

Introduction + Couche MAC

Réseaux opérateurs sans-fil
5A IA2R SIR

Samir Si-Mohammed
samir.si-mohammed@univ-lorraine.fr
Bureau C318

Ce cours est basé sur différents supports pédagogiques dont ceux de J. Montavont et F. Théoleyre. Il se base également sur l'ouvrage « *Computer Networking - Principles, Protocols and Practice* » d'O. Bonaventure.
L'usage de ce support ne peut être qu'académique.

Plan du cours

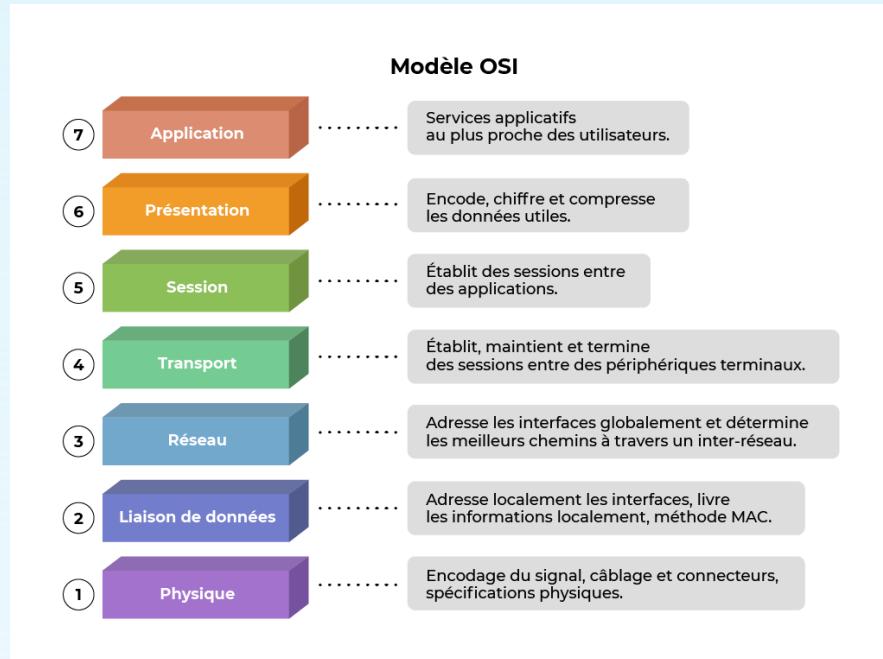
- Répartition horaire : 6h de CM, 8h de TD, 8h de TP
- Structure des CM :
 - Couche MAC
 - Réseaux 802.11 (Wi-Fi)
 - Réseaux IoT (802.15.4 + LoRa)
- Structure des TD :
 - Couche MAC
 - Réseaux 802.11
 - Réseaux IoT
- Structure des TP :
 - TP ns-3 (Wi-Fi + LoRa)
- Évaluation :
 - 2 QCM de 5min ?
 - Examen écrit (1h30)
 - Compte-rendu TP

Plan du chapitre

- Rappels
- Protocoles déterministes
 - Multiplexage (fréquentiel, temporel, par code, hybride)
 - Étalement de spectre
 - OFDMA
- Protocoles probabilistes
 - ALOHA
 - CSMA/CD
 - CSMA/CA
- Application aux réseaux contraints
- Protocoles de type Blackburst
 - Berkeley-MAC
 - X-MAC
 - CONTIKIMAC
- Conclusion

Rappels

- Modèle OSI [OSI]



- Intérêt de passer au sans-fil : Flexibilité, Passage à l'échelle, mobilité, etc.
- Inconvénients : Canal radio non fiable (interférences, etc.), complexité d'isolation des fréquences, mobilité etc.

[OSI] ISO/IEC, Reference Model of Open Systems Interconnection; Part 1, Basic Reference Model

Introduction

- Couche MAC
 - Sous-couche de la couche liaison de données (couche 2) du modèle OSI [OSI]
 - Coordonne l'accès au support de communication
 - **Équité** : chaque équipement doit avoir les mêmes chances d'accès au support de communication
 - **Performance** : délai d'attente avant émission et envoi effectif doit être le plus court possible
 - **Efficacité** : taux d'utilisation du support proche de 100%
 - >70 couches MAC pour réseaux de capteurs en 2009 [ICST]

[OSI] ISO/IEC, Reference Model of Open Systems Interconnection; Part 1, Basic Reference Model

[ICST] A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne and K. Leung. **MAC Essentials for Wireless Sensor Networks**. In IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 12, no. 2, pp. 222-248, 2010.

Protocoles MAC

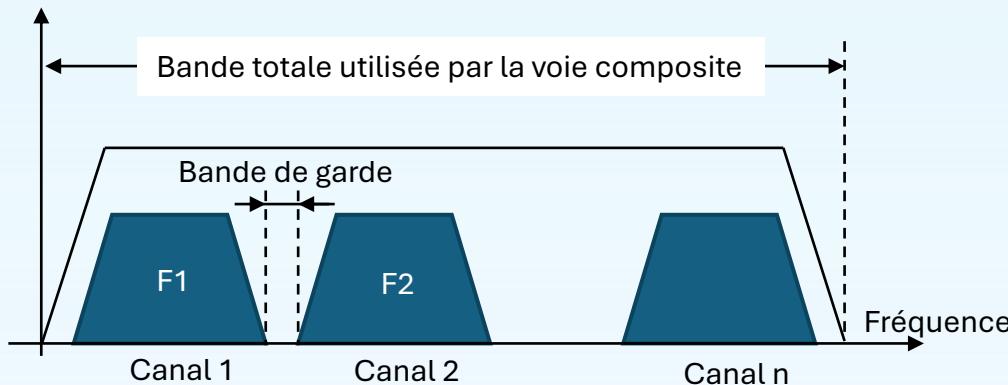
- 2 familles de protocoles
 - **Déterministe**
 - Aucune collision possible
 - Garanties (débit, délai borné, etc.)
 - Complexe (nécessite souvent un protocole de signalisation)
 - **Probabiliste / stochastique**
 - Collisions possibles (mais détectées / corrigées)
 - Aucune garantie
 - Il est possible qu'un message ne soit jamais transmis
 - « simple »

Multiplexage / partage d'un support

- Ressources (support de communication) coûteuses
- Multiplexage = technique de partage d'un support
 - Simulation de plusieurs liaisons point-à-point sur une seule ligne (voie composite)
- Partage de la voie composite via
 - Multiplexage fréquentiel
 - Multiplexage temporel
 - Multiplexage par code

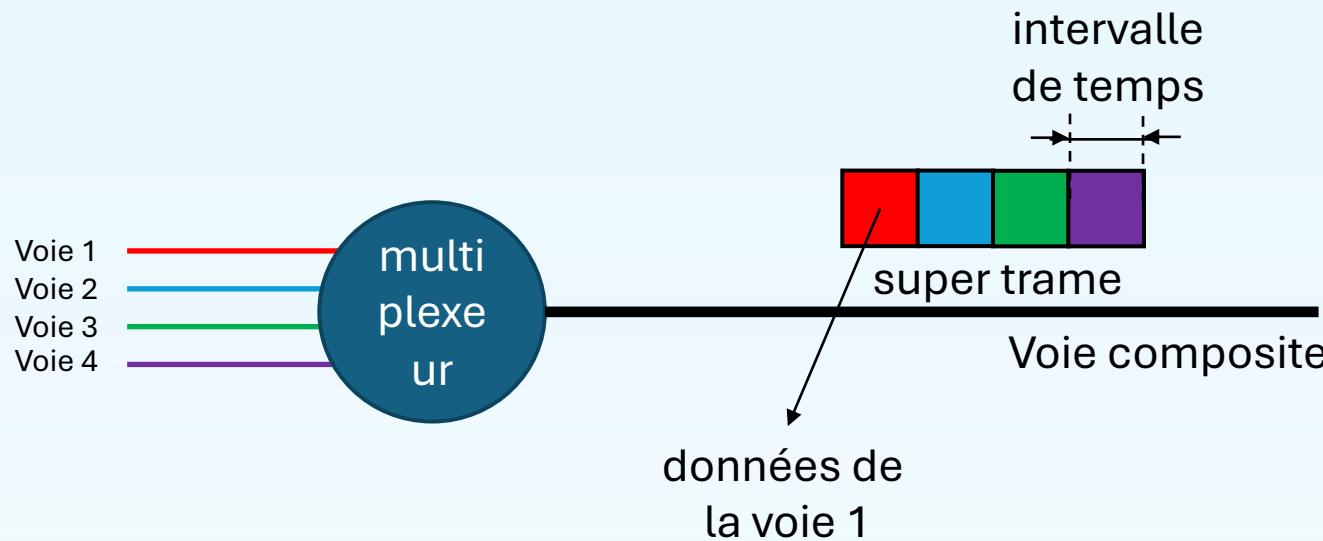
Multiplexage fréquentiel

- *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*
 - Bande passante du support est divisée en canaux
 - Chaque canal est modulé (transposition de fréquence) par une porteuse différente
 - A l'aide de filtres passe bande on extrait chaque canal



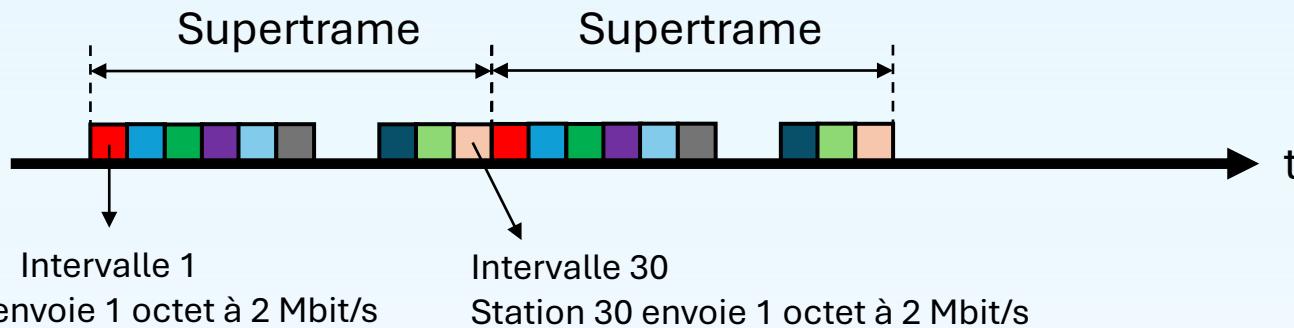
Multiplexage temporel (1)

- *Time Division Multiple Access (TDMA)*
 - Chaque liaison dispose de l'intégralité de la bande passante durant un intervalle de temps (*timeslot*) prédéterminé
 - Intervalles affectés de manière
 - statique
 - statistique



Multiplexage temporel (2)

- Ex : réseau téléphonique (flux à débit constant)
 - Voix transmises à 64 Kbit/s => 1 octet par 125 microsecondes
 - Sur ligne à 2 Mbit/s (ligne E1 en Europe)
 - On peut multiplexer 30 flux à 64 Kbit/s



Multiplexage par code (1)

- *Code Division Multiple Access (CDMA)*
 - Chaque station dispose d'un code propre et utilise toute la bande passante disponible
 - Code de m chips (en pratique $m = 64$ ou 128)
 - Transmission d'un bit à 1
 - Envoi de la séquence de chips de la station
 - Transmission d'un bit à 0
 - Envoi du complément de la séquence de chips de la station
 - Stations doivent transmettre au même moment
 - Technique utilisée dans la téléphonie mobile (US), UMTS

Multiplexage par code (2)

- Séquences chips générées par code
 - Ex : code Walsh
- Toutes les séquences de chips sont orthogonales par paires
 - Produit interne normalisé de deux séquences quelconques est égal à 0
- Ex : soit S et T deux séquences de chips quelconques

$$S \cdot T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i \times T_i = 0$$

Multiplexage par code (3)

- Ex (Tanenbaum) :
 - 4 stations (A, B, C et D) et 8 chips par bit

A : 00011011

B : 00101110

C : 01011100

D : 01000010

A : (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)

B : (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)

C : (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)

D : (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)

Transmissions

C

B + C

A + !B

A + B + !C

Réceptions

S1 = (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)

S2 = (-2 0 0 0 +2 +2 0 -2)

S3 = (0 0 -2 +2 0 -2 0 +2)

S4 = (-1 -3 +1 -1 +1 -1 +3 +1)

Décodage pour voir le bit envoyé par C

$$S1 \cdot C = (1+1+1+1+1+1+1)/8 = 1 \rightarrow \text{bit envoyé par C} == 1$$

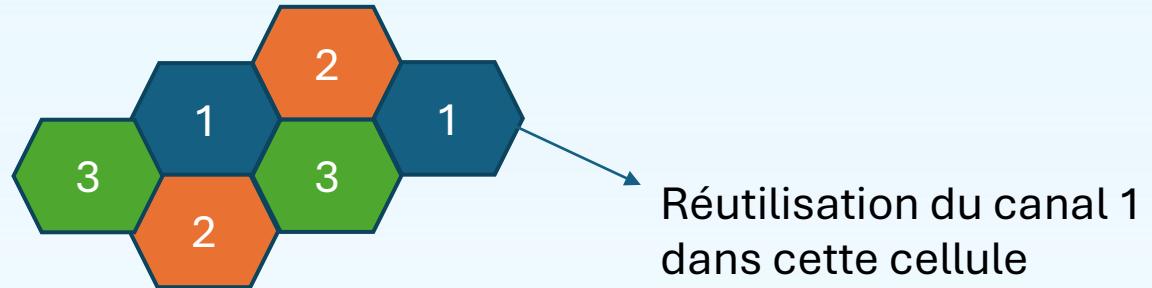
$$S2 \cdot C = (2+0+0+0+2+2+0+2)/8 = 1 \rightarrow \text{bit envoyé par C} == 1$$

$$S3 \cdot C = (0+0+2+2+0-2+0-2)/8 = 0 \rightarrow \text{pas de bit envoyé par C}$$

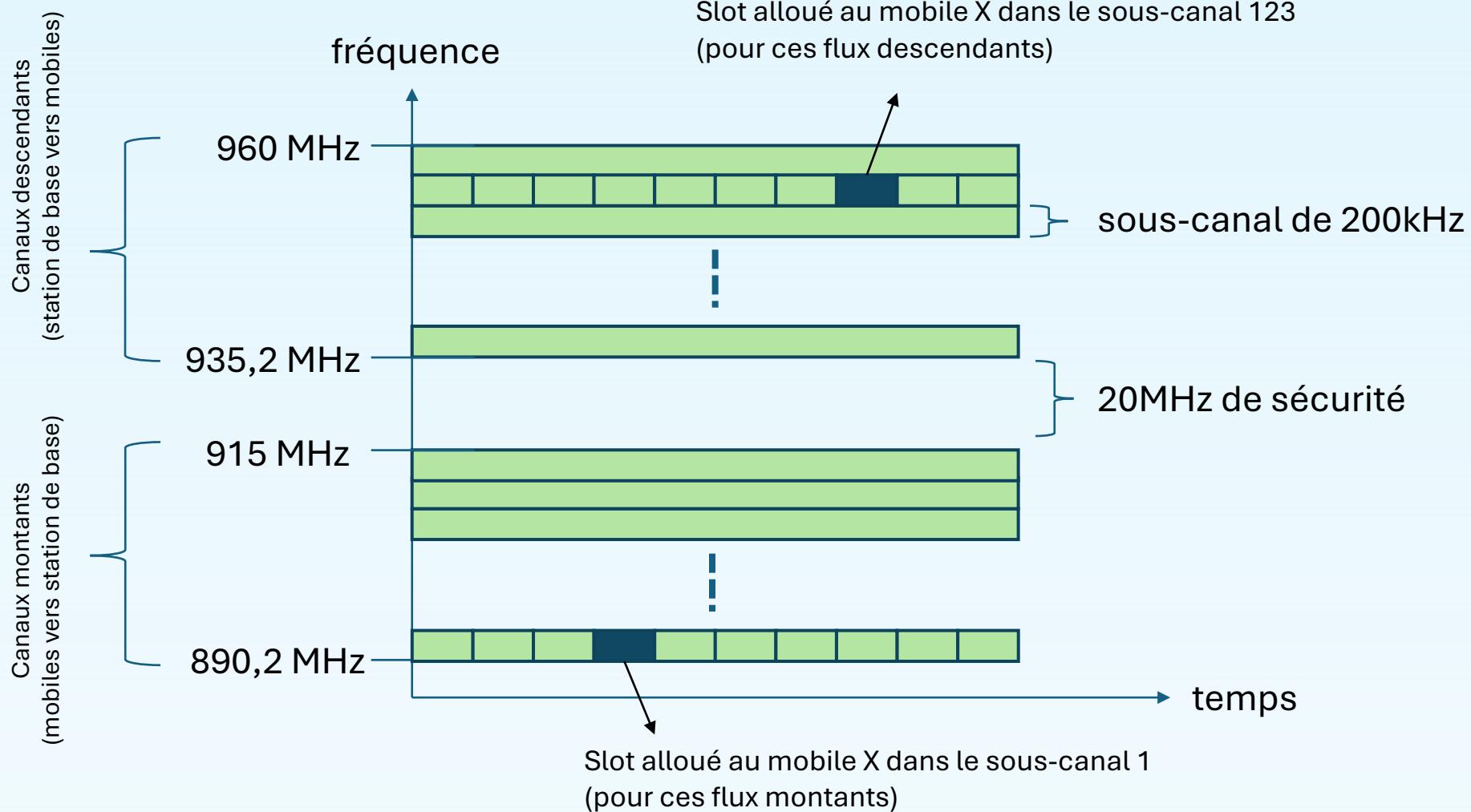
$$S4 \cdot C = (1-3-1-1+1-1-3-1)/8 = -1 \rightarrow \text{bit envoyé par C} == 0$$

Multiplexage hybride

- Ex : GSM (900 MHz)
 - Fréquentiel + géographique + temporel
 - 124 canaux partagés entre opérateurs ($1 \leq n \leq 124$)
 - Canaux montants : $f_u(n) = 890,2 + 0,2 \times (n - 1)$ MHz
 - Canaux descendants : $f_d(n) = 935,2 + 0,2 \times (n - 1)$ MHz
 - Multiplexage temporel dans chaque sous-canal
 - Territoire découpé en cellules
 - Fréquences différentes dans cellules adjacentes
 - Réutilisation des mêmes fréquences si cellules non adjacentes



Multiplexage hybride (2)

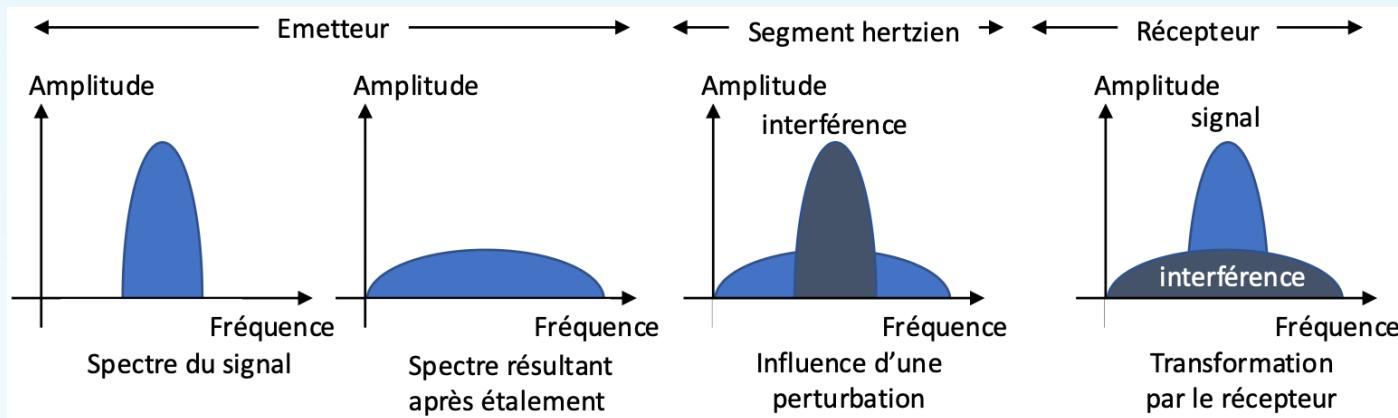


Récapitulatif

	géographique	temporel	fréquentiel	code
Idée	Segmenter l'espace en cellules / secteurs	Segmenter les temps de transmission en intervalles disjoints, intervalles fixés à l'avance ou sur demande	Segmenter les fréquences de la bande passante en canaux disjoints	Étalement de spectre utilisant des codes orthogonaux
Station	Une unique station peut être active dans une cellule / secteur	Toutes les stations sont actives à tour de rôle pour de courtes périodes sur la même fréquence	Chaque station possède son propre canal	Toutes les stations peuvent être actives au même endroit, en même temps sur la même fréquence
Séparation du signal	Structure en cellule, antennes directionnelles	Synchronisation temporelle	Filtrage des fréquences	Code + récepteurs spéciaux
Pros	Très simple, capacité augmente avec km ²	Maîtrisé, entièrement numérique, flexible	Simple, maîtrisé, robuste	Flexible, planification des fréquences plus simple
Cons	Inflexible, antennes généralement fixes	Synchronisation difficile, espace de garde nécessaire	Inflexible, fréquences sont une ressource limitée	Récepteurs complexes, nécessite un contrôle de puissance complexe pour les émetteurs

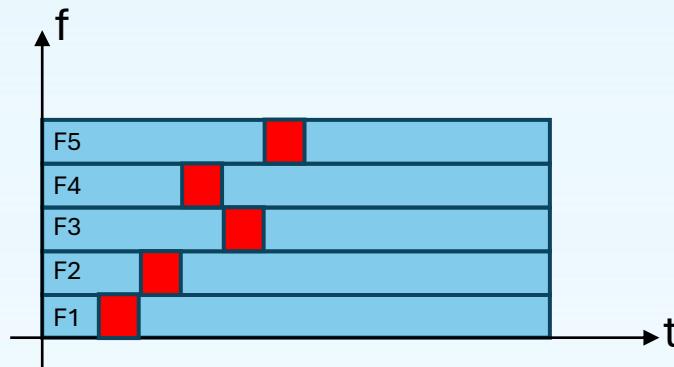
Techniques d'étalement de spectre – *Spread Spectrum*

- Partage d'une bande de fréquence
- Augmente la résistance aux interférences et signaux parasites
 - Signal d'origine occupe un spectre réduit
 - Techniques d'étalement à séquence directe ou à sauts de fréquence
 - Etalement du spectre de la perturbation lors de la reconstitution du signal d'origine par le récepteur



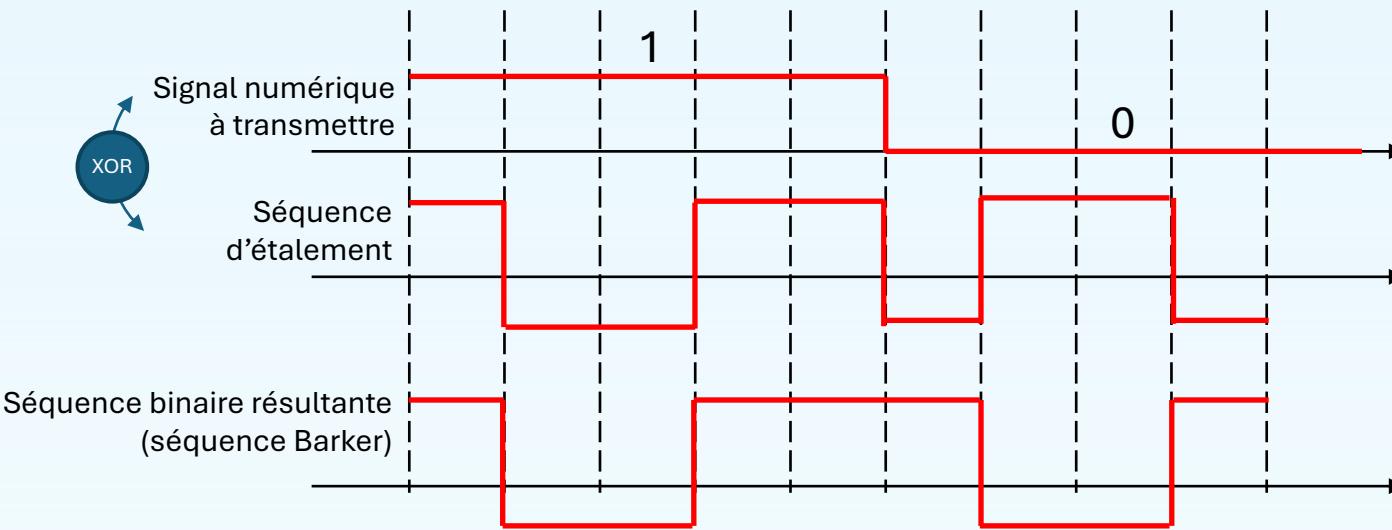
Étalement de spectre à sauts de fréquence

- *Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)*
 - Bande de fréquence divisée en sous-canaux
 - Chaque sous-canal est affecté durant un intervalle de temps prédéterminé et constant, selon une séquence pseudo-aléatoire, à une station
 - Cons : synchronisation des stations



Étalement de spectre à séquence directe

- *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*
 - Utilisation de l'intégralité de la bande de fréquence
 - Chaque communication utilise un code unique (CDMA)
 - Multiplication du signal binaire par une séquence binaire pseudo-aléatoire telle qu'à 1 bit du signal binaire correspondent N « bits » du signal émis
 - Débit d'information mesuré en bit/s
 - Débit du signal émis mesuré en chip/s
 - En réception, signal reçu est multiplié par la même séquence pour retrouver le signal d'origine
 - Cons : codage / décodage complexe (code orthogonaux)

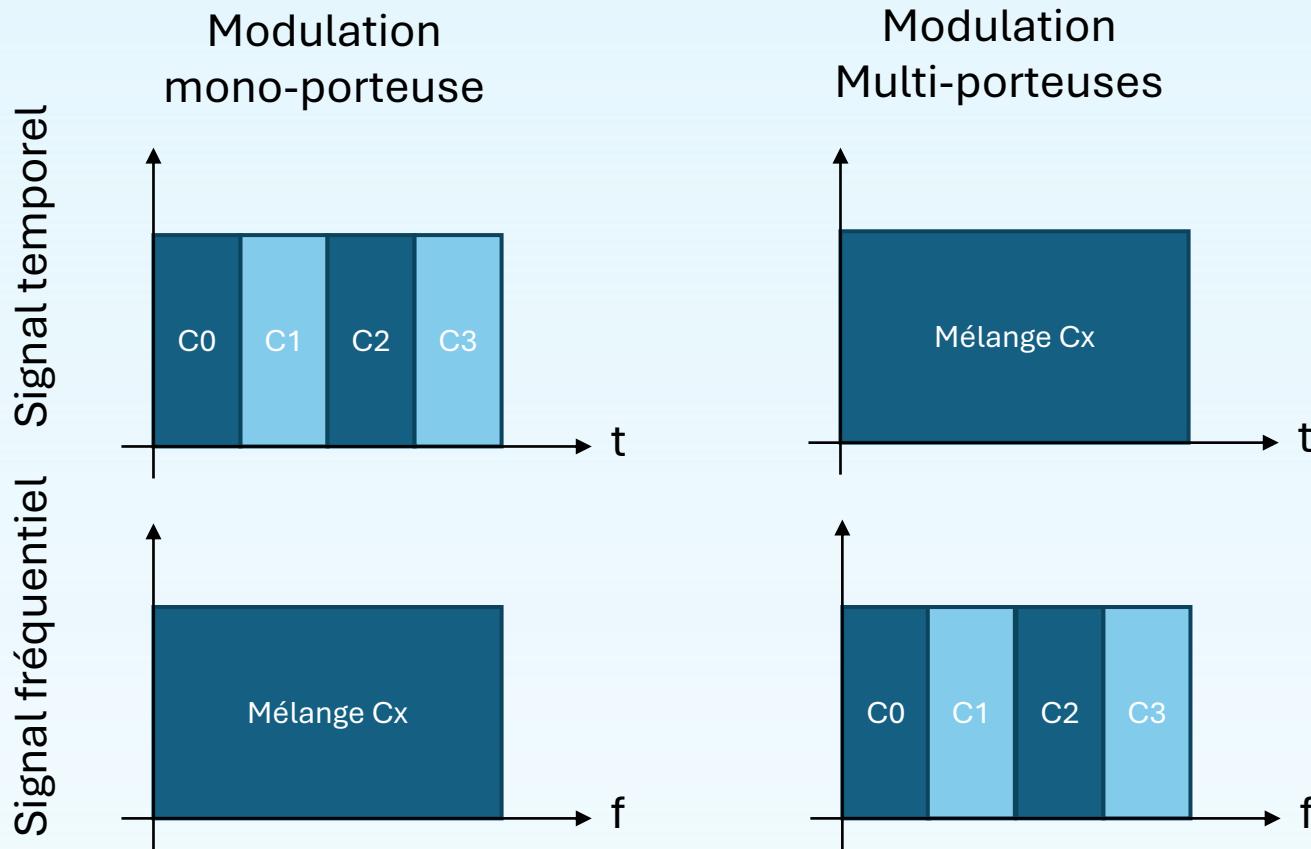


Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) (1)

- Allocation de sous-porteuses
 - Transmission simultanée de plusieurs symboles en parallèle sur différentes porteuses
 - Modulation sur N_p porteuses
 - => symboles N_p fois plus longs tout en conservant le même débit binaire qu'avec modulation mono-porteuse
 - Ex : Envoi de 100 Mb/s sur :
 - Une seule porteuse : symbole plus court
 - Multi-porteuse : symboles plus longs
 - Si N_p assez grand, la durée des symboles devient grande devant l'étalement des retards, rendant les perturbations liées aux échos (multipath fading) négligeables

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) (2)

- Dualité temps-fréquence des modulations



Méthodes probabilistes

- Collisions possibles => comment s'assurer de la bonne réception des messages ?
 - Accusé de réception au niveau 2
 - Détection des collisions
- Si collision alors correction par retransmission (ARQ)
- Ex : ALOHA

ALOHA [ABR70]

- «Bonjour» en Hawaïen, ALOHAnet Hawaii University 1970
- Contexte : réseau radio
 - Stations partagent le même canal radio
 - ⇒ émissions « simultanées » = collision
- Algorithme (assez simple...):
 - Si trame à émettre alors émettre trame !

Délai avant émission nul :

Si collision : trames perdues :(

```
N=1
while N <= max
    send (frame)
    wait (ack_on_return_channel or timeout)
    if (ack_on_return_channel):
        break # transmission was successful
    else:
        wait (random_time)
        N++
else:
    # too many transmission attempts
```

- ré-émission prise en charge par couche supérieure fiable (e.g. TCP)
- Délai élevé en cas de collision, perte bande passante

Performances ALOHA

Hypothèses :

- Un nombre arbitrairement grand de stations et des émetteurs indépendants
 - D = débit maximal théorique en trames/s , par exemple :
 - 1 Mb/s, trames de L = 1000 bits : $D = 1000$ trame/s, durée émission trame $t = 1\text{ms}$
 - G = charge totale émissions + ré-émissions
 - $G = \text{nombre de trames (ré)-émises} / D$
 - (ou $G = g * N * t$, où g : débit d'émission des trames par les stations, N : nombre de stations)
 - ex: 100 émetteurs envoient 8 trames/s => $G = 0,8$

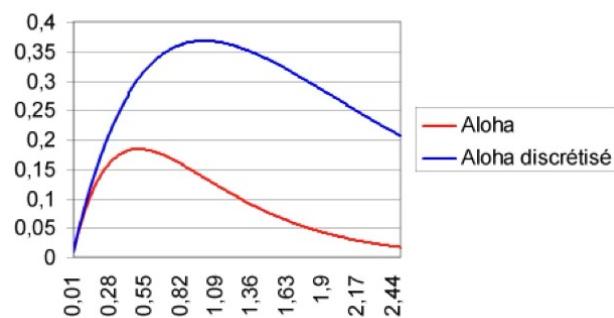
• Débit utile en fonction charge :

- Période de **contention dure $2t$** : $[t_0 - t, t_0 + t]$ si la trame est émise en t_0
- Proba (émission réussie) = proba (0 émission en $2t$)
- Débit utile = $G e^{-2G}$ (cf. théorie des files d'attente et Distribution de Poisson) = $G \times P(0)$
- Débit utile maximal pour $G = 1/2$ et vaut $1/2e = 0,184$

- Exemple:
 - $G=1/2 \Rightarrow 500$ trames/s dont 184 « passent »
 - $G < 1/2 \Rightarrow$ moins de collisions mais moins de débit
 - $G > 1/2 \Rightarrow$ collisions augmentent

- Si G tend vers l'infini, débit utile tend vers 0

$$P(k \text{ events in interval } t) = \frac{(rt)^k e^{-rt}}{k!}$$



Performances ALOHA [ABR70]

- **channel traffic** = nombre total de trames transmise (correctes + ayant subies collisions) par unité de temps
- **channel utilization** = nombre de trames correctes (sans erreur) transmises par unité de temps
- Fonctionne bien si :
 - $\text{channel traffic} \approx \text{channel utilization}$ [ABR70]
- Ne fonctionne pas si :
 - $\text{channel utilization} > 0,186 \times \text{débit}$ [ABR70]

[abr70]

Abramson, N., **THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications**; in proc. Of the November 17-19, 1970, Fall Joint Computer Conference (AFIPS), ACM

Slotted ALOHA [ROB75]

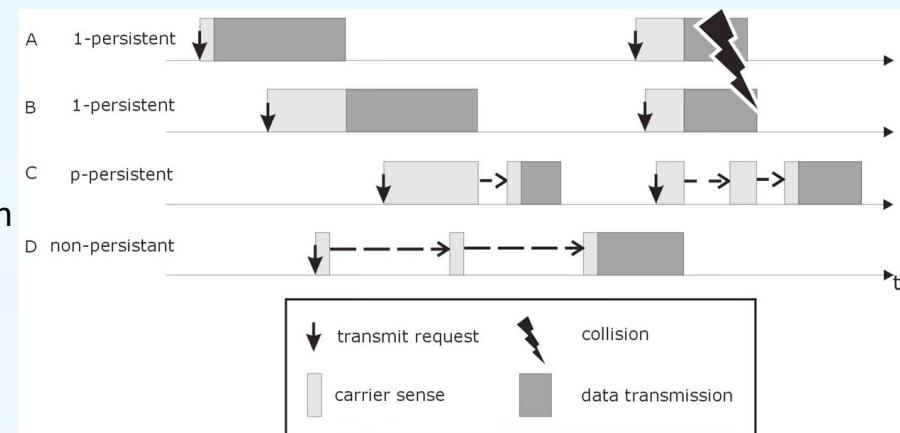
- ALOHA
 - Stations peuvent transmettre à n'importe quel moment
- Slotted ALOHA
 - Temps divisé en intervalles (timeslot)
 - Durée == temps pour transmettre une trame (taille fixe)
 - Transmission possible uniquement en début d'intervalle
 - Permet de **doubler le channel utilization**
 - ALOHA : **max_channel_utilization** = 0,186 x débit
 - Slotted ALOHA : **max_channel_utilization** = 0,372 x débit

[rob75]

Roberts, L., **ALOHA packet system with and without slots and capture**, in SIGCOMM Computer Communications Rev. 5, 2 (April 1975), 28-42

Carrier Sense Multiple Access (CSMA)

- ALOHA est simple, mais n'est utilisable que sur des réseaux peu chargés
- Amélioration : **CSMA**
 - Toutes les stations écoutent le support avant d'émettre
 - Si libre alors émission
 - Sinon (support occupé) alors attente
 - 2 versions :
 - **Persistent CSMA**
 - Pb de synchronisation des émetteurs
 - **Non persistent CSMA**
 - Résout ce problème de synchronisation



persistent CSMA

```
N=1
while N <= max:
    wait(channel_becomes_free)
    send(frame)
    wait(ack or timeout)
    if ack:
        break # trans. successful
    else:
        N++ # timeout
# end of while
# too many transmission attempts
```

non persistent CSMA

```
N=1
while N <= max:
    listen(channel)
    if free(channel):
        send(frame)
        wait(ack or timeout)
        if ack:
            break # trans. successful
        else:
            N++ # timeout
    else:
        wait(random_time)
# end of while
# too many transmission attempts
```

[KT75] montre que **max_channel_utilization** =

- 18,4% pour ALOHA
- 36,6% pour slotted ALOHA
- 52,9% pour persistent CSMA
- 81,5% pour non persistent CSMA

[KT75]

Kleinrock, L., Tobagi, F., *Tpacket Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple-Access and their Throughput-Delay Characteristics*, in IEEE Transactions on Communications, Vol. COM pp. 1400-1416, 1975

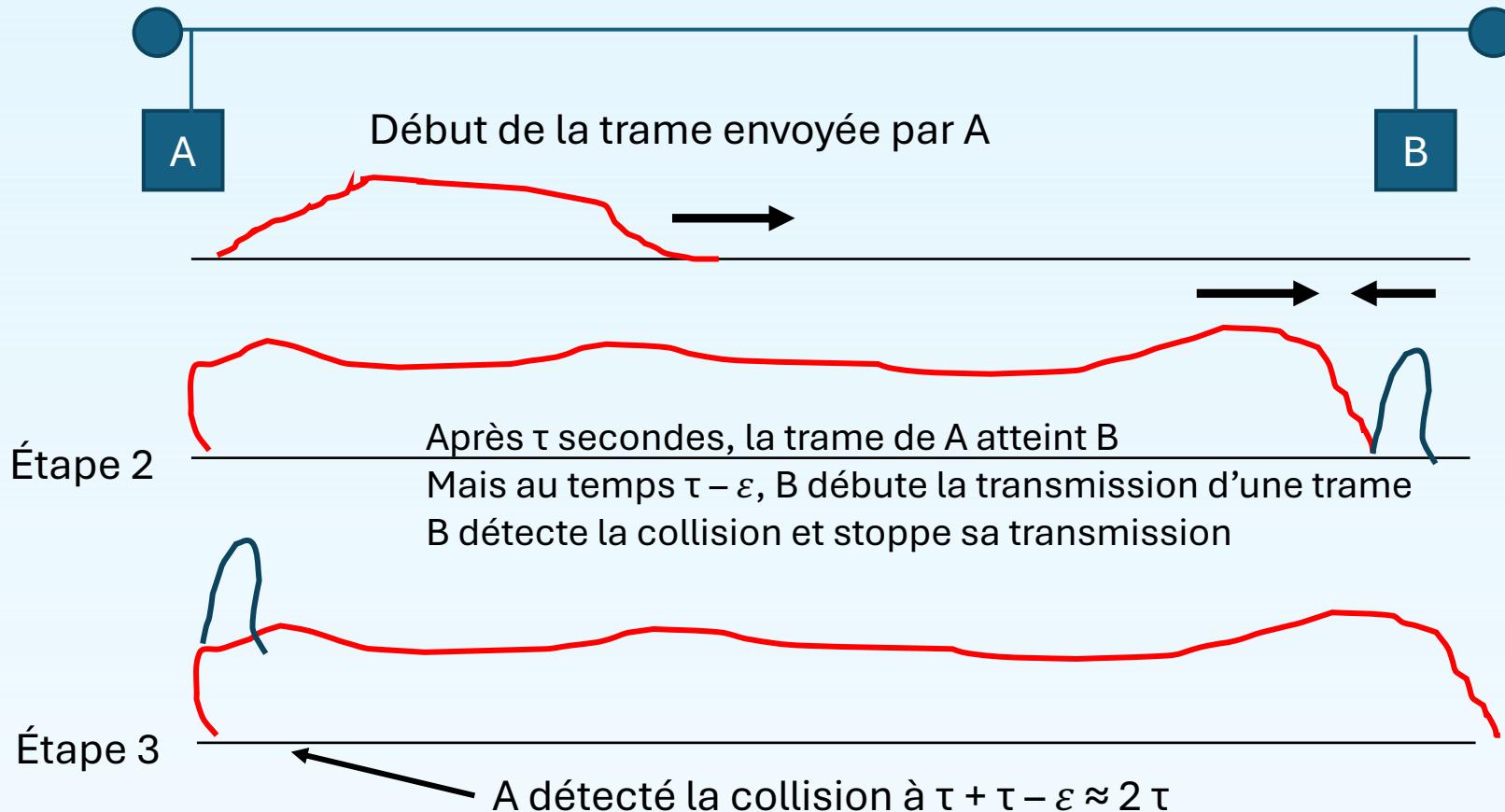
*Modes and
23, No. 12,*

CSMA with Collision Detection (CSMA/CD)

- Cherche toujours à augmenter les performances
- Utilisé dans les réseaux filaires (Ethernet 10BASE-T)
 - Erreurs de transmission proviennent presque exclusivement des collisions (**BER** du support faible)
 - => suppression des ACK
 - Toutes les stations doivent détecter une collision
 - Transmission + écoute simultanée du support
 - Si signal reçu différent du signal transmis => collision
 - Alors stopper la transmission pour accélérer la reprise

Collision sur un bus partagé

- τ = délai de propagation max sur le bus



Condition pour détecter toute collision

- Toute station doit transmettre pendant au moins $2 \times \tau$ (appelé **slottime**)
- Protocoles basés sur CSMA/CD imposent une taille minimum des trames pour respecter cette condition
 - Ethernet : 64 octets

Exponential backoff

- Quand retransmettre après une collision ?
 - Si temps d'attente avant retransmission fixe => risque de synchroniser des stations (ex : ALOHA)
 - Si temps d'attente court alors **délai réduit** mais **augmentation des risques de collisions**
 - Si temps d'attente long, alors **délai augmente** mais **diminution des risques de collisions**
 - Compromis :
 - Augmenter le temps d'attente en fonction du nombre de retransmissions => **exponential backoff**

Algorithme CSMA/CD

```
N=1
while N<= max
    wait(channel_becomes_free)
    send(frame)
    wait_until (end_of_frame) or (collision)
    if collision detected:
        stop transmitting
        send(jamming) → Pour respecter la taille min
        k = min(10, N) des trames
        r = random(0, 2^k - 1)
        wait(r x slotTime)
        N++
    else:
        wait(inter-frame_delay) → Évite qu'une station ne
        break monopolise le support sans
# end of while
# too many transmission attempts
laisser d'opportunités de
transmission aux autres
stations
```

Conclusion CSMA/CD

- Méthode la plus performante pour réseaux filaires
 - Maximisation du ***channel utilization***
- Détection des collisions et correction par retransmission
- Si autre erreur (BER), détection par ***code d'erreur*** (CRC)
 - Si CRC faux, rejet de la trame par le récepteur
 - Détection de cette « perte » par un protocole de plus haut niveau (e.g. TCP)
- Méthode d'accès ultime ?
 - Non car il reste des problème (ex. ***capture effect***)

Et pour les réseaux sans fil ?

- ALOHA / Slotted ALOHA pas très efficace
- CSMA/CD impossible car canal radio half-duplex
- *Carrier Sense with Collision Avoidance (CSMA/CA)*
 - Conserve les mécanismes de CSMA
 - Ajoute l'évitement de congestion
 - Support sans fil a généralement un BER élevé
 - => réintroduction d'ACK de niveau 2 et correction par retransmission

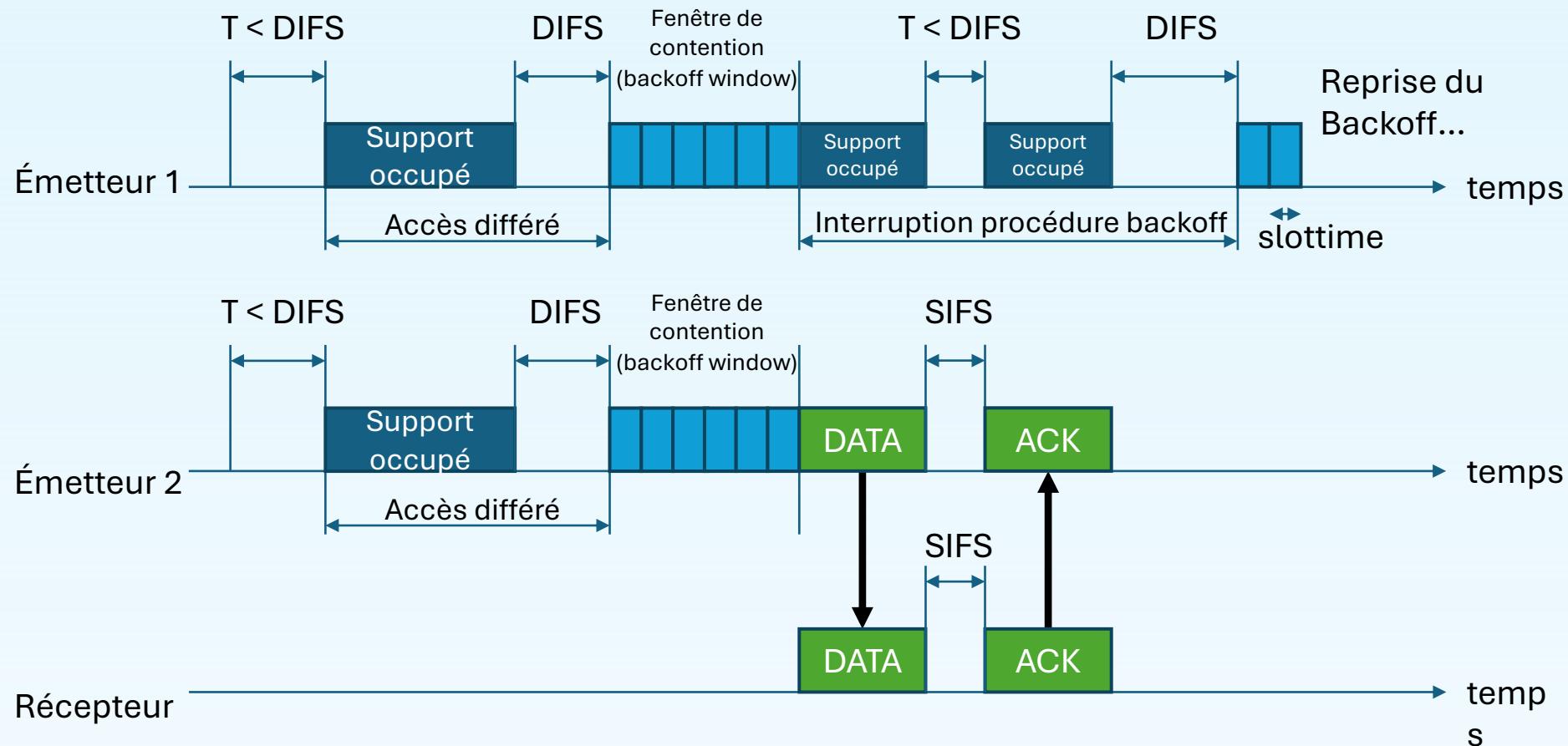
CSMA/CA – délais d'attente

- **Short Inter Frame Space (SIFS)**
 - Temps d'attente entre la réception d'une trame et l'émission de l'acquittement correspondant
- **Distributed Coordination Function Inter Frame Space (DIFS)**
 - Avant d'envoyer une trame, une station doit s'assurer que le support est libre pendant au moins DIFS si la trame précédente n'a pas subi de collision
- **Extended Interframe Space (EIFS)**
 - Si trame précédente perdue, station doit s'assurer que le support est libre pendant au moins EIFS avant de transmettre sa nouvelle trame
- SIFS < DIFS < EIFS

CSMA/CA – Exponential Backoff

- Principe similaire à CSMA/CD mais
 - Collision peut se produire **sur toute la trame**
 - CSMA/CD collision ne peut se produire **qu'en début de trame**
 - Intervalle minimal pour le premier backoff est plus grand que dans CSMA/CD
 - Pendant le backoff, la station continue à sonder le support
 - Si support occupé, procédure de backoff est interrompue et reprend ssi le support est à nouveau libre pendant au moins DIFS

CSMA/CA - Transmission



CSMA/CA pseudo-code

```
N=1
while N <= max:
    waitUntil(free(channel))
    if correct(last_frame):
        wait(channel_free_during_t >= DIFS)
    else:
        wait(channel_free_during_t >= EIFS)

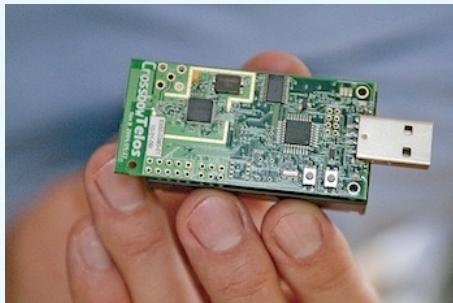
    backoff_time = int(random[0, min(255, 7x(2^(N-1))))] x slotTime
    wait(channel_free_during_backoff_time)
    # backoff timer is frozen while channel is sensed to be busy
    # and must be free for DIFS to resume
    send(frame)
    wait(ack or timeout)
    if ack:
        # frame received correctly
        break
    else:
        # retransmission required
        N++
# end of while
```

Conclusion CSMA/CA

- Adaptation « simple » de CSMA/CD pour support sans fil
- Utilisé dans une majorité de réseaux locaux sans fil
 - IEEE 802.11 (WiFi), 802.15.4 (Zigbee), etc.
 - Beaucoup de paramètres dépendent de la couche physique / protocole
 - Variantes (ex : slotted CSMA/CA)
- Fonctionne relativement bien...
 - Performances en deçà de CSMA/CD (ACK, backoff plus long, BER plus important)
- ...mais ce type de réseau introduit de nouveaux problèmes
 - Station cachée, station exposée, station lointaine...

Application aux réseaux « constraints »

- Réseaux sans fil avec équipements contraints
 - Capacité de calcul limitées
 - Energie limitée
 - Mémoire limitée
- Ex :



	TelosB
Processeur	TI MSP430
Fréquence	8 MHz
RAM	10 Ko
Espace programme	48 Ko
Radio	TI CC2420 (IEEE 802.15.4)
Fréquence	2400 – 2483 Hz
Débit	250 Kbps
Batterie	2 x 3A
Voltage	1,8 – 3,6V
Dimension (mm)	36x48x9

Plusieurs appellations

- Wireless Sensor Network (WSN)
- Low-power and Lossy Network (LLN)
- Low-power Wireless Personal Area Network (LoWPAN)
- Internet of Things (IoT)
- ...

Modèles de communication

- **Réseaux multi-sauts**
 - Communication à courte portée « peu coûteuses » en énergie
 - Transmission de proche en proche pour atteindre le destinataire
 - Chaque nœud devient peut relayer (routage) du trafic en plus de ses propres données
 - Ex : IEEE 802.15.4
- **Réseaux simple saut**
 - Nœuds à portée radio d'une station centrale
 - Toutes les communications passent par la station centrale
 - Ex : Réseaux cellulaires, LoRaWAN, SigFox...

Consommation

- Radio constitue généralement l'élément le plus gourmand en énergie

Caractéristiques	TR1000	CC1100
Ion_emission (mA)	12	17
Ion_reception (mA)	4,8	15
Ioff (µA)	0,5	0,4

Elément	Composant	Ion (mA)	Ioff (mA)
Capteur magnétique	HMC 1053	10	0,001
Microcontrôleur Fosc = 20 MHz	PIC16F690	5	0,001
CAN	PIC16F690	1	0

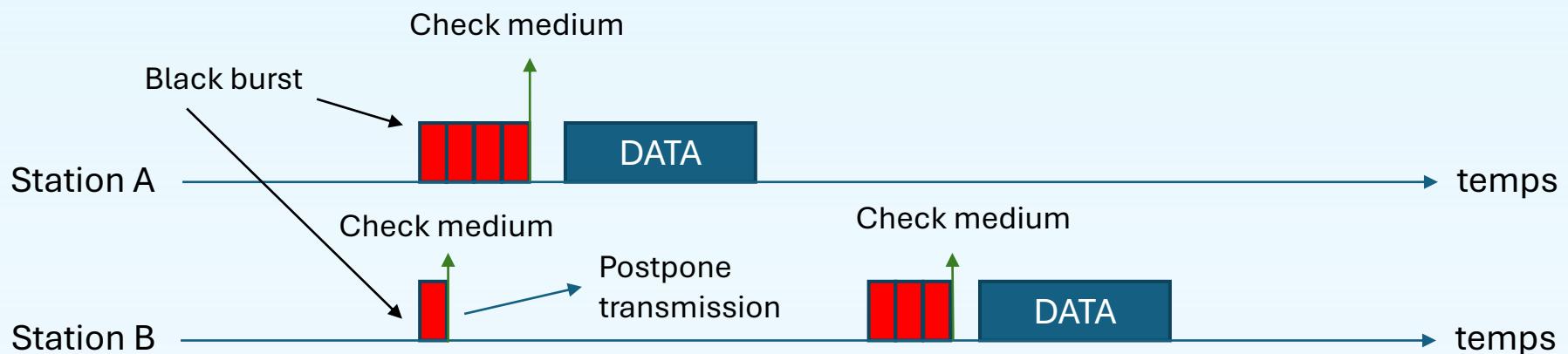
G. Terrasson. **Contribution à la conception d'un émetteur/récepteur pour microcapteurs autonomes.**
PhD thesis, Université de Bordeaux 1, 2008

Économie énergétique

- Idée couper la radio le plus souvent possible
 - 4 états pris en charge par protocole MAC
 - **Radio off / sleep, radio on, transmitting, receiving**
 - **Duty Cycling**
 - Rapport entre le temps d'activité et le temps total
 - Ex : Duty Cycle = 0,5 => radio allumé 50% du temps
- Phénomènes réseaux consommateurs
 - **Collision**
 - **Idle listening**
 - **Radio on** alors qu'il n'y a rien à émettre ou recevoir
 - **Overhearing**
 - Réception d'un signal qui ne nous est pas destiné
 - **Partitionnement**
 - Réseau segmenté en îlots
 - Voisin hors de portée radio
 - Voisin en veille (problème de synchronisation)

Blackburst [SO96, SO99]

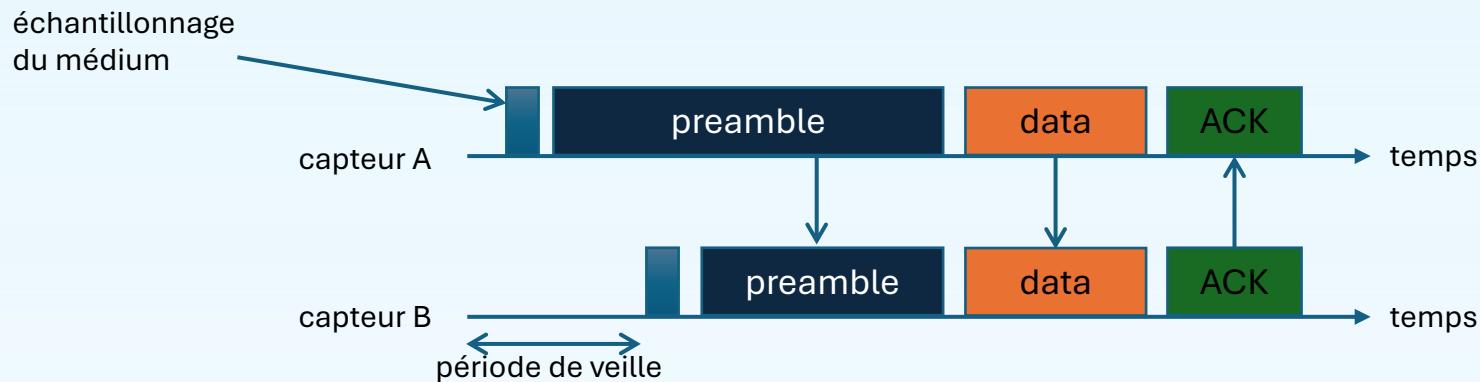
- Bloquer le canal via l'émission d'un « black burst » avant transmission d'une trame
 - Durée du « black burst » dépend du temps d'attente au cours duquel le canal était occupé
 - Minimise les délais d'accès



- [SO96] Sobrinho, J.L. et A.S.Krishnakumar (1996). Real-time traffic over the IEEE 802.11 medium access control layer. Bell labs technical journal, pp. 172-187
- [SO99] Sobrinho, J.L. et A.S.Krishnakumar (1999). Quality of service in ad hoc carrier sense multiple access networks. IEEE journal on selected areas in communications, Vol. 17, No. 8, pp. 1353-1368

Protocoles type *blackburst*

- Protocoles asynchrones
 - Organisation hétérogène des périodes d'activité et de sommeil
- Sync pour chaque transmission
 - Émission d'un « préambule » (black burst)
 - Réveil du voisinage
 - En fin de préambule récepteur réveillée ssi
 - Longueur préambule > durée de sommeil

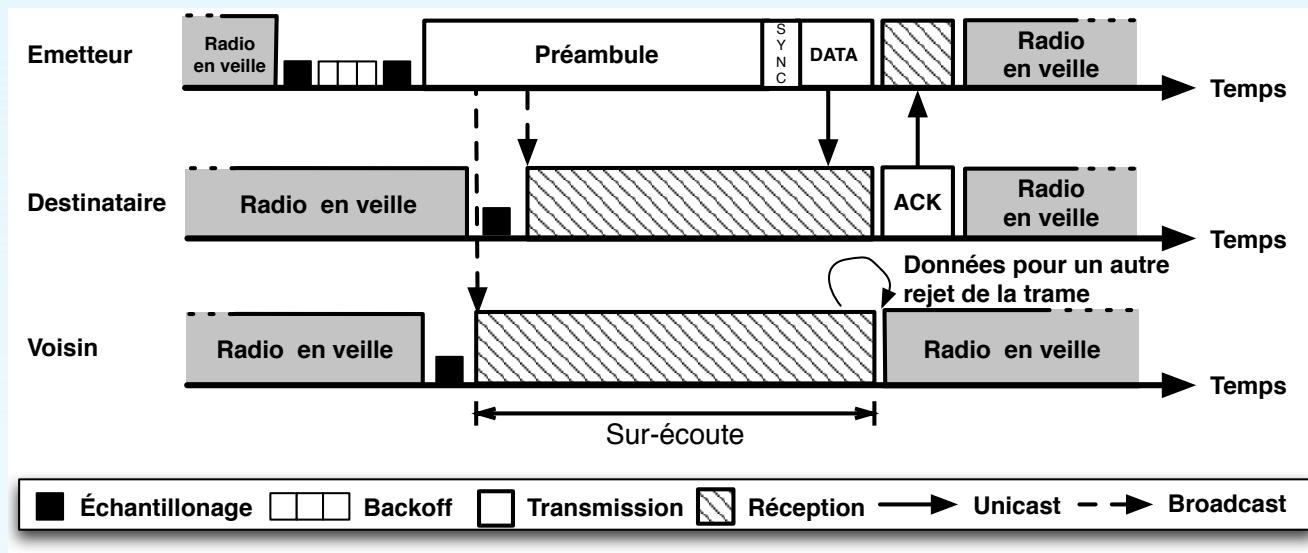


Échantillonnage du médium

- Détection d'une activité sur le médium
- ***Clear Channel Assessment (CCA)***
 - Énergie détectée > seuil
 - Détection d'un signal correspondant à la couche PHY avec même modulation et même caractéristiques de propagation
 - Combinaison des deux avec opérateur logique AND ou OR

Berkeley MAC (B-MAC) [PO04]

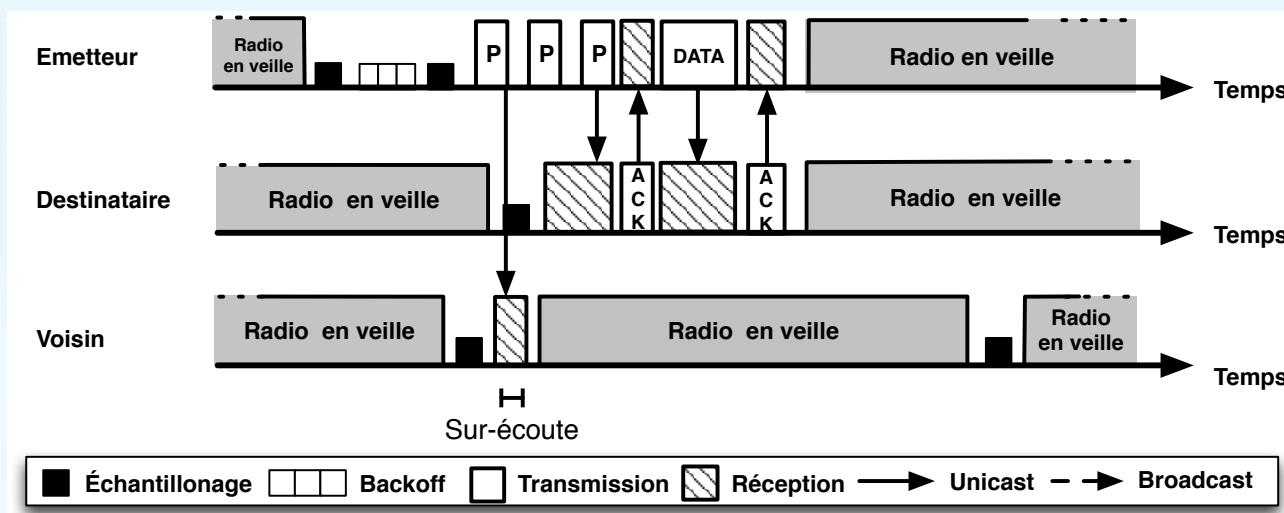
- Durée préambule > période veille
- Mot de synchro pour marquer la fin du préambule
- Backoff avant émission du préambule



D. Roth. *Gestion de la mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil*. PhD thesis, Université de Strasbourg, 2012.

X-MAC [BU06]

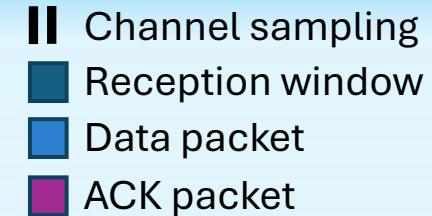
- Limite l'**overhearing** propre à B-MAC
 - Découpage du préambule en micro-trame (**strobe**)
 - Chaque strobe contient l'adresse du destinataire
- Augmente temps d'utilisation utile du médium
 - Récepteur peut interrompre le préambule dès son réveil



D. Roth. **Gestion de la mobilité dans les réseaux de capteurs sans fil.** PhD thesis, Université de Strasbourg, 2012.

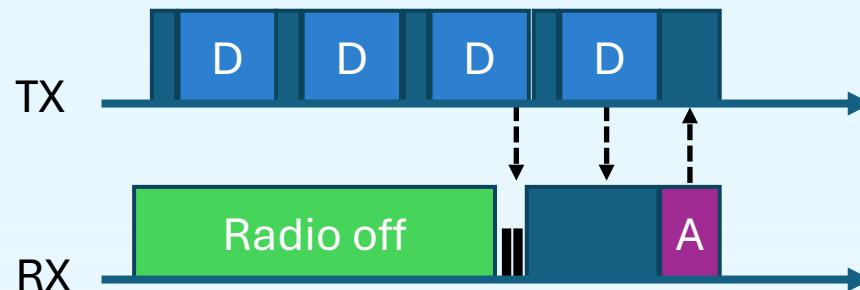
[BU06]

M. Buettner, G.V. Yee, E. Anderson and R. Han. **X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks.** In proc. of SenSys, Boulder USA, November 2006.

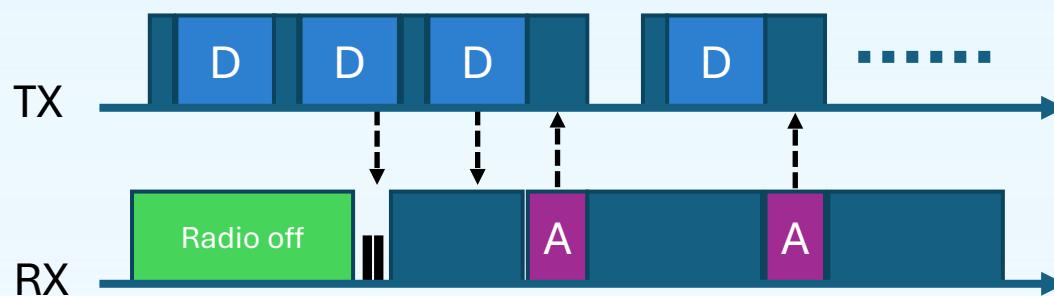


CONTIKIMAC [DU11]

- Protocole par défaut dans ContikiOS
- Remplace les « strobe » de X-MAC par les données



- Optimisation pour trafic « burst »



[DU11] Dunkels, A. « The ContikiMAC Radio Duty Cycling Protocol ». SICS Technical Report T2011:13, 2011

Conclusion protocoles de type *blackburst*

- **Pros**

- Simple
- Pas de synchronisation globale
- Robuste face aux changements de topologie

- **Cons**

- Overhearing
- Collision
- Paramétrage complexe (durée du préambule, sommeil)
- Temps d'utilisation utile du médium réduit

Récapitatif

- Rappels
- Protocoles déterministes
 - Multiplexage (fréquentiel, temporel, par code, hybride)
 - Étalement de spectre
 - OFDMA
- Protocoles probabilistes
 - ALOHA
 - CSMA/CD
 - CSMA/CA
- Application aux réseaux contraints
- Protocoles de type Blackburst
 - Berkeley-MAC
 - X-MAC
 - CONTIKIMAC
- Conclusion