

Télécommunications par satellites





Plan

- Introduction
- Généralités
- Bilan de liaison
- La couche MAC
- Conclusion



Historique

- 1957: Spoutnik
- 1960: Echo (satellite diffusion)
- 1965: Intelsat I (= Early Bird): 1er satellite commercial
- 2000: 200 satellites en orbite géostationnaire



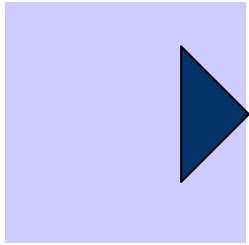
Quelques chiffres

- Early Bird
 - 1965
 - 250 liaisons téléphoniques
 - (Intelsat 1= 68kg pour 480 liaisons téléphoniques)
- Intelsat 802
 - lancé en juin 1997
 - 134 500 liaisons téléphoniques + 3 TV
 - 3,5 tonnes

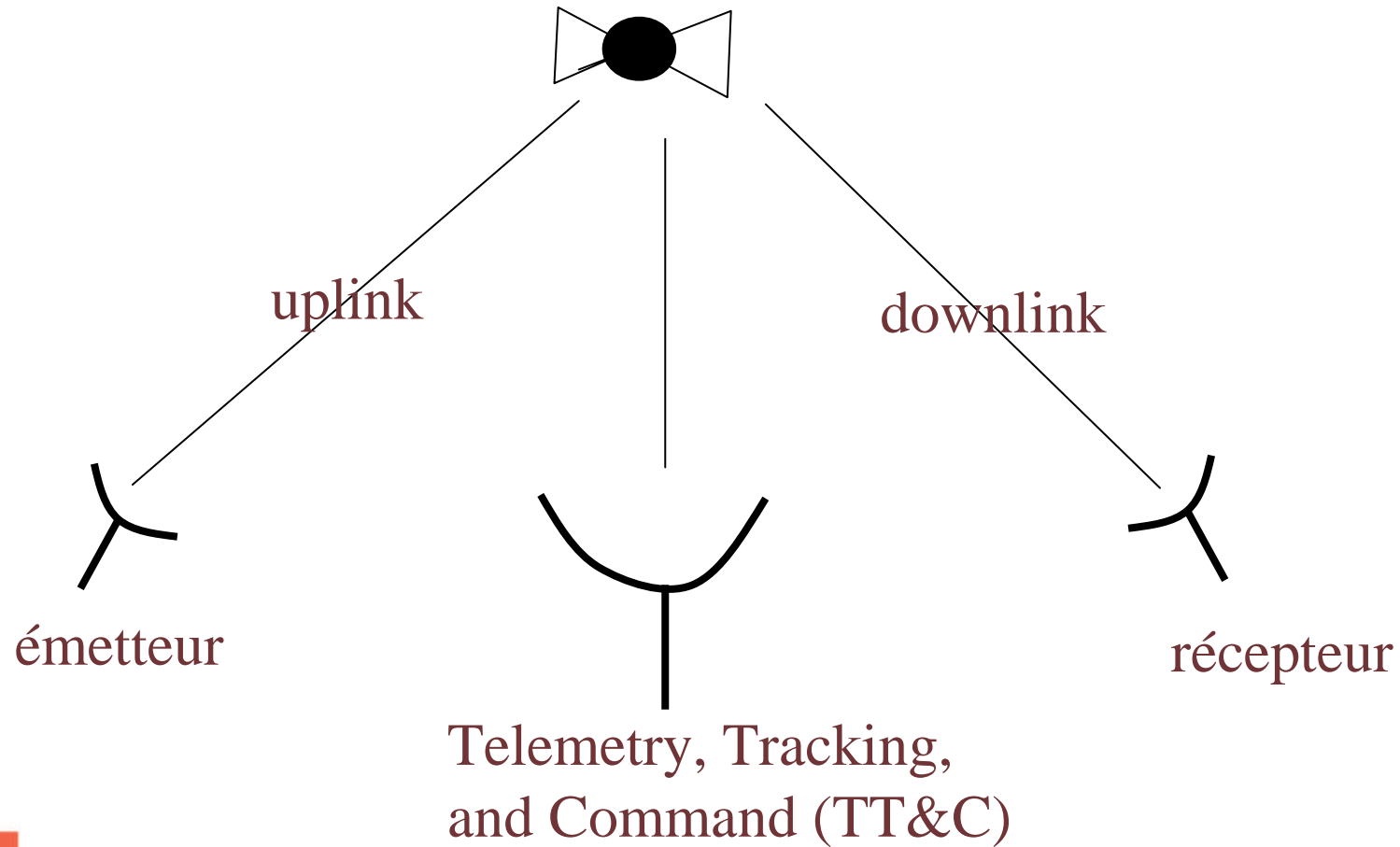


A quoi servent les satellites (de télécommunication)?

- Un satellite dispose de caractéristiques qui ne se trouvent pas dans les réseaux terrestres:
 - une capacité de diffusion
 - une bande passante très large
 - une facilité de déploiement et de reconfiguration



Satellite





Aspect système

- Composantes du système:
 - charge utile
 - stations sol
 - station de contrôle

- liaisons peuvent être:
 - point-à-point
 - multipoint



Utilisation des satellites (1/2)

- relayage pour la téléphonie et la télévision (service point-à-point) : Intelsat, Eutelsat
- accès aux réseaux téléphoniques ou de données (point-à-multipoint) pour des groupes géographiquement dispersés : telecom2, Eutelsat, SMS, Intelsat




Utilisation des satellites (2/2)

- VSAT (Very Small Aperture Terminal): diffusion (TV, internet) chez l'abonné
- téléphone mobile: Inmarsat, Iridium, Globalstar
- services multimedia: (Skybridge), Teledesic
- GPS



Satellite transparent

- En général, le satellite agit (presque) comme un miroir (on dit que c'est un transpondeur, ou répéteur transparent)
- En fait, dans ce cas, le satellite:
 - amplifie le signal
 - le transpose dans une autre gamme de fréquences

 car sinon, le signal fort émis sur downlink brouillerait le signal faible reçu sur uplink



Satellite régénératif

- Les satellites de nouvelle génération sont régénératifs (ou OBP= On Board Processing); le satellite NG:
 - démodule le signal uplink (permet de faire de la correction d'erreurs)
 - remodule le signal downlink
 - amplifie le signal
 - le transpose dans une autre gamme de fréquences



Gammes de fréquences

- Comme pour les autres systèmes de radiocommunications, les satellites ont tendance à utiliser des gammes de fréquences de plus en plus hautes
 - plus de bandes
 - composants plus petits
 - mais technos plus difficiles à maîtriser, plus chères



Gammes de fréquences utilisées

gamme	Uplink (GHz)	Downlink (GHz)
UHF	0,4	0,1
L	1,6	
S		1,5
C	6	4
X	8	7
Ku	14	11
Ka	28	18

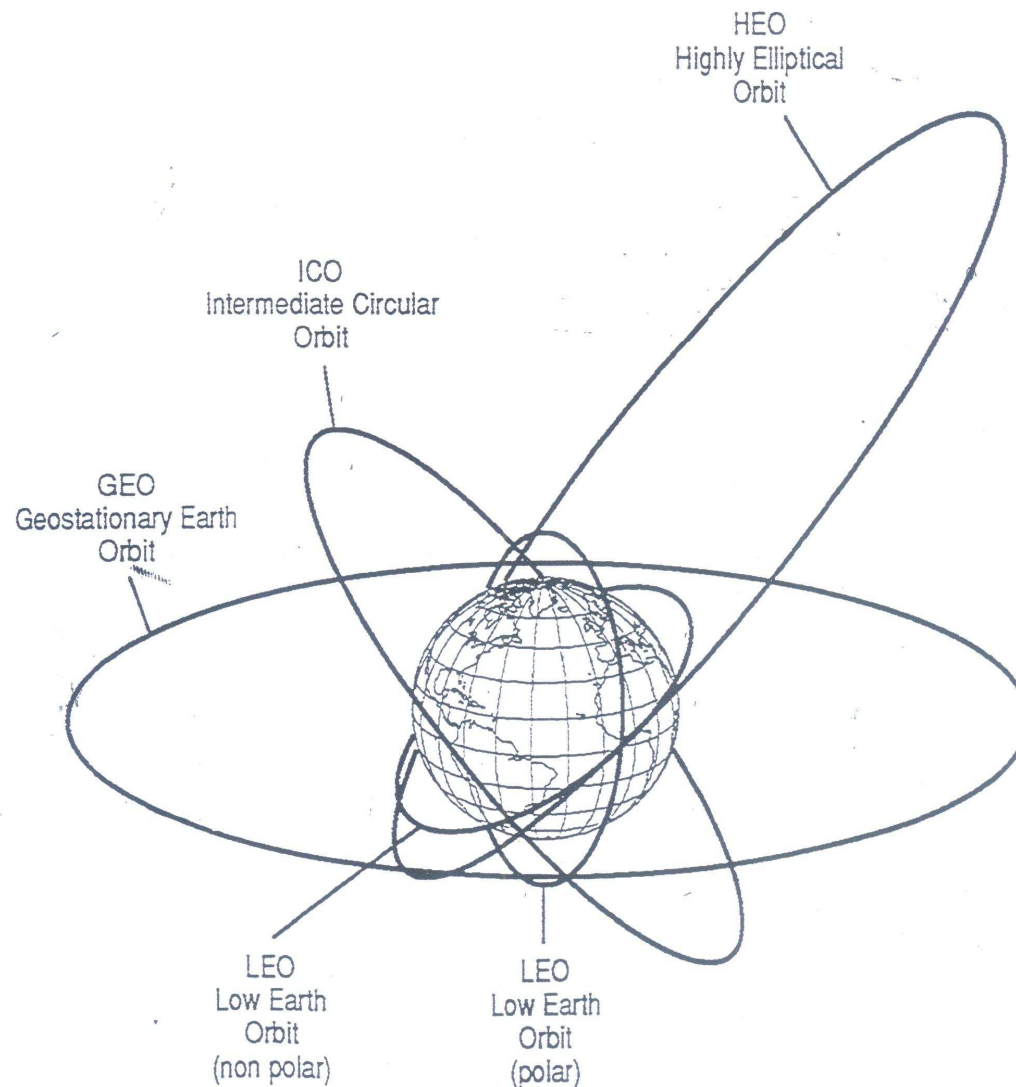


Fréquences

- Les bandes passantes des répondeurs sont en général de l'ordre de 40MHz (dans les gammes les plus hautes)
- Un satellite a en général plusieurs répondeurs

Orbites

- Plusieurs types d'orbites sont utilisées:





Orbites des satellites

- géostationnaires: dans le plan équatorial, à 36000km d'altitude, le satellite tourne avec la terre
- le satellite est donc toujours à la verticale du même point (il est vu comme un point fixe dans le ciel)



Orbites des satellites

- LEO (Low Earth Orbit): polar or non polar
- orbite circulaire inclinée par rapport au plan équatorial
 - 📖 angle = 90° (polaire)
 - 📖 angle $\neq 90^\circ$ (non polaire)
- altitude: env. 1000 km
- durée de révolution: env. 1h30
- pour une couverture globale dans le temps et l'espace: plusieurs dizaines (50-100) satellites



Orbites des satellites

- MEO (Medium Earth Orbit): orbite circulaire, polaire ou pas
- altitude: env. 10 000 km
- durée de révolution:
- pour une couverture globale dans le temps et l'espace: 10 à 15 satellites



Orbites des satellites

- HEO (Highly Elliptical Orbit)
- orbite elliptique
 - périgée: 550km
 - apogée: 40 000km
- inclinée par rapport au plan équatorial d'un angle de 64°
- le satellite reste assez longtemps au voisinage de l'apogée => zone bien couverte
- durées de révolution sous multiples de 24h



avantages/inconvénients des différentes orbites

- zone à couvrir
- latitude
- nombres de satellites
- délais de propagation
- interférences (orbite géostationnaire encombrée...)
- performances du lanceur (altitude vs masse du satellite)

Bilan de liaison





Bilan de liaison: rappel (1)

- Rappel de l'équation de Friis

- $P_r = P_e \cdot (\lambda / (4 \pi r))^2 \cdot G_e \cdot G_r$

- P_r : puissance récepteur

- P_e : puissance émetteur

- λ : longueur d'onde

- r : distance E/R

- G_e : gain de l'émetteur

- G_r : gain du récepteur



Bilan de liaison: rappel (2)

- Antennes isotropes
 - $G_e = G_r = 1$
 - $P_r = P_e \cdot (\lambda / (4 \pi r))^2$
- Exercice
 - Quelle est la densité surfacique de puissance rayonnée à distance r de l'E?
 - Sur quelle « surface équivalente » une antenne isotrope peut-elle capter de l'énergie?



Bilan de liaison: rappel (2 ')

- $P_r = P_e \cdot (\lambda / (4 \pi r))^2$
- Densité surfacique de puissance rayonnée à distance r de l'E:
 - $D_s = P_e / (4 \pi r^2)$
- « surface équivalente »:
 - $\lambda^2 / 4 \pi$

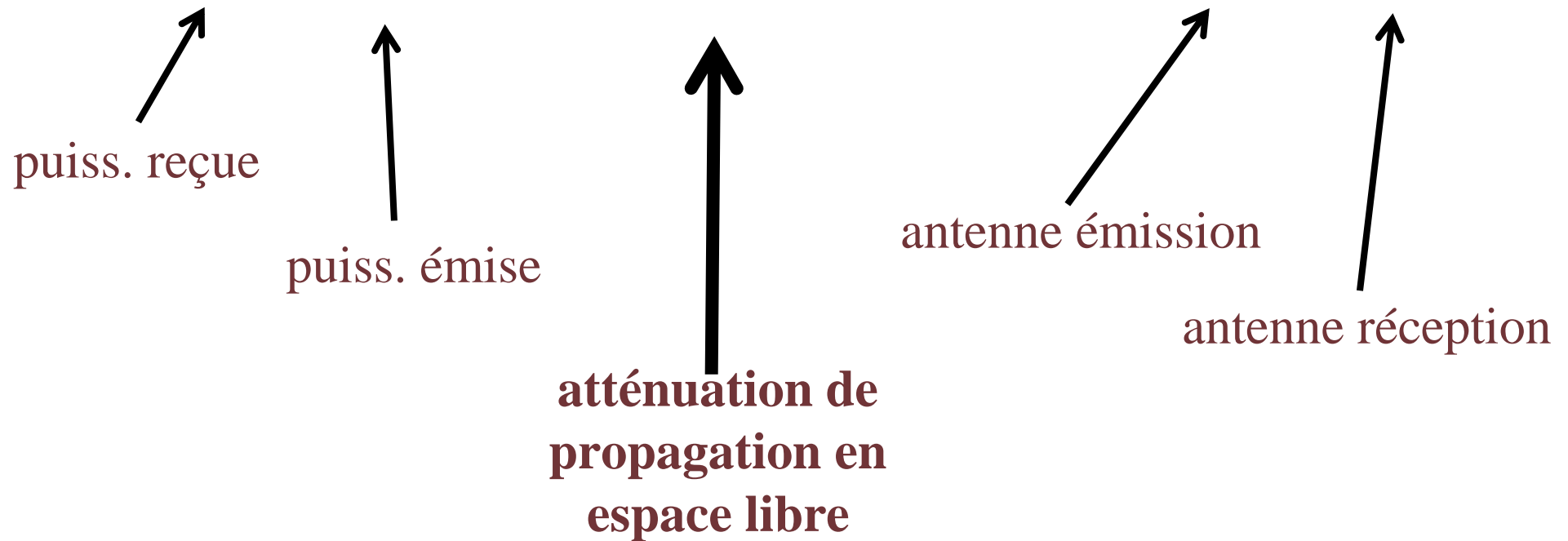


Bilan de liaison: rappel (3)

- Les formules précédentes sont en W et multiples
- Si on veut passer en dB et dBm, la formule devient:
- $$Pr = Pe + Ge + Gr - 20 \log r + 20 \log \lambda - 20 \log (4\pi)$$
 - A fréquence fixe: $20 \log \lambda - 20 \log (4\pi) = Cte$
 - Pe, Pr en dBm
 - Ge, Gr en dBi

Atténuation de propagation

- Autre écriture:
- $P_r = P_e + 20 \log (\lambda / (4 \pi r)) + G_e + G_r$





Atténuation de propagation

- Toutes choses étant égales par ailleurs,
- Atténuation de propagation est une fonction de λ / r :
 - elle est d'autant plus grande que la distance E/R augmente (!)
 - pour une distance fixée, elle varie inversement comme la longueur d'onde
 - NB: physiquement, le facteur λ ne vient pas de la diffusion de l'énergie, mais du fait qu'une antenne de réception « collecte » de l'énergie sur une surface de l'ordre de λ^2 .



Atténuation d'espace libre

- Exercice : calculer l'atténuation d'espace libre:

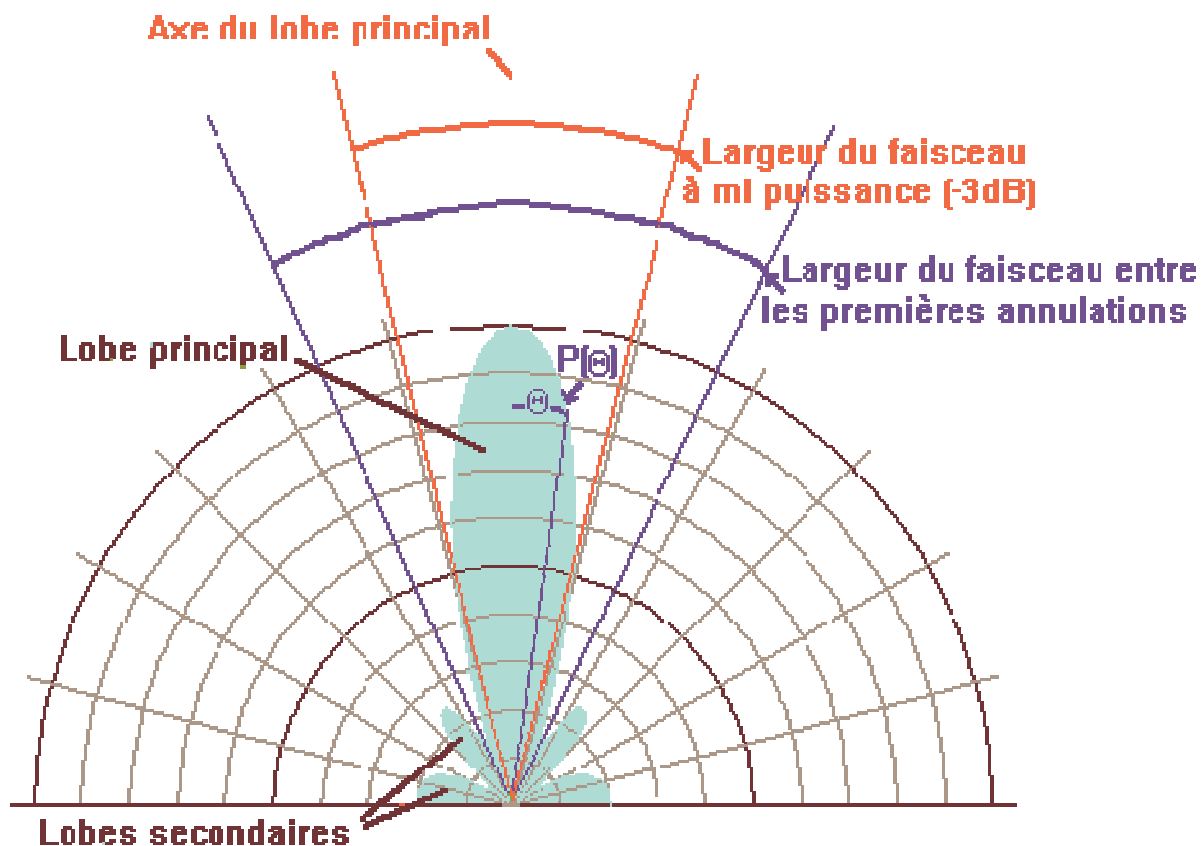
	6 GHz	12 GHz	30 GHz
1000 km			
10 000 km			
36 000 km			



Gain des antennes

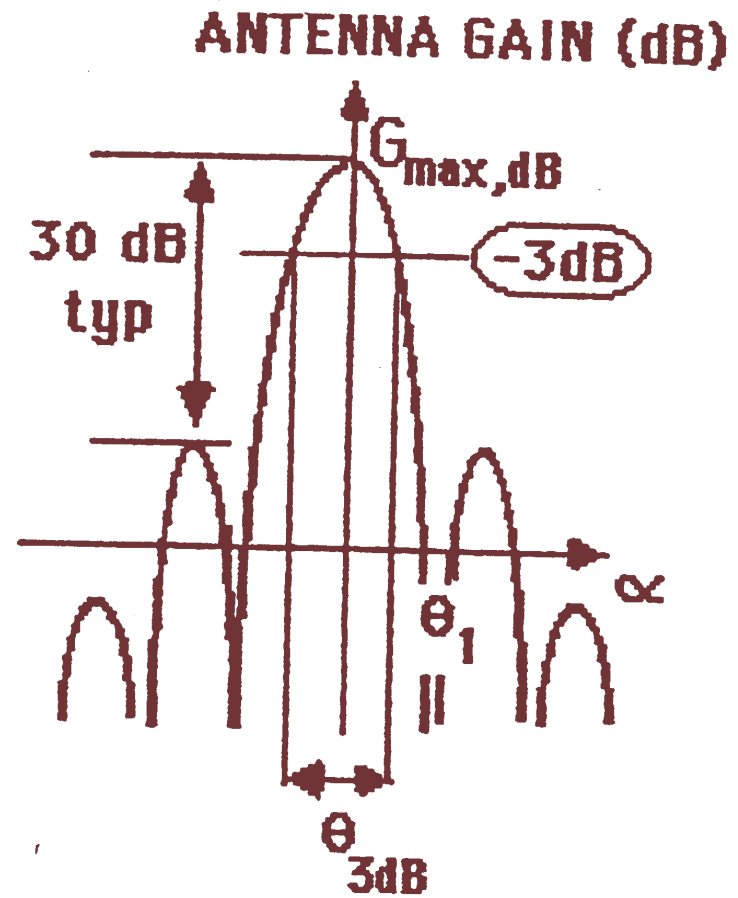
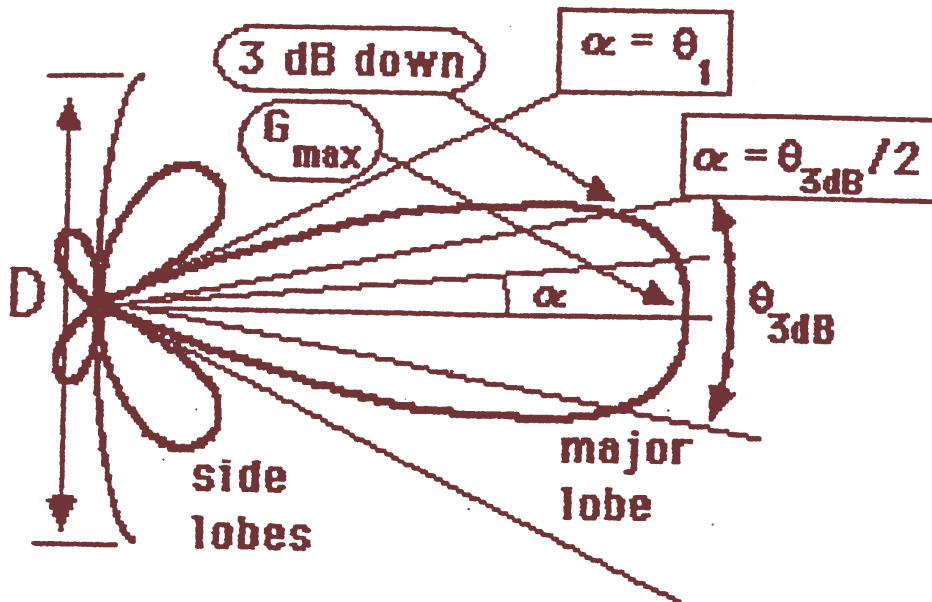
- Rappel: le gain d'une antenne est
 - le Rapport entre la Puissance qu'il faudrait fournir à une antenne de référence (dans la suite isotrope)
 - et celle qu'il suffit de fournir à l'antenne considérée pour produire la même intensité de rayonnement
 - dans une direction donnée (dans la suite, direction de rayonnement max)

Diagramme de rayonnement



- l'ouverture d'une antenne
- est la mesure de l'angle dans lequel la puissance rayonnée dans une direction
- est au moins égale à la moitié de la puissance rayonnée dans la direction de gain maximal

Gain des antennes





Antennes

- Les formules suivantes s'appliquent aux antennes paraboliques:
 - $G = \eta (\pi D / \lambda)^2$
 - $\theta_{3dB} = 70 \cdot \lambda / D$ (degrés)
- $\eta = 0,6$

Gain des antennes

Fréq.	λ	Diamètre			
		1m		4m	
		G	θ_{3dB}	G	θ_{3dB}
6 GHz					
12 GHz					
30 GHz					



Modulation

- Rappel les performances des modulations (ie le taux d'erreur binaire) sont fonction du rapport entre le signal reçu et le bruit.



Modulation

- Plus précisément, on appelle:
 - S: la puissance du signal (en W)
 - B la bande passante du signal (en Hz)
 - D: le débit symbole (en baud)
 - m: le nombre d'états de la modulation
 - E_b : énergie bit (en J)
 - » $E_b = S / D \ln 2 = S / (D \cdot \log_2 m)$



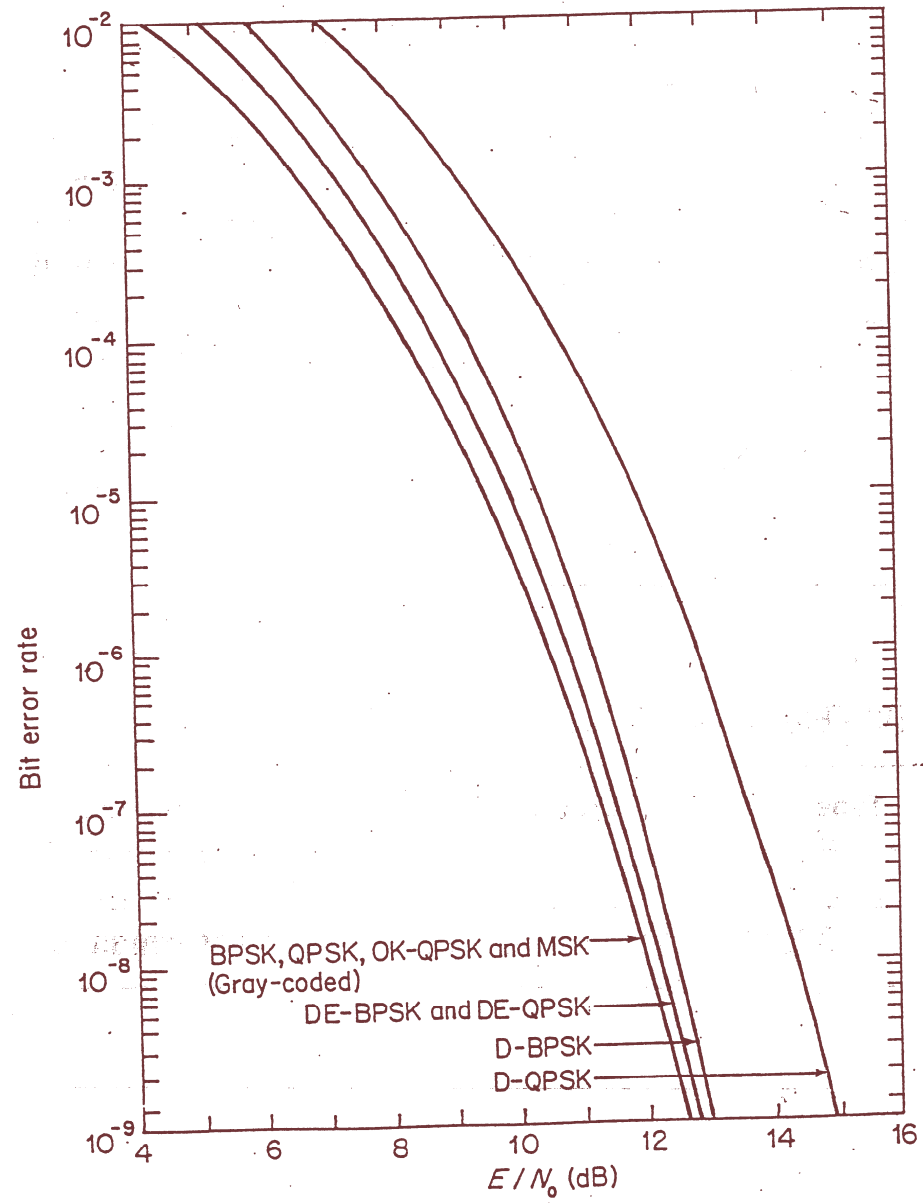
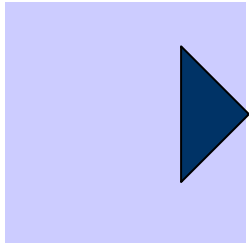
Modulation

- N_0 : la densité spectrale du bruit (en W/Hz)
 - » $N_0 = kT$
- N : la puissance du bruit dans la bande du signal (en W)
 - » $N = N_0 \cdot B$
- on considère qu'il existe un filtre adapté à la bande passante du signal



Modulation

- On montre que:
- les performances d'une modulation s'expriment comme une fonction de:
 - E_b/N_0





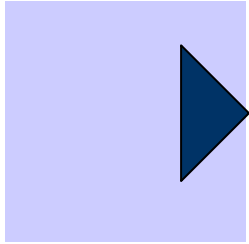
Bilan de liaison

- Hypothèses:
 - satellite géostationnaire (à la « verticale »)
 - fréquence : 6 GHz / 4 GHz
 - Antennes
 - sol: 50 dB
 - satellite: 15 dB
 - P_e : 1 kW
 - modulation : BPSK
 - TEB souhaité: 10^{-5}



Bilan de liaison

- Hypothèses:
 - $D = 25 \text{ Mbit/s}$; $B_p = 36 \text{ MHz}$
 - le bruit en réception est un bruit thermique à 290K (hypothèse ultra-simplificatrice, toutes les composantes de la chaîne de transmission contribuent au bruit)
 - $E_b = P / D$
 - $N_0 = kT = 4 \cdot 10^{-21} \text{ SI}$

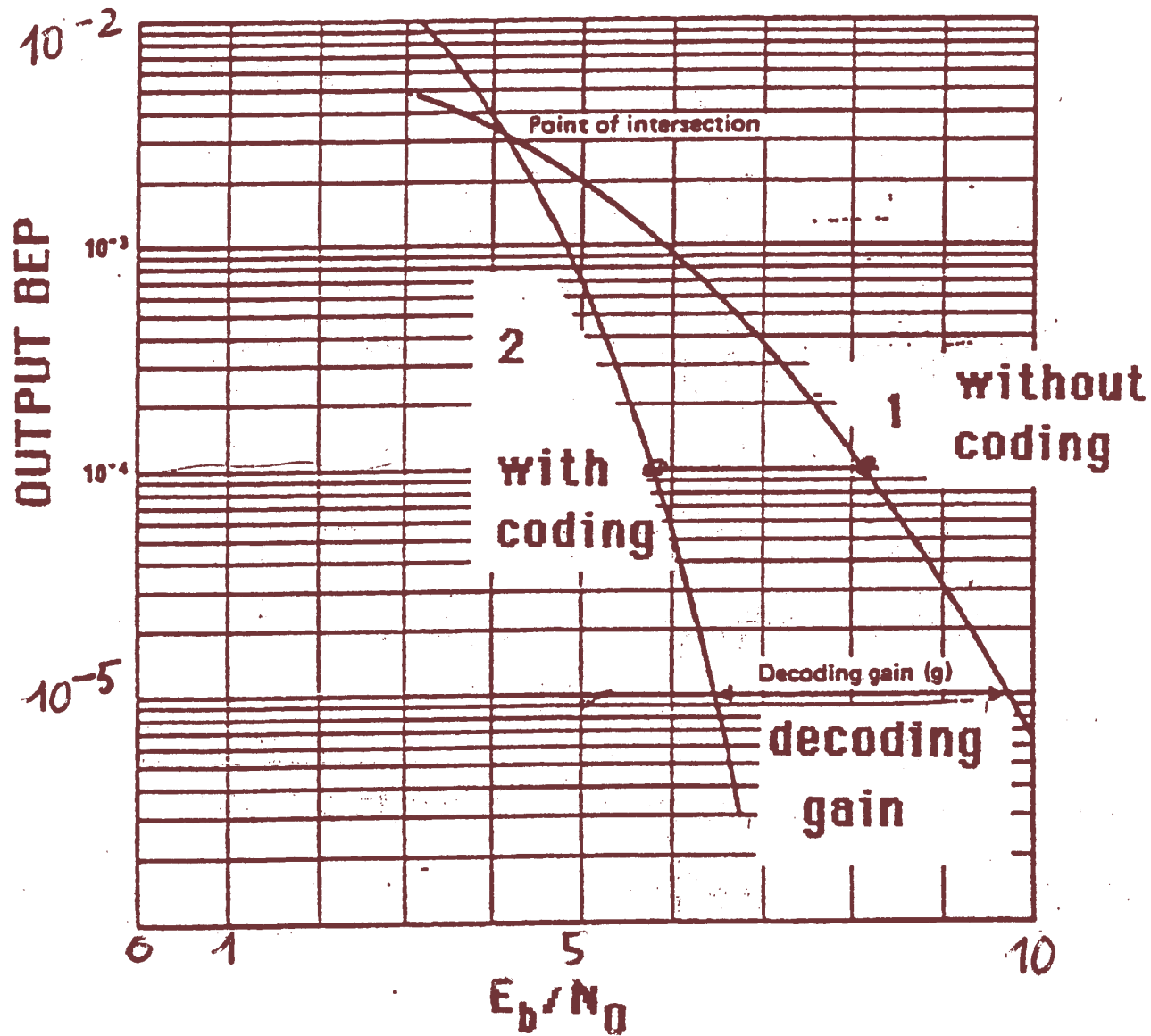
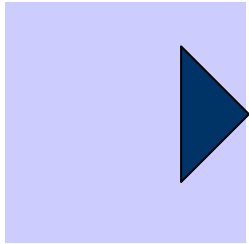


Uplink	Pe_u	
	Ge_u	
	Gr_u	
	Att. propag	
	Marge	3 dB
	Pr_u	
Satellite	Ampli sat.	126 dB
Downlink	Pe_d	
	Ge_d	
	Gr_d	
	Att. propag	
	Marge	3 dB
	Pr_d	
	$Eb/N0$	



Code correcteur

- Pour un $TEB = 10^{-5}$, les performances en E_b/N_0 requises sont:
 - 9,6dB => OK
- On peut améliorer les performances de la liaison en utilisant un code correcteur d'erreur (code convolutif).
- Mais pour une BP fixée (36MHz correspondant à un répondeur), le débit utile diminue (avec le code).





Gain de codage

Taux de codage	E_b/N_0 pour $TEB = 10^{-5}$	Gain de codage
1	9,6 dB	0 dB
7/8	7,6 dB	2 dB
3/4	5,8 dB	3,8 dB
2/3	5,3 dB	4,3 dB
1/2	4,9 dB	4,7 dB

La couche MAC (Medium Access Control)





Partage du canal

- Nous avons vu que les transmissions par satellites peuvent être:
 - point-à-point
 - point-à-multipoint
 - multipoint-à-multipoint
- Cela implique en général de partager une ressource (la charge utile du satellite: ie le répéteur du satellite)



Partage du canal

- Deux types de partages existent:
 - allocation statique (le partage du canal entre les stations ne dépend pas du temps)
 - allocation dynamique (le partage du canal entre les stations dépend du temps)
 - 📅 avec réservation (DAMA : Demand Assignment Multiple Access)
 - 📅 avec accès aléatoire



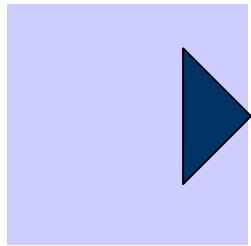
Partage du canal

- Le choix de la méthode d'accès au canal (= méthode de partage du canal) dépend:
 - du taux de connexion = nombre de fois où une station a besoin de connecter
 - du taux d'activité = lorsqu'elle est connectée, une station doit-elle passer beaucoup d'informations (= rester connectée longtemps)



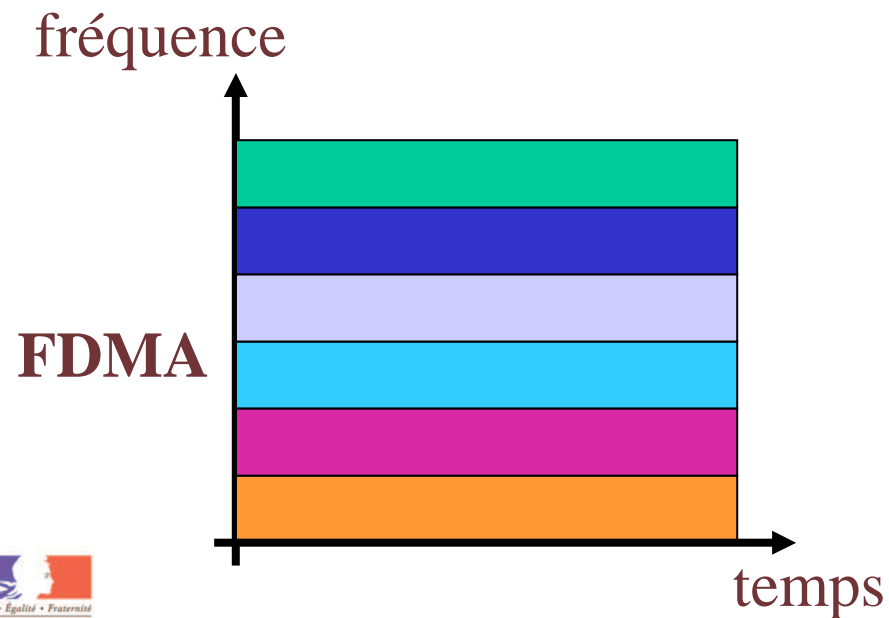
Partage du canal

- Lorsque le taux de connexion est élevé, on préfère de allocations statiques:
 - TDMA (Time Division Multiple Access) ou AMRT (Accès Multiple à Répartition Temporelle)
 - FDMA (Frequency ...) ou AMRF
 - CDMA (Code...)
- Dans cas contraire, les allocations dynamiques
 - à la demande
 - avec accès aléatoire (ALOHA,...)



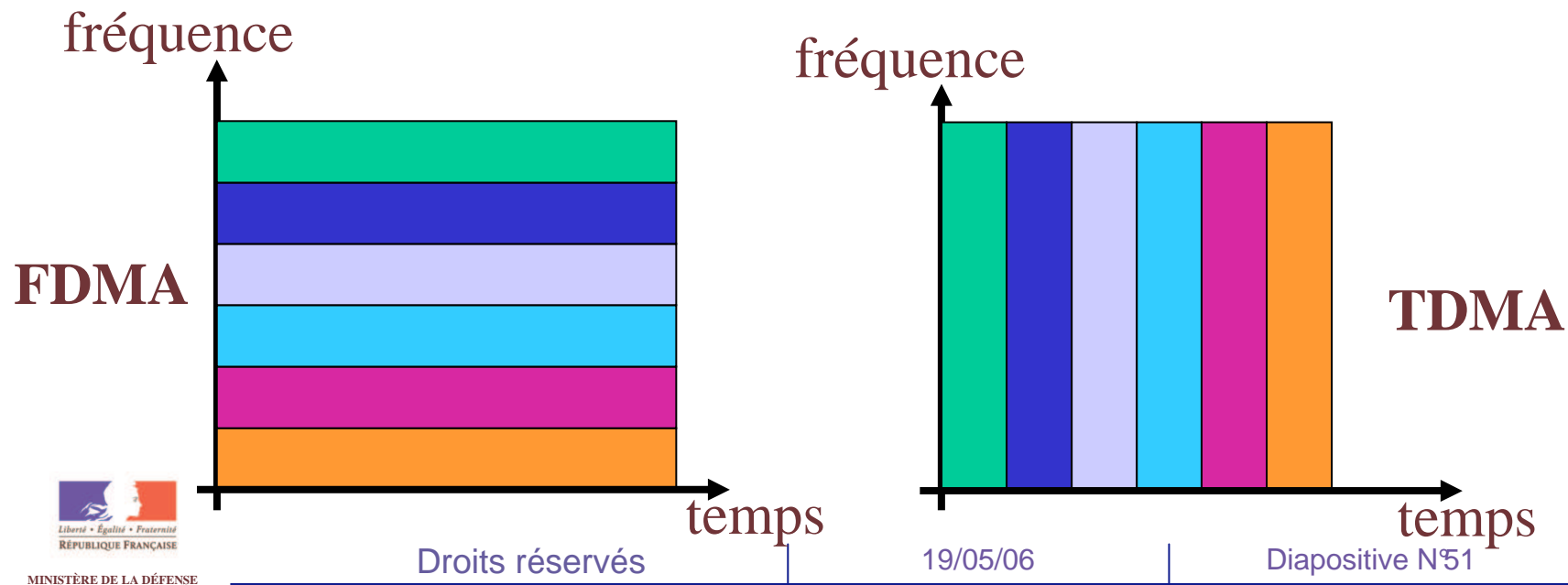
FDMA

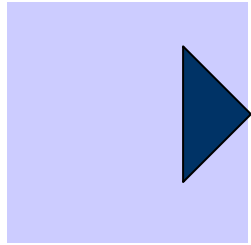
- La bande passante du répéteur est divisée en canaux, à chaque canal est associé un utilisateur



▶ TDMA

- Toute la bande passante du répéteur est affectée à chaque utilisateur à tour de rôle pendant un intervalle de temps donné (slot)





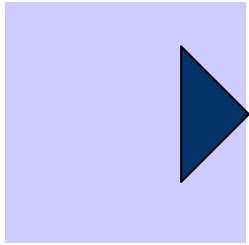
CDMA

- chaque utilisateur est caractérisé par un code
 - un code est une suite de 1 et de -1
 - ex: 2 utilisateurs (+1,+1) et (+1,-1)
 - longueur est la longueur de la suite
 - en général, les codes ont des longueurs typiques de 100 à 1000
 - les codes correspondant à 2 utilisateurs sont orthogonaux

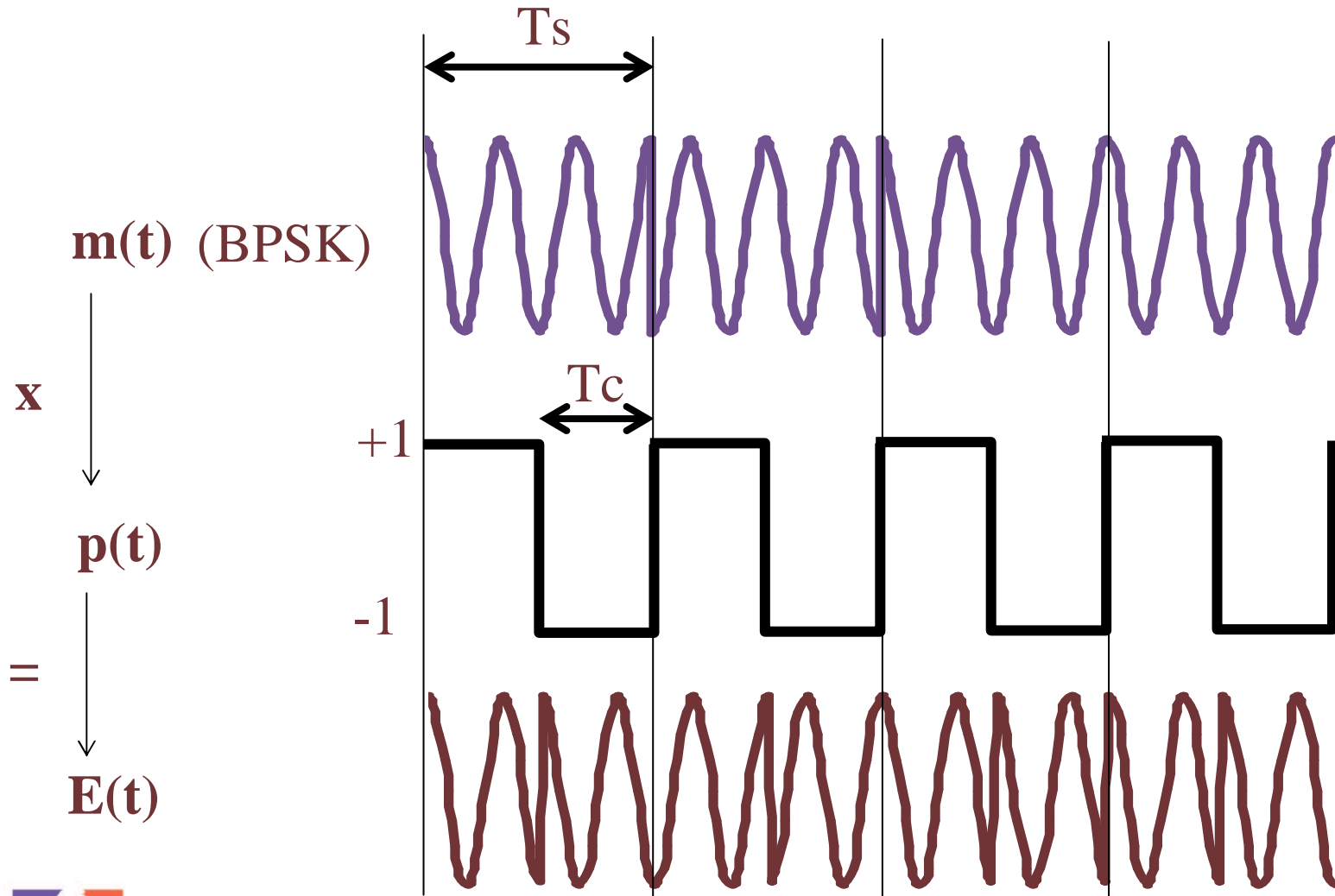
A light blue square with a dark blue triangle pointing to the right, positioned to the left of the text 'CDMA'.

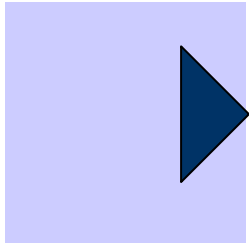
CDMA

- chaque temps symbole est divisé en L « chips », où L est la longueur du code
 - T_s : temps symbole
 - T_c : temps chip
 - $T_c = T_s / L$
- A l'émission, le signal modulé est « multiplié » par un signal NRZ correspondant au code

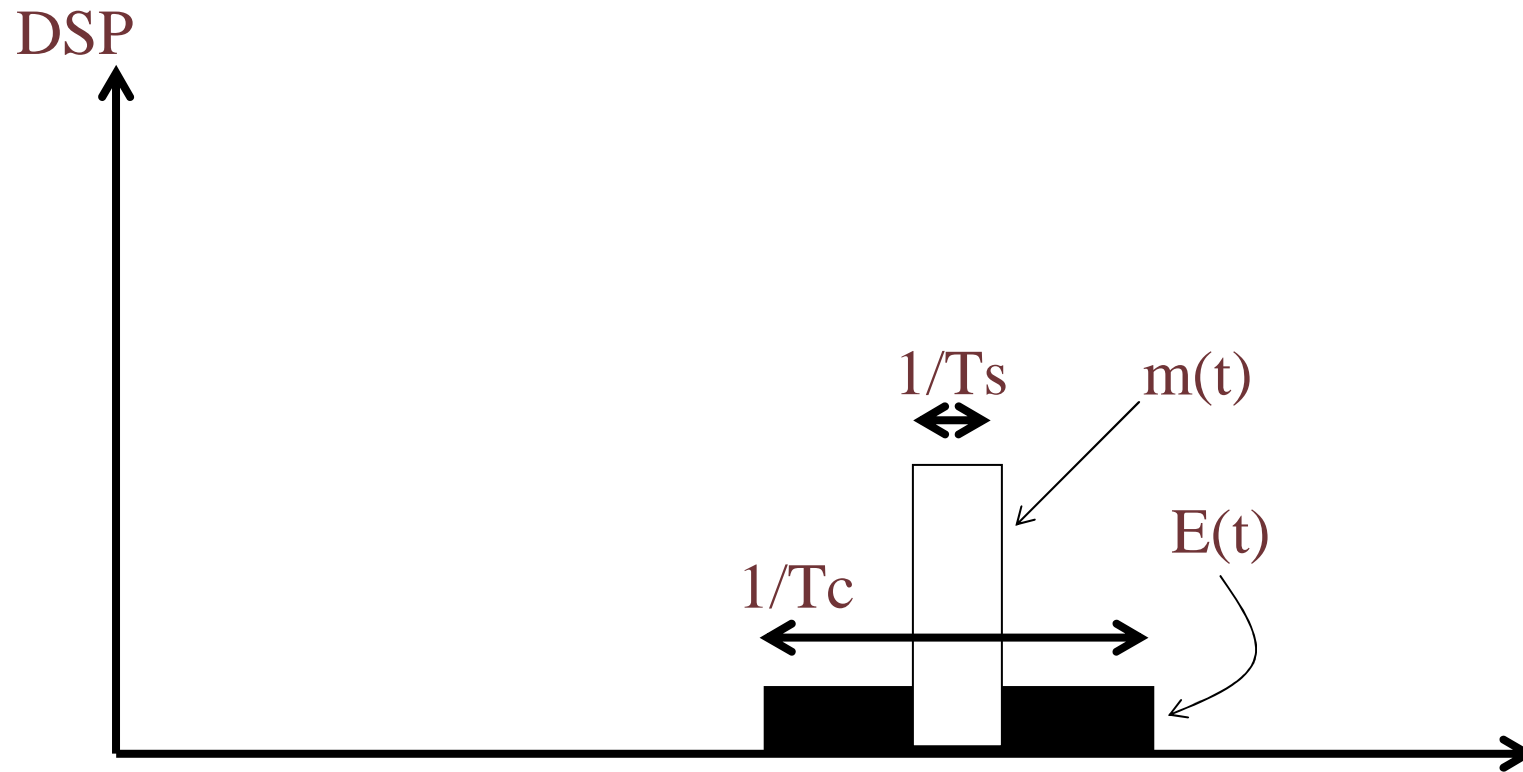


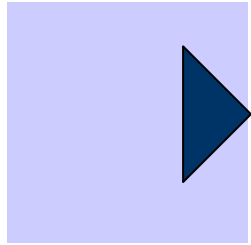
CDMA





CDMA





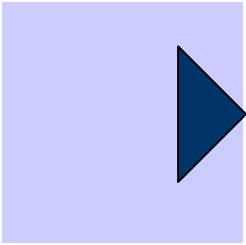
CDMA

- A la réception (on suppose ici le canal parfait, pour simplifier)
 - $R(t) \sim E(t)$
 - $R(t) \times p(t) = m(t) \times (p(t))^2 = m(t)$
 - donc, en multipliant le signal reçu par la séquence d'étalement, on retrouve le signal modulé
 - il « ne reste donc plus » qu'une démodulation à faire

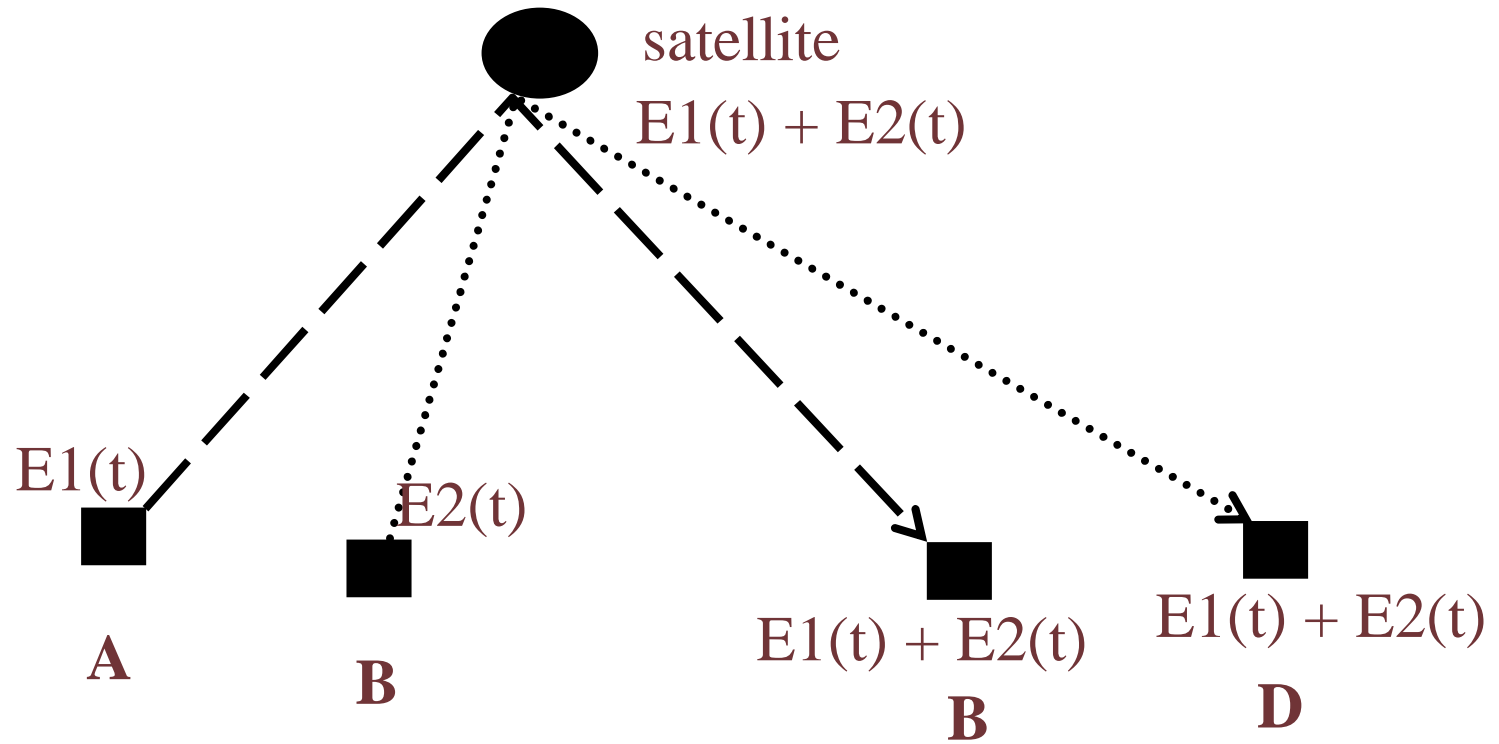
A light blue square with a dark blue triangle pointing right, partially overlapping the text 'CDMA'.

CDMA

- Si on a 2 utilisateurs
- $m_1(t)$, $m_2(t)$
- $p_1(t)$, $p_2(t)$ (p1, p2, ortho)
- $E_1(t) = m_1(t) \times p_1(t)$
- $E_2(t) = m_2(t) \times p_2(t)$
- le signal reçu par le répéteur du satellite est $E_1(t) + E_2(t)$
- En réception, on reçoit $R(t) \sim E_1(t) + E_2(t)$



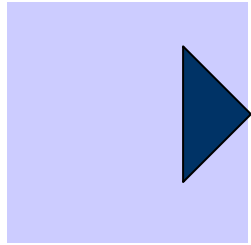
CDMA





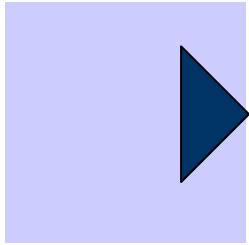
CDMA

- Au niveau de C, on veut retrouver $m_1(t)$
- $$\begin{aligned} R(t) \times p_1(t) &= (E_1(t) + E_2(t)) \times p_1(t) \\ &= (m_1(t) \times p_1(t) + m_2(t) \times p_2(t)) \times p_1(t) \\ &= m_1(t) \times (p_1(t))^2 + 0 \quad (p_1 \text{ et } p_2 \text{ ortho}) \\ &= m_1(t) \end{aligned}$$

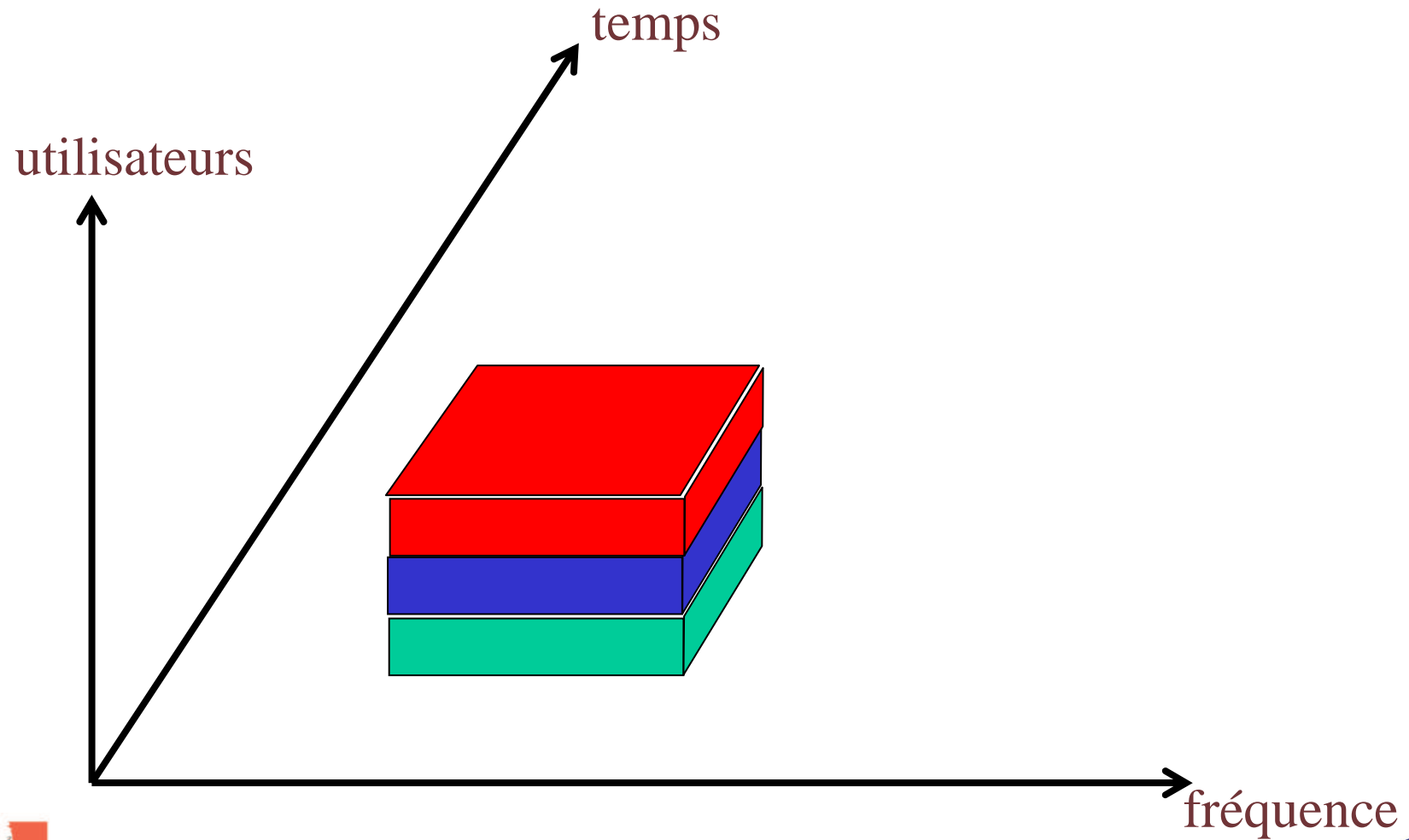


CDMA

- Comme les codes sont orthogonaux, on peut « superposer » plusieurs utilisateurs dans la même bande de fréquence et au même instant
- Cette technique est aussi utilisée dans l'UMTS



CDMA





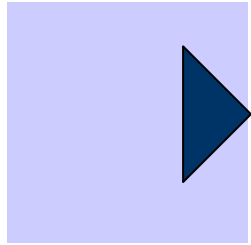
Accès statique

- Inconvénient:
 - pas efficace: si le canal n'est pas utilisé, la ressource est perdue pour tout le monde
 - nécessite une planification à l'avance



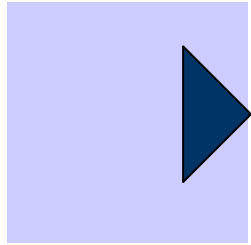
DAMA (Demand Assignment Multiple Access): « à la demande »

- Une station qui souhaite utiliser le canal émet une requête sur un canal particulier qui relie toutes les stations à un système de gestion central
- le système de gestion alloue un sous canal à la station (sous bande du répéteur, ou créneau temporel)
- la station libère le sous canal lorsqu'elle ne l'utilise plus



DAMA

- Le système DAMA:
 - permet de réserver un canal
 - nécessite en général un canal de signalisation (pour effectuer la réservation du canal pour la transmission des données)



DAMA

- Le canal (le répéteur) est partagé entre les utilisateurs ayant fait une demande en utilisant les mêmes techniques (FDMA, TDMA, CDMA) que l'accès statique
- mais l'association utilisateur <-> sous canal est dynamique
- => meilleure efficacité du système que avec un accès statique



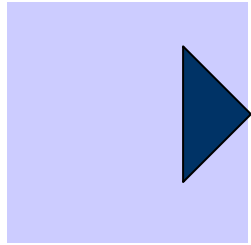
Exemple: SPADE

- Single channel per carrier PCM multiple Access Demand assignment Equipment)
- utilisé sur les premiers satellites INTELSAT
- 794 canaux de téléphonie simplex à 64 kbit/s + 1 canal de signalisation à 128 kbit/s



Exemple: SPADE

- Voie de signalisation:
 - découpée en 50 slots de 1ms (1 slot = 128 bit)
 - chaque slot affecté à 1 station (... donc 50 stations au total)
 - la station choisit un canal libre au hasard et inscrit le n° de ce canal dans son slot
 - ...



Exemple: SPADE

- Voie de signalisation:
 - si le canal est encore libre lorsque le slot de signalisation est reçu sur le downlink, il est considéré comme attribué
 - si plusieurs stations demandent le même canal dans la même trame, collision => nouvel essai ultérieur
 - pour libérer le canal, message dans son slot de signalisation



Exemple: SPADE

- voie duplex obtenue de façon analogue



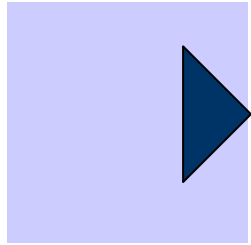
Exemple: SPADE

- voies de communication
 - 794 canaux FDMA
 - par canal:
 - 📄 bande passante: 38 kHz
 - 📄 espacement entre canaux: 45 kHz
 - 📄 stabilité: +- 2 kHz
 - 📄 modulation: QPSK
 - 📄 capacité: 64 kbit/s
 - 📄 max BER: 10^{-4}



Exemple: SPADE

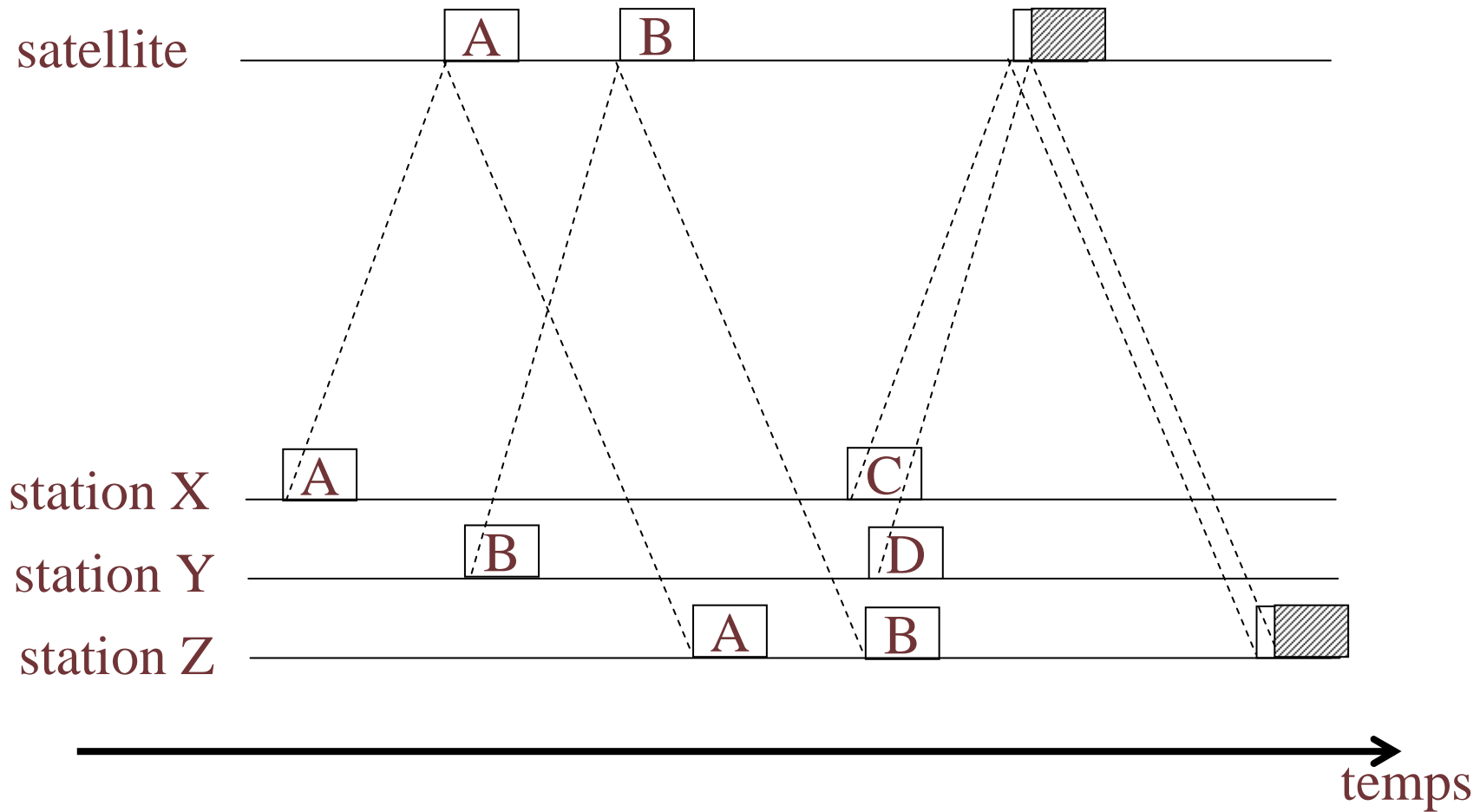
- voie de signalisation
 - 📄 type d'accès: TDMA
 - 📄 capacité: 128 kbit/s
 - 📄 modulation: BPSK
 - 📄 max BER: 10^{-7}

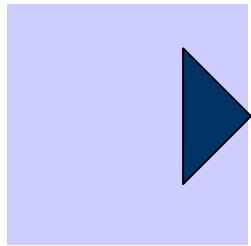


ALOHA

- Rappel: le protocole ALOHA a été conçu au départ pour les satellites (cf cours Ethernet)

ALOHA: détection des collisions





CSMA

- Pourquoi n'utilise-t'on pas le CSMA dans les télécommunications par satellites?



Conclusion

- Télécommunications par satellites se sont développées dans les années 60
- Elles ont connu un regain d'intérêt dans les années 90 avec le développement de systèmes LEO / MEO (Irridium, Globalstar,...)
- Même si l'avenir de ces systèmes reste incertain, les satellites telecom (GEO) ont encore un bel avenir



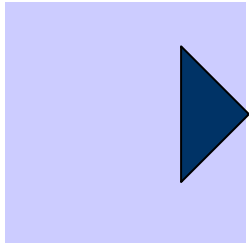
Atténuation d'espace libre

- Atténuation d'espace libre:

	6 GHz	12 GHz	30 GHz
1000 km	168	174	182
10 000 km	188	194	202
36 000 km	199	205	213

Gain des antennes

Fréq.	λ	Diamètre			
		1m		4m	
		G	θ_{3dB}	G	θ_{3dB}
6 GHz	5 cm	34	3,5	46	1
12 GHz	2,5cm	40	2	52	0,4
30 GHz	1 cm	48	0,7	60	0,2



Uplink	Pe_u	60 dBm
	Ge_u	50 dB
	Gr_u	15 dB
	Att. propag	-199 dB
	Marge	3 dB
	Pr_u	-77 dBm
Satellite	Ampli sat.	126 dB
Downlink	Pe_d	49 dBm
	Ge_d	15 dB
	Gr_d	50 dB
	Att. propag	-196 dB
	Marge	3 dB
	Pr_d	-85 dBm
	$Eb/N0$	15 dB



Calcul de Eb/N0

- $10 \log (E_b / N_0) =$
= $10 \log (P_W / D_{bin} / N_0)$
= $10 \log (10^{-3} P_{mW} / D_{bin} / N_0)$
= $-30 - 85 - 10 \log (25 \cdot 10^6) - 10 \log (4 \cdot 10^{-21})$
= $-30 - 85 - 60 + 210 - 10 \log 100$
= $-175 + 210 - 20$
= 15 dB