

Pourquoi et comment communiquer en Optique Sans Fils : de l'Infrarouge au Li-Fi

Anne Julien-Vergonjanne, XLIM

anne.julien-vergonjanne@xlim.fr

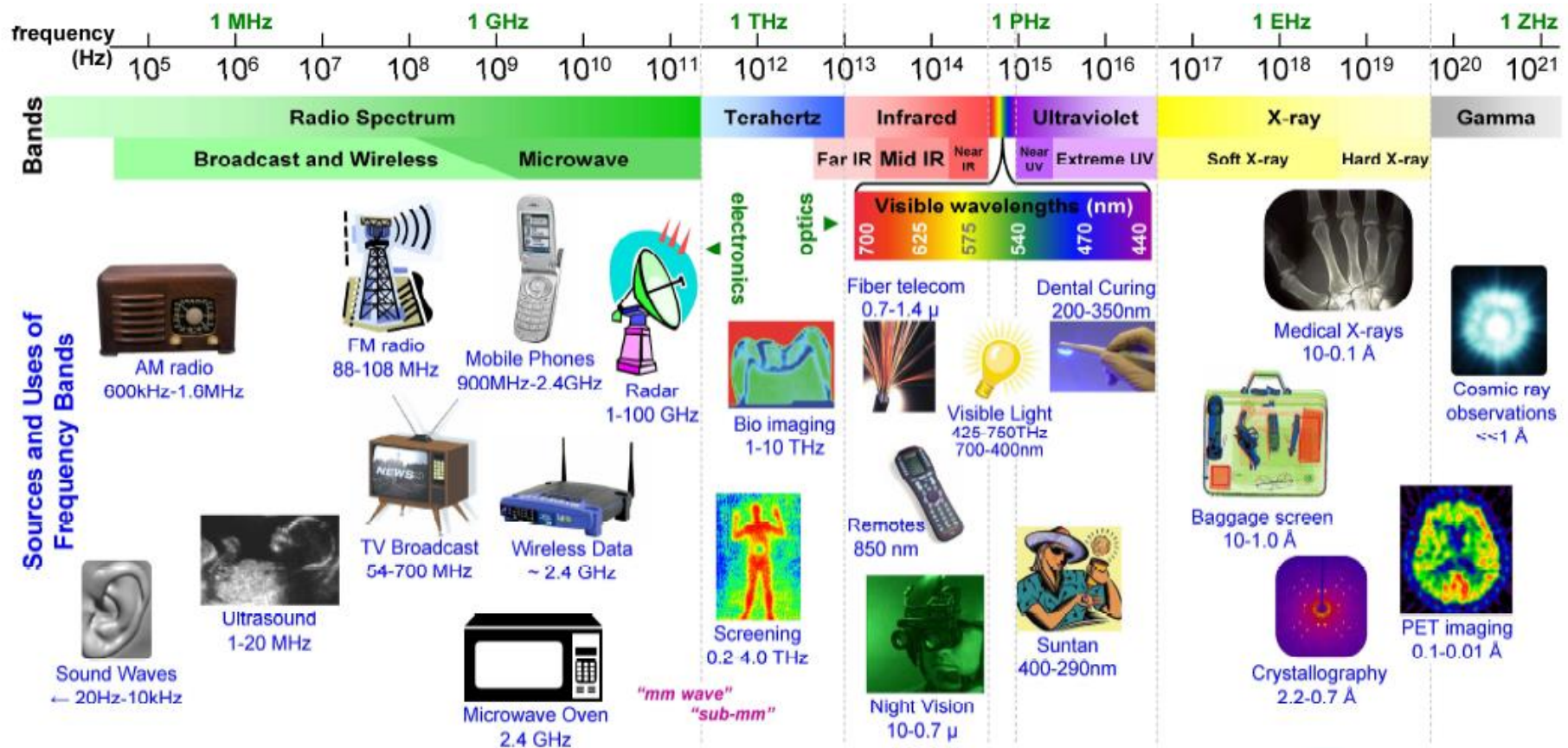




Sommaire

1. Un peu d'histoire...
2. Pourquoi communiquer par Optique sans Fils ?
3. Comment communiquer par Optique sans Fils ?
4. Applications
5. Recherche/ Challenges

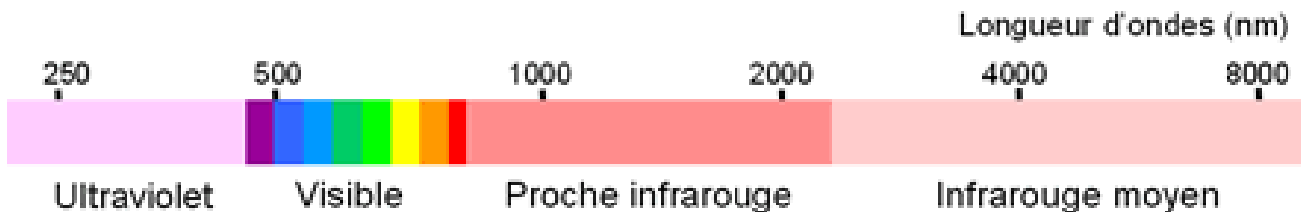
Spectre électromagnétique



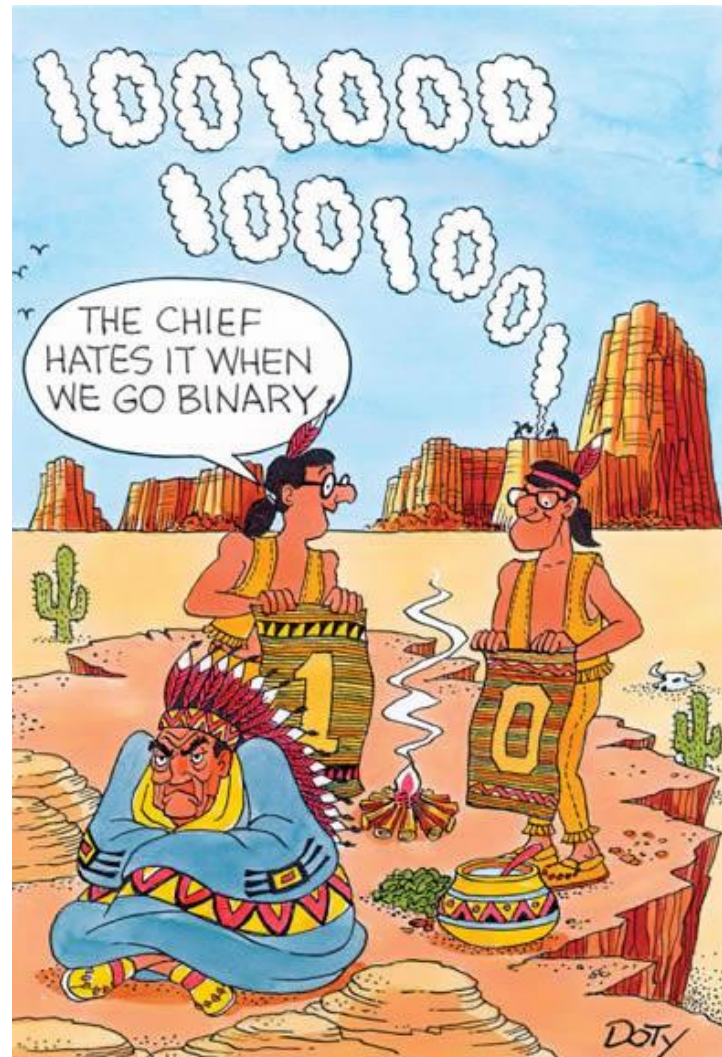
Optique sans fils

- Entre $\approx 10^{13}$ Hz et 10^{16} Hz \rightarrow on parle en longueurs d'onde
- Plusieurs technologies en fonction de la gamme :
UV, Visible, proche Infrarouge

Les différentes zones du spectre lumineux



Un peu d'histoire...



Un peu d'histoire...

- **1790 : Claude Chappe - le télégraphe optique au service de la révolution**

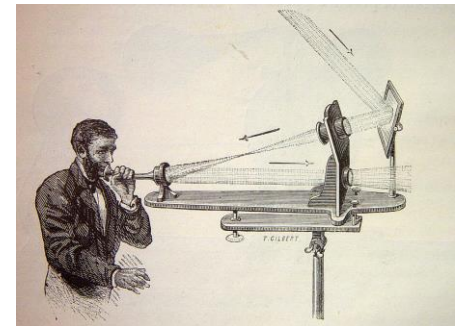
permet de communiquer sur une longue distance des signaux codés que chaque guetteur observe à la longue vue et répète lors de sa transmission au sémaphore suivant.



Le télégraphe optique de Chappe - Ancienne église et la tour du télégraphe à Montmartre
Aquarelle, XIXe siècle - © Bibliothèque nationale de France

Un peu d'histoire...

- **1880 : Graham Bell – le photophone**
première communication optique sans fils de la voix sur $\approx 200\text{m}$



Un peu d'histoire...

■ 1960 : invention du laser

- De nombreuses démonstrations de communications optiques en espace libre (*Free Space Optics* ou FSO) entre 1960 et 1970
- Applications militaires et spatiales

■ 1950-1960: *Diodes LED (Light Emitting Diode)* *de l'infrarouge au vert*

Un peu d'histoire...

- **1979 : Démonstration de la faisabilité d'un réseau de communication Indoor (≈ 100 Kbps) par optique sans fils en Infrarouge (IR)**

F.R. Gfeller and U. H. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474–1486, Nov. 1979

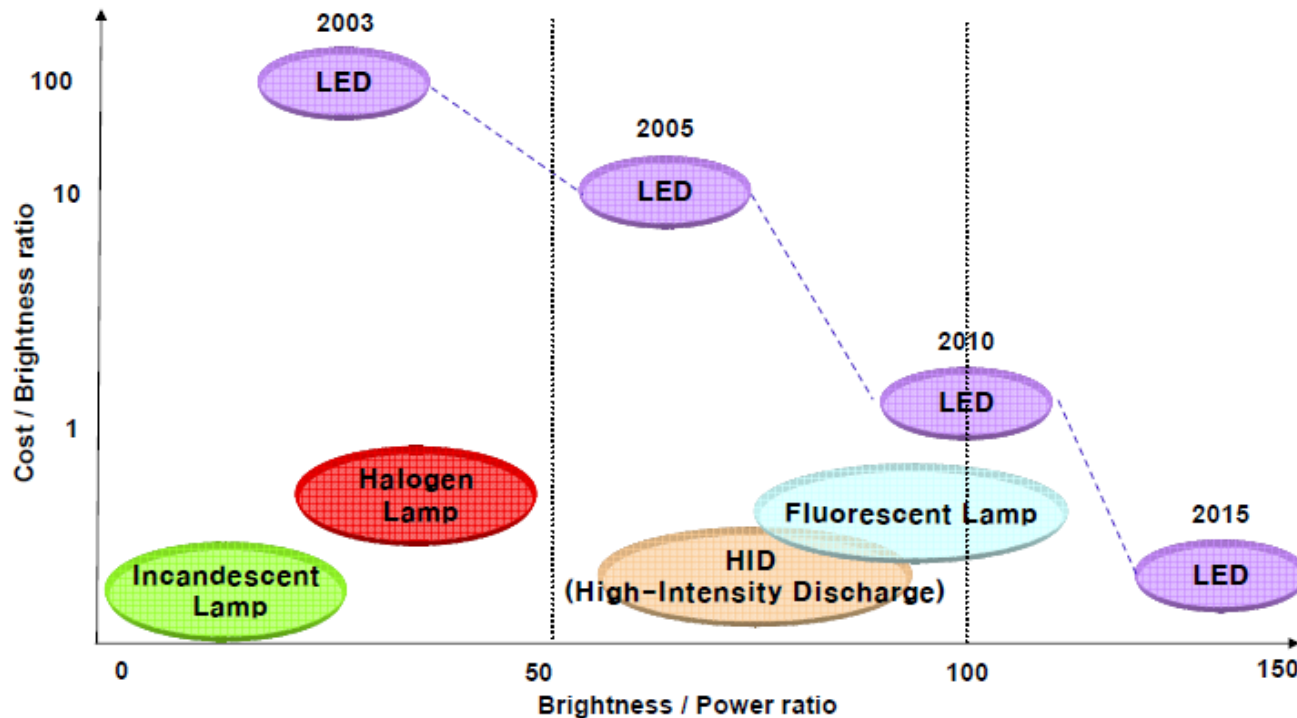
- **1993 : Standard (IrDA) pour les communications IR : mobile phones, laptops, cameras, remote controls**

Un peu d'histoire...

→ 1980 LED bleue → LED « blanche »

→ Les LED : une révolution dans le domaine de l'éclairage
efficacité énergétique, durée de vie, coût

❖ Performance and Price comparison

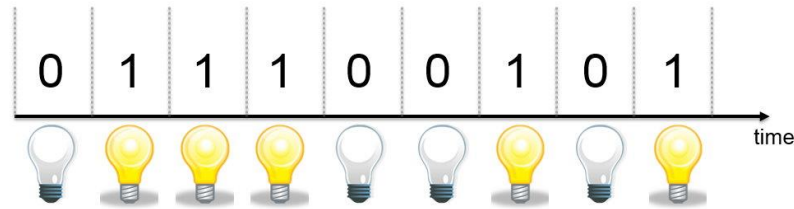


Source: Credit Suisse, 2006.11.2

Un peu d'histoire...

→ Les LED : *capacité de communication*

Il est possible de faire clignoter des LEDs à haute fréquence :



l'oeil humain : incapable de déceler les changements de luminosité (fréquence au delà de 1KHz); illusion que le flux de lumière est continu

- *Communications dans le Visible*
- **Visible Light Communications (VLC) :**
- **1^{er} standard en 2011 IEEE802.15.7**

Classification des communications optiques sans fils

OWC : *Optical Wireless Communications*

■ On définit plusieurs bandes:

- UVB-C : 200 -280nm : *UV communications*
- Entre 400 et 750 nm : *Visible Light Communications (VLC), Li-Fi*
- Entre 750 et 1600 nm : *Free Space Optics (FSO)*
 - 750-950nm : *proche infrarouge (IR)*
 - Une bande autour de 1300nm
 - Une bande autour de 1550nm
 - Ces deux dernières bandes correspondent aux bandes fibre optique

Classification des communications optiques sans fils

■ Chaque bande a des avantages et des inconvénients.

La longueur d'onde détermine:

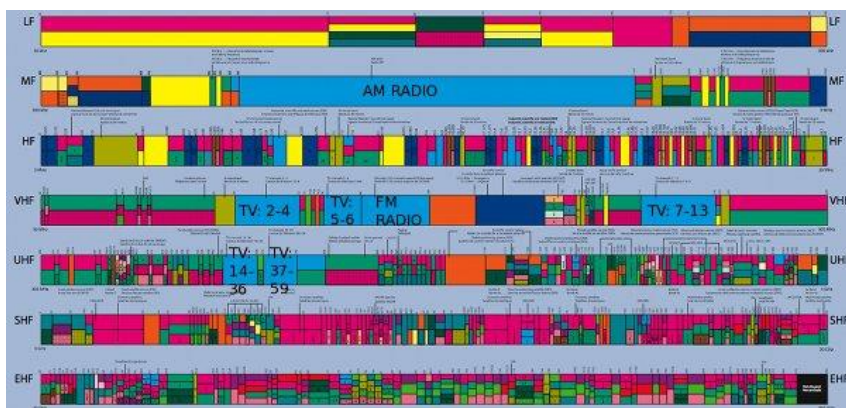
- *Les propriétés des composants optiques et optoélectroniques*
- *La puissance maximum admissible*
- *Les propriétés physiques du canal*
- *Le coût économique*



Pourquoi communiquer en Optique sans Fils ?

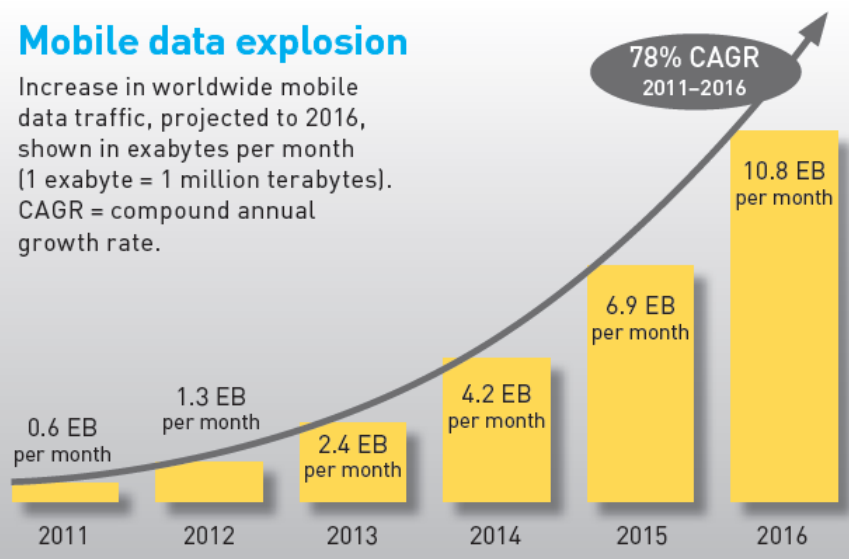
Pourquoi communiquer en Optique sans Fils ?

■ Une solution/ à la saturation de la bande radiofréquence



Mobile data explosion

Increase in worldwide mobile data traffic, projected to 2016, shown in exabytes per month (1 exabyte = 1 million terabytes). CAGR = compound annual growth rate.



Source: Cisco Visual Networking Index, May 2013

- En Optique : Bande non régulée (pas de licence) et très abondante (200 THz dans la bande 700-1500 nm)
- Très haut débit

Pourquoi communiquer en Optique sans Fils ?

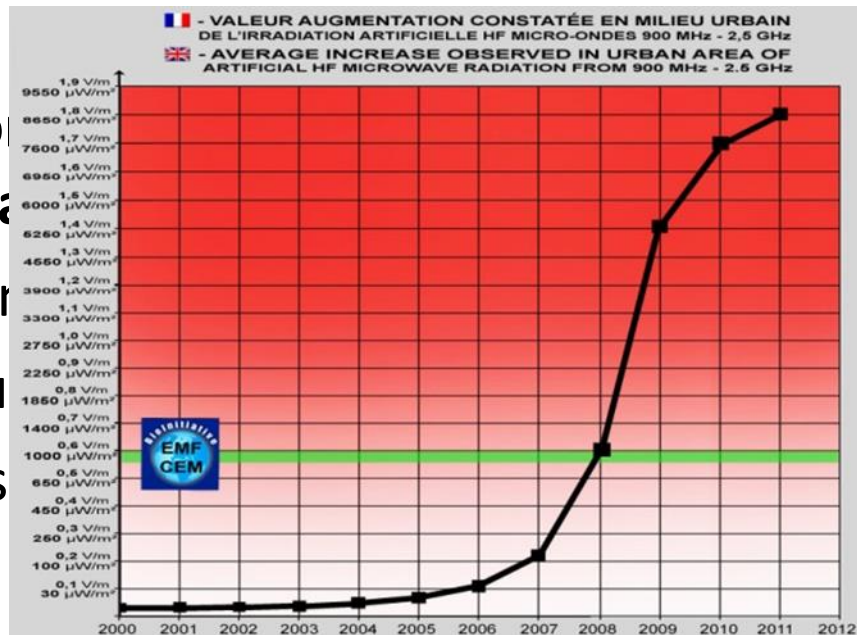
■ Une solution pour diminuer la « pollution » électromagnétique

→ En optique :

- Pas d'interférence avec d'autres équipements électriques ou électroniques
- Pas de problème de santé publique

■ Une solution radio est inacceptable dans les environnements où la radio est indispensable :

- transmission
- centrale nucléaire
- milieux hospitaliers



environnements où la radio est indispensable :

Pourquoi communiquer en Optique sans Fils ?

- Une solution pour renforcer la sécurité des communications

- Les ondes optiques ne traversent pas les murs : sécurité
- En Visible : l'information ne circule que là où va la lumière

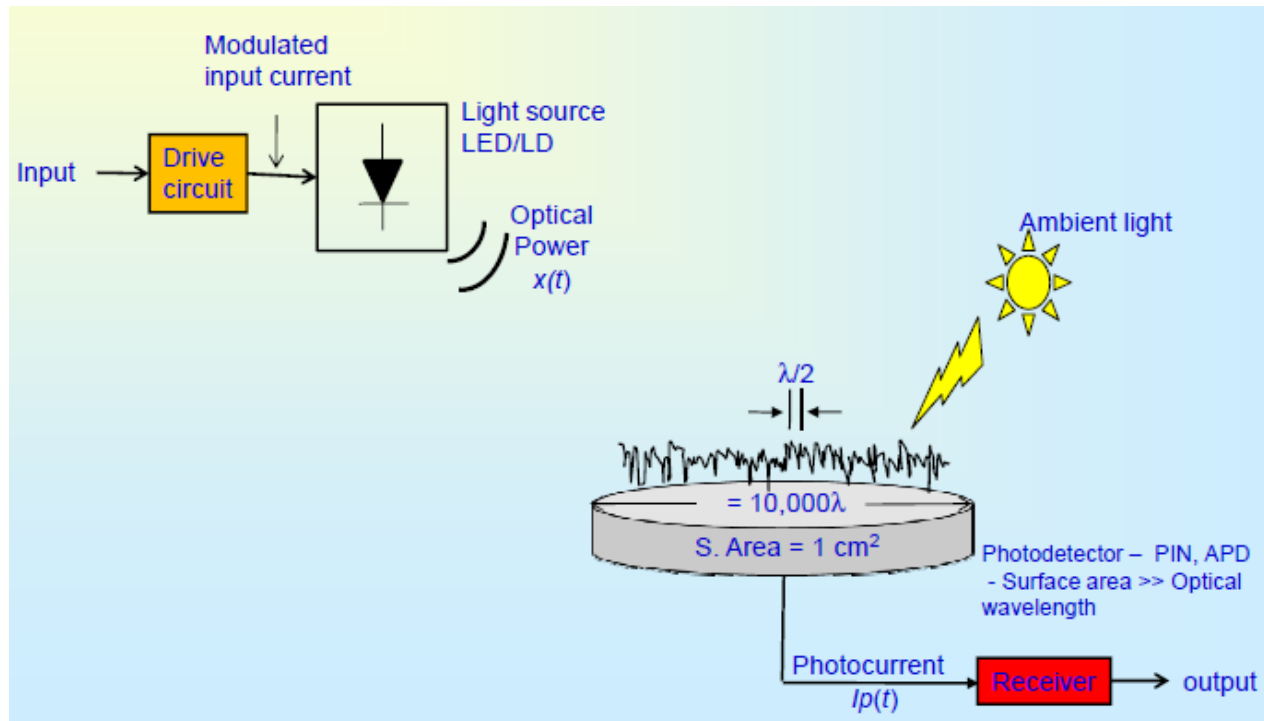




Comment communiquer en Optique sans Fils ?

Principe général

Schéma IM/DD : Modulation en Intensité/ Détection directe



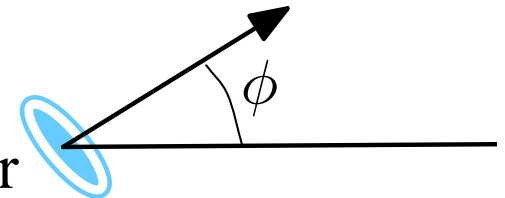
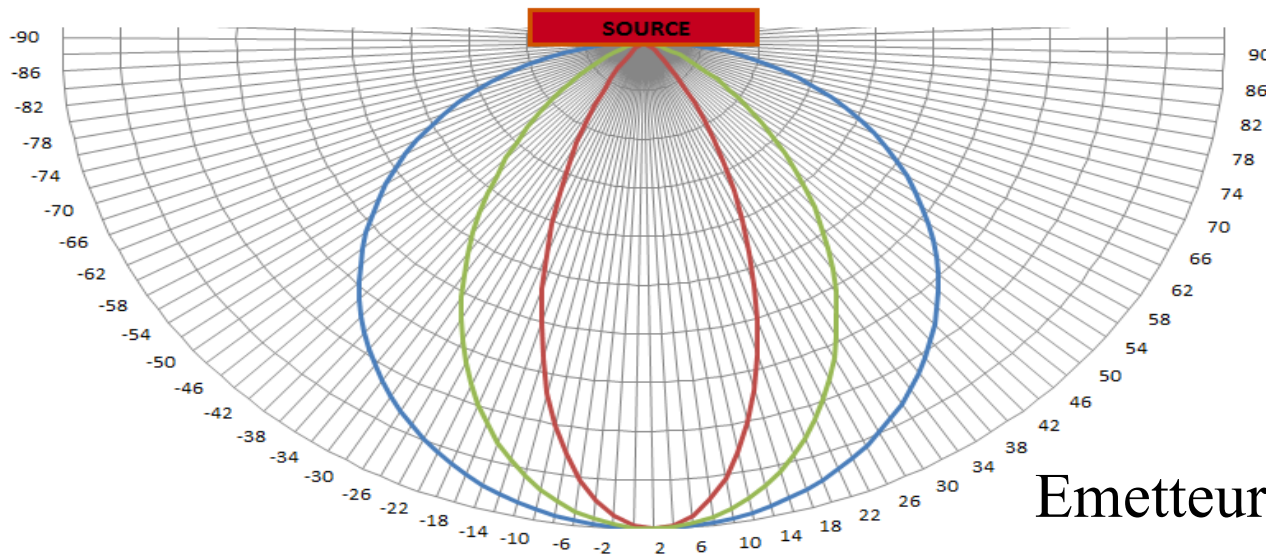
- La source \rightarrow transforme un signal électrique en puissance optique rayonnée (Modulation)
- L'onde optique se propage dans le canal
- Le récepteur détecte une puissance optique par unité de surface \rightarrow signal électrique : photo-courant (Démodulation)

Emission

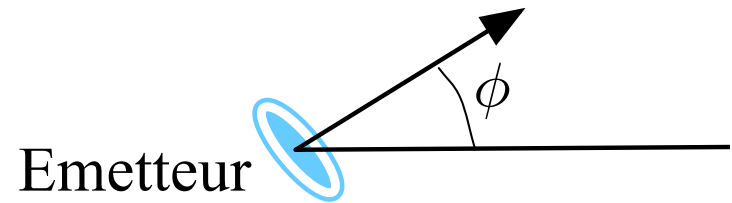
■ Caractéristiques :

■ Répartition spatiale :

- L'intensité rayonnée (Lambertien) : $I(\varphi) = I_0 \cos^m \varphi$
 I_0 intensité maximum en $\varphi = 0$
- Le nombre m représente une mesure de la directivité
 - Plus m grand, plus la source est directive



Emission

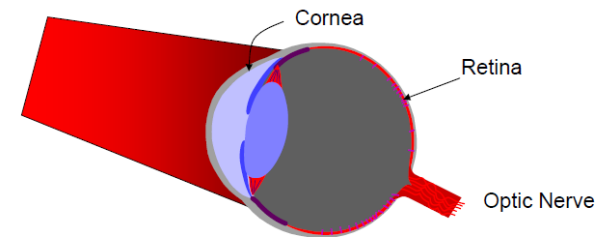


- Puissance rayonnée (W)

$$P_t = 2\pi \int_0^{\varphi_1} I(\varphi) \sin \varphi d\varphi = \frac{2\pi I_0}{(m+1)}$$

- Dans le proche IR (700-1000nm): l'œil humain peut être endommagé (rétine)
- La cornée est opaque pour $\lambda > 1400\text{nm}$

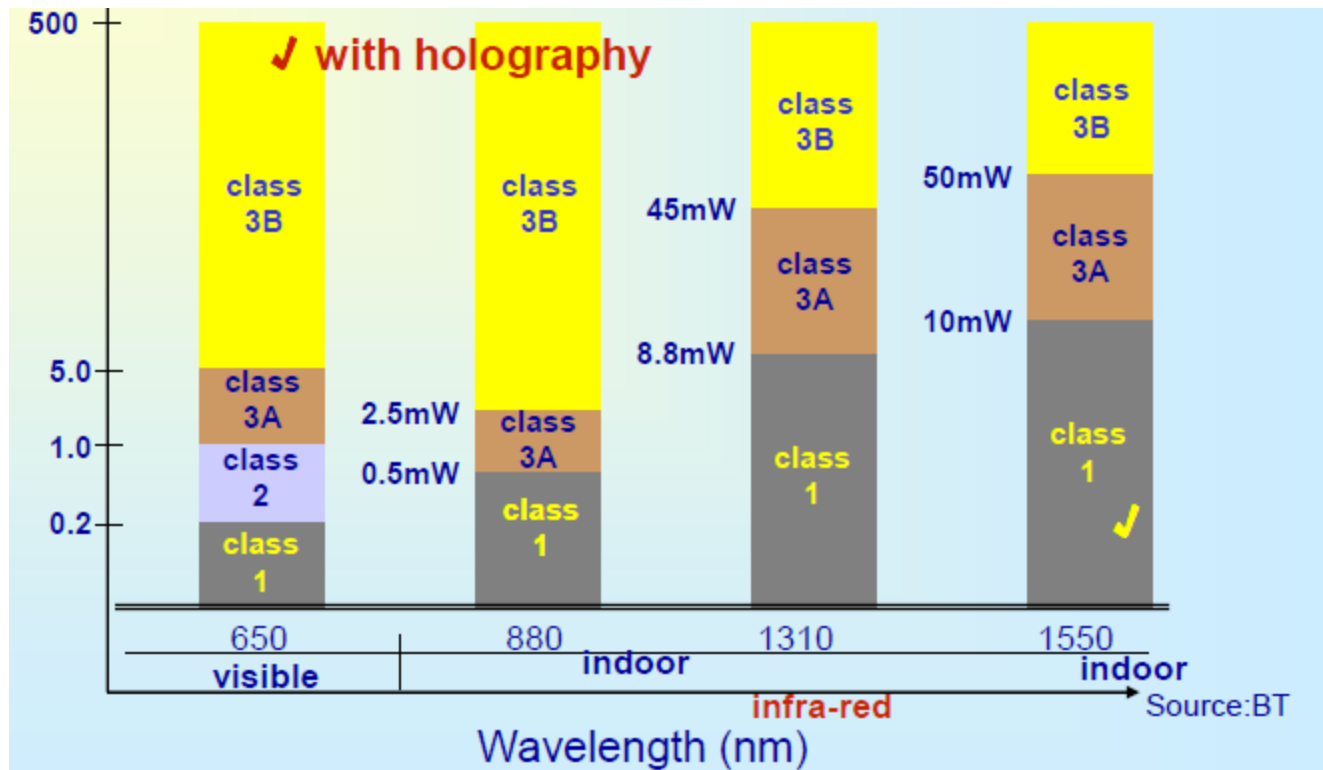
Limitations sur $I_0\text{max}$ → puissance maximale en fonction de la taille et de la directivité de la source



- ❖ **VLC, LiFi** : des contraintes liées aux standards et régulation de l'éclairage

Normes

Puissance
(mW)



La classe 1 correspond à une utilisation sans restriction

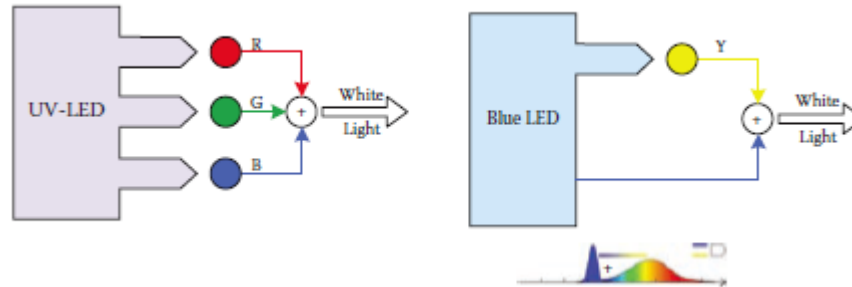
Sources en IR

■ Diode LED ou diode laser

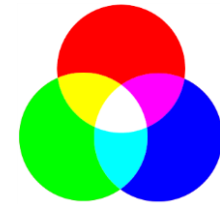
Characteristics	LED	LD
Optical output power	Low power	High power
Optical spectral width	25–100 nm	0.01–5 nm
Modulation bandwidth	Tens of kHz to hundreds of MHz	Tens of kHz to tens of GHz
E/O conversion efficiency	10–20%	30–70%
Eye safety	Considered eye safe	Must be rendered eye safe
Directionality	Beam is broader and spreading	Beam is directional and is highly collimated
Reliability	High	Moderate
Coherence	Noncoherent	Coherent
Temperature dependence	Little temperature dependence	Very temperature dependent
Drive and control circuitry	Simple to use and control	Threshold and temperature compensation circuitry
Cost	Low	Moderate to high
Harmonic distortions	High	Less
Receiving filter	Wide—increase noise floor	Narrow—lower noise floor

■ dépend de l'application, de la portée, de la puissance...

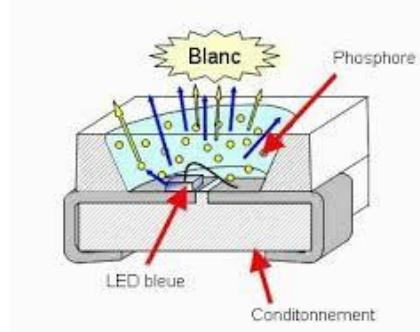
LED Visible



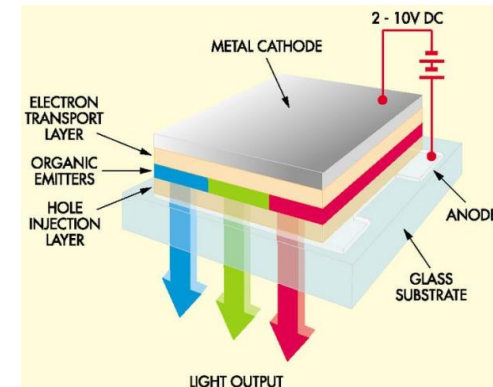
- En combinant plusieurs LED bleu-vert-rouge
(470 -525 - 625 nm)



- Avec une seule LED bleue et excitation d'un phosphore
Bas coût
→ la plus classique



- Plus récemment : les LED organiques (OLED)
Flexible, grande surface



Caractéristiques en Visible

Un luminaire : LED + driver électronique pour contrôler la luminosité

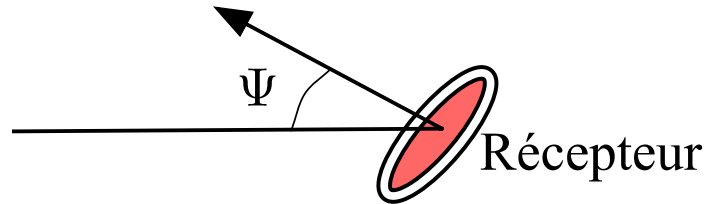
Pour communiquer :

- Soit on exploite les circuits existants → adaptation des circuits → limitation des performances
- Soit on développe un nouveau driver → le luminaire n'est plus bas coût



Réception

■ Caractéristiques :



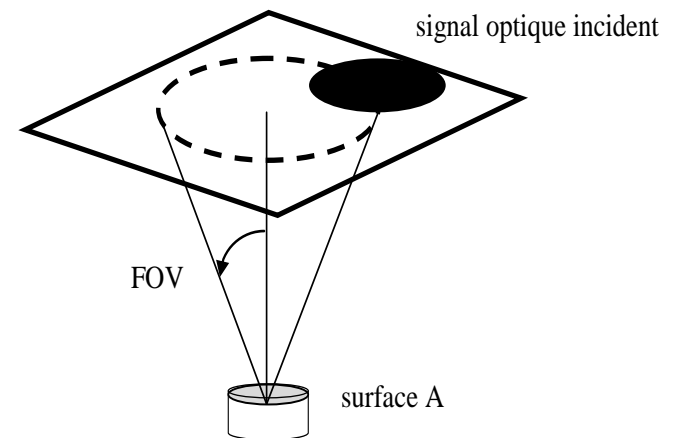
- *Le récepteur détecte l'intensité optique par unité de surface*
- *La surface du récepteur est $\gg \lambda \Rightarrow$ pas d'évanouissement multi-trajets comme en RF*
- *La surface effective de collecte : $A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq FOV \\ 0 & \psi \geq FOV \end{cases}$*
- *A : surface physique*

FOV: angle correspondant au champ de vision (Field of View)

\rightarrow impact sur la couverture

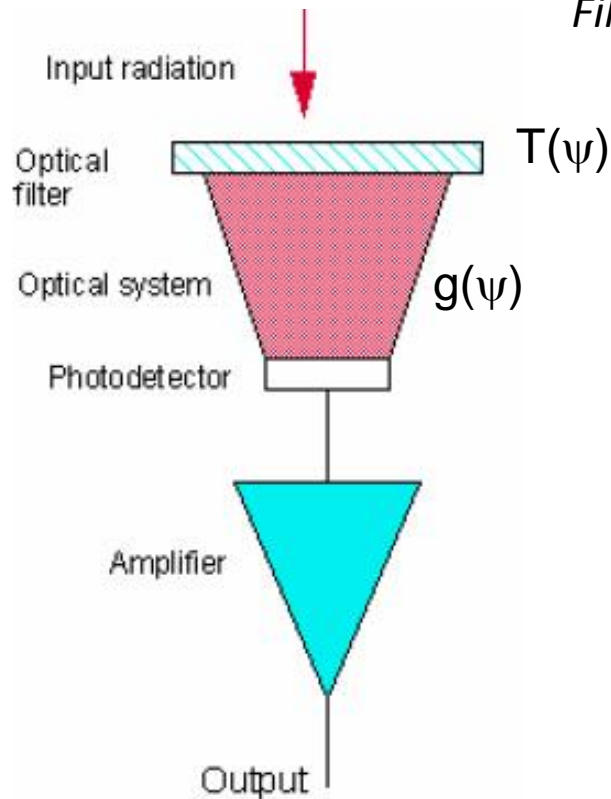
■ Sensibilité

- *Puissance optique minimum détectable*
- *Conversion puissance/courant : R (A/W)*



Récepteur

Pour augmenter la surface effective de collecte :
Filtre + concentrateur optique d'indice de réfraction n



$$g(\psi) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(FOV)} & 0 \leq \psi \leq FOV \\ 0 & \psi \geq FOV \end{cases}$$

$$A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A \cos(\psi) \cdot T(\psi) \cdot g(\psi) & 0 \leq \psi \leq FOV \\ 0 & \psi \geq FOV \end{cases}$$

$$A_{eff}(\psi) \cdot \sin^2(FOV) \leq n^2 \cdot A$$

Récepteurs

■ ***En IR et Visible : photodiodes***



- *Composants semi-conducteurs qui convertissent la lumière en courant*
- *2 technologies*
 - *Photodiodes PIN (Positive Intrinsic Negative)*
 - *Photodiodes à avalanche : APD*

■ ***en Visible : capteur d'images***

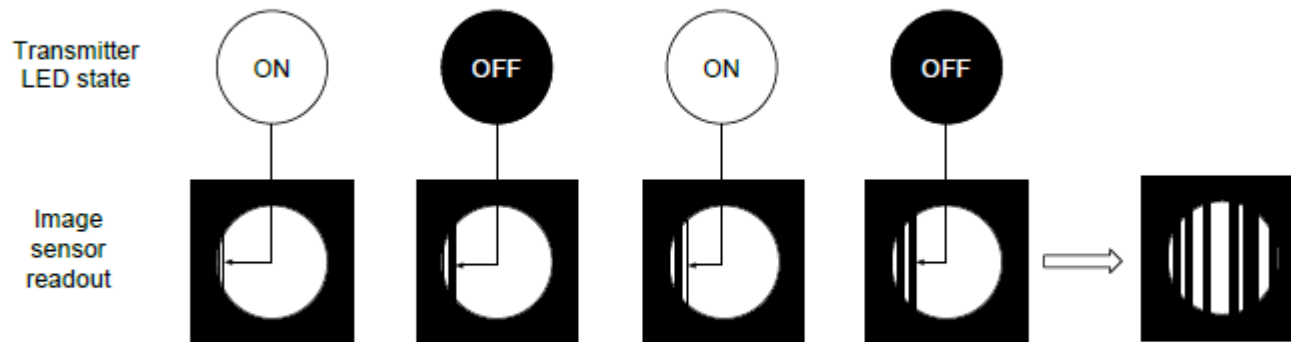


- *Matrices de photo-détecteurs*
- *2 technologies*
 - *CCD (Charge coupled Device)*
 - *CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor)*

Récepteurs


■ *en Visible : capteur d'images*

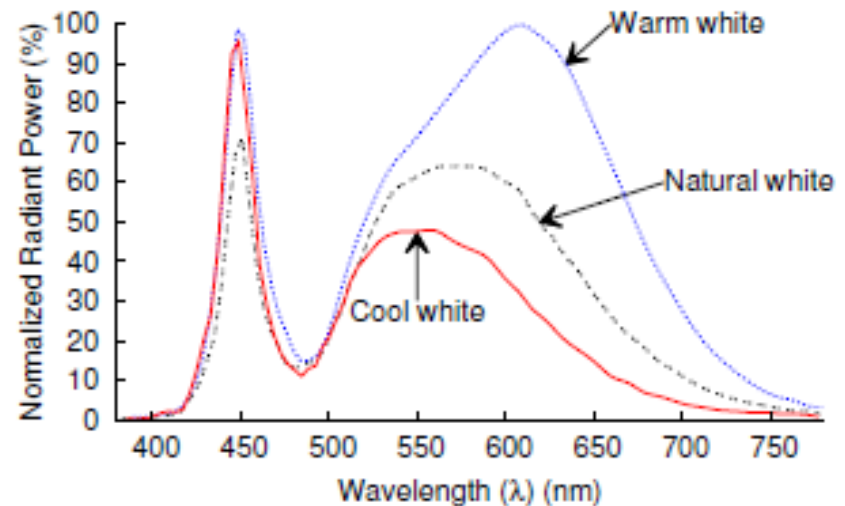
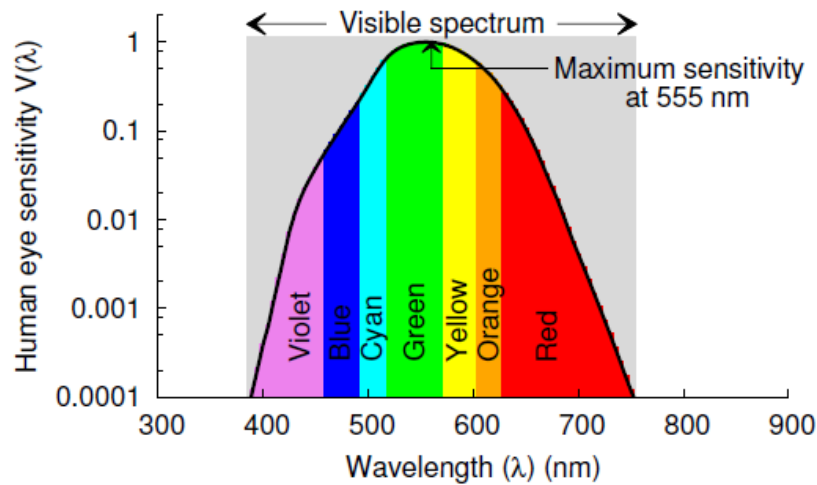
Utilisation du « rolling shutter » dans les caméras pour décoder (lecture des pixels par ligne)



(a) The rolling shutter effect observed when receiving data using an image sensor.

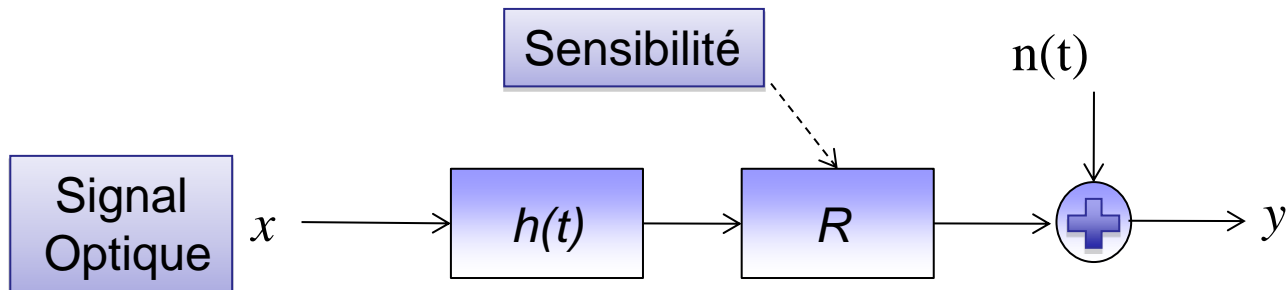
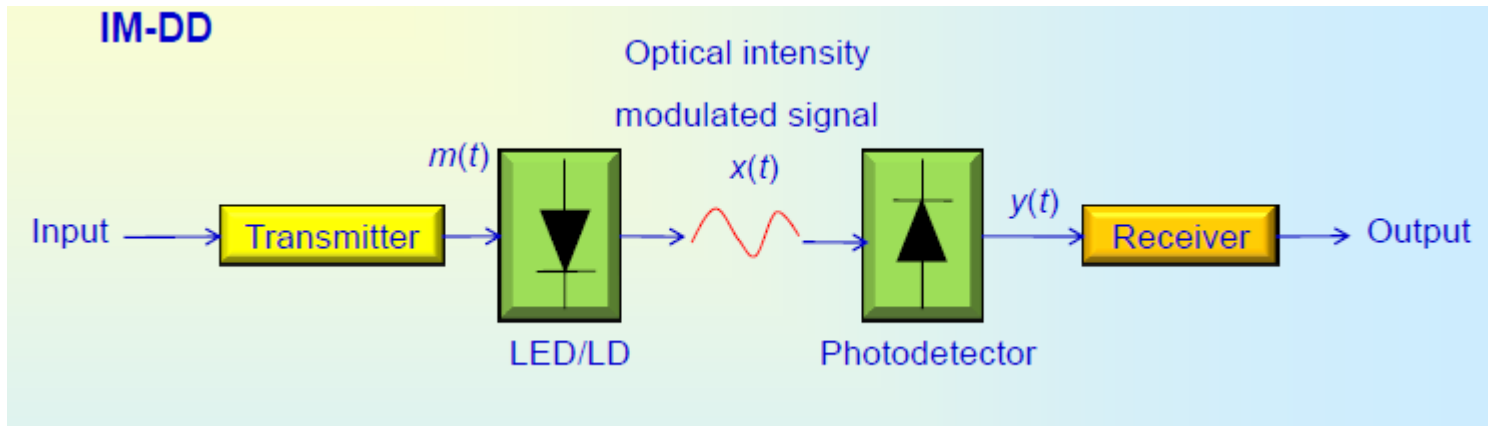
Récepteurs

- On a 2 récepteurs : le photorécepteur et l'œil humain 
- La puissance « perçue » dépend de la **sensibilité** de l'œil humain et de la **répartition spectrale de la puissance** de la LED



La condition d'éclairage définie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) exige que l'éclairement doit être entre 300 et 1500 lux (lumen/m²) pour un environnement de travail de bureau

Modélisation



En bande de base, au niveau du récepteur le courant électrique est donné par :

$$y(t) = Rh(t) \otimes x(t) + n(t)$$

Modélisation

$$y(t) = Rh(t) \otimes x(t) + n(t)$$

- $x(t)$ est la puissance optique transmise

- dépend du type de modulation utilisée

Débit = $1/T$

$$P_t = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt$$

- $h(t)$ représente la réponse impulsionnelle du canal

- déterminée suivant le type de propagation, la géométrie de la pièce et les positions des émetteurs-récepteurs.

- Le gain statique du canal : $H(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) dt$

- R est la sensibilité du photo-détecteur

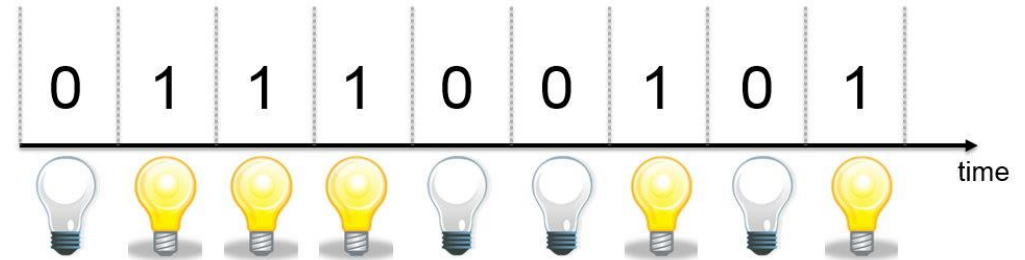
- $n(t)$ représente le bruit, caractérisé par sa variance σ_n^2

- Puissance reçue : $P_r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \frac{y(t)}{R} dt = H(0)P_t$

- Rapport signal sur bruit en réception: $SNR = \frac{R^2 P_r^2}{\sigma_n^2} = \frac{R^2 H(0)^2 P_t^2}{\sigma_n^2}$
 - A partir du SNR \rightarrow performances

Modulations

■ La plus simple : OOK

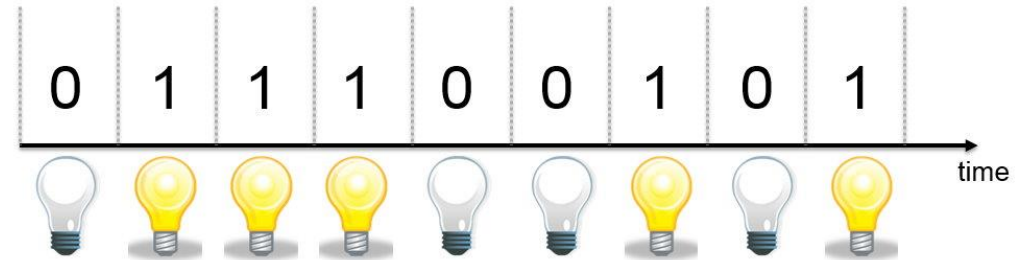


Une impulsion optique est émise ou non, selon l'information binaire $\{0,1\}$

→ A des performances limitées en Visible en fonction de la luminosité

Modulations

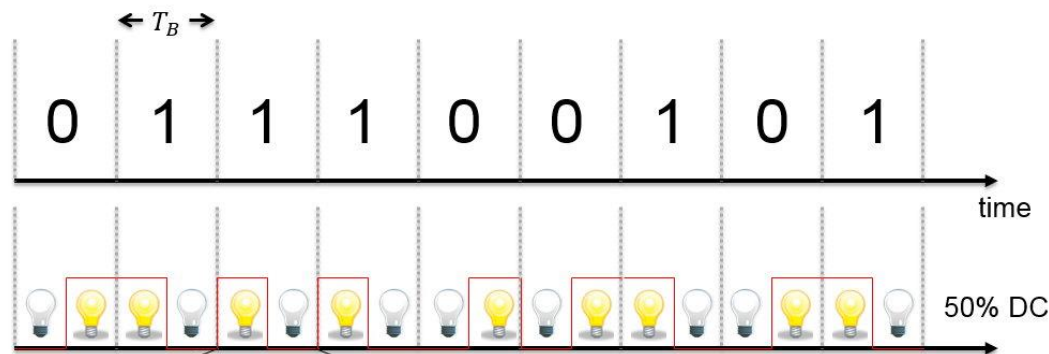
- La plus simple : OOK



- Pulse Position Modulation (*M*-PPM)

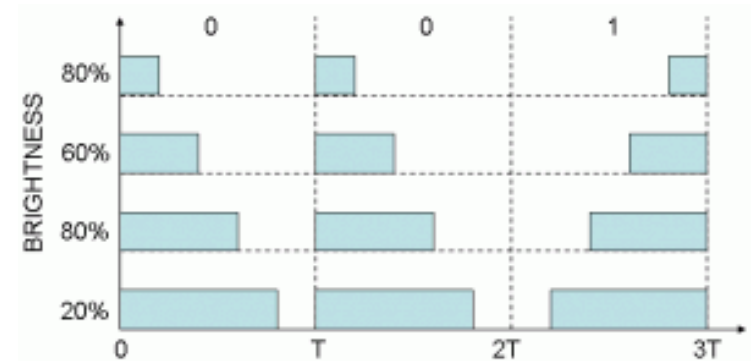
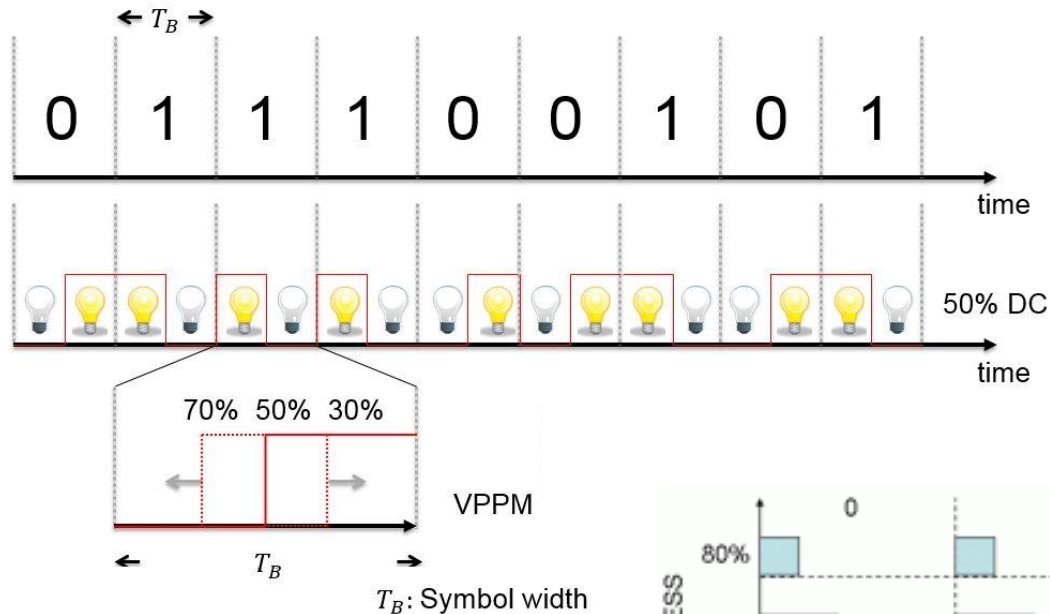
chaque intervalle symbole est divisé en M sous-intervalles ou chips.

L'information est transmise en envoyant une intensité lumineuse dans un des chips



Modulations VLC en tenant compte du contrôle de l'illumination

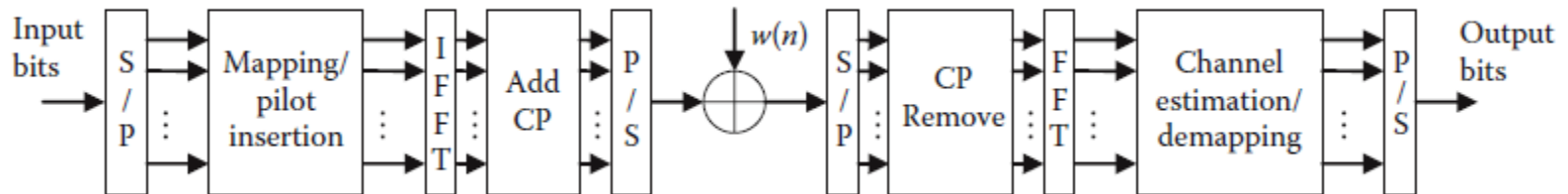
VPPM



Modulations

■ OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

- *très utilisée en RF pour lutter contre les effets d'interférences entre symboles*
 - *Signaux OFDM : complexes et bipolaires*
- *Adaptation aux systèmes IM/DD : signaux réels*

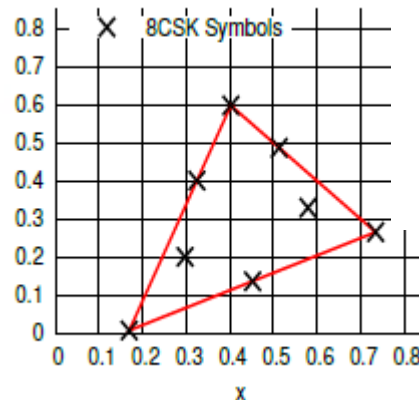
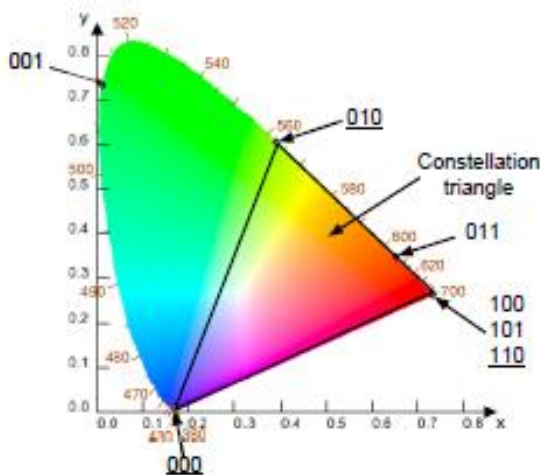
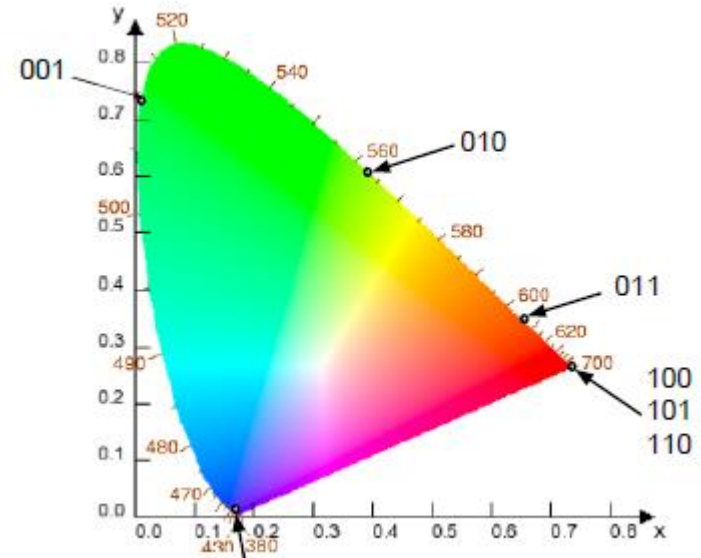


Modulation spécifique pour VLC

■ CSK (Colour shift keying)

- Modulation utilisée avec des LEDs RGB
- Basée sur la combinaison des couleurs en fonction des bits d'information

→ Limitation liée à la complexité

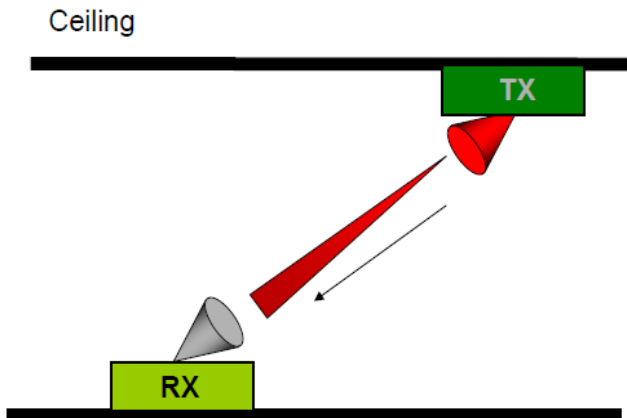


Band (nm)	Code	Center (nm)	(x, y)
380-478	000	429	(0.169, 0.007)
478-540	001	509	(0.011, 0.733)
540-588	010	564	(0.402, 0.597)
588-633	011	611	(0.669, 0.331)
633-679	100	656	(0.729, 0.271)
679-726	101	703	(0.734, 0.265)
726-780	110	753	(0.734, 0.265)

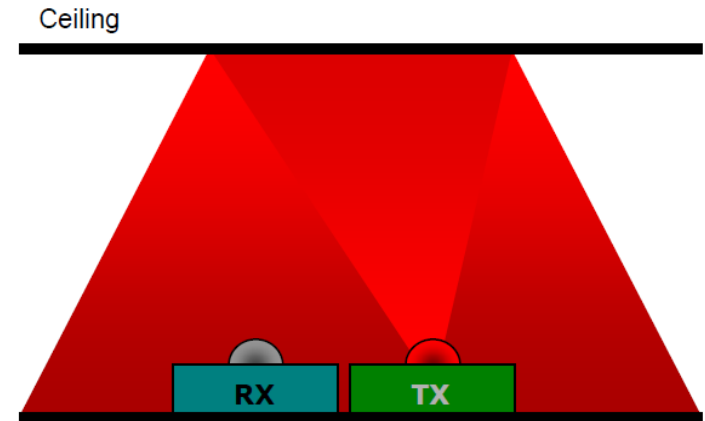
Canal de transmission

- 2 configurations de base :

Line-Of-Sight (LOS)



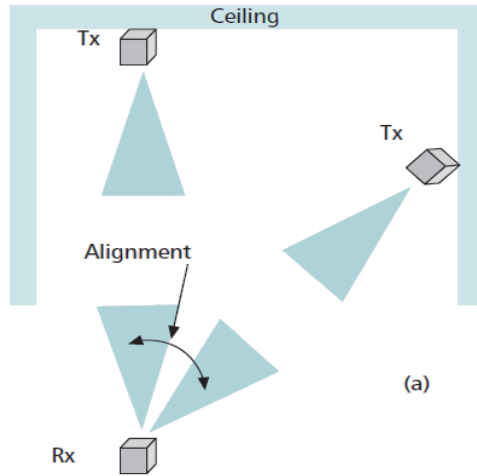
Diffus



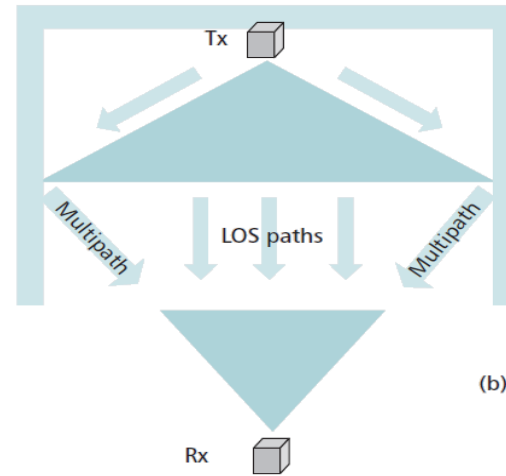
- LOS : performances ++ **mais** sensible aux obstructions (objets, personnes) et nécessité d'un alignement
- Diffus : atténuations liées aux réflexions et distorsion multi-trajet **mais** + robuste face aux blocages

Canal de transmission

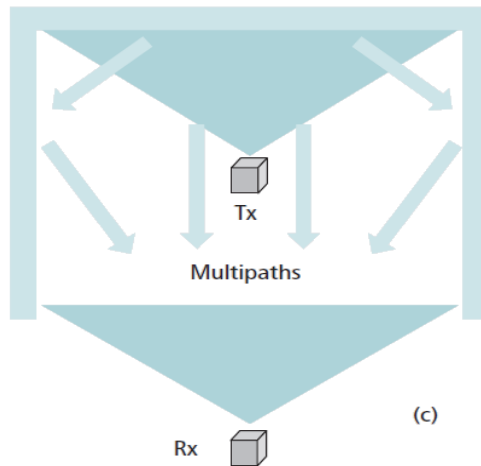
(a) Directed – line-of-sight (LOS)



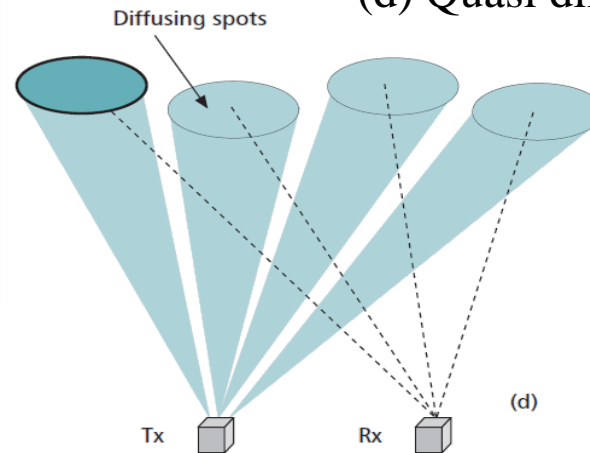
(b) Non-directed LOS



(c) Diffuse

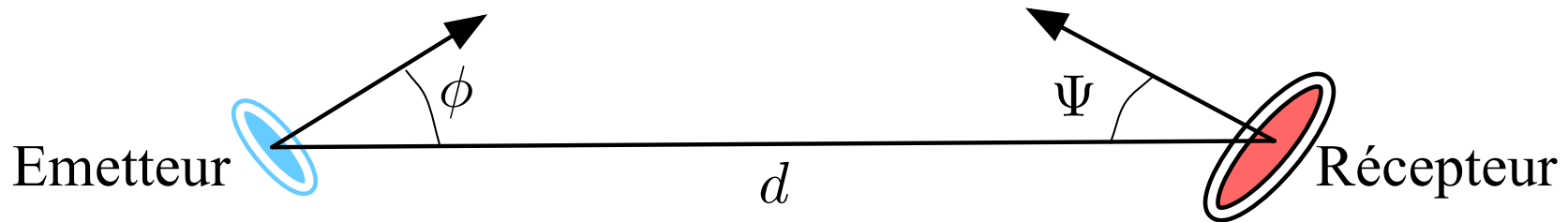


(d) Quasi diffuse



Canal de transmission

$$H(0) = \mathbf{H}_{LOS}(0) + H_{diff}(0)$$

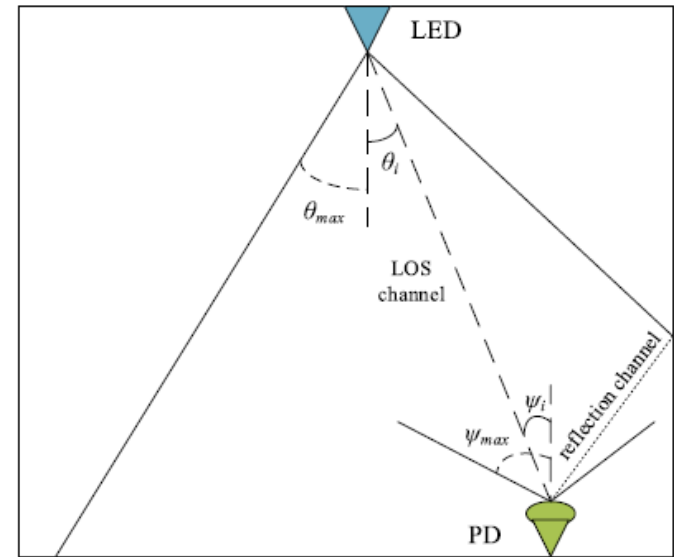


$$H_{LOS}(0) = \frac{A(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m \phi \cdot \cos \psi \quad 0 \leq \psi \leq FOV$$

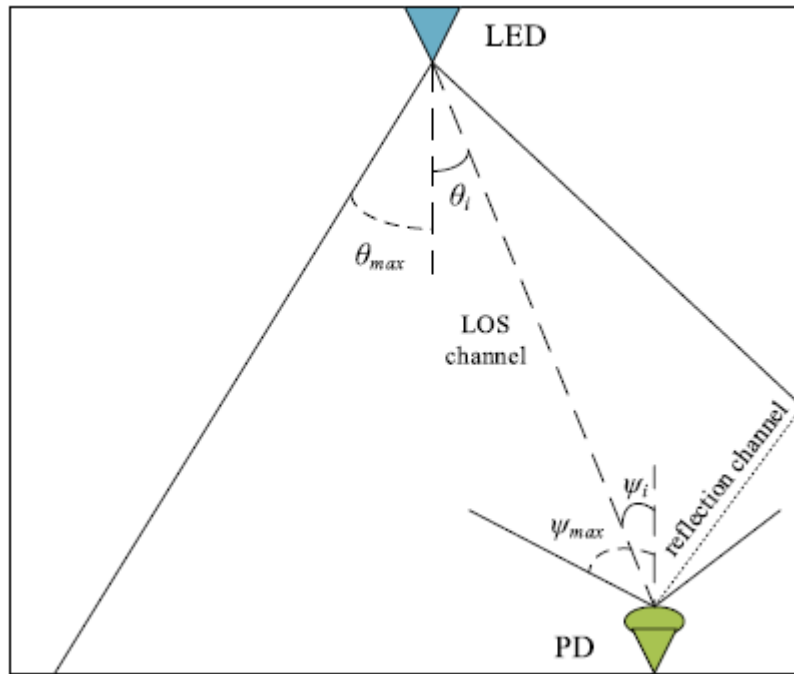
Canal de transmission

$$H(0) = H_{LOS}(0) + H_{diff}(0)$$

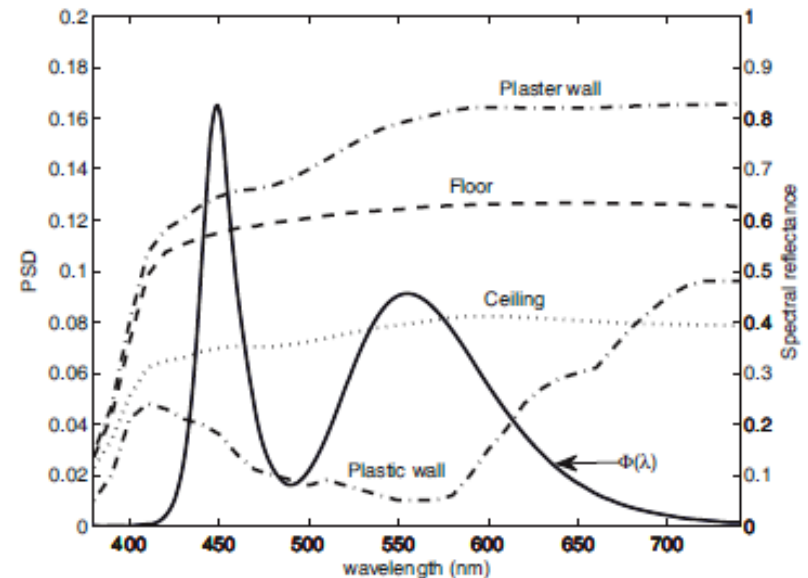
- En diffus, le gain est plus complexe
 - taille de l'environnement
 - réflectivité des surfaces
 - Obstacles
 - Position/orientations des E/R



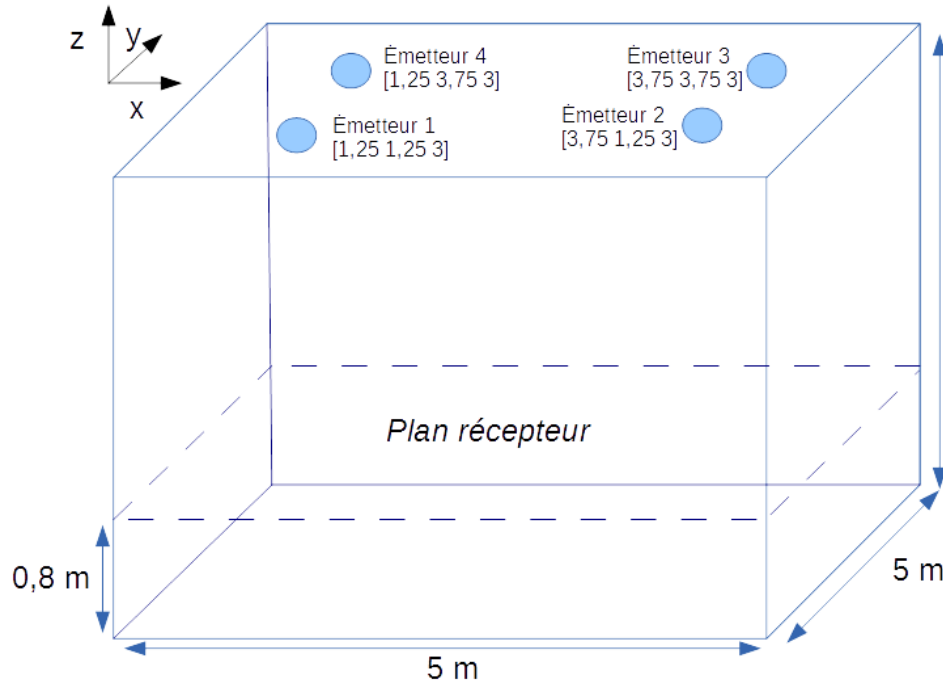
Configuration typique en VLC : non-directed LOS



Importance de la réflectivité des surfaces :



Exemple



Émetteur

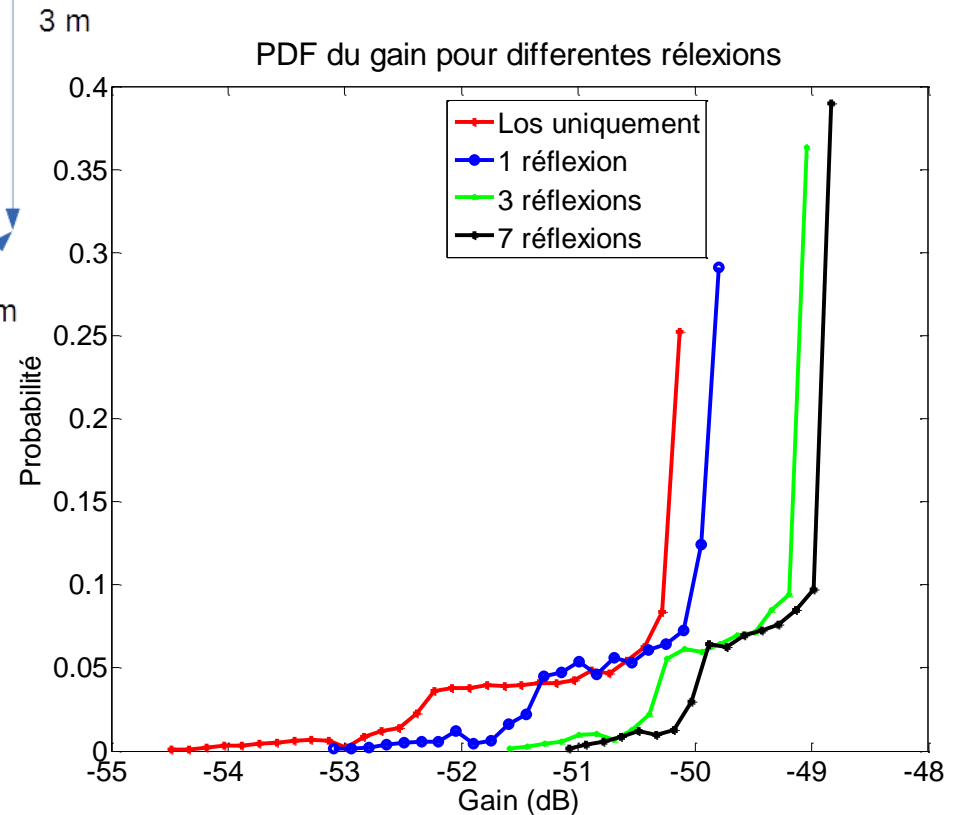
- semi-angle 60°
- orienté vers le sol

Récepteur

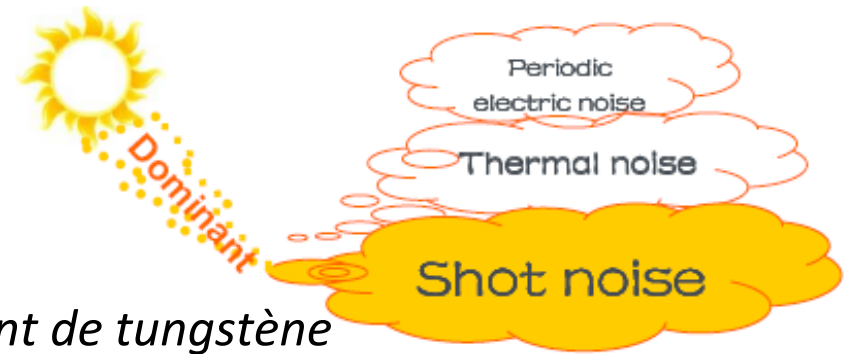
- surface 1cm²
- FOV = 65°
- Sensibilité: 0,33A/W
- orienté vers le plafond

ρ murs et plafond (plâtre) = 0,73

ρ Sol (plastique) = 0,3



Le bruit



■ Bruit optique ambiant

- *Lumière émise par un filament de tungstène*
- *Lumière émise par un tube fluorescent à basse fréquence*
- *Les télécommandes*
- *La lumière du jour*

→ Généralement filtré

■ Bruit du récepteur

- *Induit par la variation aléatoire du nombre de photons collectés appelé « shot noise », bruit de grenaille*
- *Bruit des amplificateurs : bruit thermique*

→ en première approximation c'est la partie « shot noise » qui est prépondérante : $\sigma_n^2 = 2qI_{bg}$ avec $I_{bg} = RP_{bg}$

q est la charge de l'électron et I_{bg} est le photo courant proportionnel à la puissance de la lumière ambiante P_{bg}

Exemple de performance

■ Lien LOS

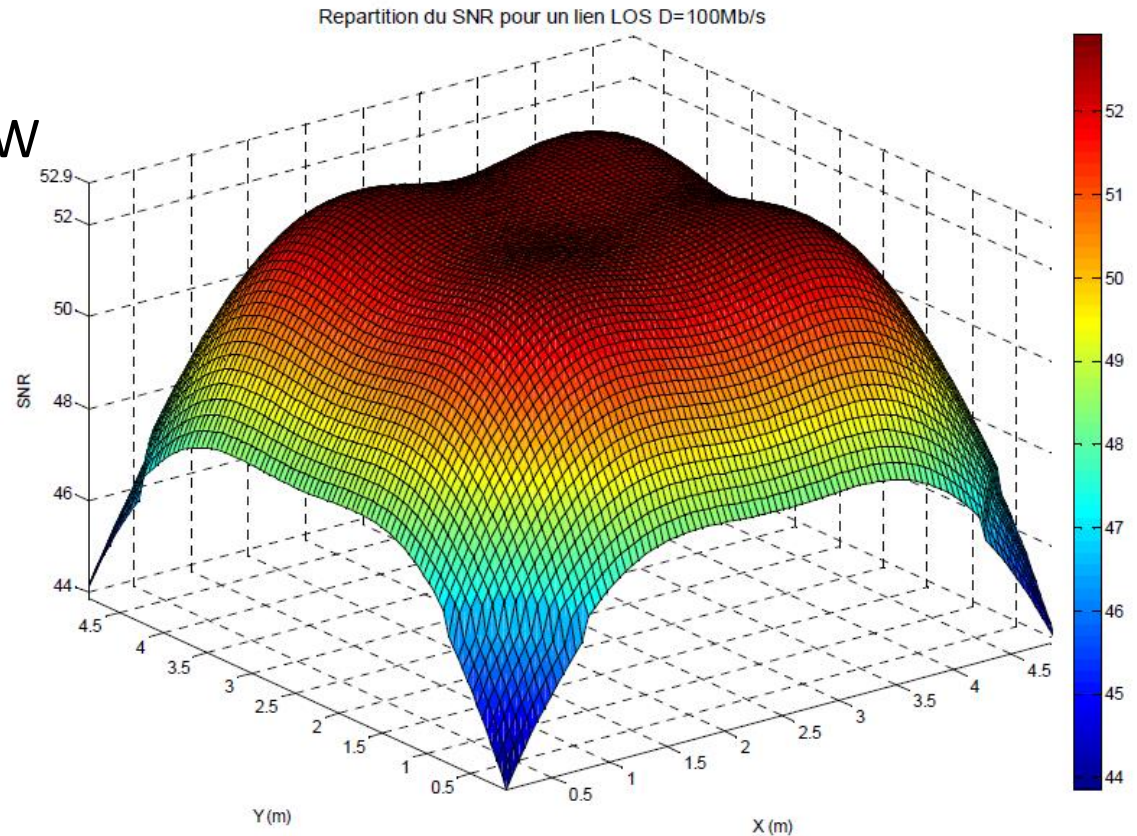
- Puissance totale 12W
- Modulation OOK
- Débit 100 Mbps
- Bruit
 - Soleil direct
 - photo-courant I_{bg} de 5100 μA

Emetteur

- semi-angle 60°
- orienté vers le sol

Récepteur

- surface 1cm²
- FOV = 65°
- Sensibilité: 0,33A/W
- orienté vers le plafond

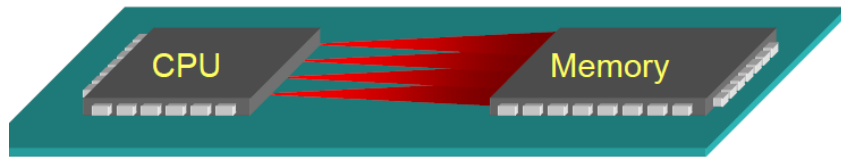




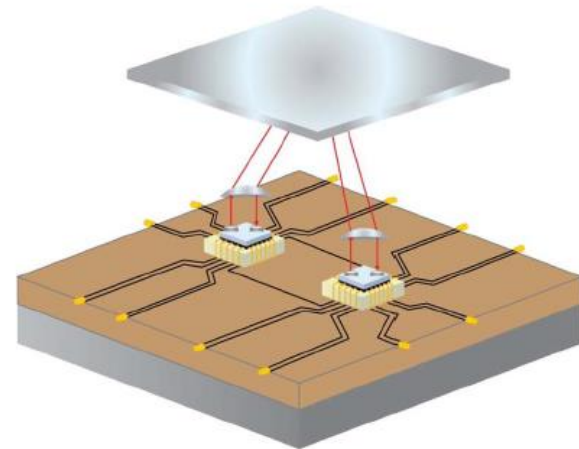
Applications

Applications très courtes portées

→ Communications à très courtes distances (mm-cm): IR, VLC



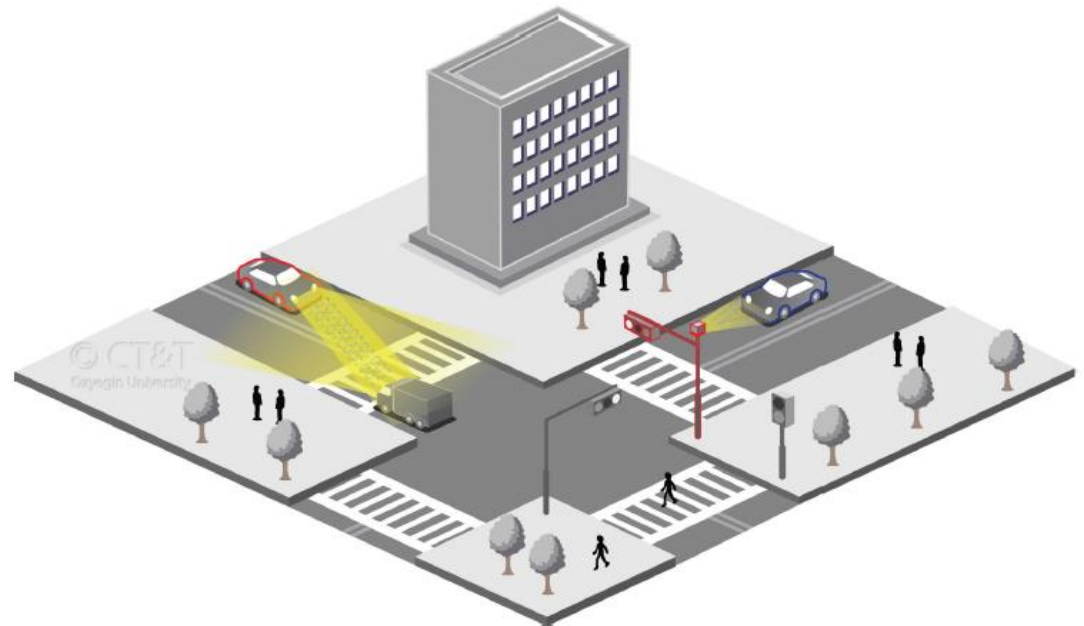
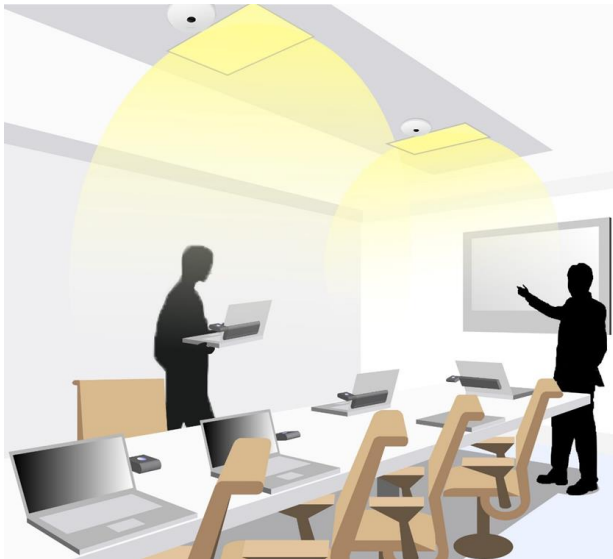
- Multi-pixel
- High Rate
- High interconnect density
- Low Power
- Power supply independent
- No EMI



Applications moyennes portées

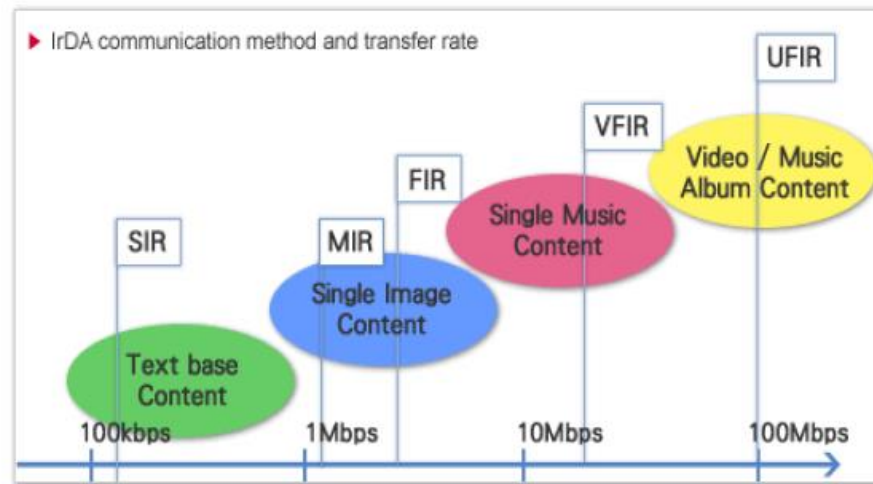
→ Communications à courtes (m) et moyennes distances (<10m) : IR, VLC, Li-Fi

en indoor et outdoor



Normes

■ Infrarouge : IrDA



■ VLC

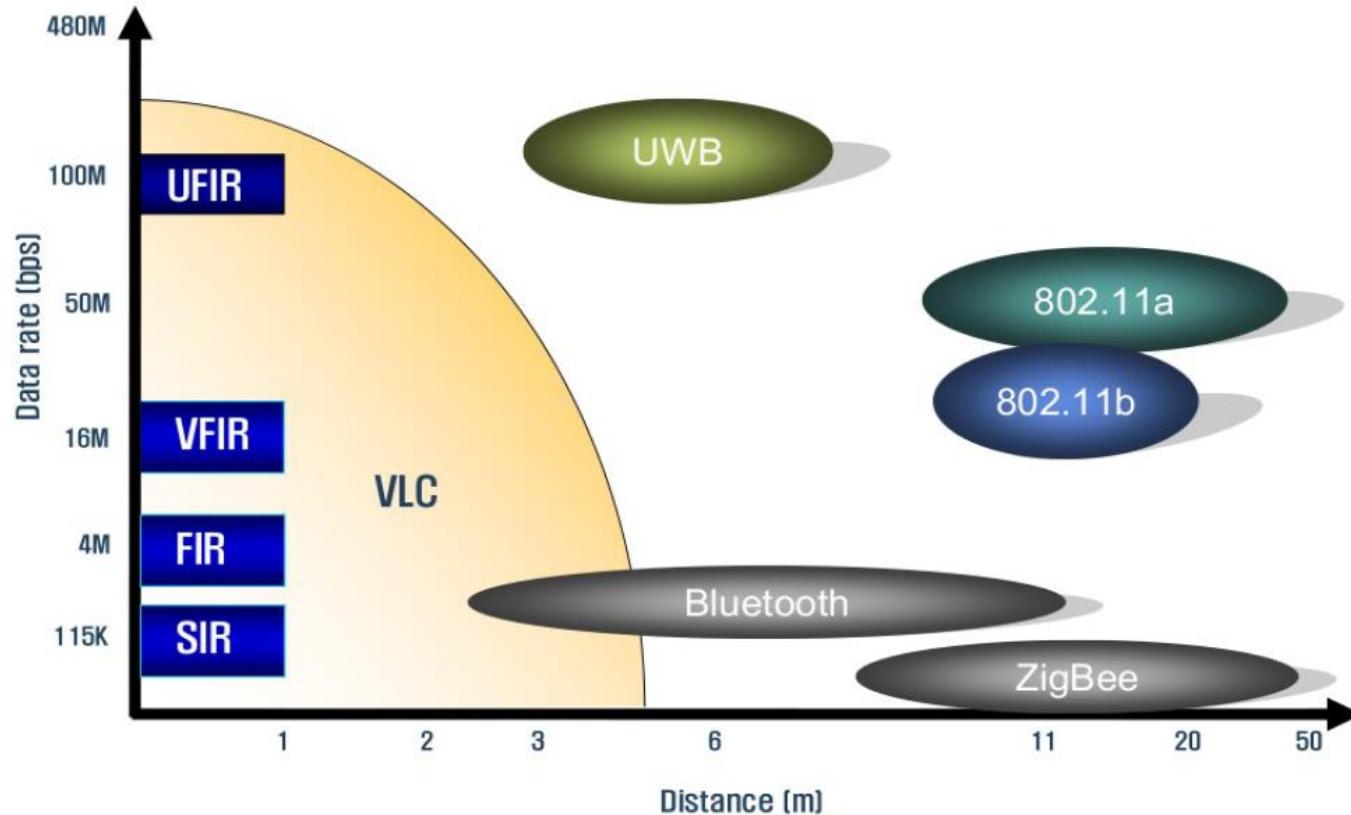
■ **2011** : Premier standard **IEEE** pour les VLC, **802.15.7**

■ **Actuellement IEEE 802.15.7r1 OWC TGroup : a revision**

inclut les gammes IR et UV + options :

- “Optical camera communications”
- “LED-ID” (wireless light identification system using LED)
- **Li-Fi** (high-speed, bidirectional, networked mobile wireless communication using light).

Normes

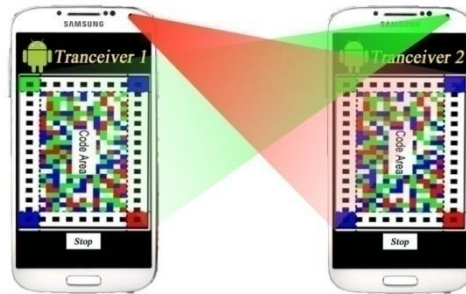


source: IEEE VLC Tutorial <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>

VLC- Li-Fi

■ Modes de communication en VLC:

- De l'infrastructure au mobile
 - Voie de retour : VLC, IR, RF
- Entre mobiles



■ Li-Fi : version Haut-débit des VLC

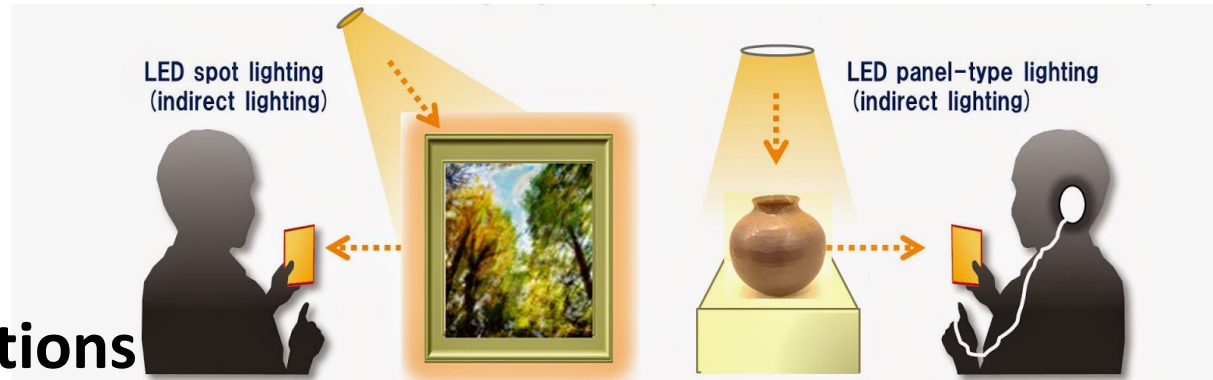
- 10 fois plus rapide que le Wi-Fi
- $\approx 1\text{Gbit/s}$
- Bidirectionnel → Connexion Internet en remplacement du WiFi



En indoor

■ Diffusion d'informations

- Bureaux, musées, hôpital
- Centres commerciaux
- Train, avion



En indoor

■ Localisation

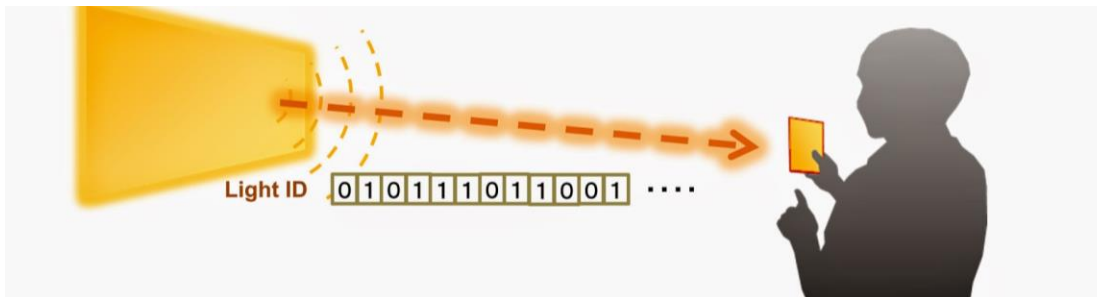
- Avantage/ RF:
 - *Nombre de luminaires >> nombre de spots WIFI*
 - *Grande précision*
- Possibilité d'utiliser la caméra du smartphone pour détecter l'identifiant de la lampe



- ## ■ Applications dans le domaine de la grande distribution :
- contenu personnalisé pour les clients par exemple

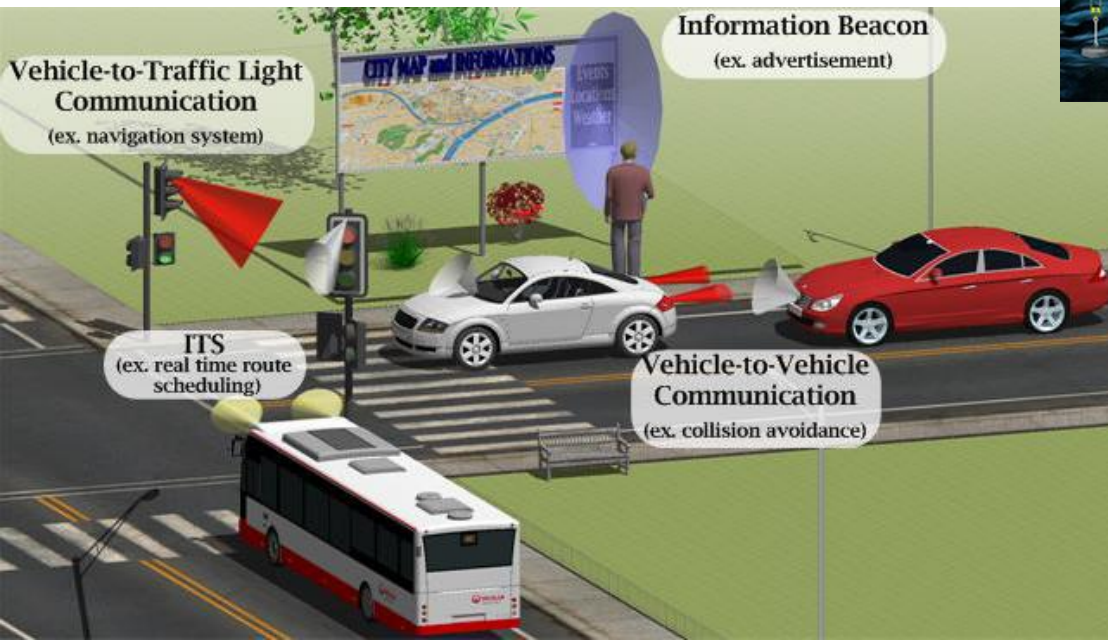
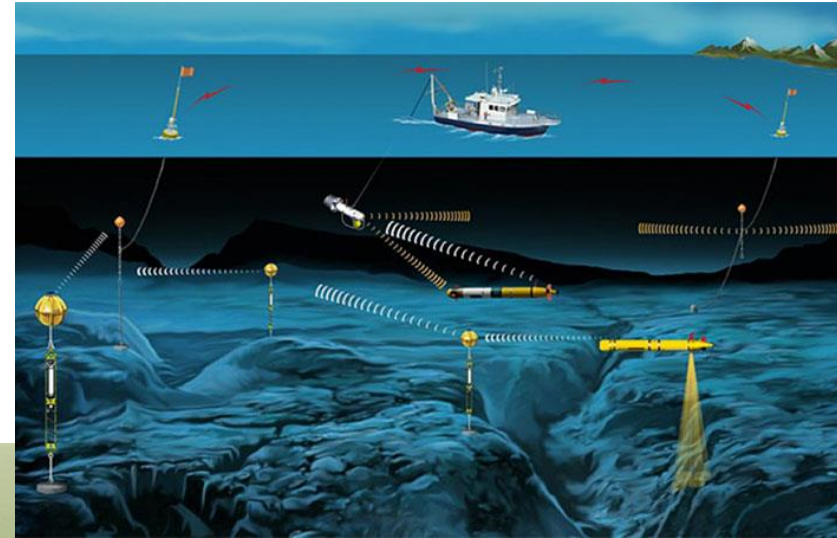
En indoor

- **Communications entre LEDs**
 - Jeux, multimédia
- **Communications entre écran et caméra**



En outdoor

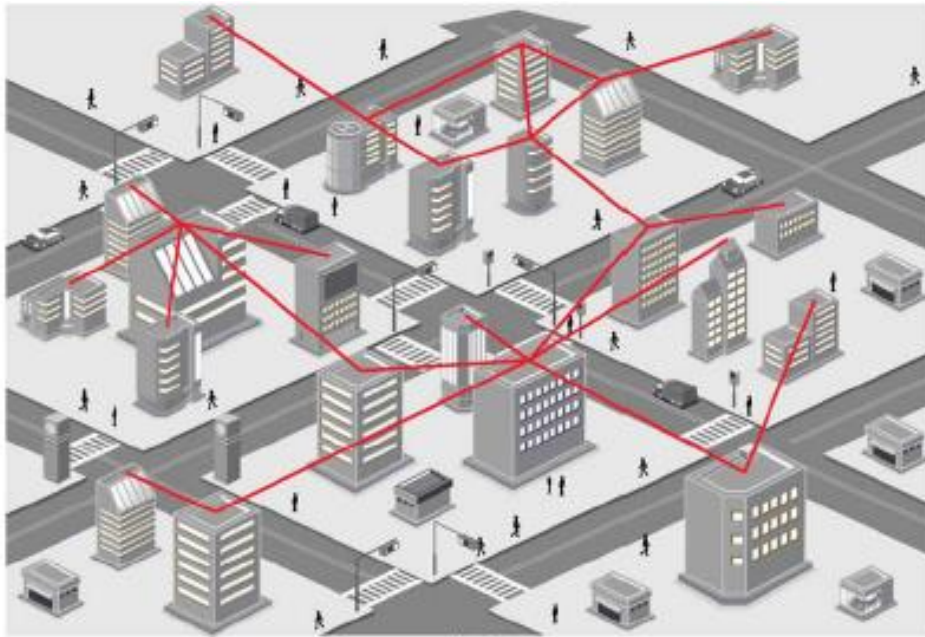
- **Traffic communications** (*Intelligent Transportation System ITS*)
- **Communications sous-marines**



Applications longues portées

→ Communications à longues distances (km): Free Space Optics (FSO)

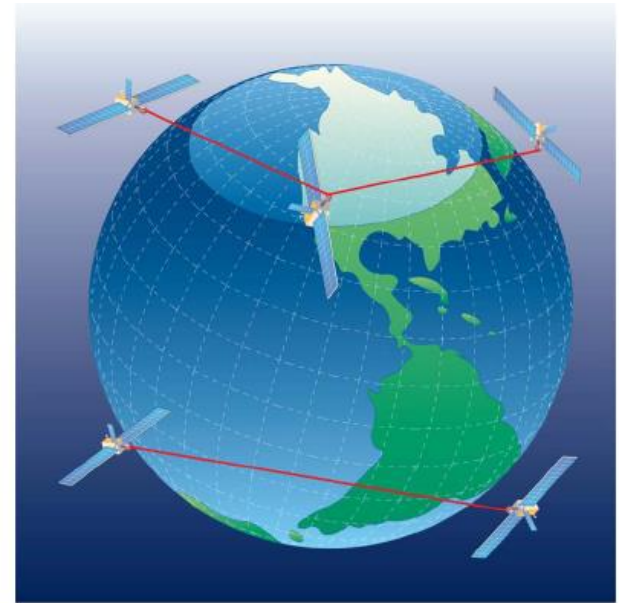
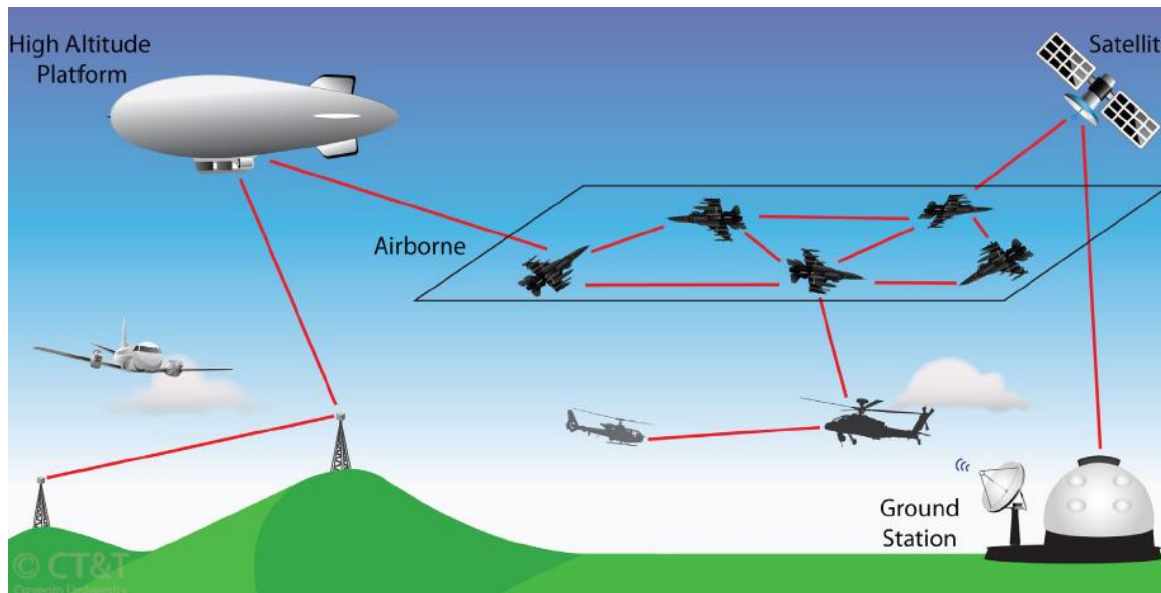
communications entre bâtiments



Applications longues portées

→ **Communications ultra- longues distances : FSO et Deep Space Optics**

communications spatiales, entre satellites





Recherches dans le domaine

■ Japon

Nagakawa Lab, Keio University -Yokohama

■ Chine

Fudan University, Tsinghua University

■ Etats-Unis

Boston University, University of Virginia, Pennsylvania State University

■ Canada

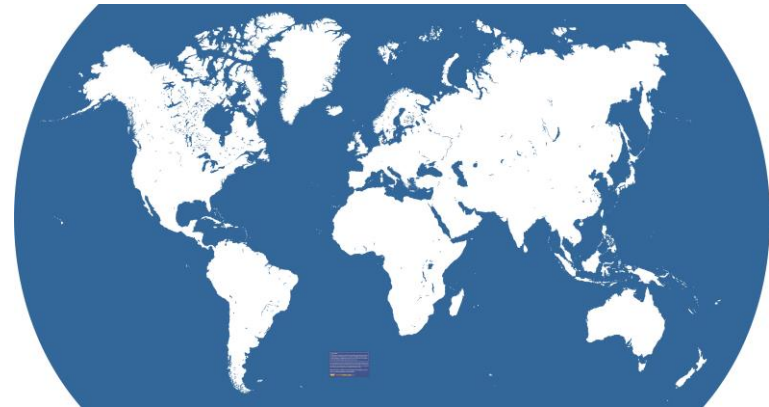
McMaster University

■ Australie

Monash University

- **Europe** : 1^{ère} Action COST IC1101 dédiée **18 pays Européens + Israël**
pilotée par Ozyegin University (Turquie)

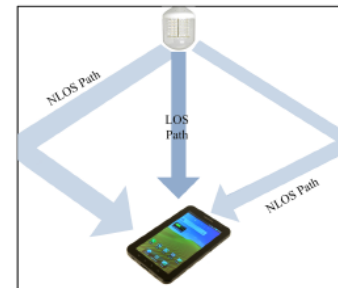
En France : Telecom Bretagne, Institut Fresnel, Université de Limoges XLIM, UTC, Université de Versailles...



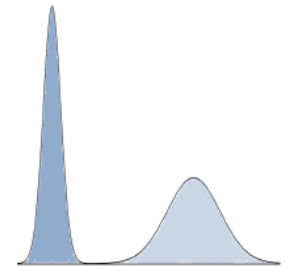
Challenges

■ FOV et masquages

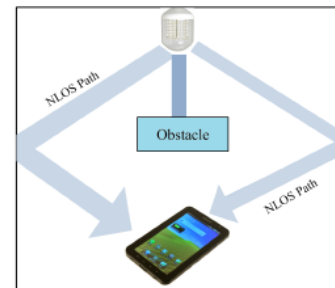
- Haut-débit : canal LOS
 - *Challenges si mouvements du récepteur et changements d'orientations → Mobilité*
- Blocages par le corps et les obstacles
 - *utilisation des réflexions*
 - *Challenge : latence*



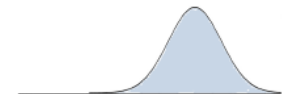
(a)



(b)



(c)



(d)

Challenges

■ Emetteur

- Non-linéarité
- Amélioration de la bande passante
- Conception de nouveaux composants

■ Récepteur

- Photodiode → pratique pour des utilisations statiques
- Capteur d'image → pour la mobilité car grand FOV
 - *Challenge : haut-débit et consommation énergétique*

Challenges

■ Inter-connectivité

- Généralement pour les fonctions d'éclairage : un grand nombre de LEDs
- Challenge : le coût pour les connecter à internet
 - *Piste : les courants porteurs*
 - *Activités sur l'intégration VLC/PLC*

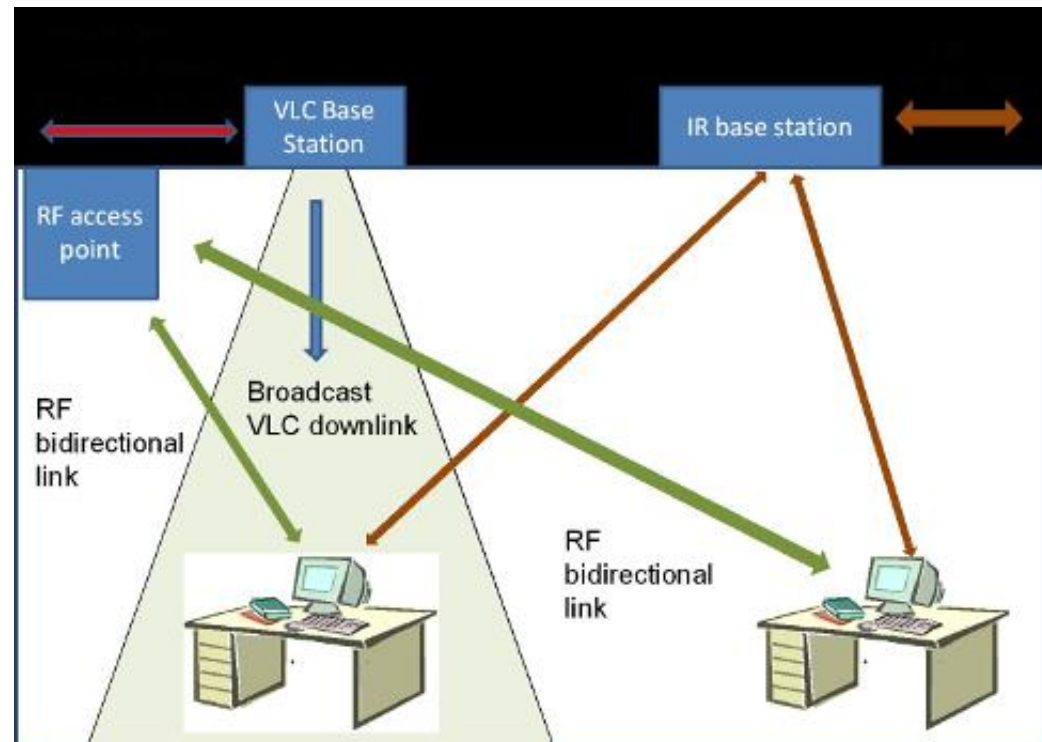
■ Déploiement cellulaire

- Le grand nombre de LEDs → cellules de plus en plus petites
 - *Challenge : gestion de l'interférence*
 - *Pistes: techniques MIMO pour coordonner les transmissions*
- Accès multiple

Challenges

■ Voix montante

- IR, VLC
 - *Challenge en mobilité : l'utilisateur ne doit pas être obligé de maintenir l'alignement → débit ?*
- RF
 - Réseaux hétérogènes
 - *assymétrie*



Activités XLIM - OWC

- Modulation, codage, traitement du signal, accès multiple, performances couche PHY et MAC
- Simulation du canal Optique sans fils
- LEDs pérovskite (émission blanche intrinsèque à la couche émettrice et qui ne comporte pas de matériaux rares)
- **Labex SigmaLim** : applications des communications optiques sans fils en e-health (collaborations CHU Limoges)

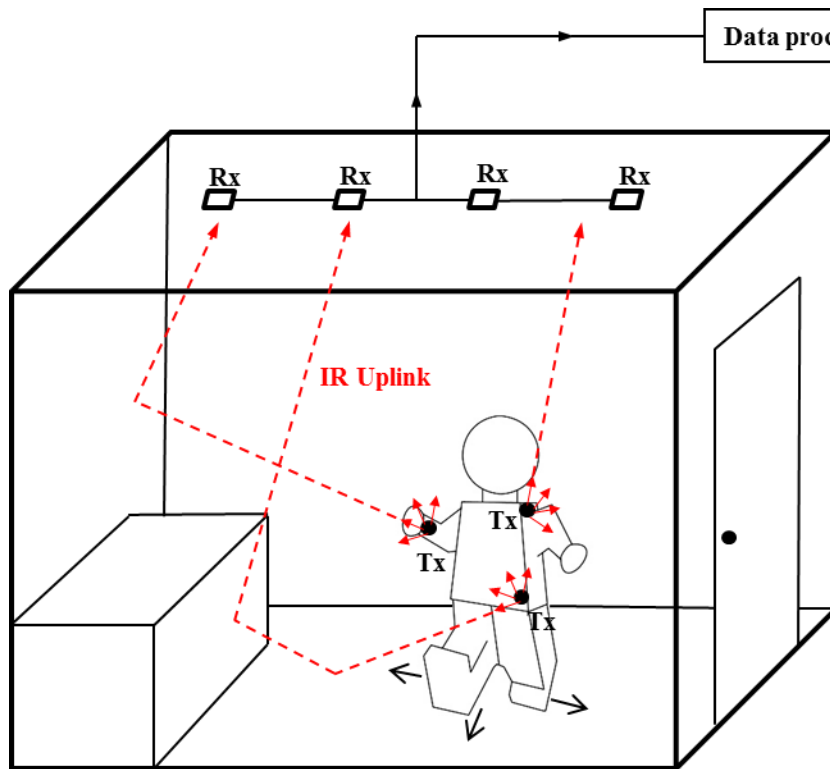
Equipe de recherche RESYST

→ Systèmes et réseaux de communications dans le contexte de la santé :

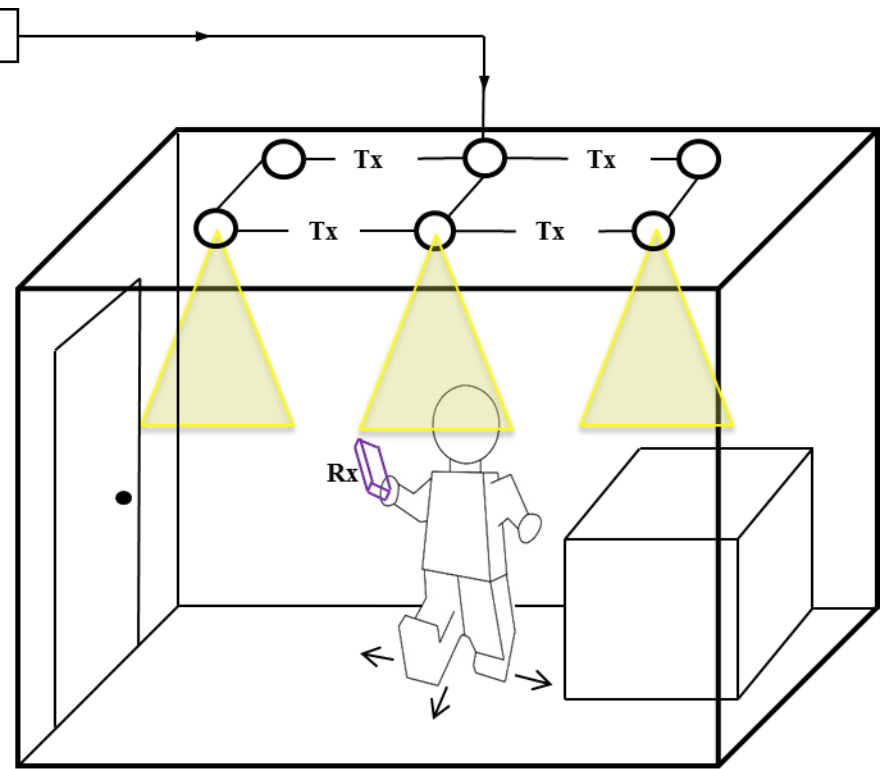
- Communications optique sans fils (IR et Visible – Visible Light Communications LiFi)
- Techniques avancées de traitement numérique: codage de canal, accès multiple
- Réseaux de capteurs, objets connectés

Contexte

Une exemple de scénario : surveillance médicale



Voix montante en IR

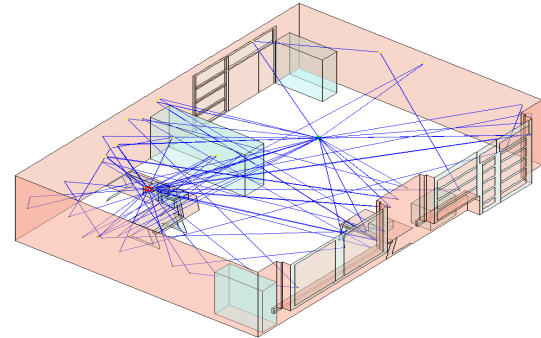


Voix descendante en Visible

Compétences

1. Modélisation des canaux optiques sans fils indoor et outdoor

- Méthode lancer de rayons : IR, Visible, LOS ,non-LOS, diffus
- Mobilité
- Indoor, Outdoor



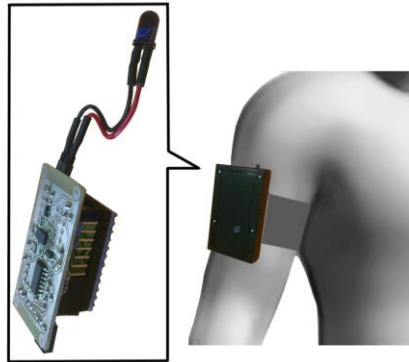
2. Modulation, codage, traitement du signal, couche PHY et MAC

- Modulations et techniques avancées: OOK, PPM, OFDM, MIMO...
- Codage de canal
- Accès Multiple: CDMA pour l'Optique

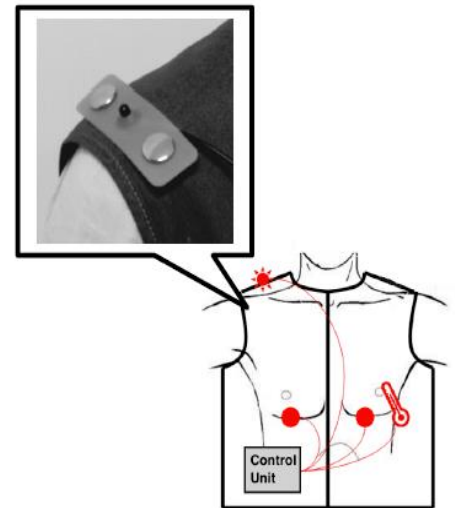
Compétences

3. Objets connectés :

- Système communiquant porté / Récepteur dans l'infrastructure (*bâtiment intelligent*)
 - *Transmission IR non-LOS*
 - *Mobilité*
- Application bas débit
 - *suivi de paramètres physiologiques, suivi d'activité physique*



Brassard pour le suivi de l'activité physique
(Accéléromètre)



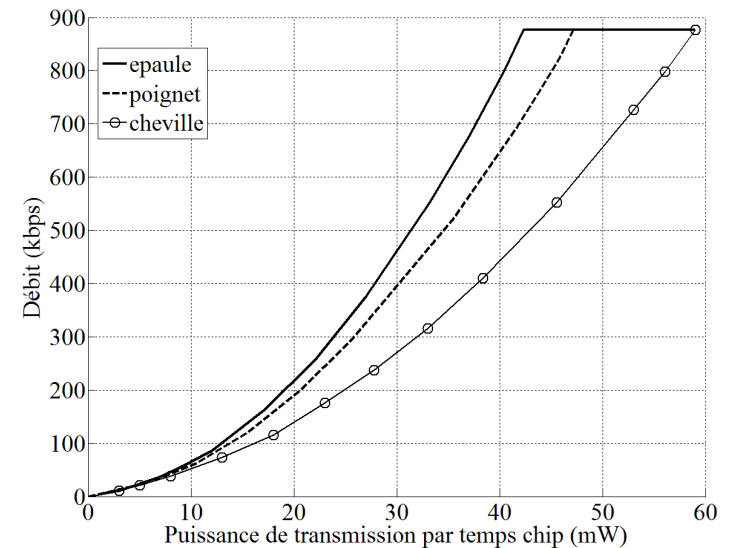
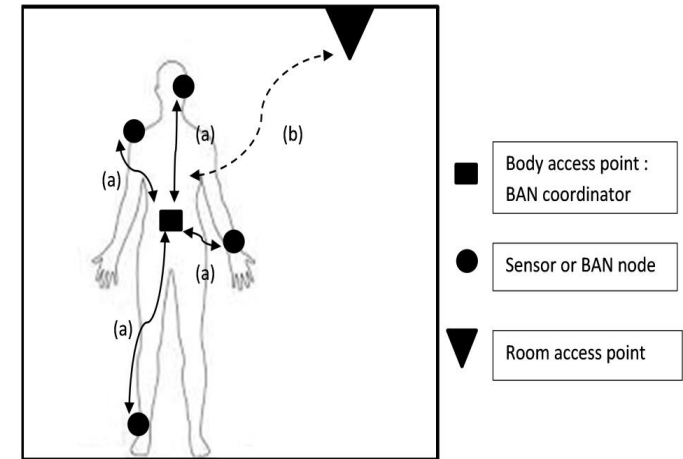
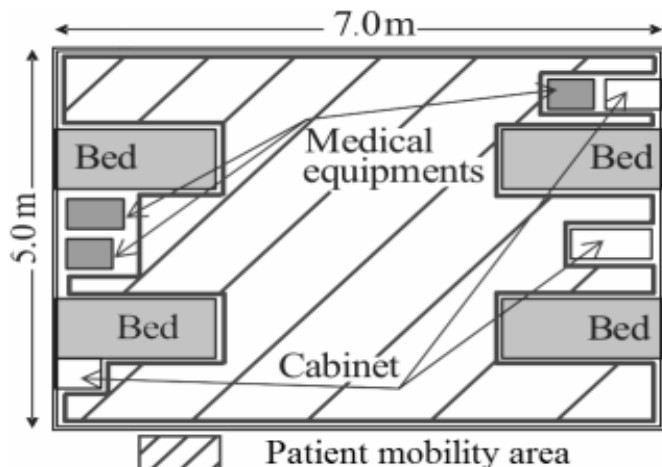
Gilet communicant : température et
fréquence cardiaque

Compétences

4. Réseaux de capteurs corporels (BAN)

- Nouveau concept : BAN Optique
- Emetteur/Récepteur sur le corps
 - *Technologie IR diffus*
 - *CDMA Optique*
 - *Applications médicale*
- Performances Théoriques en mobilité pour 3 nœuds émetteurs (épaule poignet cheville) et 1 récepteur (taille ou épaule)

- $TEB=10^{-10}$
- *Couverture : 99,9%*



Conclusion

■ Ecosystème international



SIEMENS

CASIO



VLC Ltd



LiFi Consortium

