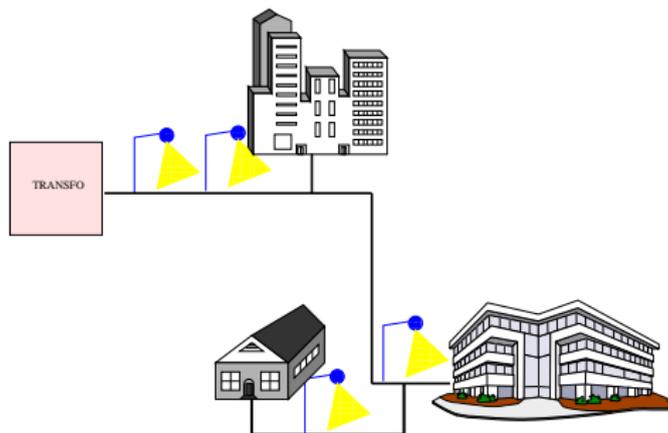


Communications sur câble électrique

Philippe Ciblat

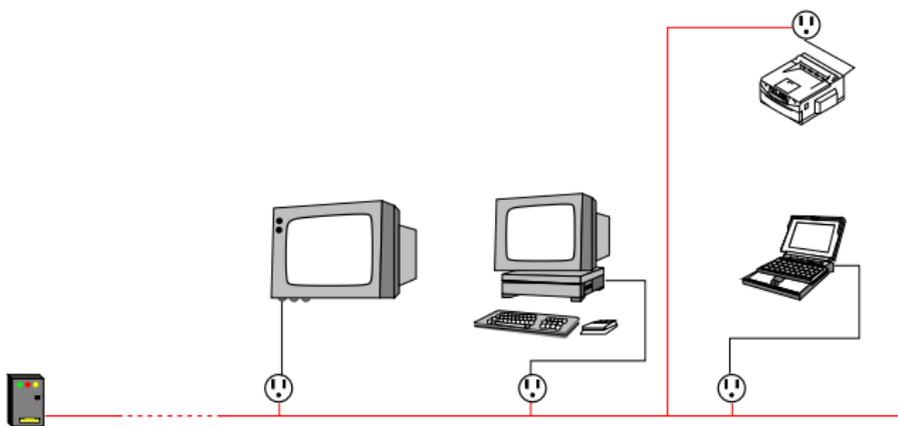
École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France

Problématique : réseau d'accès



- Outdoor
- Réseau public
- Licence obligatoire

Problématique : réseau local



- Indoor
- Réseau privé
- Pas de licence

Objectif

Les buts sont communs à l'outdoor et à l'indoor

- Débit partagé de qq dizaines de Mbits/s
- TEB de 10^{-7}
- Latence 50ms
(voix, jeux : 50ms ; vidéo : 100ms ; consultation internet : 400ms)
- Bande maximale de 30MHz

Dénomination :

- PLC : *PowerLine Communication*
- CPL : *Communications on Powerline / Courant Porteur en Ligne*

Historique

Rappel : l'électricité fonctionne à la fréquence 50Hz

- 1960 : Commutation des compteurs, Allumage des lumières
Très basses fréquences (175Hz) et qq bits/s
- 1980 : Télémétrie
Basses fréquences (9-100 kHz) et qq kbits/s
- 1995 : Domotique (9-100 kHz)
- Fin années 1990 : Domotique (*indoor*) ou réseau d'accès (*outdoor*) → Hautes fréquences (1,6-30MHz)

Normalisation

Instance :

- CENELEC : couche PHY
- ETSI : couche MAC et plus
- IEEE : groupe P1901

Consortium :

- HomePlug : alliance de certification
- OPERA : projet européen d'étude et de standardisation

Commercialisation :

- Indoor : oui
- Outdoor : phase de test/prototype

Canal : généralités

- Réponse impulsionnelle de l'ordre de qq μs
- Canal statique
- Atténuation forte en fonction de la fréquence
 - 20dB/100m entre 1-10MHz
 - 40dB/100m entre 10-30MHz
- Bruit de fond : environ -120dBm/Hz
- Bruit impulsif : environ -60dBm/Hz pour une longueur typique de qq dizaines de μs
- Puissance de transmission autorisée : environ -40dBm/Hz
- Néanmoins qq bandes interdites (radio AM, radio amateur)

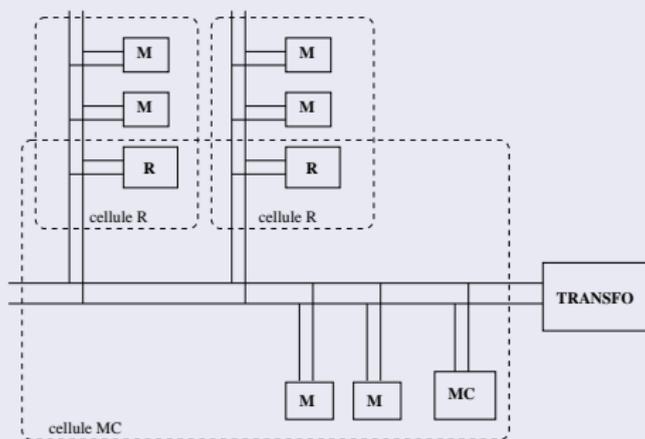
Portée

- 400m entre 1-10MHz \Rightarrow Outdoor
- 200m entre 10-30MHz \Rightarrow Indoor

Canal : architecture outdoor 1

Distance moyenne transformateur-abonné en urbain :

- qq centaines de mètres voire un kilomètre
- qq centaines de foyers
- répéteur nécessaire (en bas des immeubles typiquement)



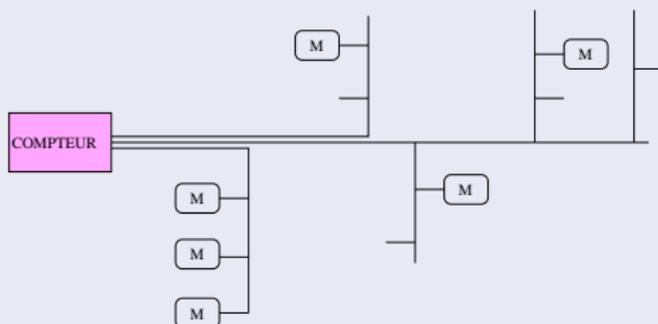
Canal : architecture outdoor 2

- Système **multi-cellulaire** et **multi-utilisateur** mais canal connu à l'intérieur d'une cellule
- Technique d'accès multiple comme en WIFI (distribué) ou comme en UMTS (centralisé)
- Différences entre PLC et ADSL :
 - multi-utilisateur (car câble partagé)
 - multi-cellulaire (car atténuation forte)

N.B. : Aux Etats-Unis, problématique différente car distance plus courte (transformateur sur pôleau en début de lotissement)

Canal : architecture indoor

Distance moyenne prise-prise : qq dizaines de mètres



- Liaison multi-point multi-point
- Une dizaine d'appareils
- Signal ne sort pas du réseau local (le compteur l'arrête !)
- Technique d'accès multiple clairement comme en WIFI (distribué de type CSMA/CA)

Modulation : Généralités 1

- On ne s'intéresse dorénavant qu'au réseau outdoor
- Néanmoins couche physique de l'indoor similaire
- Mais couche d'accès au medium différente

Toutes les fréquences sont potentiellement intéressantes donc

- Mode TDD entre cellule R et cellule MC
- Mode TDD entre le lien montant et descendant

Présentation

Couches physique et MAC conçues par le projet RNRT IDILE
(consortium d'industriels et d'académiques dont l'ENST)

Modulation : Généralités 2

- Bande $\approx 20\text{MHz} \Rightarrow T_s \approx 0,05\mu\text{s}$
- Filtre de longueur maximale $15\mu\text{s}$ soit 300 symboles

⇒ **Gestion simple de l'interférence entre symboles**

- Canal statique
- Fréquences interdites
- Evanouissement important

⇒ **Gestion du débit par bande de fréquence**

Solution

OFDM est plus adapté que le CDMA et que le mono-porteuse

OFDM : Dimensionnement

Largeur de bande (B)	20 MHz
Temps symbole d'information ($T_s = 1/B$)	0,05 μ s
Longueur du filtre	15 μ s
Degré du filtre (L)	300
Préfixe cyclique (CP)	300
Nombre de porteuses (N)	2048
Perte d'efficacité spectrale	12,8 %
Espacement entre porteuse ($\Delta f = B/N$)	9,75 kHz
Temps bloc FFT ($T = 1/\Delta f$)	102 μ s
Temps symbole OFDM	117 μ s

- Désynchronisation des horloges d'échantillonnage

$$N \times \text{précision} \approx 10^{-2}$$

Utilisation d'un VCO/PLL de 5ppm

Egaliseur fréquentiel

Soit $u(z)$ l'égaliseur fréquentiel (dénommé aussi FEQ)

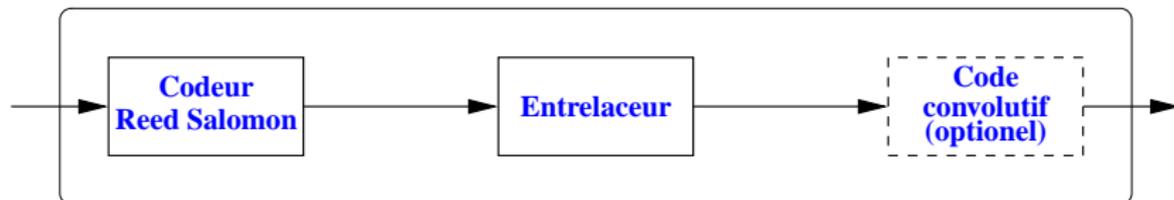
h : filtre représentant le canal de propagation.

$H_k = h(e^{2i\pi k/N})$: réponse fréquentielle sur la porteuse 'k'.

Sortie de FFT (porteuse 'k') : $z_n^{(k)} = H_k s_n^{(k)}$

- Filtre adapté : $U_k = H_k^*$
- Forçage à zéro : $U_k = 1/H_k$
- Wiener : $U_k = H_k^*/(|H_k|^2 + \sigma_{b,k}^2)$
- DFE

Codage



- Technique de codage similaire à celle de l'ADSL
- Entrelaceur présent juste pour améliorer la concaténation des codes et non pour gérer le bruit impulsif

Bruit impulsif

- Qq dizaines de μs , donc interne à un symbole OFDM
- Fréquence d'apparition 10ms
- Si nécessaire, technique d'ARQ pour le symbole/paquet perdu

Accès multiple

Comment associer une technique d'accès multiple à l'OFDM à l'intérieur d'une cellule

Réponse

- MC-CDMA : gère mal la connaissance du canal
- MC-DS-CDMA : gère bien l'interférence multi-cellulaire et permet le partage de bonnes porteuses
- OFDMA : solution simple et efficace

N.B. : CDMA seul (sans OFDM) ne peut être retenu car

- fréquence interdite
- mauvaise gestion du canal connu à l'émetteur

Attribution des porteuses en OFDMA

Difficulté

Trouver un critère pertinent

Soit R_k le débit atteignable par l'utilisateur $k = \{1, \dots, K\}$

	Equitable	Débit cumulé
$\sum_{k=1}^K R_k$	mauvais	optimal
$\sum_{k=1}^K \alpha_k R_k$	moyen	bon
$\sum_{k=1}^K \log(R_k)$	moyen	bon
$\max \min R_k$	très bon	mauvais
$\text{var} \left(\frac{R_k}{R_{k,\text{seul}}} \right)$	bon	bon

Allocation dynamique

En OFDMA, utilisateur unique par sous-porteuse \Rightarrow idem à l'ADSL

- « Waterfilling » n'est pas applicable
- Modulation adaptative en revanche possible
 - Probabilité d'erreur bit cible de 10^{-7} en sortie du décodeur RS, soit une probabilité d'erreur bit de 10^{-3} en entrée
 - Pour simplifier, on assimile la probabilité d'erreur bit à la probabilité d'erreur symbole P_s , d'où

$$P_s = 4Q \left(\sqrt{d_{\min}^2 |H|^2 / 4N_0} \right) \text{ avec } E_b = \frac{M-1}{6} d^2$$

Lien entre nb de bits/symbole et le RSB

$$m = \left\lfloor \log_2 \left(1 + \frac{\text{RSB}}{\Gamma} \right) \right\rfloor$$

avec

$$\text{RSB} = \frac{E_b |H|^2}{N_0} \text{ et } \Gamma = \frac{2}{3} \left(Q^{(-1)} \left(\frac{P_s}{4} \right) \right)^2 = 9\text{dB}$$

Débit

Capacité de Shannon avec

- Marge de 10dB
- Bande de 20MHz
- RSB maximal de 80dB et atténuation moyenne de 20dB/100m

0m	100m	200m	300m
460Mbits/s	330Mbits/s	200Mbits/s	70Mbits/s

La réalité

HomePlug 1.0	HomePlug 1.1	HomePlug A/V	IDILE
6Mbits/s	35Mbits/s	80Mbits/s	100Mbits/s

Bibliographie

- <http://www.cpl-france.org/>
- <http://www.ist-opera.org/>
- <http://www.isplc.org/>
- Numéro spécial du *IEEE Journal of Selected Areas in Communications* (JSAC), Juillet 2006.
- E. Biglieri, « Coding and modulation for a horrible channel », *IEEE Com. Magazine*, Mai 2003.
- M. Zimmermann, « Analysis and Modeling of impulse noise in broadband PLC », *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Fév. 2002.
- S. Gault, « An OFDMA based modem for PLC over low voltage distribution network », *IEEE International Symposium on PLC and its Applications* (ISPLC), Avril 2005.