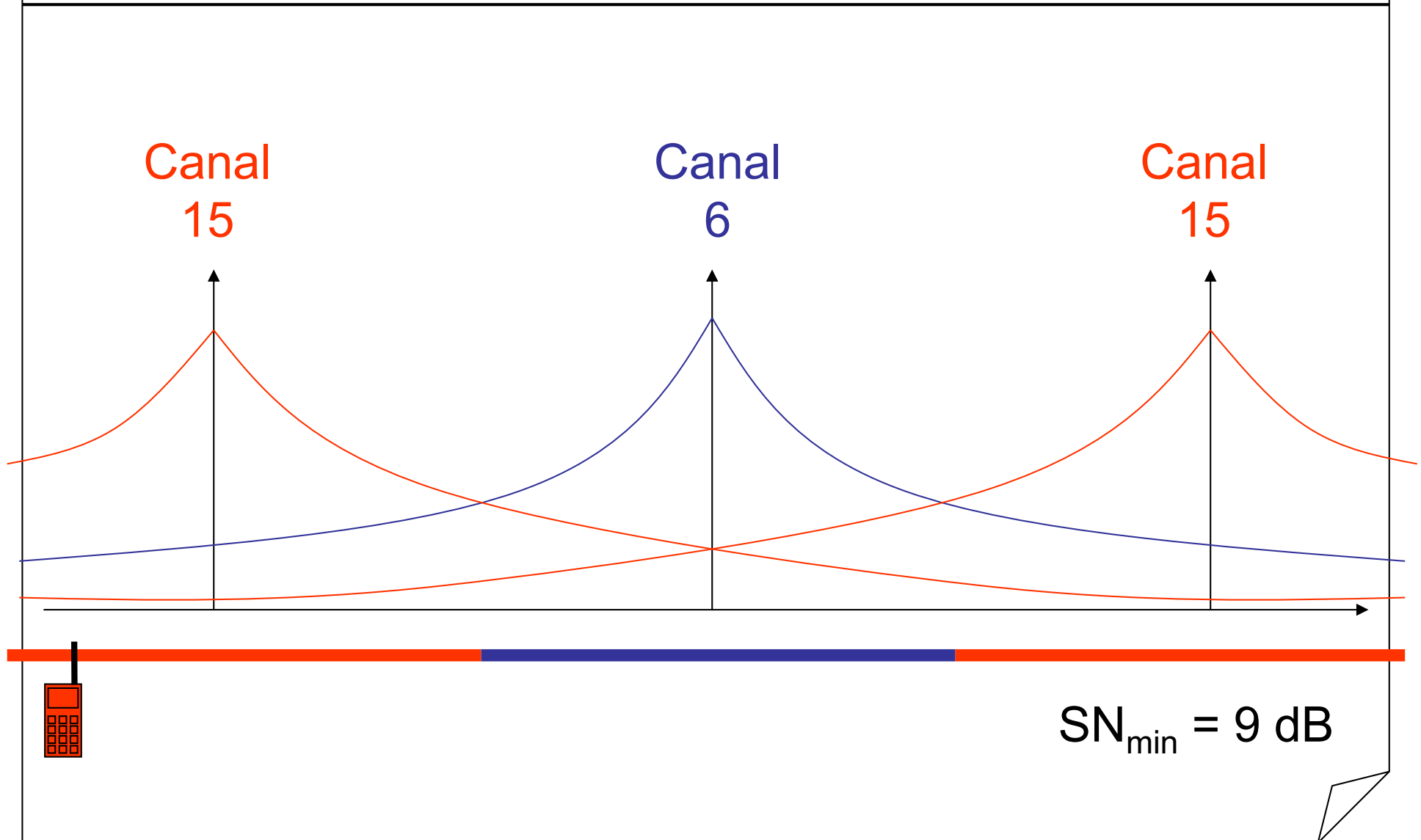
2,4 GHz

2,483 5 GHz

| Canal | Fréquence crête (en GHz) |
|-------|--------------------------|
| 1 | 2,412 |
| 2 | 2,417 |
| 3 | 2,422 |
| 4 | 2,427 |
| 5 | 2,432 |
| 6 | 2,437 |
| 7 | 2,442 |
| 8 | 2,447 |
| 9 | 2,452 |
| 10 | 2,457 |
| 11 | 2,462 |
| 12 | 2,467 |
| 13 | 2,472 |
| 14 | 2,477 |



Réutilisation et interférences



Atténuation du signal radio

- Dépend essentiellement de la distance

$$P_r = P_e d^{-\alpha}$$

- avec :
 - P_e = puissance émise (antenne émission)
 - P_r = puissance reçue (antenne réception)
 - d = distance entre les antennes
 - α pouvant varier de 2 à 4

Atténuation

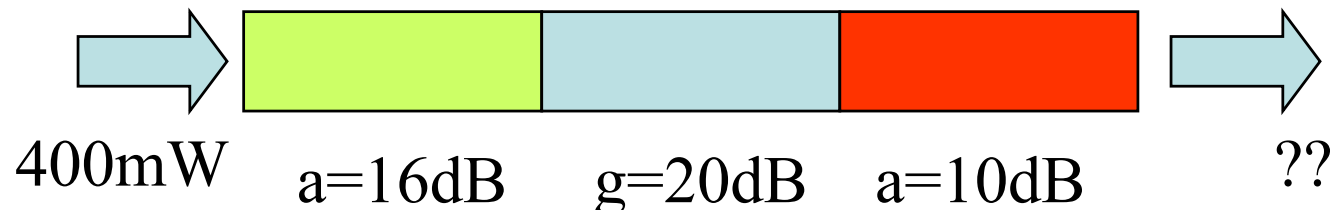
- Pour une antenne idéale isotropique :

$$\frac{P_e}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2}$$

- P_e = puissance émise (antenne émission)
- P_r = puissance reçue (antenne réception)
- d = distance entre les antennes
- c = vitesse de la lumière $3 \cdot 10^8$ m/s
- λ = longueur d'onde de la porteuse

Atténuation en décibel (dB)

- Echelle logarithmique car les valeurs sont très grande
- Atténuation en dB
 - $10\log_{10}(P_t/P_r)$ (en dB), P_i en watts
 - Différence de 3db \approx moitié
- ➡ Gain = $10\log_{10}(P_r/P_t)$
- si plusieurs sections d'atténuation/gain différents, on peut les sommer:



dB, dBm, ...

- Total net output power of transmitter
- Typically measured in dBm or mW



- **mW**: milliwatts are a measurement of power (1000 mW = 1 Watt).
- **dB**: decibel is a unit for expressing the ratio of two amounts of signal power equal to 10 times the common logarithm of this ratio. So, a power measurement in dB has to be relative to something.
- **dBm**: dB(mW) is power relative to 1 milliwatt ($mW \text{ to dBm} = 10\text{Log}_{10}(mW/1000) + 30$).
$$P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log_{10}(P(\text{mW}) / 1\text{mW})$$
- **dB*i***: dB(isotropic) is the forward gain of an antenna compared to the hypothetical isotropic antenna, which uniformly distributes energy in all directions.

dBm to mW conversion

| dBm | Watts |
|-----|--------|
| 0 | 1.0 mW |
| 1 | 1.3 mW |
| 2 | 1.6 mW |
| 3 | 2.0 mW |
| 4 | 2.5 mW |
| 5 | 3.2 mW |
| 6 | 4 mW |
| 7 | 5 mW |
| 8 | 6 mW |
| 9 | 8 mW |
| 10 | 10 mW |
| 11 | 13 mW |
| 12 | 16 mW |
| 13 | 20 mW |
| 14 | 25 mW |
| 15 | 32 mW |

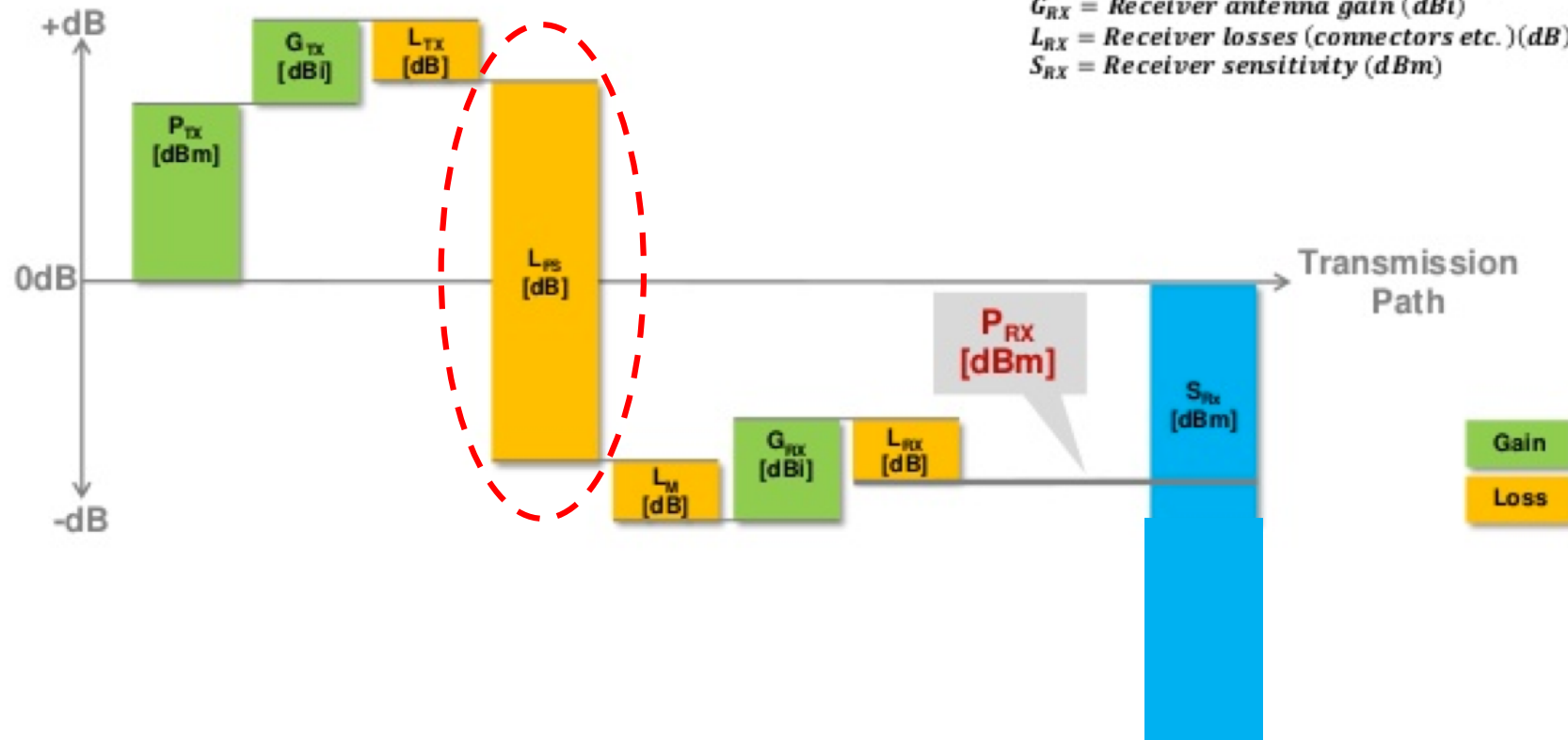
| dBm | Watts |
|-----|--------|
| 16 | 40 mW |
| 17 | 50 mW |
| 18 | 63 mW |
| 19 | 79 mW |
| 20 | 100 mW |
| 21 | 126 mW |
| 22 | 158 mW |
| 23 | 200 mW |
| 24 | 250 mW |
| 25 | 316 mW |
| 26 | 398 mW |
| 27 | 500 mW |
| 28 | 630 mW |
| 29 | 800 mW |
| 30 | 1.0 W |
| 31 | 1.3 W |

| dBm | Watts |
|-----|-------|
| 32 | 1.6 W |
| 33 | 2.0 W |
| 34 | 2.5 W |
| 35 | 3.2 W |
| 36 | 4.0 W |
| 37 | 5.0 W |
| 38 | 6.3 W |
| 39 | 8.0 W |
| 40 | 10 W |
| 41 | 13 W |
| 42 | 16 W |
| 43 | 20 W |
| 44 | 25 W |
| 45 | 32 W |
| 46 | 40 W |
| 47 | 50 W |

Budget de liaison

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} - L_M + G_{RX} - L_{RX}$$

- P_{RX} = Received power (dBm)
- P_{TX} = Sender output power (dBm)
- G_{TX} = Sender antenna gain (dBi)
- L_{TX} = Sender losses (connectors etc.)(dB)
- L_{FS} = Free space loss (dB)
- L_M = Misc. losses (multipath etc.)(dB)
- G_{RX} = Receiver antenna gain (dBi)
- L_{RX} = Receiver losses (connectors etc.)(dB)
- S_{RX} = Receiver sensitivity (dBm)



Receiver's sensibility

How low can you go?



- Receiver sensitivity is a measure of how well the receiver performs and is defined as the power of the weakest signal the receiver can detect

Pertes en dB

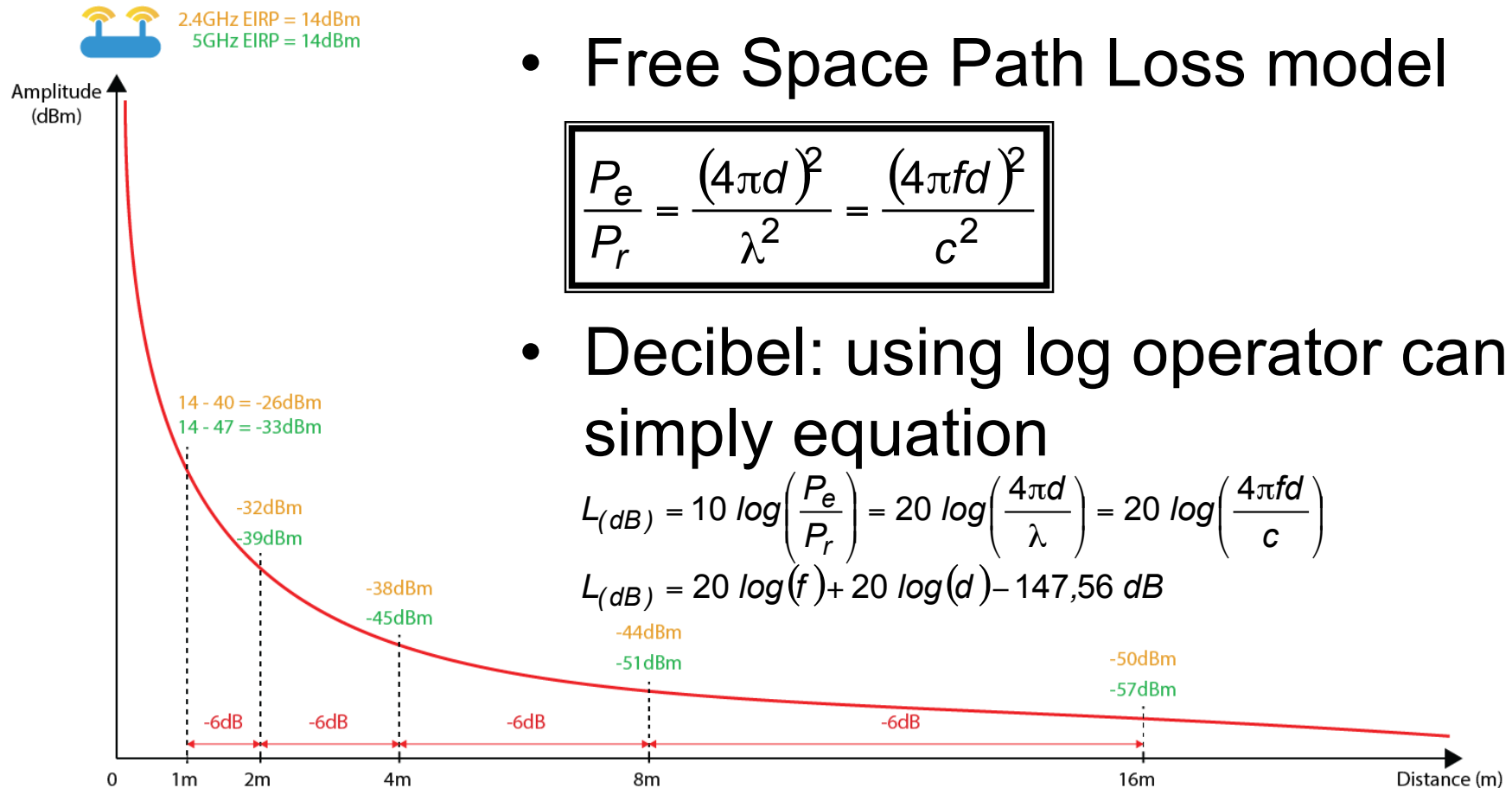
- Calcul en fonction de la fréquence et de la distance :

$$\frac{P_e}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2}$$

$$L_{(dB)} = 10 \log\left(\frac{P_e}{P_r}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi f d}{c}\right)$$

$$L_{(dB)} = 20 \log(f) + 20 \log(d) - 147,56 \text{ dB}$$

Attenuation in image



- Free Space Path Loss model

$$\frac{P_e}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{(4\pi f d)^2}{c^2}$$

- Decibel: using log operator can simply equation

$$L_{(dB)} = 10 \log\left(\frac{P_e}{P_r}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi f d}{c}\right)$$

$$L_{(dB)} = 20 \log(f) + 20 \log(d) - 147,56 \text{ dB}$$

Additional advantage of log scale: very large and very small values can be plotted on the same graph

Impact of signal frequency

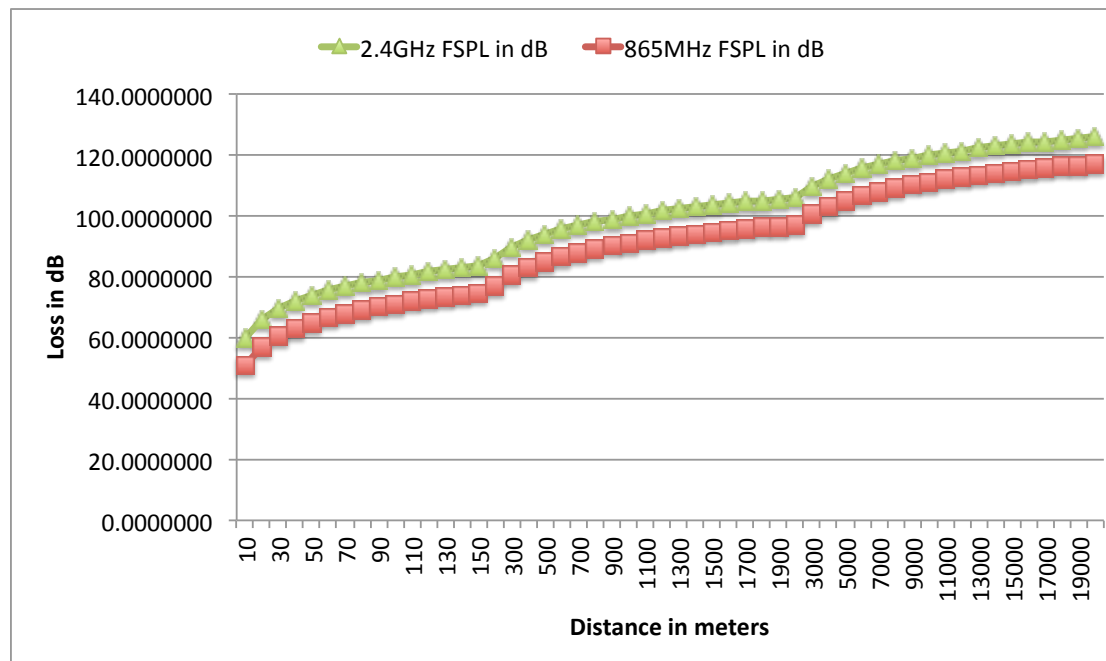
- Free Space Path Loss model
$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2$$

$$FSPL = \frac{P_t}{P_r} G_t G_r$$

$$L_{(dB)} = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_r}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20 \log\left(\frac{4\pi f d}{c}\right)$$

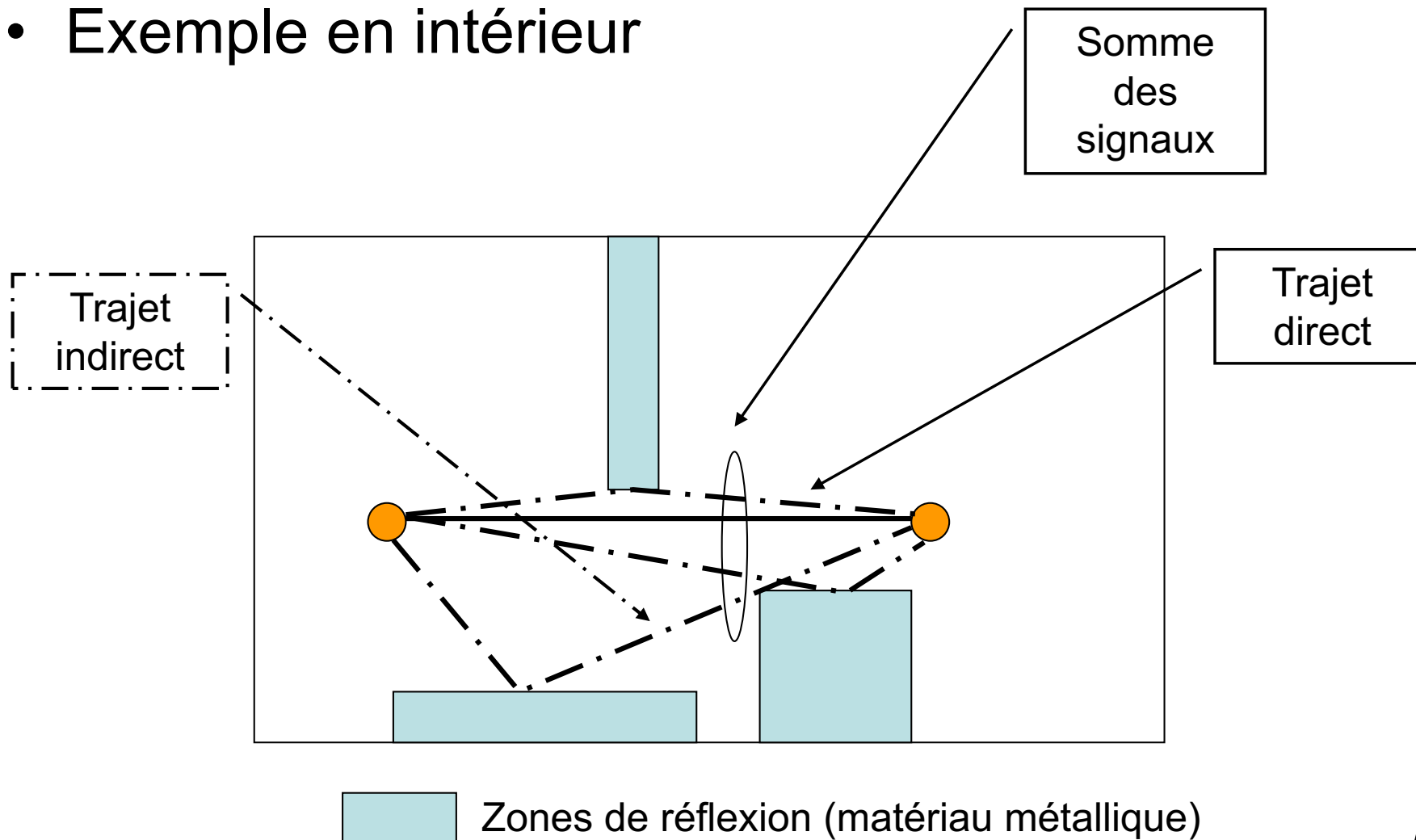
FSPL assume $G_t=G_r=1$

$$L_{(dB)} = 20 \log(f) + 20 \log(d) - 147,55 \text{ dB}$$



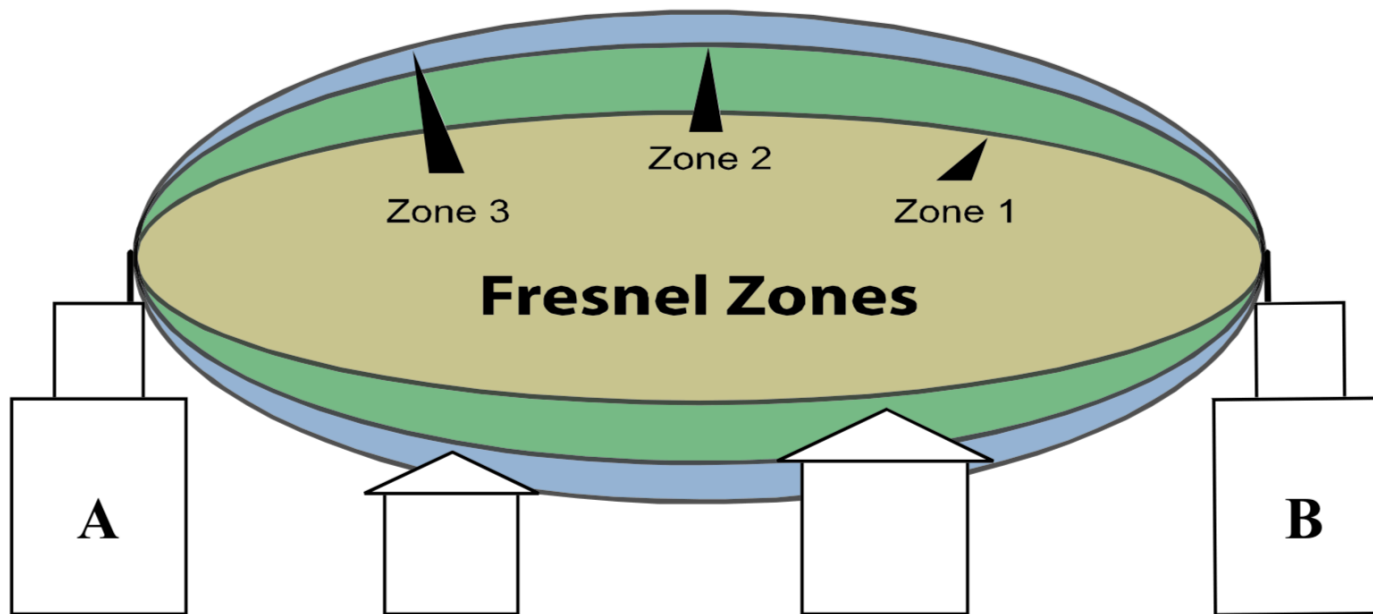
Notion de multi-trajets

- Exemple en intérieur

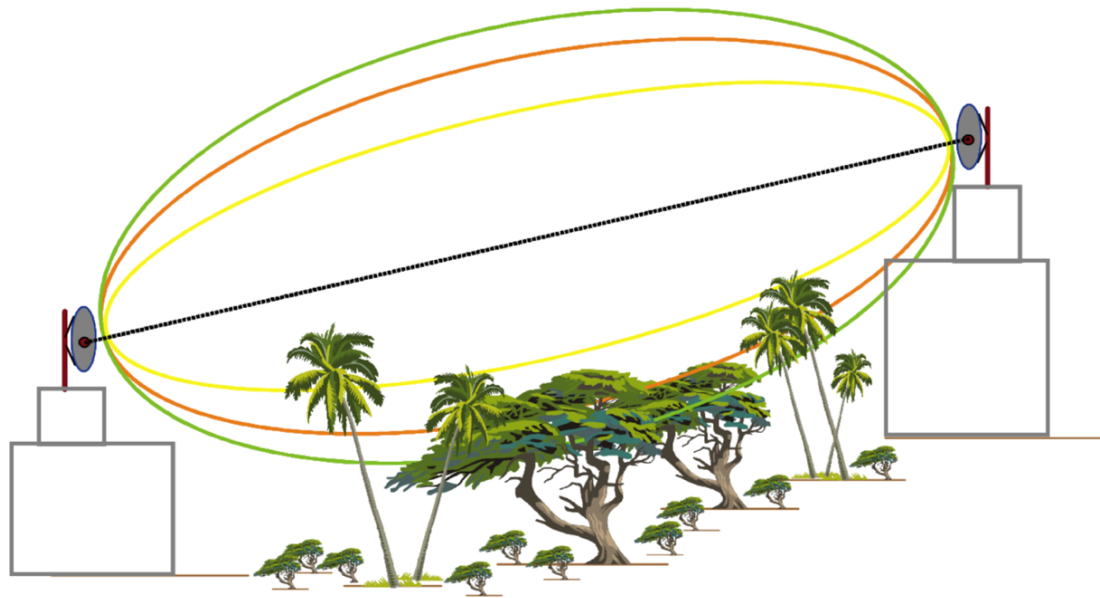


Fresnel zone

- LoS means clear Fresnel zone
- Football (american) shape
- Acceptable = 60% of zone 1 + 3m

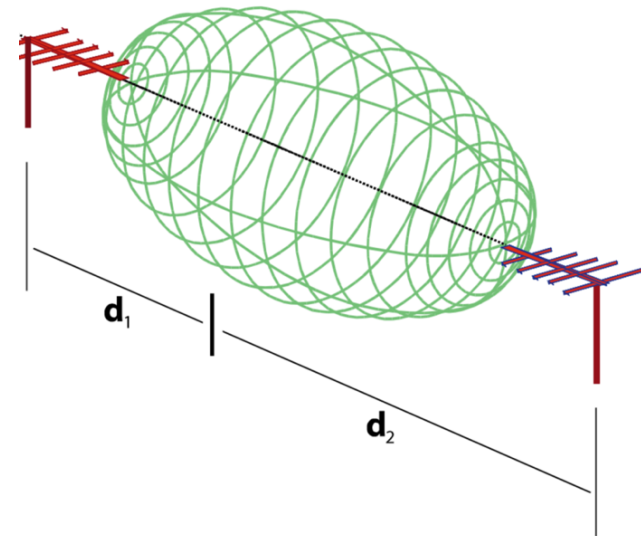


Clearing the Fresnel zone? Raise antennas!



$$r_n = \sqrt{\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

| Range Distance | 900 MHz Modems Required Fresnel Zone Diameter | 2.4 GHz Modems Required Fresnel Zone Diameter |
|------------------|---|---|
| 1000 ft. (300 m) | 16 ft. (5 m) | 11 ft. (3.4 m) |
| 1 Mile (1.6 km) | 32 ft. (10 m) | 21 ft. (6.4 m) |
| 5 Miles (8 km) | 68 ft. (21 m) | 43 ft. (13 m) |
| 10 Miles (16 km) | 95 ft. (29 m) | 59 ft. (18 m) |



Not always possible in dense environment!



Clearing the Fresnel zone? Let's use satellite!

- Low-orbit, low-cost; compact satellite for global coverage



<https://lacuna.space/first-successful-lacunasat-launch-in-2021/>

Point d'accès

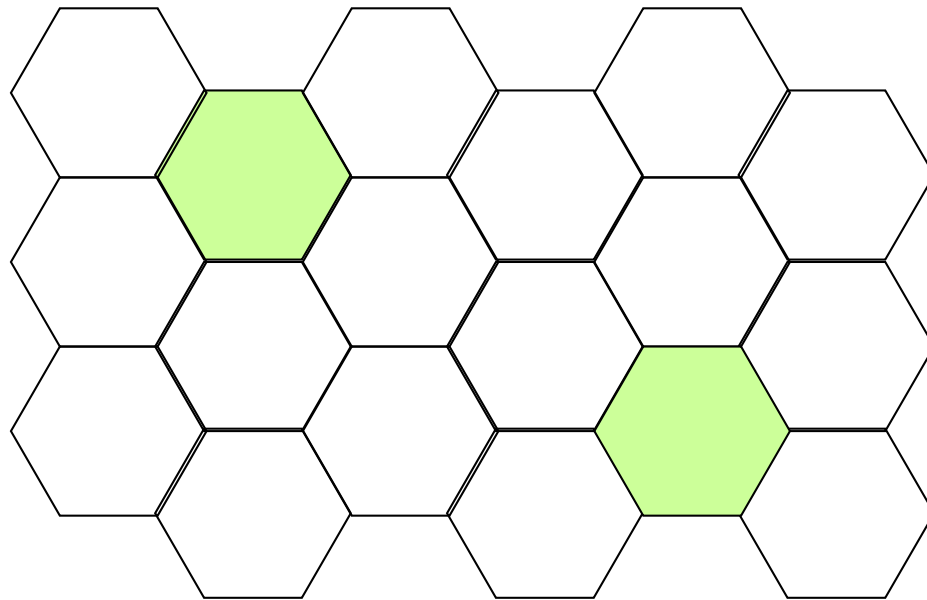
- Liaison réseau filaire - réseau sans fil
- Gère le trafic des mobiles d'une cellule en réception et en transmission de données
- Type de matériel : Station (dédiée de préférence) avec :
 - carte réseau traditionnelle pour le réseau filaire
 - carte émission / réception radio
 - couche logicielle adéquate

Organisation cellulaire

- **Cellule de communication = BSS** : Basic Set Service
de taille variable :
 - liée à l'environnement
 - liée à la puissance du mobile, car le point d'accès (fixe) dispose à priori d'une source d'énergie suffisante
- **ESS** : Extended Set Service :
plusieurs BSS \Leftrightarrow plusieurs AP (Access Point)

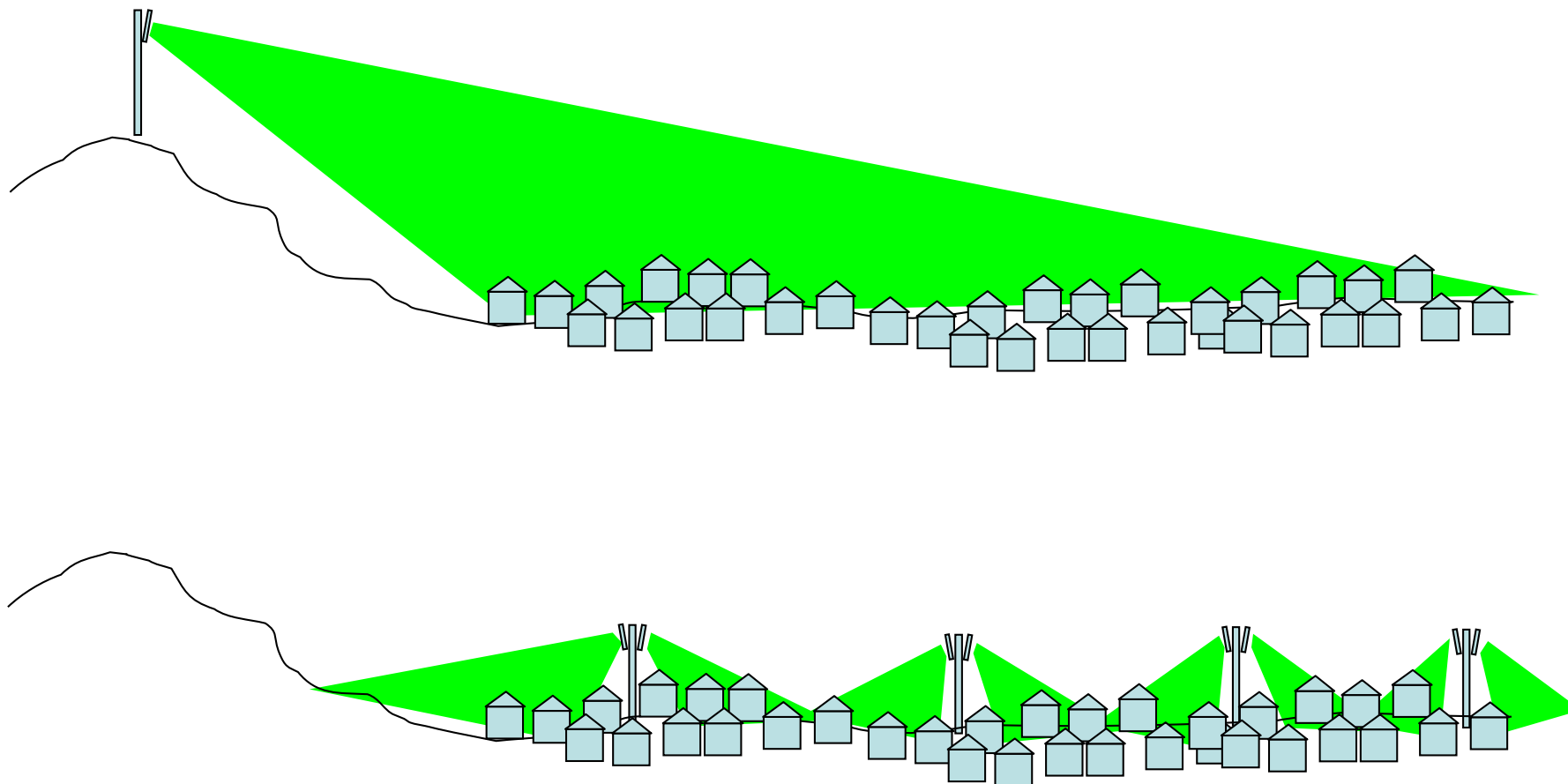
Organisation cellulaire

- Réutilisation de la même fréquence sur des zones géographiques différentes



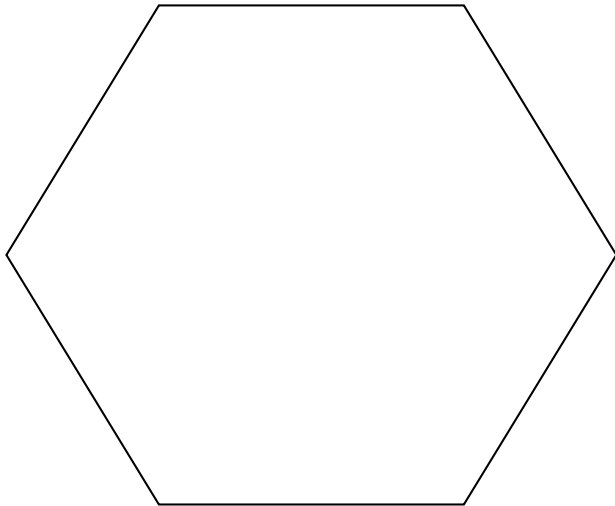
- **Avantage** : augmentation de la capacité
- **Inconvénient** : augmentation des interférences

Implantation des antennes



Exemple : couverture d'une zone

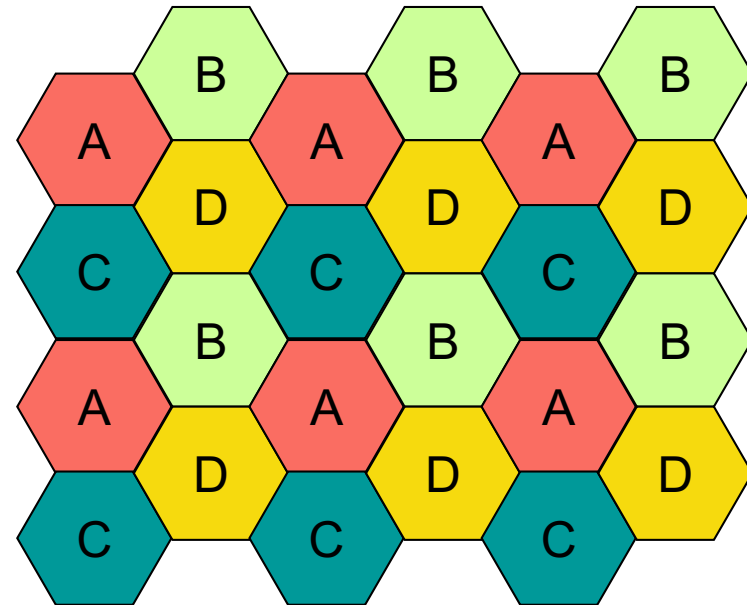
1 cellule



Ex: Bande passante de 100 MHz
200 KHz nécessaire par canal

100MHz pour la cellule
 $100\text{M} / 200\text{K} = \underline{\underline{500 \text{ canaux}}}$

Organisation
en 6 clusters de 4 cellules



$100\text{MHz} / 4 \text{ cellules} = 25 \text{ MHz par cellule}$
 $25\text{M} / 200\text{K} = 125 \text{ canaux par cellule}$
 $125 \text{ canaux} * 24 \text{ cellules} = \underline{\underline{3000 \text{ canaux}}}$

Gain = nombre de clusters

Organisation cellulaire

- **Nombre d'utilisateurs :**

$$n = \frac{W}{B} \times \frac{m}{N}$$

avec :

- W = largeur de la bande passante
- B = bande passante nécessaire par utilisateur
- N = facteur de réutilisation spectrale
= nombre de cellules par cluster
- m = nombre total de cellules
(quand $m > n$ cela devient intéressant)

Notion de qualité de service, prise en compte de la complexité, taille des terminaux, etc.

Organisation cellulaire

- **Plusieurs types de cellules :**
 - Femtocellules (qq mètres)
 - Picocellules (qq dizaines de mètres)
 - Microcellules (zone urbaine, antennes basses)
 - Macrocellules (zone urbaine, antennes hautes)
 - Megacellules Satellites (centaines de kms)
- Raisons : taille de la zone à couvrir, nombre d'utilisateurs, bâtiments, etc.

Organisation cellulaire

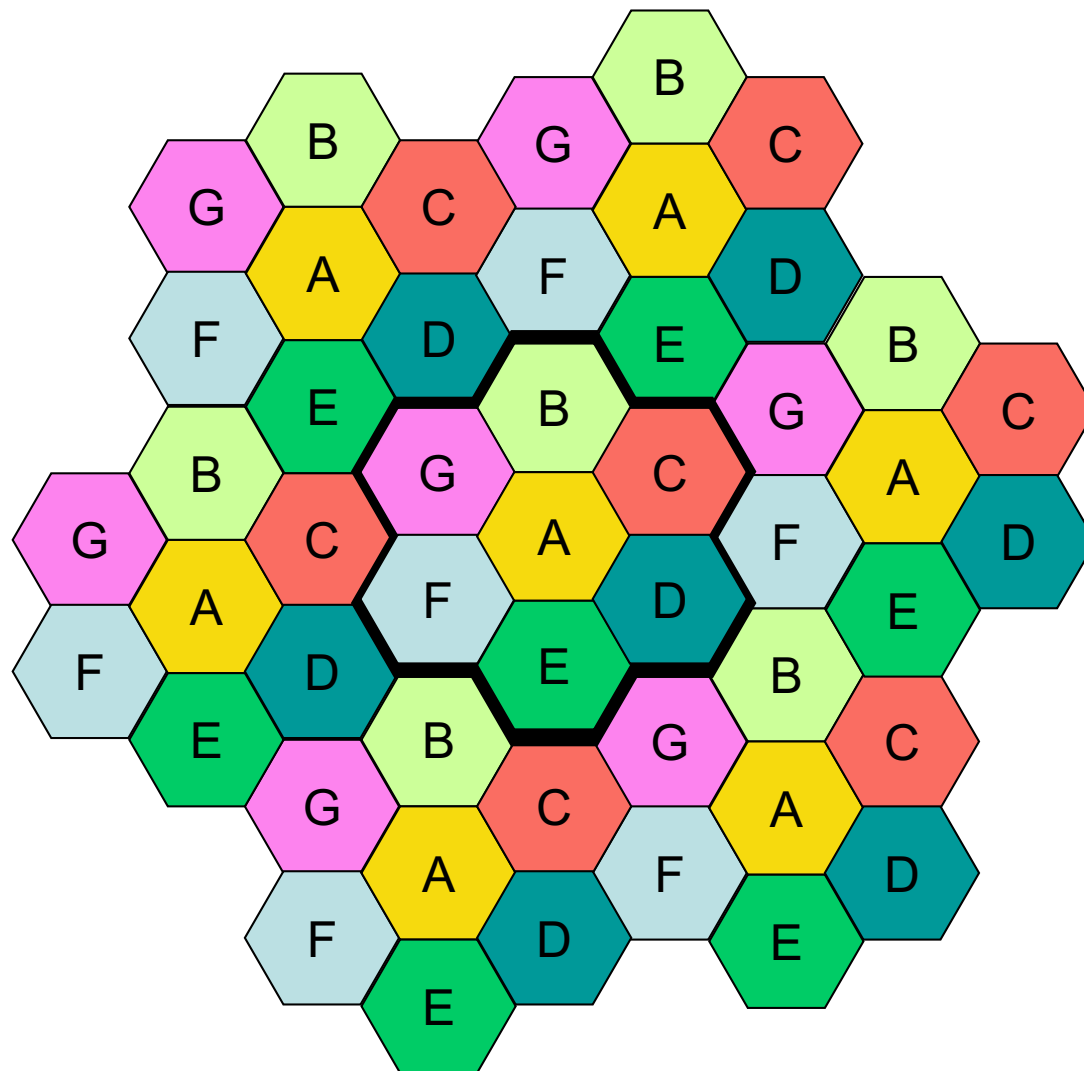
- Facteur de réutilisation

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N}$$

avec :

- D = distance entre cellules
- R = rayon de la cellule
- N = taille du cluster

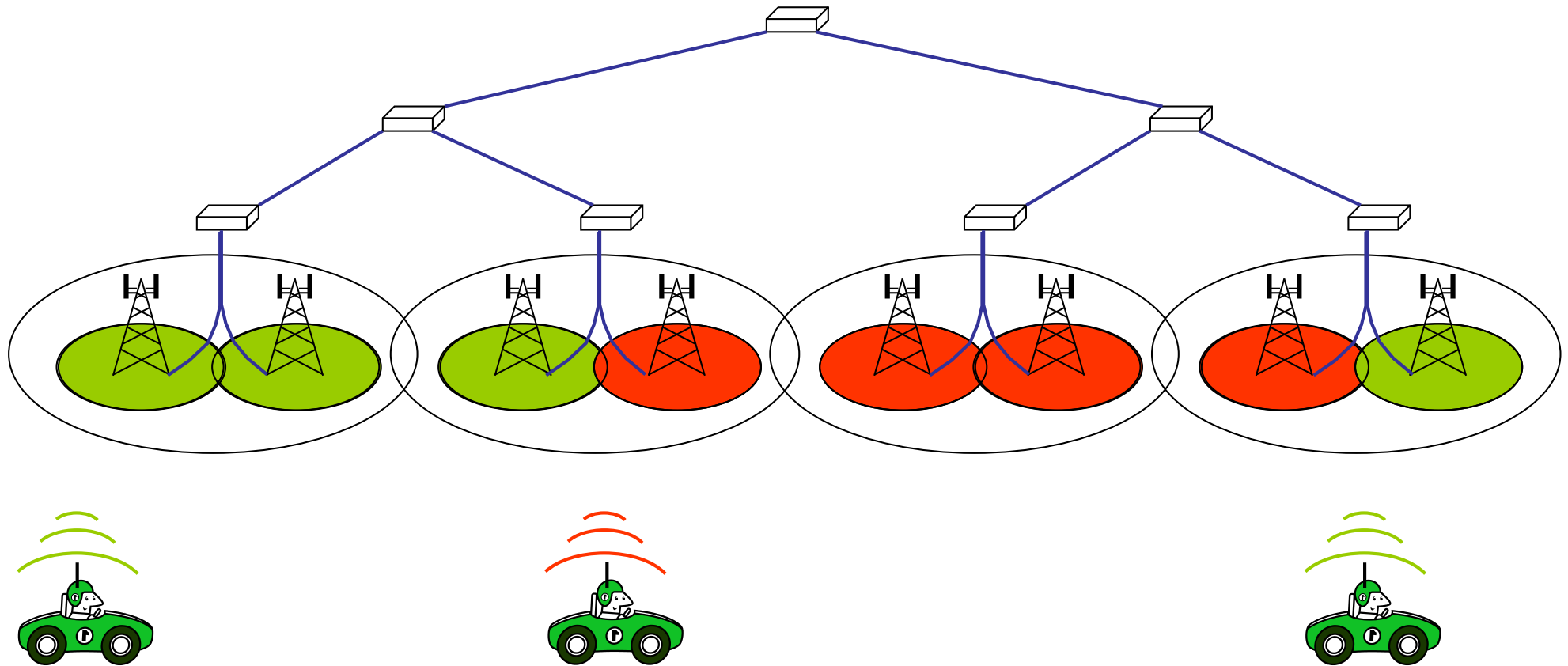
Exemple en zone urbaine, N=7



Mécanisme de "Handover"

- Procédé issu du téléphone cellulaire GSM
- Permet au mobile de continuer un transfert commencé dans une cellule, dans une autre
 - Intercellulaire : passage d'une cellule à une autre (AP<->AP)
 - Si le signal est trop faible (en général)
 - Si un point d'accès sature (partage de trafic)
 - Intracellulaire :
Changement de canal (si signal fort) avec qualité faible
 - Inter-réseau
Très important pour les systèmes 3G
- On parle de *Handoff* dans les systèmes US

Mécanisme de "Handover"



En veille

En communication
Mécanisme de Handover

En veille

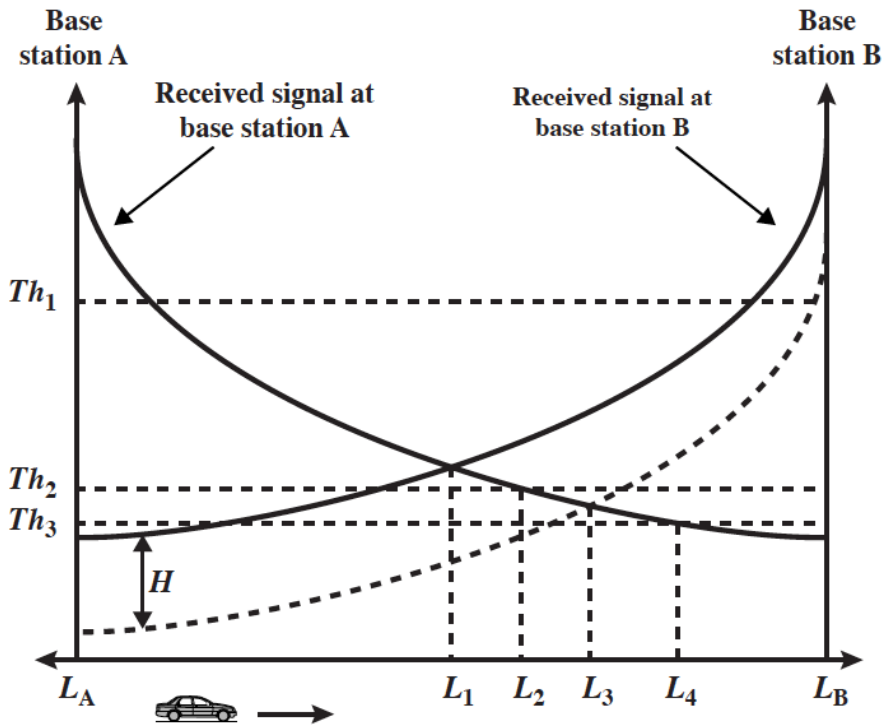
Mécanisme de "Handover"

2. Choix de la cellule cible

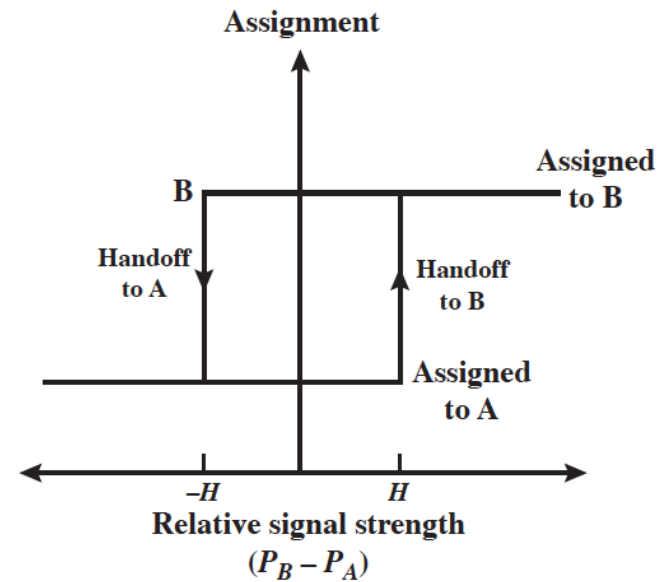
le mobile gère une liste de candidates (5 maxi en GSM) si il reçoit un signal suffisant pour le canal pilote

- puissance relative des signaux ($P_2 > P_1$)
- puissance relative des signaux avec seuil ($P_1 < \text{seuil}$ et $P_2 > P_1$)
- puissance relative des signaux avec hystérésis ($P_2 > P_1 + \text{seuil}$)
- puissance relative des signaux avec seuil et hystérésis ($P_1 < \text{seuil}_1$ et $P_2 > P_1 + \text{seuil}_2$)

Hysteresis-based selection



(a) Handoff decision as a function of handoff scheme

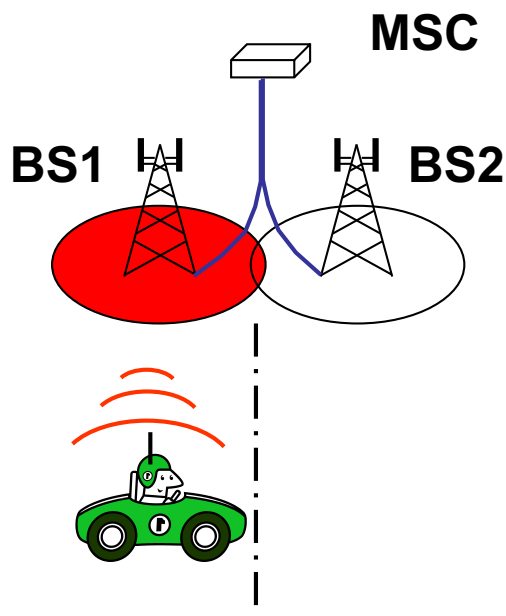


(b) Hysteresis mechanism

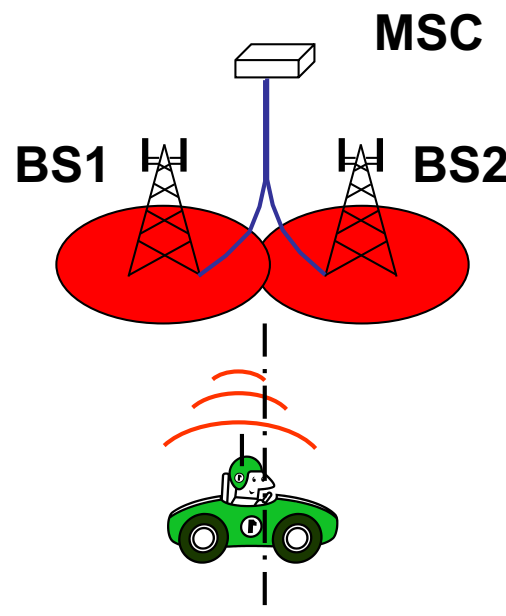
Mécanisme de "Handover"

- Handover doux (soft-handover)

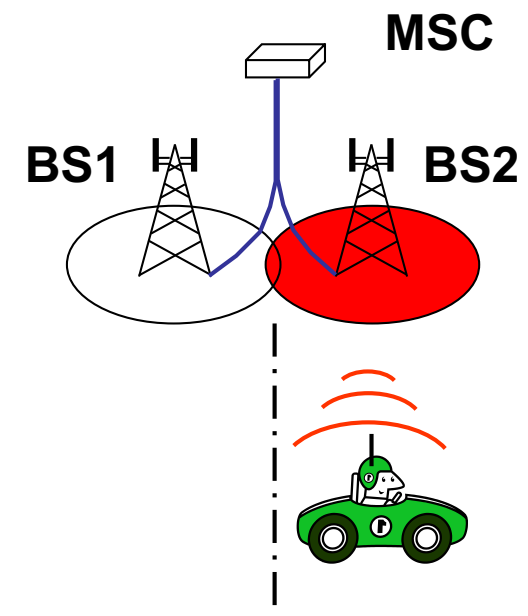
Avant



Pendant



Après

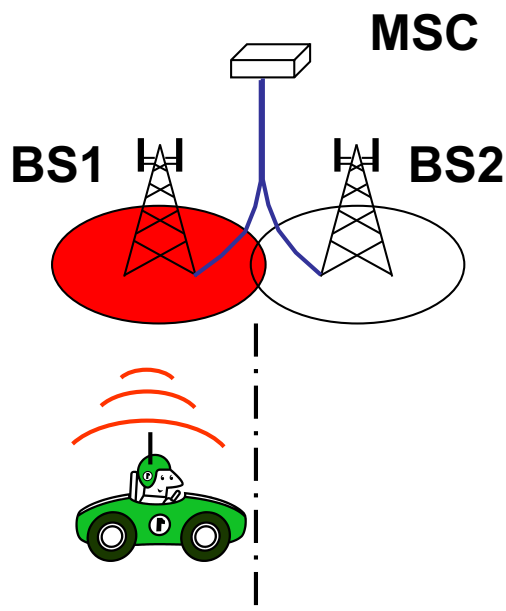


- Plus de consommation de ressources
- + Meilleur confort lors de passage d'une cellule à l'autre

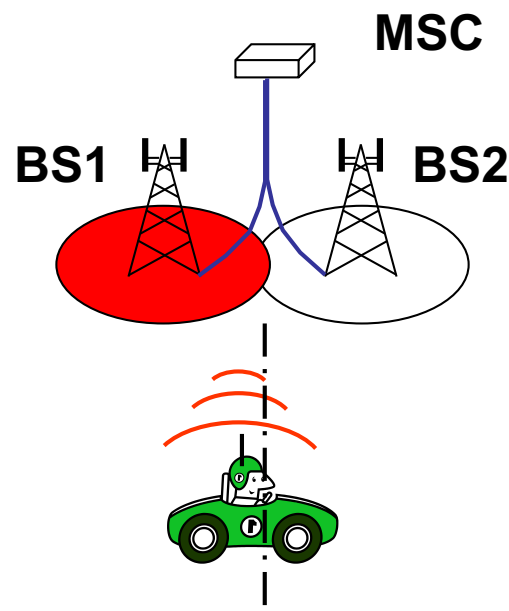
Mécanisme de "Handover"

- Handover dur (hard-handover)

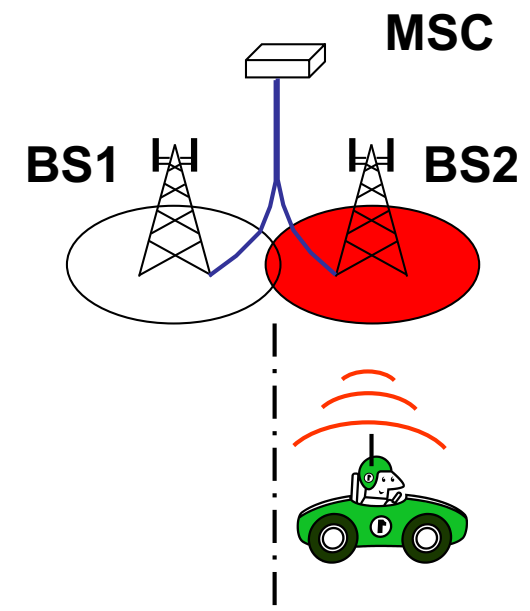
Avant



Pendant



Après



- Coupure de communication la + réduite possible en établissant le lien à l'avance
- + Pas de sur-consommation des ressources

WiFi - IEEE 802.11

Définition

- Le **WI-FI** répond à la norme **IEEE 802.11**. La norme IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11) est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN).
- Le nom **Wi-Fi** (contraction de **Wireless Fidelity**) correspond initialement au nom donné à la certification délivrée par la WECA (<http://www.weca.org/>) Etats-Unis (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), l'organisme chargé de maintenir l'interopérabilité entre les matériels répondant à la norme 802.11.
- C' est la Wi-Fi Alliance qui pose le **label** “ Wi-Fi ” et certifie les produits des constructeurs
- Par abus de langage (et pour des raisons de marketing) le nom de la norme se confond aujourd'hui avec le nom de la certification. Ainsi un réseau Wifi est en réalité un réseau répondant à la norme 802.11.

WiFi est un réseau cellulaire

Antamedia HotSpot Software

192.168.0.11 - 192.168.0.49



192.168.0.51 - 192.168.0.99



192.168.0.101



192.168.0.102



192.168.0.103



Ethernet connection

Network Topology Example

192.168.0.10



Access Point

192.168.0.50



Access Point

192.168.0.2



Router

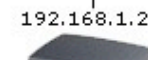


Switch

192.168.0.1



192.168.1.1



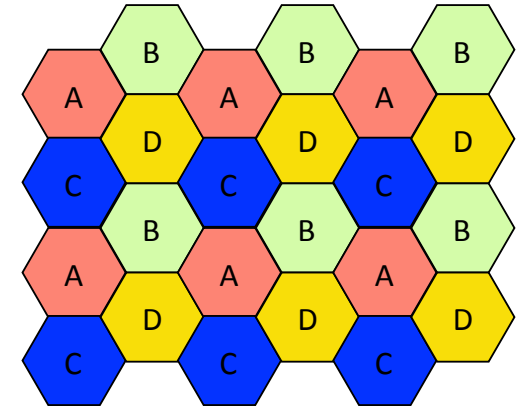
Router

ADSL



Internet

©2006 Antamedia



IEEE 802.11 : Architecture

- Il existe deux types de topologies :
 - Le **mode infrastructure**, avec **BSS** et **ESS**.
 - En mode infrastructure **BSS**, le réseau est composé d'un point d'accès qui permet aux différentes stations qui se trouvent dans sa cellule d'échanger des informations.
 - En mode infrastructure **ESS**, le réseau comporte plusieurs points d'accès reliés entre eux par un DS
 - Le **mode ad-hoc**
 - En mode ad-hoc, ne comporte pas de points d'accès, ce sont les stations (avec cartes Wi-Fi) qui entrent elles mêmes en communication.

IEEE 802.11 : Architecture BSS

Caractéristiques principales :

- 1 seul point d'accès
- Nom de réseau (SSID)
Service Set Identifier



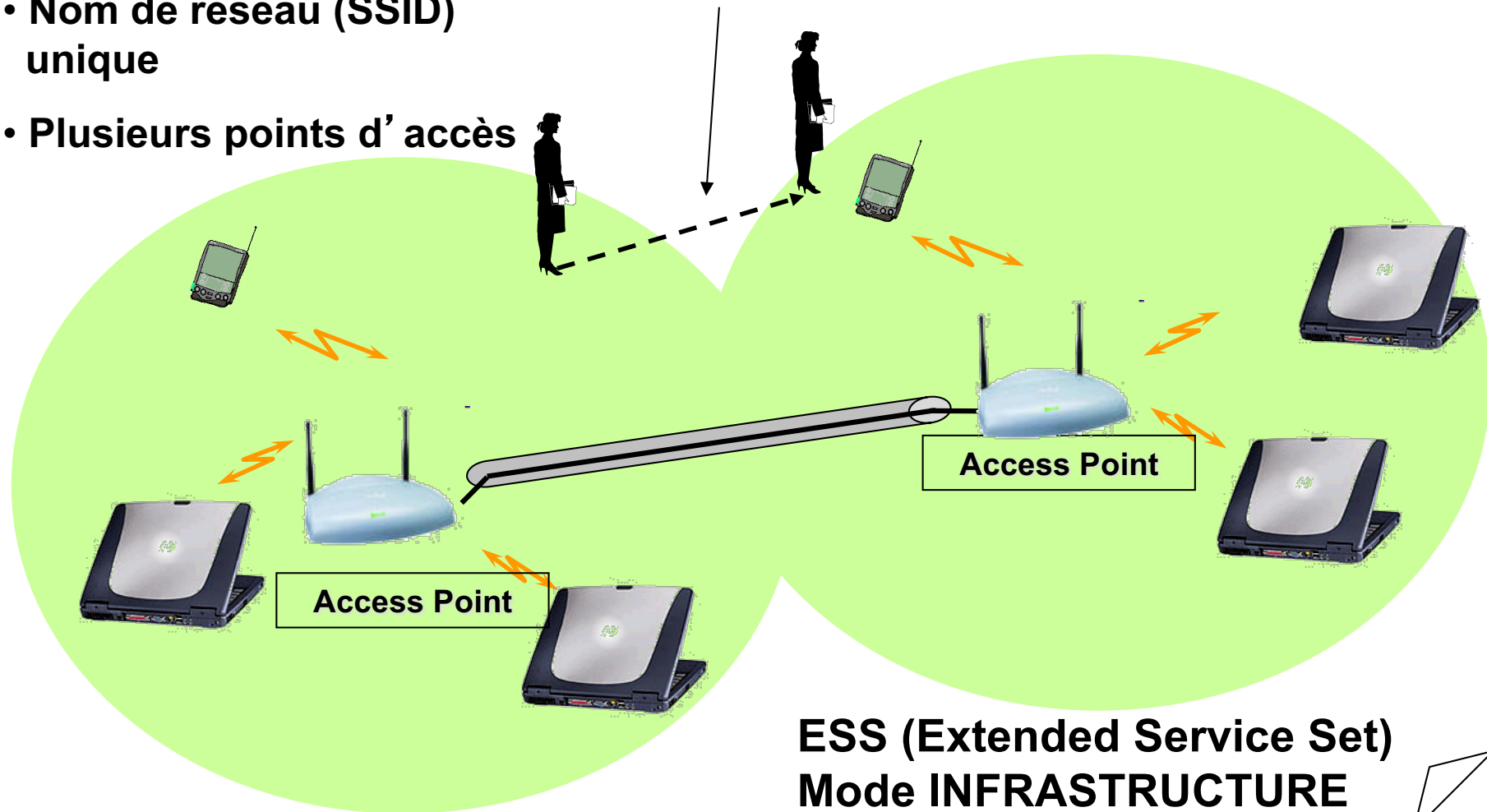
BSS (Basic Service Set)

IEEE 802.11 : Architecture ESS et handover

Caractéristiques principales :

- Nom de réseau (SSID) unique
- Plusieurs points d'accès

Mécanisme de handover



Premiers standards IEEE 802.11

- **802.11** : L' ancêtre du réseau sans fil, sur 2,4 GHz modulation DSSS ou saut de fréquence (aucune norme imposée), d' un débit de 2 Mb/s et pratiquement pas inter-opérable de constructeur à constructeur.
- **802.11b** : premier réseau Ethernet sans fil interopérable, sur 2,4 GHz, offrant un débit physique de 11 Mb/s (modulation DSSS, accès par CSMA/CA et détection de porteuse)
- **802.11a** : (baptisé WiFi 5) historiquement c' est le second projet de réseau Ethernet sans fil sur 5 GHz, elle permet d'obtenir un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels). Pas de compatibilité avec 802.11b
- **802.11g** : Adaptation d' OFDM aux réseaux 802.11b (compatibilité) (passage à 54 Mb/s). La norme 802.11g a une compatibilité ascendante avec la norme 802.11b.

INFO

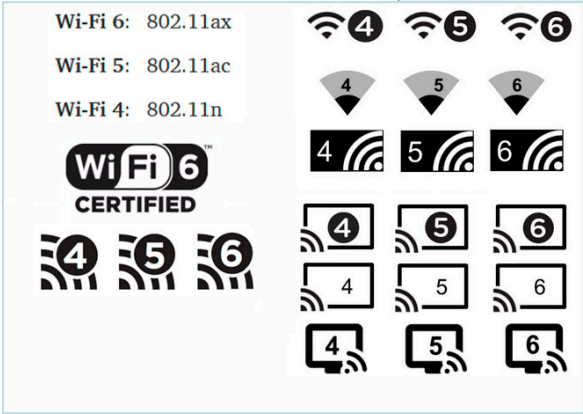
| Réseaux locaux 802.11 : standards physiques [masquer] | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|-------------------------|--|---|--------------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|
| Protocole 802.11 | date ² | Fréquence (GHz) | largeur de bande (MHz), (GHz) | Débit binaire ³ (Mbit/s), (Gbit/s) | Nombre maximum de flux MIMO | Codage / Modulation | Portée | |
| | | | | | | | Intérieur (mètres) | Extérieur (mètres) |
| 802.11-1997 (d'origine) | juin 1997 | 2,4 | 79 ou 22 ⁴ MHz | 1, 2 Mbit/s | NC | FHSS, DSSS | 20 m | 100 m |
| 802.11a | sept 1999 | 5 3,7 ^[A] | 20 MHz | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s | 1 | OFDM | 35 m — | 120 m 5 000 m ^[A] |
| 802.11b | sept 1999 | 2,4 | 22 MHz | 1, 2, 5,5, 11 Mbit/s | 1 | DSSS | 35 m | 140 m |
| 802.11g | juin 2003 | 2,4 | 20 MHz | 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s | 1 | OFDM | 38 m | 140 m |
| 802.11n | oct 2009 | 2,4 / 5 | 20 MHz | 7,2 à 72,2 Mbit/s ^[B] (6,5 à 65) ^[C] | 4 | OFDM | 70 m (2,4 GHz) 12-35 m (5 GHz) | 250 m ⁵ |
| | | | 40 MHz | 15 à 150 Mbit/s ^[B] (13,5 à 135) ^[C] | | | | |
| 802.11ac | déc 2013 | 5 | 20 MHz | 6,5 à 346,8 Mbit/s ^[D] | 8 | OFDM | 12-35 m | 300 m |
| | | | 40 MHz | 13,5 à 800 Mbit/s ^[D] | | | | |
| | | | 80 MHz | 19,3 Mbit/s à 1,7 Gbit/s ^[D] | | | | |
| | | | 160 MHz | 58,5 Mbit/s à 3,4 Gbit/s ^[D] | | | | |
| 802.11ad | déc 2012 | 57 à 71 | 1,7 à 2,16 GHz | jusqu'à 6,75 Gbit/s ⁶ | NC | OFDM ou porteuse unique | 10 m ⁷ | |
| 802.11af | février 2014 | 0,054 à 0,79 | 6 à 8 MHz | 1,8 à 568,9 Mbit/s | 1, 2, 4 | OFDM | 100 m | 1000 m |
| 802.11ah | mai 2017 ² | 0,9 | 1 à 8 MHz | 0,6 à 8,6 Mbit/s ⁸ | 4 | OFDM | 100 m | |
| 802.11ax | novembre 2020 | 2,4 / 5 | 20 MHz | 8 Mbit/s à 1,1 Gbit/s ^[D] | 8 | OFDM, OFDMA | 12-35 m | 300 m |
| | | | 40 MHz | 16 Mbit/s à 2,3 Gbit/s ^[D] | | | | |
| | | | 80 MHz | 34 Mbit/s à 4,8 Gbit/s ^[D] | | | | |
| | | | 160 MHz | 68 Mbit/s à 10,5 Gbit/s ^[D] | | | | |
| 802.11ay | décembre 2020 ⁹ | 58,3 à 70,2 | 2,16 à 8,64 GHz | 20 à 176 Gbit/s | 4 ¹⁰ | OFDM ou <i>single carrier</i> | 100 m | 500 |

Nouvelles générations WiFi

- Terme "génération" pour le grand public

Wi-Fi Generations

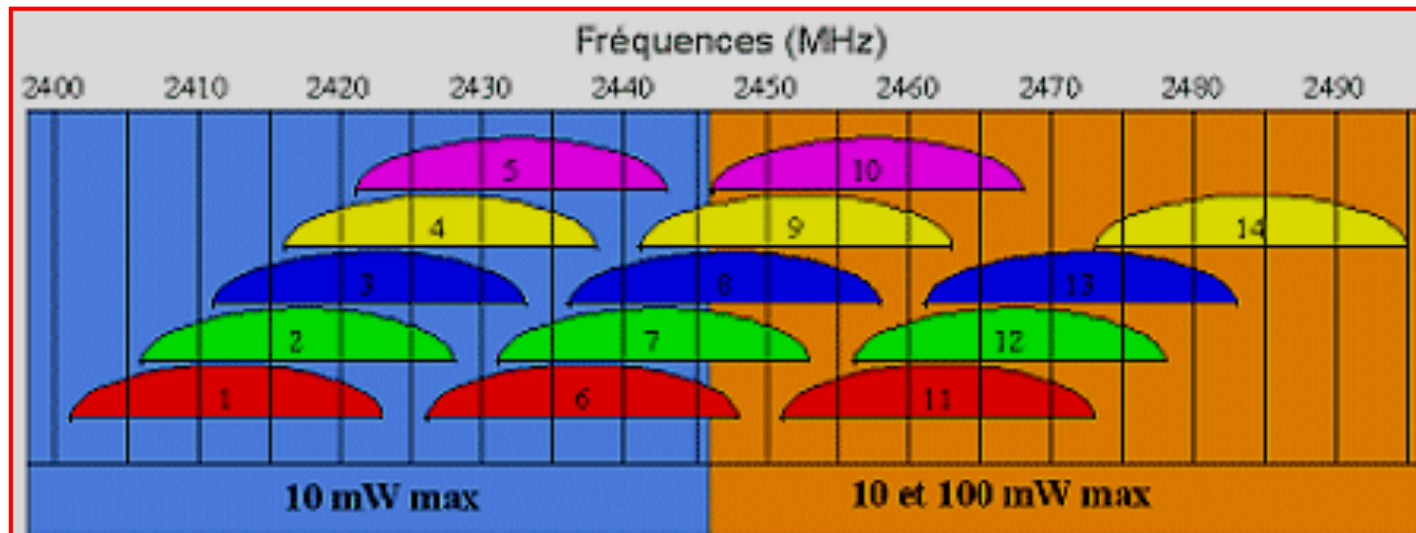
| Generation/IEEE Standard | Maximum Linkrate | Adopted | Frequency |
|--------------------------|--------------------|---------|-----------|
| Wi-Fi 6E (802.11ax) | 600 to 9608 Mbit/s | 2019 | 6 GHz |
| Wi-Fi 6 (802.11ax) | 600 to 9608 Mbit/s | 2019 | 2.4/5 GHz |
| Wi-Fi 5 (802.11ac) | 433 to 6933 Mbit/s | 2014 | 5 GHz |
| Wi-Fi 4 (802.11n) | 72 to 600 Mbit/s | 2008 | 2.4/5 GHz |
| 802.11g | 6 to 54 Mbit/s | 2003 | 2.4 GHz |
| 802.11a | 6 to 54 Mbit/s | 1999 | 5 GHz |
| 802.11b | 1 to 11 Mbit/s | 1999 | 2.4 GHz |
| 802.11 | 1 to 2 Mbit/s | 1997 | 2.4 GHz |



Bande ISM

(Industrial, Scientific and Medical)

- Bande ISM
 - Bande divisée en 14 canaux de 20 MHz
 - Problème de recouvrement
 - Superposition de 3 réseaux au sein d'un même espace
 - Largeur de bande 83 MHz



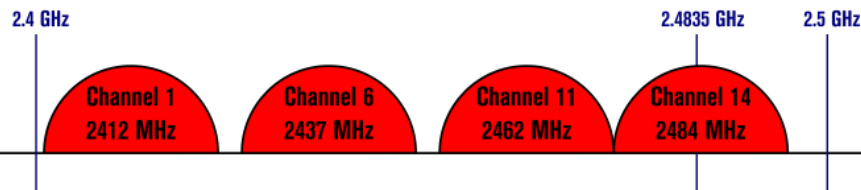
| Canal | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fréquence (GHz) | 2.412 | 2.417 | 2.422 | 2.427 | 2.432 | 2.437 | 2.442 | 2.447 | 2.452 | 2.457 | 2.462 | 2.467 | 2.472 | 2.484 |

Canaux sans recouvrement

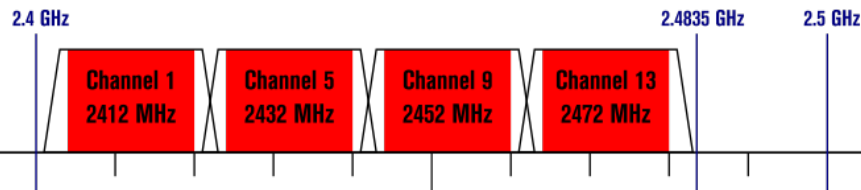
- Les canaux 1, 6 et 11 sont les plus utilisés

Non-Overlapping Channels for 2.4 GHz WLAN

802.11b (DSSS) channel width 22 MHz



802.11g/n (OFDM) 20 MHz ch. width - 16.25 MHz used by sub-carriers



IEEE 802.11

Couche Liaison

Couche Liaison de données

| | |
|--------------------------------------|--|
| Couche liaison de données | LLC 802.2 Contrôle de liaison logique |
| | MAC 802.11, sécurité, etc ... Contrôle d'accès au support |

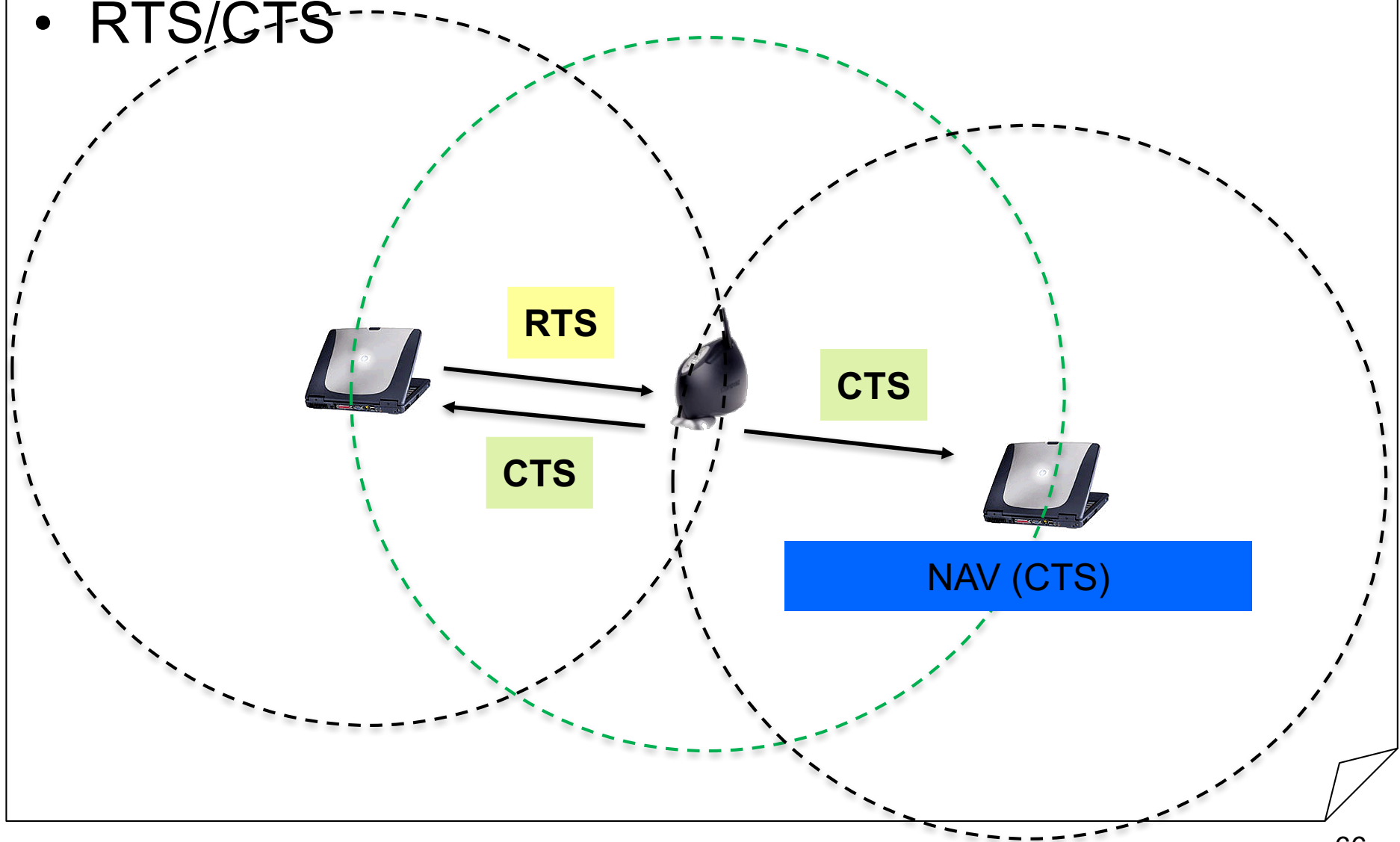
- La couche MAC définit 2 méthodes d'accès différentes
 - La méthode CSMA/CA utilisant la Distributed Coordination Function
 - La Point Coordination Function (PCF) : voix, vidéos ...
- La couche MAC offre 2 mécanismes de robustesse :
 - sommes de contrôle (CRC sur 32 bits)
 - fragmentation des paquets

CSMA/CA

- **Rappel** : dans un réseau **éthernet** filaire, utilisation de la méthode d'accès **CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)**
- Pour un environnement sans fil : utilisation **CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)**
 - 2 stations communiquant avec un récepteur (AP) ne s'entendent pas forcément mutuellement en raison de leur rayon de portée.
 - Caractéristique : utilise un mécanisme d'esquive de collision basé sur un principe d'accusés de réception (RTS/CTS) réciproques entre l'émetteur et le récepteur
 - Ecoute du support et Network Allocation Vector (NAV)
 - Deux méthodes d'accès au canal basées sur CSMA/CA ont été implémentées pour les réseaux 802.11 : **DCF** et **PCF**

Problème du "terminal caché"

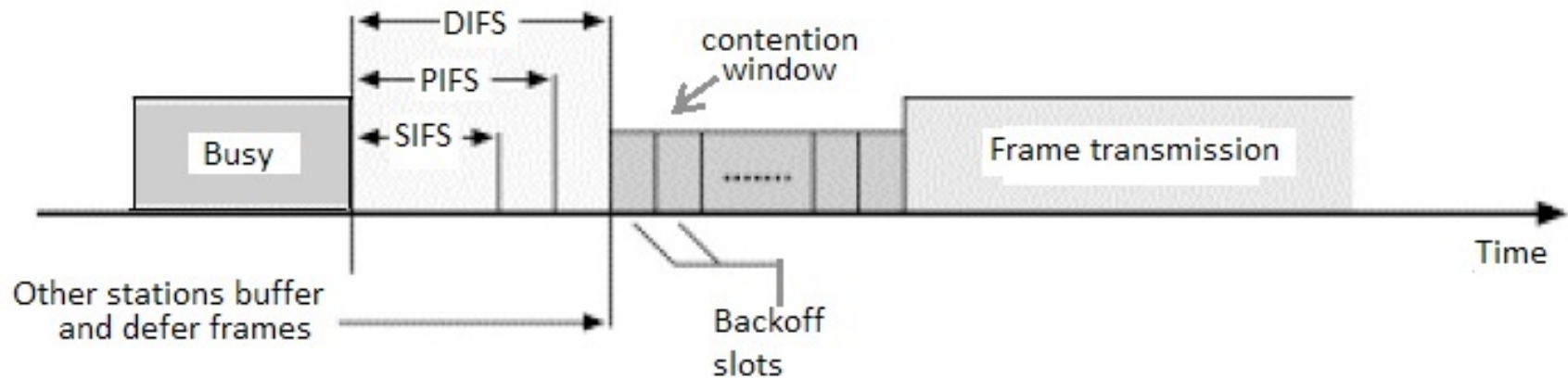
- RTS/CTS



Inter Frame Spacing

CSMA/CA est basé sur :

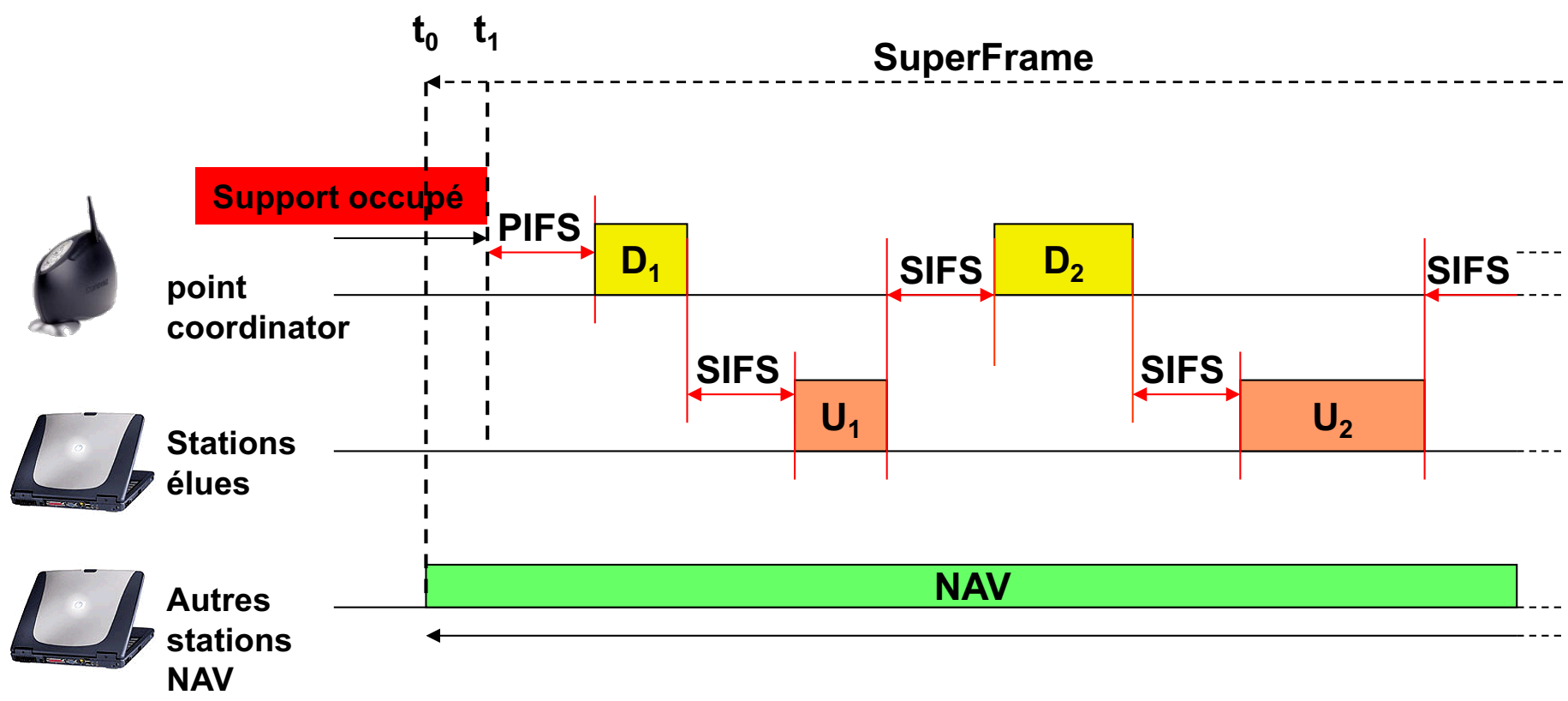
- Les temporisateurs IFS (Inter Frame Spacing)
 - SIFS (Short IFS) : Plus haute priorité pour ACK, CTS,...
 - PIFS (PCF IFS) : Priorité Moyenne, pour le PCF
 - DIFS (DCF IFS) : Priorité Faible pour le DCF
- Algorithme de Backoff: attente aléatoire dans la fenêtre de contention



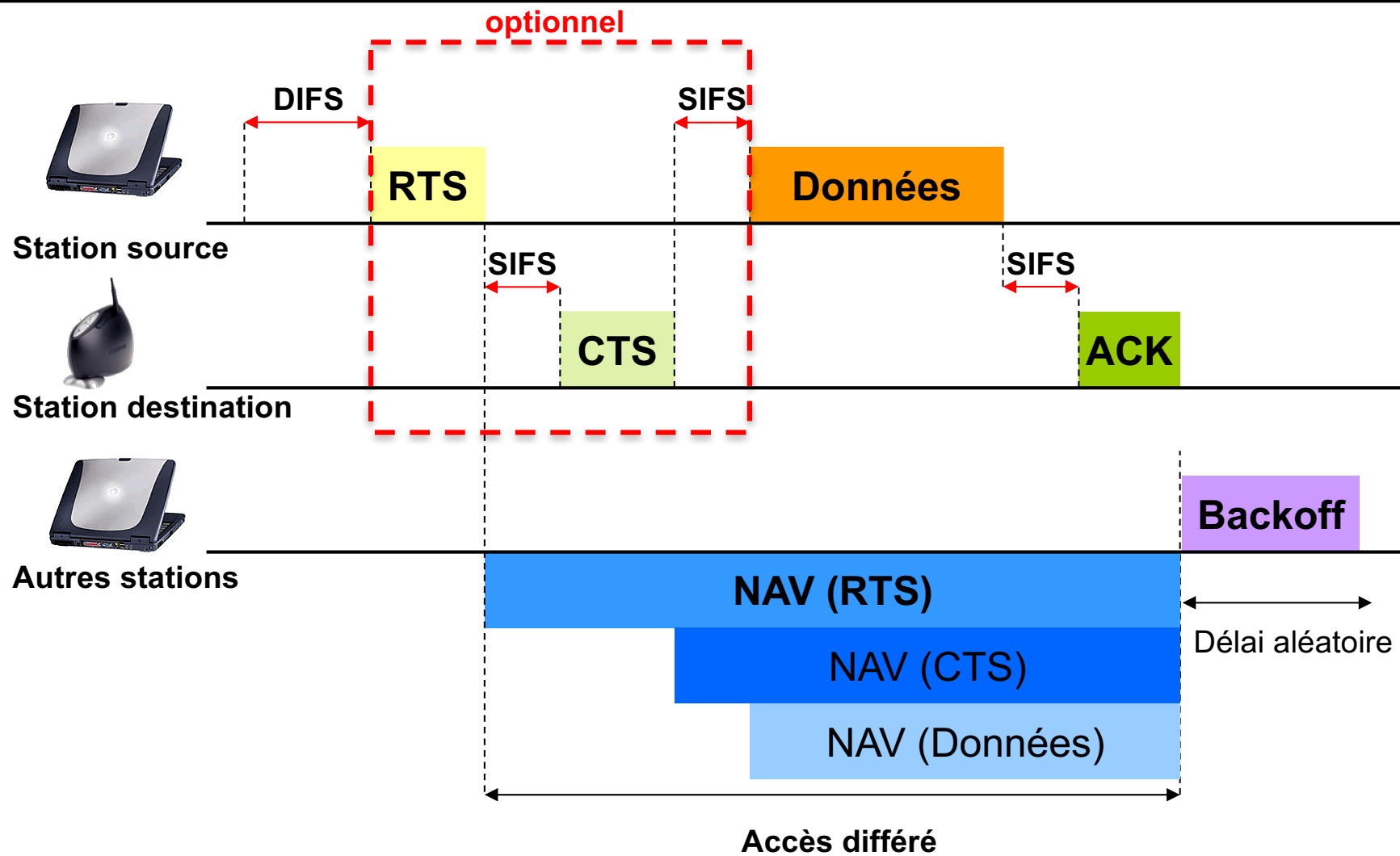
- Le but de l'attente aléatoire est de répartir le début des transmissions

INFO

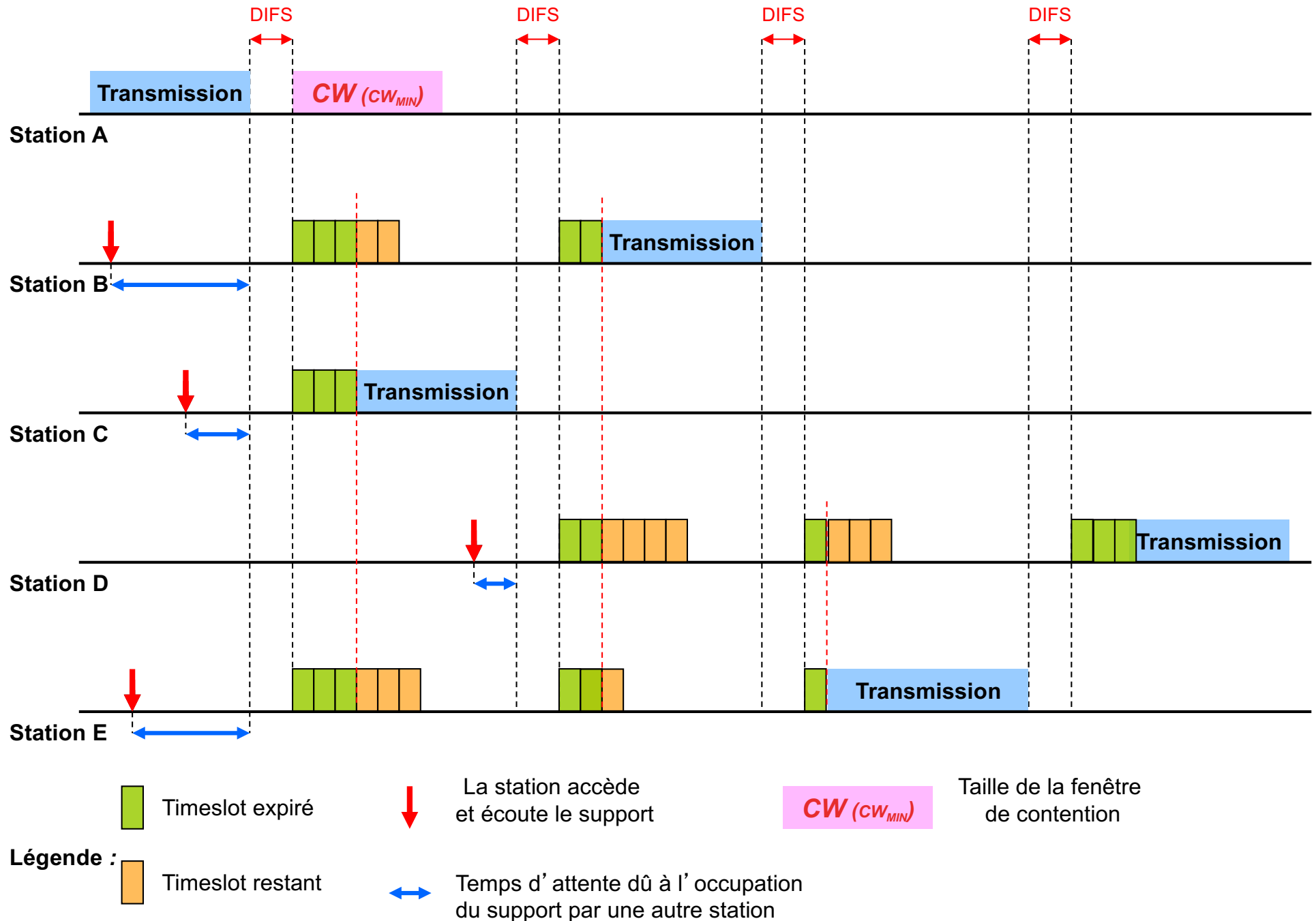
PCF (Point Coordination Function)



DCF (Distributed Coordination Function)

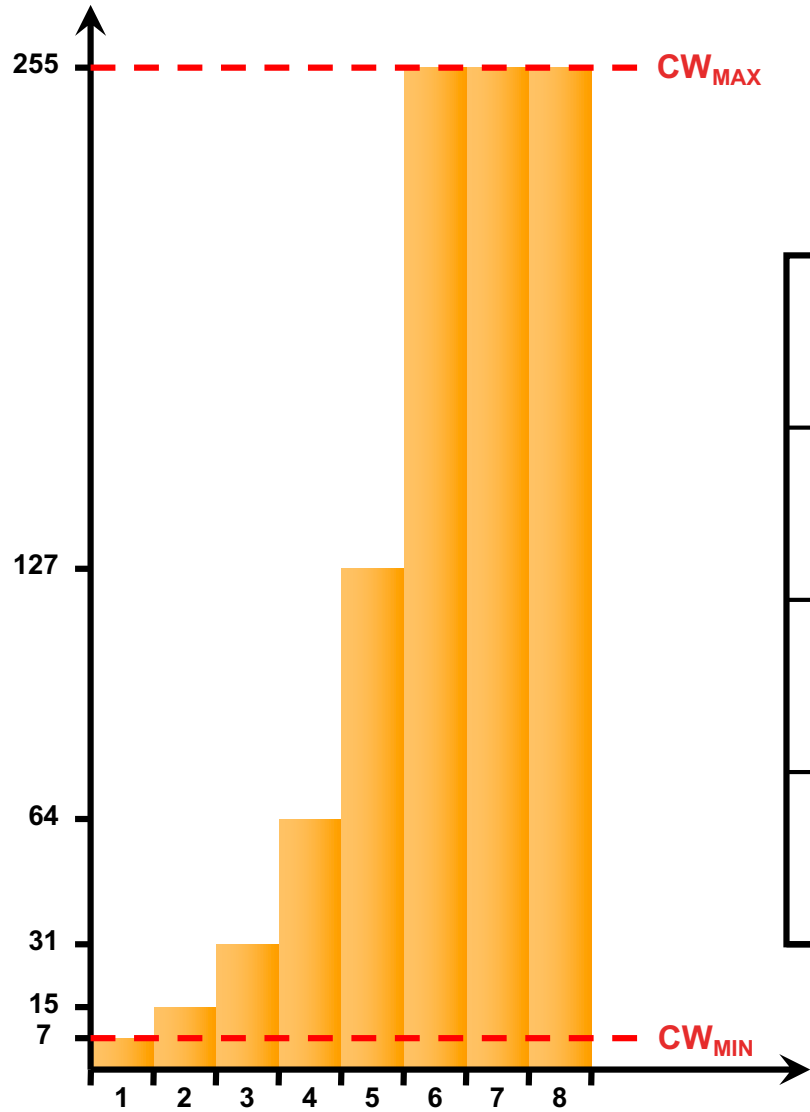


Supports empruntés à G. Pujolle



INFO
fenêtre
de contention

Durées



| | FHSS | DSSS | IR |
|----------------------|------|------|----|
| Timeslot (μs) | 50 | 20 | 8 |
| SIFS (μs) | 28 | 10 | 7 |
| DIFS (μs) | 128 | 50 | 19 |
| PIFS (μs) | 78 | 30 | 15 |