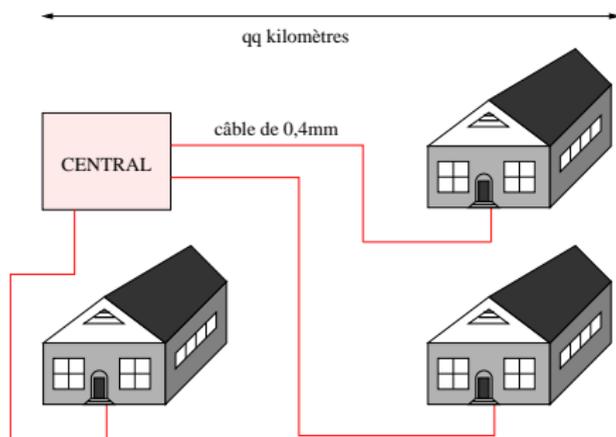


# La couche physique de l'ADSL (voie descendante)

Philippe Ciblat

École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, France

# Problématique



## Objectifs initiaux :

- Débit de qq Mbits/s
- TEB de  $10^{-7}$
- Latence 50ms  
(voix, jeux : 50ms ; vidéo : 100ms ; consultation internet : 400ms)
- Bande de 1MHz.

# Historique (1/2)

## Modems ante-« ADSL » : bande téléphonique (3 à 4 kHz)

### 1. Lien modem - modem :

- Modems V.22 (1980) : 1,2kbits/s  
*FDM + 600bd + DQPSK + ZF/MMSE*
- Modems V.32 (1984) : 9,6kbits/s  
*EC + 2400bd + 16-QAM + ZF/MMSE*
- Modems V.34 (1990) : 34kbits/s  
*EC + 3200bd + QAM + DFE + TCM*

### 2. Lien modem - central :

- Modems V.90 (1995) : 56kbits/s  
*EC + 8000bd + PAM non modulé*

$$C = 4k * \log_2(1 + 80dB) = 105k$$

# Historique (2/2)

Modems ADSL (1995) : qq Mbits/s

- Groupe de travail ITU-T : G992.1 ou G.DMT
- Bande de 1MHz
- Portée de qq kms
- Modulations multiporteuses OFDM
- Décollage commercial autour de 2000

Modems VDSL (1998) : qq dizaines de Mbits/s

- Portée 1km
- Large bande (20 MHz)

# Canal : généralités

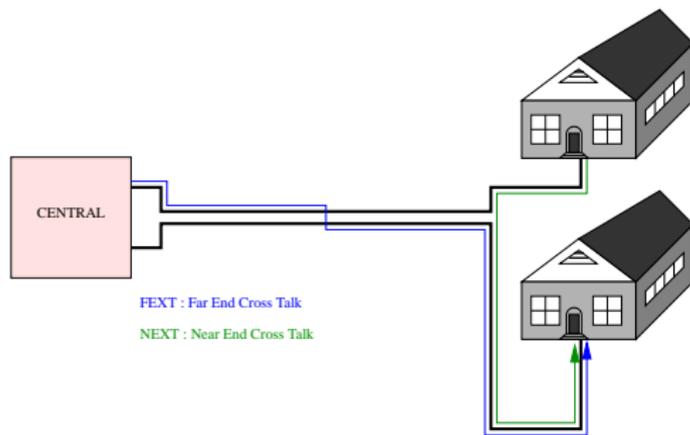
- Liaison point à point mono-utilisateur
- Canal statique
- Réponse impulsionnelle de l'ordre de la centaine de  $\mu s$

# Canal : bruit

**Bruit de fond** : environ  $-140\text{dBm/Hz}$

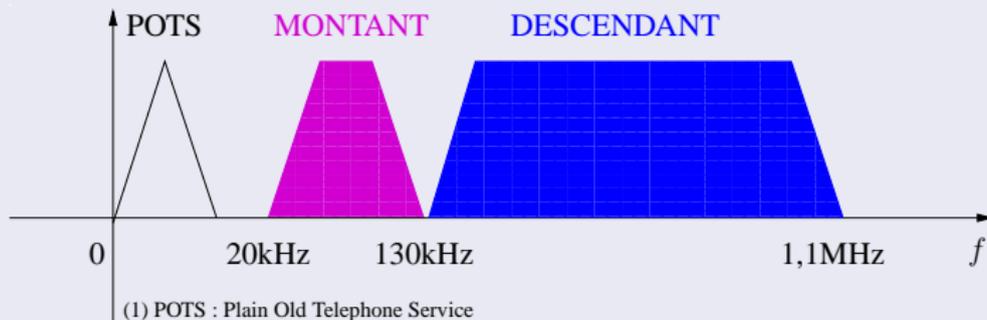
**Bruit impulsif** : longueur typique de qq centaines de  $\mu\text{s}$

**Diaphonie** :



# Canal : bande (1/2)

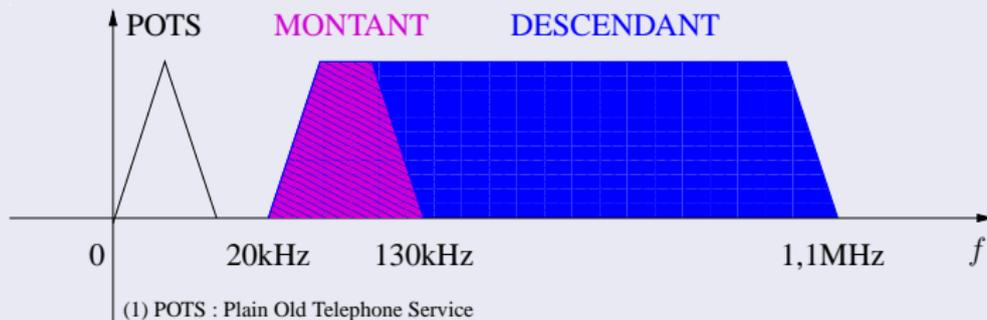
Mode FDM : multiplexage en fréquence



- Absence de NEXT
- Présence de FEXT

# Canal : bande (2/2)

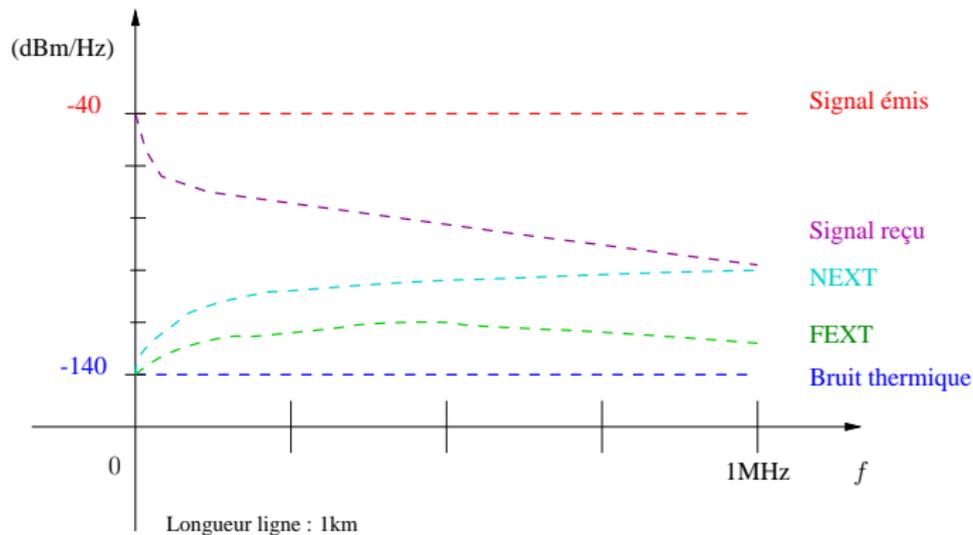
Mode EC : pas de multiplexage fréquentiel



- Présence de FEXT et de NEXT
- Largeur de bande de filtre « annulateur d'écho » : 100kHz

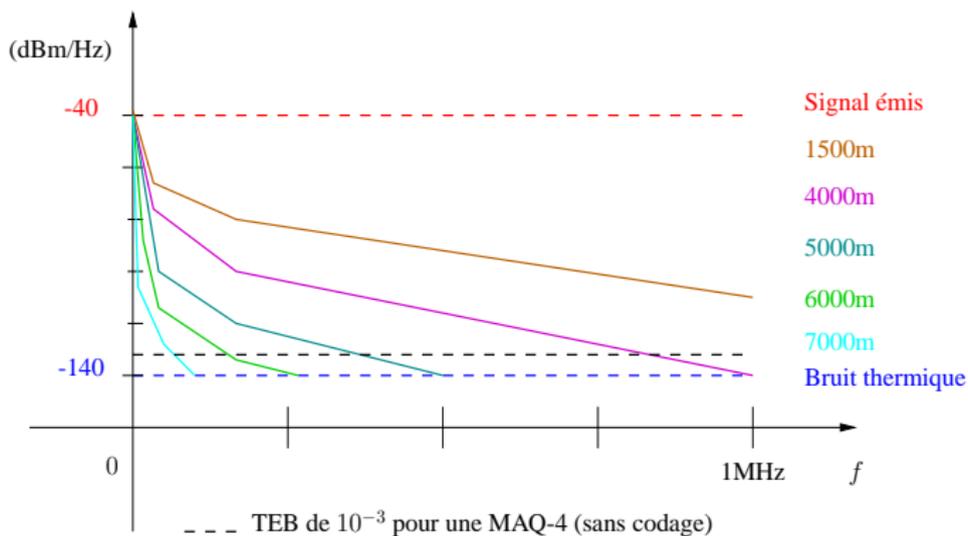
# Canal : bilan de liaison (1/2)

Puissance émise : -40dBm/Hz



NEXT > FEXT (dans la bande où le NEXT est censé exister)

# Canal : bilan de liaison (2/2)



- Atténuation fortement fonction de la fréquence
- Distance maximale : entre 5000 et 6000m pour 500kbits/s

# OFDM : Généralités

- Filtre long :

- Algorithme de Viterbi trop complexe
- DFE trop complexe
- Egalisation linéaire pas suffisante

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

- Canal statique et hautes fréquences très dégradées

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

# OFDM : Dimensionnement (1/3)

Largeur de bande ( $B$ )	1104 kHz
Temps symbole d'information ( $T_s = 1/B$ )	0,9 $\mu$ s
Nombre de porteuses ( $N$ )	256
Perte d'efficacité spectrale	12,5 %
Préfixe cyclique (CP)	<b>32</b>
Espacement entre porteuse ( $\Delta f = B/N$ )	4,31125 kHz
Temps bloc FFT ( $T = 1/\Delta f$ )	232 $\mu$ s
Temps symbole OFDM	260 $\mu$ s
Degré du filtre ( $L$ )	$\approx$ <b>150</b>

# OFDM : Dimensionnement (2/3)

## Remarque

Degré du filtre ( $L$ )  $\gg$  Préfixe cyclique (CP)

Pour avoir  $L < CP$ , il faudrait augmenter  $N$ , mais

- *Désynchronisation des horloges d'échantillonnage* : si  $N \times \text{précision} \approx 10^{-2}$ , alors perte en TEB négligeable. Par contre, si  $N \times \text{précision} \gg 10^{-2}$ , alors perte importante en TEB.  $\Rightarrow$  Besoin d'un VCO de précision de 40ppm : **OK** en 1990.
- *Temps limité pour la FFT* : complexité en  $N \log(N)$ . Si  $N \gg 256$ , **NIET** en 1990.
- *Temps de latence* : si  $N = 2048$ , bloc OFDM de 2ms
- *Temps de cohérence du canal*

# OFDM : Dimensionnement (3/3)

## Porteuses actives

EC/POTS	254 (99%)
EC/ISDN	227 (90%)
FDM/POTS	227 (90%)
FDM/ISDN	197 (75%)

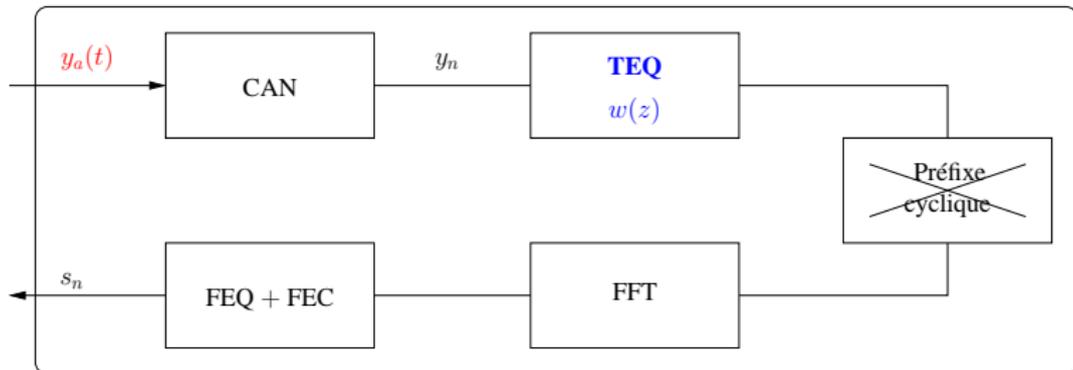
En pratique, ADSL avec EC qui s'impose

# Egaliseur temporel

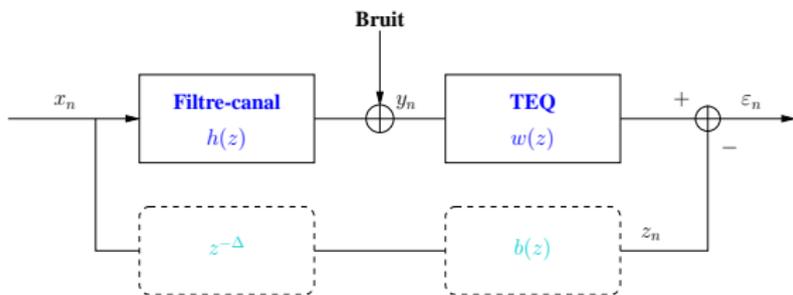
Soit  $w(z)$  l'égaliseur temporel (dénommé aussi TEQ)

## But

Réduire la taille de la réponse impulsionnelle du filtre pour la rendre inférieure à celle du préfixe cyclique.



## TEQ : Erreur quadratique



Soit  $\varepsilon_n = z_n - w \star y_n = (b_{n-\Delta} - (h \star w)_n) \star x_n$  : [Cioffi-1992]

$$w_{\text{MMSE}} = \arg \min_w \mathbb{E}[|\varepsilon_n|^2]$$

$$\Rightarrow w_{\text{MMSE}} = R_{yy}^{-1} R_{xy} b$$

# Egaliseur fréquentiel

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

$t = w \star h$  : filtre équivalent global.

$T_k = t(e^{2i\pi k/N})$  : réponse fréquentielle sur la porteuse 'k'.

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

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

# Codage

- Code en bloc Reed-Solomon (240,224)
  - Capacité de correction : 8 octets (soit 8 séries de 8 bits consécutifs)
  - 64 bits consécutifs perdus tous les 1920 bits sont corrigibles
  
- Longueur de l'entrelaceur
  - Objectif : absorption de bruits impulsifs de  $500\mu s$ , soit 555 symboles QAM
  - Considérons, à titre d'exemple, l'utilisation de 16-QAM
  - Le bruit impulsif fait perdre environ 2000 bits consécutifs
  - Soit  $n$  le nombre de mots de code RS non-dépendants

$$n = \frac{\text{nb erreur consécutive}}{\text{nb erreur consécutive corrigible}} = \frac{2000}{64} = 31$$

- Taille de l'entrelaceur :
  - $n \times$  taille d'un mot de code RS =  $31 \times 1920 \approx 60000$  bits
  - Latence de 15ms
  
- Code convolutif de rendement 1/2 (Algo. de Viterbi)

# Allocation dynamique (1/2)

- « Waterfilling » non applicable car contrainte de masque fréquentiel sur la puissance
- 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

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

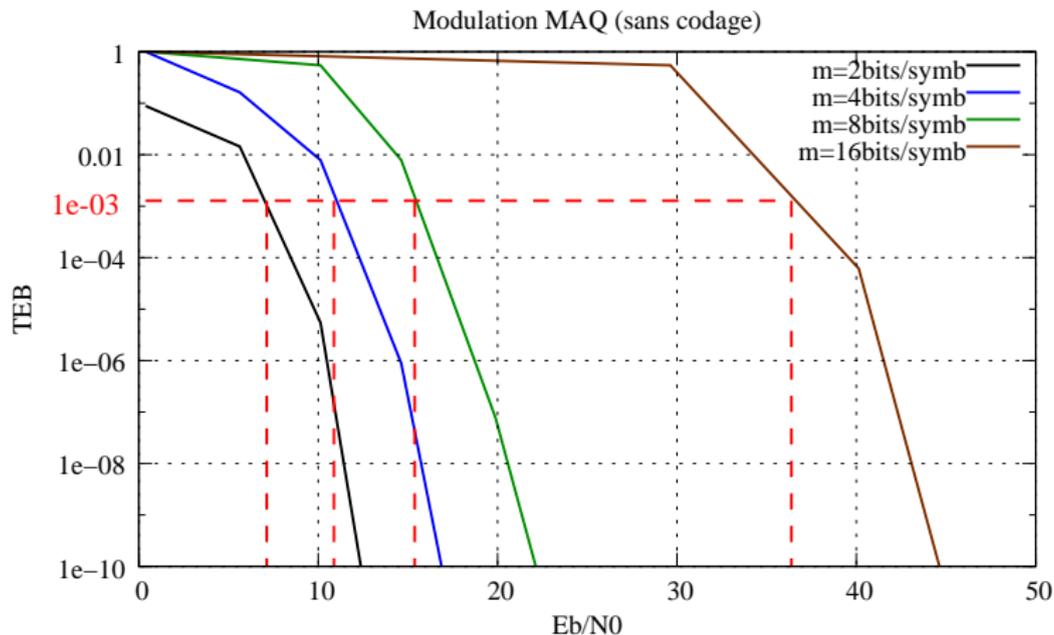
## Lien entre nb de bits/symbole et le RSB

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

avec

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

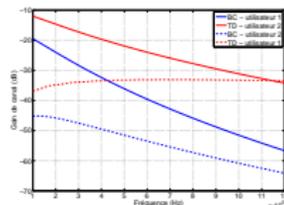
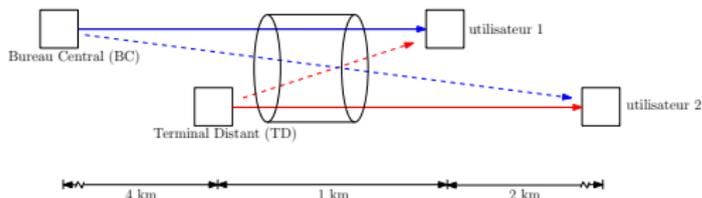
# Allocation dynamique (2/2)



Modulations : 2-32768 MAQ (nombre bits/symb : 1→15)  
 Débit maximal : 13,5 Mbits/s (sans le codeur convolutif)

# Allocation de puissance (1/2)

Gestion du FEXT/NEXT par allocation intelligente de puissance



Problème d'optimisation suivant

$$\max_{P_1^1, \dots, P_N^1, P_1^2, \dots, P_N^2} w \left( \sum_{n=1}^N R_n^1 \right) + (1 - w) \left( \sum_{n=1}^N R_n^2 \right)$$

avec

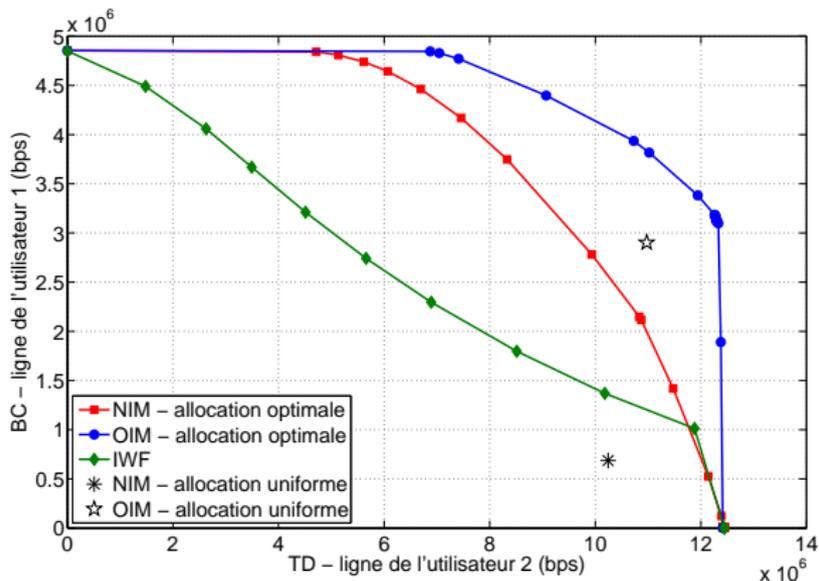
$$R_n^k = \log \left( 1 + \frac{1}{\Gamma} \frac{|h_n^{k,k}|^2 P_n^k}{|h_n^{k,k'}|^2 P_n^{k'} + 2N_0} \right)$$

sous les contraintes  $\sum_{n=1}^N P_n^1 \leq P_{\max}^1$  et  $\sum_{n=1}^N P_n^2 \leq P_{\max}^2$

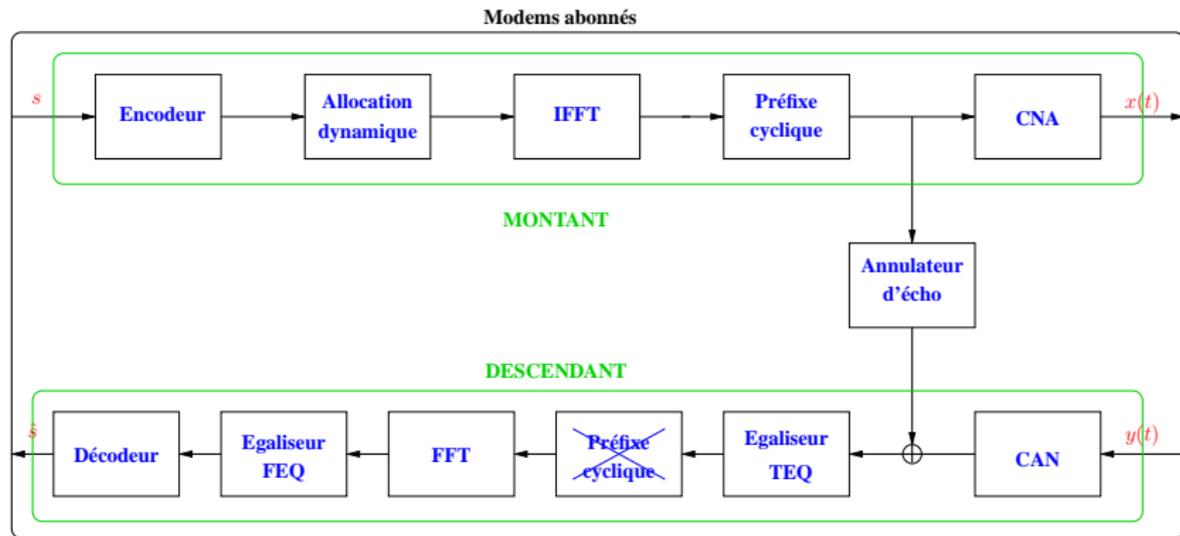
**Rq** : Contrainte de puissance totale et non de masque

# Allocation de puissance (2/2)

- Marge :  $\Gamma = 13\text{dB}$
- NIM : interférence vue comme de "bruit"
- OIM : interférence optimalement gérée



# Récapitulatif



# Allumage du modem

- Apprentissage long  
( $\leq 0,5s$ , c'est-à-dire, 2000 symboles OFDM)
  - Annulateur d'écho
  - Allocation dynamique (nécessite une voie de retour)
  - TEQ
  - FEQ
- Aucune réactualisation sauf synchronisation  
car temps de cohérence très long  
1 symbole OFDM dédié sur 68

# Bibliographie

- J. Bingham, « ADSL, VDSL, and multicarrier modulation », Wiley, 2000.
- P. Golden, « Fundamentals of DSL », Auerbach, 2006.
- G. Forney, « The V.34 high-speed modem standard », *IEEE Com. Magazine*, Déc 1996.
- J. Cioffi, « Very-High-Speed Digital Subscriber Line », *IEEE Com. Magazine*, Avril 1999.
- R. Cendrillon, W. Yu, M. Moonen, J. Verlinden and T. Bostoen, « Optimal Multiuser Spectrum Balancing for Digital Subscriber Lines », *IEEE Trans. on Communications*, Mai 2006.