

Mesures de quelques rayonnements électromagnétiques dans la bande de 100 MHz à 10 GHz

Michel Terré
Jean-Baptiste Clausse
Conservatoire National des Arts et Métiers

Contexte

- **Augmentation des sources** de rayonnement électromagnétique (GSM, WiFi, ..., mais aussi : fours à micro-ondes, systèmes d'éclairage, ordinateurs, ...)
- **Besoin d'analyse** du niveau de bruit électromagnétique,
 - Ex. besoin "Télécom" de recherche de canaux libres ("radio cognitive")

MAIS

- **Mesure difficile**, caractère fluctuant des rayonnements, résultats statistiques (niveau moyen, médian, .. probabilité de dépassement, ...)
- Appareils de mesure ne sont pas exempts d'**erreurs** (sensibilité, ex UWB)
- **Unités** varient selon les domaines

Unités

$$\vec{S} = \vec{E} \wedge \vec{H}$$

$$\frac{E}{H} = 120\pi$$

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

$$P_r = \frac{G_e P_e}{4\pi d^2} \times A$$

équations de Maxwell

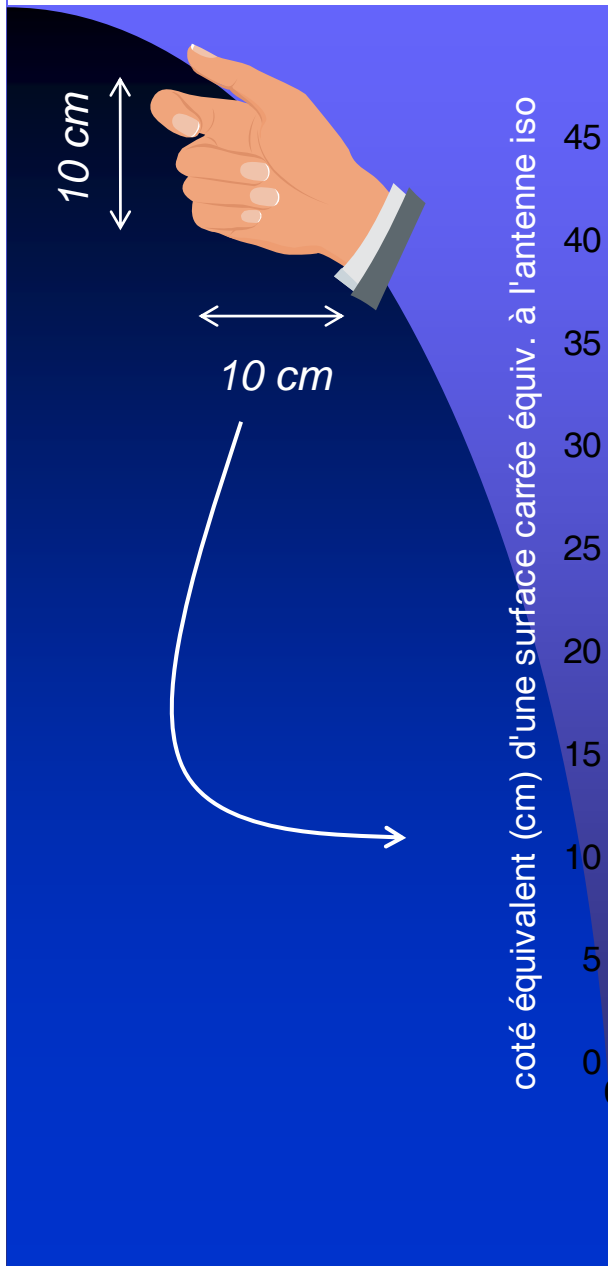
$$P_r = \frac{V^2}{R}$$

R

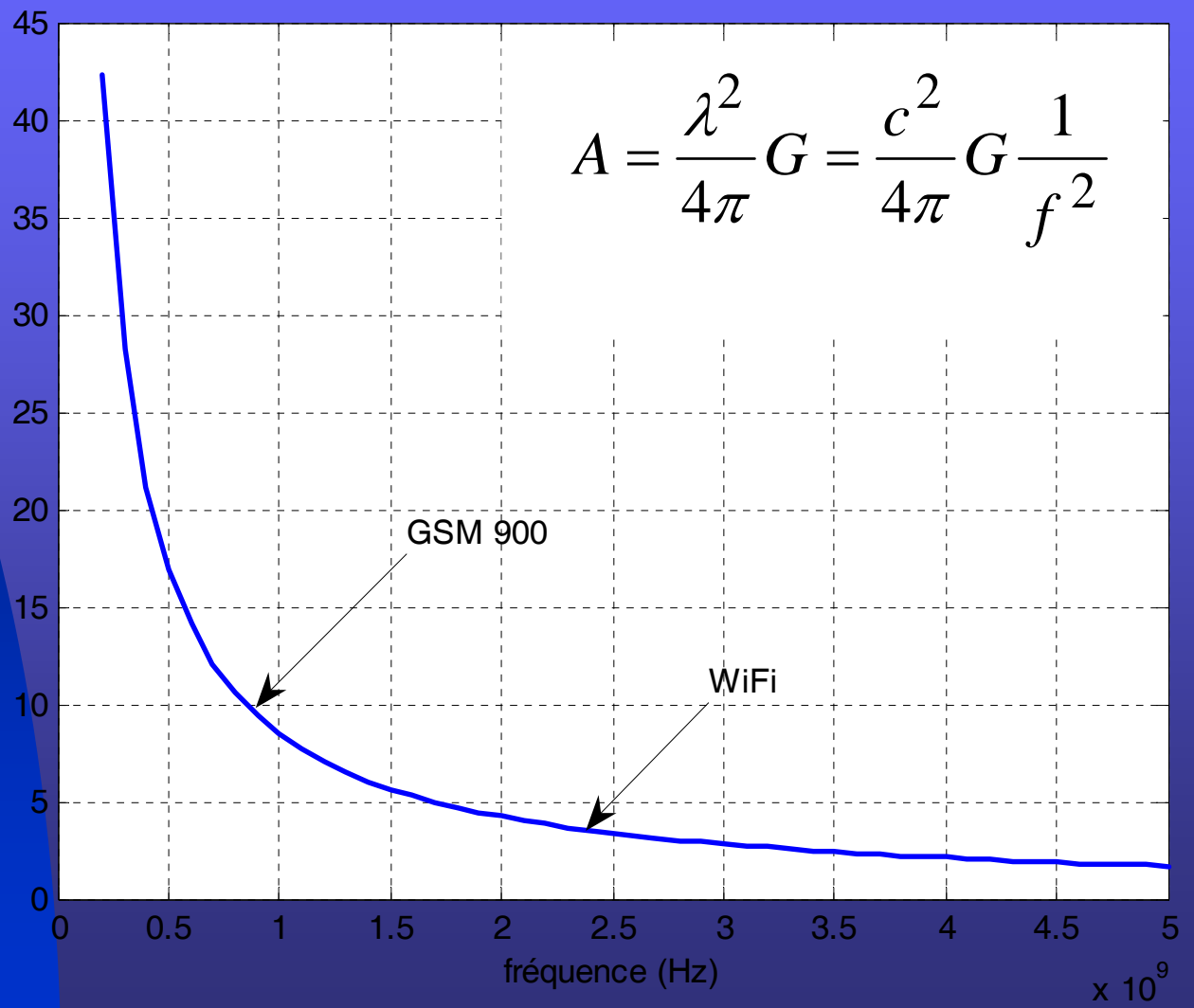
$$P_r = \frac{V^2}{R} = \|\vec{S}\| \times A = \frac{E^2}{120\pi} \times \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

- E en Volt/m, dBμV/m
- Flux de puissance W/m²
- Puissance (captée par A) en Watt, dBW, dBm
- Puissance dans un circuit en Watt, dBW, dBm
- DAS en Watt/kg
- Débit offert (bit/s)

Surface et antenne



coté équivalent (cm) d'une surface carrée équiv. à l'antenne iso



$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G = \frac{c^2}{4\pi} G \frac{1}{f^2}$$

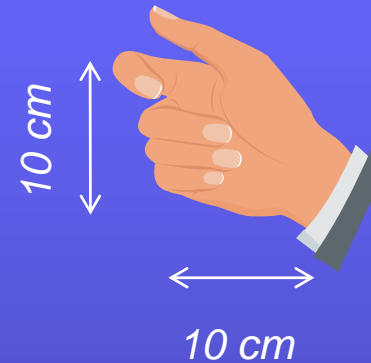
Exemple

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G$$

Antenne isotrope ($G=1$) large bande

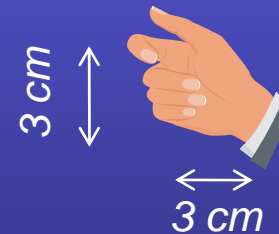
GSM \rightarrow -96 dBm \rightarrow 6 Mbit/s (SNR +10dB)

$2.8 \cdot 10^{-8}$ mW/m²



WiFi \rightarrow -54 dBm \rightarrow 96 Mbit/s (SNR +40 dB)

$3.2 \cdot 10^{-6}$ mW/m²



Les besoins "Télécom"

Radio
Cognitive !

- "... highly reliable communication whenever and wherever needed" [1]
- "... to offer an expanded set of operational choices to the users, applications and service providers, operators, regulators in the context of heterogeneous mobile radio systems" [2]
- "...the **user-centric** broadband experience is about the user being able to use all the services to which he or she has subscribed from any location, using any device" [3]

[0] J. Mitola et al., "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio," Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH) Stockholm, Sweden, 2000.

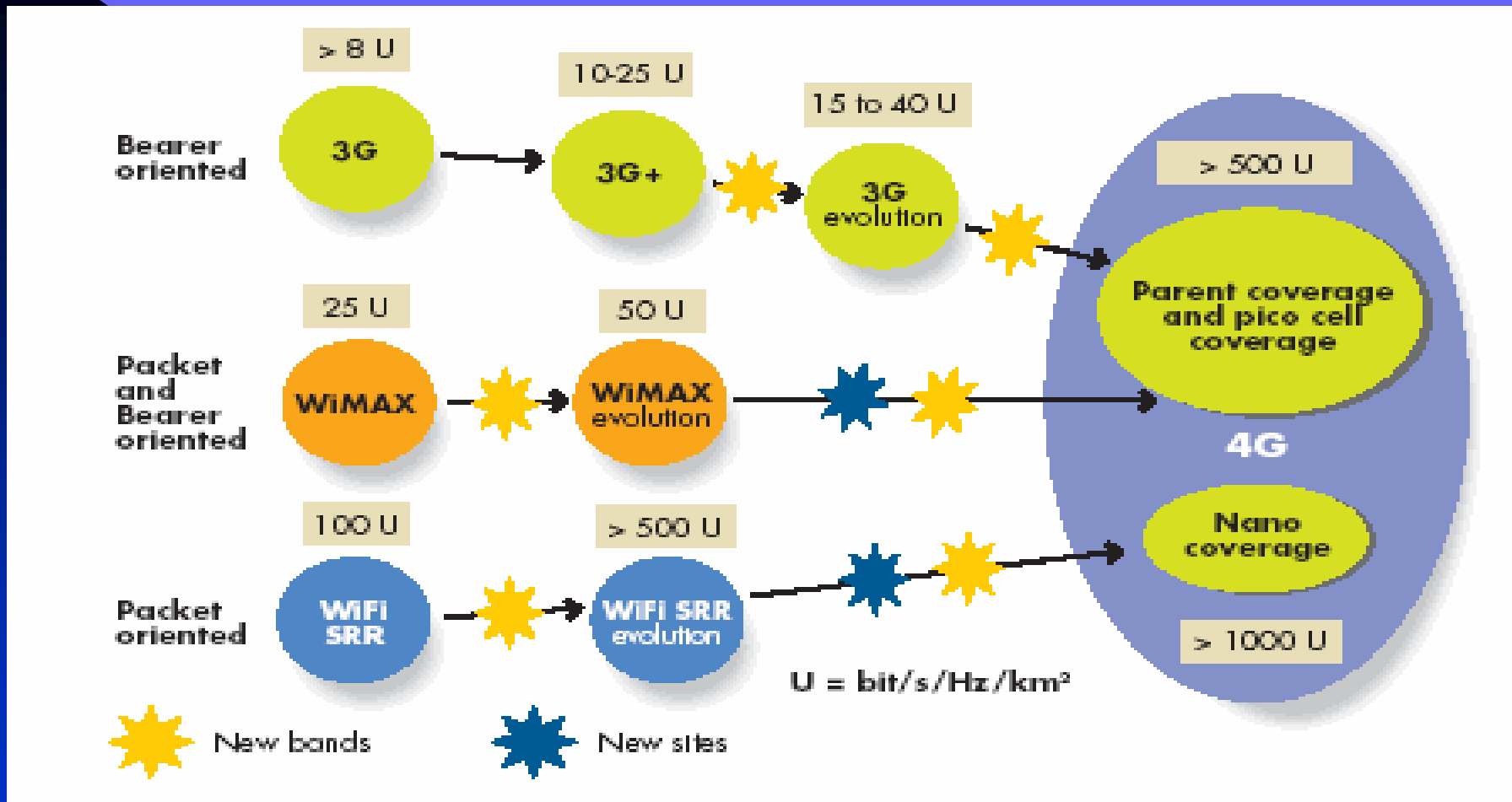
[1] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications", IEEE JSAC, vol 23, n°2, February 2005.

[2] Projet IST End-to-End Reconfigurability (E²R), <http://e2r.motlabs.com/>

[3] Ph. Lainé, L. Le Gouriellec, J. De Vriendt, "Making User-Centric Broadband in Acces A Reality", Alcatel Telecommunications Review, 2nd Quarter 2005.

Les besoins "Télécom"

$$U = \text{bit/s/Hz/km}^2 !$$



source: D. Rouffet, S. Kerboeuf, L. Cai, V. Capdevielle, "4G Mobile", Alcatel Telecommunications Review, 2nd Quarter 2005.

Débit et puissance

- Lien entre la puissance reçue et le débit atteignable

rapport signal sur bruit (plus interférences) requis

Puissance émise

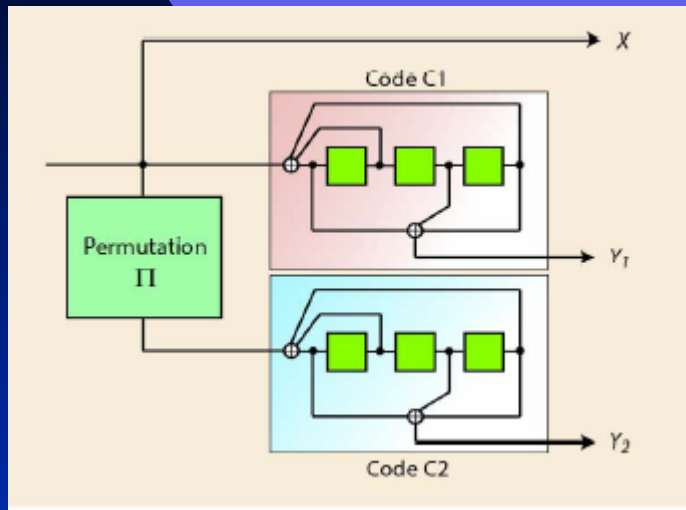
débit

$$R_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = \frac{P_e G_e G_r}{kT} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

distance

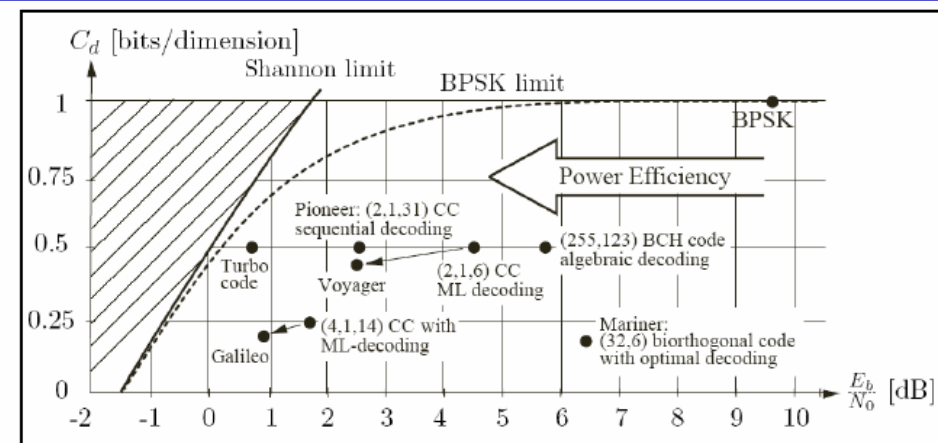
Amélioration du codage et du contrôle de puissance

- Effet des Turbo-codes (Berrou, Glavieux 1990)
 - Ex UMTS rapport signal sur bruit compris entre 1 et 5 dB contre 10 en GSM



Source: Raphael Le Bidan, ENST Bretagne

$$R_b \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = \frac{P_e G_e G_r}{kT} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$



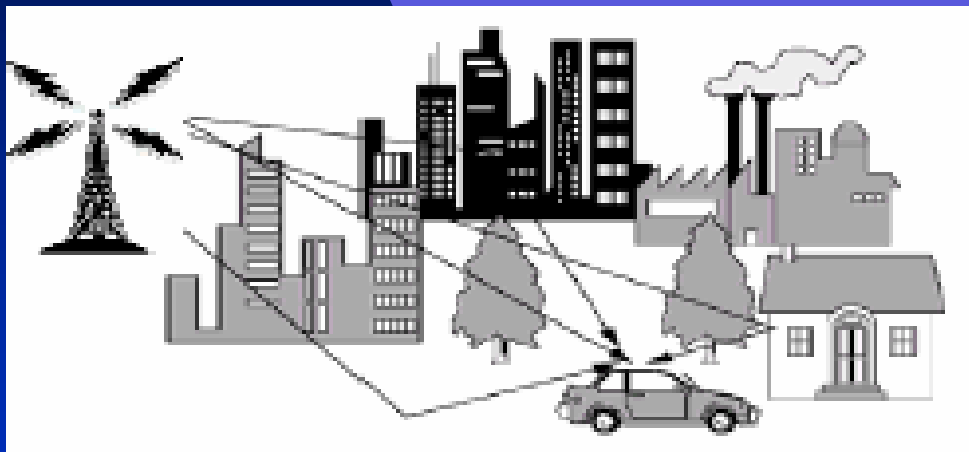
[Copyright © C. Schlegel, *Trellis and Turbo Coding*, IEEE Press, 2004]

- Contrôle de puissance
 - 2 Hz en GSM 1.5 kHz en UMTS !

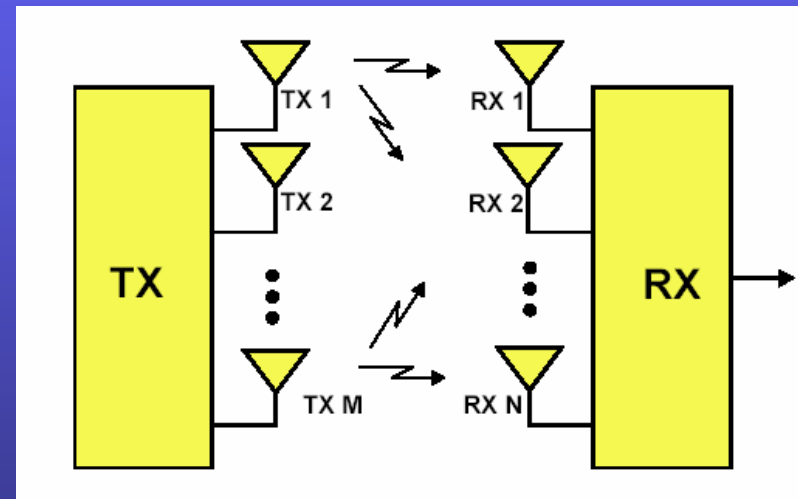
MIMO: Multiple, Input Multiple Output

SISO : Puissance reçue →

$$SNR = P_e \frac{|h_1|^2}{2\sigma^2}$$



canal



MIMO : Puissance reçue →

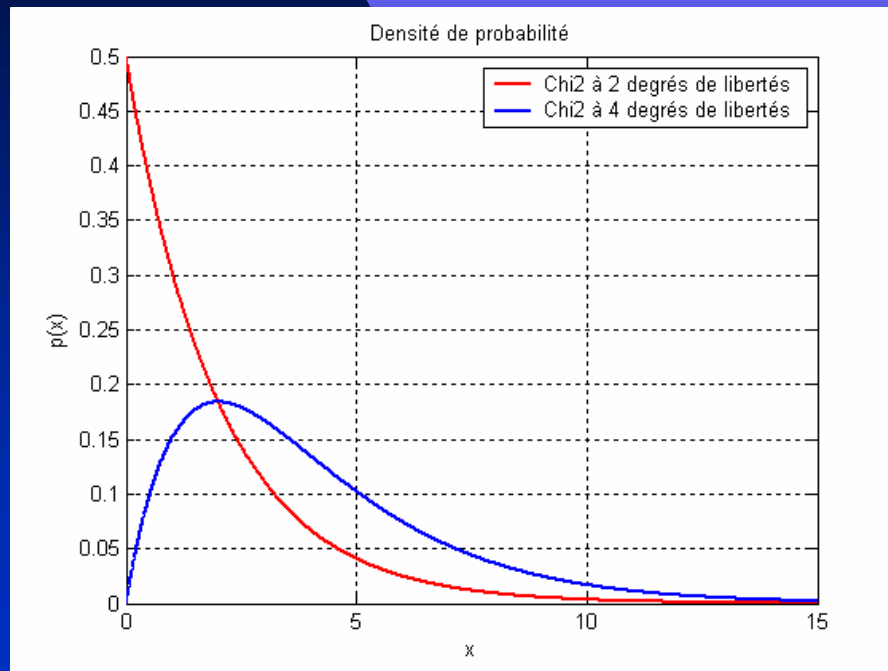
$$SNR = \alpha P_e \left(\frac{|h_1|^2 + |h_2|^2}{2\sigma^2} \right)$$

$$\alpha \leq 2$$

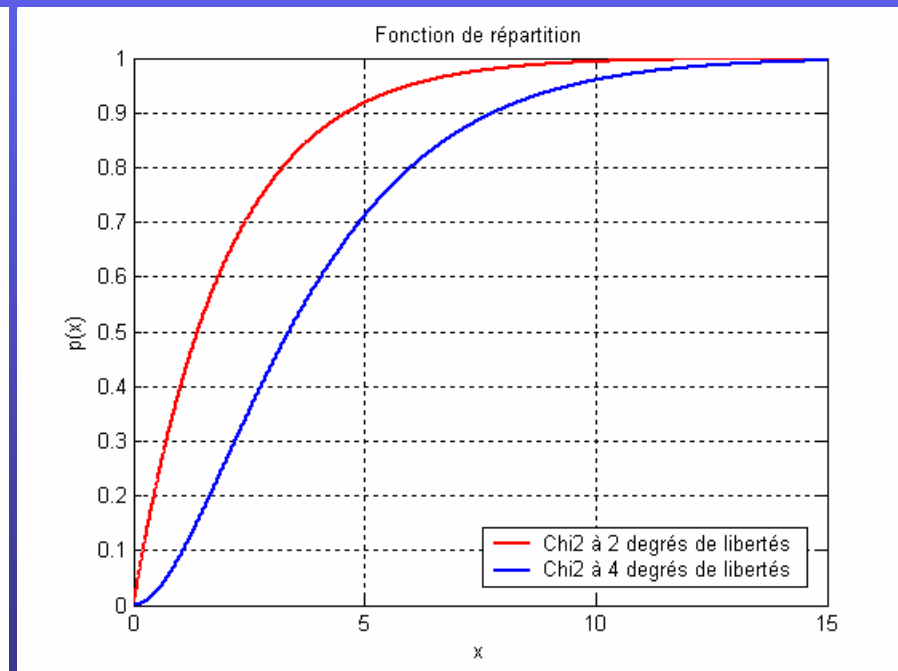
SNR : signal sur bruit

MIMO: Multiple, Input Multiple Output

En diminuant les risques d'évanouissement on *peut* réduire les marges et diminuer la puissance émise



Densité de probabilité de la puissance reçue



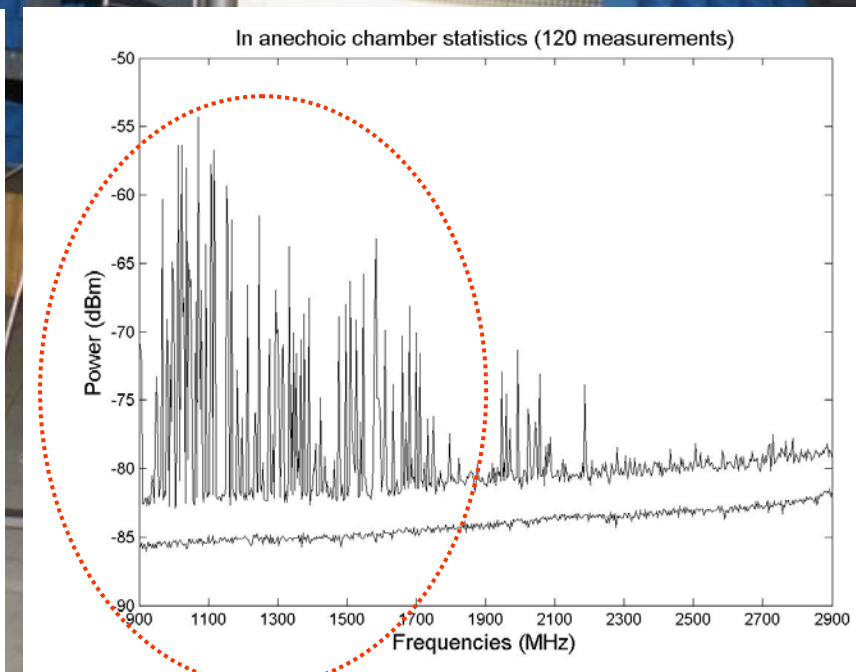
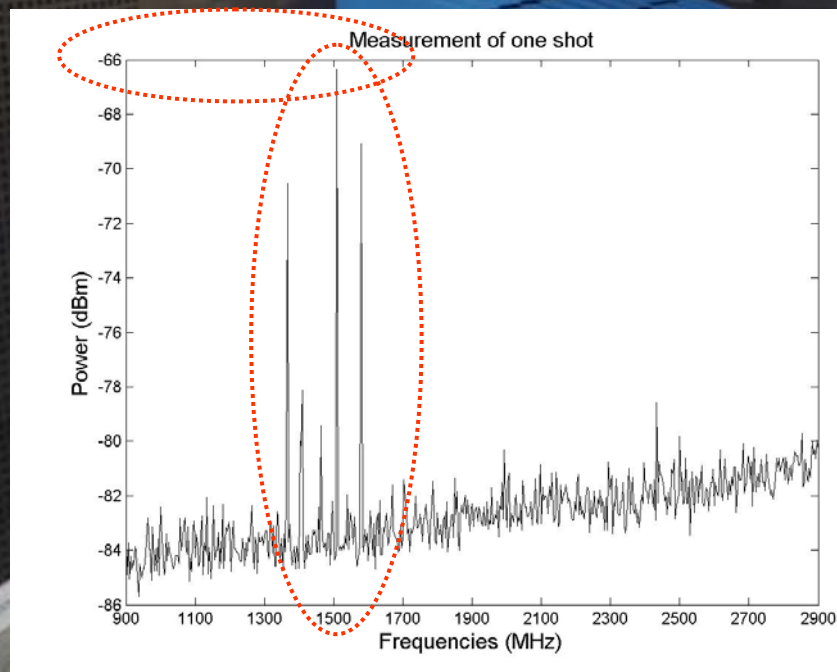
Probabilité que la puissance reçue soit < à une valeur (même puissance émise)

Mesures

- Tubes fluorescents
- Fours à micro-ondes
- Ordinateurs

■ Analyses dans une chambre semi-anéchoïque

◆ Résultats entre 0.9 – 2.9 GHz

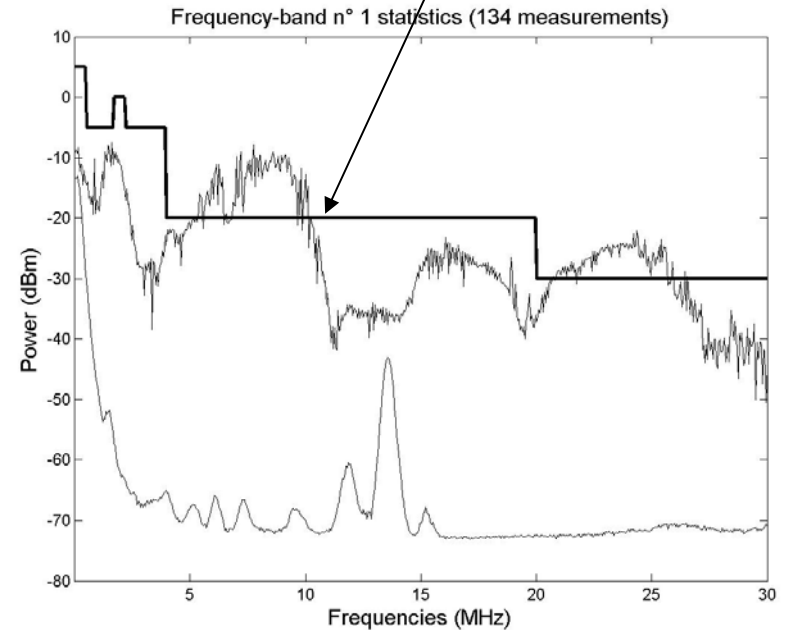
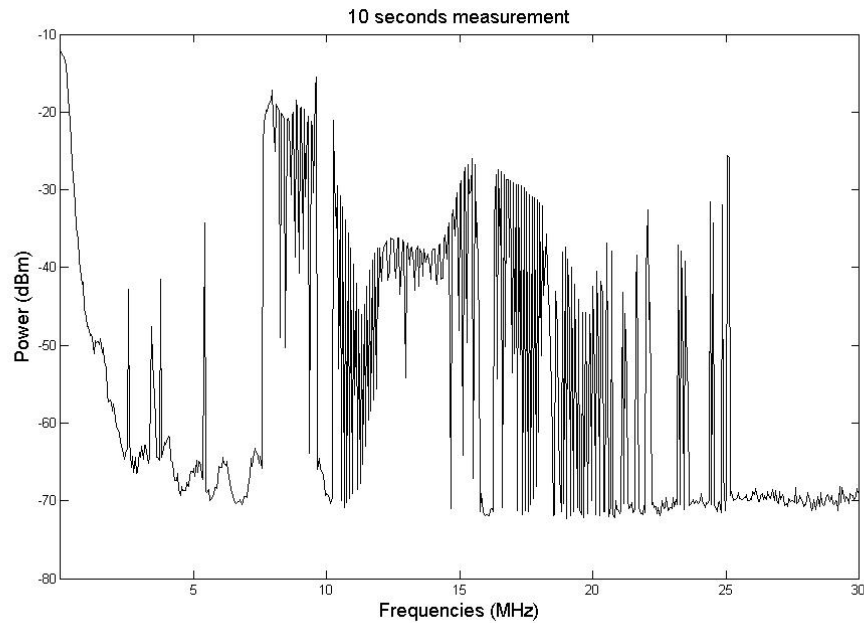


Analyses sur site d'un tube néon en panne

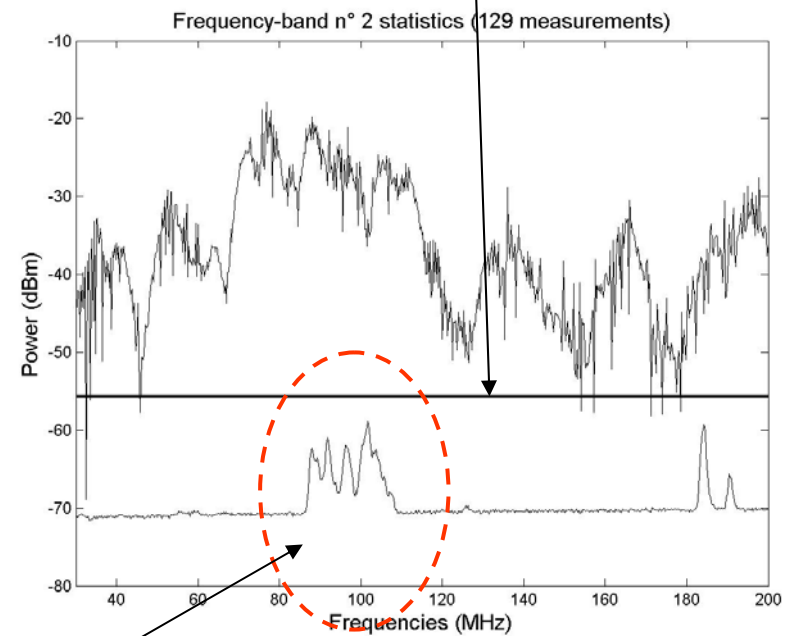
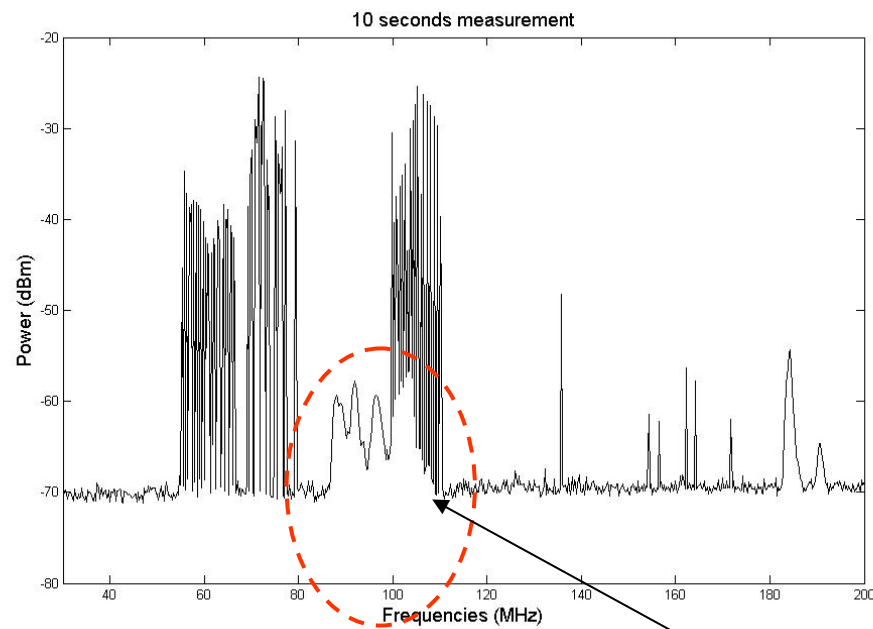
(clignotement)

- ◆ Résultats entre 0.01 – 30 MHz

ECC Report 24



Résultats entre 30 – 200 MHz



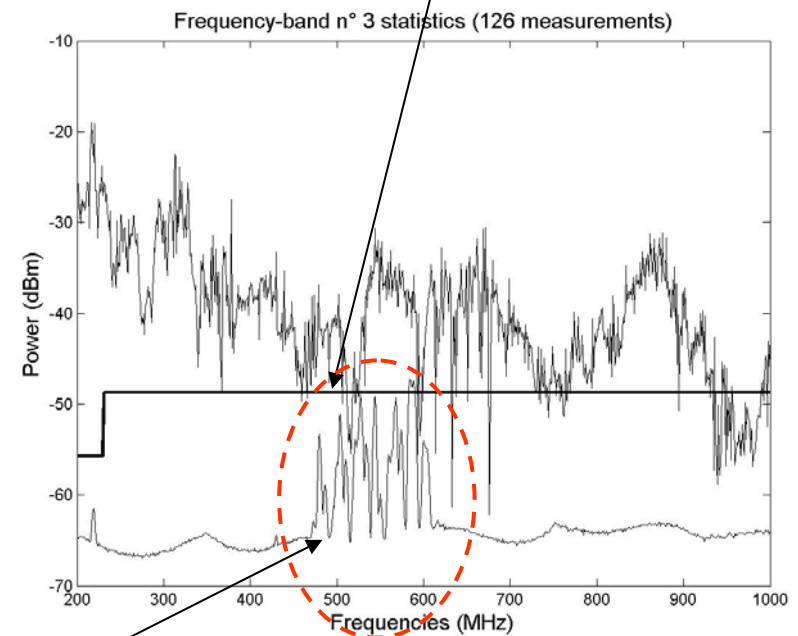
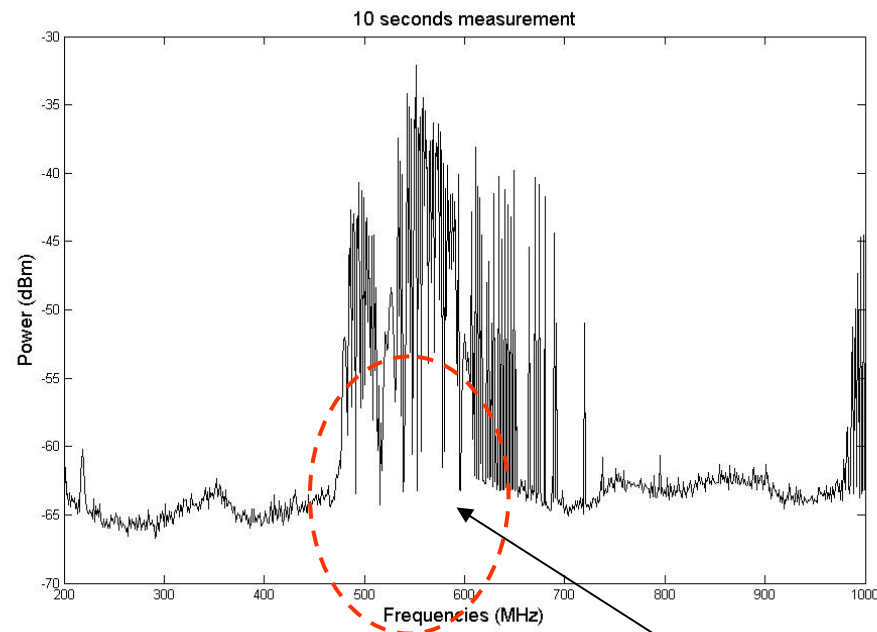
FM bandwidth



Résultats entre 0.2 – 1 GHz



CISPR-22



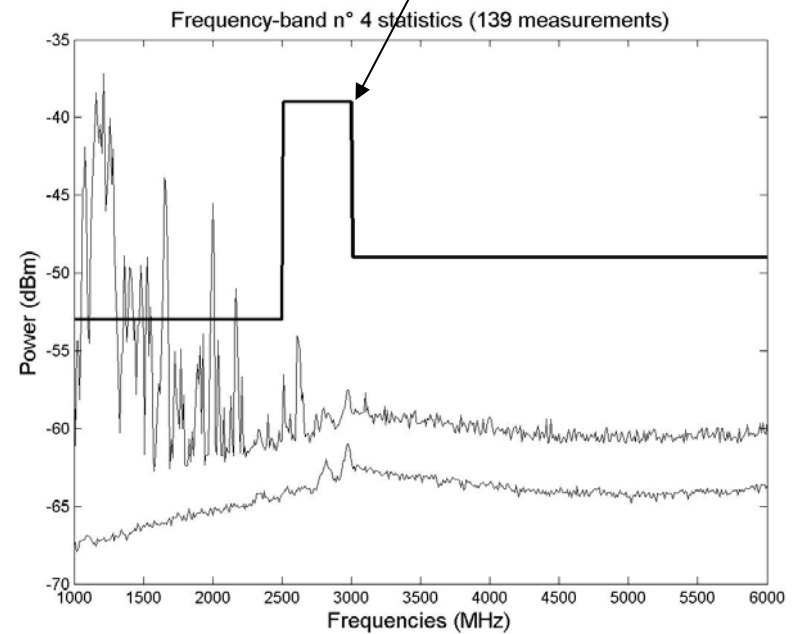
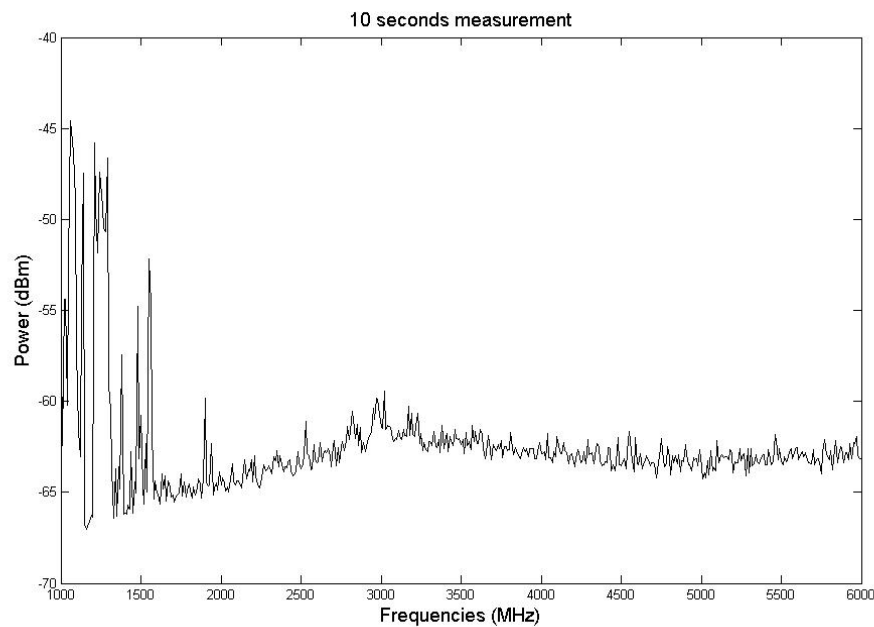
UHF (TV channels)



Résultats entre 1 – 6 GHz



ECC Report 24



Impact sur un lien WiFi

■ Impact

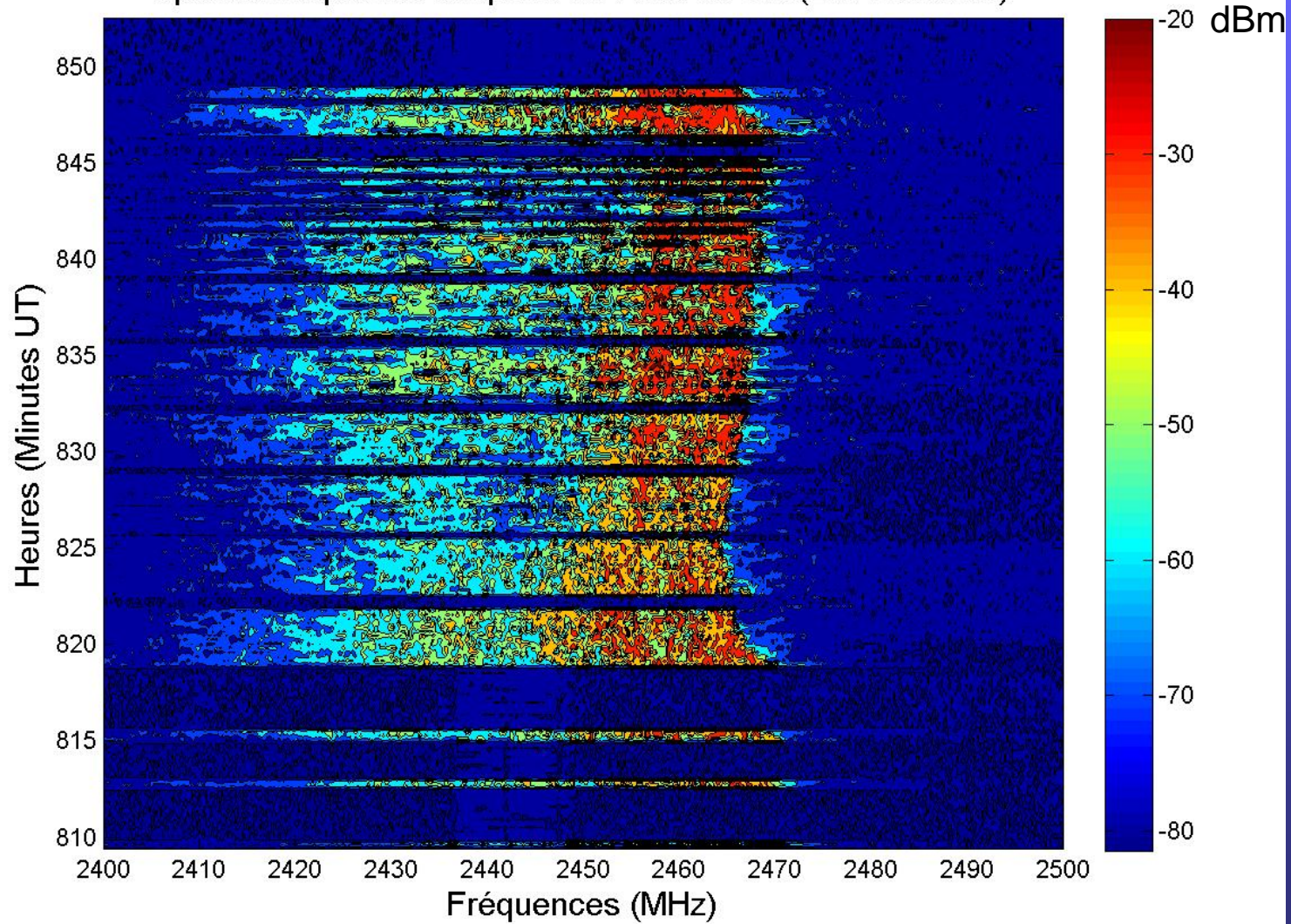
<u>Item</u>	<u>Values (case 1)</u>	<u>Values (case 2)</u>
<i>Transmitter power</i>	+20 dBm	+20 dBm
<i>Distance (WiFi link)</i>	1 m	10m
<i>Propagation loss</i>	-40.2 dB	-61.4 dB
<i>Receiver bandwidth</i>	22 MHz	22 MHz
<i>Noise temperature</i>	300 K	300 K
<i>Thermal noise</i>	-100.4 dBm	-100.4 dBm
<i>SNR without Tube noise</i>	80.2 dB	59 dB
<i>AP-Tube distance</i>	1 m	1m
<i>Tube noise power (example)</i>	-76 dBm	-76 dBm
<i>SNR with Tube noise</i>	55.8 dB	34.6 dB
<i>SNR loss due to the Tube noise</i>	-24.4 dB	-24.4 dB

Analyse four à micro-ondes sur site (1)

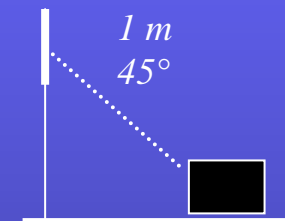


Analyse four à micro-ondes sur site (1)

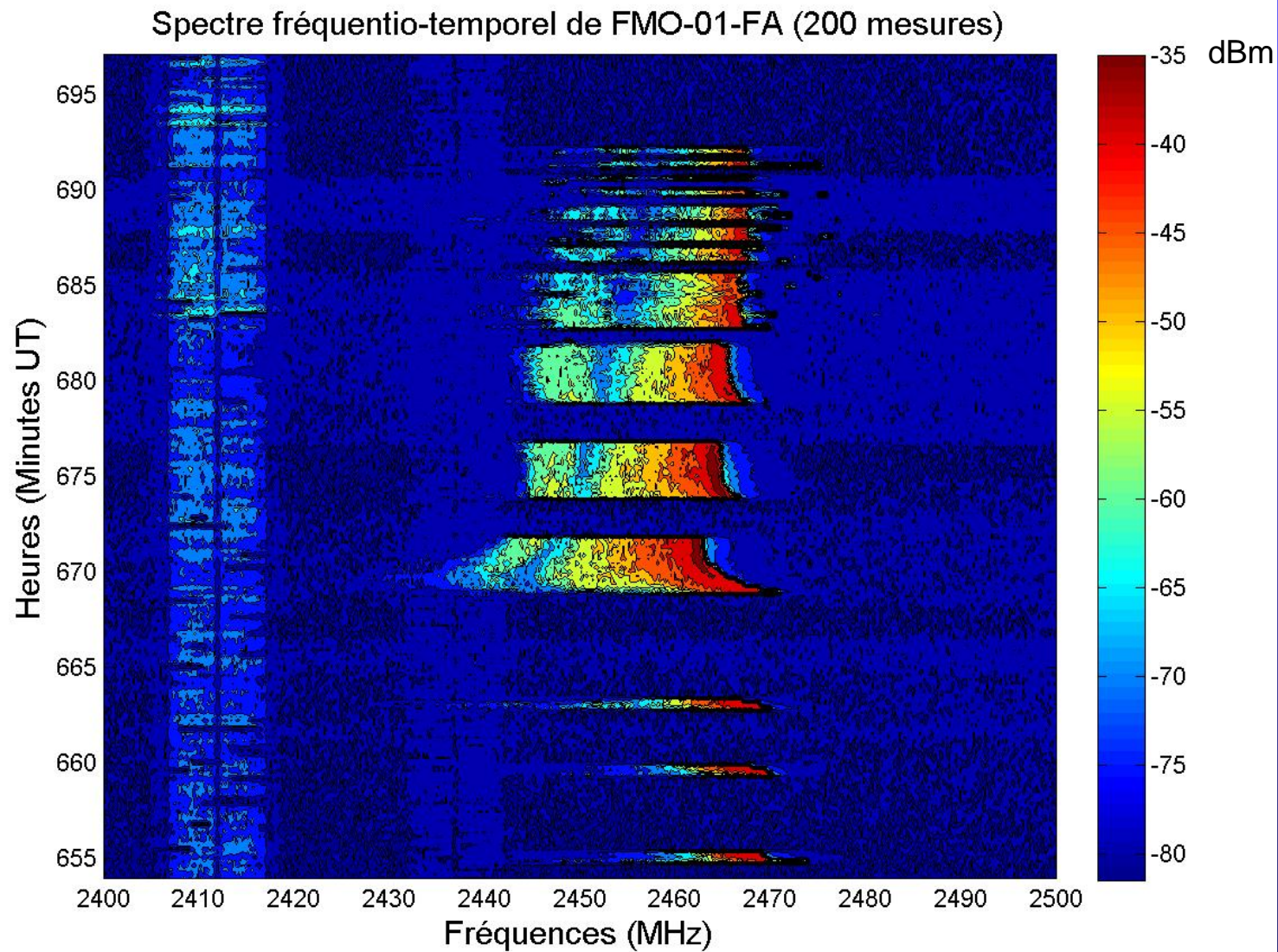
Spectre fréquentio-temporel de FMO-05-FA (200 mesures)



Analyse four à micro-ondes sur site (2)

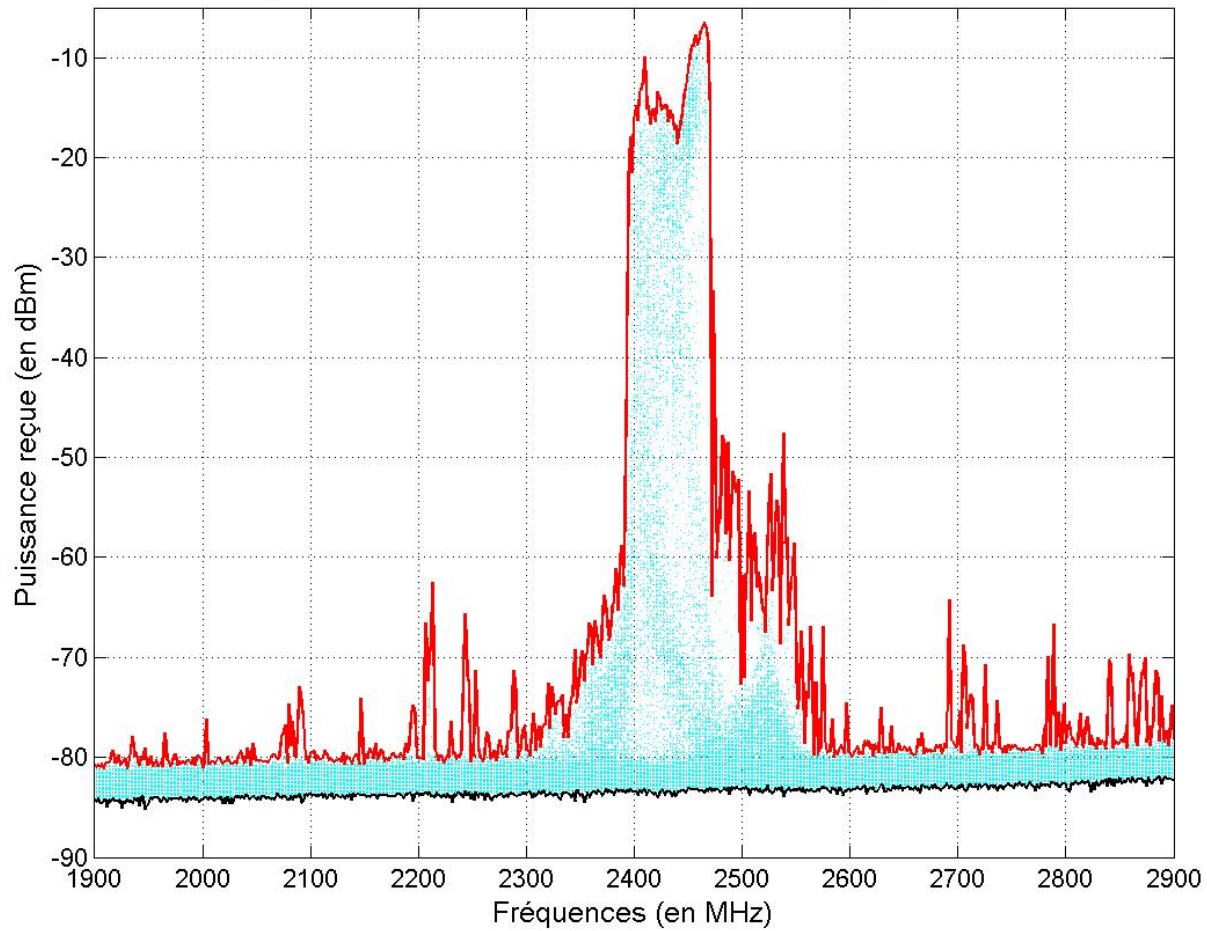


Analyse four à micro-ondes sur site (2)



Analyse four à micro-ondes en cage

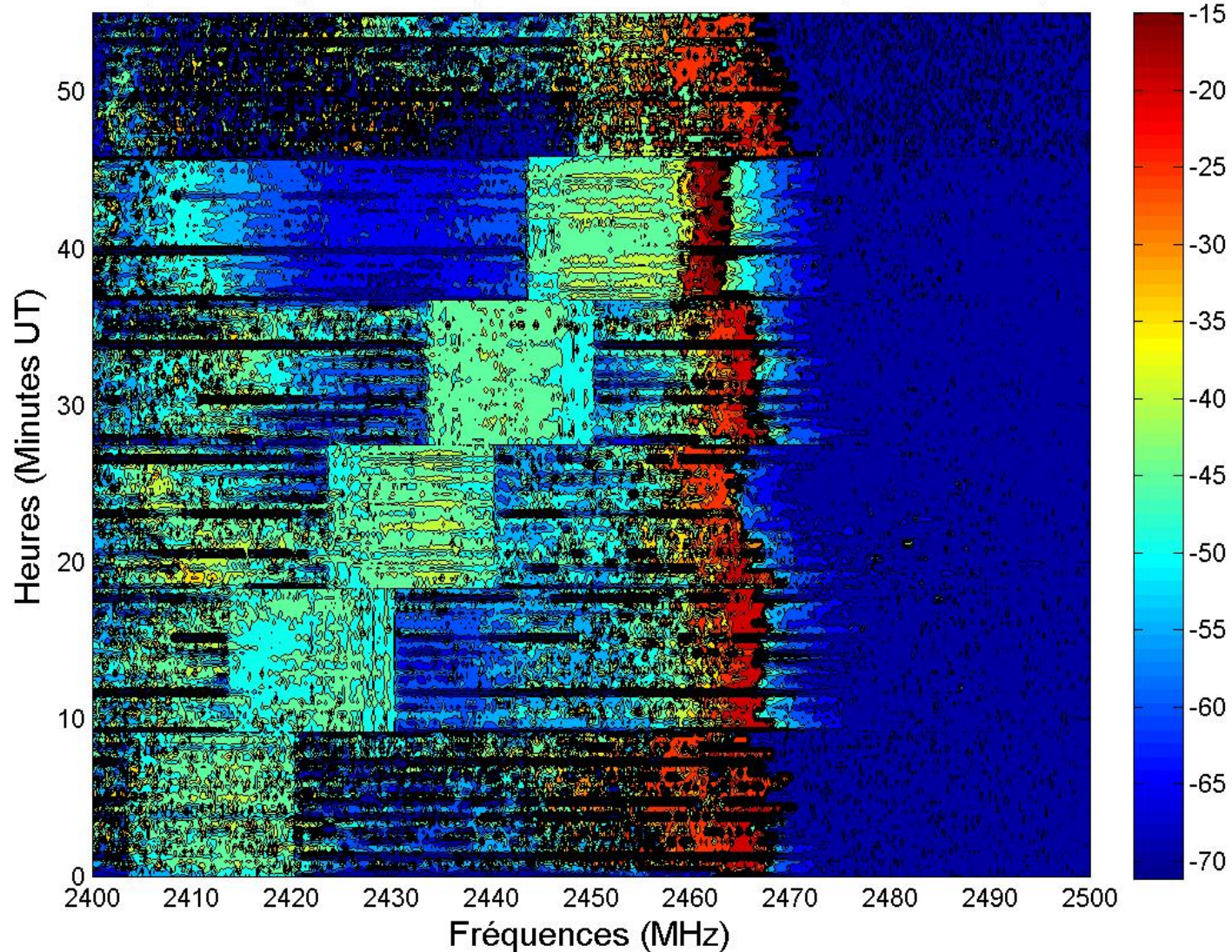
Rayonnement d'un four à micro-ondes par l'avant



Analyse four à micro-ondes en cage (avec WiFi)

Canaux 1, 3, 5, 7, 9, 10

Spectre fréquentio-temporel de VLAN-06cf-FA (180 mesures)

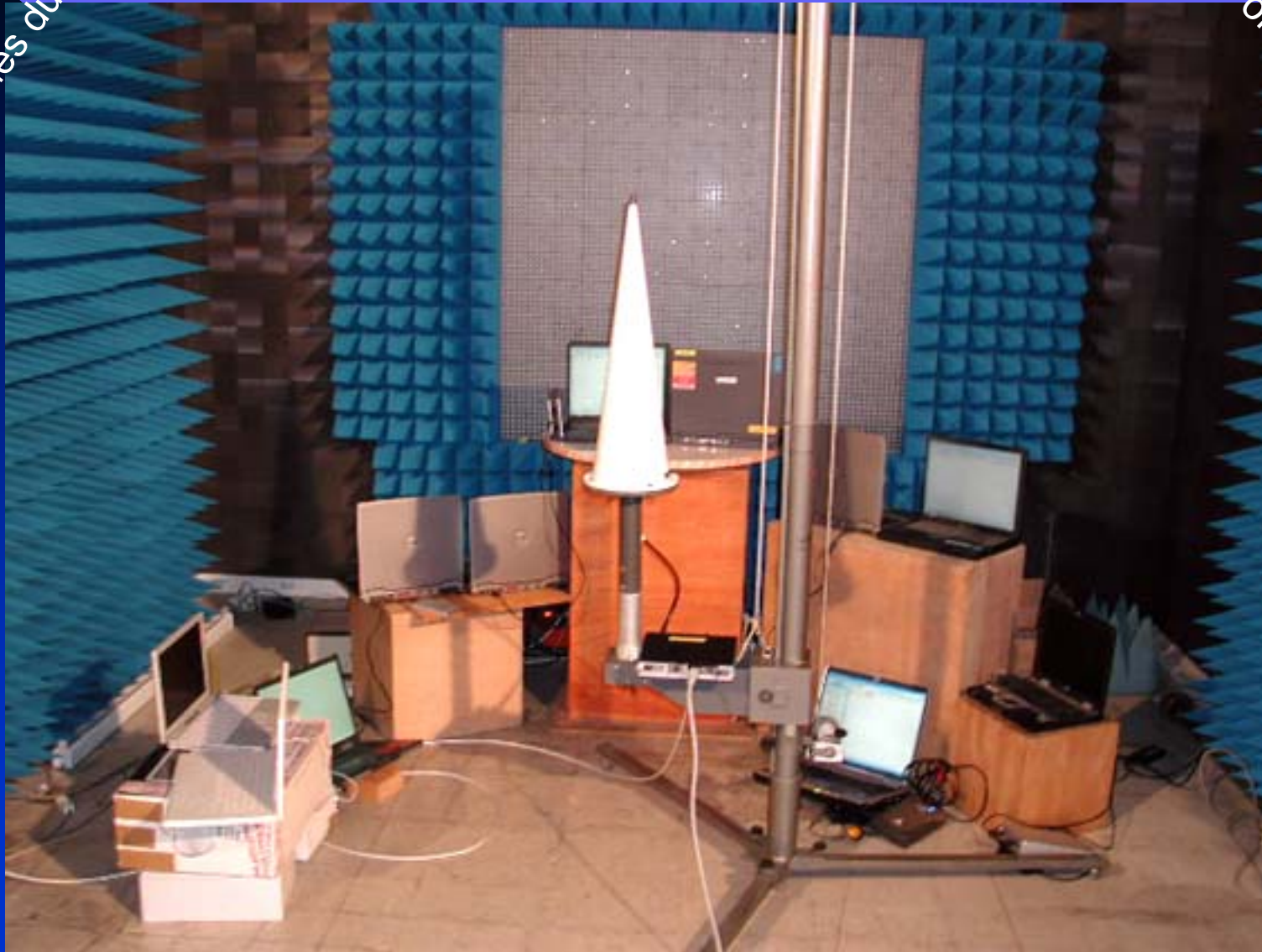


Impact sur un lien WiFi

<u>Item</u>	<u>Values (case 1)</u>	<u>Values (case 2)</u>
<i>Transmitter power</i>	+20 dBm	+20 dBm
<i>Distance (WiFi link)</i>	1 m	1 m
<i>Propagation loss</i>	-40.2 dB	-40.2 dB
<i>Receiver bandwidth</i>	22 MHz	22 MHz
<i>Noise temperature</i>	300 K	300 K
<i>Thermal noise</i>	-100.4 dBm	-100.4 dBm
<i>SNR without oven noise</i>	80.2 dB	80.2 dB
<i>AP-Oven distance</i>	1 m	10 m
<i>Oven noise power (example)</i>	-10 dBm	-31.2 dBm
<i>SNR with oven noise</i>	-10 dB	11.2 dB
<i>SNR loss due to the oven noise</i>	-90.2 dB	-69 dB

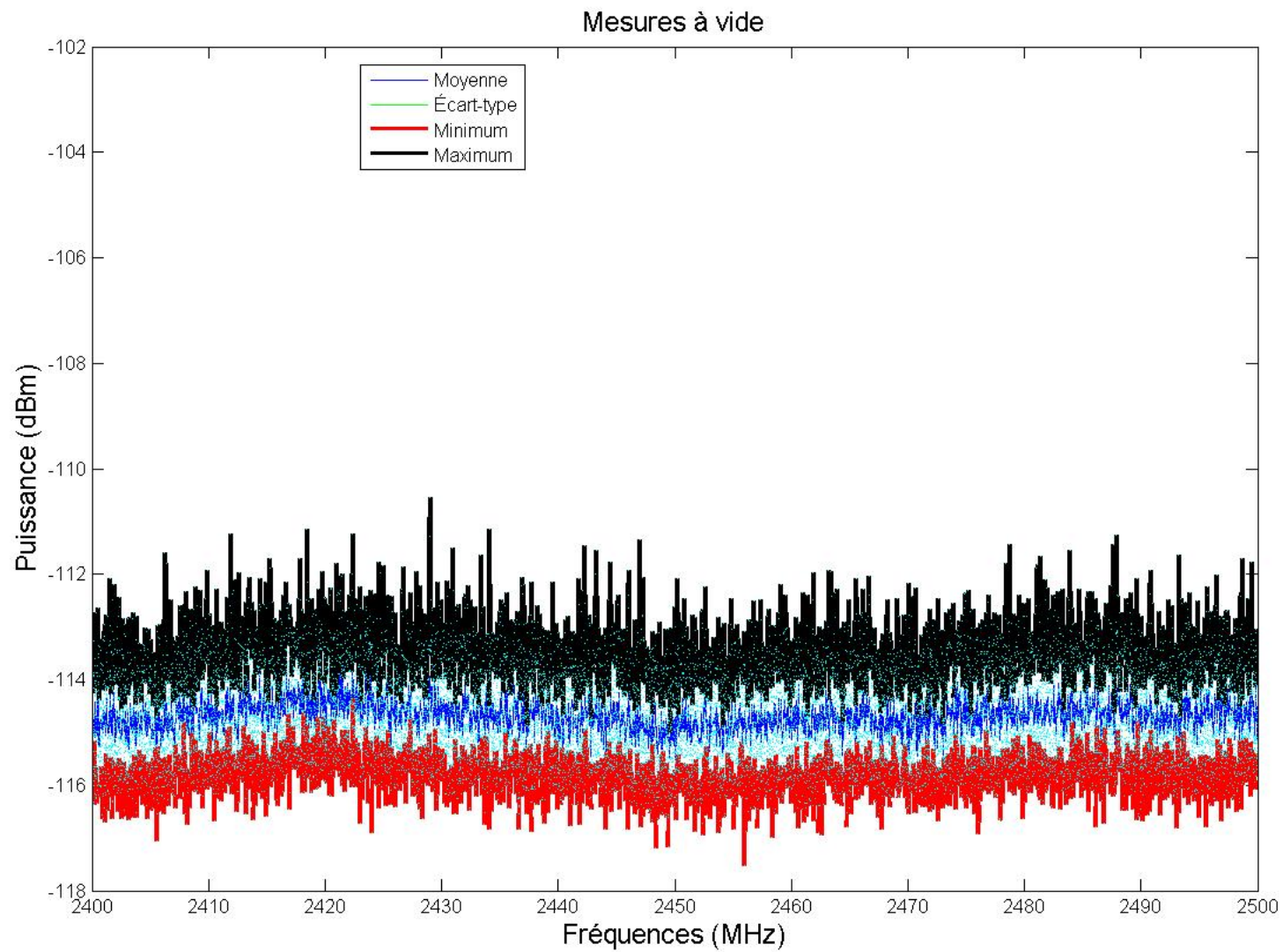
Ordinateurs portables (en cage)

4 disques durs

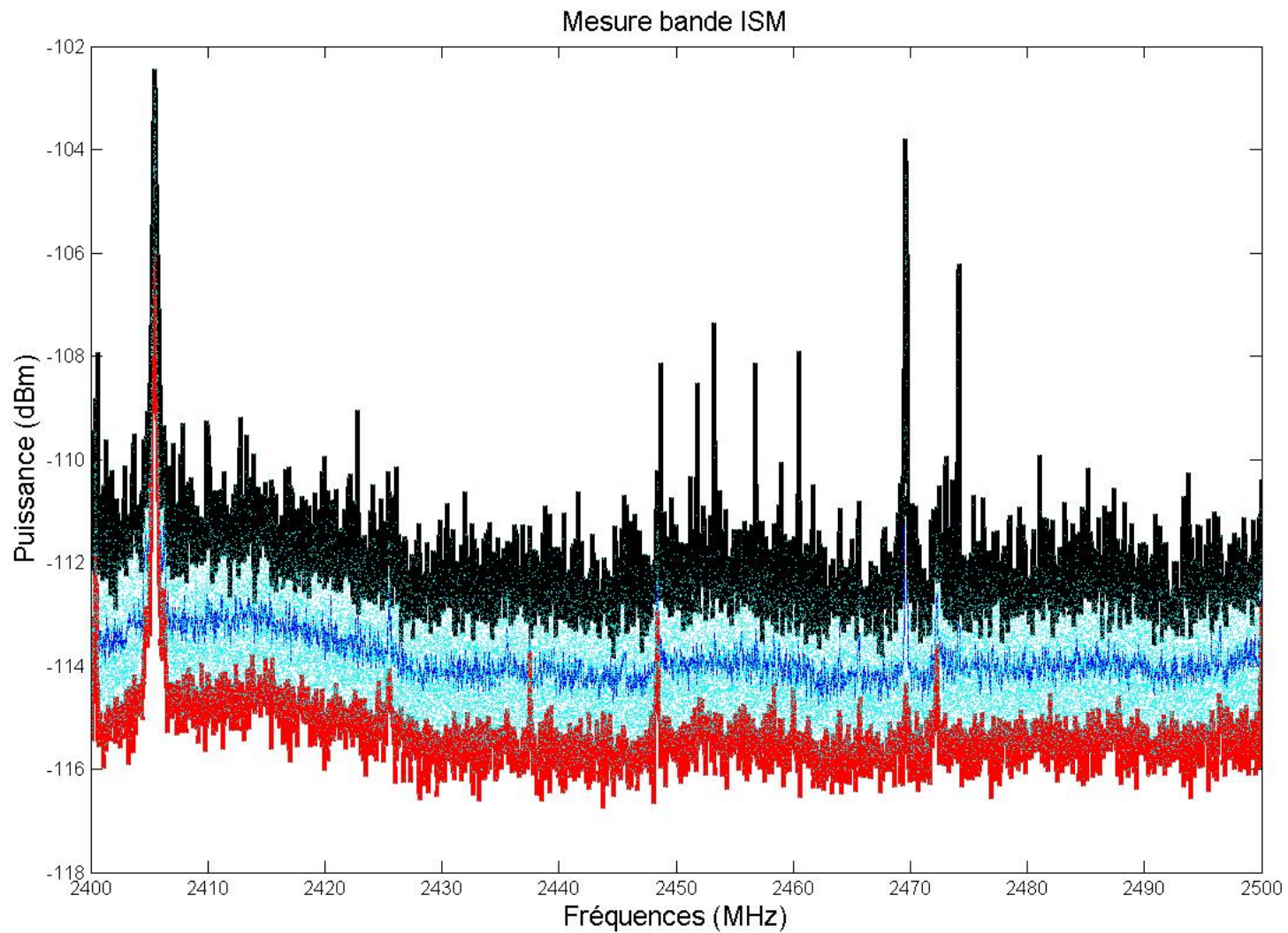


11 ordinateurs

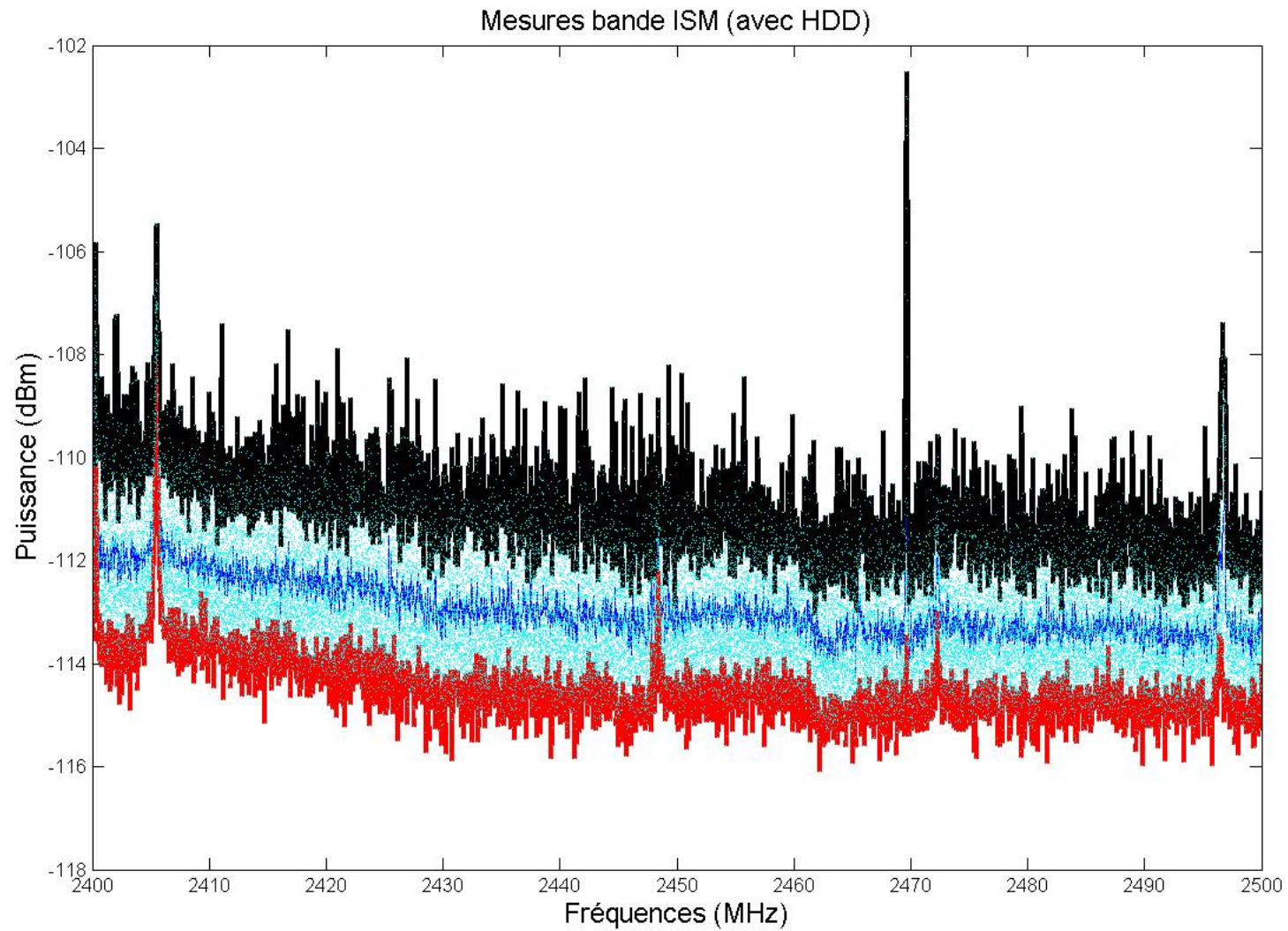
Ordinateurs portables (en cage) : à vide



Ordinateurs portables (en cage) : 1 ordinateur

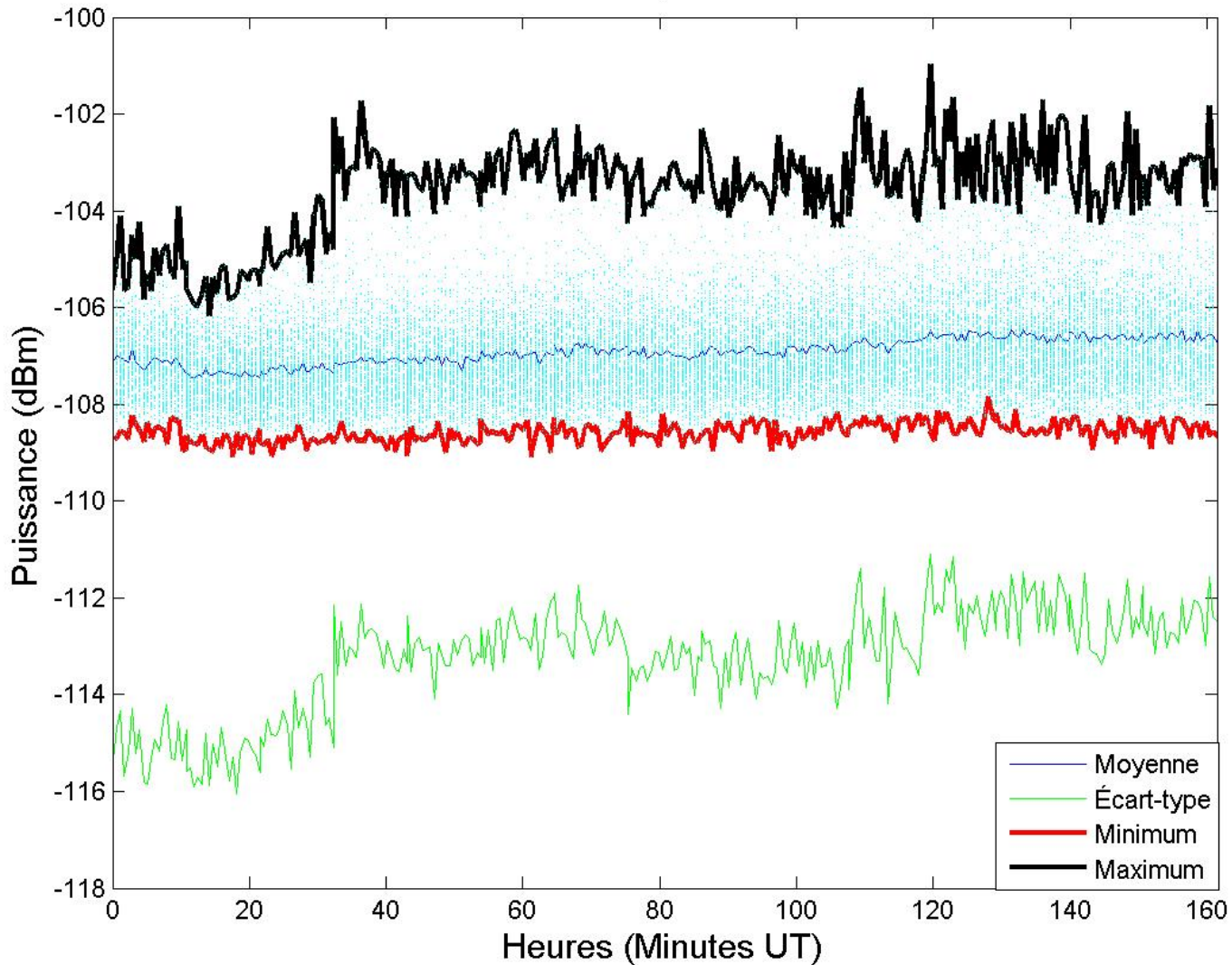


Ordinateurs portables (en cage) : 1 ordinateur + 1 DD



Ordinateurs portables (en cage) : 11 ordinateurs + 4 DD

Statistiques de ordi-108₁22-.1-FA (300 mesures)



Conclusion

- Le four à micro-ondes a un rayonnement non négligeable pour un lien Wifi.
- L'éclairage n'est pas gênant, hors cas très particulier.
- Le rayonnement des ordinateurs reste négligeable vis à vis des systèmes de communications.

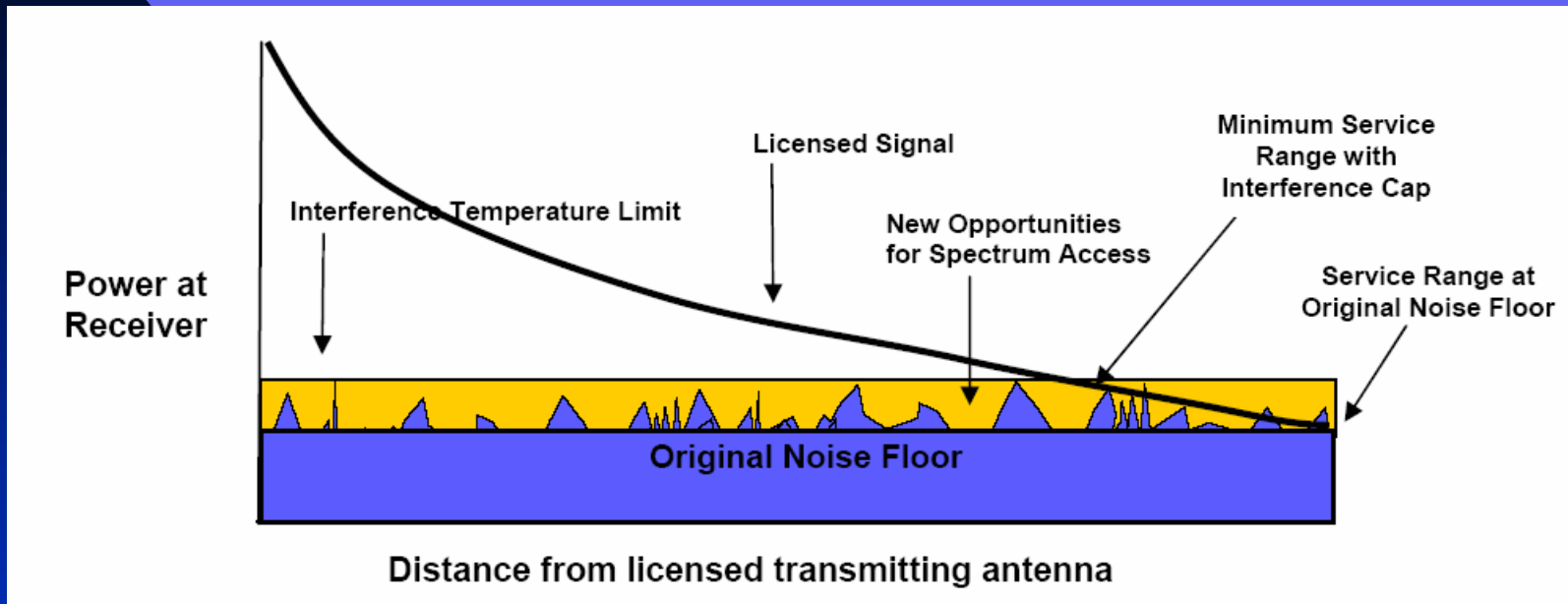
J.-B. Clause, R. Razafferson, M. Terré, A. Zeddou, Characterisation of the radio-electric noise due to the lighting of fluorescent tubes, European Wireless 2007, Paris, April 2007

J.-B. Clause, R. Razafferson, M. Terré, A. Zeddou, Characterisation and impact of the microwave ovens over a Wi-Fi system, EMC Workshop, Paris, June 2007

J.-B. Clause, R. Razafferson, M. Terré, A. Zeddou, Characterisation and measurements of the electromagnetic radiation of mobile personal computers and hard disks, 2EMC, Rouen, October 2007

Cognitif, primaire, secondaire

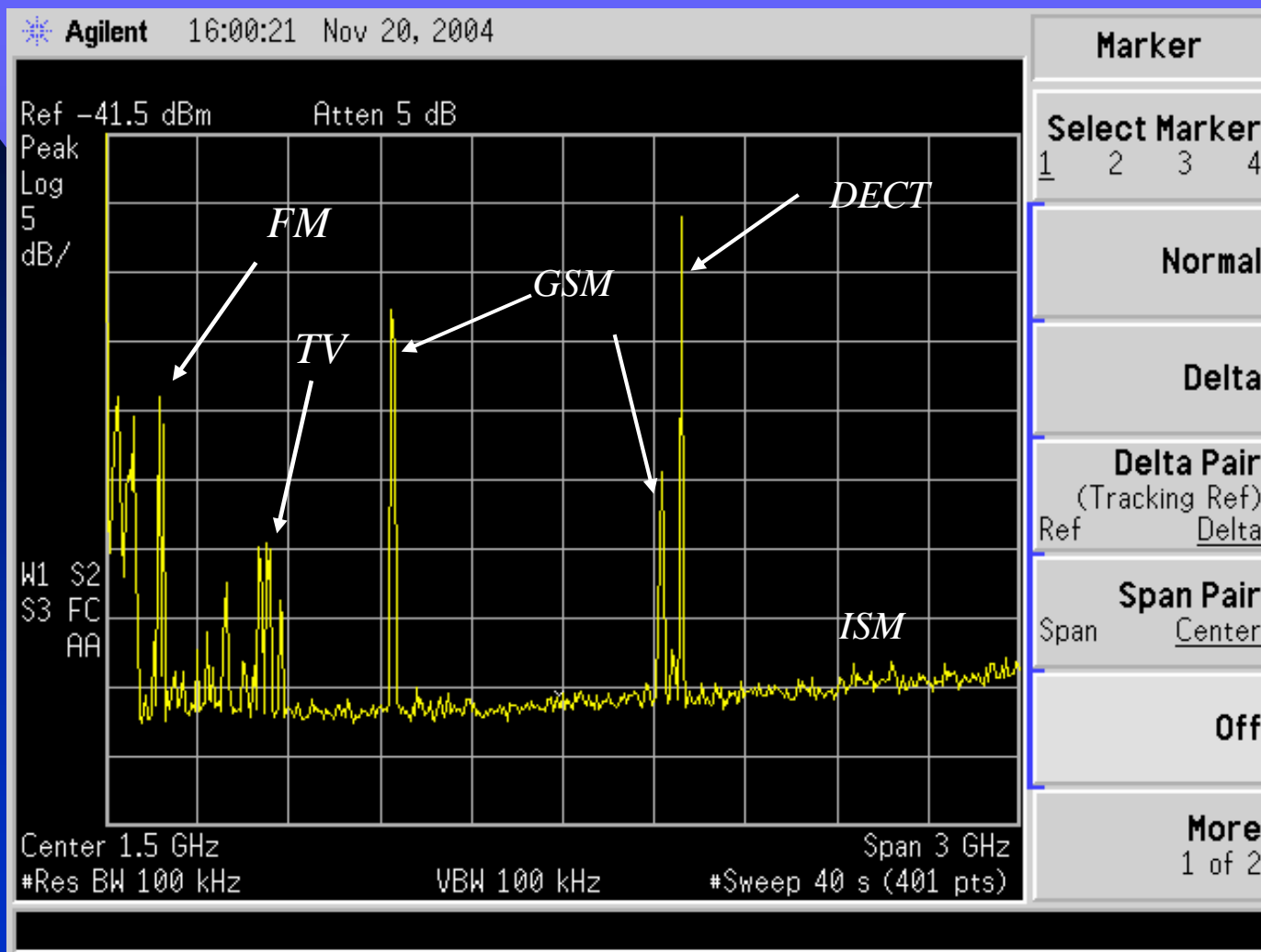
Température d'interférence



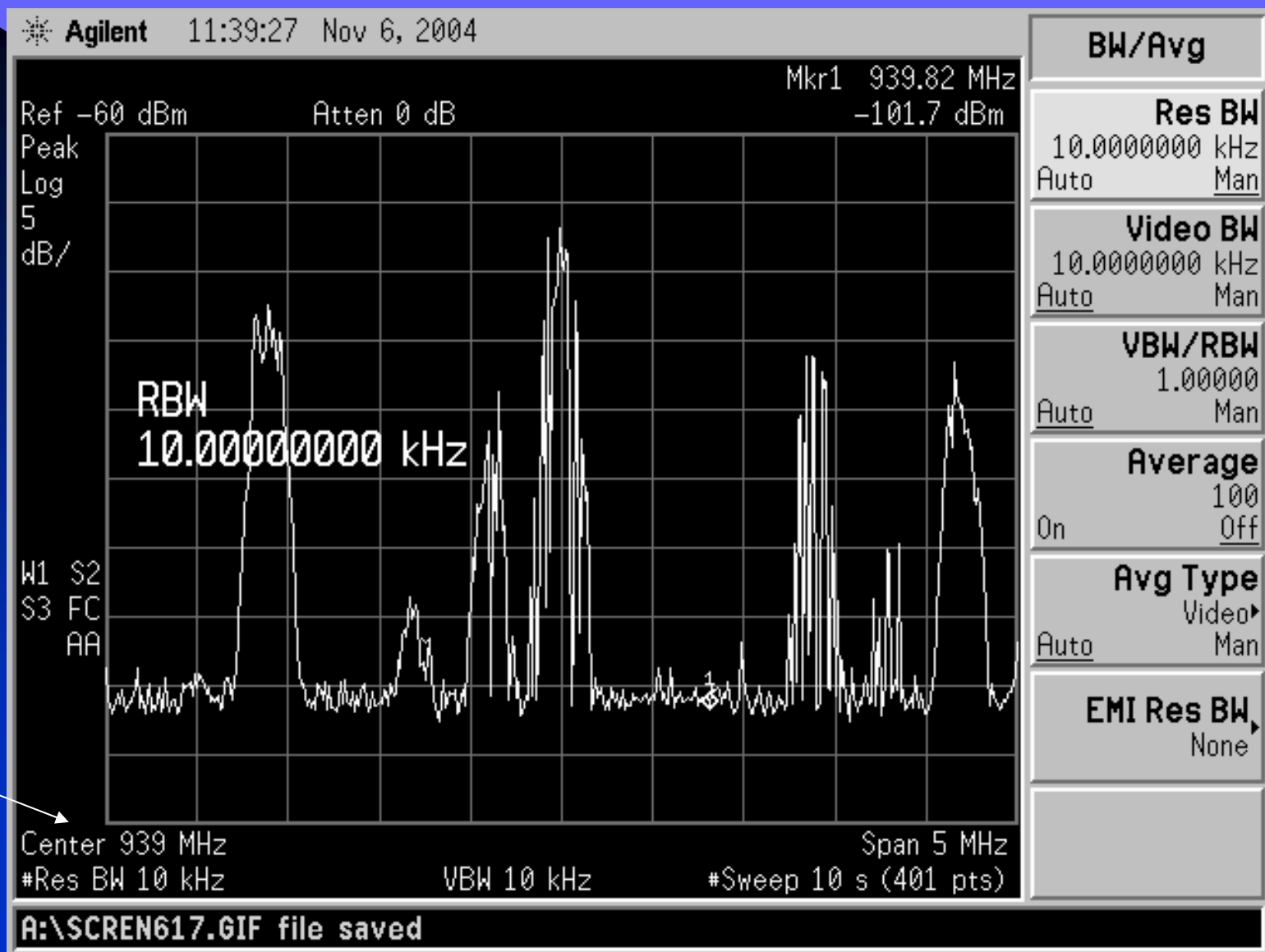
Source : FCC, http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-03-289A1.pdf, Novembre 2003



Exemples de mesures (1/4)



Exemple de mesures (2/4)

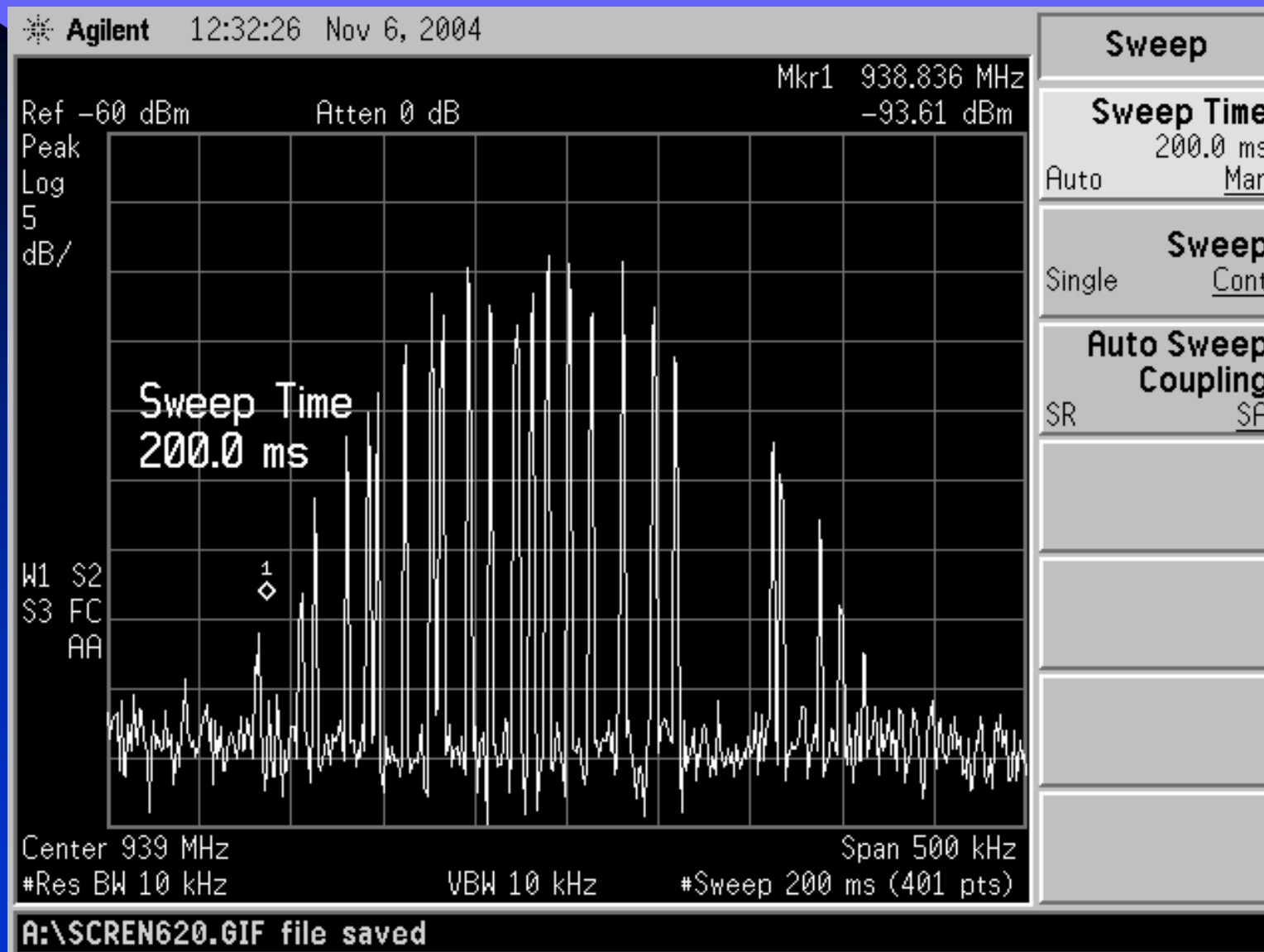


GSM

Exemple de mesures (3/4)



Exemples de mesures (4/4)



Réglementation UWB

