

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

Anne Julien-Vergonjanne, XLIM

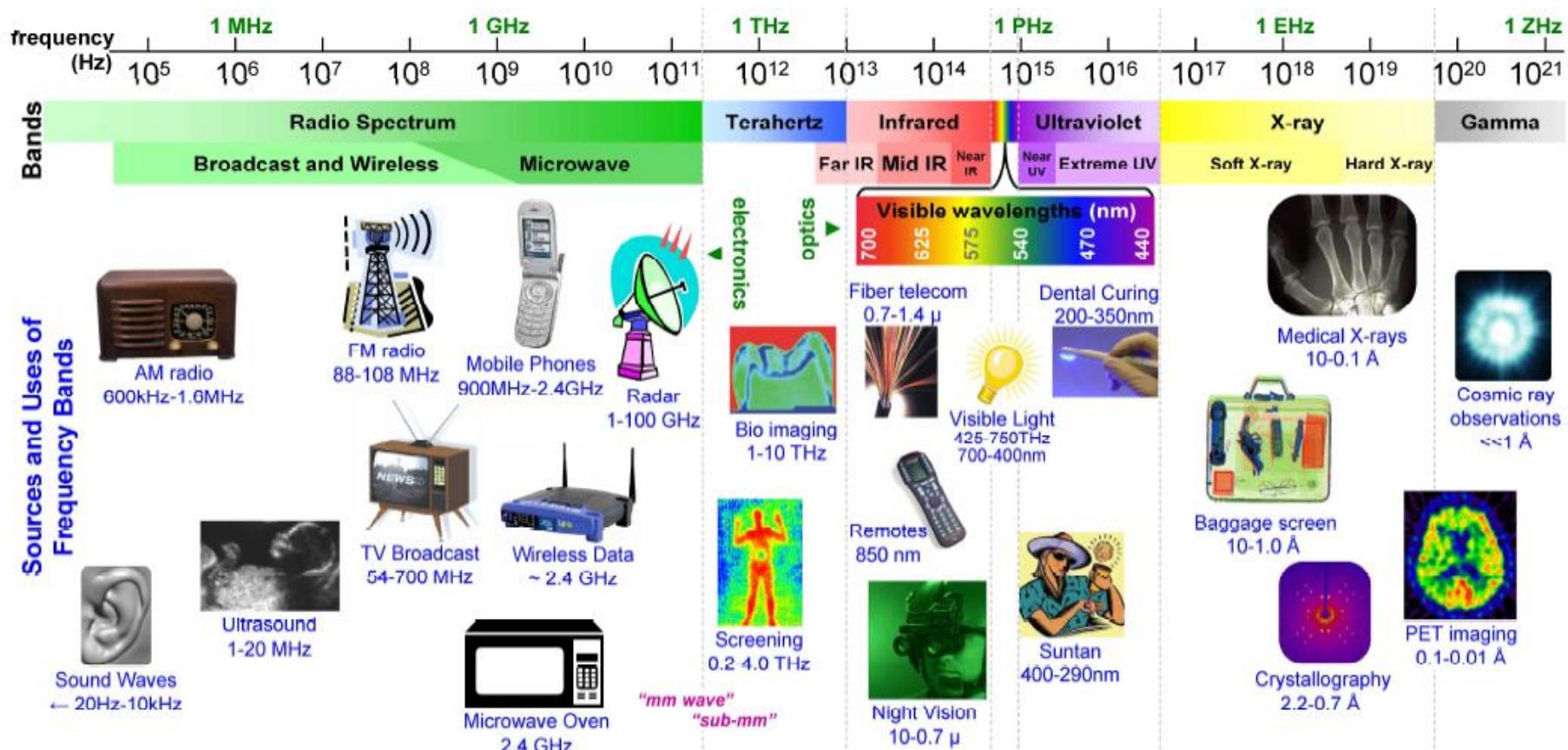
[anne.julien-vergonjanne@xlim.fr](mailto:anne.julien-vergonjanne@xlim.fr)



# 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



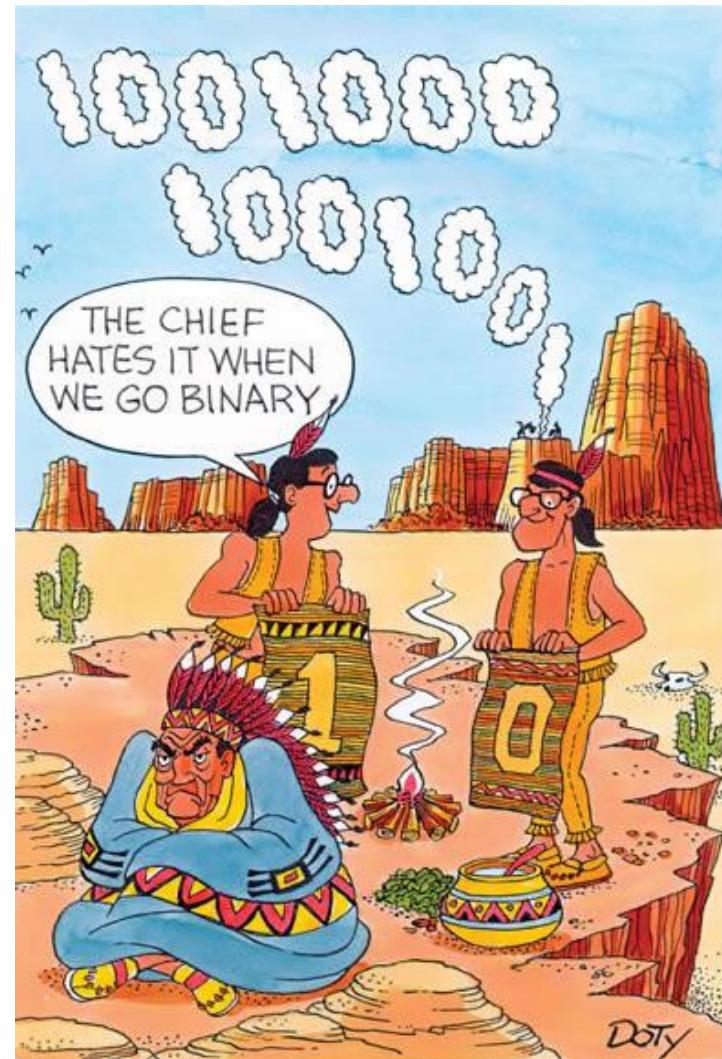
# Optique sans fils

- Entre  $\approx 10^{13}$  Hz et  $10^{16}$  Hz → 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.

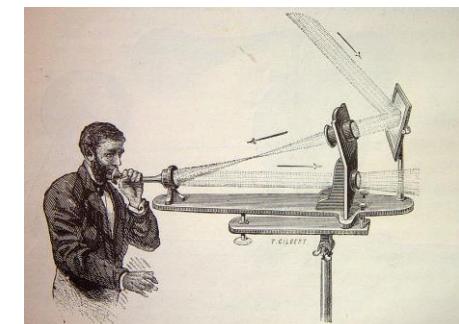


*Le télégraphe optique de Chappe - Ancienne église et la tour du télégraphe à Montmartre*  
Aquarelle, XIXe siècle - © Bibliothèque nationale de France

# Un peu d'histoire...

## ■ 1880 : Graham Bell – le photophone

première communication optique sans fils de la voix sur  $\approx 200m$



# 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...

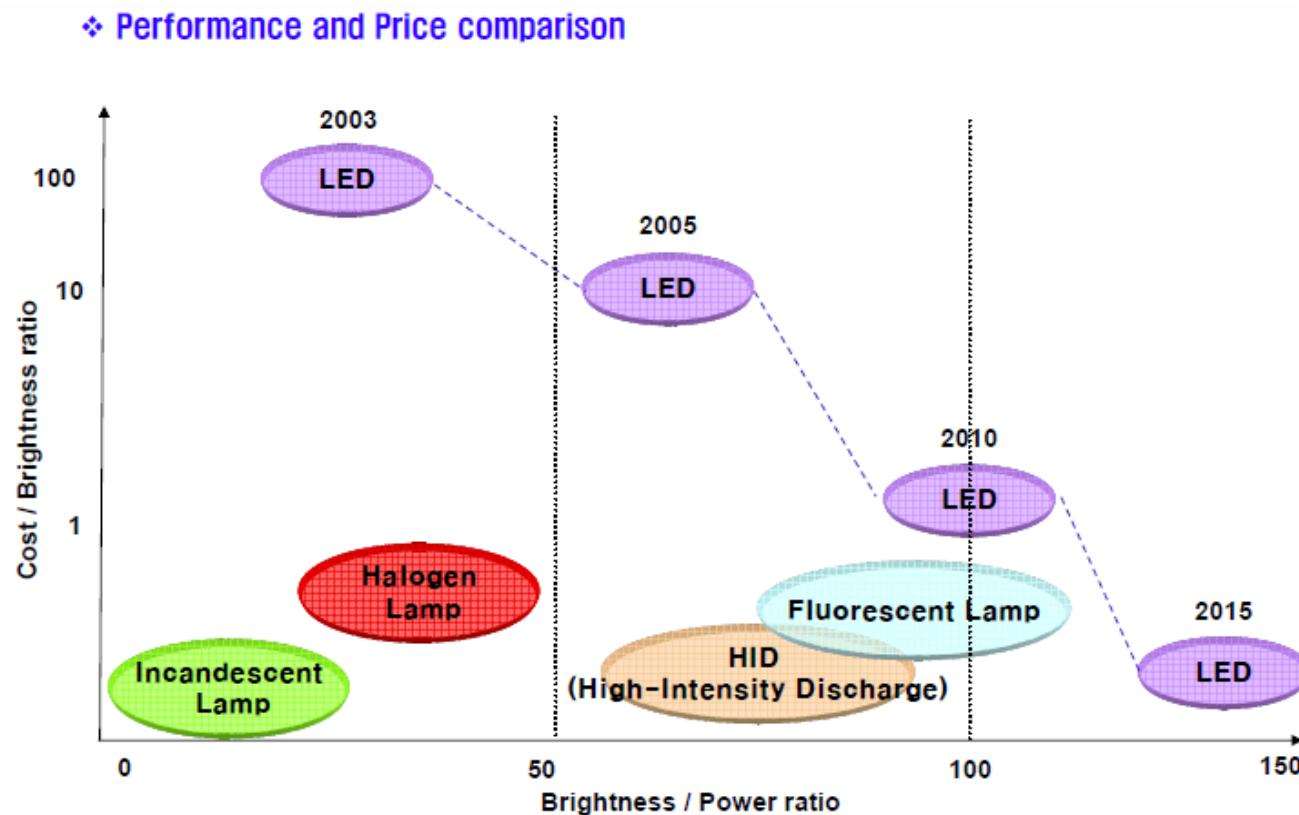
- **1979 : Démonstration de la faisabilité d'un réseau de communication Indoor ( $\approx 100$  Kbps) par optique sans fils en Infrarouge (IR)**

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*

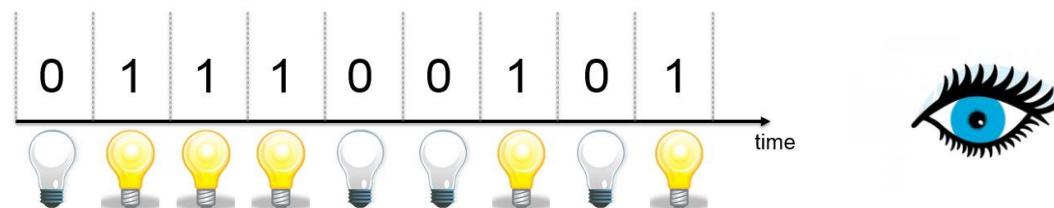


Source: Credit Suisse, 2006.11.2

# 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<sup>er</sup> standard en 2011 IEEE802.15.7***

# Classification des communications optiques sans fils

OWC : *Optical Wireless Communications*

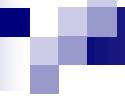
- On définit plusieurs bandes:
  - UVB-C : 200 -280nm : *UV communications*
  - Entre 400 et 750 nm : *Visible Light Communications (VLC), Li-Fi*
  - Entre 750 et 1600 nm : *Free Space Optics (FSO)*
    - 750-950nm : *proche infrarouge (IR)*
    - *Une bande autour de 1300nm*
    - *Une bande autour 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:

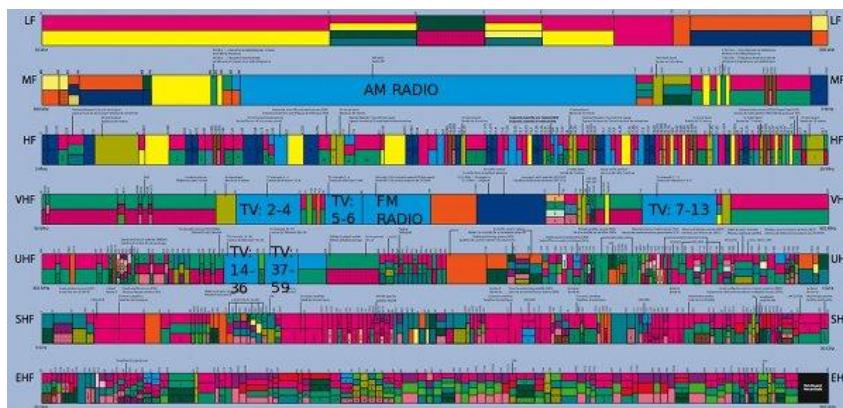
- *Les propriétés des composants optiques et optoélectroniques*
- *La puissance maximum admissible*
- *Les propriétés physiques du canal*
- *Le coût économique*



# **Pourquoi communiquer en Optique sans Fils ?**

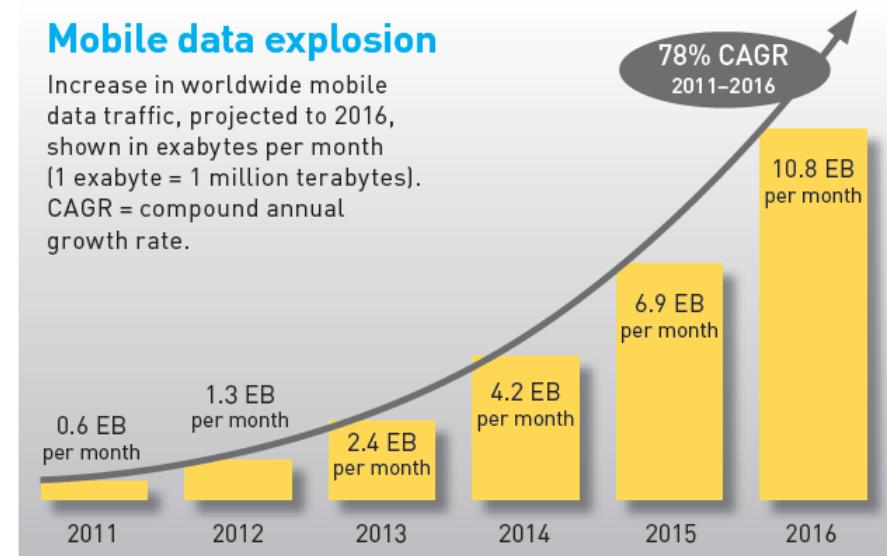
# Pourquoi communiquer en Optique sans Fils ?

## ■ 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

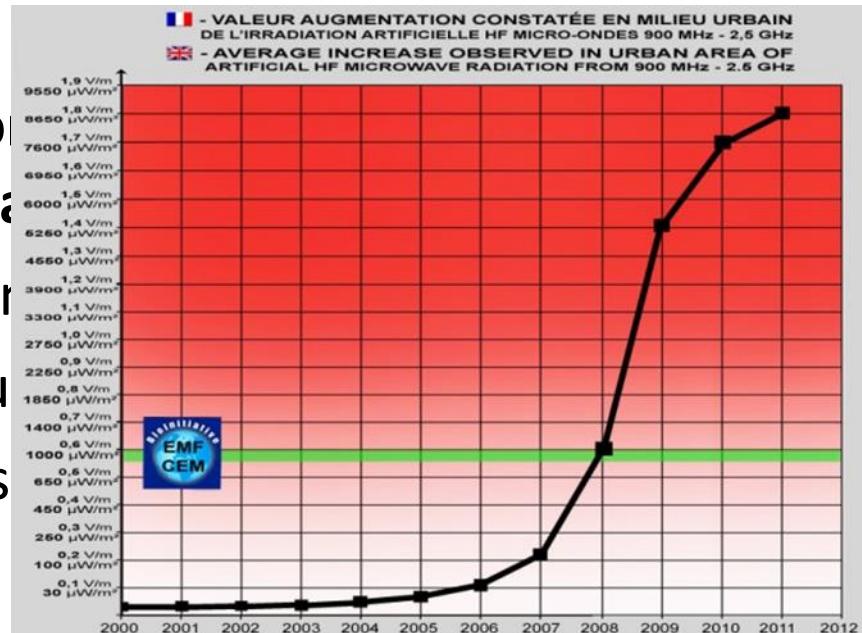
- En Optique : Bande non régulée (pas de licence) et très abondante (200 THz dans la bande 700-1500 nm)
- Très haut débit

# 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 pour diminuer la pollution radio est inadmissible:

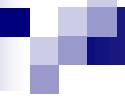
- transmission par radio
- centrale nucléaire
- milieux hospitaliers

environnements où la pollution est admissible:

# 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

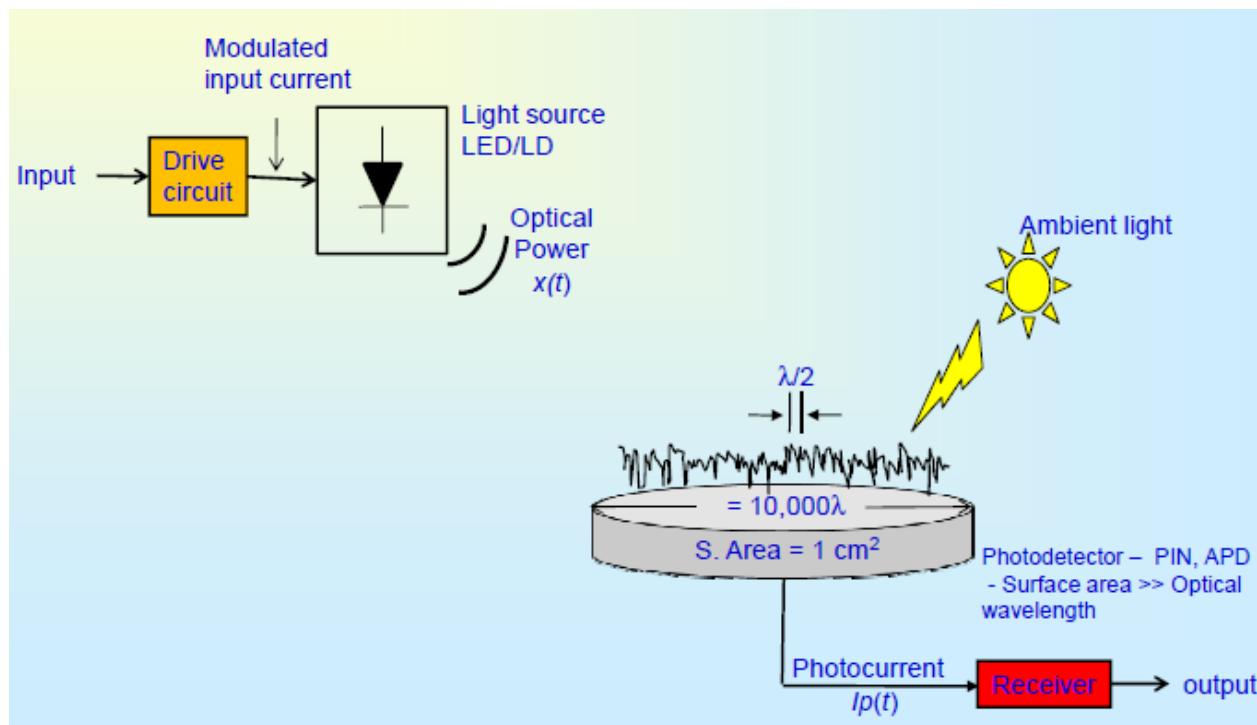




# Comment communiquer en Optique sans Fils ?

# Principe général

## Schéma IM/DD : Modulation en Intensité/ Détection directe



- La source → 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 → signal électrique : photo-courant (Démodulation)

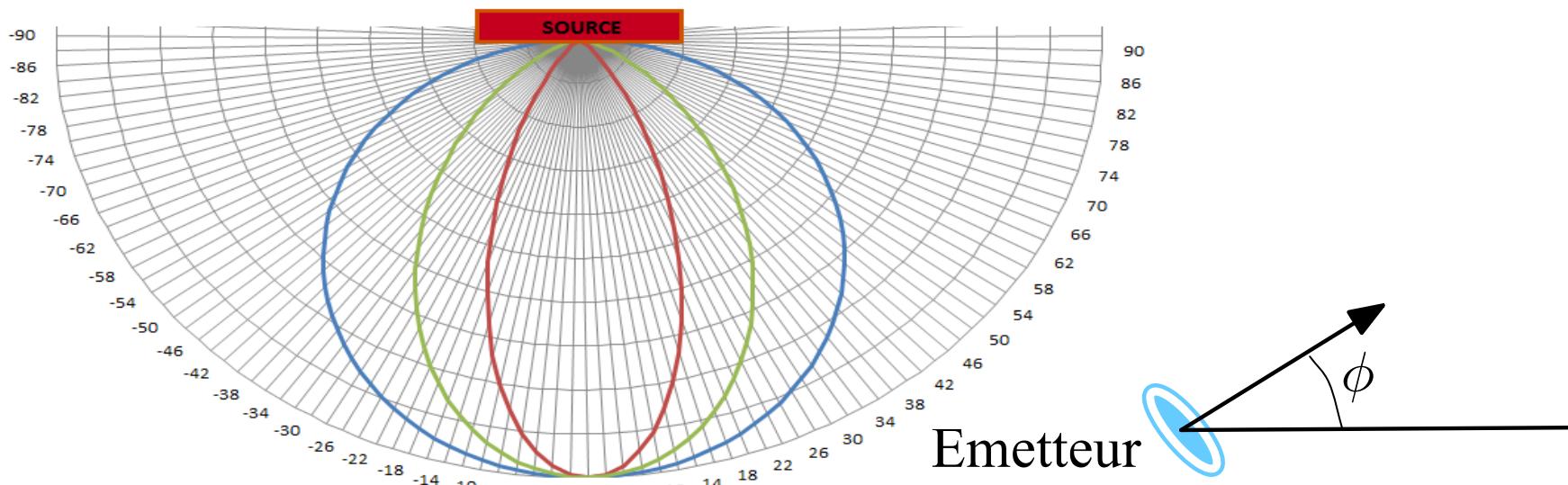
# Emission

- Caractéristiques :
  - Répartition spatiale :

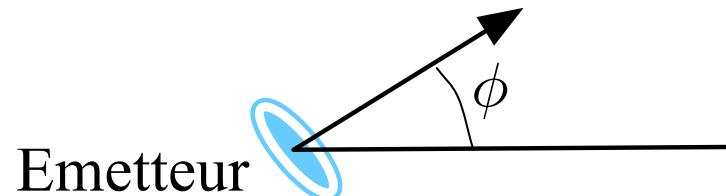
■ L'intensité rayonnée (Lambertien) :  $I(\varphi) = I_0 \cos^m \varphi$

$I_0$  intensité maximum en  $\varphi = 0$

- Le nombre  $m$  représente une mesure de la directivité
  - Plus  $m$  grand, plus la source est directive



# Emission

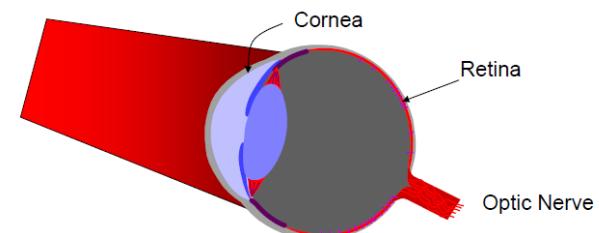


- Puissance rayonnée (W)

$$P_t = 2\pi \int_0^{\frac{\phi_1}{2}} I(\varphi) \sin \varphi d\varphi = \frac{2\pi I_0}{(m+1)}$$

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

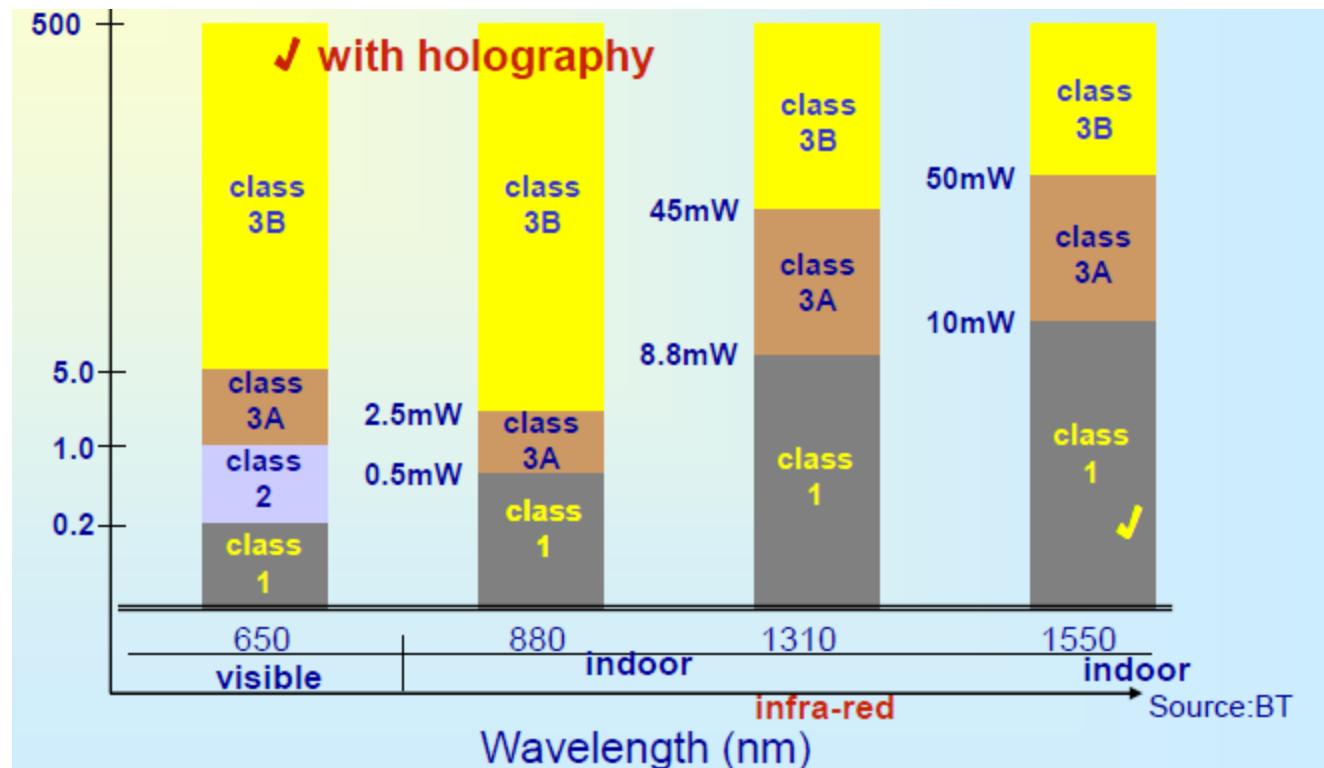
*Limitations sur  $I_0\text{max}$  → puissance maximale en fonction de la taille et de la directivité de la source*



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

# Normes

Puissance  
(mW)



La classe 1 correspond à une utilisation sans restriction

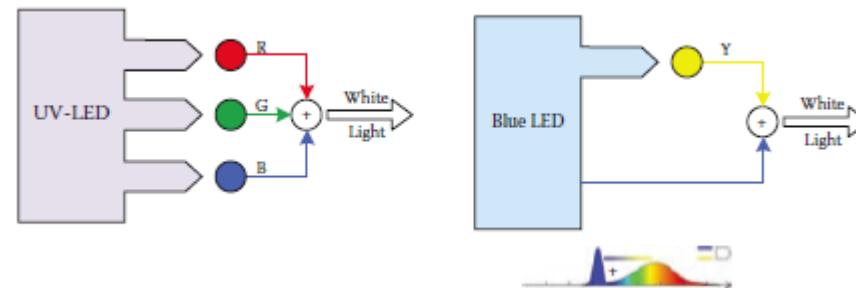
# Sources en IR

## ■ Diode LED ou diode laser

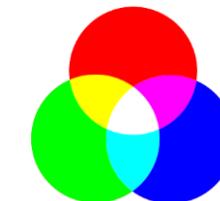
Characteristics	LED	LD
Optical output power	Low power	High power
Optical spectral width	25–100 nm	0.01–5 nm
Modulation bandwidth	Tens of kHz to hundreds of MHz	Tens of kHz to tens of GHz
E/O conversion efficiency	10–20%	30–70%
Eye safety	Considered eye safe	Must be rendered eye safe
Directionality	Beam 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



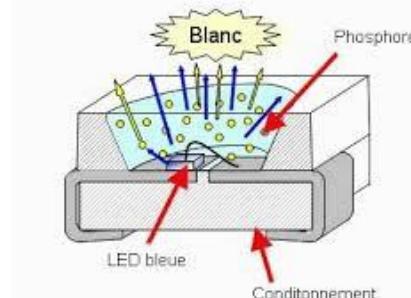
- En combinant plusieurs LED bleu-vert-rouge  
(470 -525 - 625 nm)



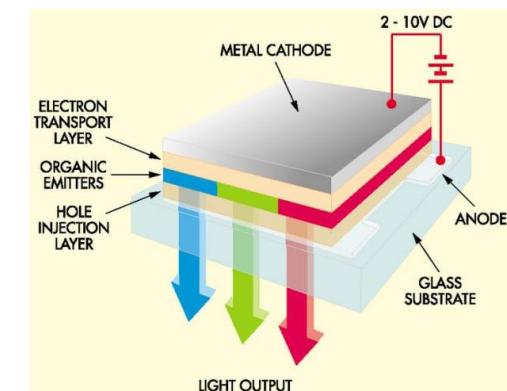
- Avec une seule LED bleue et excitation d'un phosphore

*Bas coût*

*→ la plus classique*



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



# Caractéristiques en Visible

Un luminaire : LED + driver électrique pour contrôler la luminosité

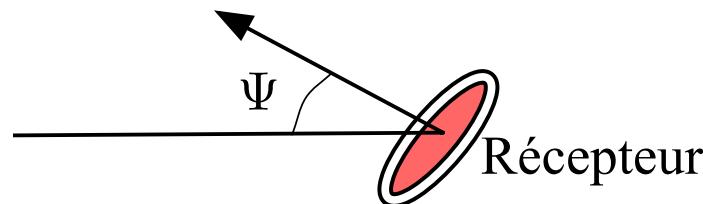
Pour communiquer :

- 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 :



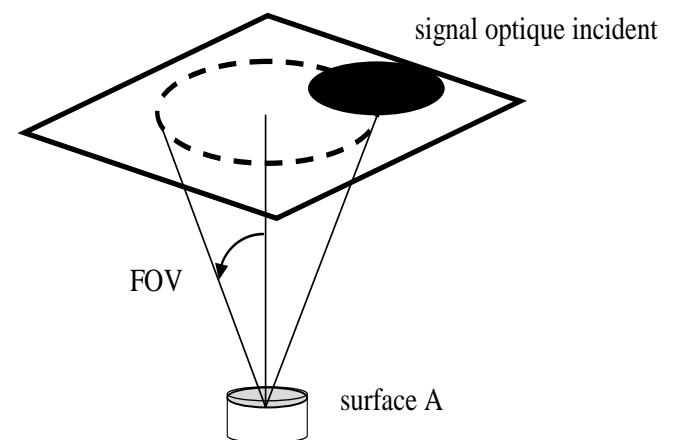
- *Le récepteur détecte l'intensité optique par unité de surface*
- *La surface du récepteur est  $\gg \lambda$  => pas d'évanouissement multi-trajets comme en RF*
- La surface effective de collecte:  $A_{eff}(\psi) = \begin{cases} A \cos(\psi) & 0 \leq \psi \leq FOV \\ 0 & \psi \geq FOV \end{cases}$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

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

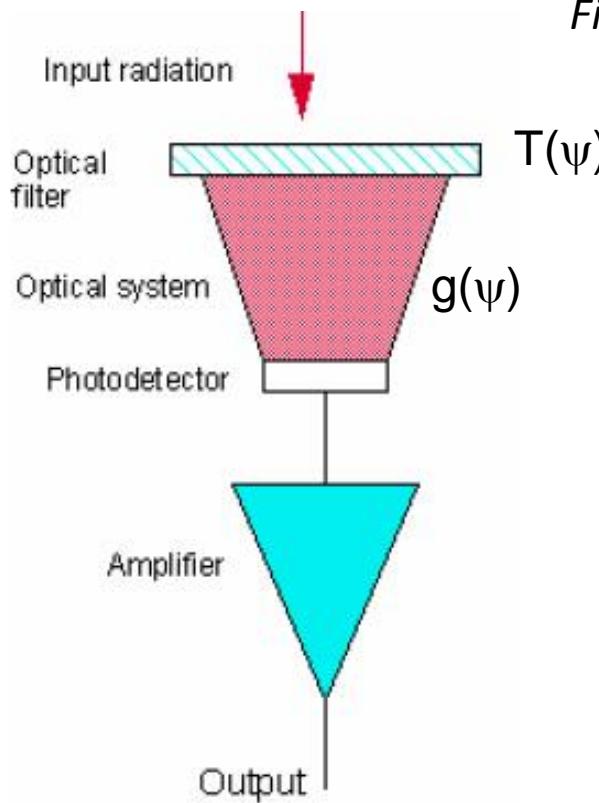
→ *impact sur la couverture*

## ■ 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

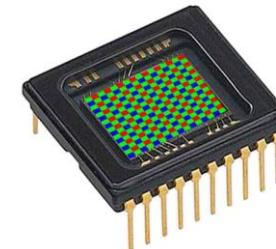
## ■ ***En IR et Visible : photodiodes***

- 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***

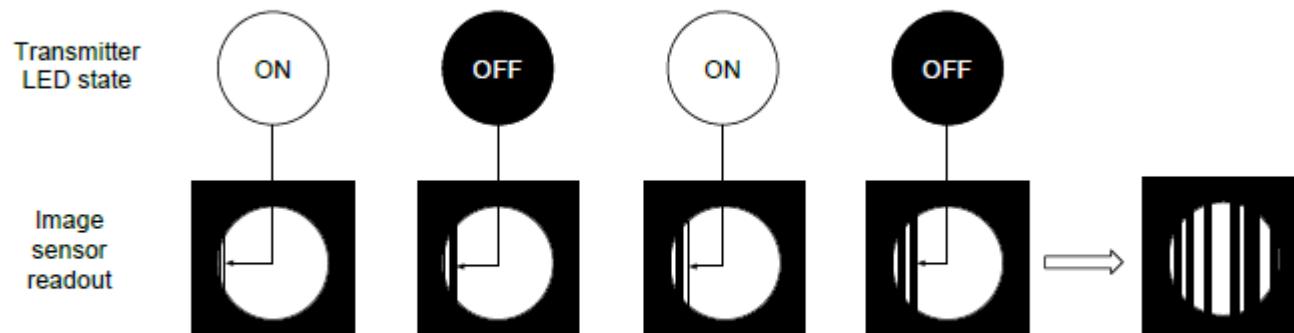
- Matrices de photo-détecteurs
- 2 technologies
  - CCD (Charge coupled Device)
  - CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor)



# Récepteurs

## ■ *en Visible : capteur d'images*

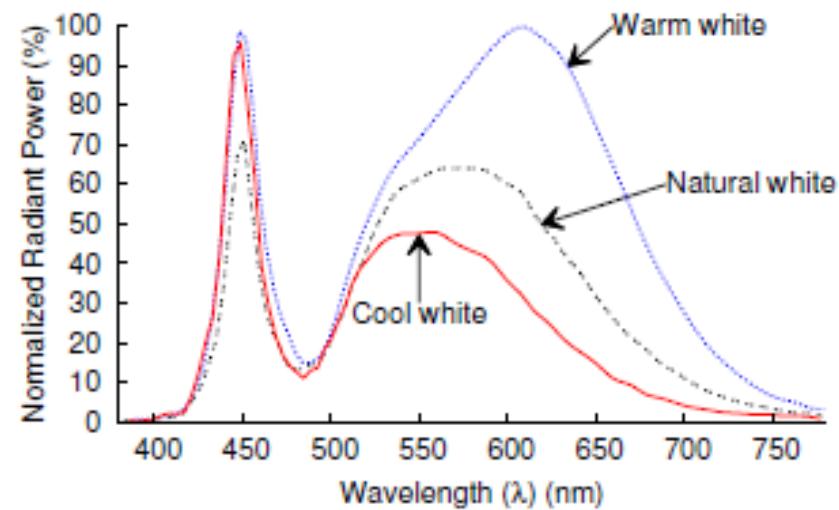
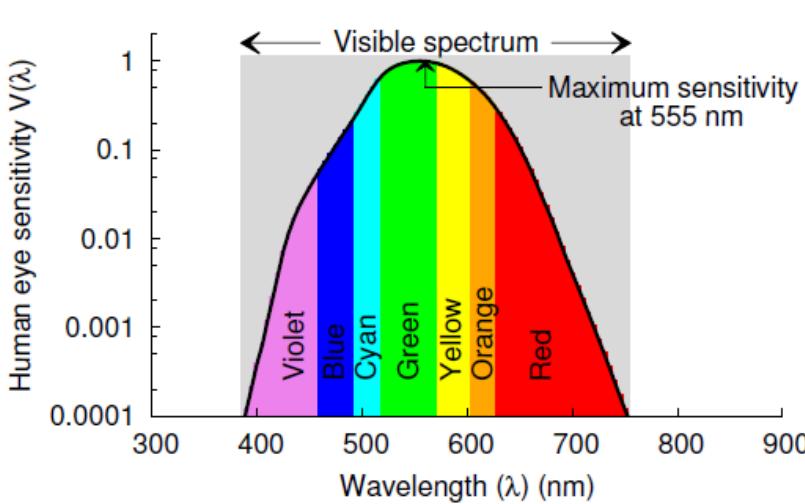
*Utilisation du « rolling shutter » dans les caméras pour décoder (lecture des pixels par ligne)*



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

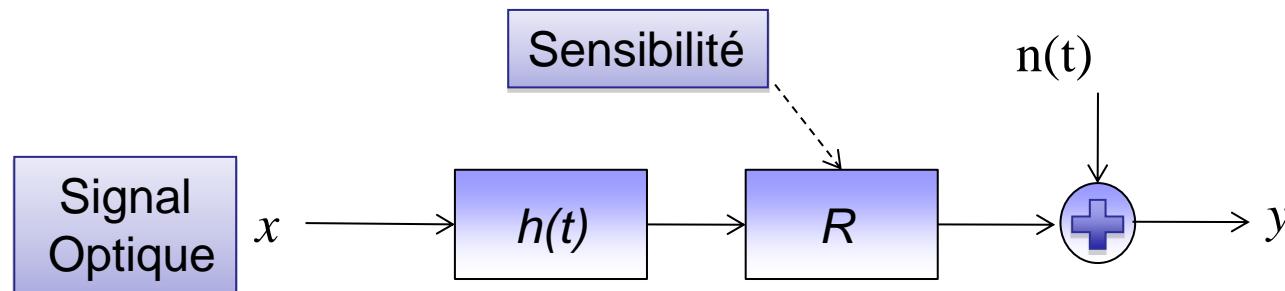
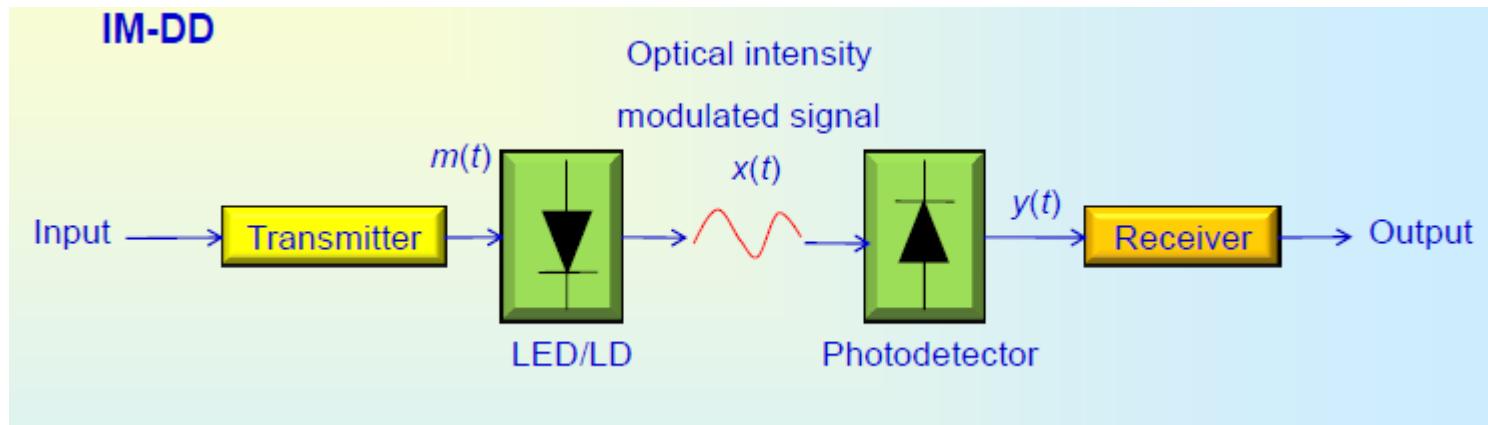
# Récepteurs

- 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/m<sup>2</sup>) pour un environnement de travail de bureau*

# Modélisation



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

$$y(t) = R h(t) \otimes x(t) + n(t)$$

# Modélisation

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

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

- dépend du type de modulation utilisée

$$\text{Débit} = 1/T$$

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

- $h(t)$  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

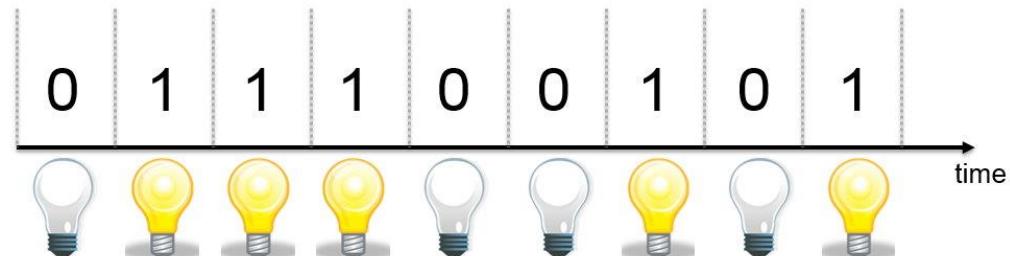
- $n(t)$  représente le bruit, caractérisé par sa variance  $\sigma_n^2$

- 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:  $\text{SNR} = \frac{R^2 P_r^2}{\sigma_n^2} = \frac{R^2 H(0)^2 P_t^2}{\sigma_n^2}$ 
  - A partir du SNR → performances

# Modulations

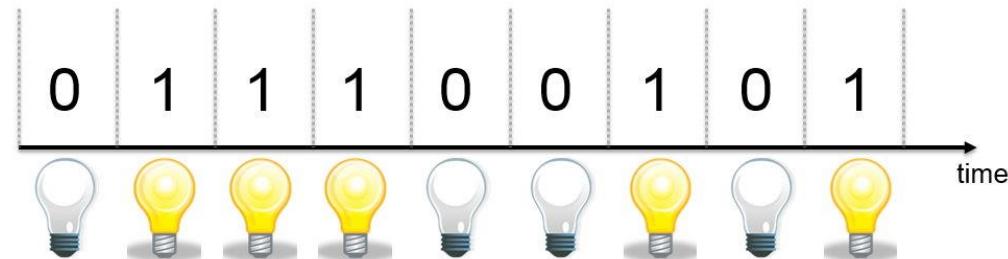
- La plus simple : OOK



*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

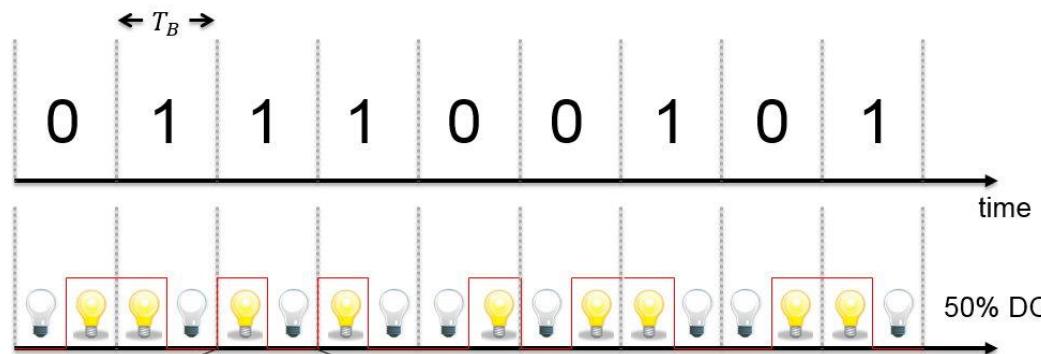
- La plus simple : OOK



- Pulse Position Modulation ( $M$ -PPM)

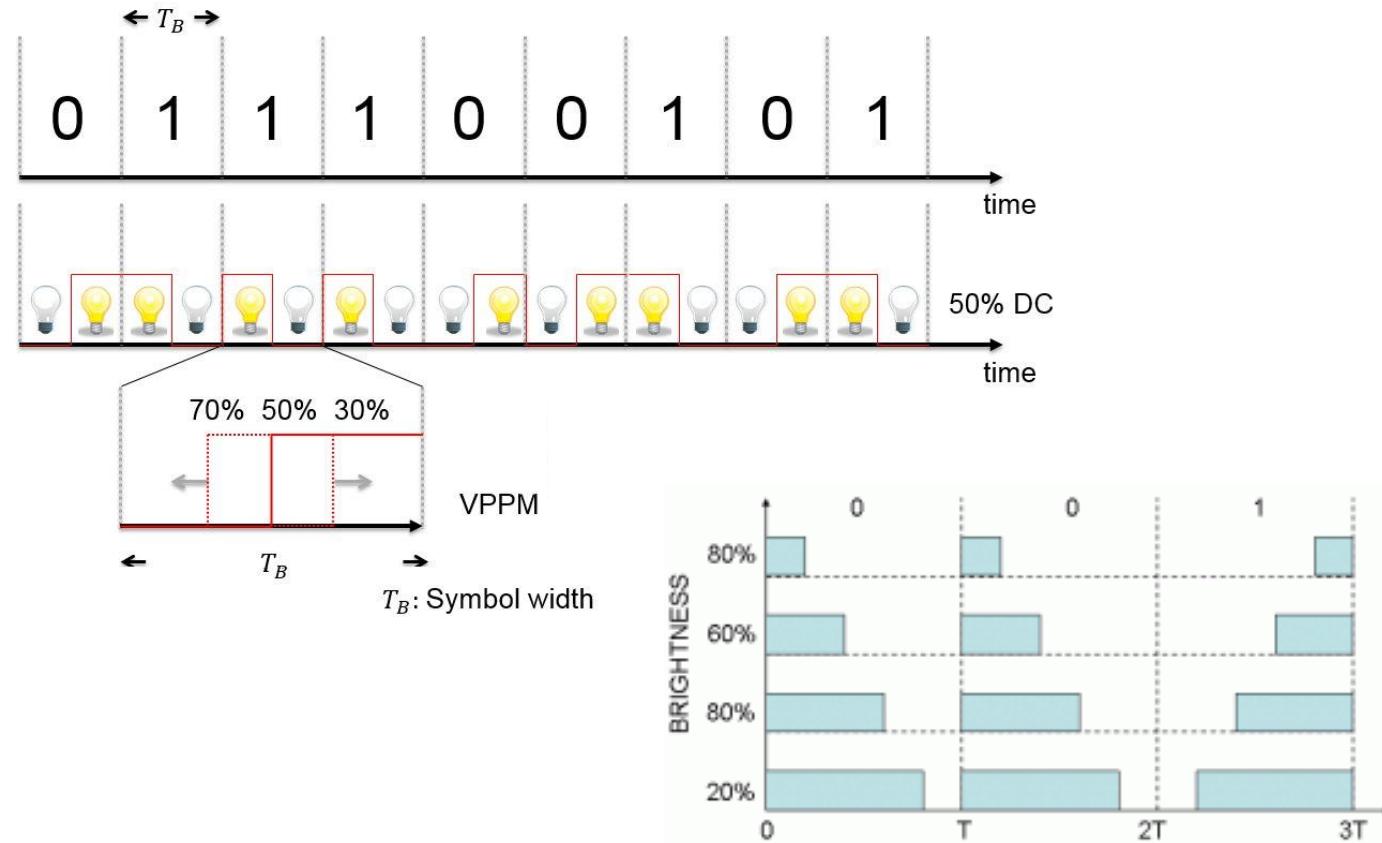
*chaque intervalle symbole est divisé en  $M$  sous-intervalles ou chips.*

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



# Modulations VLC en tenant compte du contrôle de l'illumination

## ■ VPPM

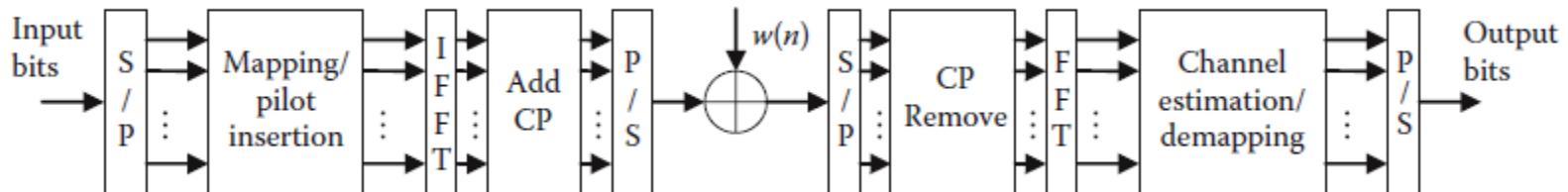


# Modulations

## ■ 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

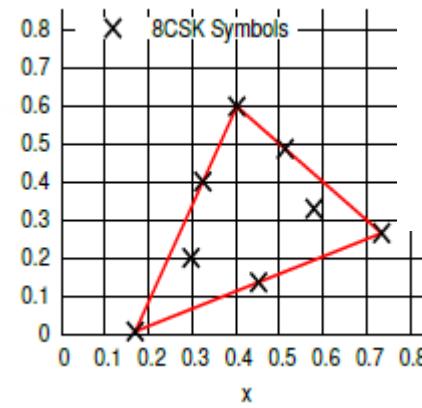
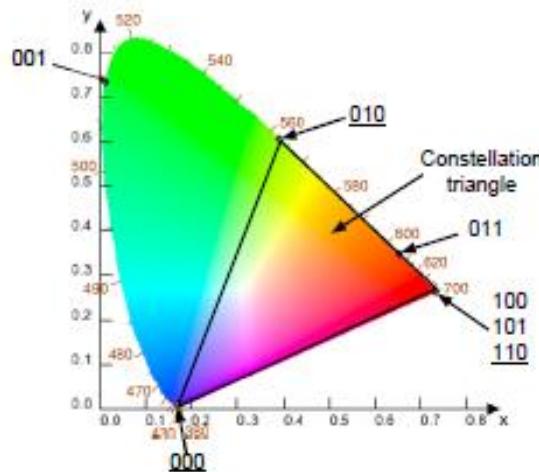
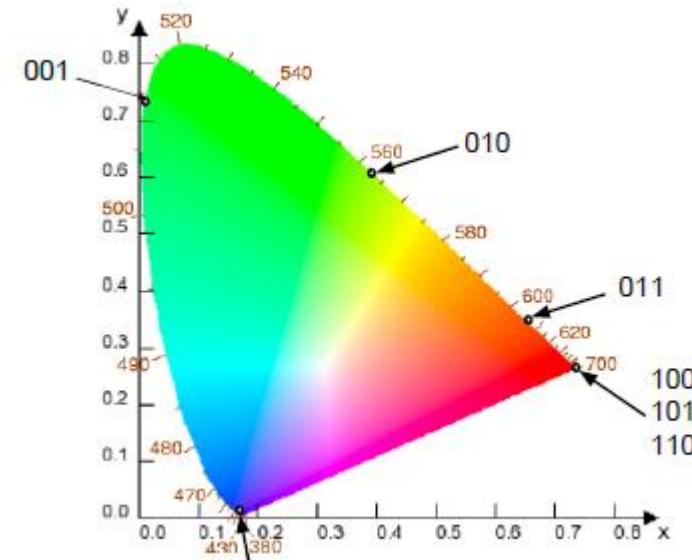


# Modulation spécifique pour VLC

## ■ 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

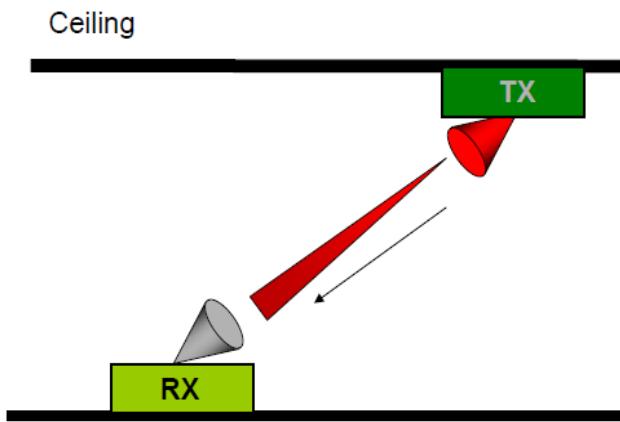


Band (nm)	Code	Center (nm)	(x, y)
380-478	000	429	(0.169, 0.007)
478-540	001	509	(0.011, 0.733)
540-588	010	564	(0.402, 0.597)
588-633	011	611	(0.669, 0.331)
633-679	100	656	(0.729, 0.271)
679-726	101	703	(0.734, 0.265)
726-780	110	753	(0.734, 0.265)

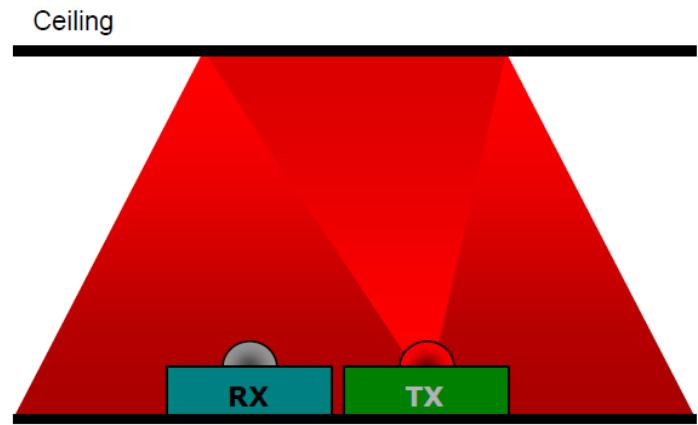
# Canal de transmission

- 2 configurations de base :

## Line-Of-Sight (LOS)



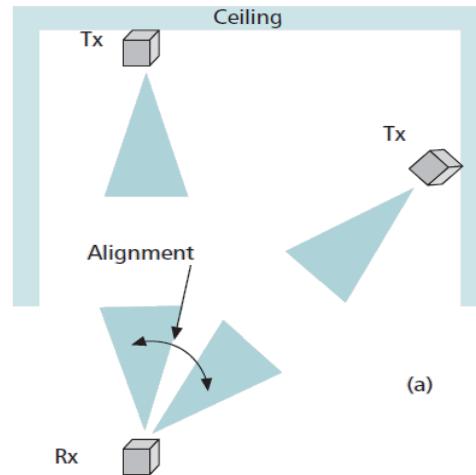
## Diffus



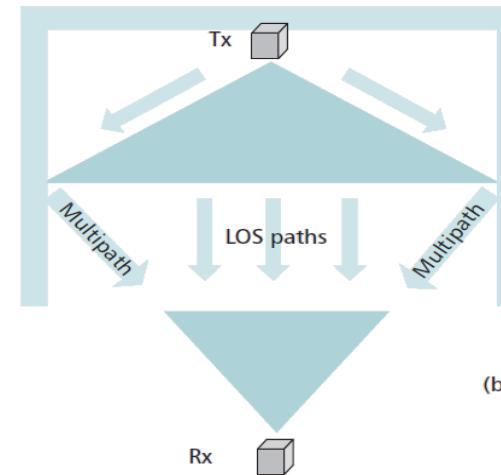
- LOS : performances ++ **mais** sensible aux obstructions ( objets, personnes) et nécessité d'un alignement
- Diffus : atténuations liées aux réflexions et distorsion multi-trajet **mais** + robuste face aux blocages

# Canal de transmission

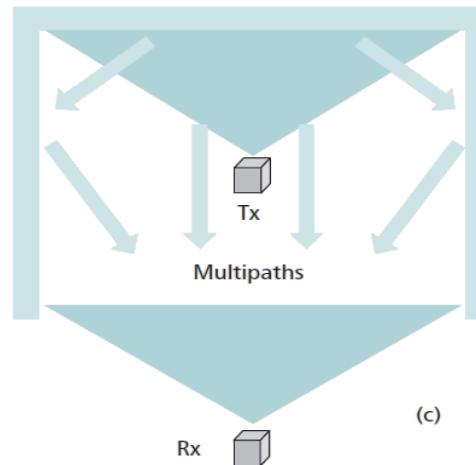
(a) Directed – line-of-sight (LOS)



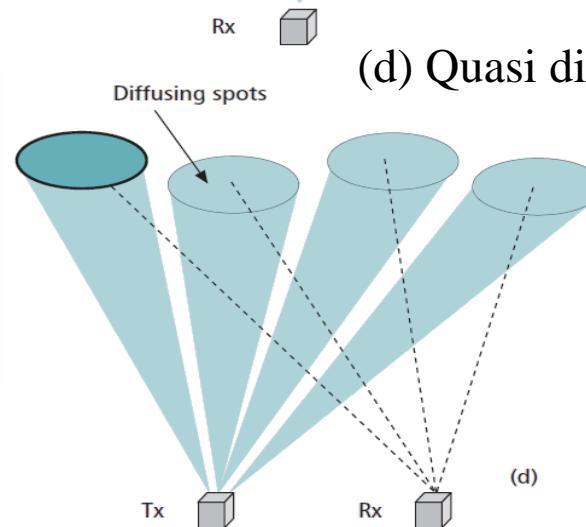
(b) Non-directed LOS



(c) Diffuse

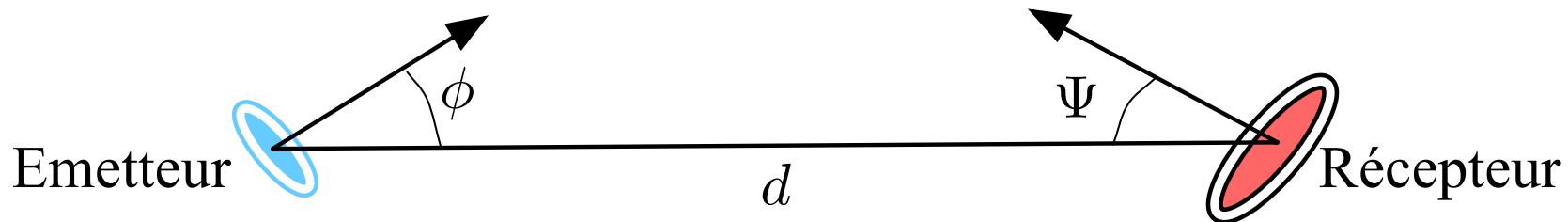


(d) Quasi diffuse



# Canal de transmission

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

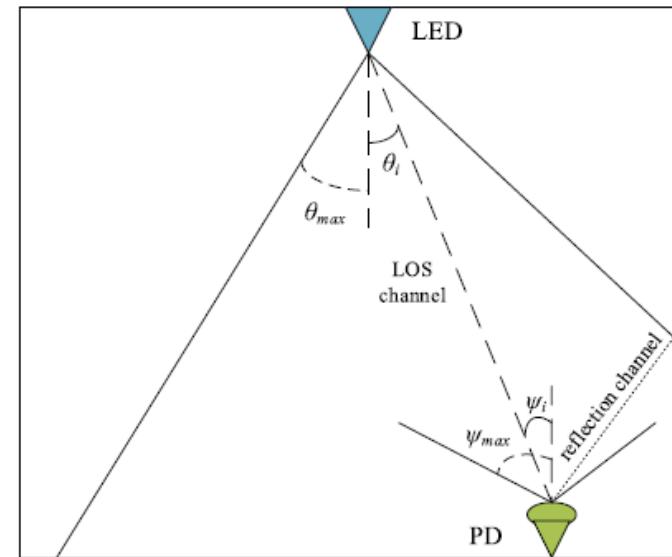


$$H_{Los}(0) = \frac{A(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m \varphi \cdot \cos \psi \quad 0 \leq \psi \leq FOV$$

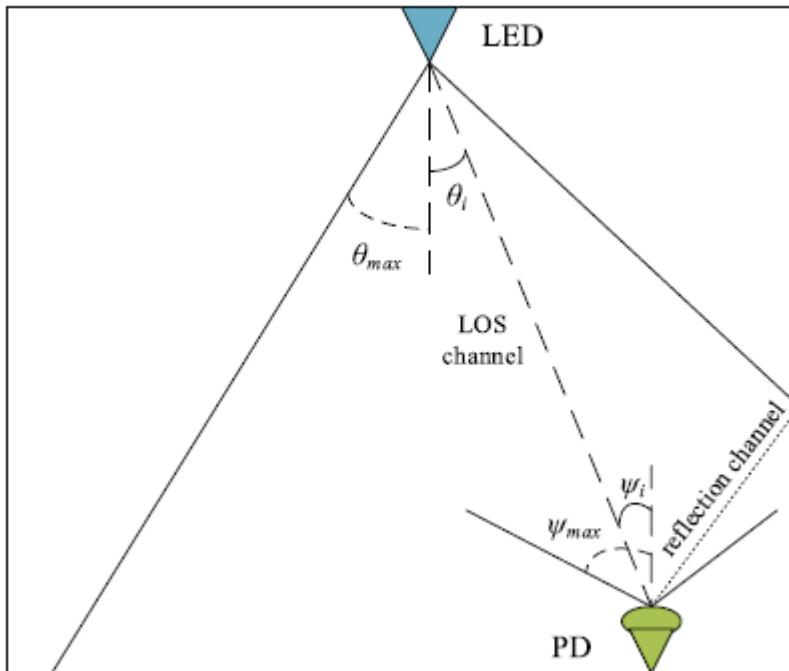
# Canal de transmission

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

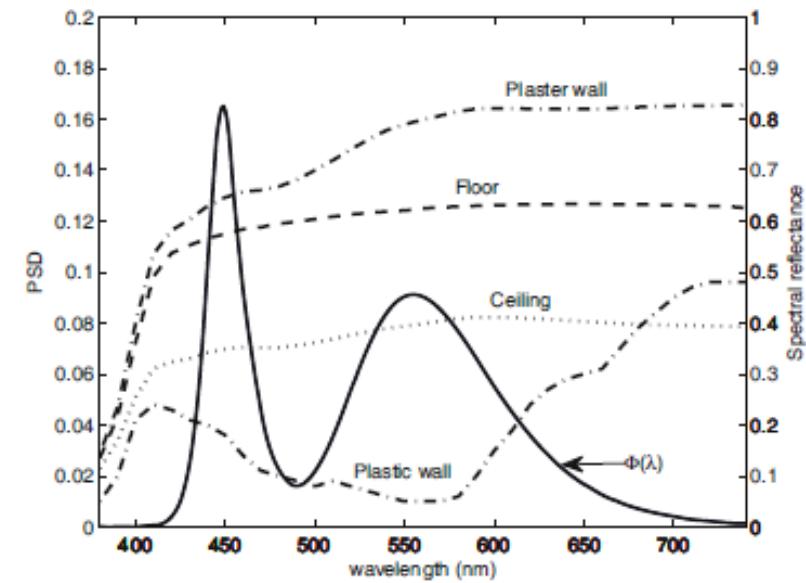
- En diffus, le gain est plus complexe
  - taille de l'environnement
  - réflectivité des surfaces
  - Obstacles
  - Position/orientations des E/R



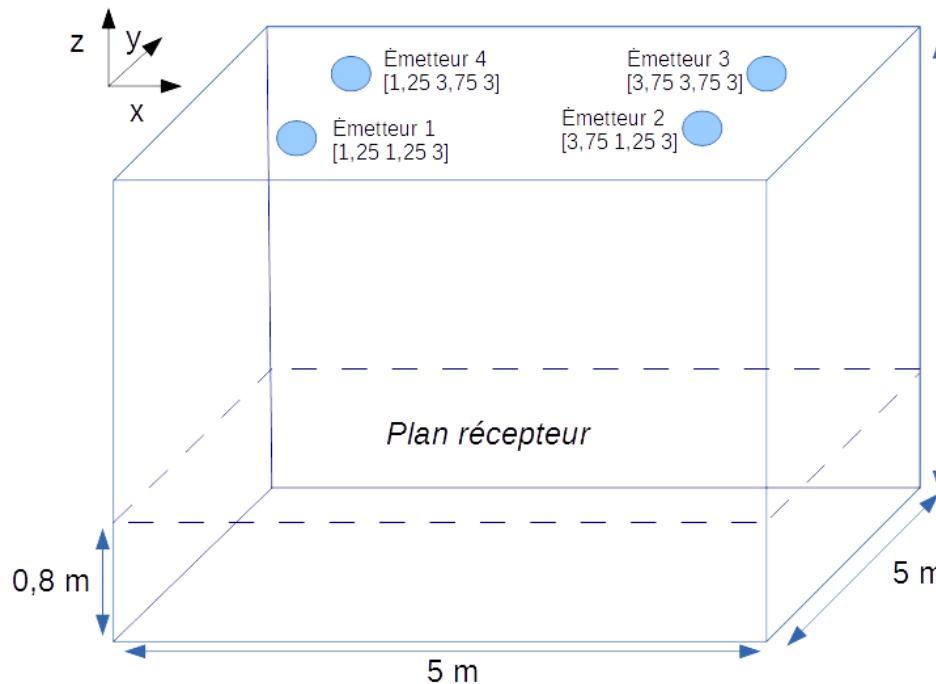
# Configuration typique en VLC : non-directed LOS



Importance de la réflectivité des surfaces :



# Exemple



## Emetteur

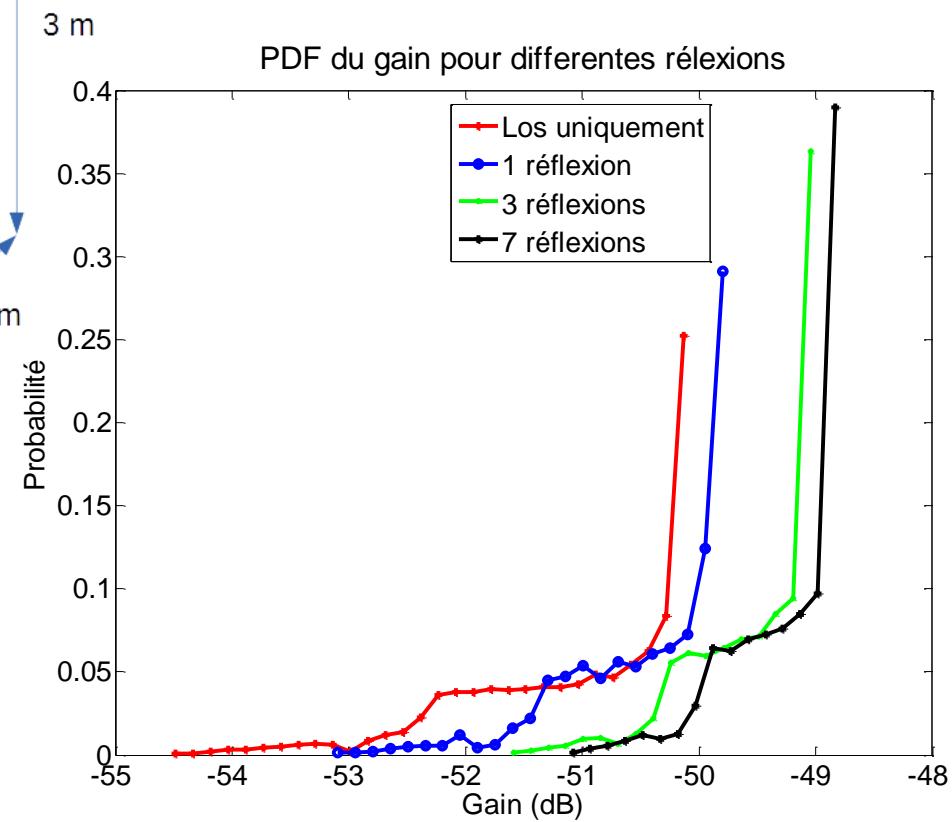
- semi-angle  $60^\circ$
- orienté vers le sol

## Récepteur

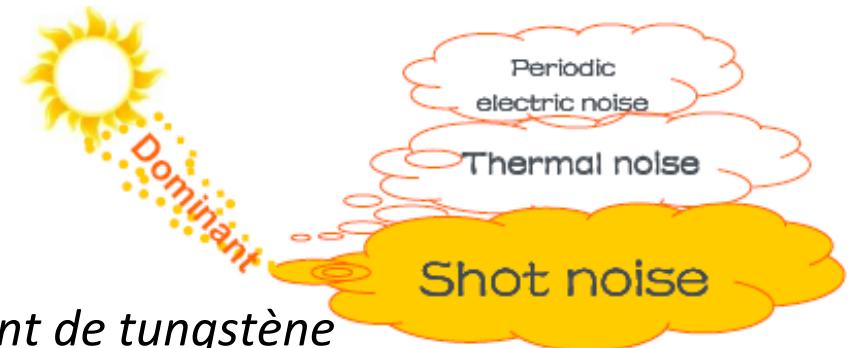
- surface  $1\text{cm}^2$
- FOV =  $65^\circ$
- Sensibilité:  $0,33\text{A/W}$
- orienté vers le plafond

$$\rho \text{ murs et plafond (plâtre)} = 0,73$$

$$\rho \text{ Sol (plastique)} = 0,3$$



# 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 :  $\sigma^2_n = 2qI_{bg}$  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

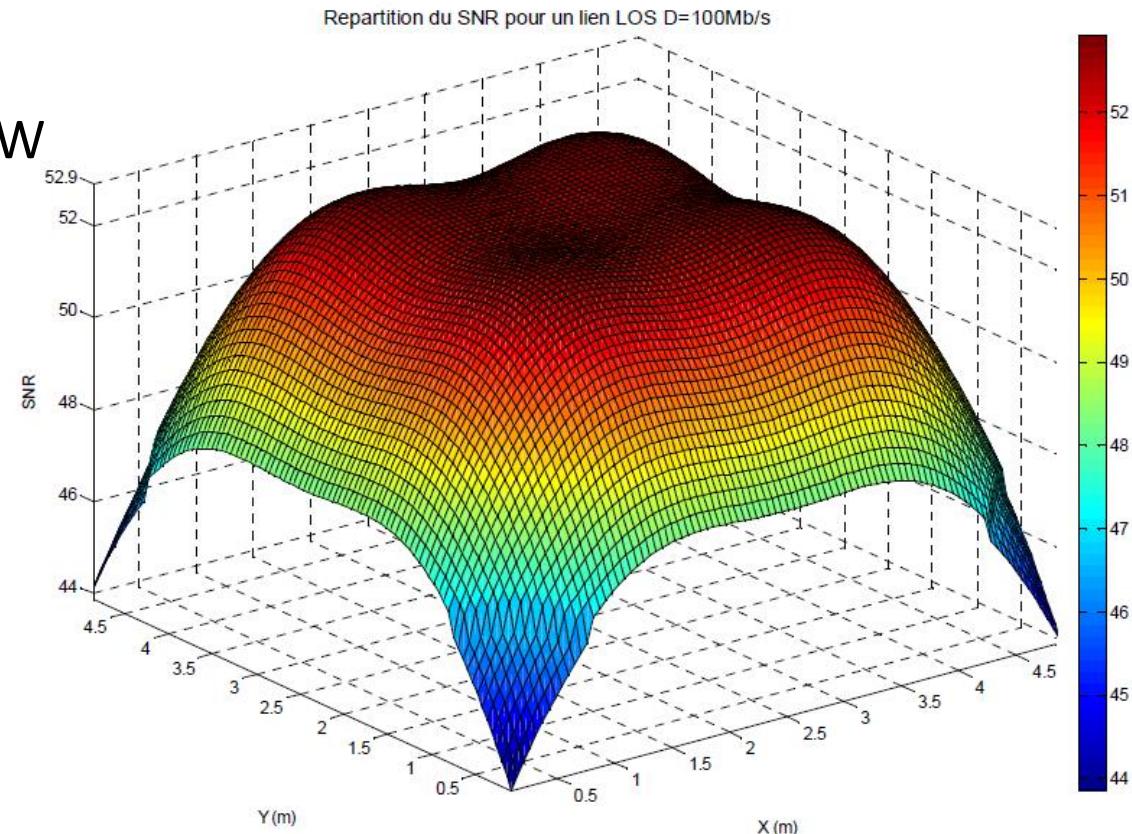
- Puissance totale 12W
- Modulation OOK
- Débit 100 Mbps
- Bruit
  - Soleil direct
  - photo-courant  $I_{bg}$  de 5100  $\mu$ A

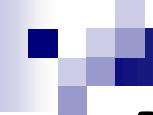
### Emetteur

- semi-angle 60°
- orienté vers le sol

### Récepteur

- surface 1cm<sup>2</sup>
- FOV = 65°
- Sensibilité: 0,33A/W
- orienté vers le plafond

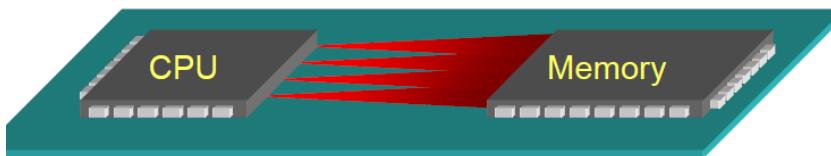




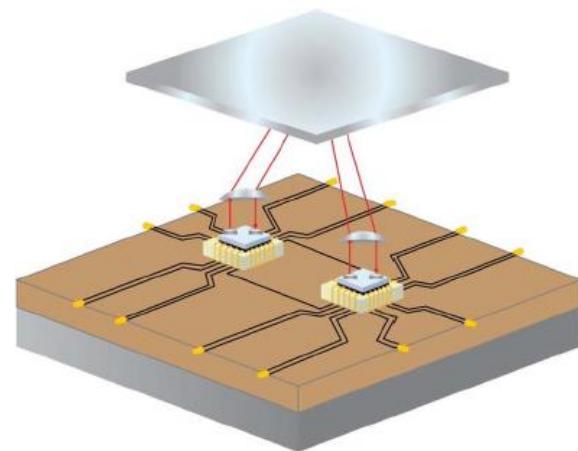
# Applications

# Applications très courtes portées

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

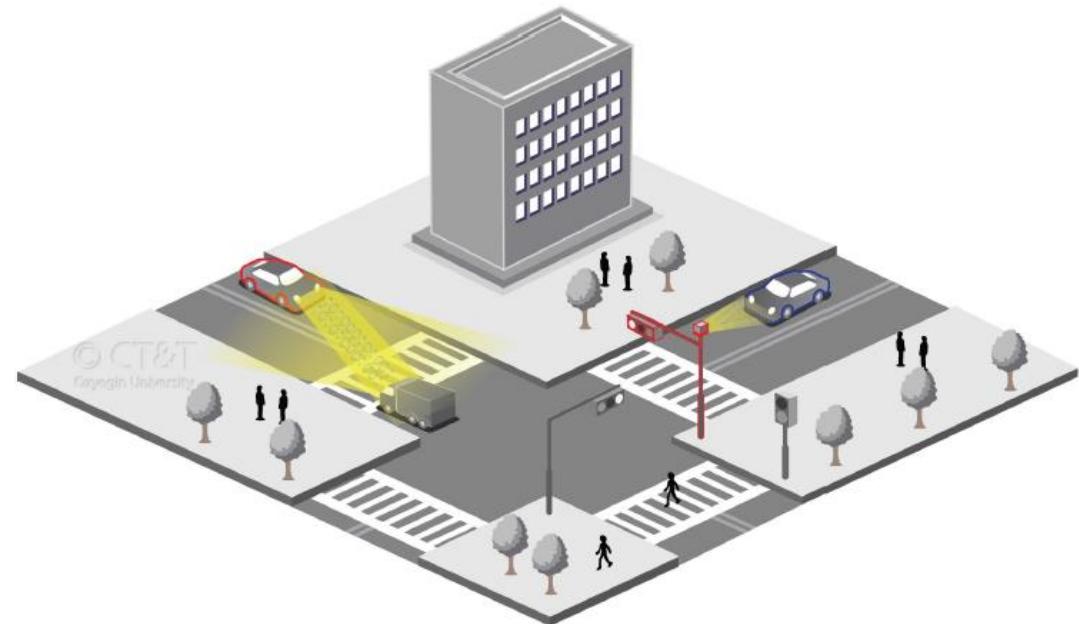
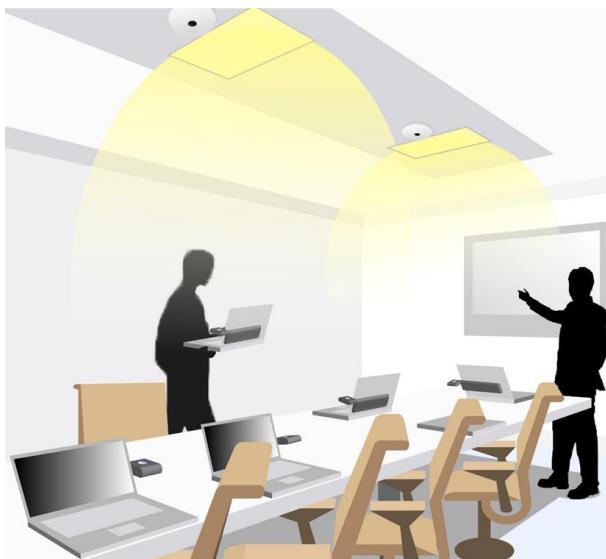


- Multi-pixel
- High Rate
- High interconnect density
- Low Power
- Power supply independent
- No EMI



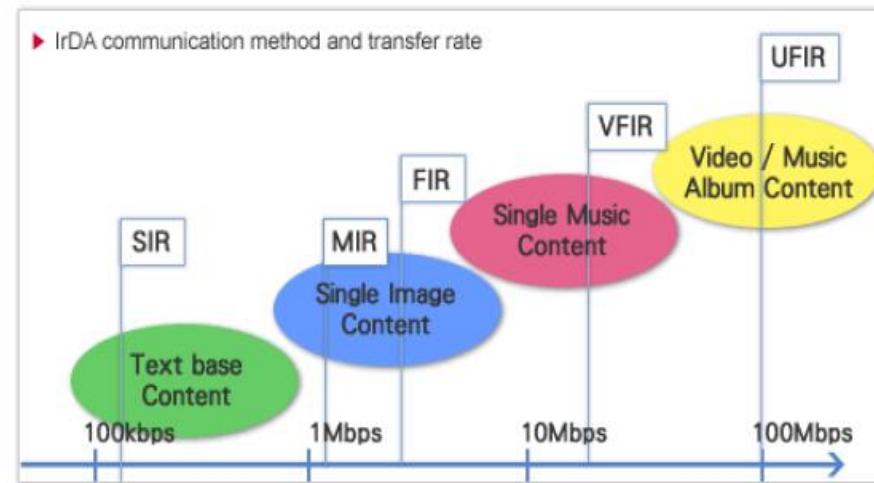
# Applications moyennes portées

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



# Normes

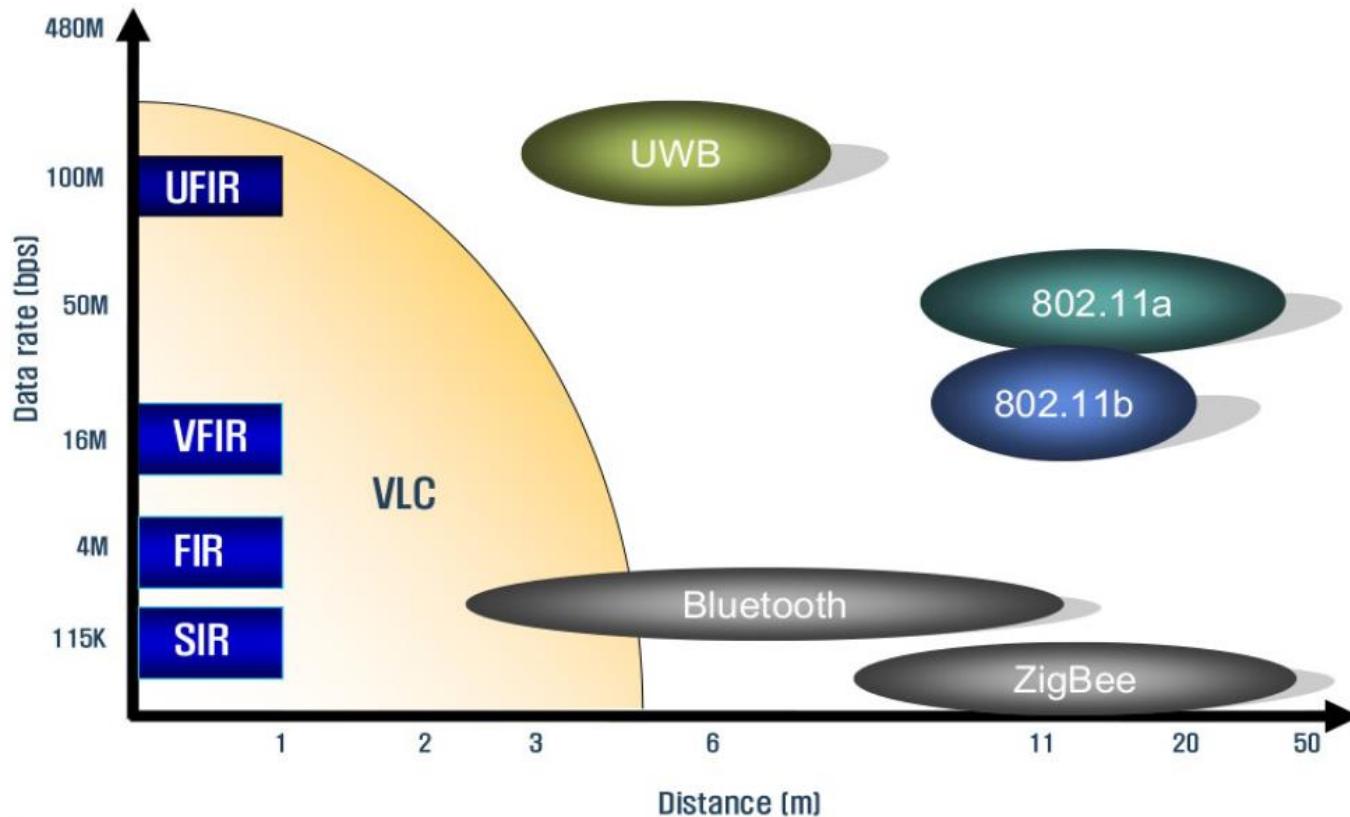
## ■ Infrarouge : IrDA



## ■ VLC

- **2011** : Premier standard **IEEE** pour les VLC, **802.15.7**
- **Actuellement IEEE 802.15.7r1 OWC TGroup : a revision**  
inclus 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

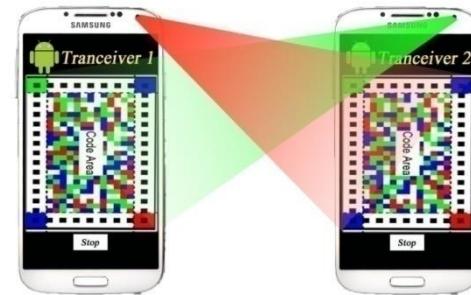


source: IEEE VLC Tutorial <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>

# 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



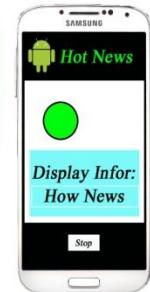
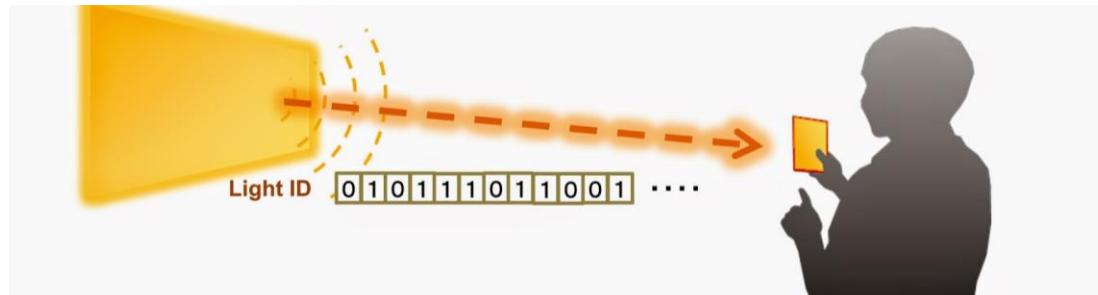
## ■ Applications dans le domaine de la grande distribution : contenu personnalisé pour les clients par exemple

# En indoor

## ■ Communications entre LEDs

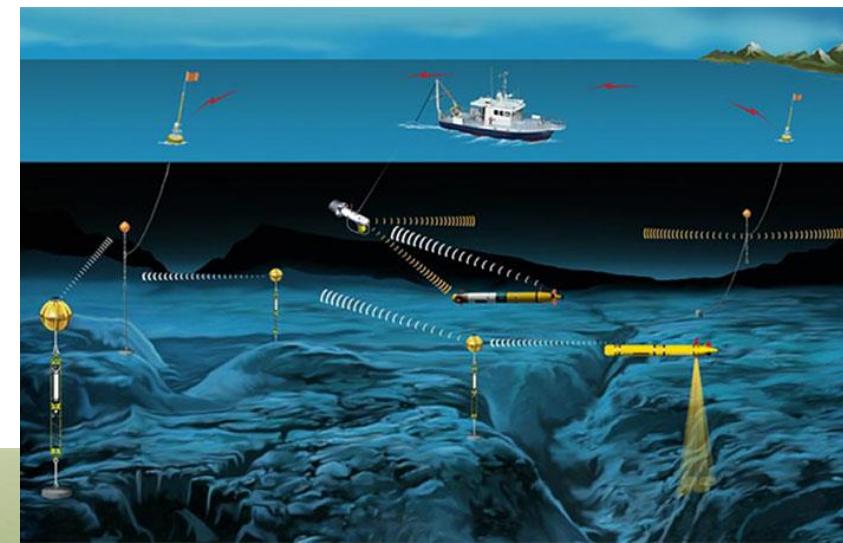
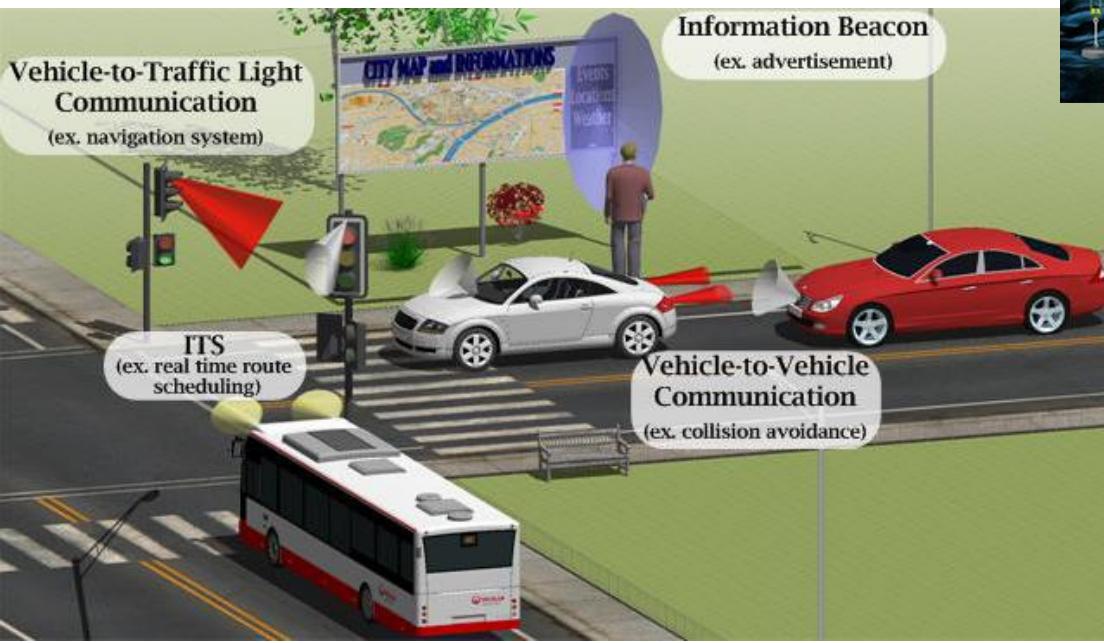
## – Jeux, multimédia

## ■ Communications entre écran et caméra



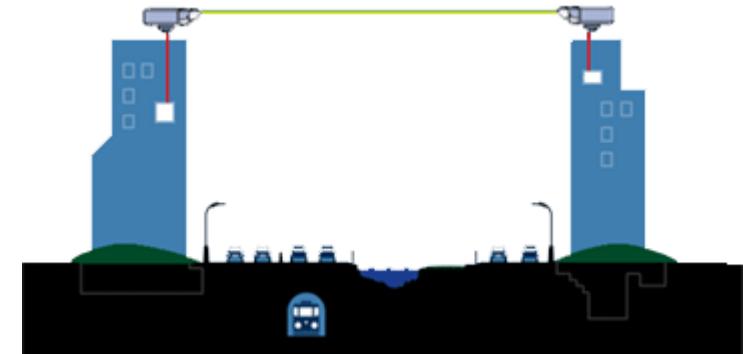
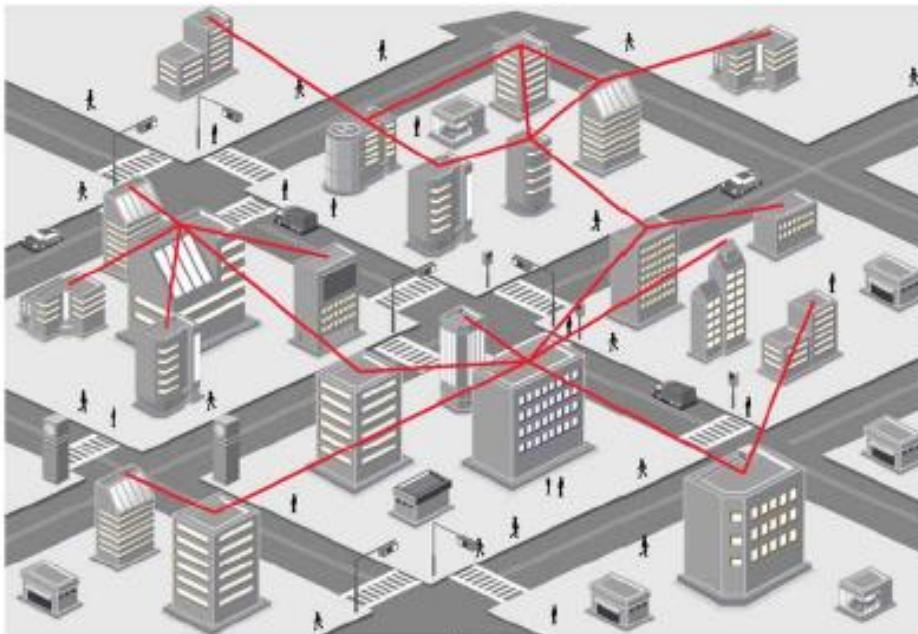
# En outdoor

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



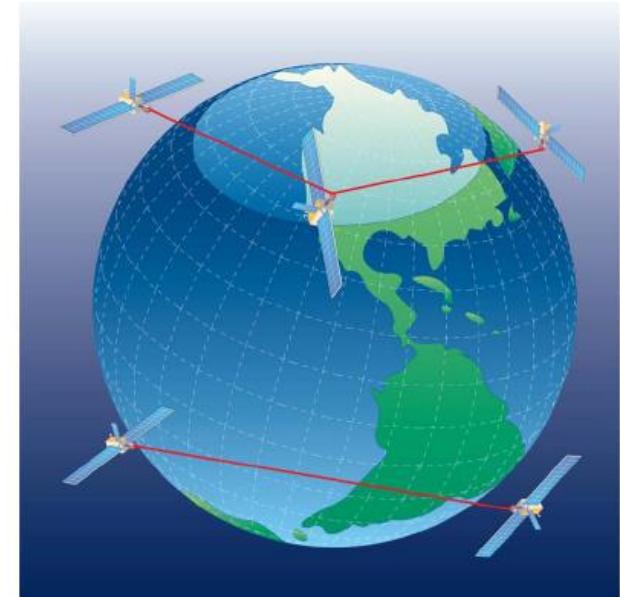
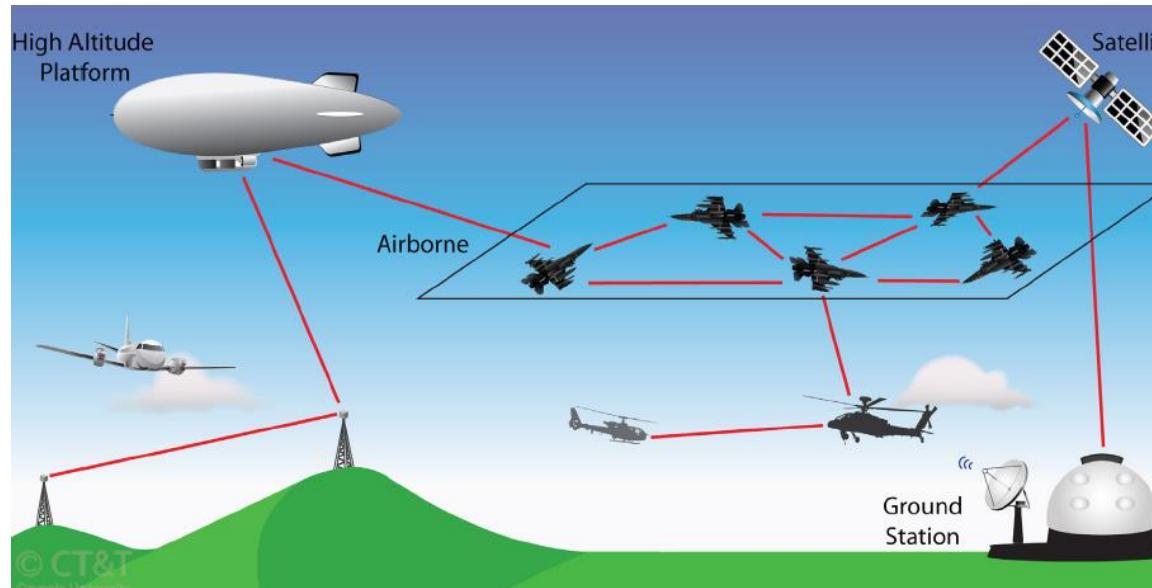
# Applications longues portées

→ **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**

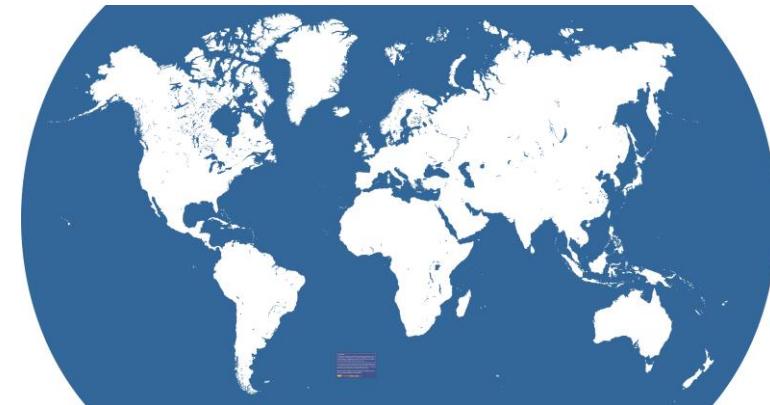
McMaster University

- **Australie**

Monash University

- **Europe : 1<sup>ère</sup> Action COST IC1101 dédiée 18 pays Européens + Israël**  
pilotée par Ozyegin University (Turquie)

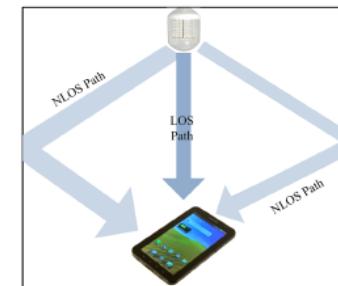
En France : Telecom Bretagne, Institut Fresnel, Université de Limoges XLIM, UTC, Université de Versailles...



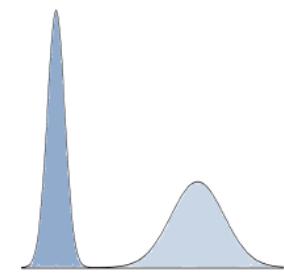
# Challenges

## ■ 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 : latency*



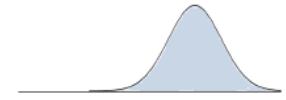
(a)



(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*

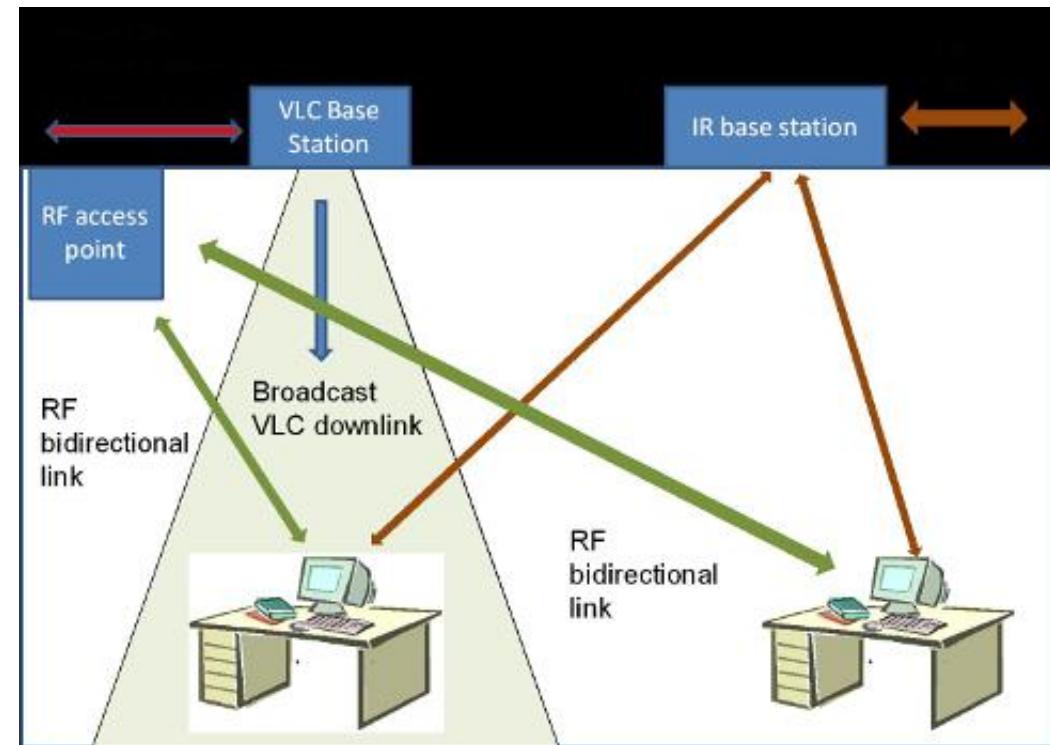
## ■ Déploiement cellulaire

- 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)



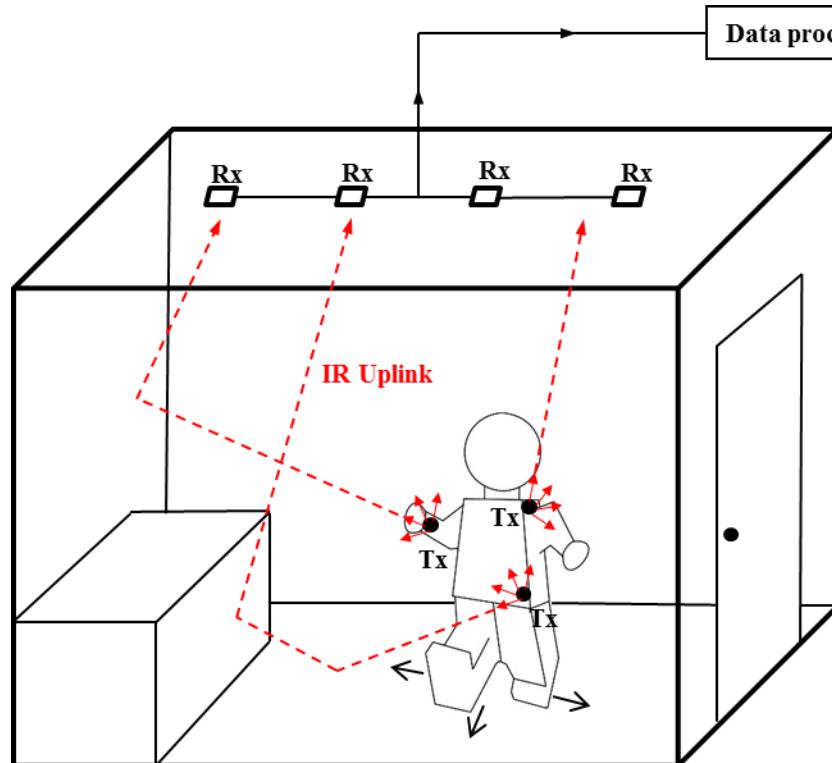
# Equipe de recherche RESYST

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

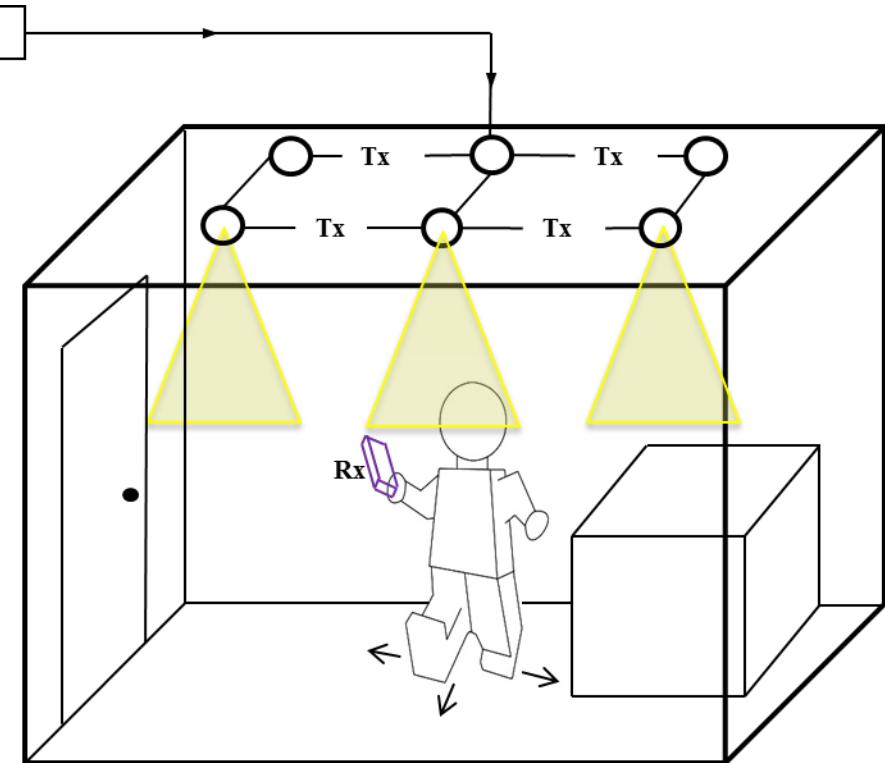
- Communications optique sans fils ( IR et Visible – Visible Light Communications LiFi)
- Techniques avancées de traitement numérique: codage de canal, accès multiple
- Réseaux de capteurs, objets connectés

# Contexte

## Une exemple de scénario : surveillance médicale



Voix montante en IR

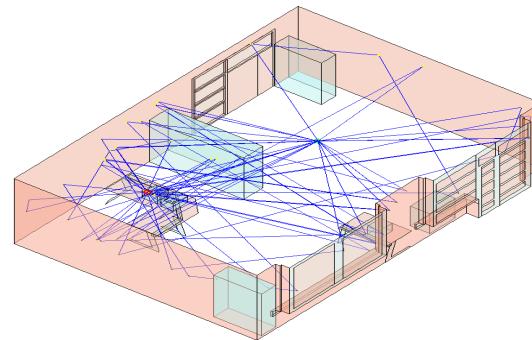


Voix descendante en Visible

# Compétences

## 1. Modélisation des canaux optiques sans fils indoore et outdoor

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



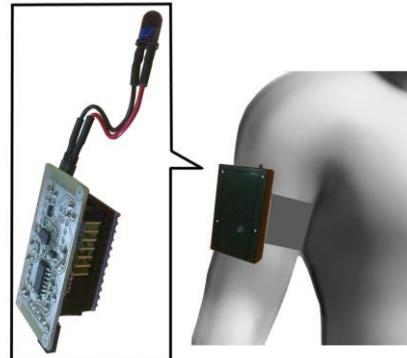
## 2. Modulation, codage, traitement du signal, couche PHY et MAC

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

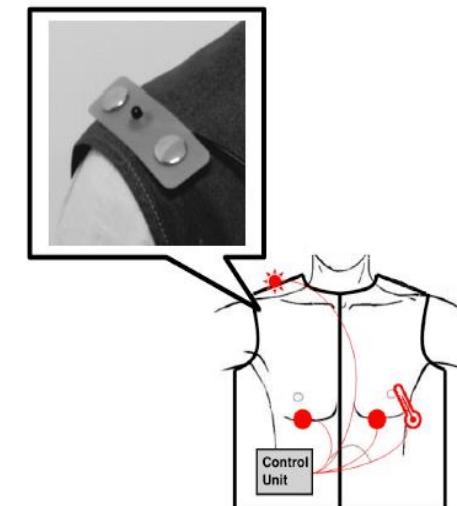
# Compétences

## 3. Objets connectés :

- Système communiquant porté / Récepteur dans l'infrastructure (*bâtimennt 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)

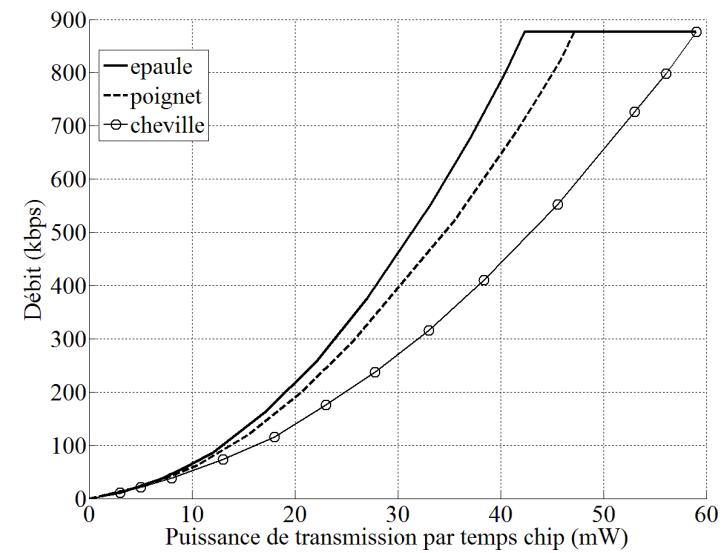
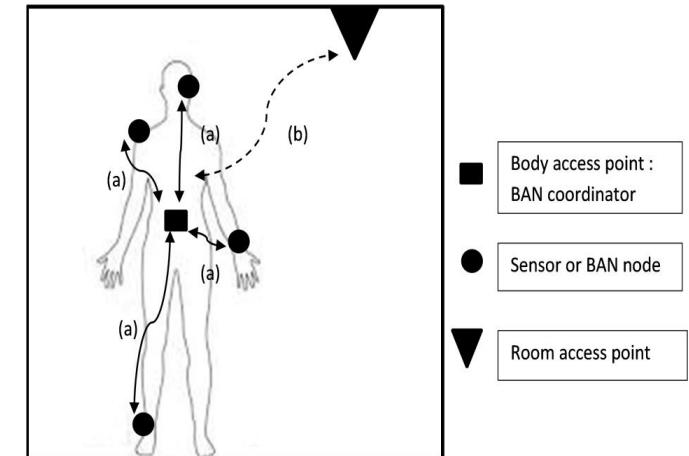
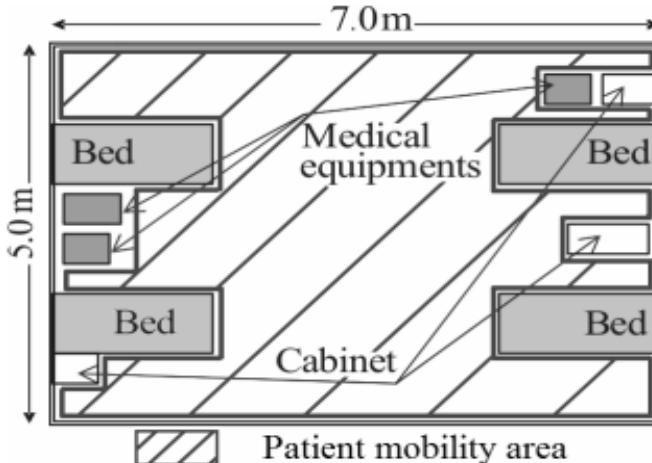


Gilet communicant : température et  
fréquence cardiaque

# Compétences

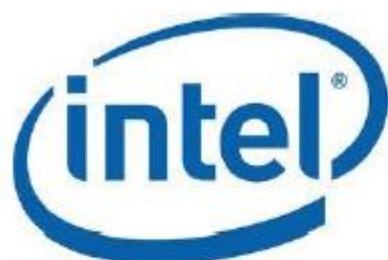
## 4. Réseaux de capteurs corporels (BAN)

- 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**



IEEE 802.15.7



**VLC Ltd**

**IBSENtelecom**  
optical telecom designed with people in mind