
Introduction aux réseaux cellulaires

Techniques d'accès et de partage de la ressource radio

Systemes de Télécommunications Numériques Systemes et Réseaux de Communication SRC - 2013

Georges Rodriguez
Dépt. COMELEC Pièce A311

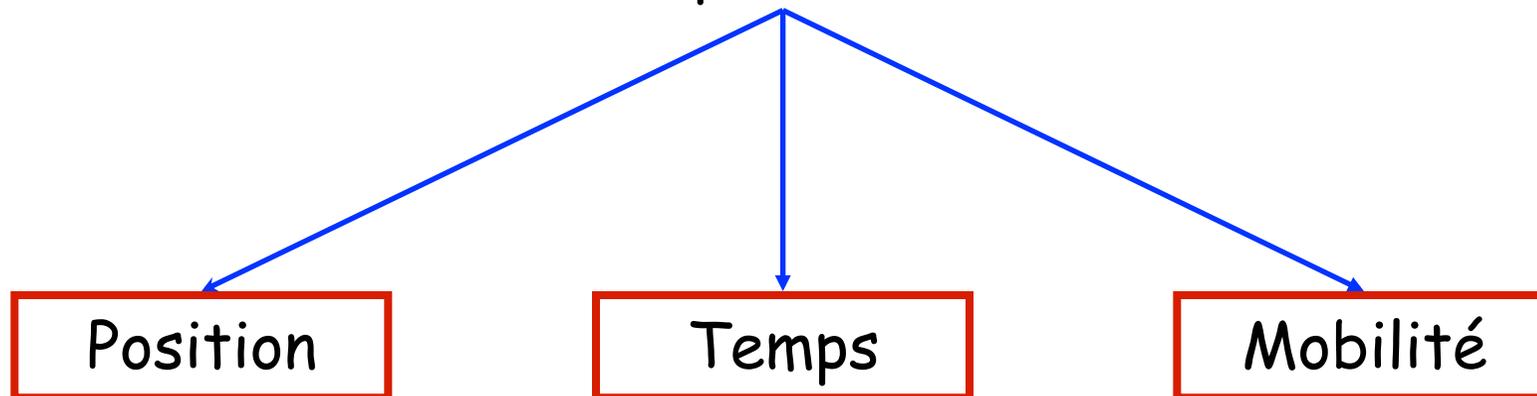
☎ : 01 45 81 73 97

✉ : rodriguez@telecom-paristech.fr

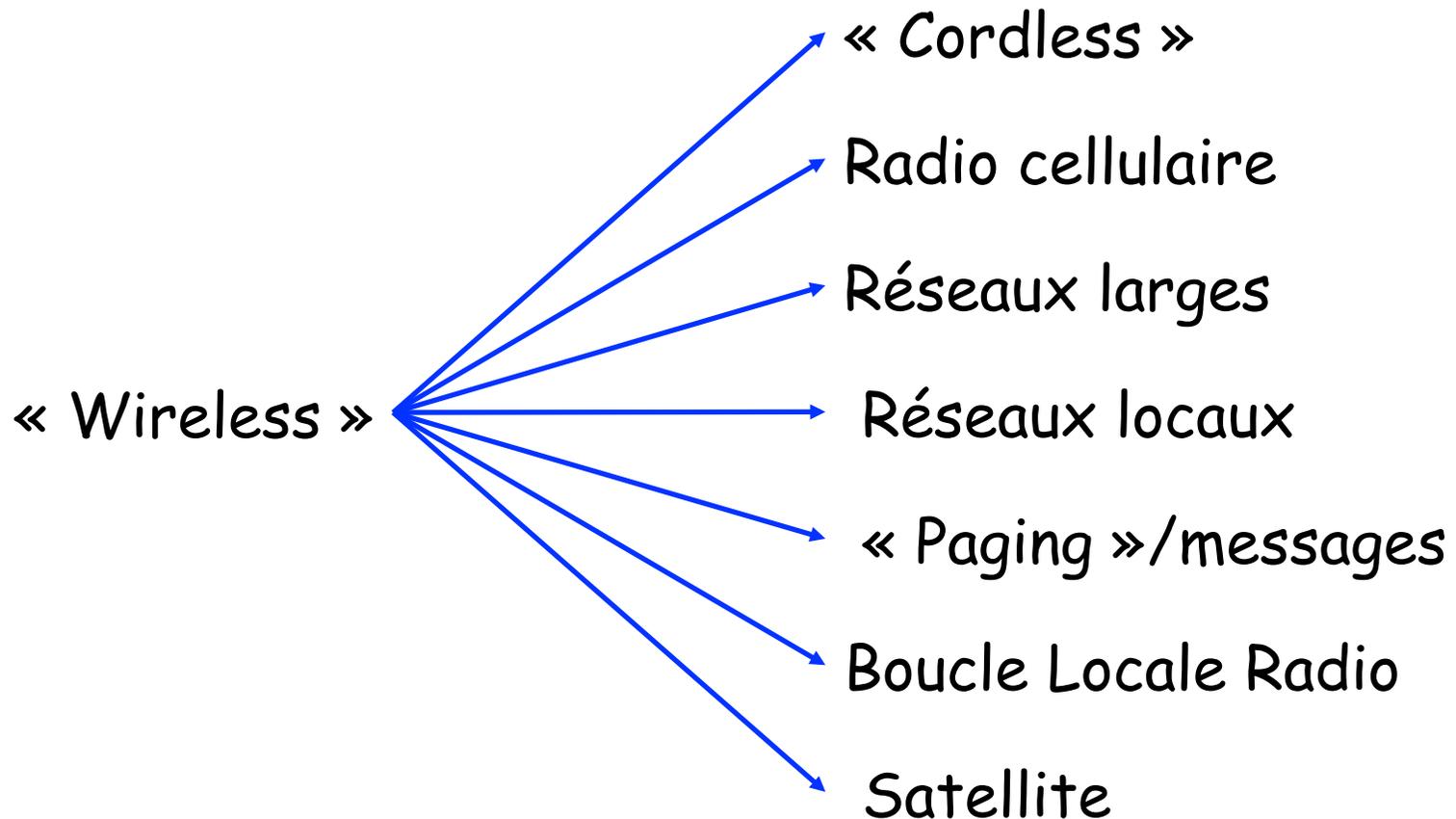
Les systèmes de communication sans fil

Caractéristique fondamentale

Offrir des services de télécommunications indépendants :



Technologies, systèmes et services



Les objectifs du cours

- ✓ Comprendre les technologies
- ✓ Saisir les aspects socio-économiques du « wireless »
- ✓ Comprendre les techniques d'accès multiple
- ✓ Connaître les principaux systèmes

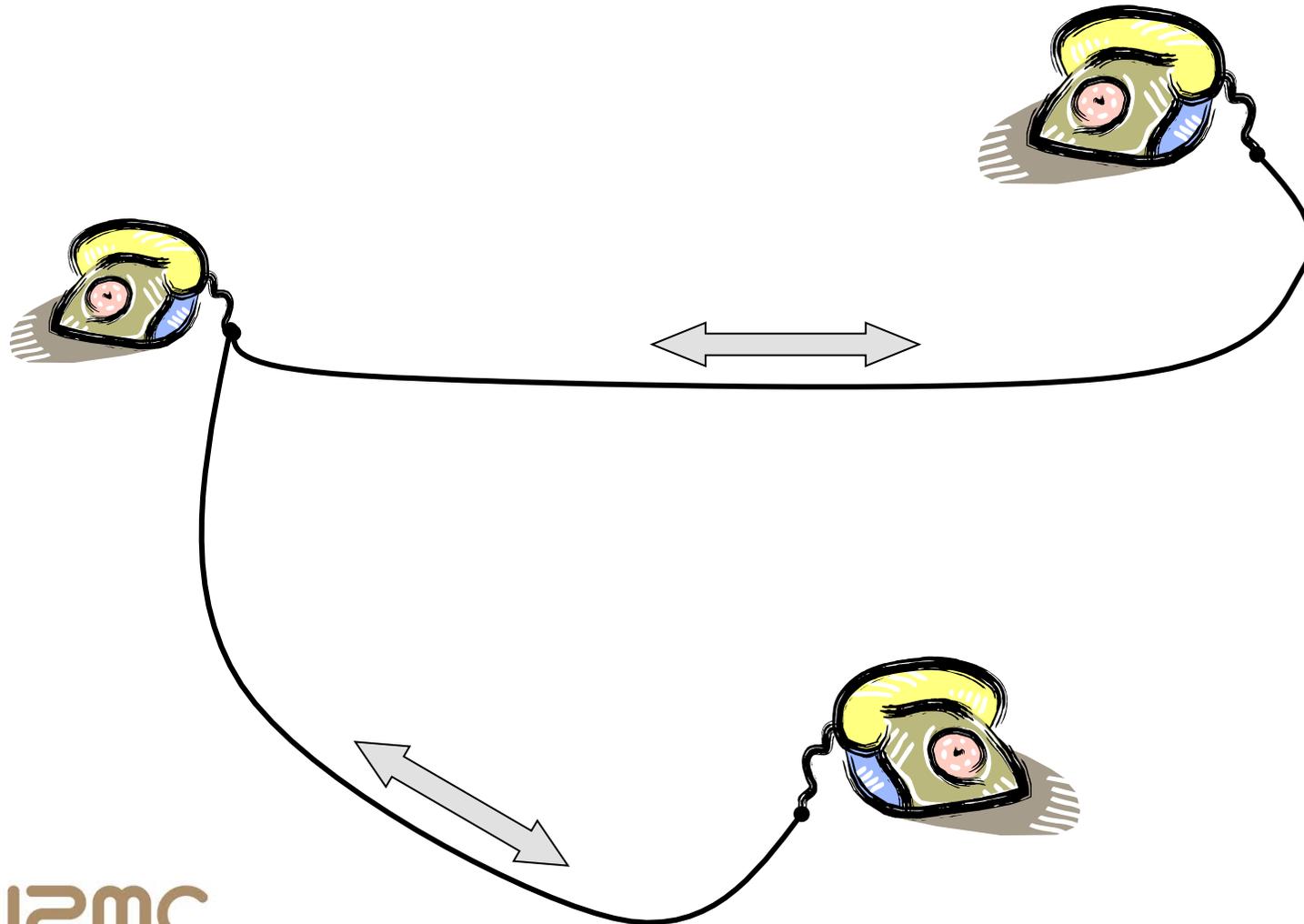
Plan

- I. Introduction - le RTC;
- II. Le duplex téléphonique;
- III. Capacité d'un réseau radio;
- IV. L'accès multiple;
- V. La technologie radio;

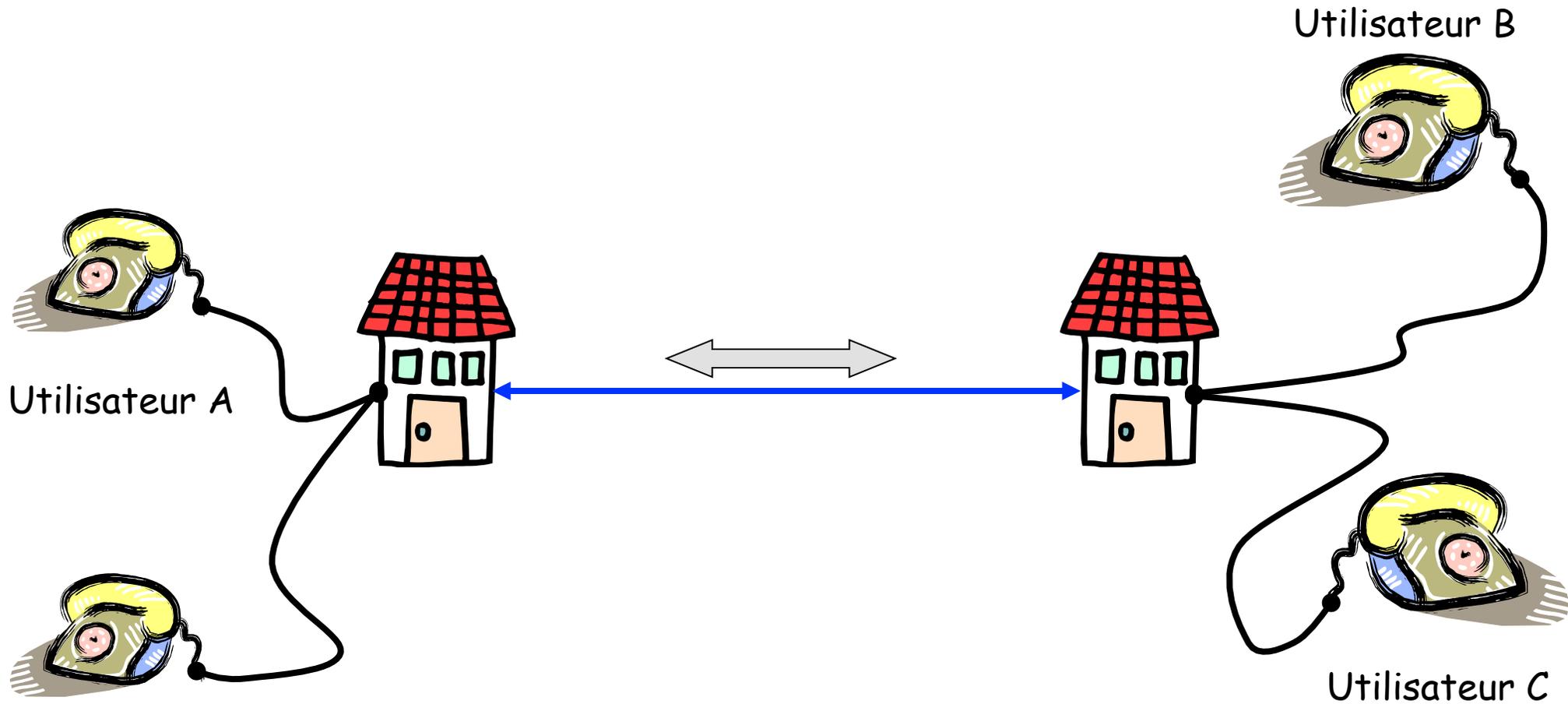
Plan

- I. Introduction - le RTC;
- II. Le duplex téléphonique;
- III. Capacité d'un réseau radio;
- IV. L'accès multiple;
- V. La technologie radio;

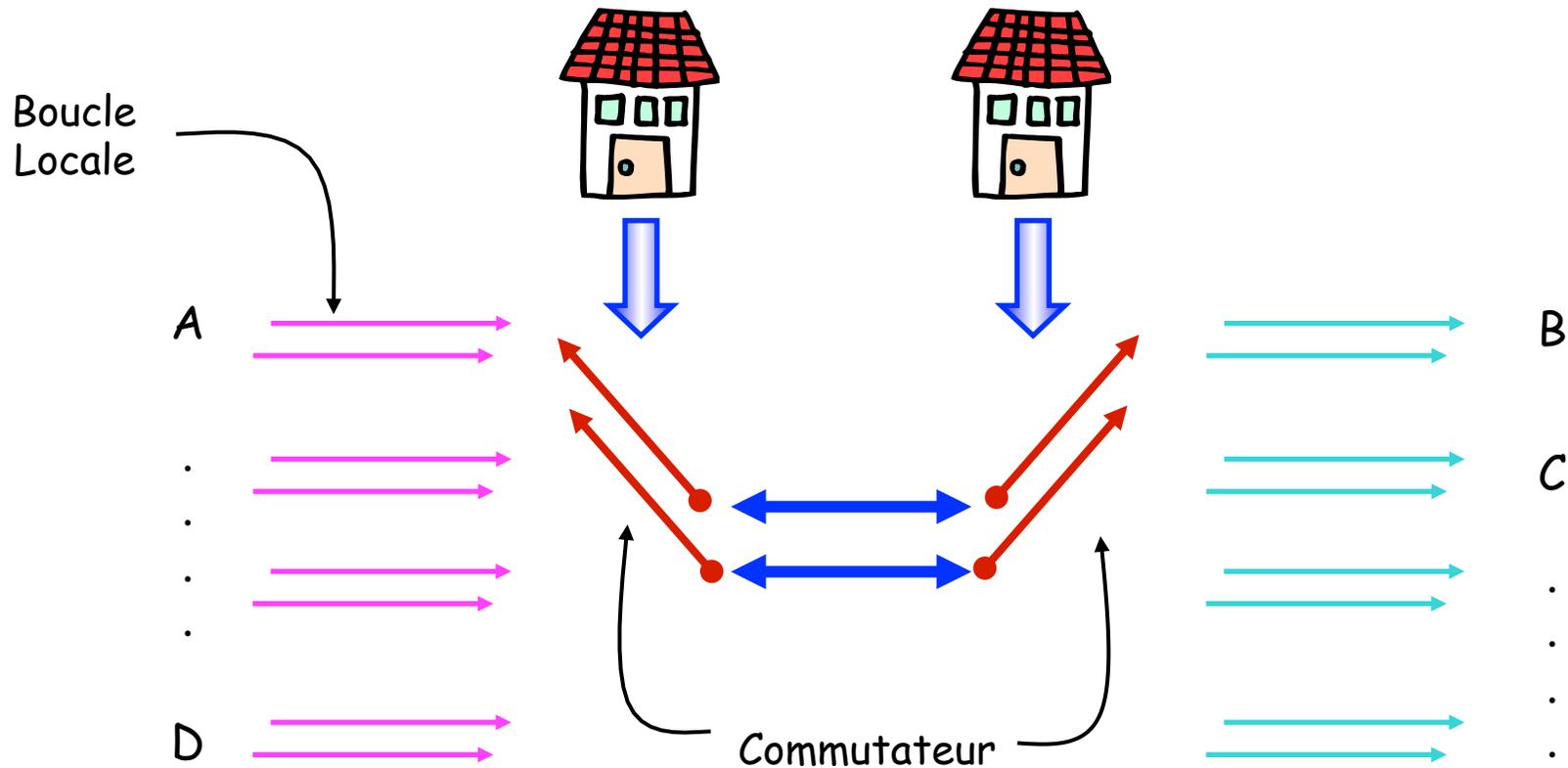
Le Réseau Téléphonique Commuté (PSTN)



Le Réseau Téléphonique Commuté (suite)

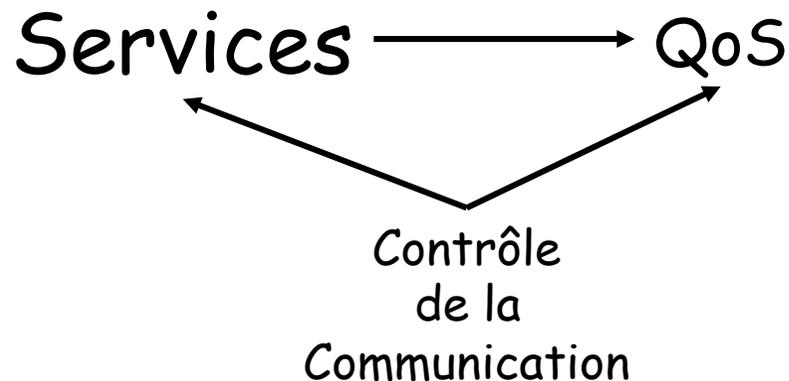


Le rôle du « switch »



Les caractéristiques des services du RTC

- ✓ Adressage → trouver la bonne connexion
- ✓ Identité → trouver le nom de l'abonné
- ✓ Bidirectionnalité → Garantir la voie d'aller et de retour
- ✓ Types de services → parole, données, signalisation



Les caractéristiques du RTC (suite)

- ✓ Adressage → Implicite à l'existence de la boucle locale
- ✓ Identité → Base de données dynamique
- ✓ Bidirectionnalité → superposition des deux signaux sur le même support de transmission
- ✓ Types de services → Limités par les caractéristiques de la paire torsadée

Comment résoudre ces problèmes dans le cas du « wireless » ?

Les caractéristiques du radio-mobile

Dans le cas du « wireless » :

1. Le canal matériel **n' existe pas** !
2. L' utilisateur **n' appartient pas** nécessairement au réseau de l' opérateur !
3. La superposition **ne garantie pas** la bidirectionnalité !
4. Les propriétés du canal **varient** dans le temps !
5. L' utilisateur du réseau **bouge** !!

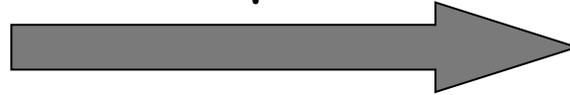
Plan

- I. Introduction - le RTC;
- II. Le duplex téléphonique;
- III. Capacité d'un réseau radio;
- IV. L'accès multiple;
- V. La technologie radio;

Le duplex téléphonique



Simplex



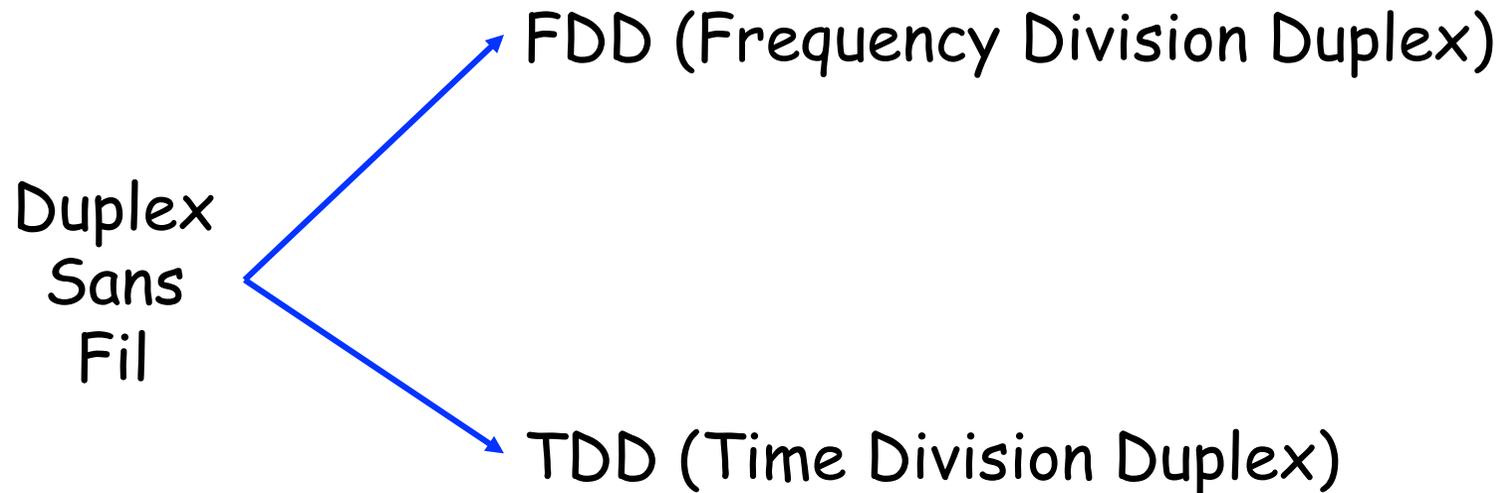
Half Duplex



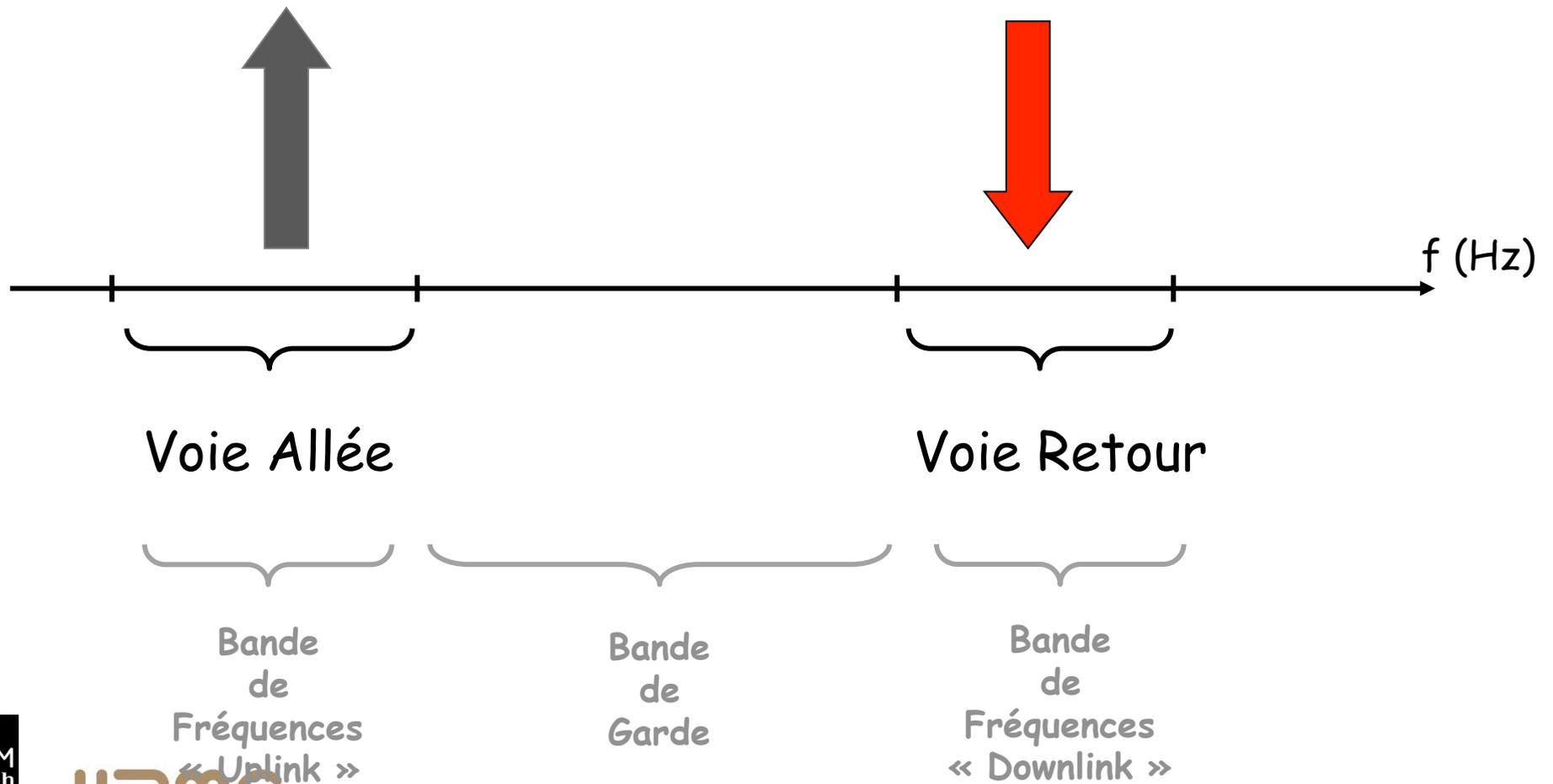
Full Duplex



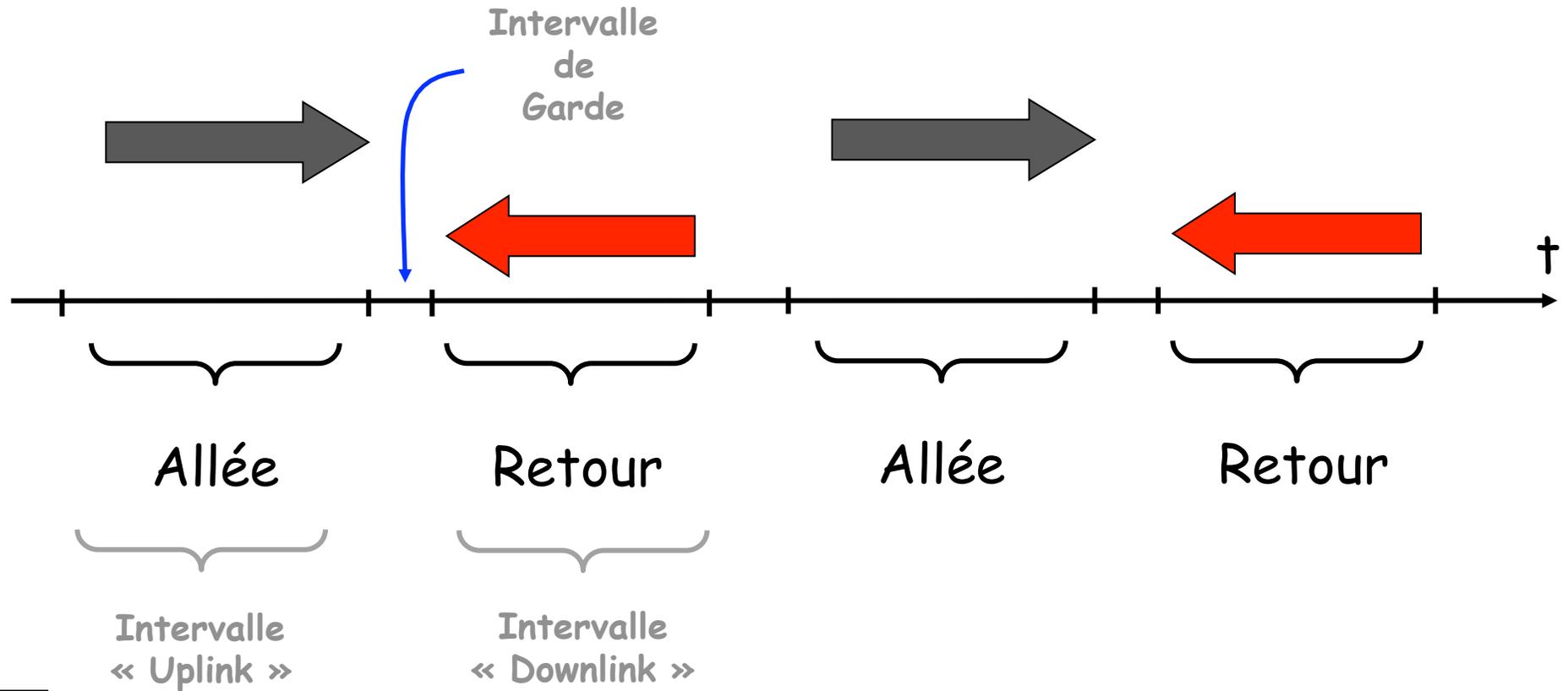
Le duplex pour le <<sans-fil>>



Le « FDD »



Le « TDD »



Plan

- I. Introduction - le RTC;
- II. Le duplex téléphonique;
- III. Capacité d'un réseau radio;
- IV. L'accès multiple;
- V. La technologie radio;

Définition de la capacité d'un réseau

Déf. de capacité :

Nombre d'abonnés qui peuvent communiquer de façon simultanée sur le réseau téléphonique

C'est le point de vue de l'opérateur du réseau !

Comment construire un réseau radio ?

Ressource disponible :

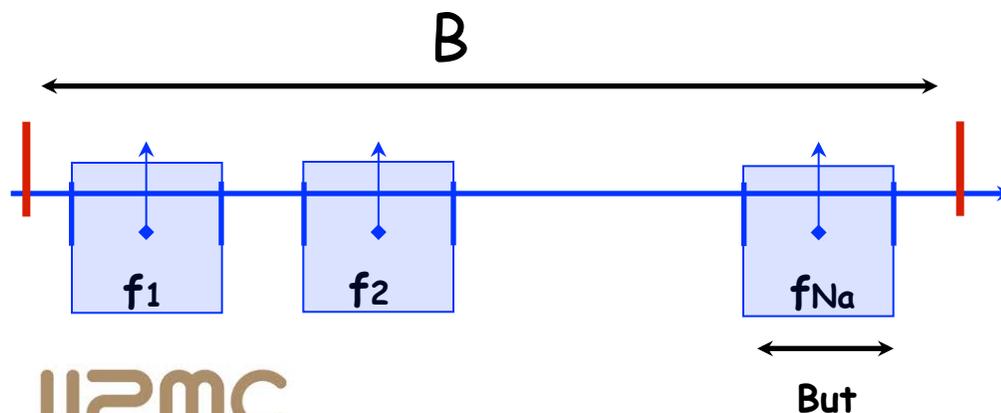
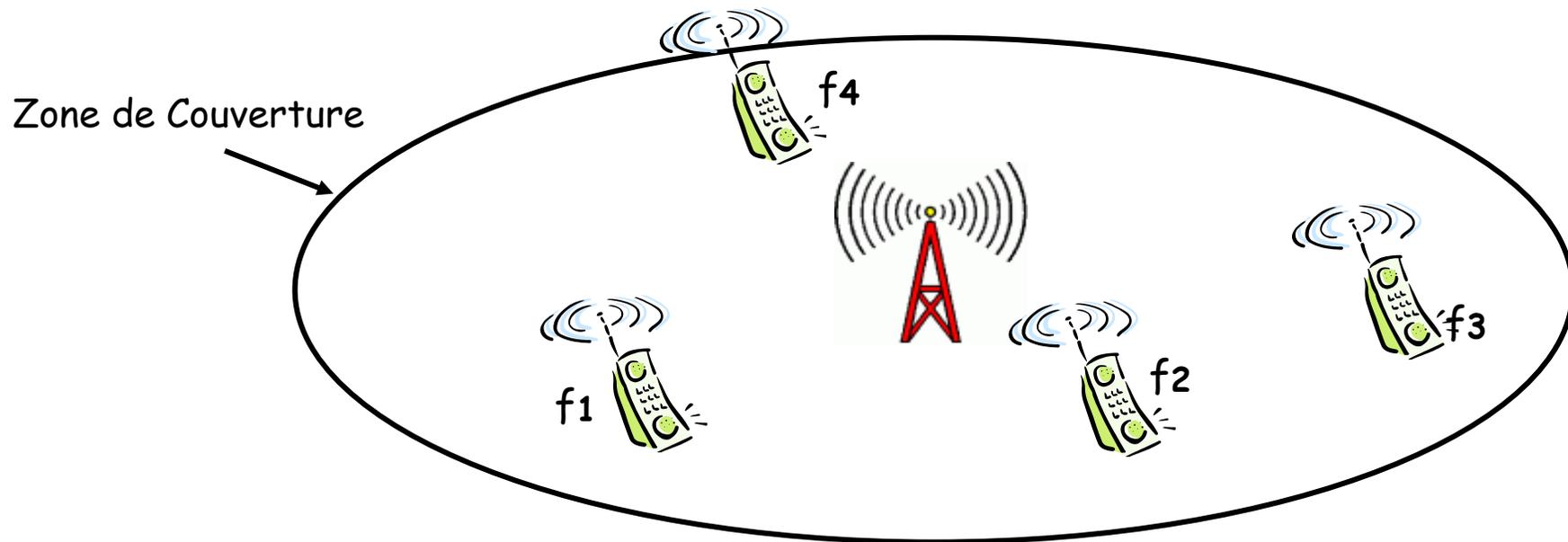
Largeur de bande B (Hz)

Construisons un réseau en partageant la bande !

Comment ?

Solution simple : chaque utilisateur peut utiliser B_{ut} Hz pour communiquer !

Déploiement du réseau radio

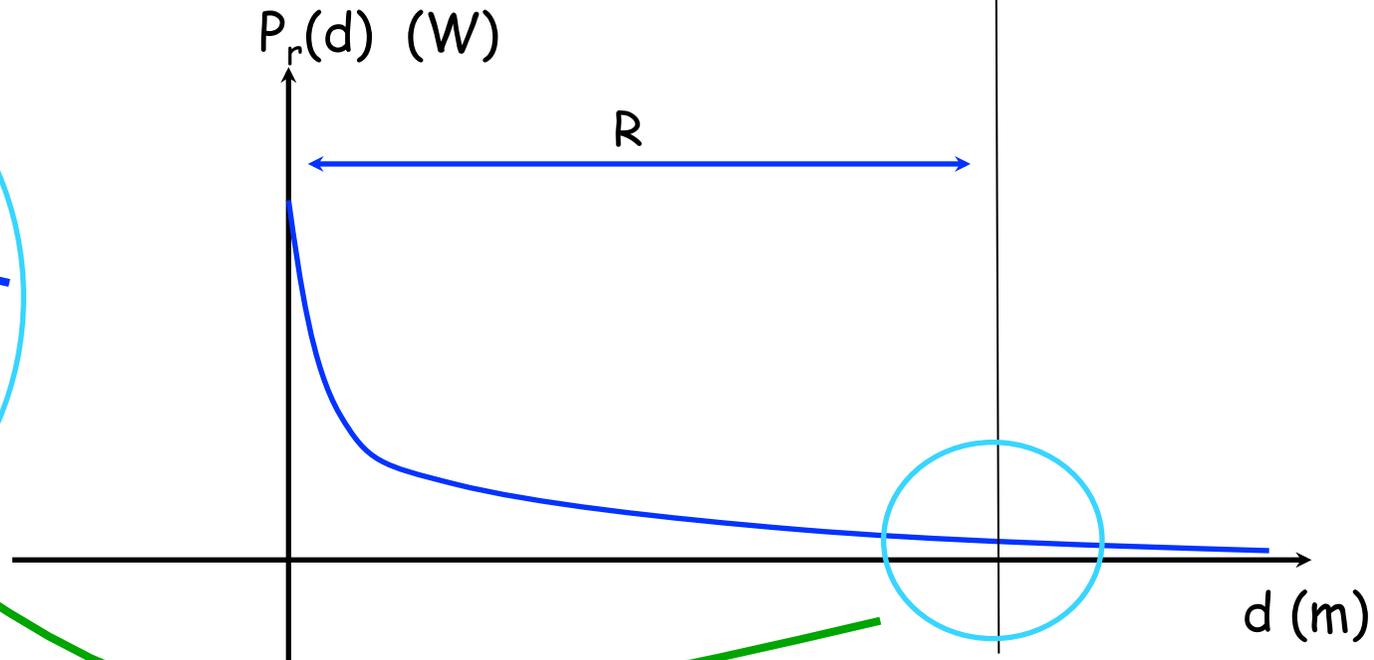
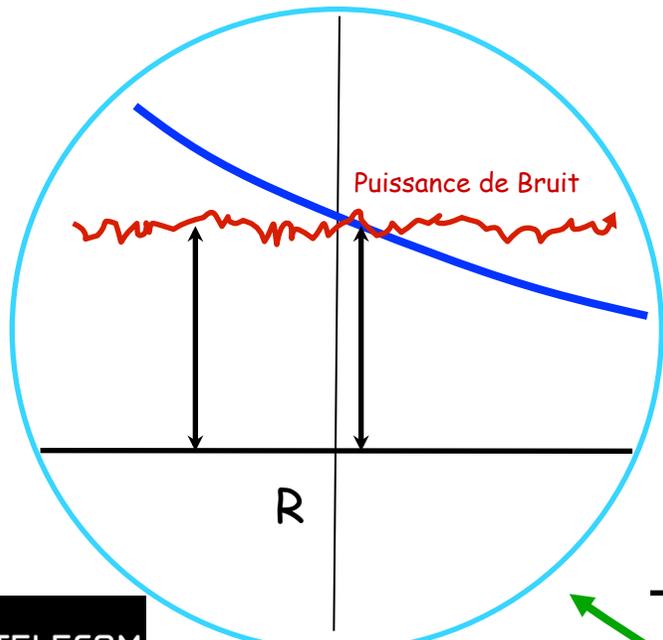
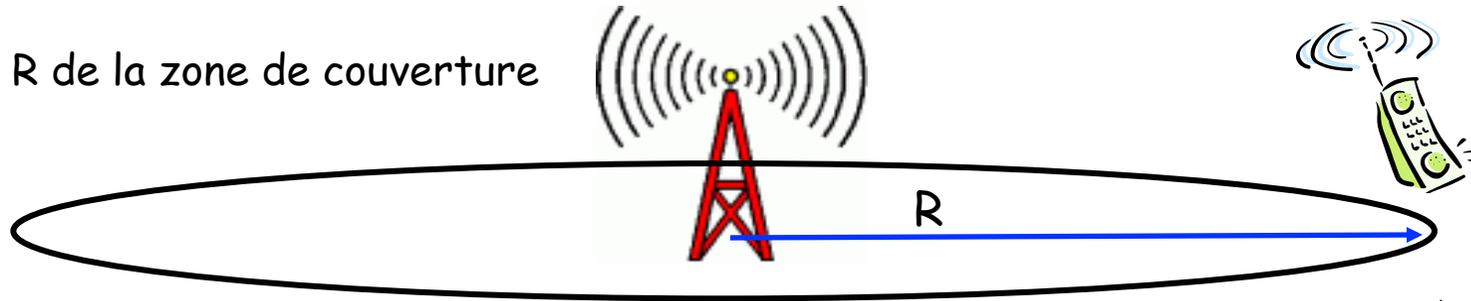


Capacité

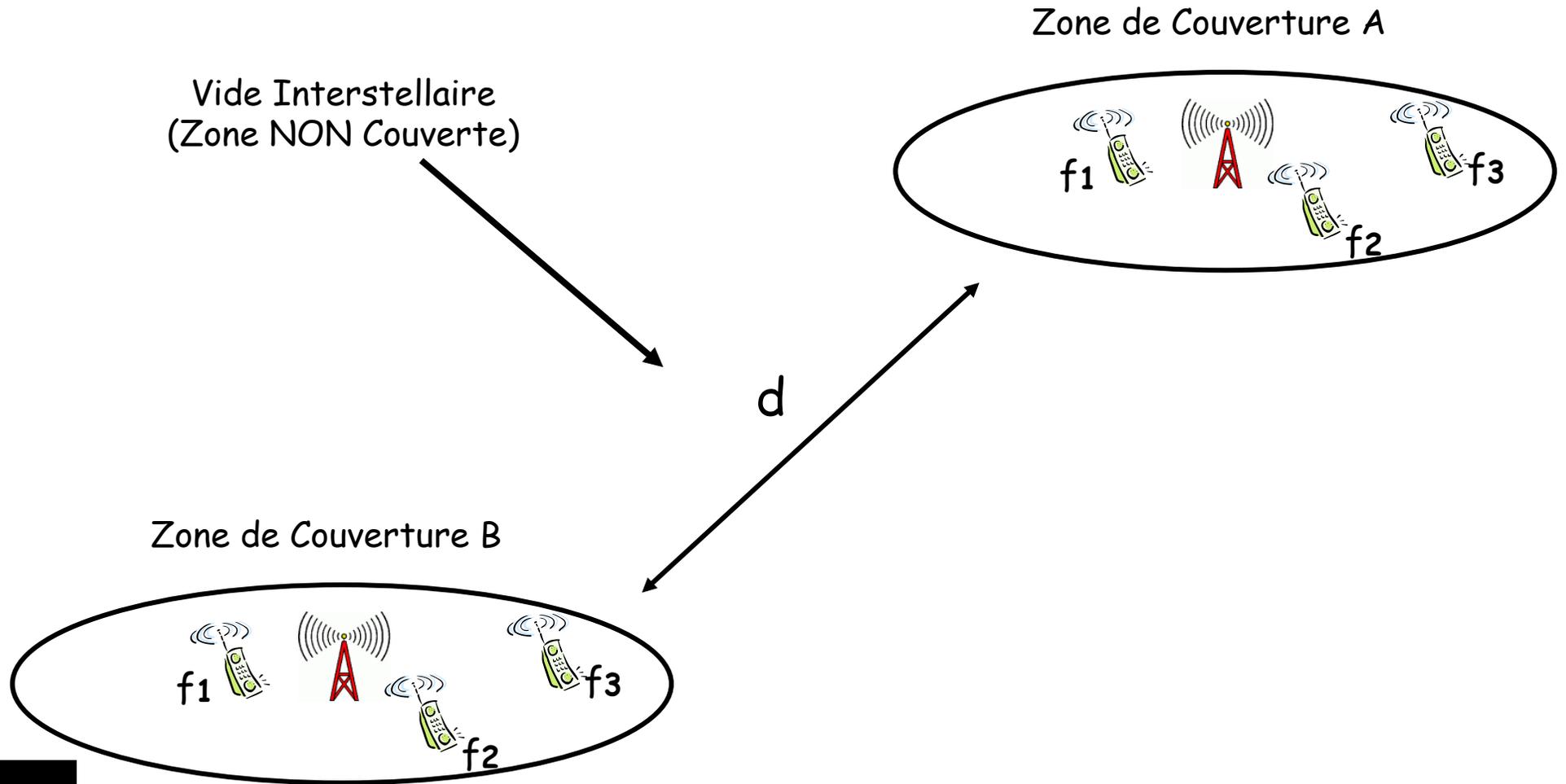
$$N_a = \frac{B}{B_{ut}}$$

Zone de couverture du réseau radio

Rayon R de la zone de couverture

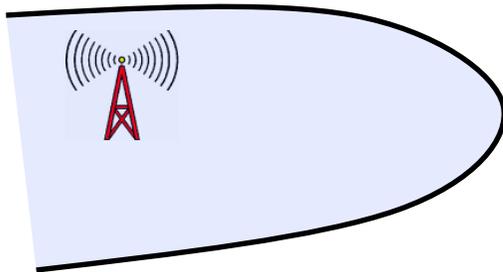


La réutilisation des fréquences

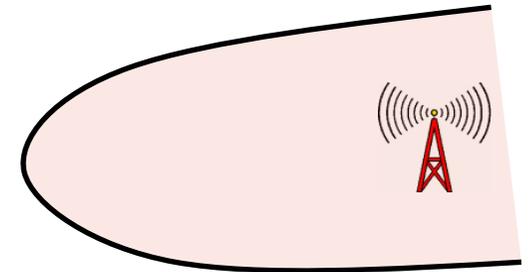


La réutilisation des fréquences (suite)

Zone de Couverture B



Zone de Couverture A



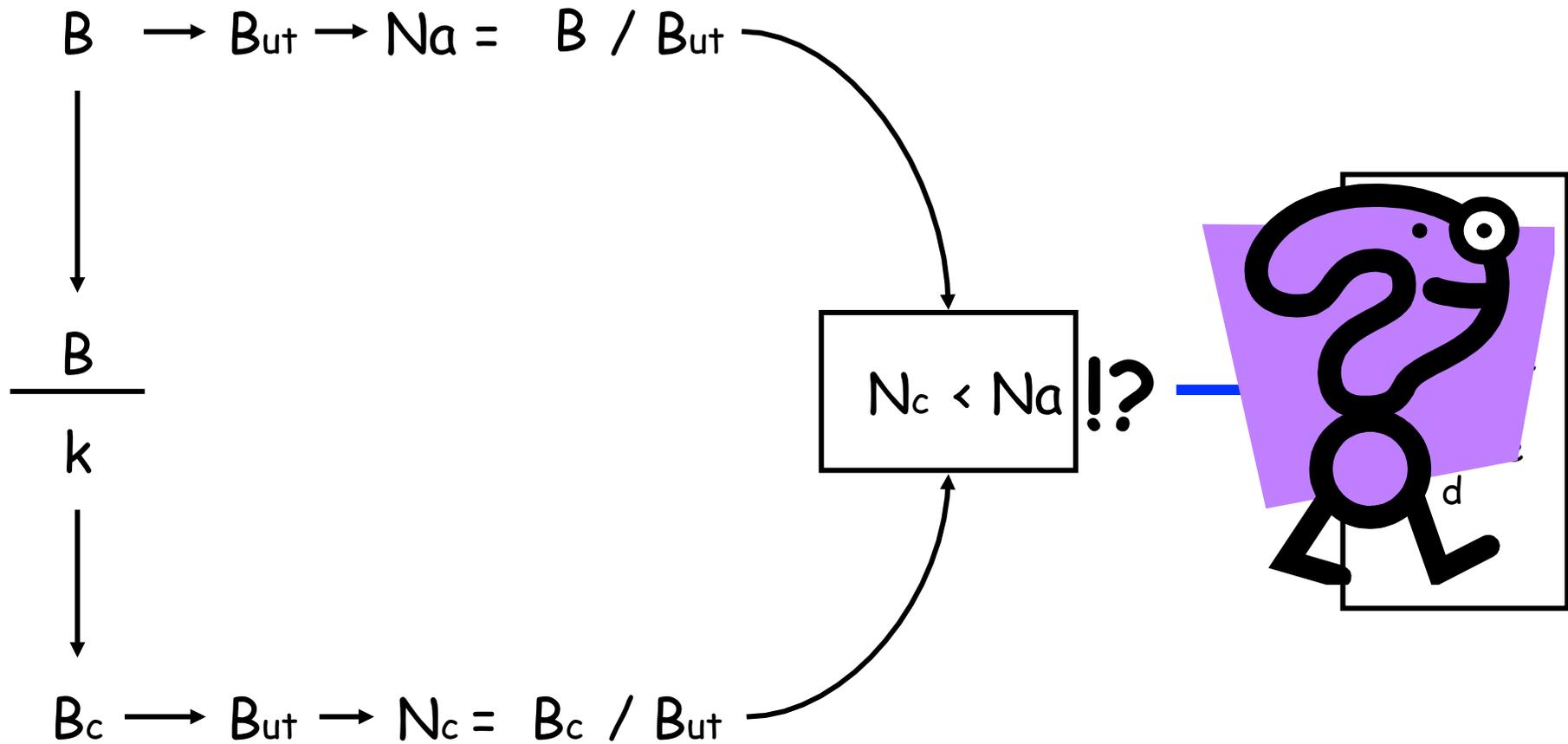
Vide Interstellaire
(Zone NON Couverte)



$P_r(d)$

$P_r(d)$

Le principe cellulaire (acte I - le partage des fréquences)



Le principe cellulaire (acte II - la ville de Paris)

$$B = 25 \text{ MHz}$$

$$B_{\text{ut}} = 200 \text{ kHz}$$

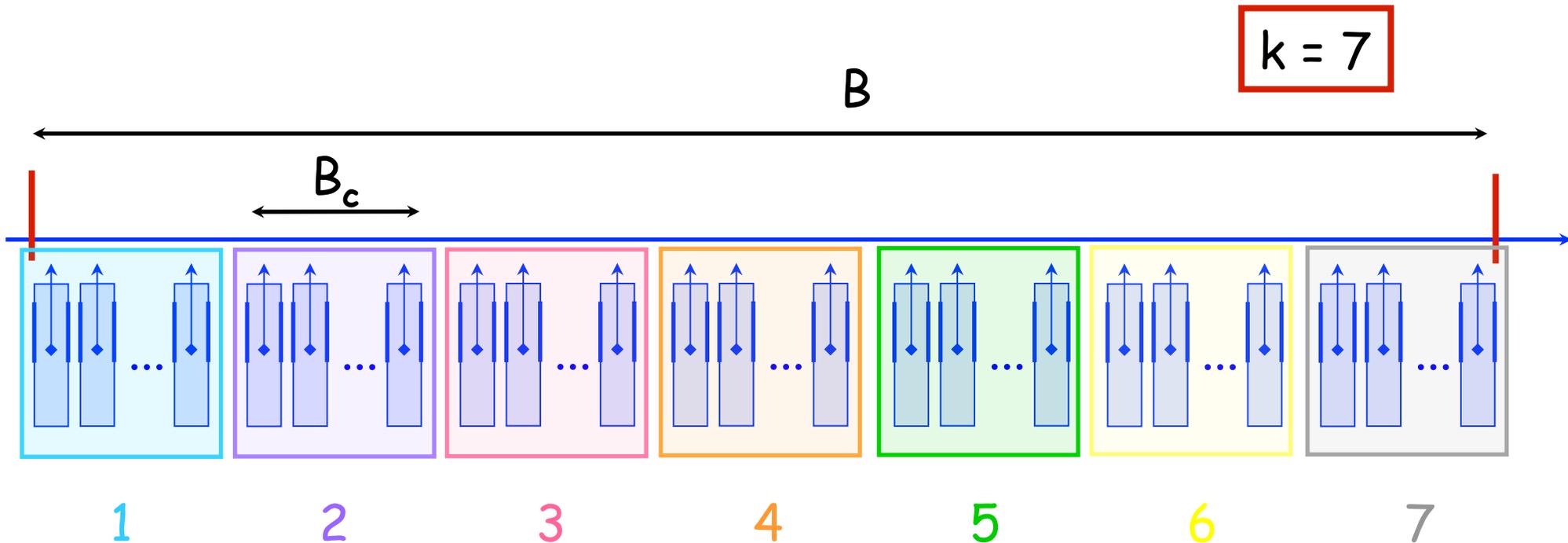
$$k = 5$$

$$N_{\text{a}} = B / B_{\text{ut}} = 125 \text{ canaux de fréquence ! (pour toute la ville)}$$

$$B_{\text{c}} = B/k = 5\text{MHz} \longrightarrow N_{\text{c}} = 25 \text{ canaux de fréquence !}$$

$$N_{\text{c}} = 25 \text{ canaux réutilisés tous les 200m! (1000fois~)} \longrightarrow \boxed{25000 \text{ canaux !}}$$

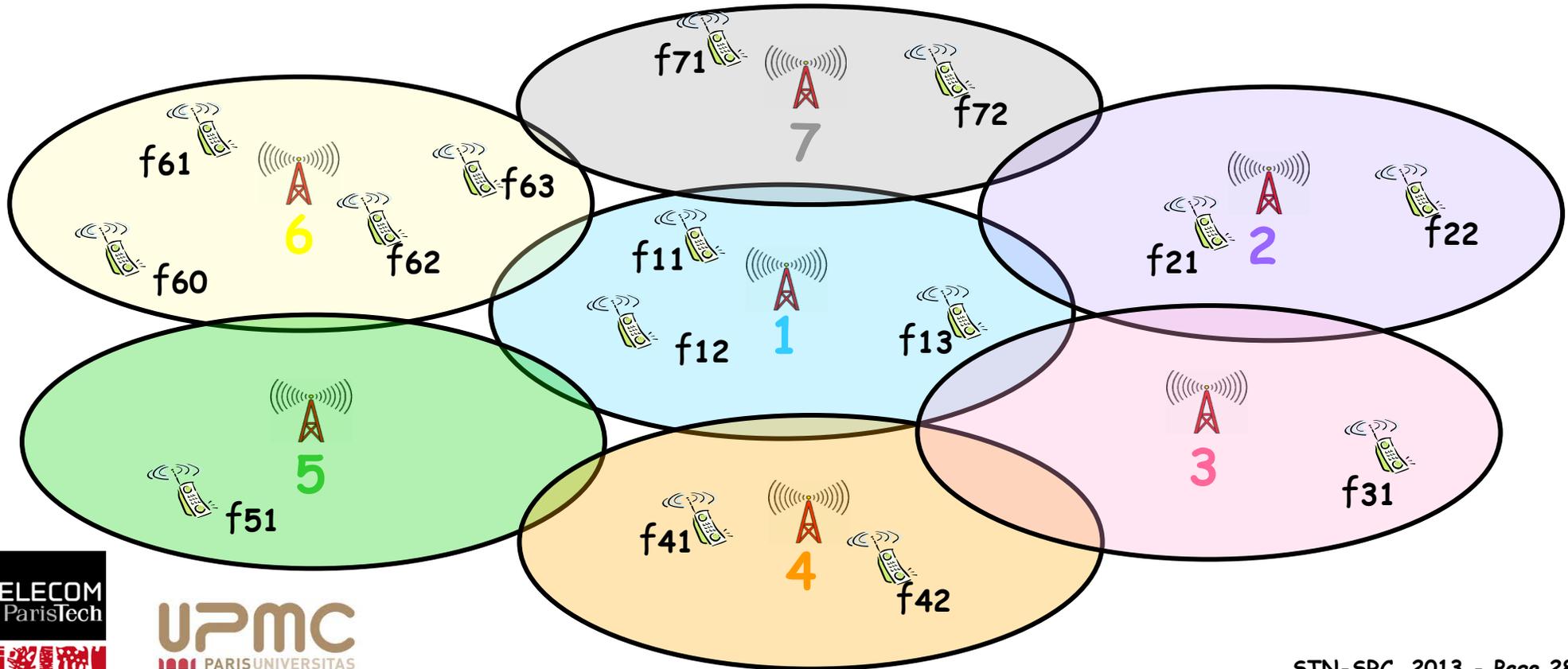
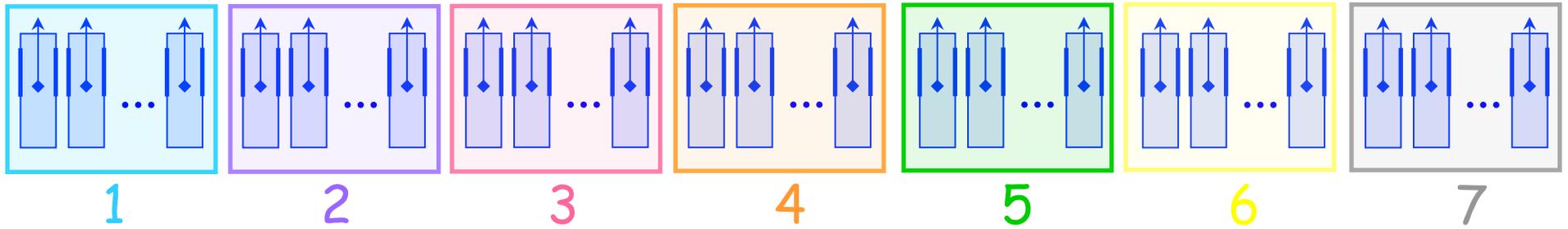
Le principe cellulaire (acte III - les cellules)



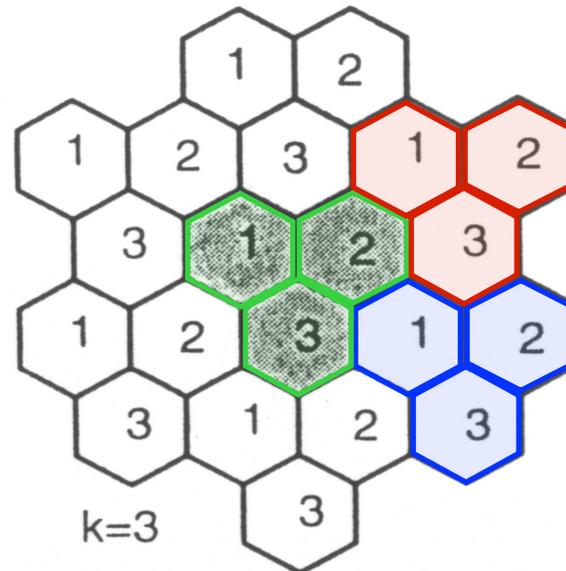
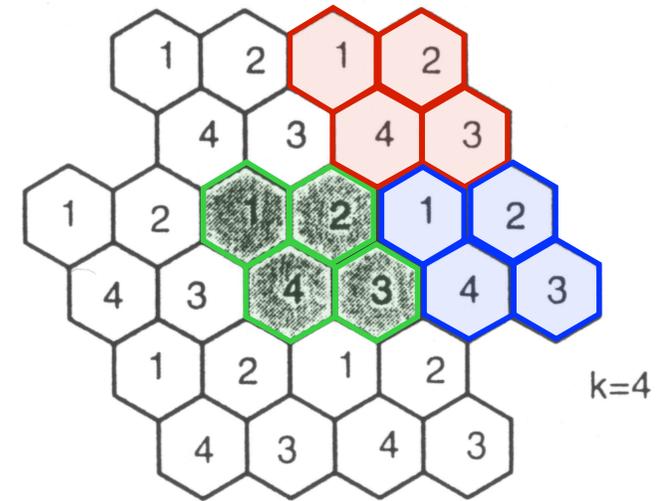
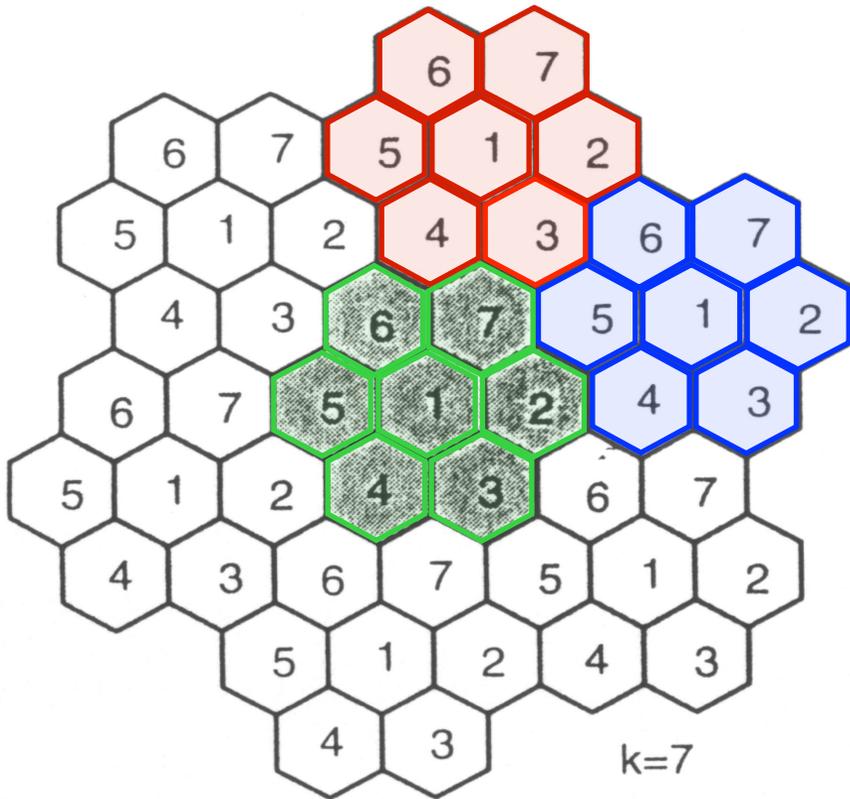
k sous-ensembles de fréquences différents

Chaque sous-ensemble avec une capacité N_c

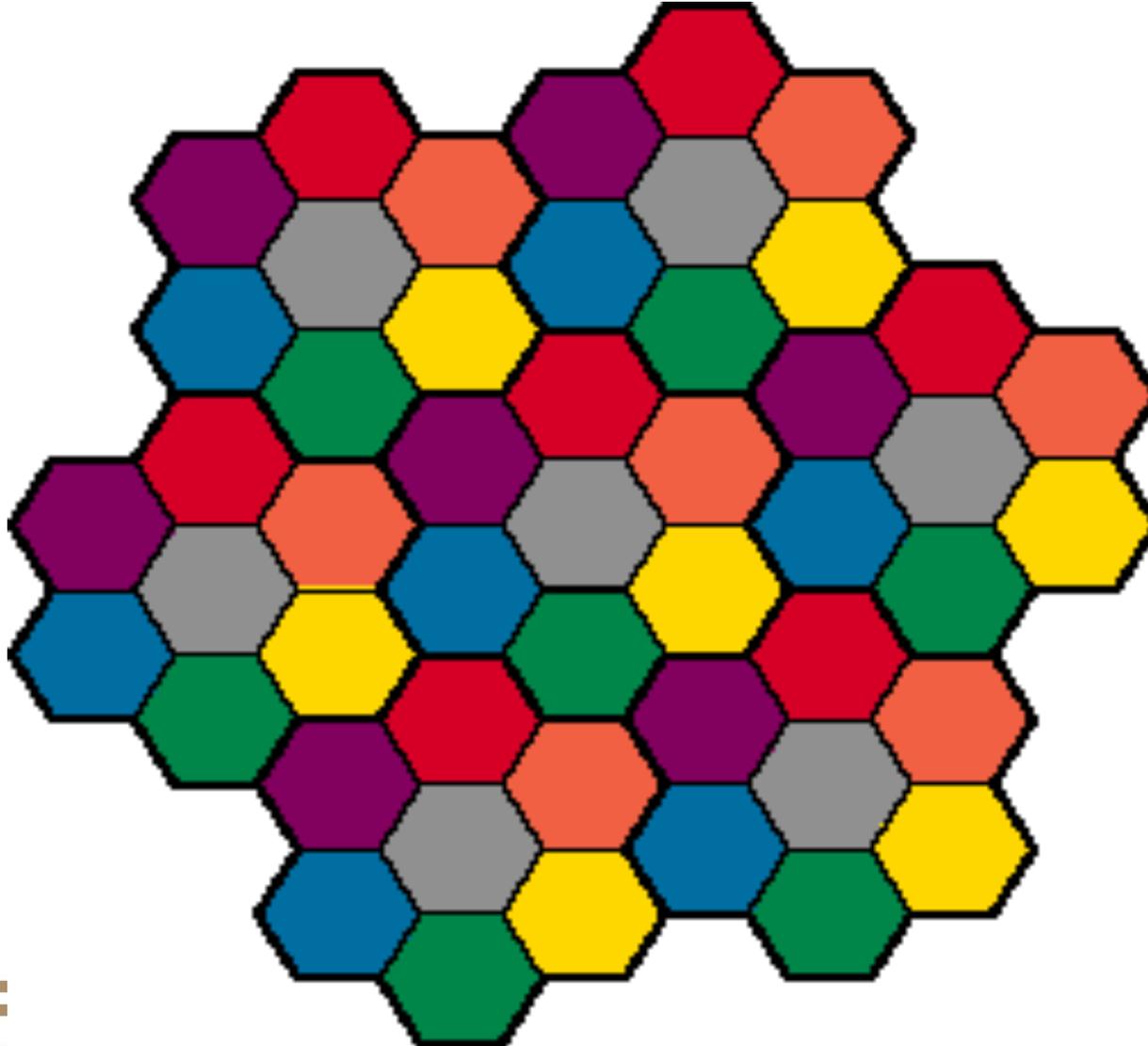
Le principe cellulaire (acte IV - Comment paver la ville?)



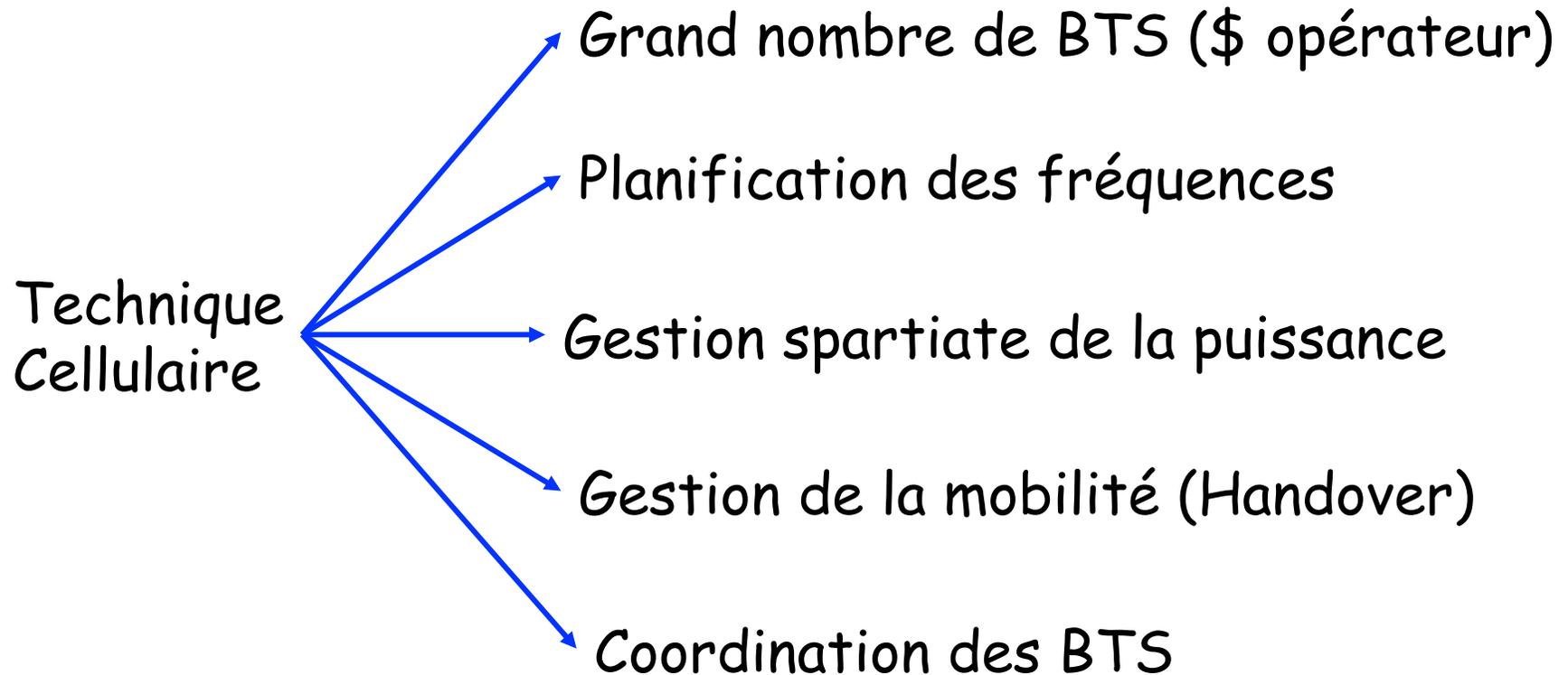
Le principe cellulaire (acte V - Exemples)



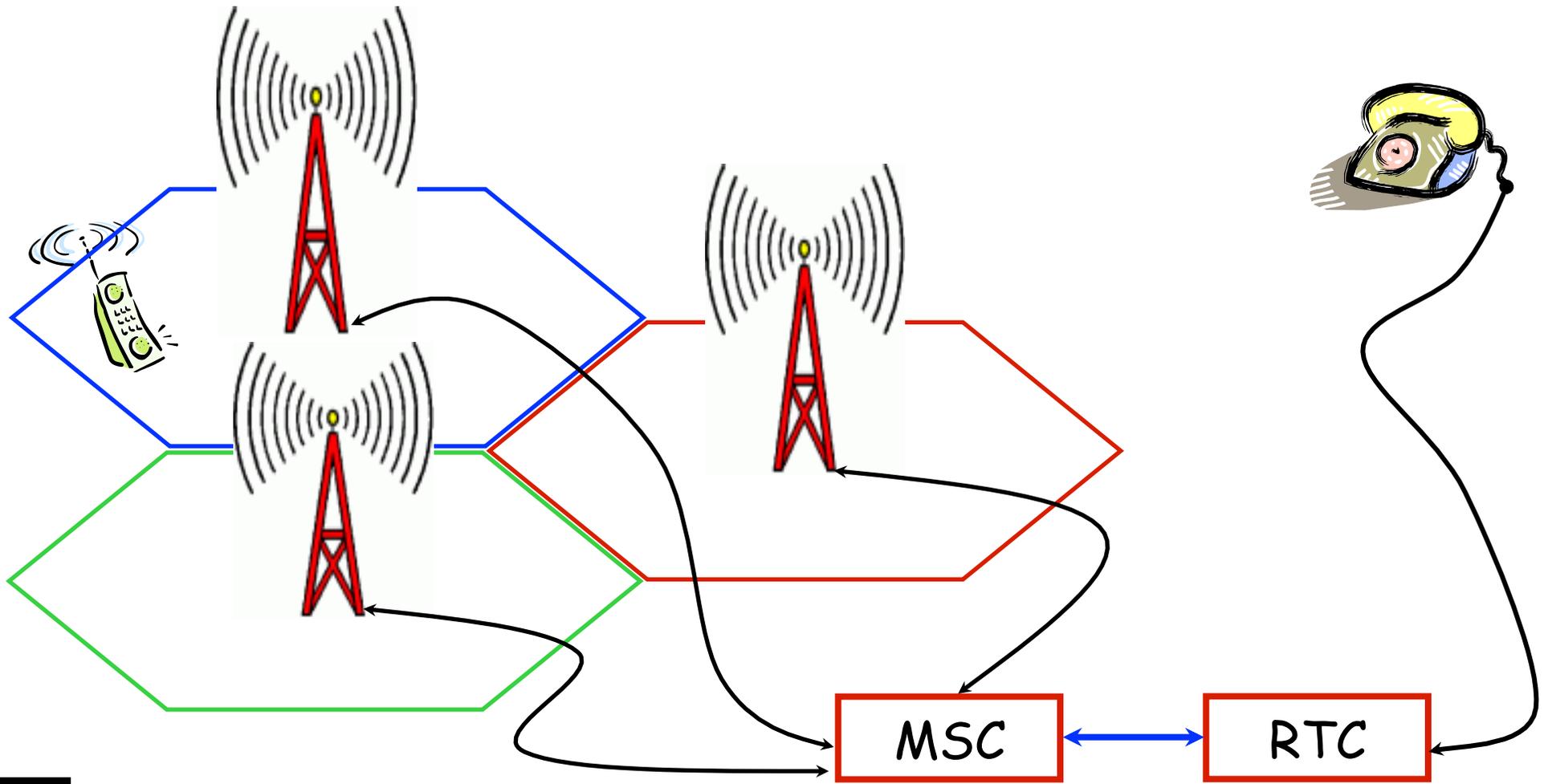
Le principe cellulaire (acte VI - Le « colourID » des cellules)



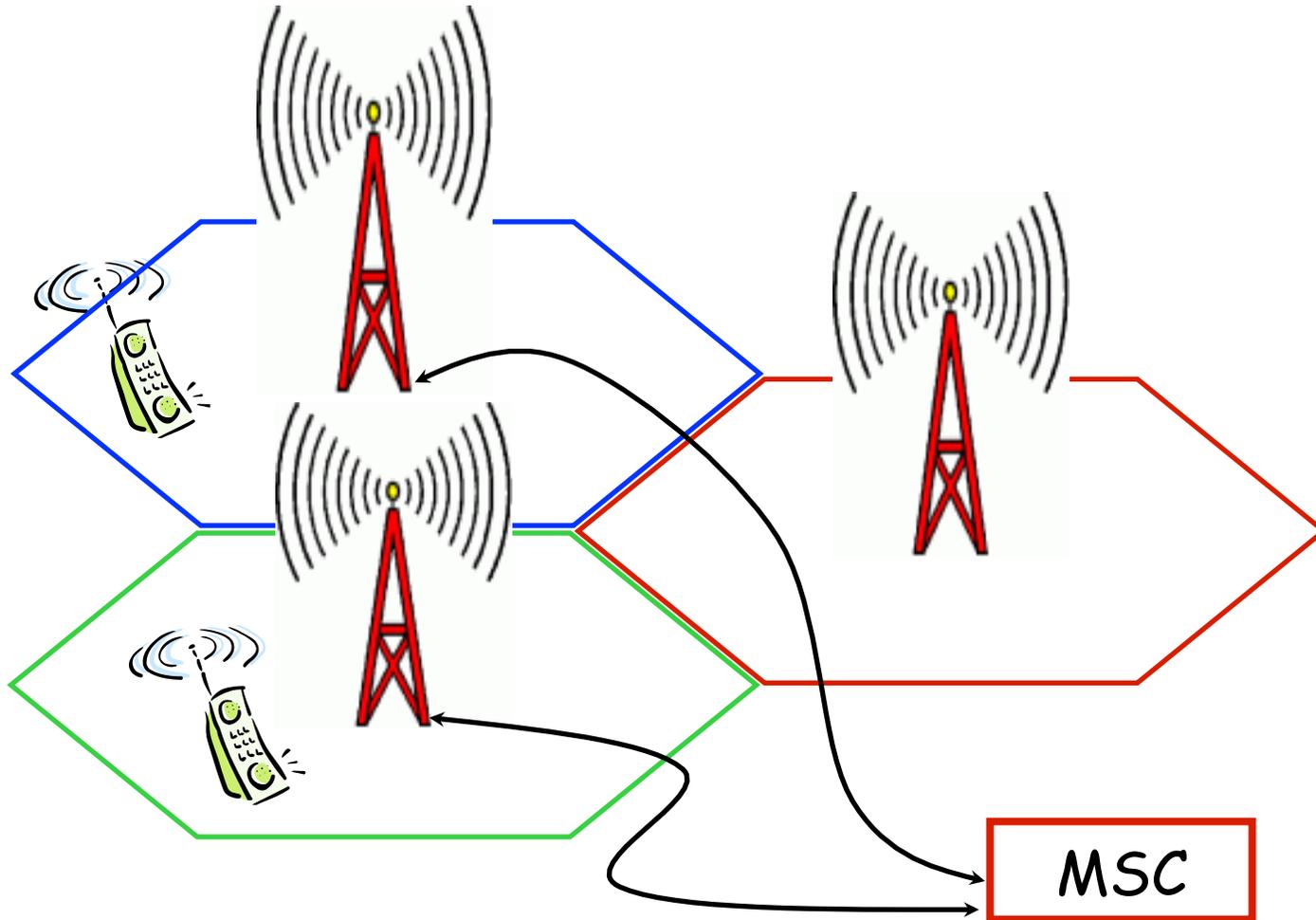
Les désavantages de la technique cellulaire



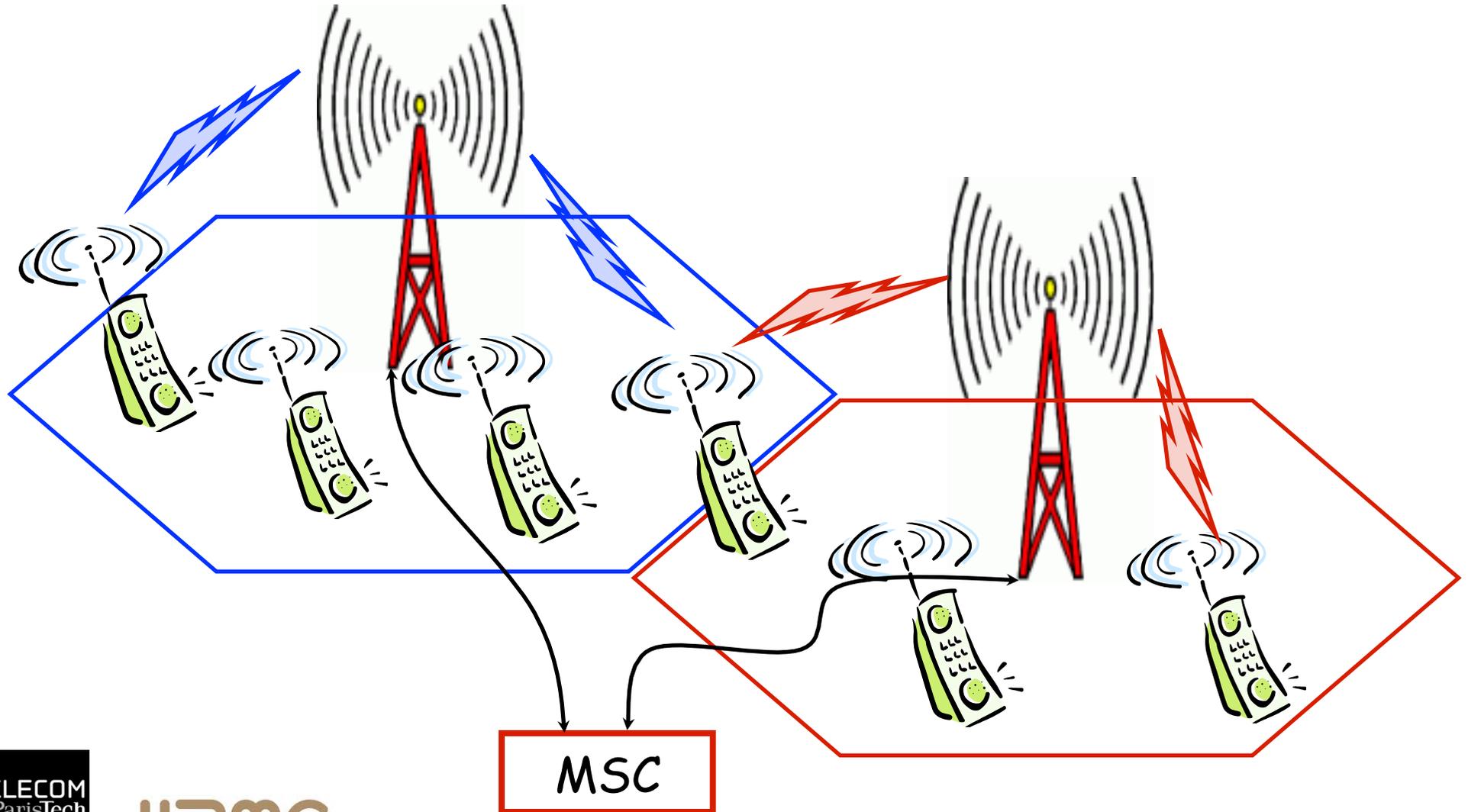
Exemple de gestion de la communication (mob → RTC)



Exemple de gestion de la communication (mob → mob)



Exemple de gestion de la communication (« handover »)



Plan

I. Introduction - le RTC;

II. Le duplex téléphonique;

III. Capacité d'un réseau radio;

IV. L'accès multiple;

V. La technologie radio;

L'accès multiple

Motivation : Parole 10-60% du temps en activité vocale !!

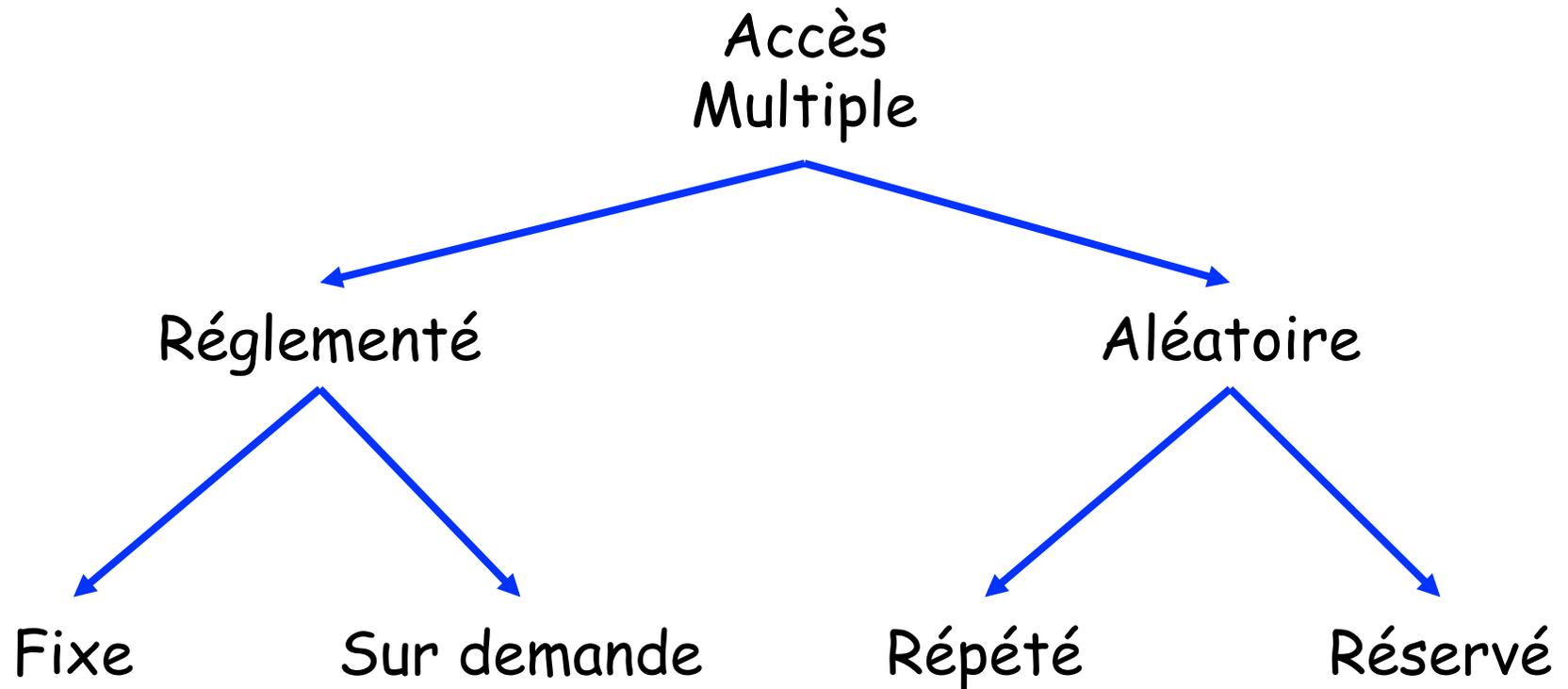
Conséquence :

La ressource canal est très MAL exploitée !!

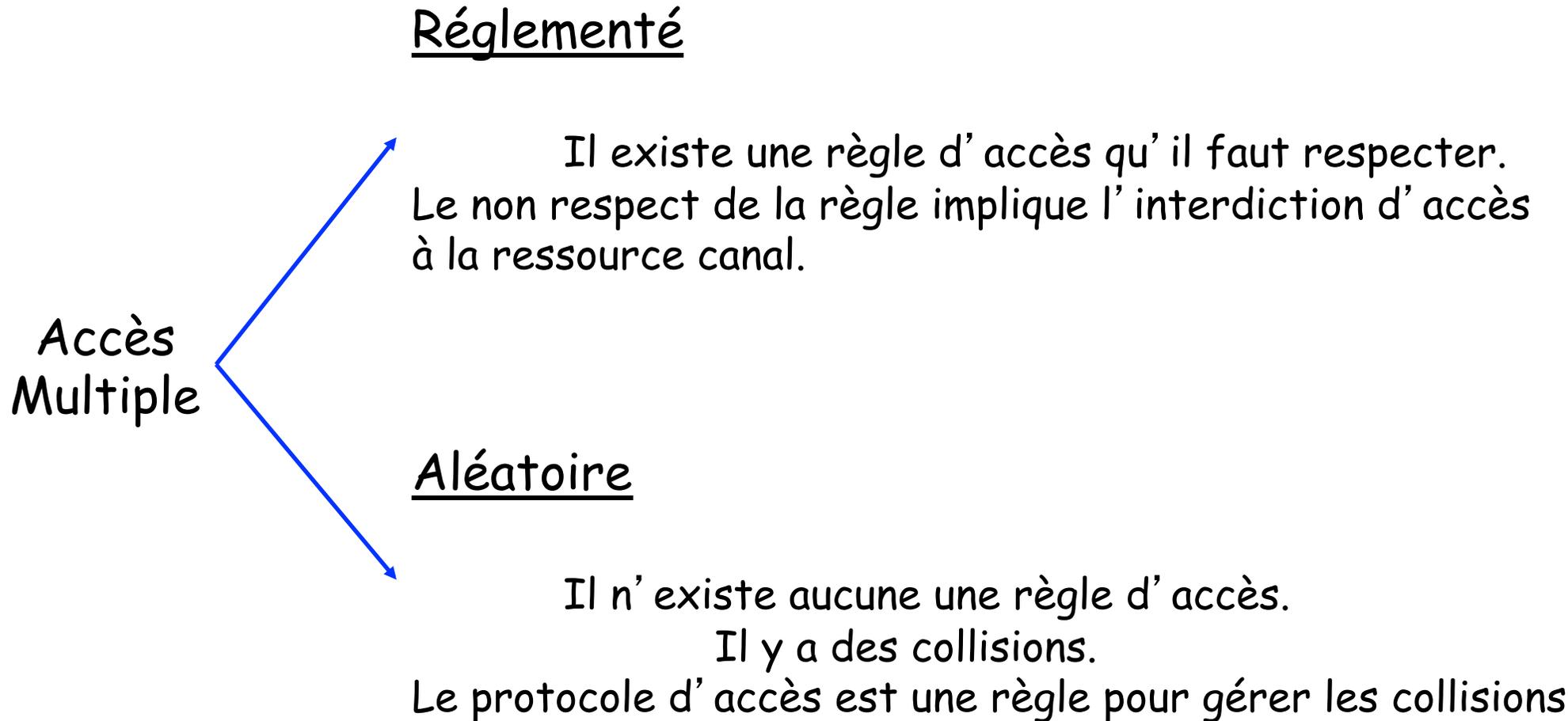
Solution :

Partage de la ressource (accès)

Les techniques d'accès multiple



Les techniques d'accès multiple (suite)



L' accès multiple réglementé

Fixe

La règle est toujours la même, indépendamment que la ressource soit utilisée ou non.

Ex : TDMA, FDMA

Sur demande

La règle est toujours la même mais elle n' est pas disponible tout le temps. Il faut la solliciter si j' ai un message à transmettre.

Ex : Polling ou jeton

Accès
Multiple
Réglementé

L' accès multiple aléatoire

Répété

En cas de collision, la requête de communication se répète.

Ex : p-ALOHA, s-ALOHA

Accès
Multiple
Aléatoire

Réservé

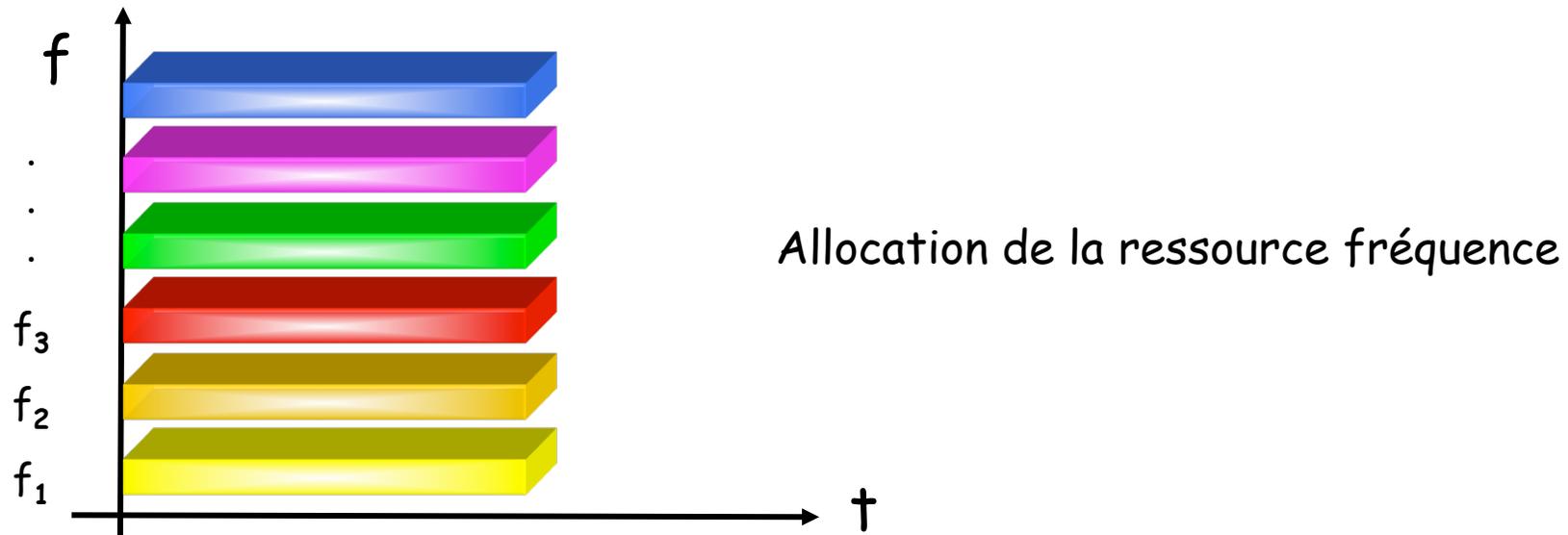
En cas de collision, la requête est inscrite dans une liste de réservation

Ex : réservation implicite ou explicite

Propriétés d'un protocole d'accès multiple

- ✓ Il doit contrôler l'allocation de la capacité du canal aux différents utilisateurs ;
- ✓ Il doit utiliser la ressource canal de façon efficace :
Notions de « throughput » et retard ;
- ✓ Il doit gérer l'allocation de la ressource de façon équilibrée entre les utilisateurs ;
- ✓ Il doit être flexible en autorisant des types de trafic différents ;
- ✓ Il doit être stable, à partir d'un état d'équilibre, toute augmentation du trafic doit conduire le système à un nouvel état d'équilibre ;
- ✓ Il doit être robuste vis-à-vis d'une panne des équipements ;

Le FDMA (« Frequency Division Multiple Access »)

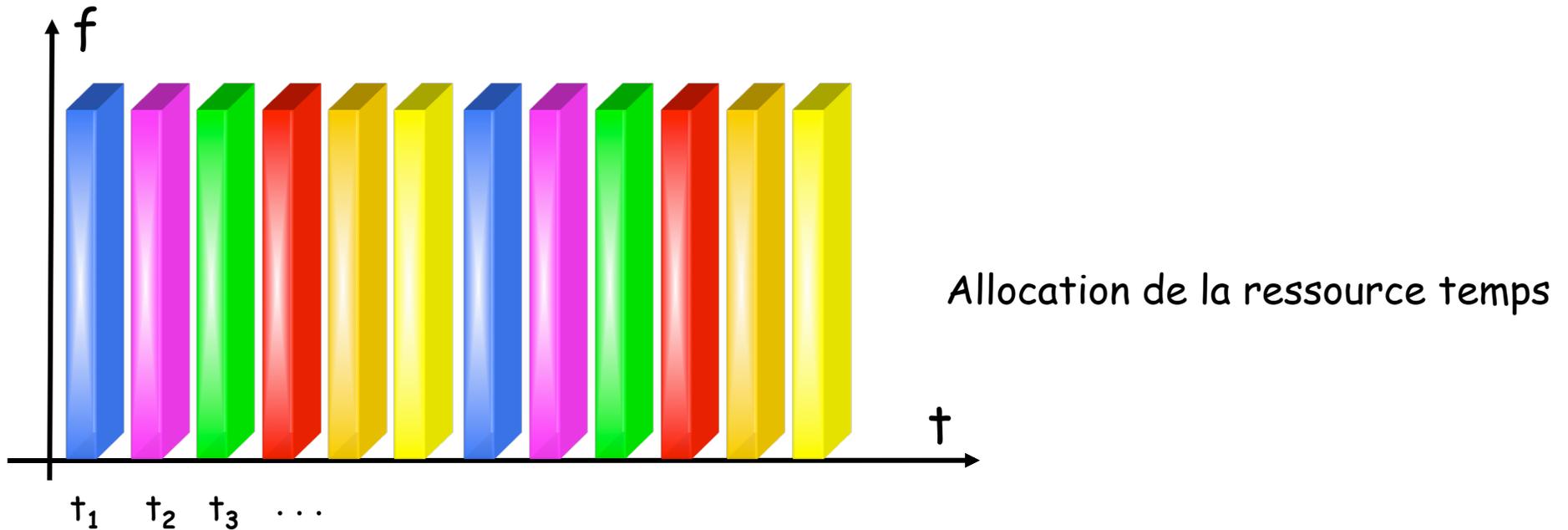


Des sous-bandes de fréquences indépendantes sont allouées à chaque utilisateur.

Avantages : simple à séparer les utilisateurs par filtrage

Désavantages :
- bandes de garde,
- bonne linéarité des amplis,
- bonne synchro de fréquence

Le TDMA (« Time Division Multiple Access »)

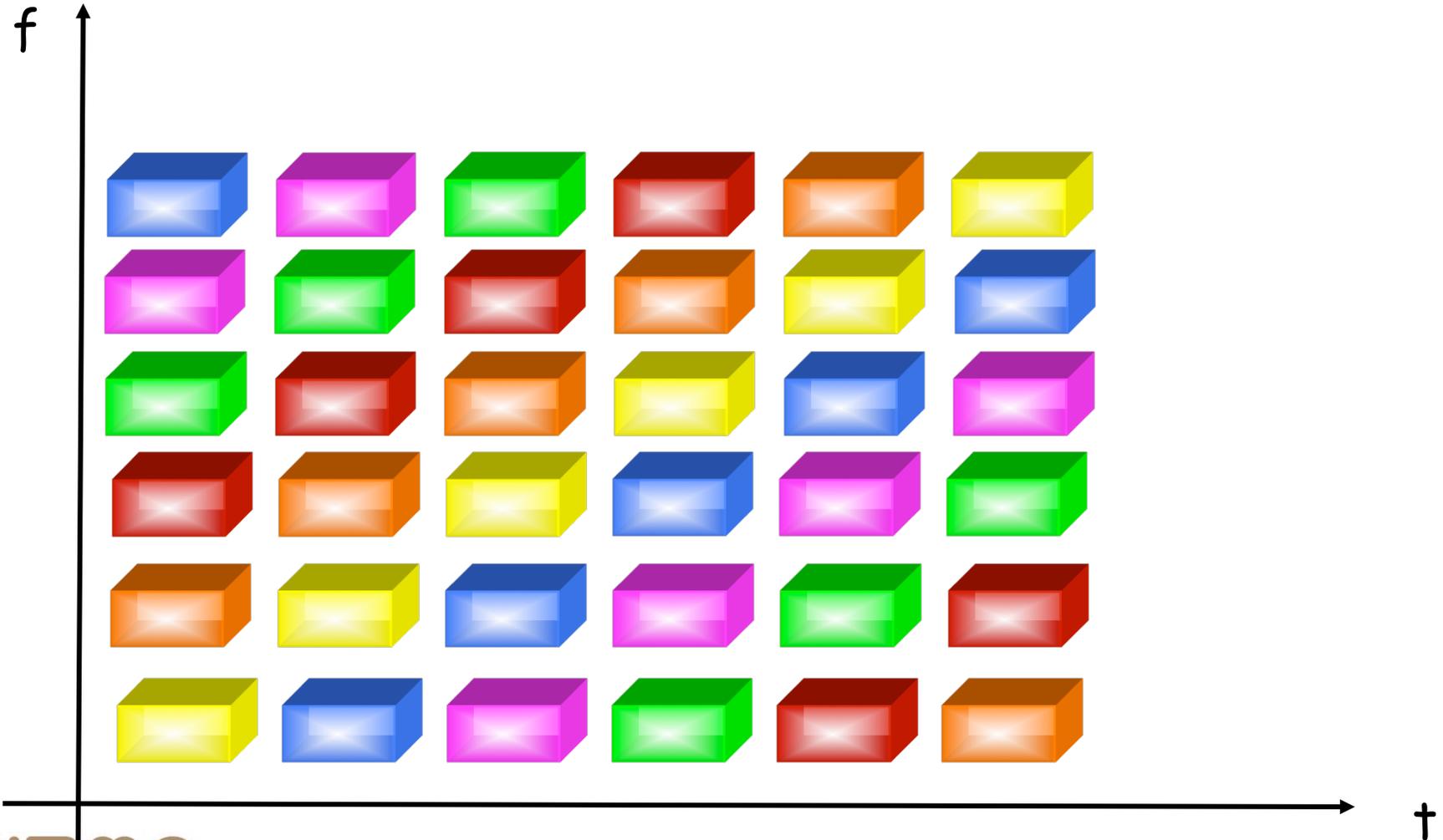


Intervalles de temps sont attribuées de façon cyclique à chaque utilisateur.

Avantages : simple à séparer les utilisateurs par synchronisation

Désavantages :
- intervalles de garde,
- dispersion du canal,
- bonne synchro temporelle

Le TDMA/FDMA (hybride)



Les protocoles ALOHA

Protocoles Aloha

Accès Multiple Aléatoire dans les réseaux d'ordinateurs
Proposé par l'Université de Hawaï en 1970

Accès :

Les utilisateurs accèdent au canal chaque fois qu'ils ont
des données à transmettre

Problème → Il y a des Collisions !!

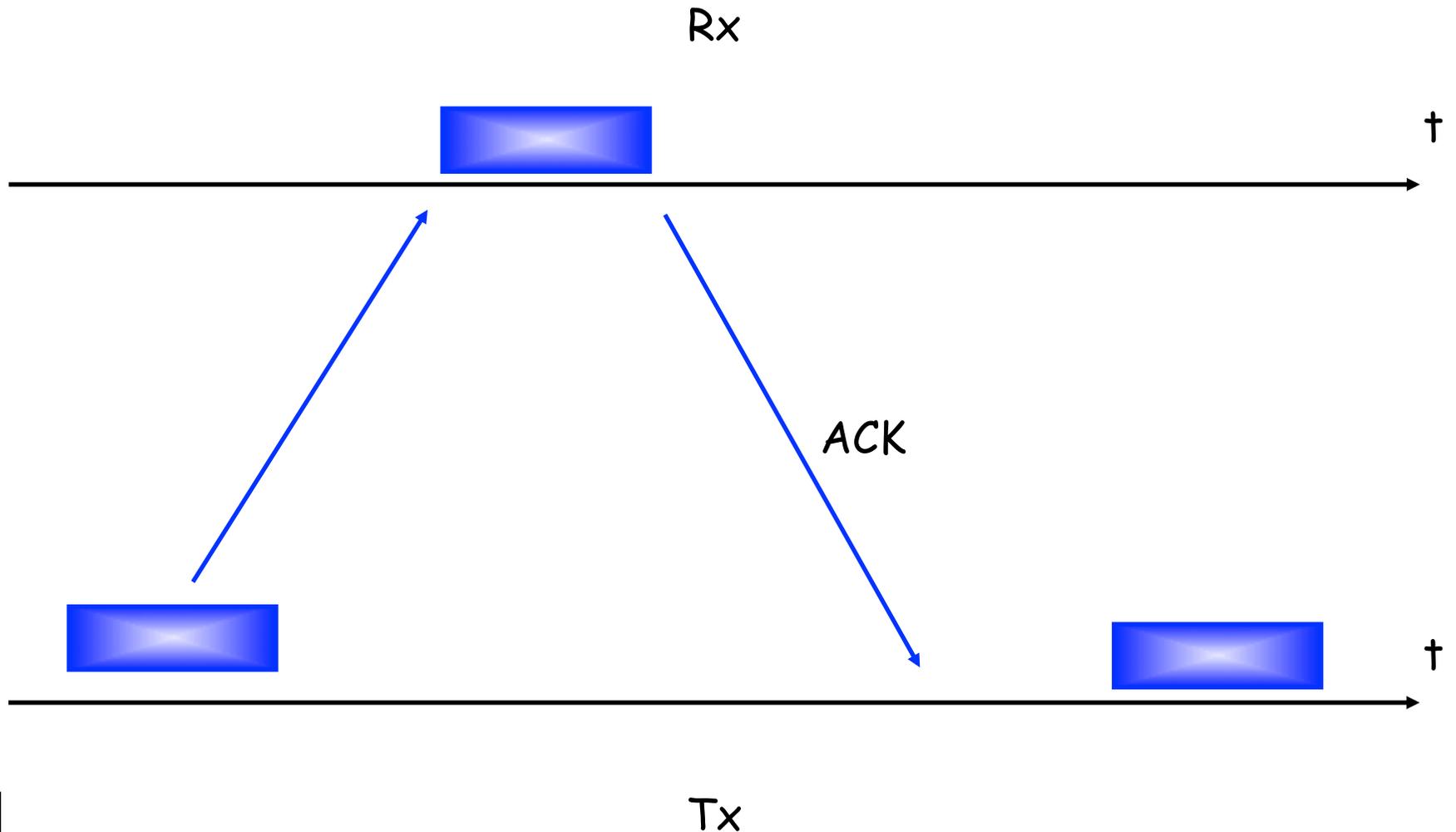
Le p-ALOHA

Le protocole p-ALOHA est extrêmement simple !

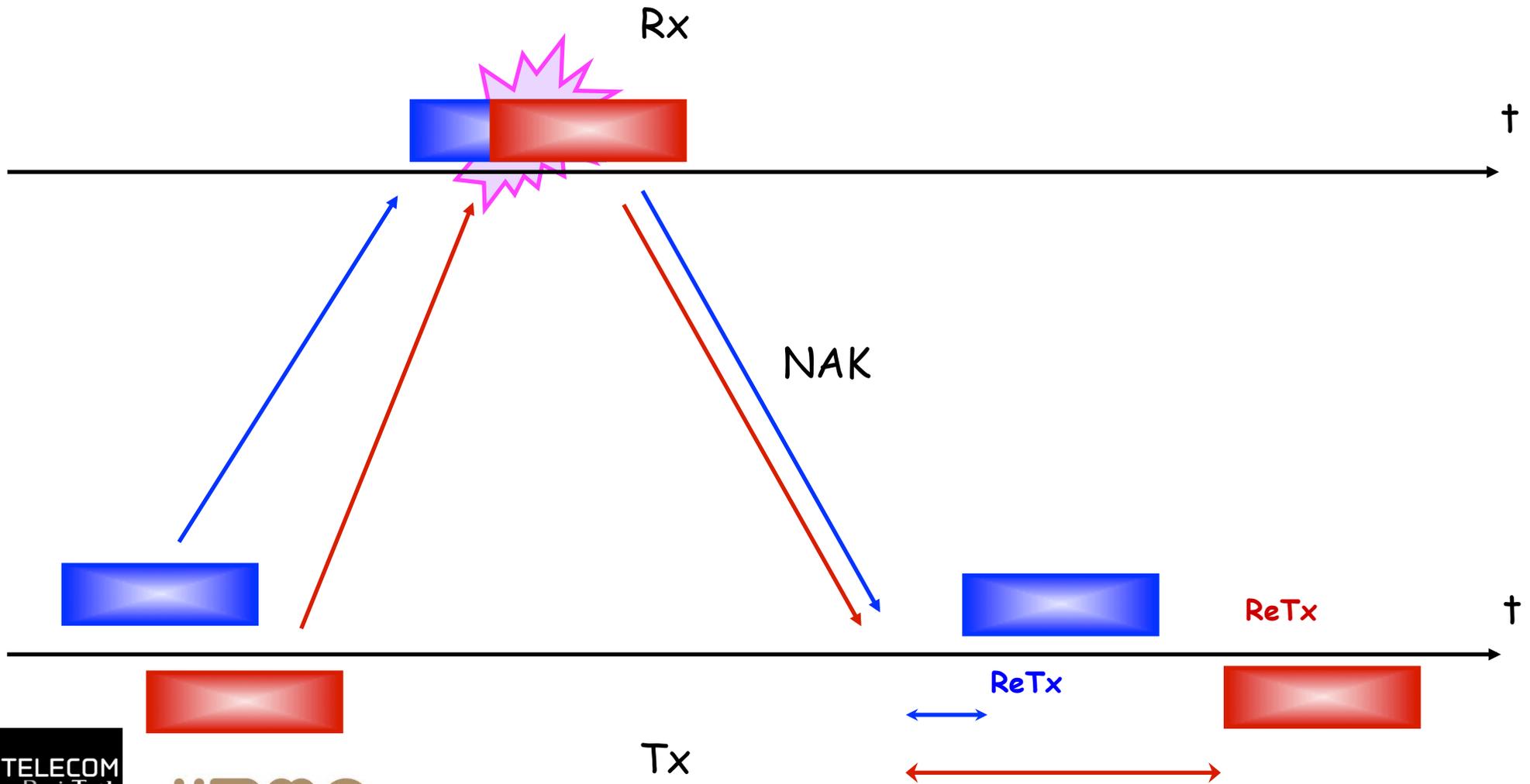
En supposant que tous les paquets ont exactement la même durée, p-ALOHA est constitué des modes suivants :

1. **Mode « Transmission »** → Les utilisateurs émettent quand ils le souhaitent en protégeant leurs informations par un code détecteur d'erreurs.
2. **Mode « Écoute »** → Après Tx les utilisateurs attendent un acquittement (ACK) du récepteur. S'il y a eu collision, le RTx détecte des erreurs et émet un non-acquittement (NAK)
3. **Mode « Retransmission »** → Comme suite à un NAK, les utilisateurs retransmettent leurs messages en attendant un temps aléatoire.
4. **Mode « Timeout »** → Après un certain temps si aucun ACK ou NAK est reçu, alors les utilisateurs retransmettent leurs messages

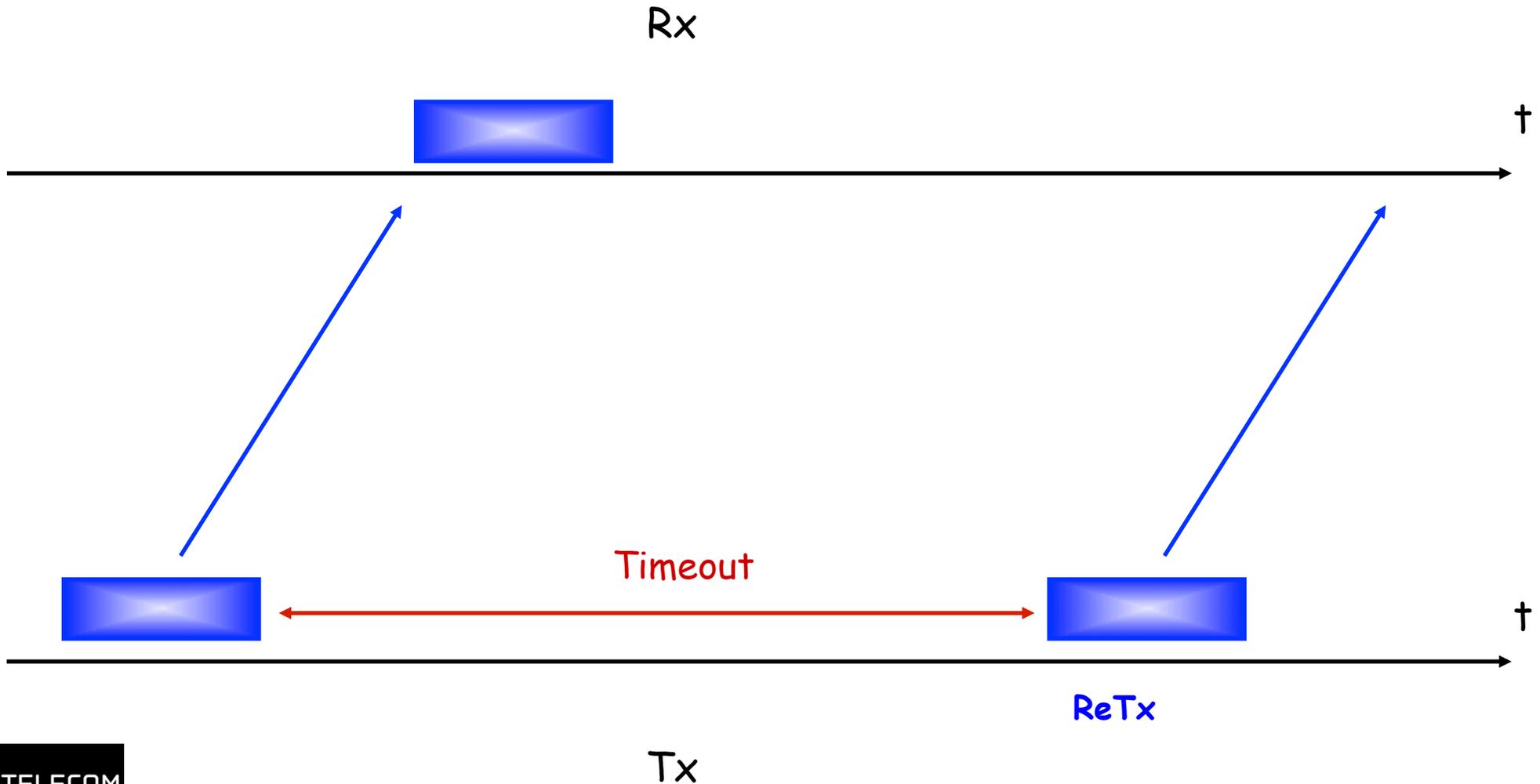
Le p-ALOHA (Exemple de ACK)



Le p-ALOHA (Exemple de NAK)



Le p-ALOHA (Exemple de « Timeout »)



Le s-ALOHA (Slotted ALOHA)

Le Protocole p-Aloha peut être amélioré en rajoutant un minimum de coordination entre les utilisateurs !

Comment ?

Une séquence de marques de synchro est systématiquement diffusée vers tous les utilisateurs.

Un utilisateur peut envoyer ses paquets d'information seulement pendant la durée d'un « slot »;

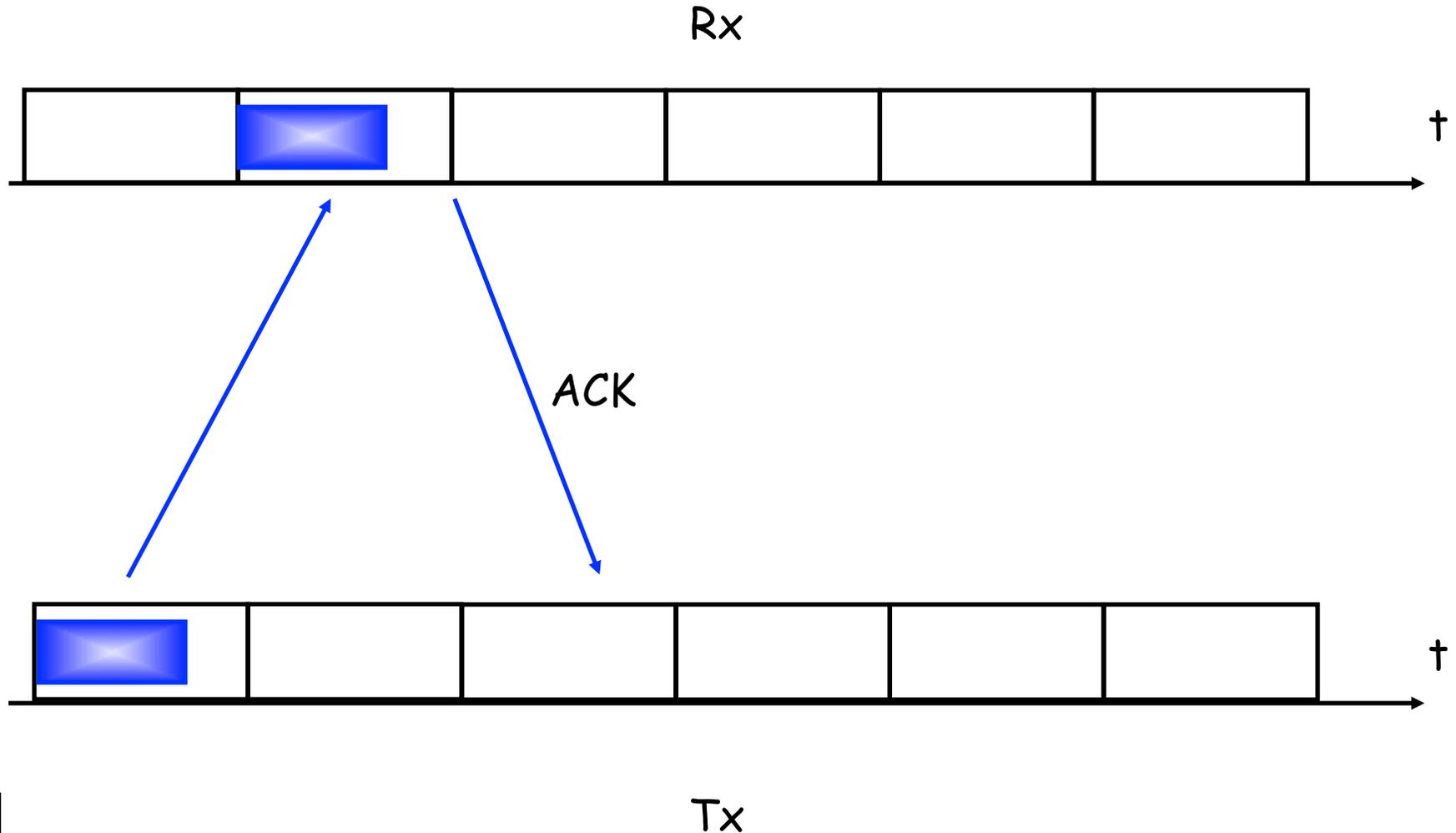
la transmission peut démarrer seulement au début d'un « slot ».

Le s-ALOHA (suite)

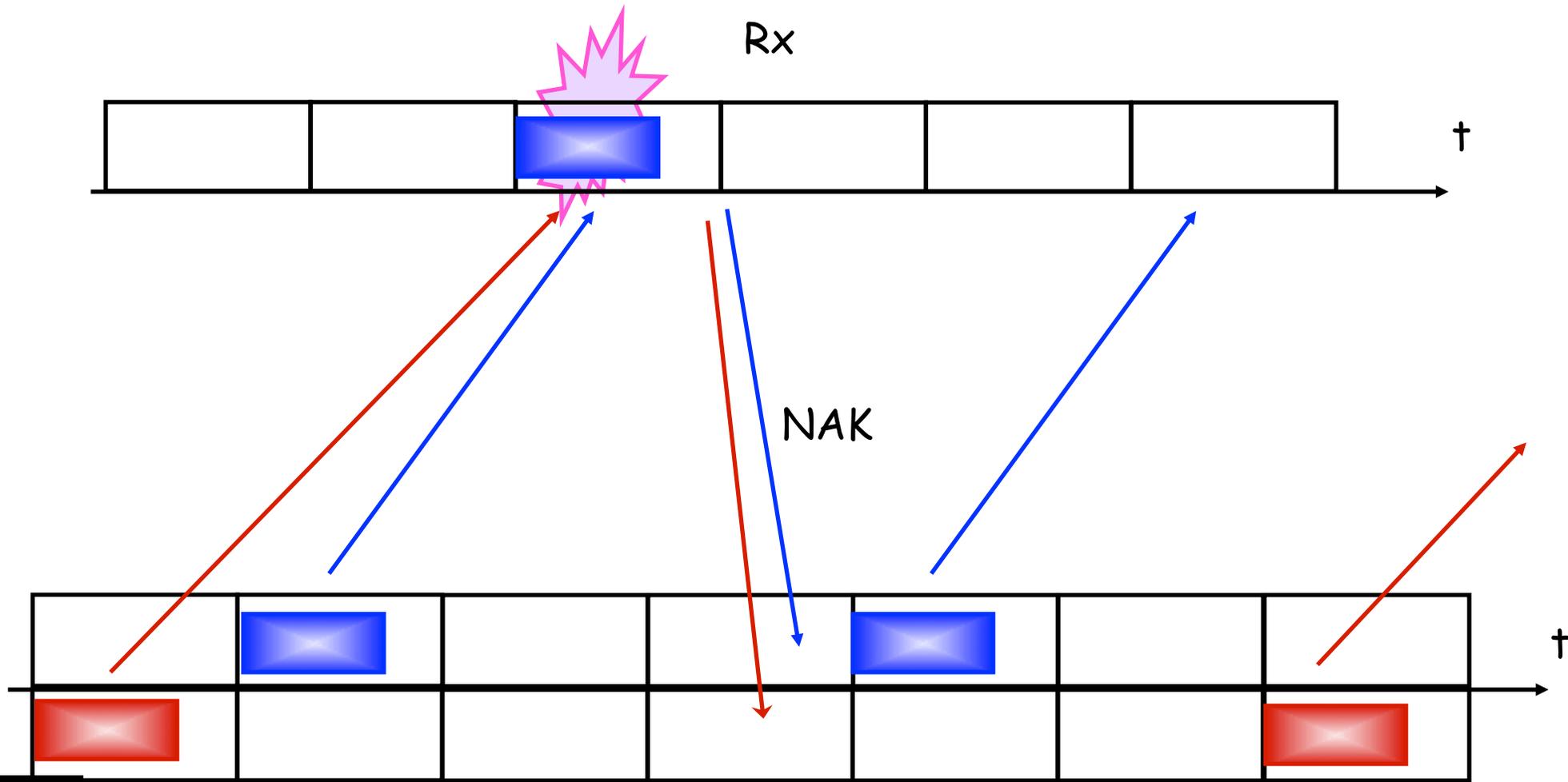
En supposant que tous les paquets ont exactement la même durée, s-ALOHA est constitué des modes suivants :

1. **Mode « Transmission »** → Les utilisateurs émettent en protégeant leurs informations par un code détecteur d'erreurs à partir de « tops » de synchro (début d'un « slot »)..
2. **Mode « Écoute »** → Après Tx les utilisateurs attendent un acquittement (ACK) du récepteur. S'il y a eu collision, le RTx détecte des erreurs et émet un non-acquittement (NAK)
3. **Mode « Retransmission »** → Comme suite à un NAK, les utilisateurs retransmettent leurs messages en attendant un temps aléatoire multiple entier de la durée d'un « slot ».
4. **Mode « Timeout »** → Après un certain temps si aucun ACK ou NAK est reçu, alors les utilisateurs retransmettent leurs messages selon 1.

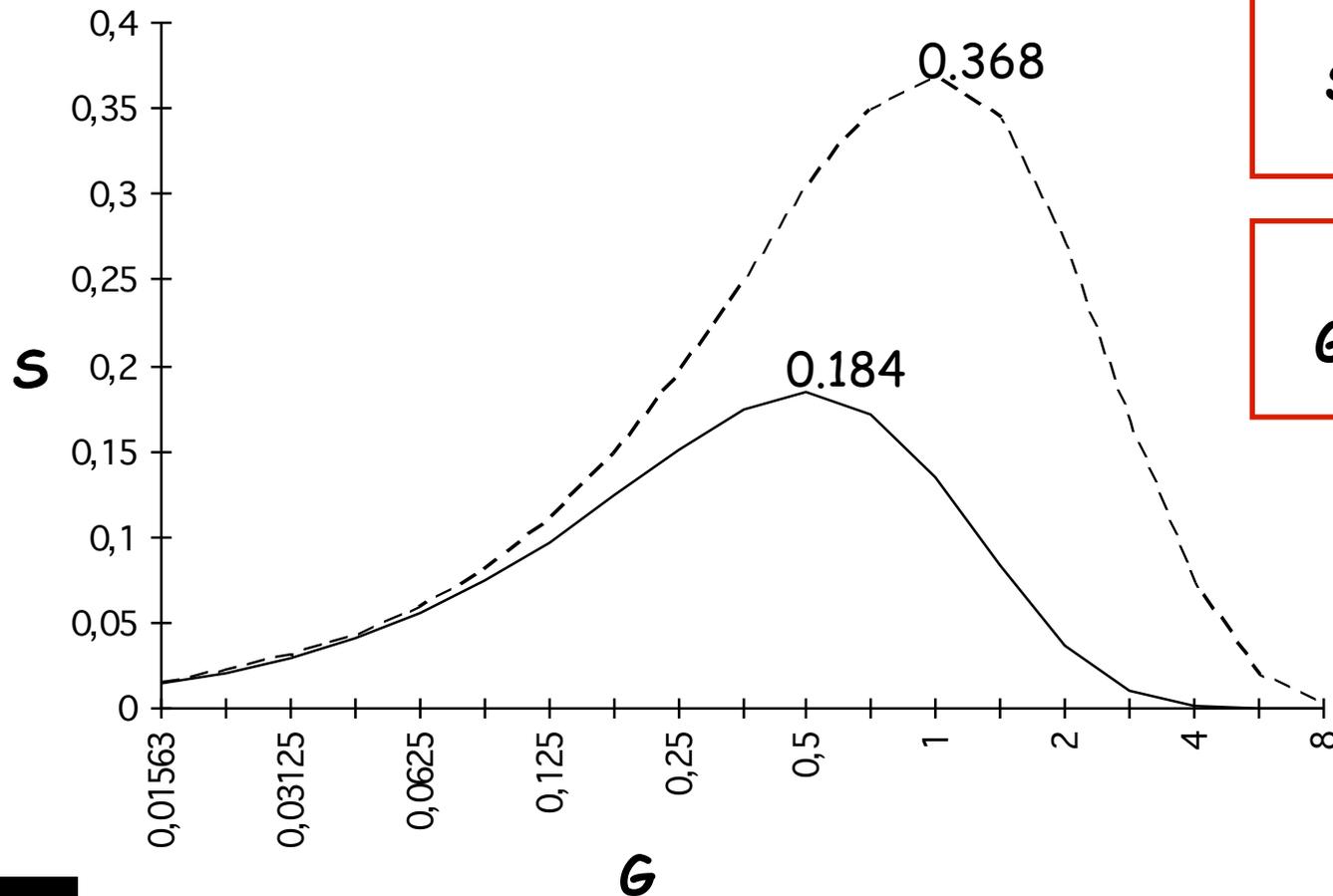
Le s-ALOHA (Exemple de ACK)



Le s-ALOHA (Exemple de NAK)



Performances de p-ALOHA et s-ALOHA



$$S = b\lambda_e / R$$

$$G = b\lambda_T / R$$

Les protocoles « Carrier Sense »

Les Protocoles « Carrier Sense » « écoutent » le canal pour savoir s' il est disponible ou non.

« Écouter » veut dire détecter une certaine activité sur le canal

En cas de disponibilité plusieurs stratégies sont possibles.

Il faut gérer les collisions !

- Non persistent CSMA
- 1P-CSMA
- P-CSMA

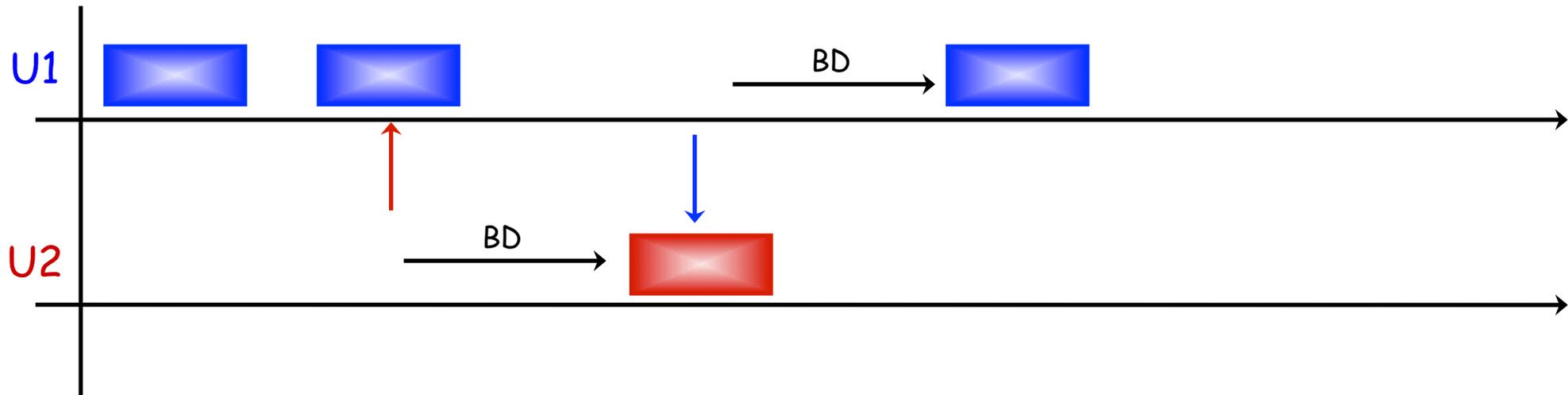
« Non persistent CSMA »

Il est le plus simple des protocoles CSMA !

NP-CSMA est constitué des modes suivants :

1. On écoute le canal;
2. SI le canal est libre, ALORS *Tx*.
3. SI le canal est occupé, ALORS on attend un certain temps aléatoire et on recommence (**1.**).

« Non persistent CSMA » (Exemple)



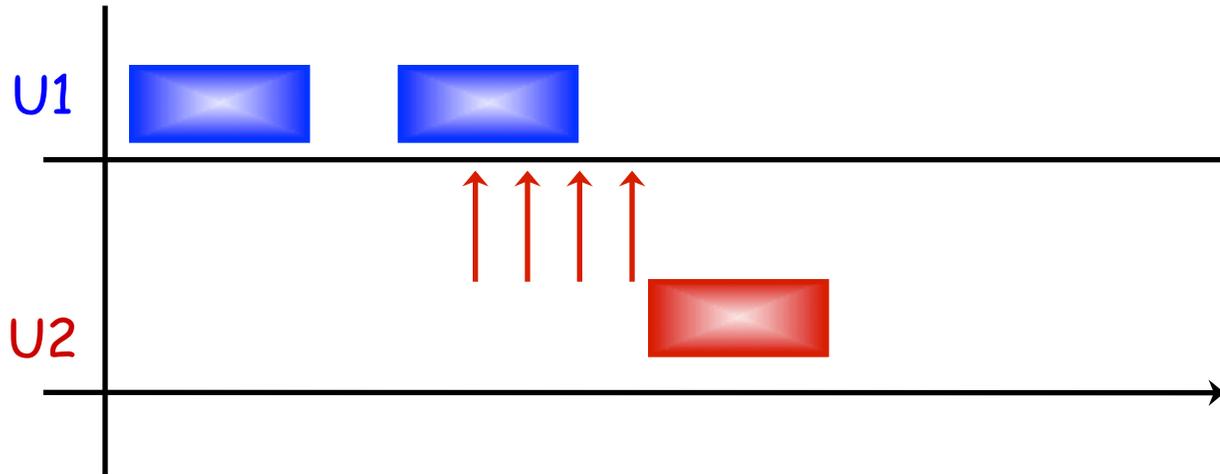
BD = Busy Delay

RTx = Retransmission

« 1-persistent CSMA »

1. On écoute le canal;
2. SI le canal est libre, ALORS *Tx*.
3. SI le canal est occupé, ALORS on continue à écouter le canal jusqu'à ce-qu' il soit libre et on transmet immédiatement.

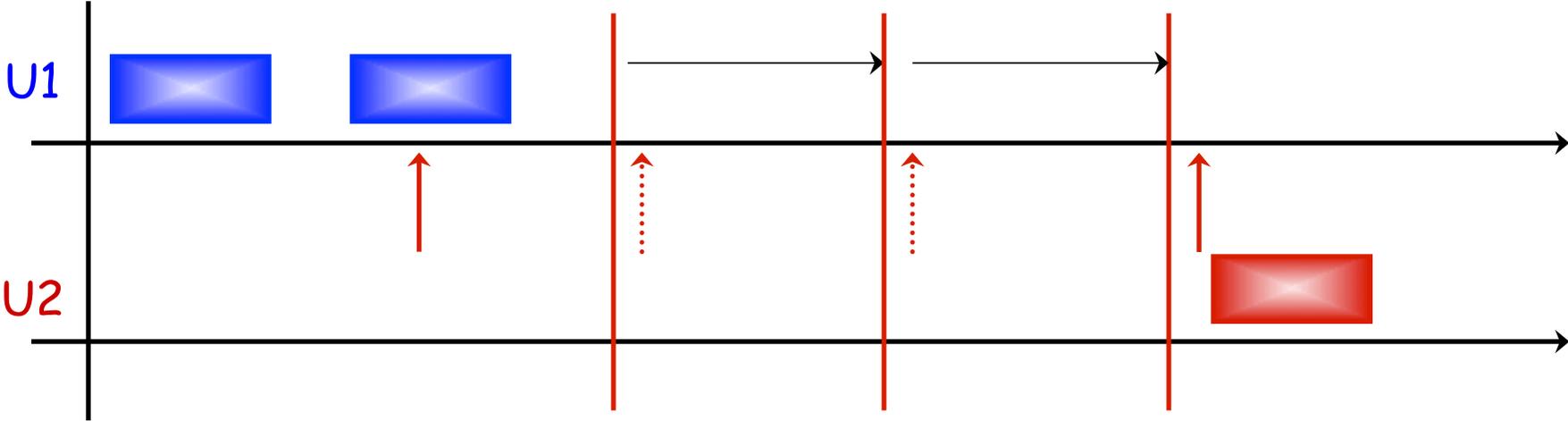
« 1-persistent CSMA » (Exemple)



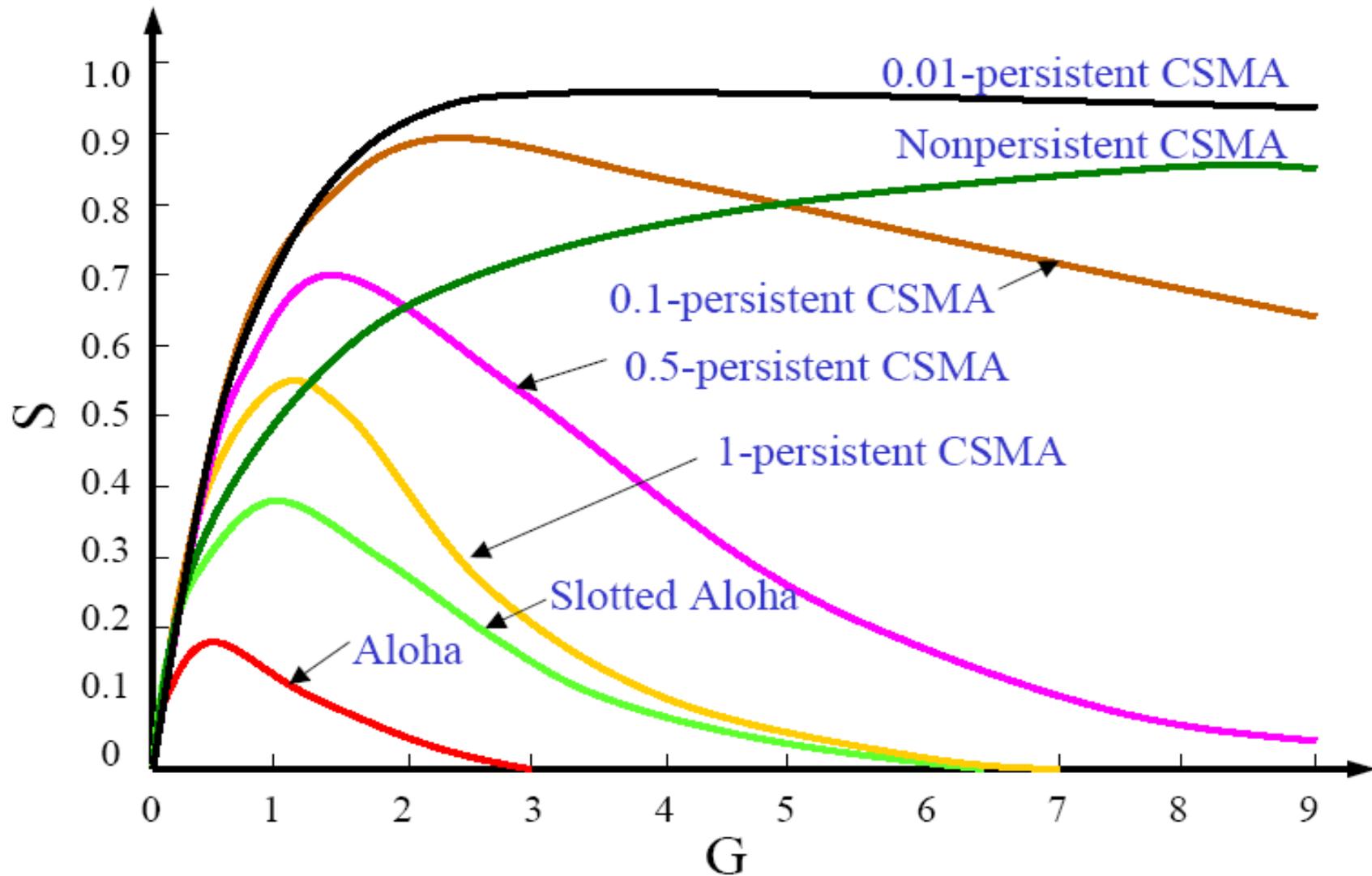
« p-persistent CSMA » - approche « slotted »

1. On écoute le canal;
2. SI le canal est libre, ALORS avec probabilité p on transmet, avec probabilité $(1-p)$ on retarde d'un « slot » et on recommence ;
3. SI le canal est occupé, ALORS on retarde d'un « slot » et on recommence.

« p-persistent CSMA » (Exemple)



Performances - Étude comparative



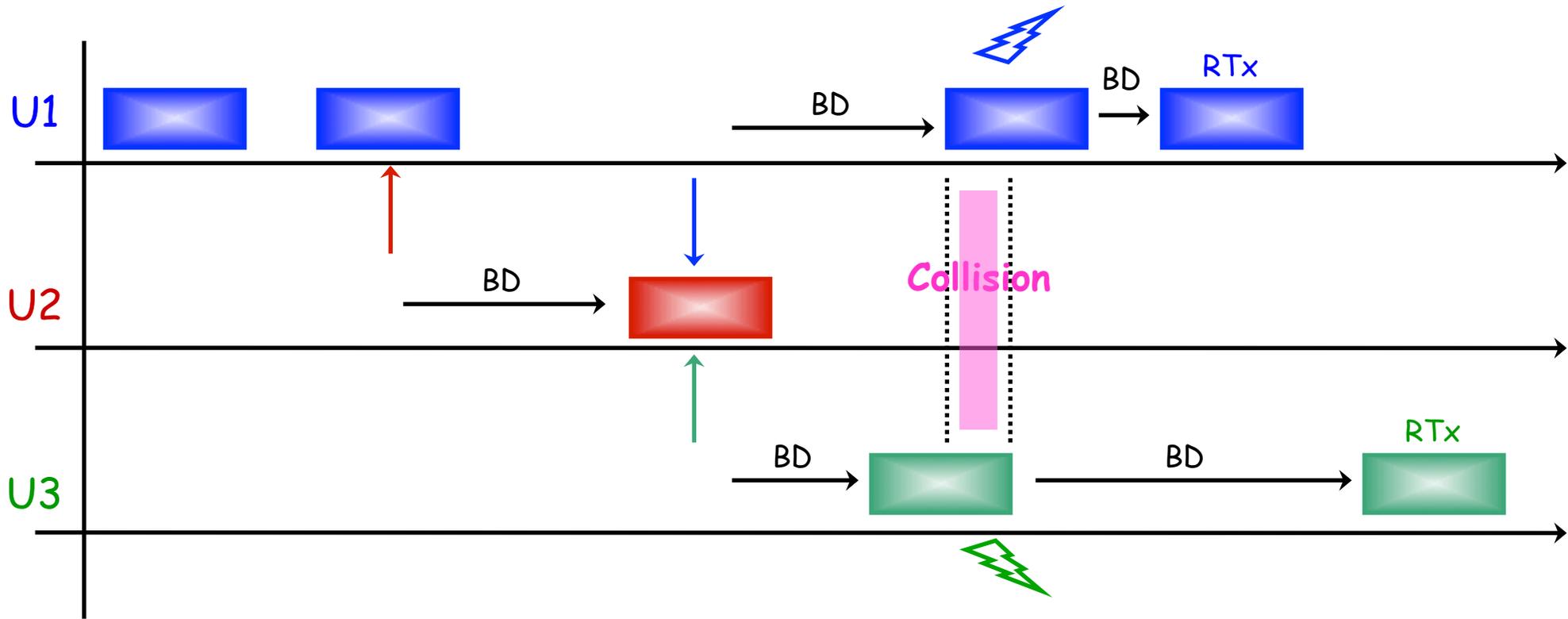
Gestion des collisions en CSMA

1. Dans les trois techniques précédentes des collisions sont possibles.
2. Le CSMA détecte les collisions si un NAK revient du récepteur ou bien une condition de « TIMEOUT » est détectée (cette condition est extrêmement chère en termes de performance) ;
3. SI une collision est détectée, ALORS on attend un temps aléatoire et on recommence (1.).

CSMA/Collision Detection

1. Si on détecte une collision, ALORS la transmission s'arrête immédiatement ;
2. Le premier utilisateur qui détecte la collision envoie un signal de brouillage  sur le canal pour indiquer aux autres utilisateurs qu'il-y-a eu collision.
3. Après avoir reçu le signal de brouillage, un utilisateur attend un temps aléatoire avant de retransmettre son message.
4. Le temps maximal requis pour détecter une collision est le double du temps de propagation.

CSMA/CD (Exemple)



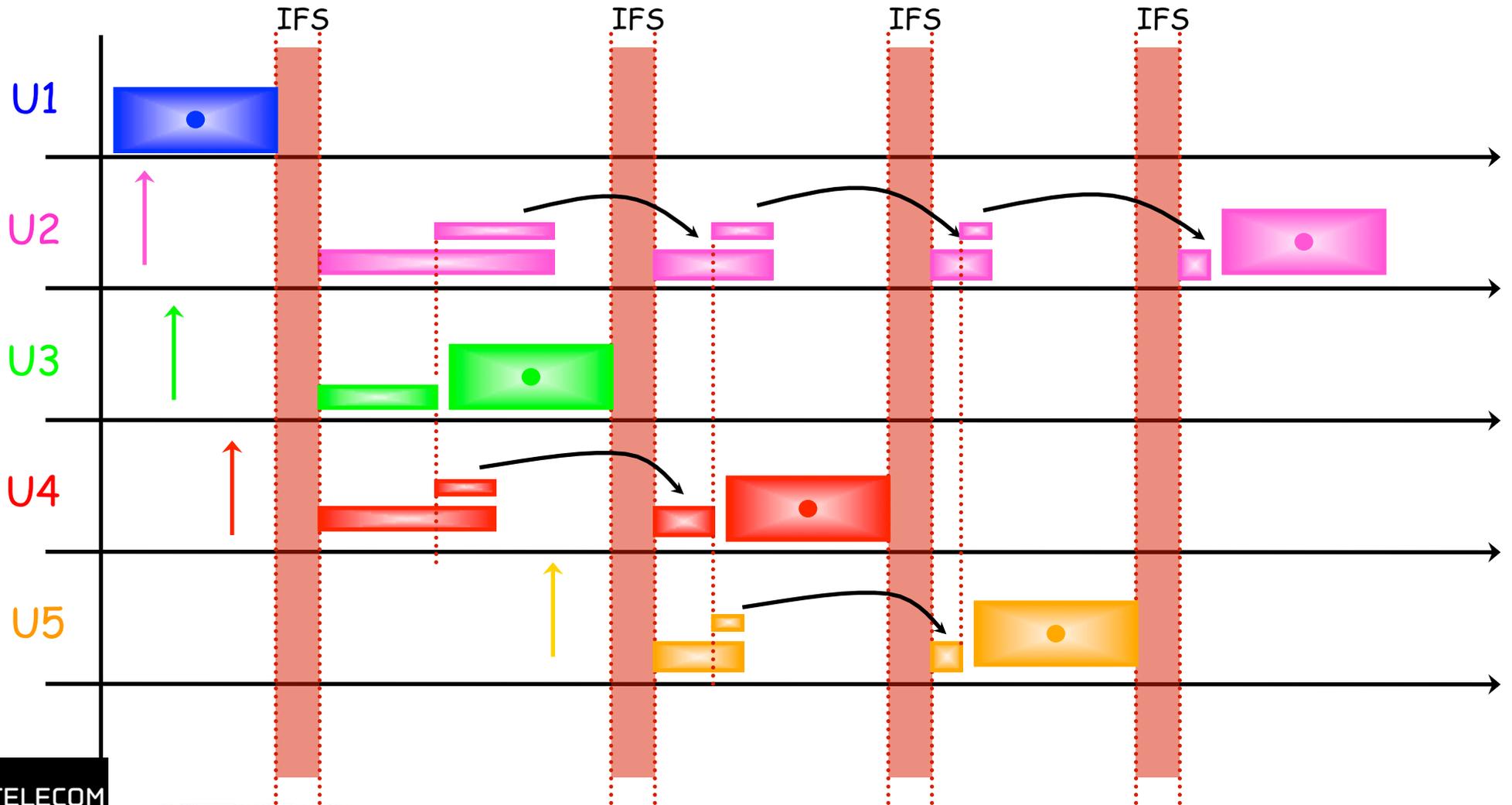
BD = Busy Delay

RTx = Retransmission

CSMA/Collision Avoidance

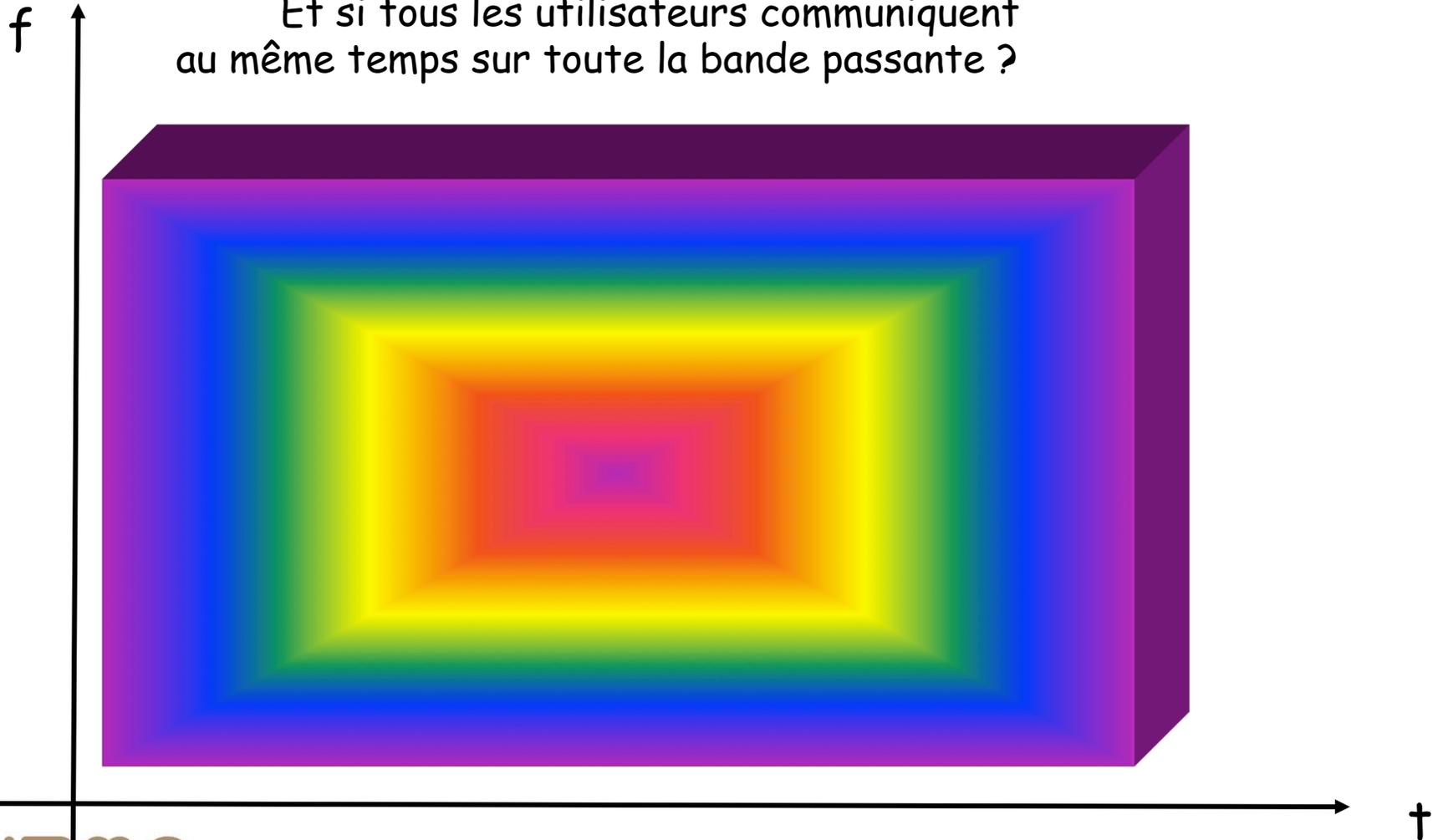
1. Tous les utilisateurs écoutent le canal (id. CSMA/CD);
2. Si un utilisateur a un message à émettre et le canal est occupé, alors il attend la fin de la transmission + un temps extra appelé IFS (pour « Inter Frame Spacing ») ;
3. Il choisit un nombre aléatoire de « slots » (valeur initiale d'un compteur à rebours) à l'intérieur de la fenêtre d'émission ;
4. S'il y a un autre utilisateur qui utilise le canal pendant la fenêtre de tir, alors il gèle son compteur ;
5. Il résume son compte à rebours après que les autres utilisateurs ont terminé leurs transmissions.
6. Si le compteur est nul, alors il démarre la transmission immédiatement.

CSMA/CA (Exemple)



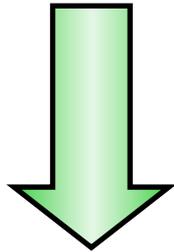
Le CDMA (« Code Division Multiple Access »)

Et si tous les utilisateurs communiquent
au même temps sur toute la bande passante ?



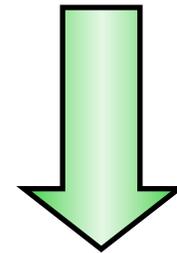
Le CDMA - Quelques questions

Qu'est ce qu'on alloue ?



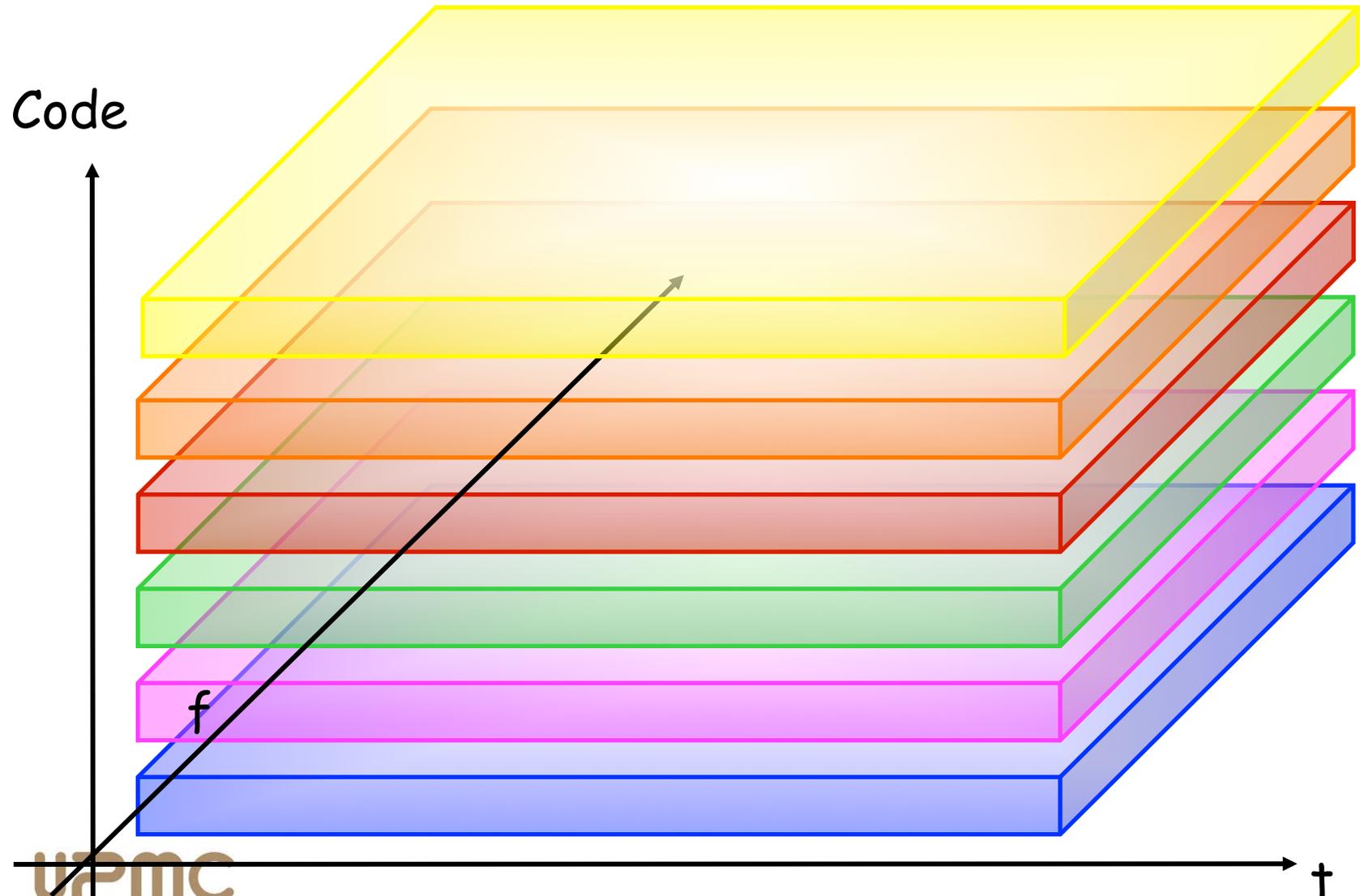
Un code
(mot de passe)

Comment séparer les utilisateurs entre eux ?

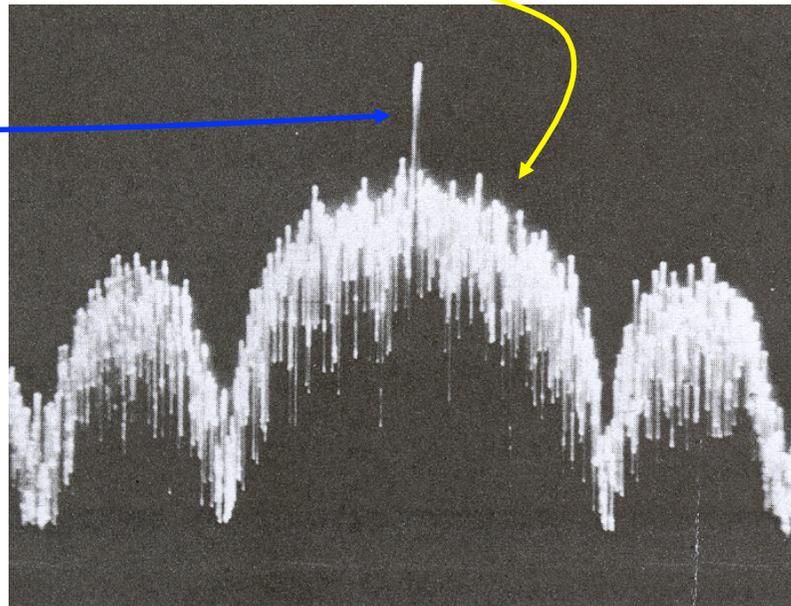
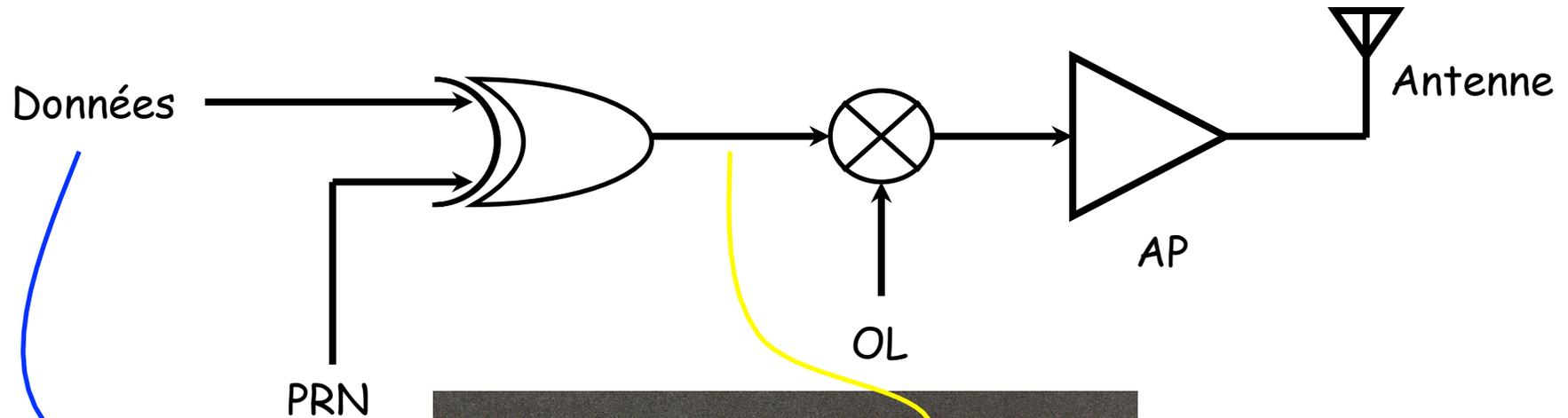


Codes orthogonaux

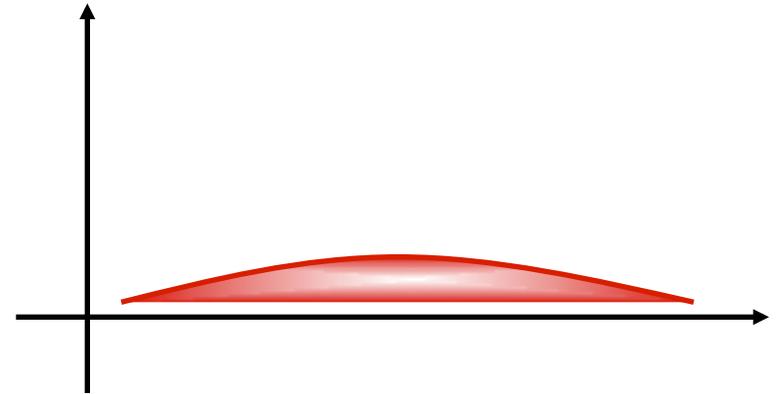
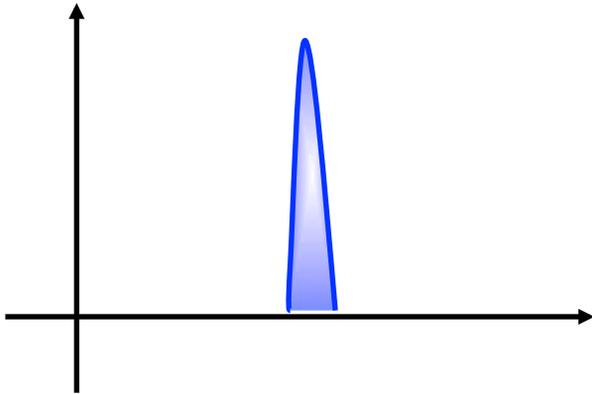
Le CDMA - La composante « code »



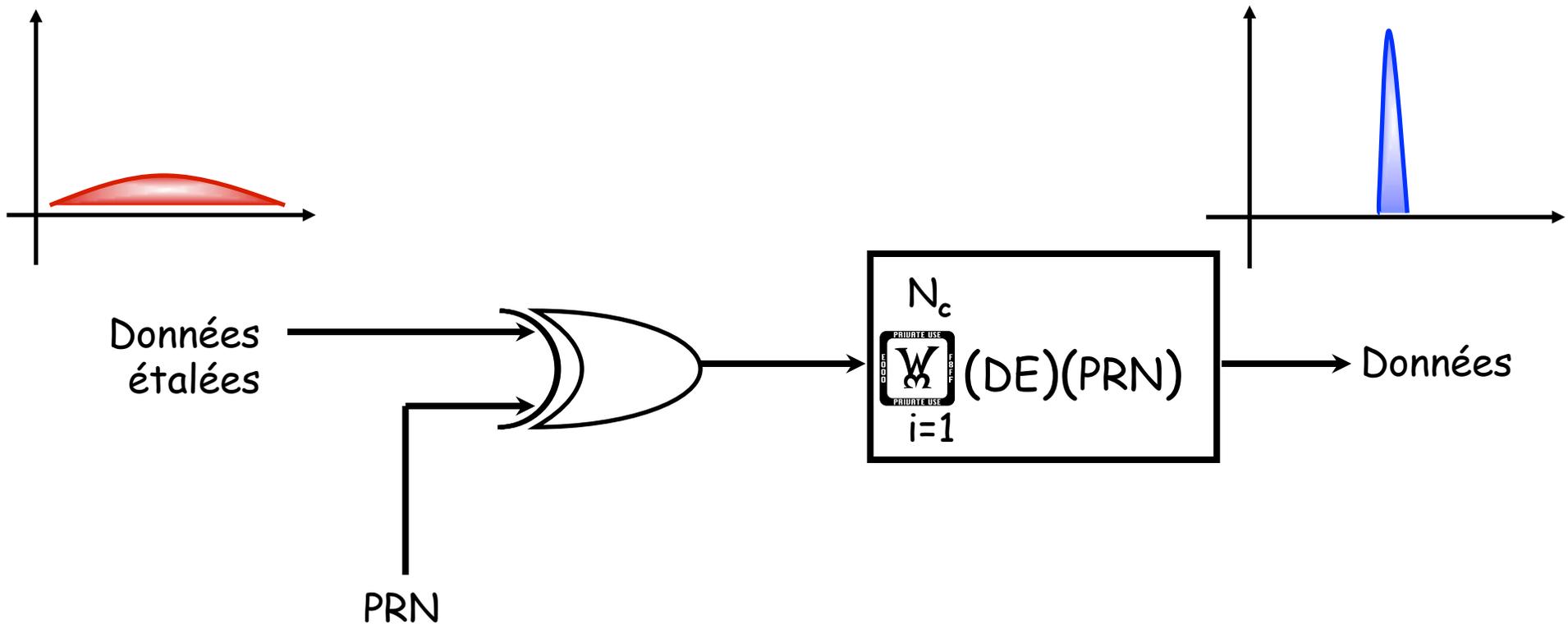
L'étalement de spectre



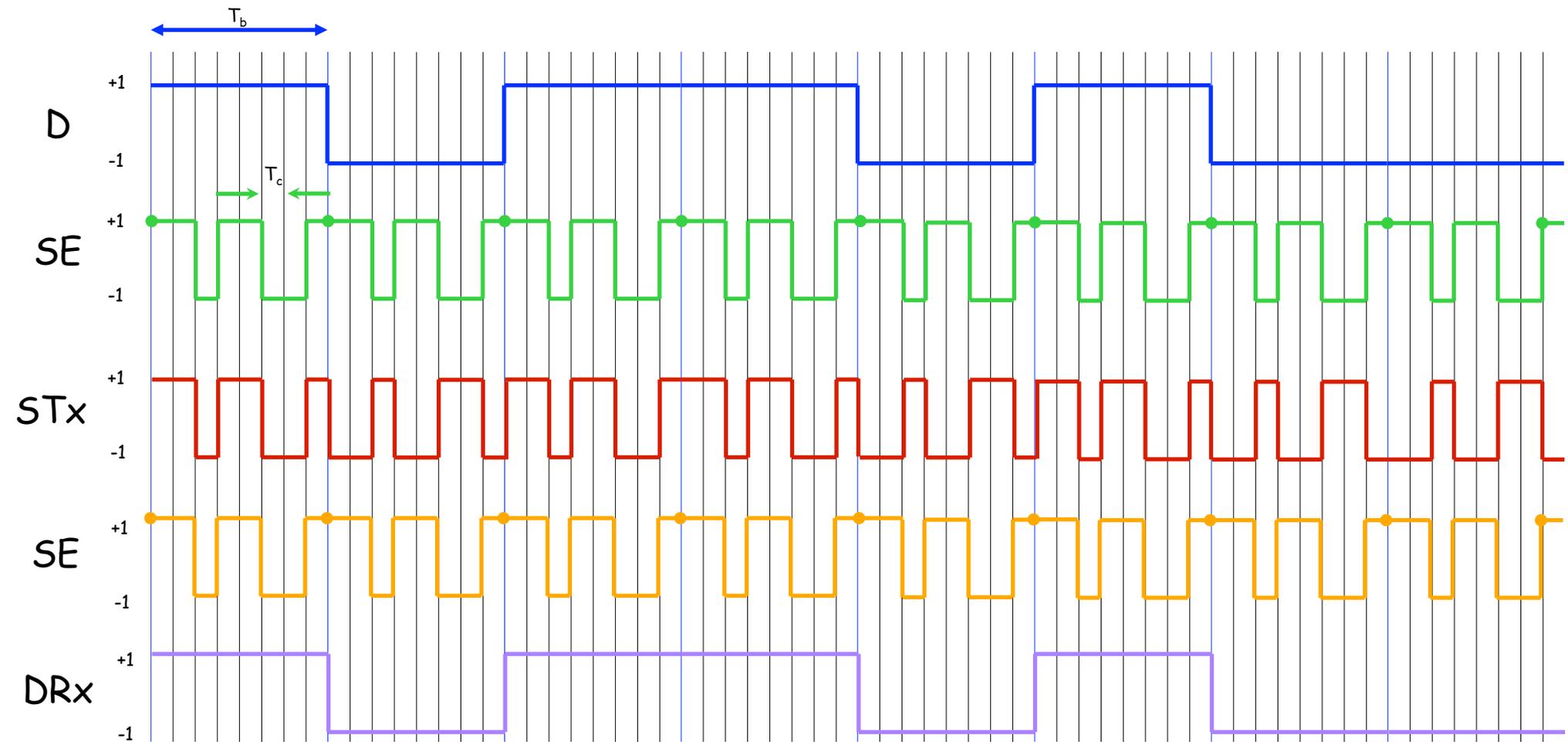
L'étalement de spectre (suite)



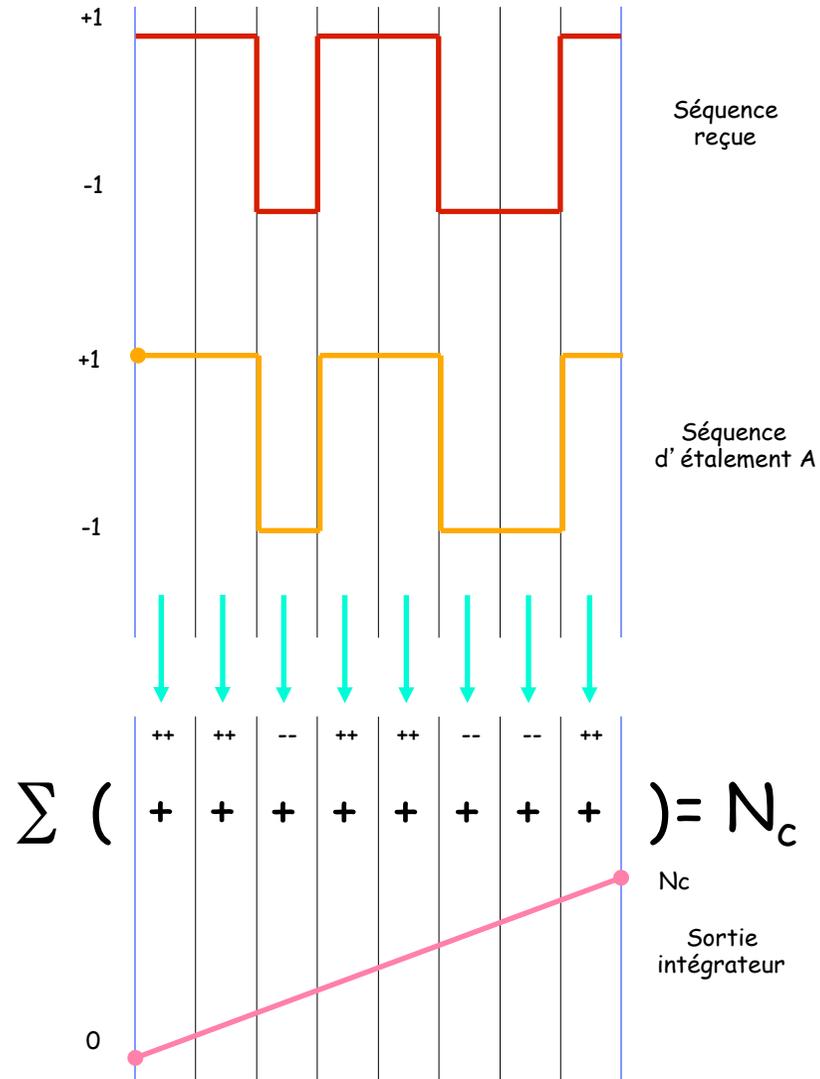
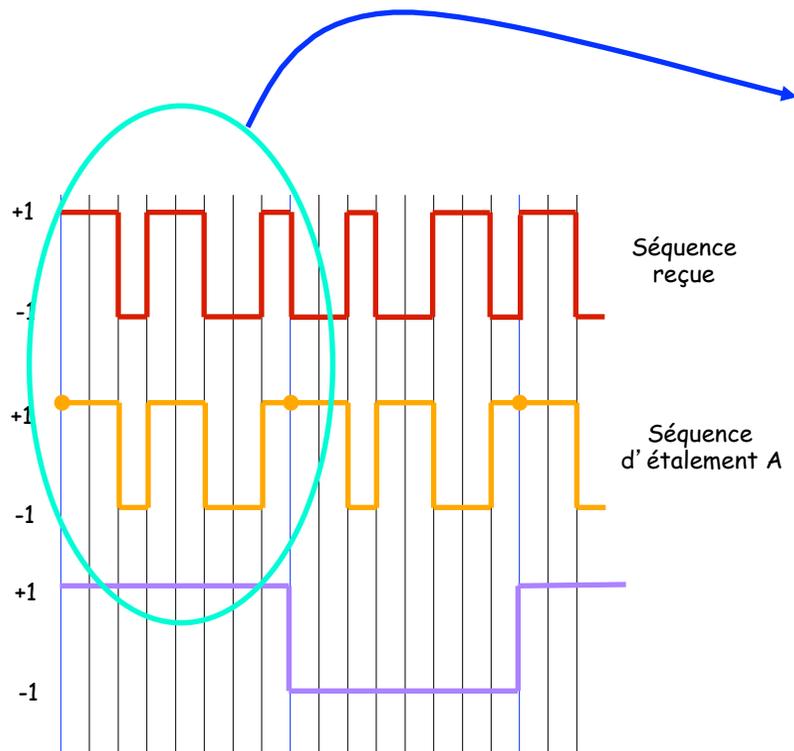
Le des étalement



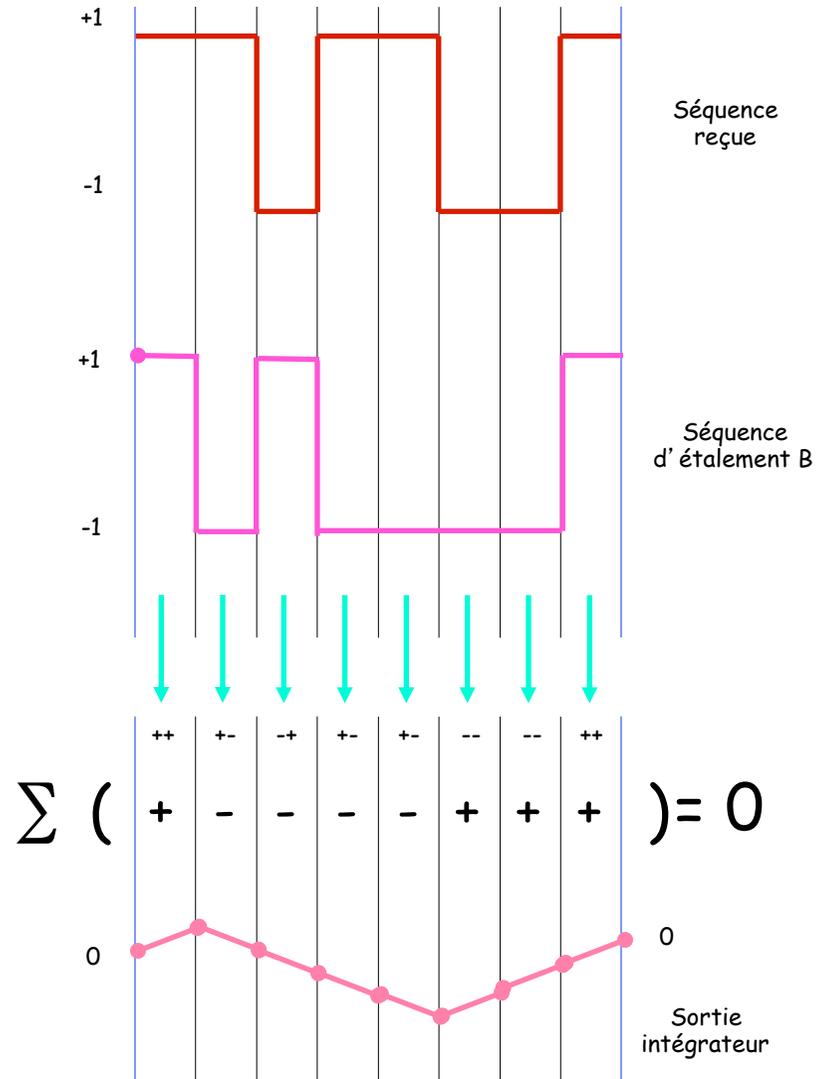
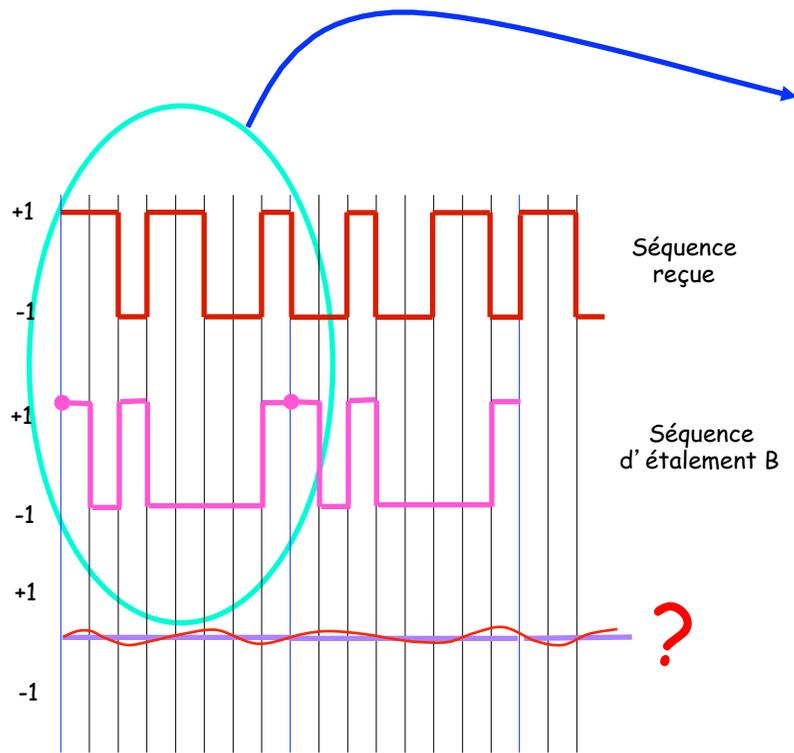
Le CDMA et l'étalement de spectre



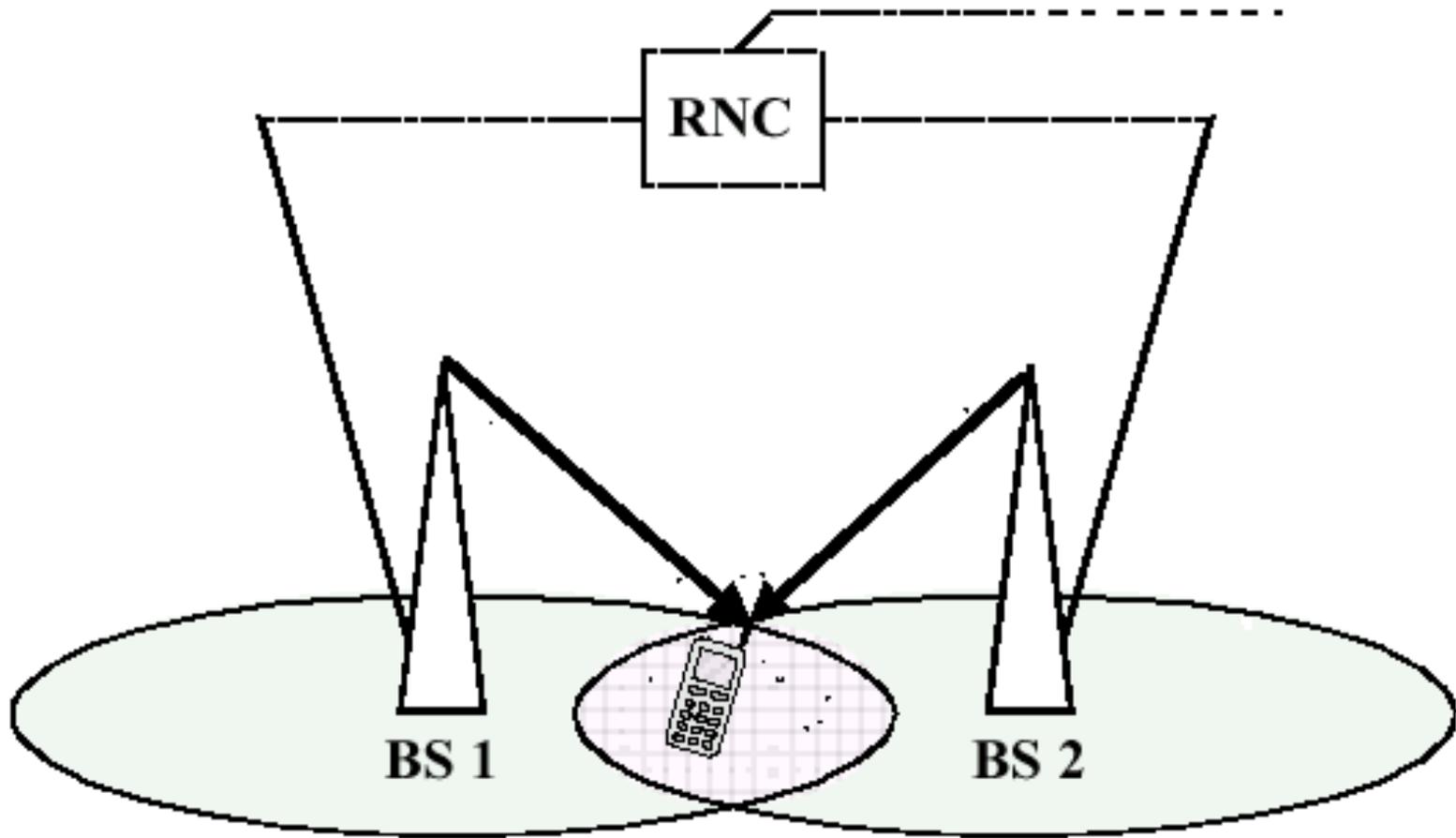
Le CDMA - Dés étalement de l'utilisateur A



Le CDMA - Dés étalement de l'utilisateur B



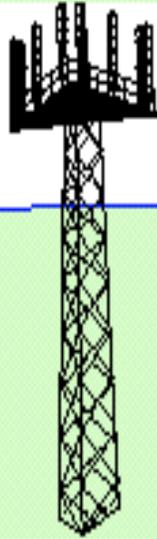
Le CDMA - Approche cellulaire



Le CDMA - Approche cellulaire (suite)

Code d'embrouillage 1

Code d'embrouillage 2



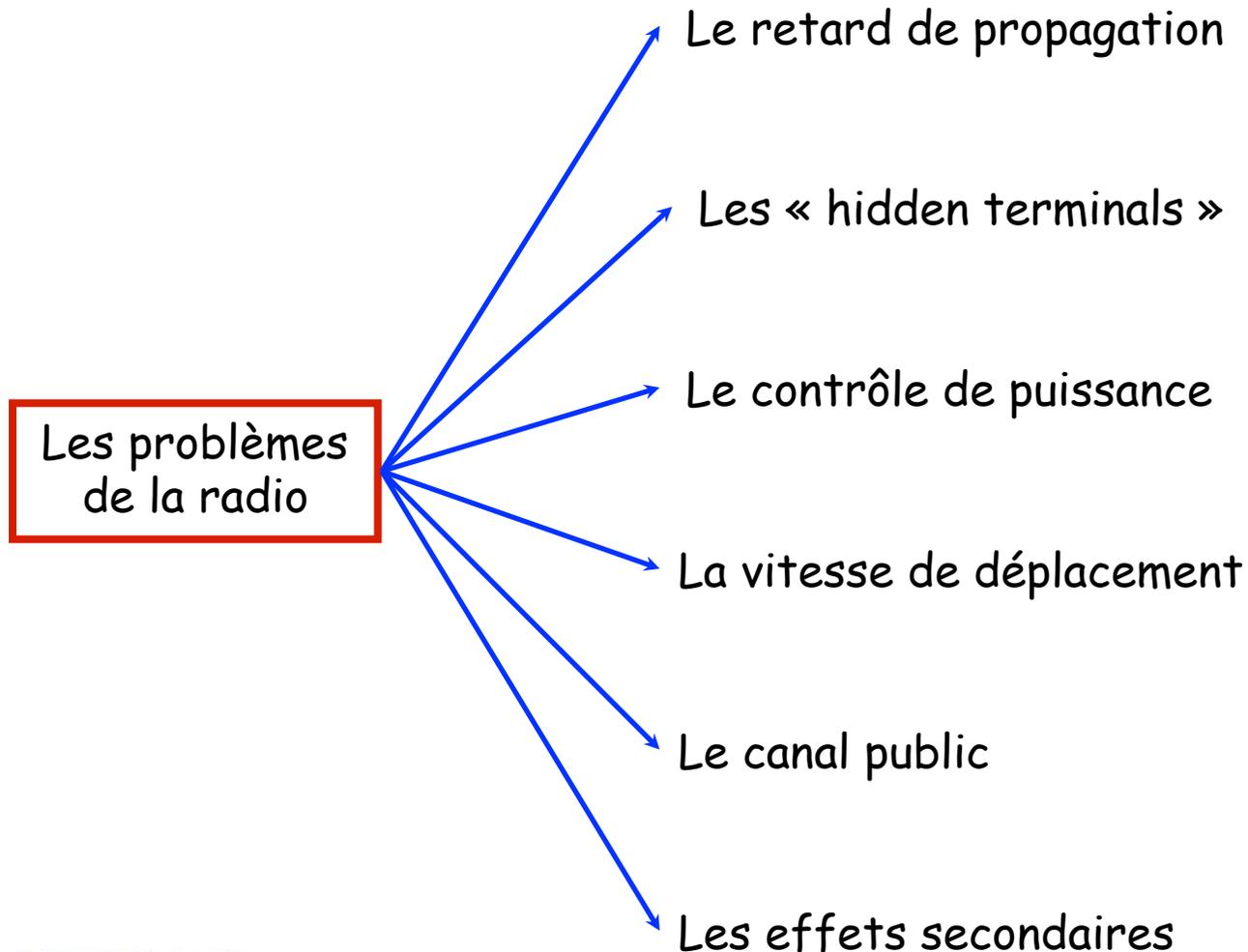
Station de base 1

Station de base 2

Plan

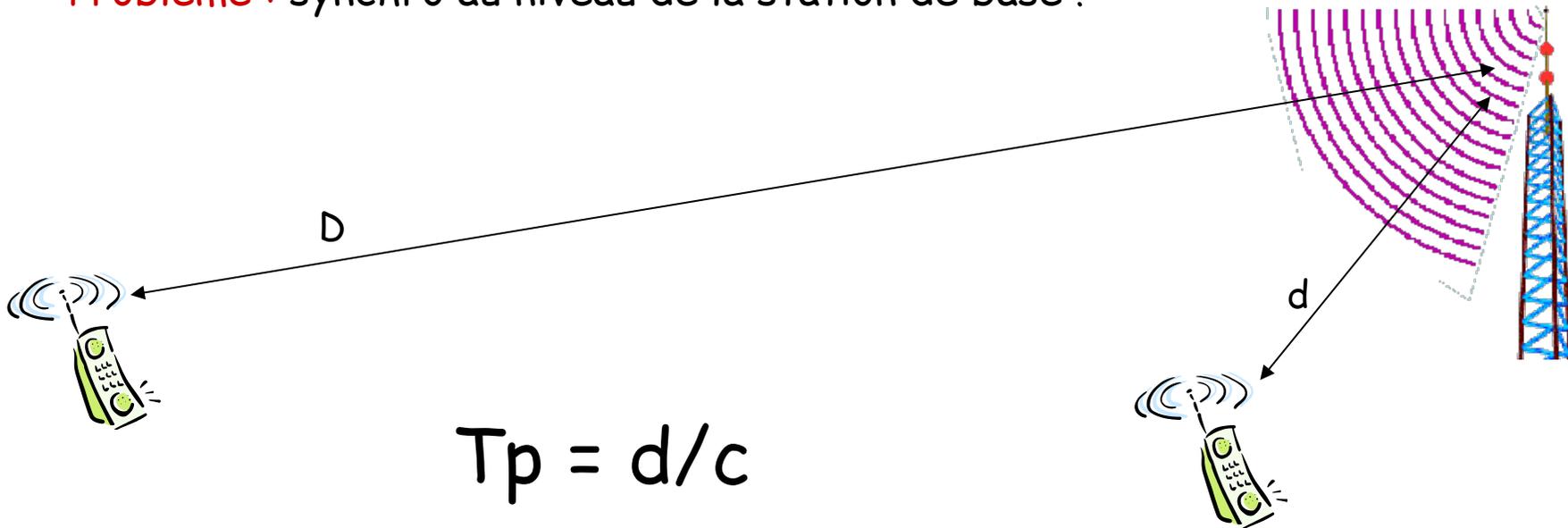
- I. Introduction - le RTC;
- II. Le duplex téléphonique;
- III. Capacité d'un réseau radio;
- IV. L'accès multiple;
- V. La technologie radio;

Les problèmes issus de la radio



Le retard de propagation

Problème : synchro au niveau de la station de base !

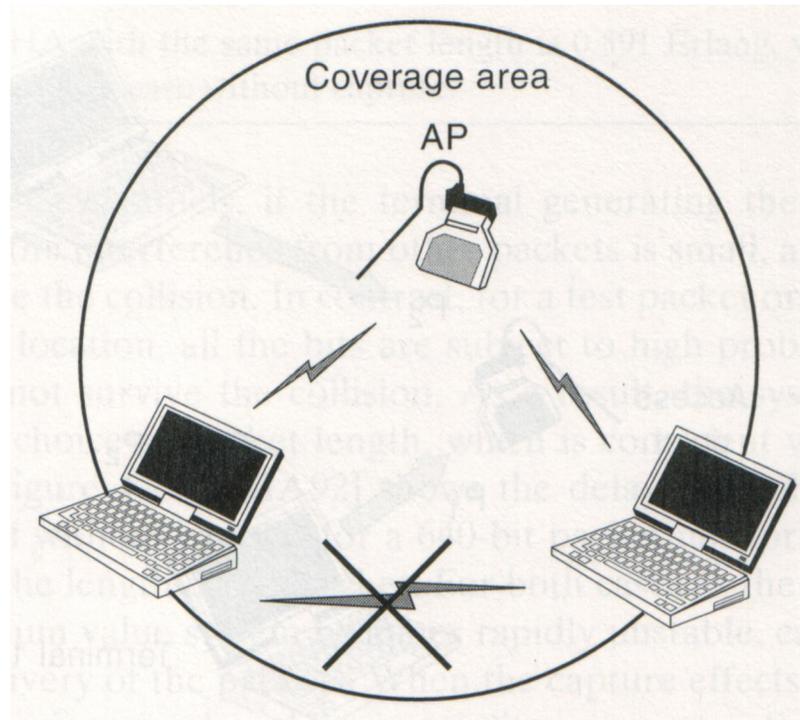


Ex: $d = 150 \text{ m}$ $T_p = 500 \text{ ns}$
 $D = 30 \text{ km}$ $T_p = 100 \mu\text{s} !$

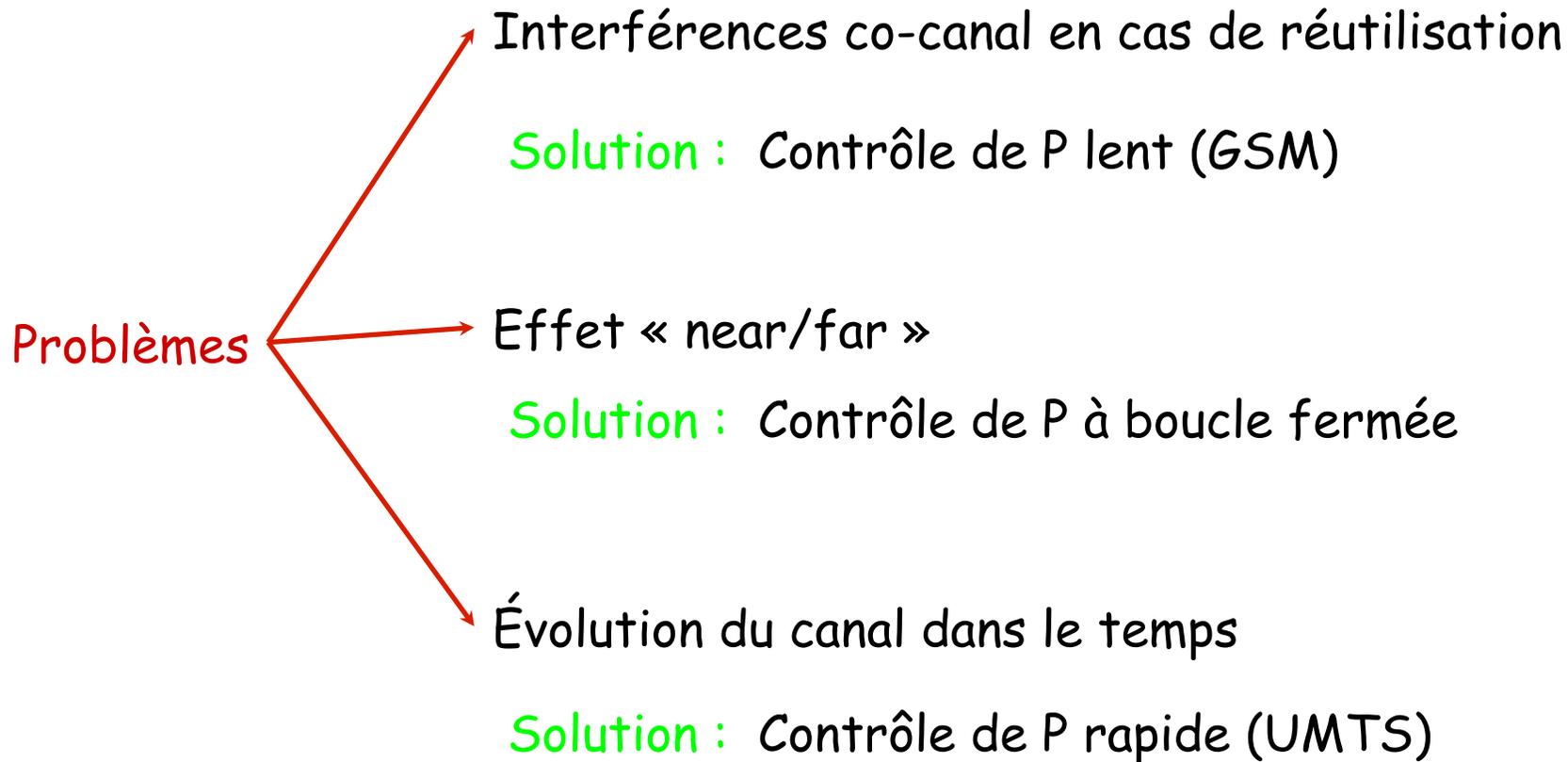
Solution : gestion du « timing advance »

Les « hidden terminals »

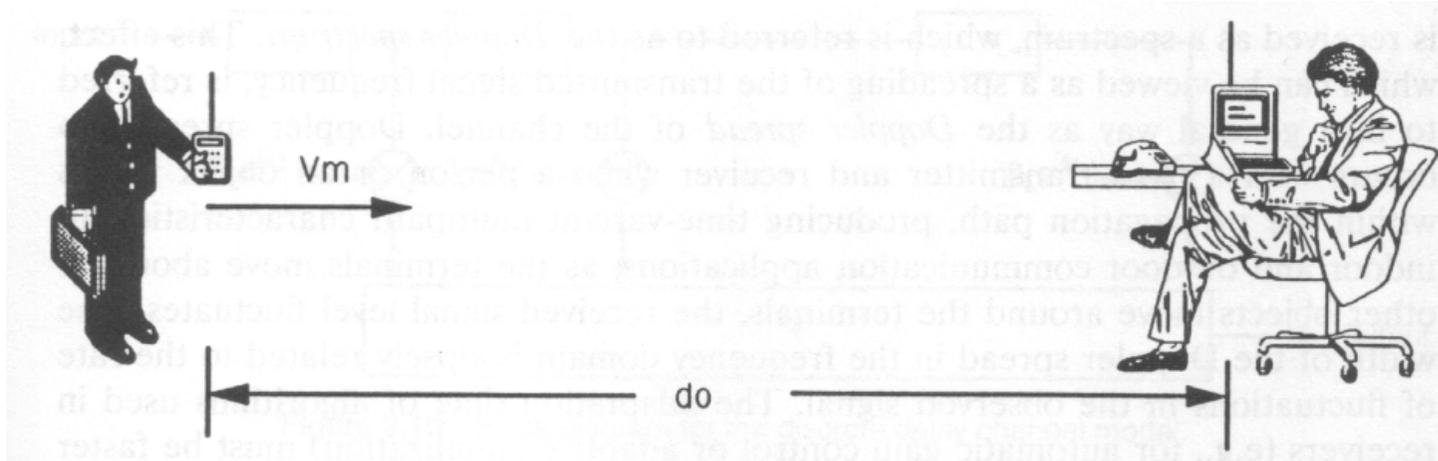
Problème : Comment faire le « sensing » dans le cas du « wireless » ?



Le contrôle de puissance



L'effet Doppler

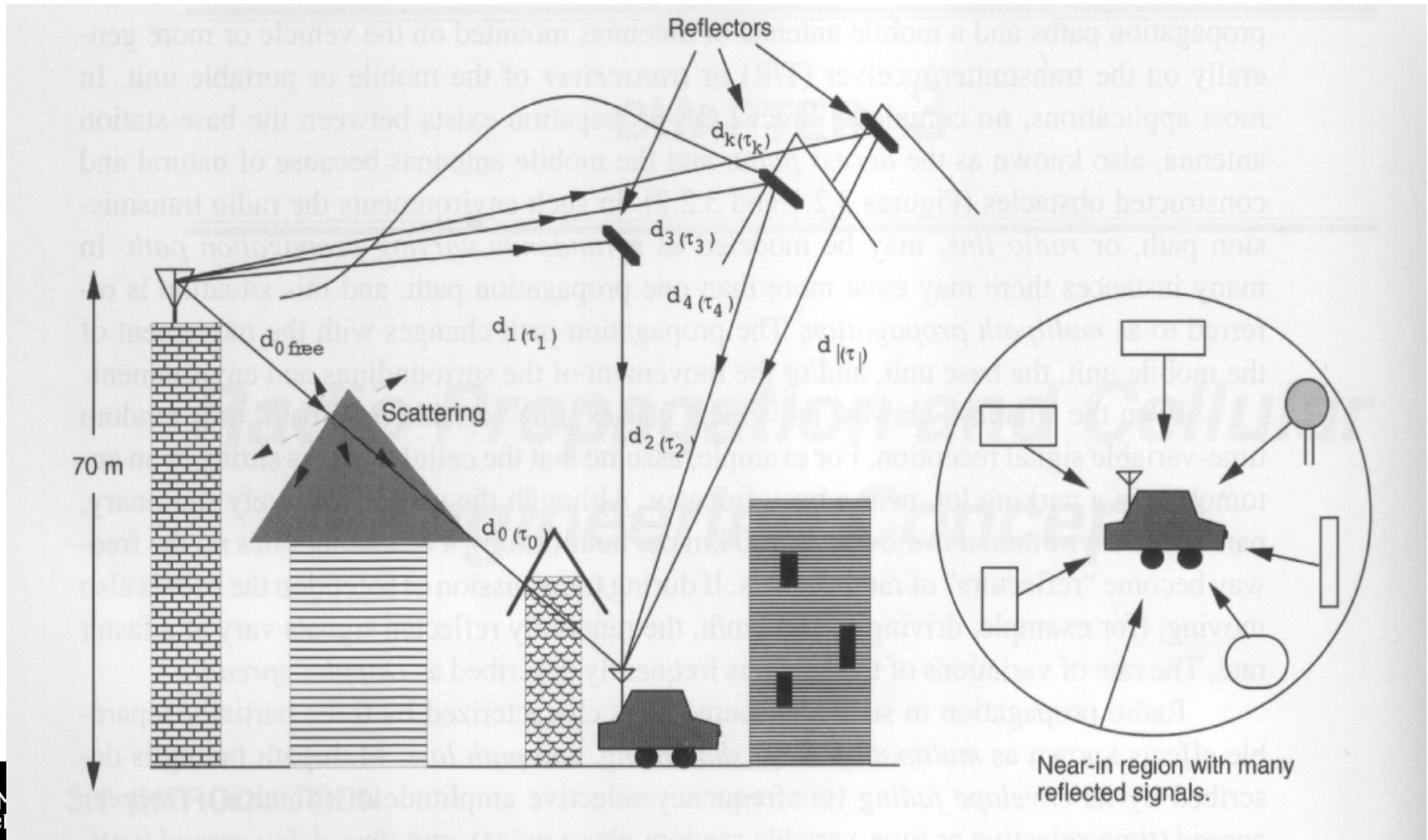


Problème :

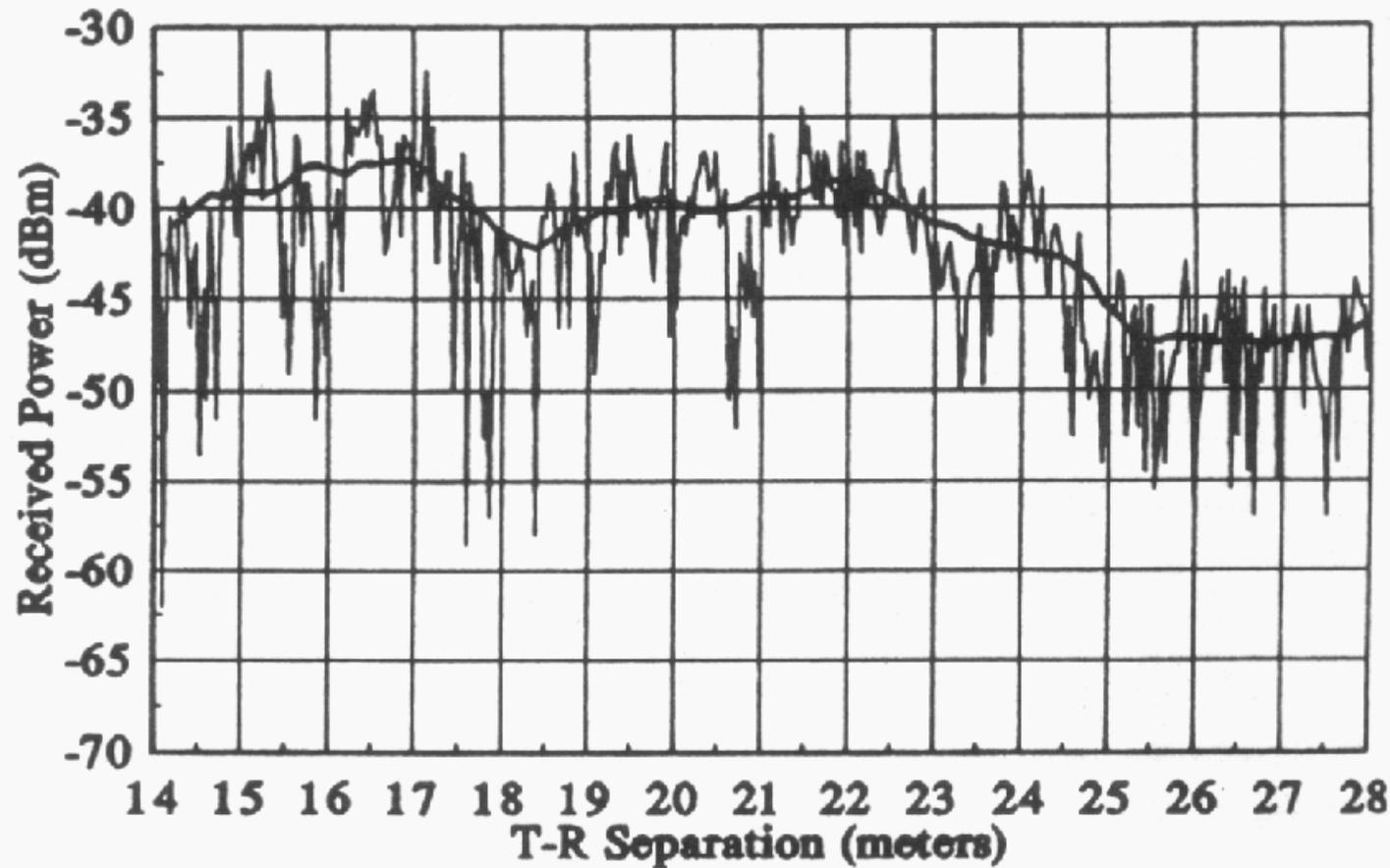
$$f_D = f_c \frac{v_m}{c}$$

Solution : estimation de la dynamique du canal !

Le multi-chemin et le « fading »



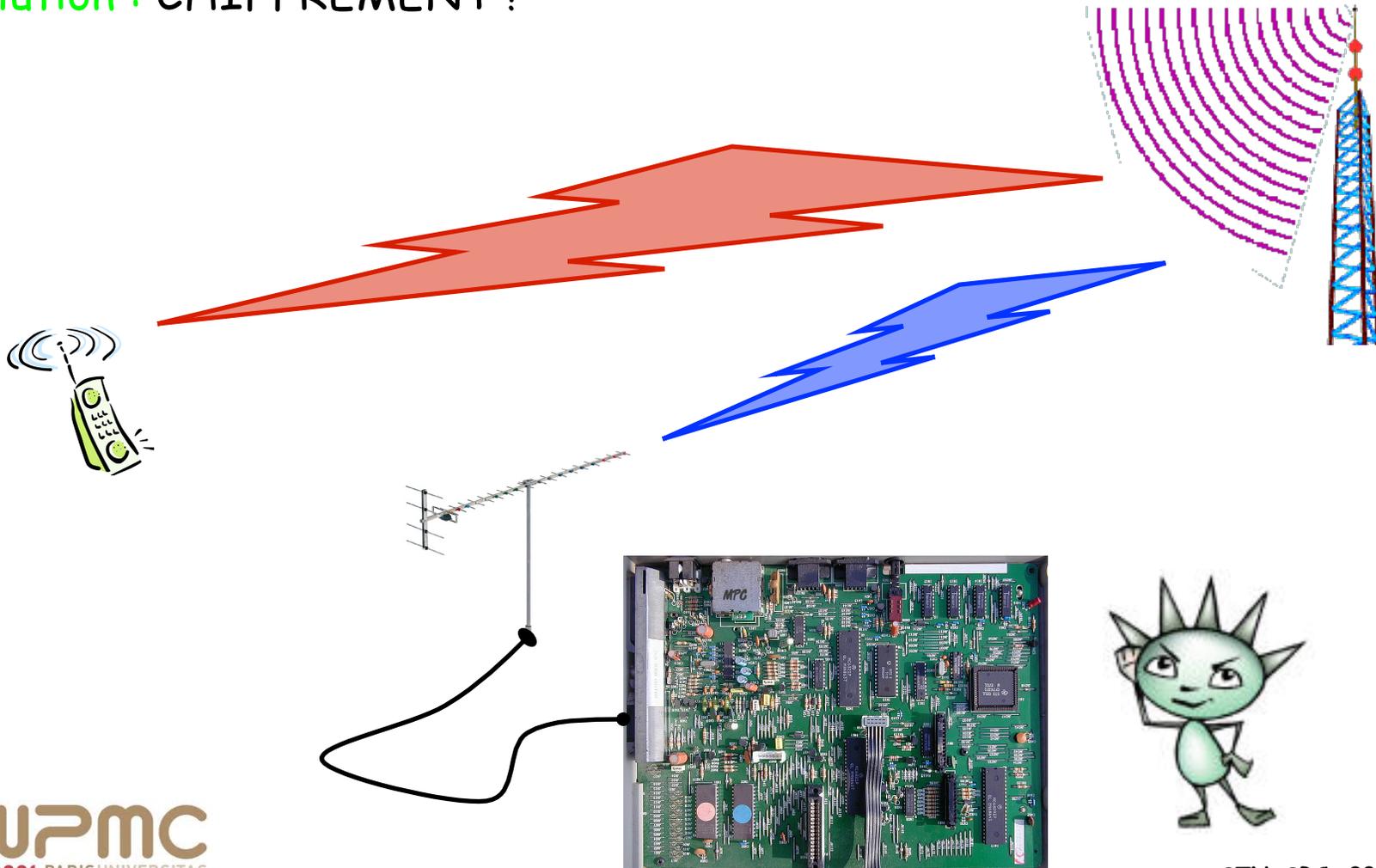
La dynamique du canal



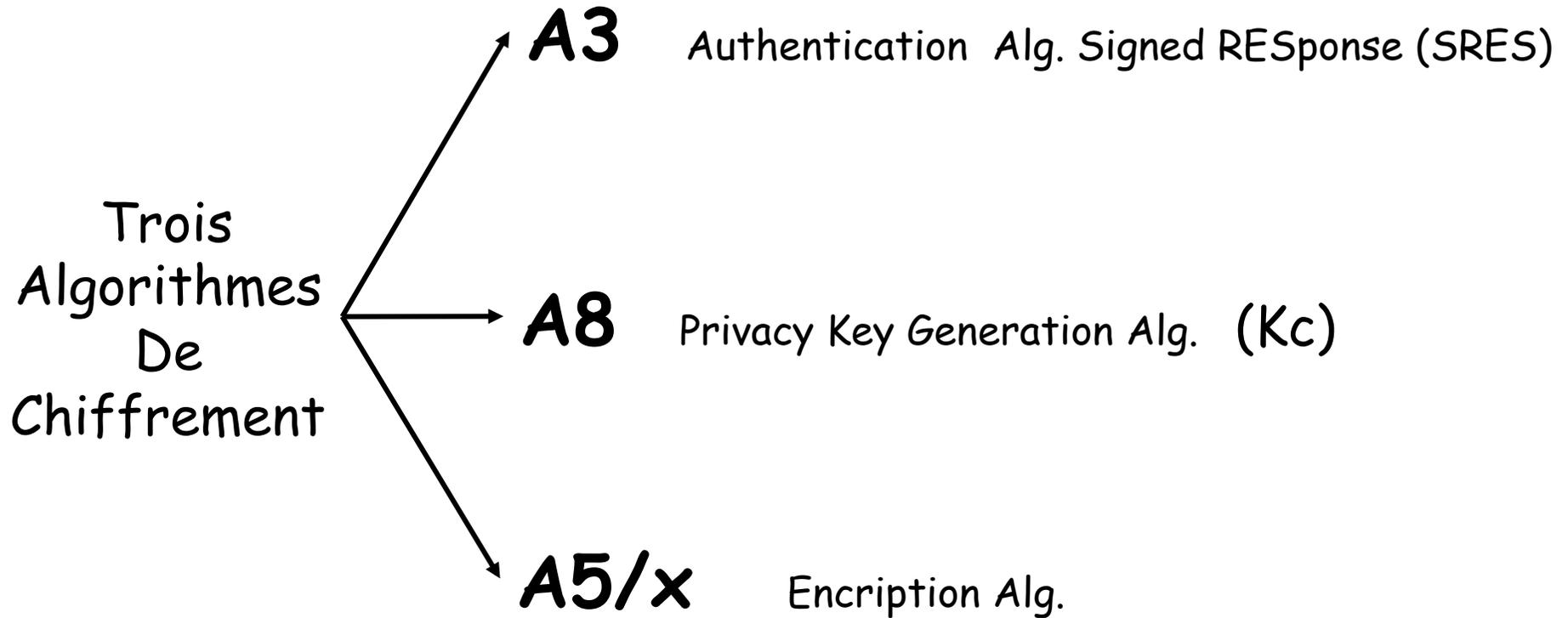
Solution : égalisation !

Le canal public

Solution : CHIFFREMENT !

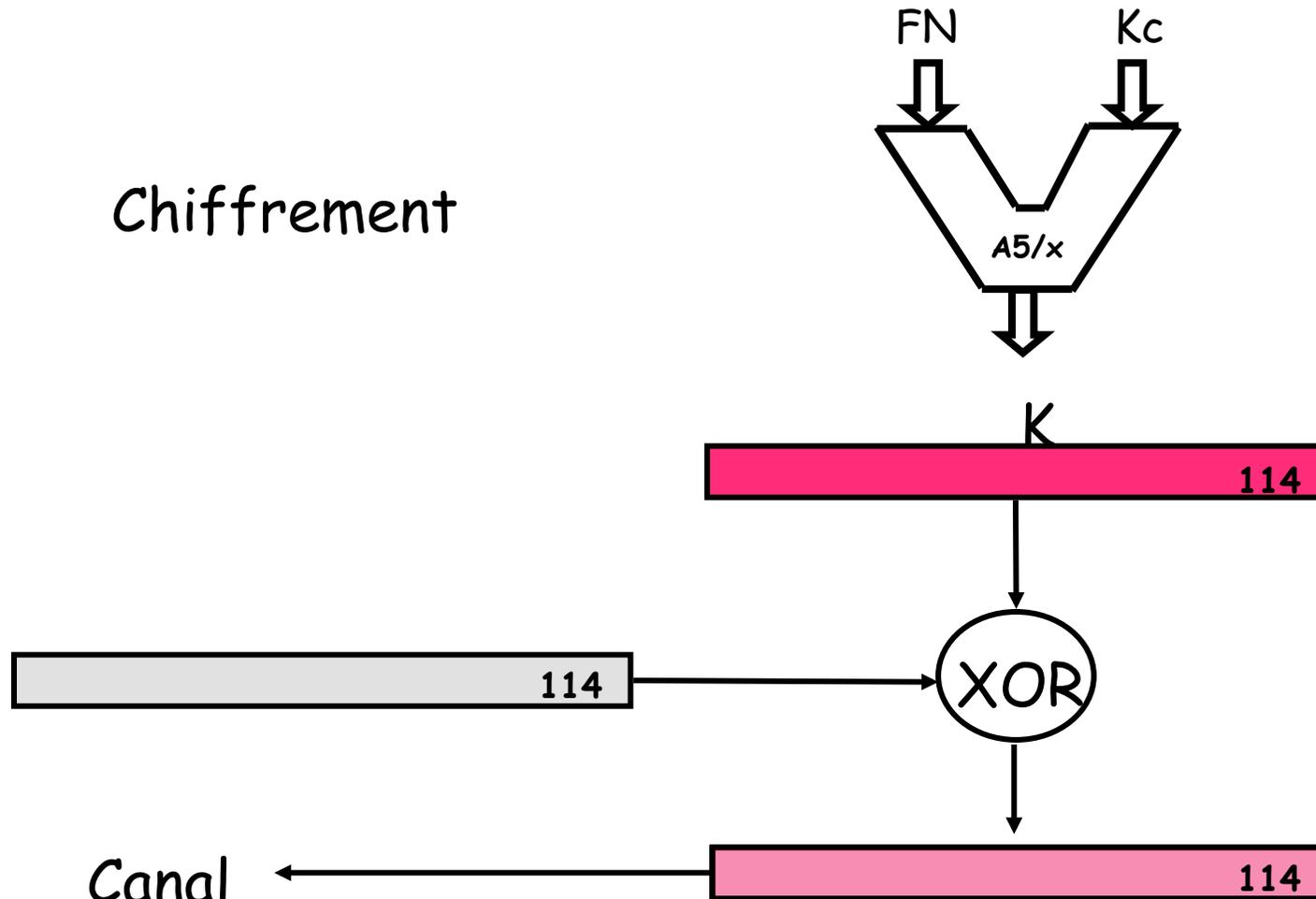


Exemple : le chiffrement du

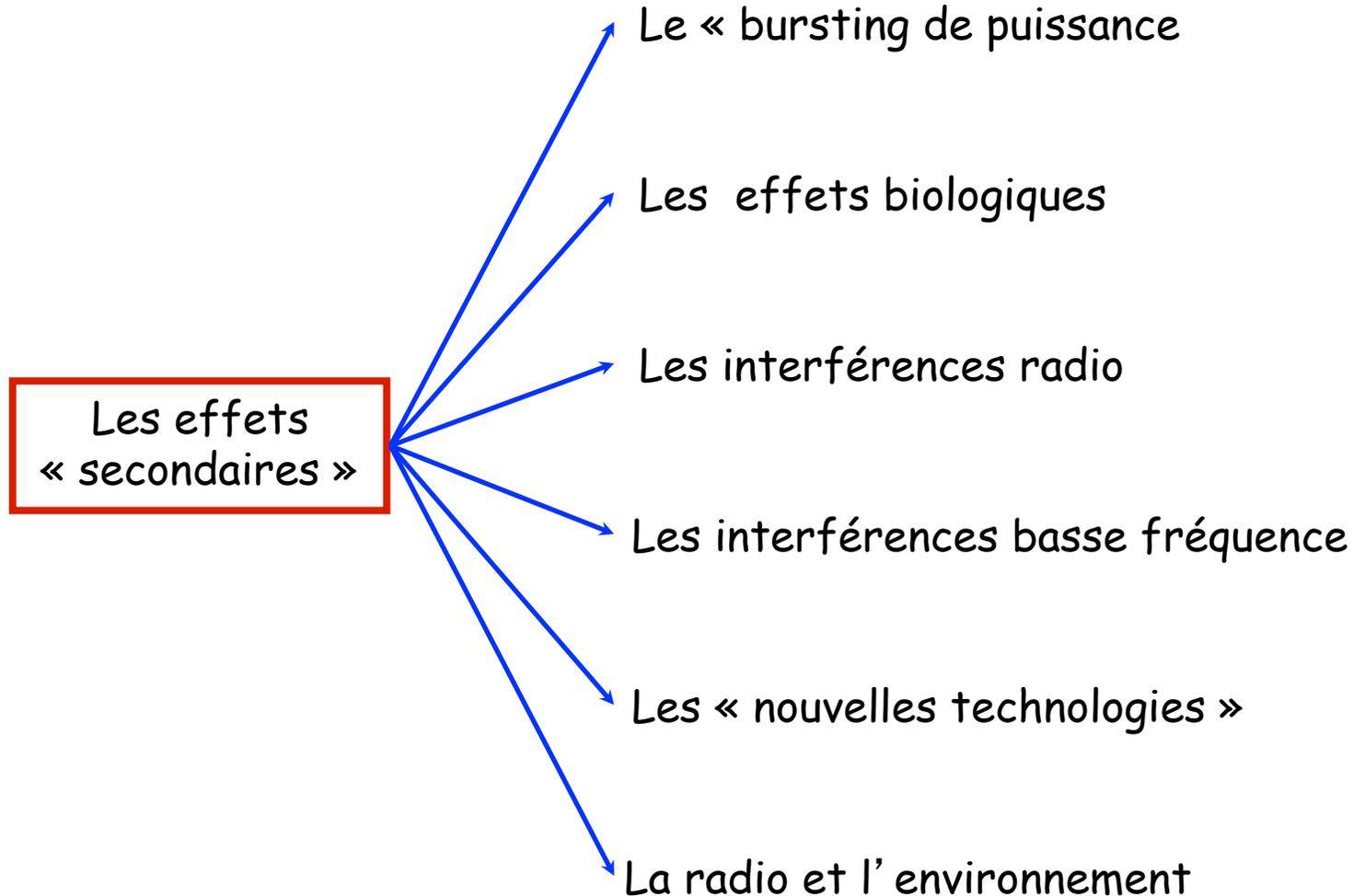


L' algorithme A5/x

Chiffrement



Les effets secondaires



L' image du jour (trouver l'erreur)



L' image du jour (suite)



Annexe - Abréviations et acronymes

ADPCM	Adaptive differential pulse code modulation	ISDN	Integrated Services Digital Network
AMPS	Advanced Mobile Phone Service	ISM	Industrial, Scientific, and Medical (bands, devices)
CDMA	Code division multiple access	ITU-R	International Telecommunication Union-radio communication sector
CDPD	Cellular Digital Packet Data (U.S.)	LEOS	Low earth orbit satellite
CEPT	Conférence Européenne des Postes et Télécommunications	MAC	Medium access control (layer)
CRC	Cyclic redundancy check	MNP	Microcom Networking Protocol
CT	Cordless Telephone (interim ETSI standards, e.g., CT1)	MPT	Ministry of Posts and Telecommunications (Japan)
DCA	Dynamic channel assignment	MSS	Mobile satellite services (or systems)
DCS1800	Digital Cellular System 1800 (Europe)	NMT	Nordic Mobile Telephone (Europe)
DECT	Digital European Cordless Telecommunications	PACS	Personal Access Communications Services
DLC	Data link control (layer)	PBX	Private branch exchange
DQPSK	Differential quaternary phase shift keying	PCN	Personal Communications Network (Europe)
EIA	Electronic Industries Association (U.S.)	PCS	Personal Communications Services (U.S.)
ERP	Effective radiated power	PDC	Personal Digital Cellular (Japan)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	PHS	Personal Handyphone System (Japan, formerly PHP)
FCC	Federal Communications Commission (U.S.)	PMR	Private mobile radio
FDD	Frequency division duplexing	PRMA	Packet Reservation Multiple Access
FDMA	Frequency division multiple access	PSTN	Public Switched Telephone Network
FEC	Forward error correction (channel coding; e.g., convolutional coding)	QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
FM	Frequency modulation	RACE	R & D in Advanced Communications Technologies in Europe
FPLMTS	Future Public Land Mobile Telecommunication Systems	RCR	Research & development Center for Radio systems (Japan)
FSK	Frequency shift keying	RF	Radio frequency
GFSK	Gaussian filtered FSK	RLL	Radio local loop
GMSK	Gaussian minimum shift keying	RTMS	Radio Telephone Mobile System (Italy)
GPRS	General Packet Radio Service (GSM connectionless packet service, ETSI, Europe)	RX	Receive or reception
GSM	Groupe Spécial Mobile (originally) currently Global System for Mobile Communication (ETSI, Europe)	SMR	Specialized mobile radio
HIPERLAN	High Performance Radio Local Area Network (ETSI, Europe)	TACS	Total Access Communication System (Europe)
INMARSAT	International Maritime Satellite Organization	TDD	Time division duplexing
IR	Infrared	TDMA	Time division multiple access
IS-41	Interim Standard 41 (TIA/EIA cellular network signaling standard, U.S.)	TETRA	Trans European Trunked Radio System
IS-54	Interim Standard 54 (TIA/EIA TDMA cellular standard, U.S.)	TIA	Telecommunications Industry Association (U.S.)
IS-95	Interim Standard 95 (TIA/EIA CDMA cellular standard, U.S.)	TTC	Telecommunication Technical Committee (Japan)
		TX	Transmit or transmission
		UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
		VSELP	Vector sum excited linear prediction (speech coding)
		WACS	Wireless Access Communications Systems
		WARC	World Administrative Radio Conference