

Réseaux sans fil

Réseaux WiFi

Master Technologies de l'Internet

C. Pham

Université de Pau et des Pays de l'Adour

Département Informatique

<http://www.univ-pau.fr/~cpham>

Congduc.Pham@univ-pau.fr



WiFi

802.11ac HOW DID WE GET HERE?

1973

Ethernet developed at Xerox's Palo Alto Research Center (PARC)



1977

Ethernet patented by Xerox



1997

802.11 Standard

The 802.11 standard is created. Products using the 2.4 GHz band have a maximum data rate of 2 Mbps



2003

802.11g Standard

The 802.11g standard is considered third generation; this standard permits products to use the 2.4 GHz band and match the 54 Mbps throughput of 5 GHz devices.



>> Throughput of 5 GHz devices

1999

802.11a Standard

The 802.11b and 802.11a standards are created. 802.11b drives the implementation of widespread use of WLAN technology. It is considered the first generation of wireless local area network technology. Products use 2.4 GHz and have a maximum data rate of 11 Mbps. 802.11a is considered the second generation. Products use the 5 GHz band and have a maximum data rate of 54 Mbps.



2005

802.11e Standard

The 802.11e standard is created. It is intended to take 11b and 11a to the next level with quality of service (QoS) features capable of prioritizing data, talk and video transmissions. Networks using 11e operate at radio frequencies of up to 5.850 GHz. It is most suitable for networks with multimedia capabilities.



2007

802.11n Standard (I)

The 802.11n standard is considered the fourth generation. Products are created for 2.4 GHz and 5 GHz bands and both have a maximum data rate of 450 Mbps.



2009

802.11 Standard (II)

The second wave of 802.11n is created and products operating in both the 2.4 GHz and 5 GHz bands now support a maximum data rate of 600 Mbps.



2014

802.11ac Standard (II)

Second-wave 802.11ac products hit the market. These products also use the 5 GHz band, but at a speed of 6.93 Gbps. It expands AP capabilities through the support of multiple input, multiple output (MIMO) technology, which enables APs to send multiple streams to multiple clients instead of just one at a time. The second wave also employs wider 160 MHz channels that can be used to give high-throughput applications their own exclusive pathways, thus further improving performance.



2013

802.11ac Standard (I)

The 802.11ac standard, so-called gigabit Wi-Fi, is ratified. In the first wave, Wi-Fi certified products have a maximum data rate of 1.3 Gbps and operate only in the 5 GHz band. Among other technological enhancements, this standard allows APs to send multiple streams to one client at a time. It is considered the fifth generation.



2011

The 802.11v, 802.11k and 802.11u standards are created. 11k is designed to improve the way wireless traffic is distributed through a network by determining which access points (APs) have available capacity. 11u allows users to know what wireless services a network offers before they are connected to it. It is most beneficial in crowded areas with multiple wireless services.



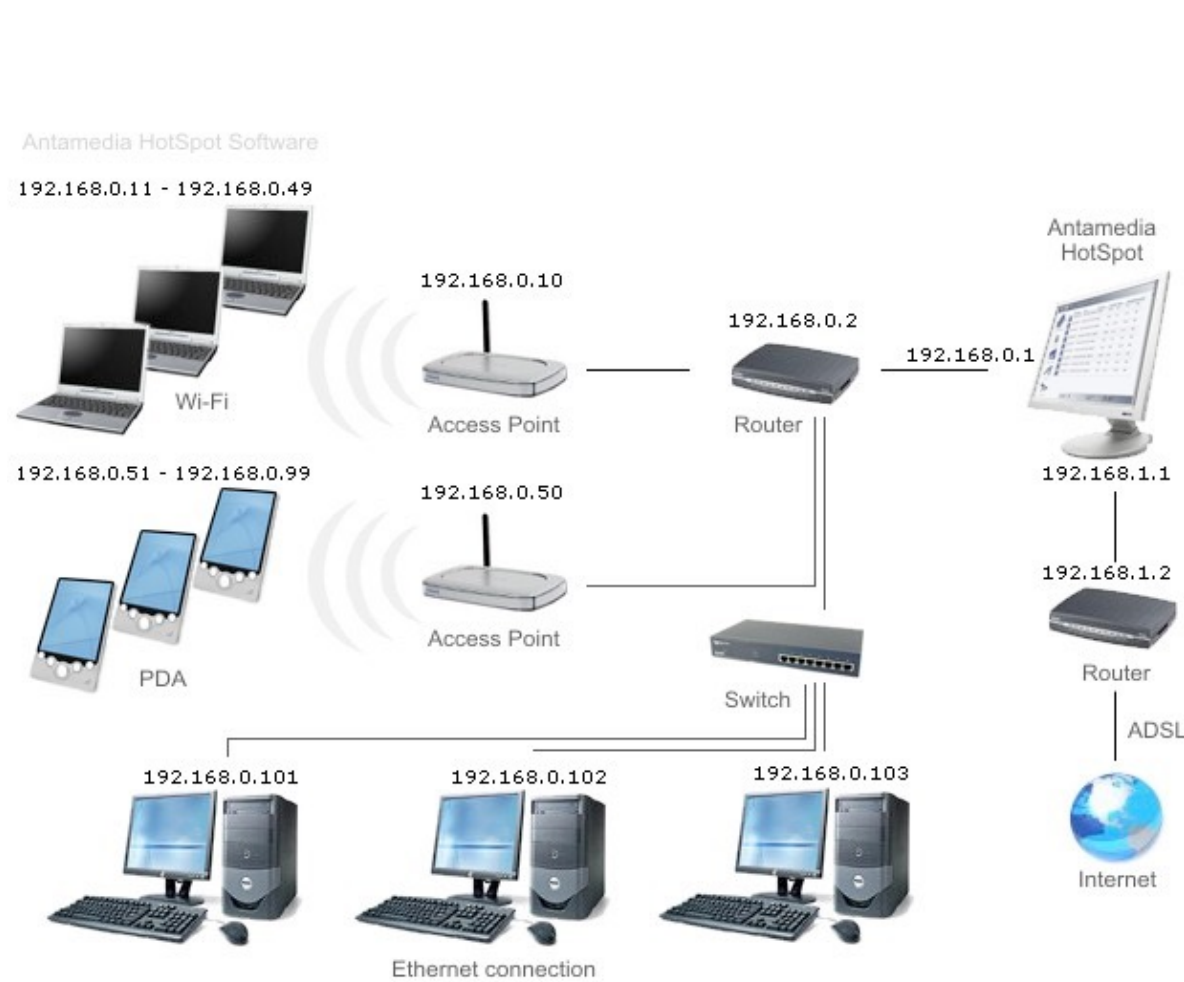
For up-to-date news, analysis and advice on networking, visit SearchNetworking.com.

Information by: Sonia Grotf/TechTarget
Design by: Brian Lineberry/TechTarget

Définition

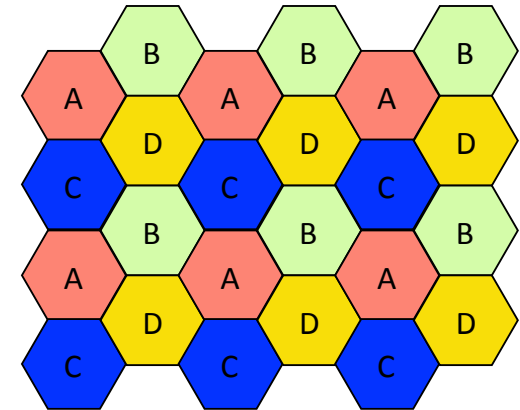
- Le **WI-FI** répond à la norme **IEEE 802.11**. La norme IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11) est un standard international décrivant les caractéristiques d'un réseau local sans fil (WLAN).
- Le nom **Wi-Fi** (contraction de **Wireless Fidelity**) correspond initialement au nom donné à la certification délivrée par la WECA (<http://www.weca.org/>) Etats-Unis (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*), l'organisme chargé de maintenir l'interopérabilité entre les matériels répondant à la norme 802.11.
- C' est la Wi-Fi Alliance qui pose le **label** “ Wi-Fi ” et certifie les produits des constructeurs
- Par abus de langage (et pour des raisons de marketing) le nom de la norme se confond aujourd'hui avec le nom de la certification. Ainsi un réseau Wifi est en réalité un réseau répondant à la norme 802.11.

WiFi est un réseau cellulaire



Network Topology Example

©2006 Antamedia



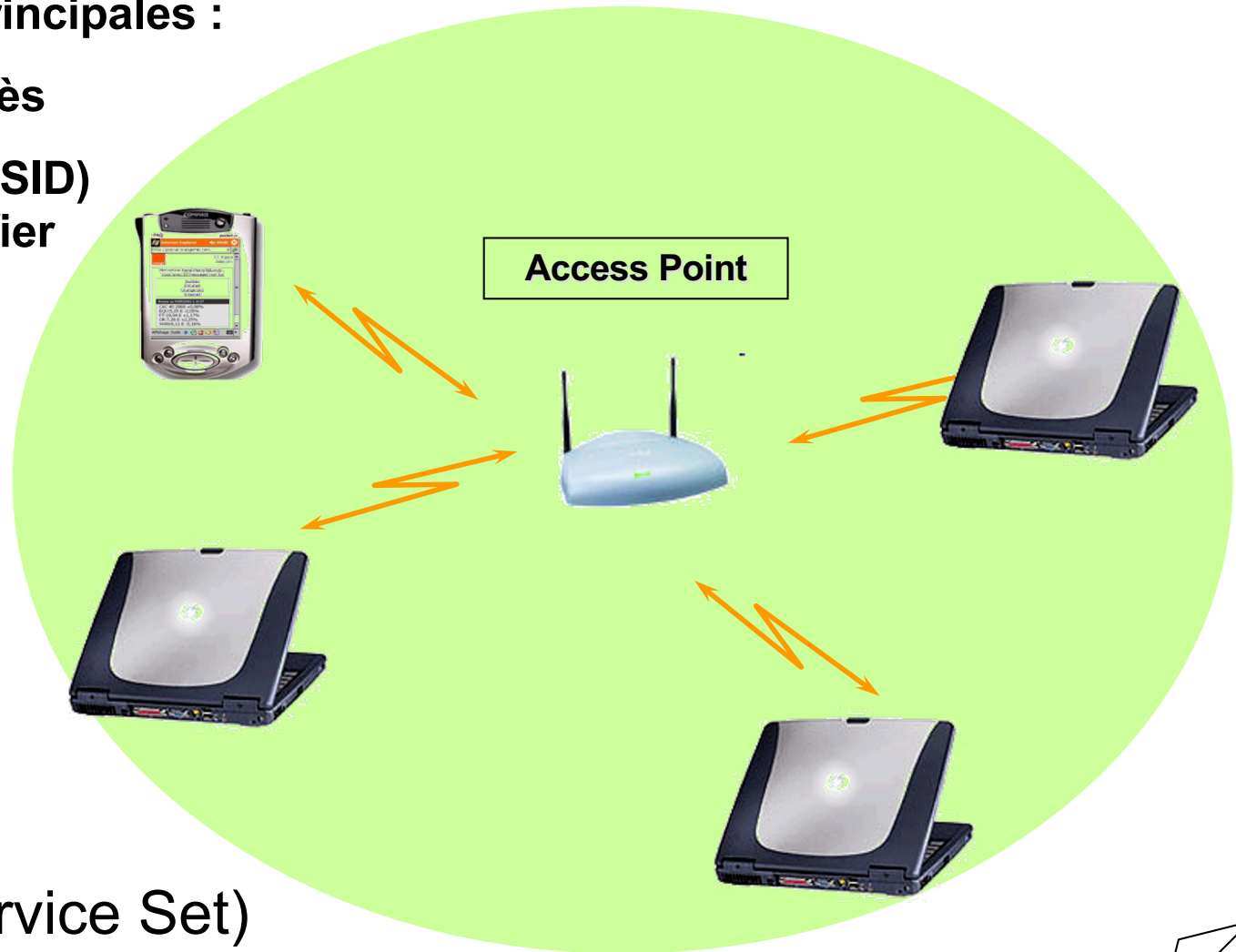
IEEE 802.11 : Architecture

- Il existe deux types de topologies :
 - Le **mode infrastructure**, avec **BSS** et **ESS**.
 - En mode infrastructure **BSS**, le réseau est composé d'un point d'accès qui permet aux différentes stations qui se trouvent dans sa cellule d'échanger des informations.
 - En mode infrastructure **ESS**, le réseau comporte plusieurs points d'accès reliés entre eux par un DS
 - Le **mode ad-hoc**
 - En mode ad-hoc, ne comporte pas de points d'accès, ce sont les stations (avec cartes Wi-Fi) qui entrent elles mêmes en communication.

IEEE 802.11 : Architecture BSS

Caractéristiques principales :

- 1 seul point d'accès
- Nom de réseau (SSID)
Service Set Identifier

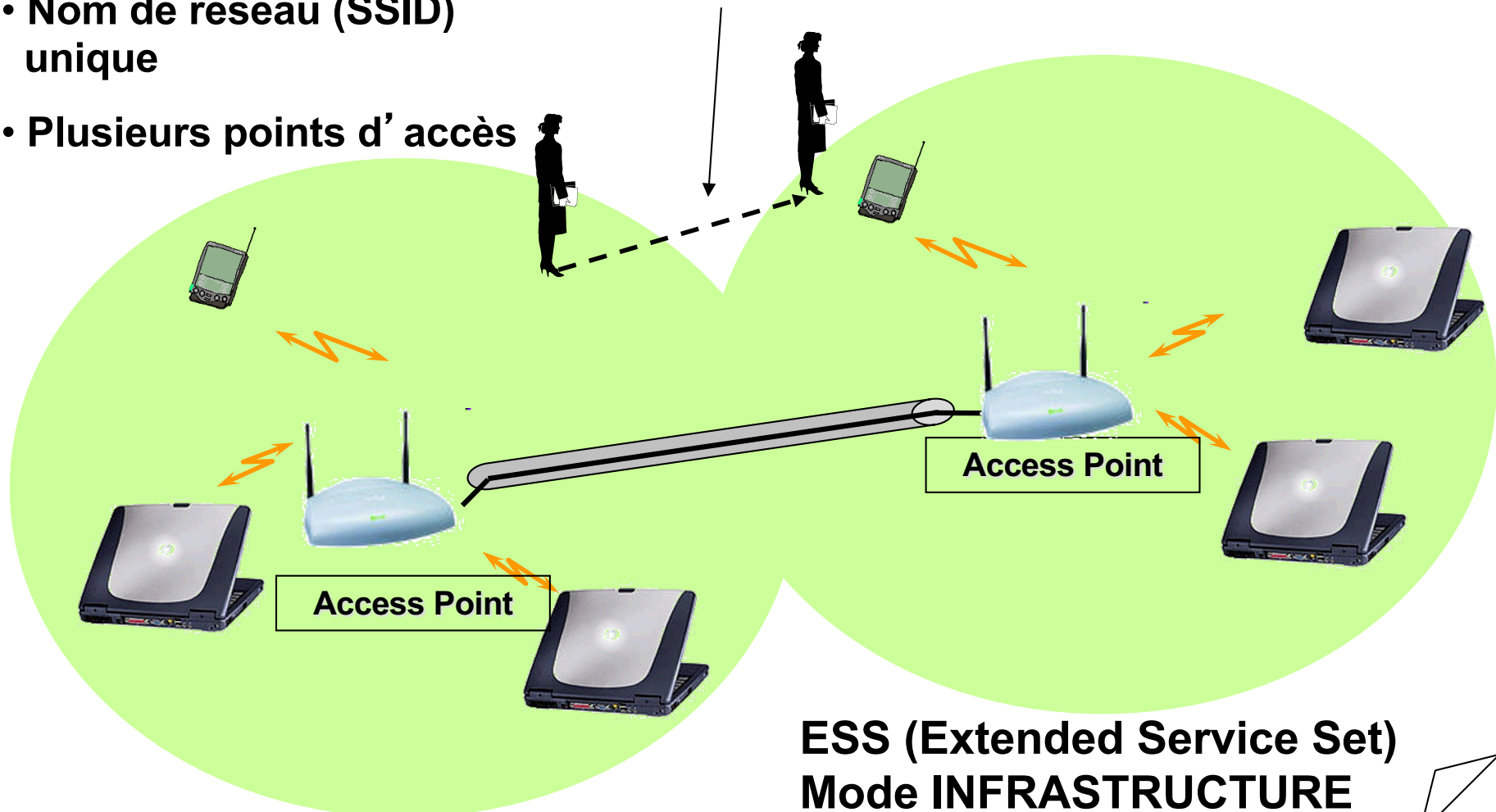


IEEE 802.11 : Architecture ESS et handover

Caractéristiques principales :

- Nom de réseau (SSID) unique
- Plusieurs points d'accès

Mécanisme de handover



Premiers standards IEEE 802.11

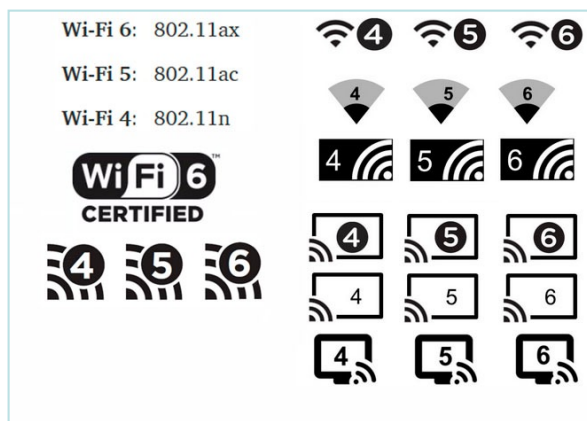
- **802.11** : L' ancêtre du réseau sans fil, sur 2,4 GHz modulation DSSS ou saut de fréquence (aucune norme imposée), d' un débit de 2 Mb/s et pratiquement pas inter-opérable de constructeur à constructeur.
- **802.11b** : premier réseau Ethernet sans fil interopérable, sur 2,4 GHz, offrant un débit physique de 11 Mb/s (modulation DSSS, accès par CSMA/CA et détection de porteuse)
- **802.11a** : (baptisé WiFi 5) historiquement c' est le second projet de réseau Ethernet sans fil sur 5 GHz, elle permet d'obtenir un haut débit (54 Mbps théoriques, 30 Mbps réels). Pas de compatibilité avec 802.11b
- **802.11g** : Adaptation d' OFDM aux réseaux 802.11b (compatibilité) (passage à 54 Mb/s). La norme 802.11g a une compatibilité ascendante avec la norme 802.11b.

Réseaux locaux 802.11 : standards physiques								[masquer]
Protocole 802.11	date ²	Fréquence	largeur de bande	Débit binaire ³	Nombre maximum de flux MIMO	Codage / Modulation	Portée	
							Intérieur	Extérieur
		(GHz)	(MHz), (GHz)	(Mbit/s), (Gbit/s)			(mètres)	(mètres)
802.11-1997 (d'origine)	juin 1997	2,4	79 ou 22 ⁴ MHz	1, 2 Mbit/s	NC	FHSS, DSSS	20 m	100 m
802.11a	sept 1999	5	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s	1	OFDM	35 m	120 m
		3,7 ^[A]					—	5 000 m ^[A]
802.11b	sept 1999	2,4	22 MHz	1, 2, 5,5, 11 Mbit/s	1	DSSS	35 m	140 m
802.11g	juin 2003	2,4	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s	1	OFDM	38 m	140 m
802.11n	oct 2009	2,4 / 5	20 MHz	7,2 à 72,2 Mbit/s ^[B] (6,5 à 65) ^[C]	4	OFDM	70 m (2,4 GHz) 12-35 m (5 GHz)	250 m ⁵
			40 MHz	15 à 150 Mbit/s ^[B] (13,5 à 135) ^[C]				
802.11ac	déc 2013	5	20 MHz	6,5 à 346,8 Mbit/s ^[D]	8	OFDM	12-35 m	300 m
			40 MHz	13,5 à 800 Mbit/s ^[D]				
			80 MHz	19,3 Mbit/s à 1,7 Gbit/s ^[D]				
			160 MHz	58,5 Mbit/s à 3,4 Gbit/s ^[D]				
802.11ad	déc 2012	57 à 71	1,7 à 2,16 GHz	jusqu'à 6,75 Gbit/s ⁶	NC	OFDM ou porteuse unique	10 m ⁷	
802.11af	février 2014	0,054 à 0,79	6 à 8 MHz	1,8 à 568,9 Mbit/s	1, 2, 4	OFDM	100 m	1000 m
802.11ah	mai 2017 ²	0,9	1 à 8 MHz	0,6 à 8,6 Mbit/s ⁸	4	OFDM	100 m	
802.11ax	novembre 2020	2,4 / 5	20 MHz	8 Mbit/s à 1,1 Gbit/s ^[D]	8	OFDM, OFDMA	12-35 m	300 m
			40 MHz	16 Mbit/s à 2,3 Gbit/s ^[D]				
			80 MHz	34 Mbit/s à 4,8 Gbit/s ^[D]				
			160 MHz	68 Mbit/s à 10,5 Gbit/s ^[D]				
802.11ay	décembre 2020 ⁹	58,3 à 70,2	2,16 à 8,64 GHz	20 à 176 Gbit/s	4 ¹⁰	OFDM ou <i>single carrier</i>	100 m	500
Voir aussi : Wi-Fi · Liste des canaux Wi-Fi								

Nouvelles générations WiFi

- Terme "génération" pour le grand public

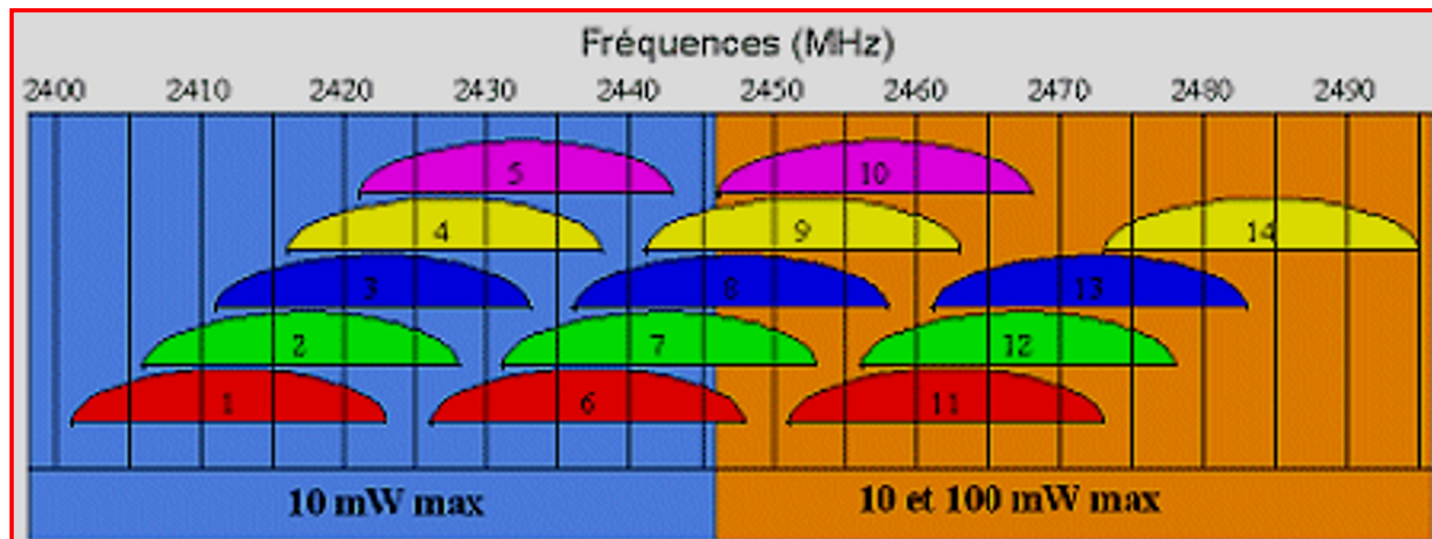
Gen. ^[3]	IEEE standard	Adopt.	Link rate (Mbit/s)	2.4 GHz	5 GHz	6 GHz
	802.11	1997	1–2	✓		
	802.11b	1999	1–11	✓		
	802.11a	1999	6–54		✓	
	802.11g	2003		✓		
Wi-Fi 4	802.11n	2009	6.5–600	✓	✓	
Wi-Fi 5	802.11ac	2013	6.5–6,933		✓ ^[a]	
Wi-Fi 6	802.11ax	2021	0.4–9,608	✓	✓	
Wi-Fi 6E ^[b]				✓	✓	✓
Wi-Fi 7	802.11be	2024	0.4–23,059	✓	✓	✓
Wi-Fi 8 ^{[4][5]}	802.11bn		100,000 ^[6]	✓	✓	✓



Bande ISM

(Industrial, Scientific and Medical)

- Bande ISM
 - Bande divisée en 14 canaux de 20 MHz
 - Problème de recouvrement
 - Superposition de 3 réseaux au sein d'un même espace
 - Largeur de bande 83 MHz



Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fréquence (GHz)	2.412	2.417	2.422	2.427	2.432	2.437	2.442	2.447	2.452	2.457	2.462	2.467	2.472	2.484

Canaux sans recouvrement

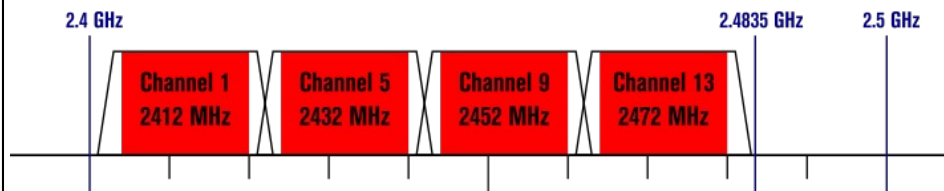
- Les canaux 1, 6 et 11 sont les plus utilisés

Non-Overlapping Channels for 2.4 GHz WLAN

802.11b (DSSS) channel width 22 MHz



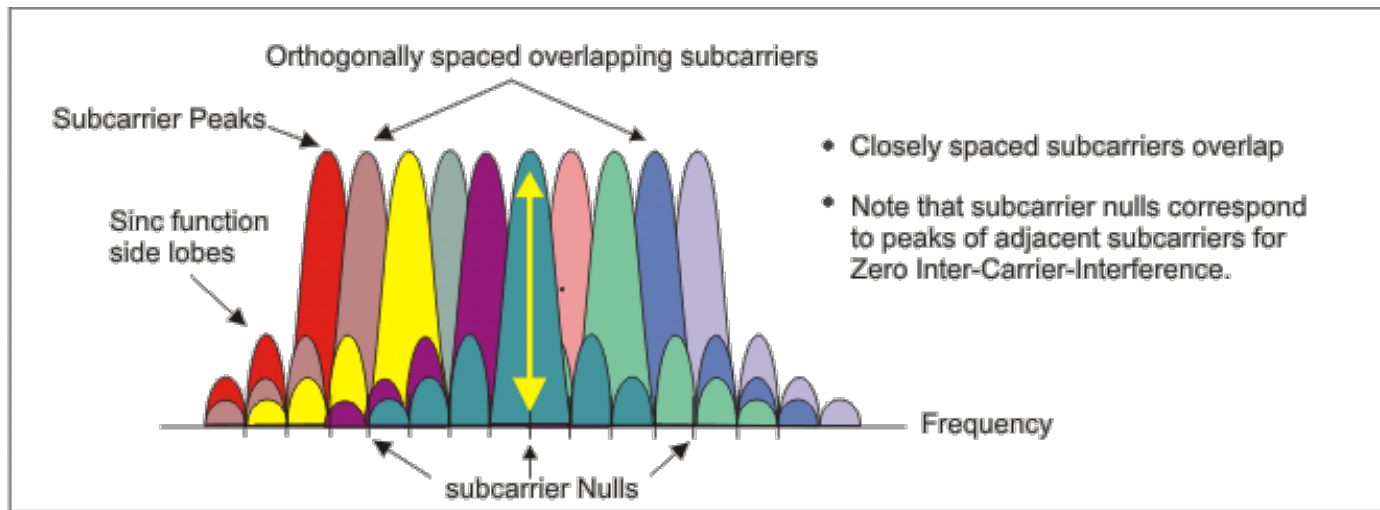
802.11g/n (OFDM) 20 MHz ch. width – 16.25 MHz used by sub-carriers



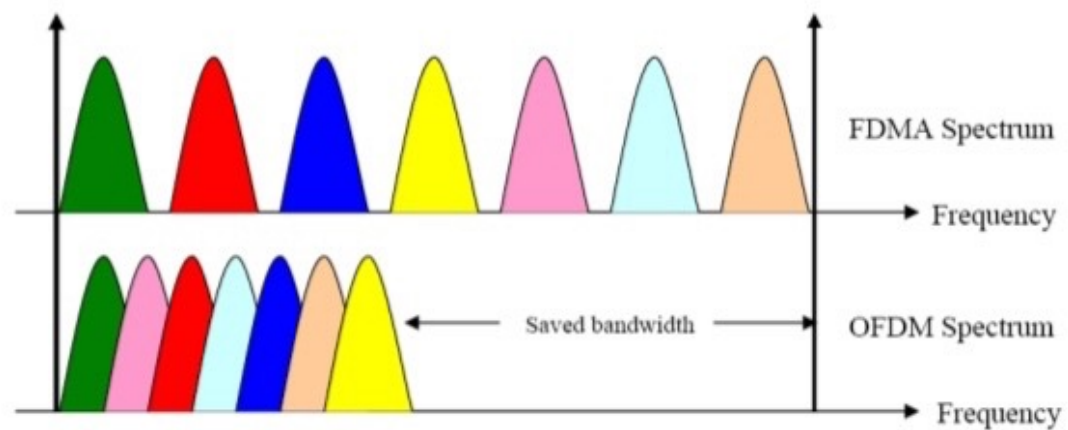
OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)

- Principe : diviser le canal principal en sous canaux de fréquence plus faible. Chacun de ces sous canaux est modulé par une fréquence différente, l'espacement entre chaque fréquence restant constant. Ces fréquences constituent une base orthogonale : le spectre du signal OFDM présente une occupation optimale de la bande allouée.
- Multiplexage en fréquences, mais pour une seule source de données.

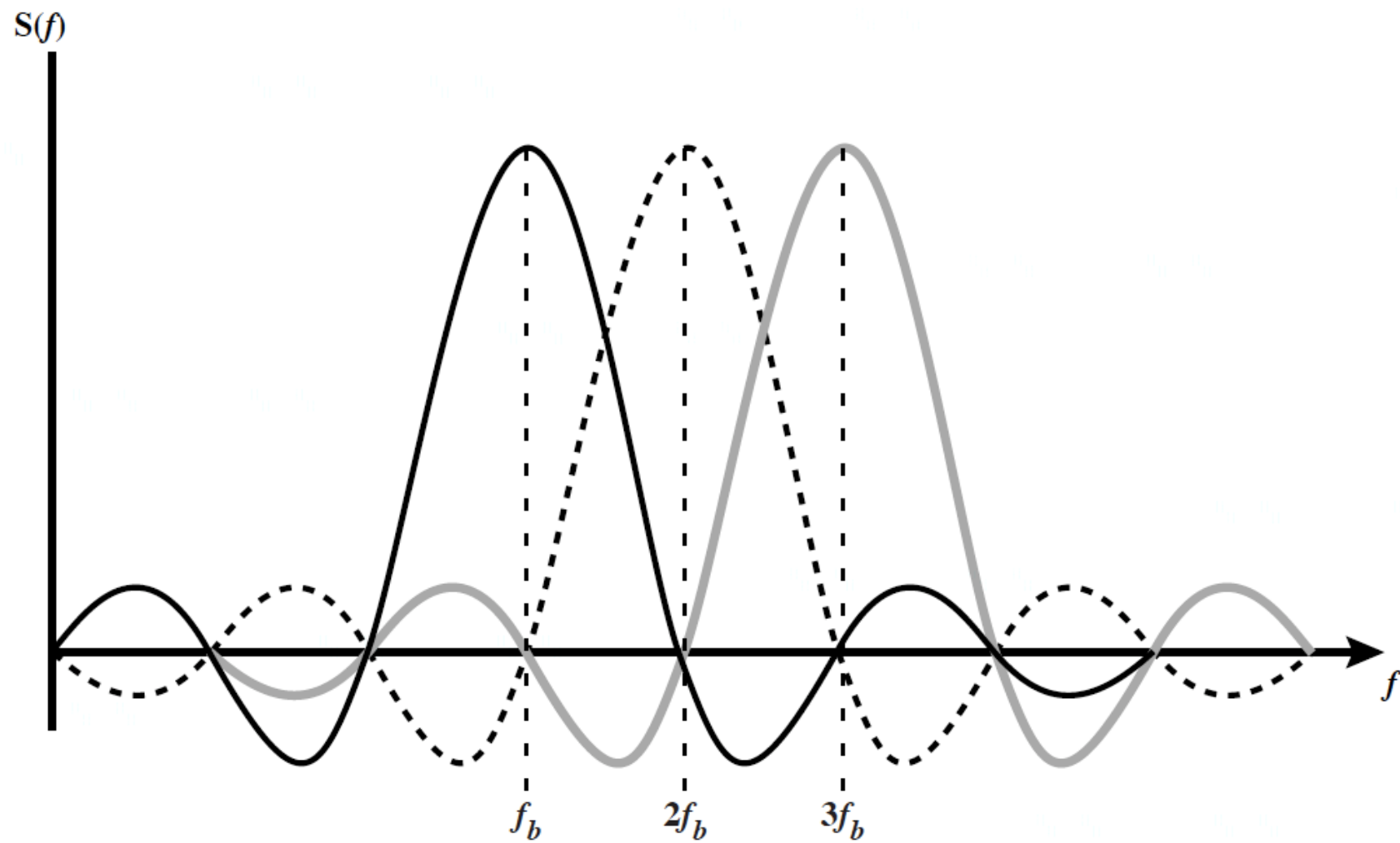
OFDM



OFDM Signal Frequency Spectra



OFDM



(b) Three subcarriers in frequency domain

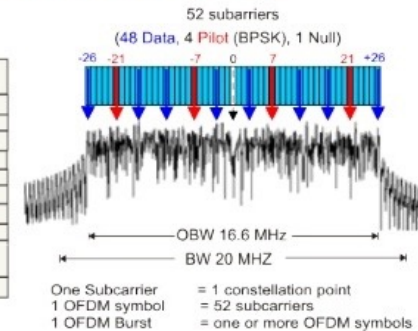
OFDM et WiFi

Protocole 802.11	date ¹	Fréquence (GHz)	largeur de bande (MHz), (GHz)	Débit binaire ² (Mbit/s), (Gbit/s)	Nombre maximum de flux MIMO	Codage / Modulation	Portée	
							Intérieur (mètres)	Extérieur (mètres)
802.11-1997 (d'origine)	juin 1997	2,4	79 ou 22 ³ MHz	1, 2 Mbit/s	NC	FHSS, DSSS	20 m	100 m
802.11a	sept 1999	5 3,7 ^[A]	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s	1	OFDM	35 m —	120 m 5 000 m ^[A]
802.11b	sept 1999	2,4	22 MHz	1, 2, 5,5, 11 Mbit/s	1	DSSS	35 m	140 m
802.11g	juin 2003	2,4	20 MHz	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54 Mbit/s	1	OFDM	38 m	140 m
802.11n	oct 2009	2,4 / 5	20 MHz	7,2 à 72,2 Mbit/s ^[B] (6,5 à 65) ^[C]	4	OFDM	70 m (2,4 GHz)	250 m ⁴ (5 GHz)
			40 MHz	15 à 150 Mbit/s ^[B] (13,5 à 135) ^[C]			12-35 m	
802.11ac	déc 2013	5	20 MHz	6,5 à 346,8 Mbit/s ^[D]	8	OFDM	12-35 m	300 m
			40 MHz	13,5 à 800 Mbit/s ^[D]				
			80 MHz	19,3 Mbit/s à 1,7 Gbit/s ^[D]				
			160 MHz	58,5 Mbit/s à 3,4 Gbit/s ^[D]				
802.11ad	déc 2012	57 à 71	1,7 à 2,16 GHz	jusqu'à 6,75 Gbit/s ⁵	NC	OFDM ou porteuse unique	10 m ⁶	
802.11af	février 2014	0,054 à 0,79	6 à 8 MHz	1,8 à 568,9 Mbit/s	1, 2, 4	OFDM	100 m	1000 m
802.11ah	mai 2017 ¹	0,9	1 à 8 MHz	0,6 à 8,6 Mbit/s ⁷	4	OFDM	100 m	
802.11ax	novembre 2020	2,4 / 5	20 MHz	8 Mbit/s à 1,1 Gbit/s ^[D]	8	OFDM, OFDMA	12-35 m	300 m
			40 MHz	16 Mbit/s à 2,3 Gbit/s ^[D]				
			80 MHz	34 Mbit/s à 4,8 Gbit/s ^[D]				
			160 MHz	68 Mbit/s à 10,5 Gbit/s ^[D]				
802.11ay	décembre 2020 ⁸	58,3 à 70,2	2,16 à 8,64 GHz	20 à 176 Gbit/s	4 ⁹	OFDM ou single carrier	100 m	500

Voir aussi : Wi-Fi · Liste des canaux Wi-Fi

WiFi OFDM parameters

BW	20 MHz
OBW	16.6 MHz
Subcarrier Spacing	312.5 KHz (20MHz/64 Pt FFT)
Information Rate	6/9/12/18/24/36/48/54 Mbits/s
Modulation	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Coding Rate	1/2, 2/3, 3/4
Total Subcarriers	52 (Freq Index -26 to +26)
Data Subcarriers	48
Pilot Subcarriers*	4 (-21, -7, +7, +21) *Always BPSK
DC Subcarrier	Null (0 subcarrier)



802.11a OFDM Physical Parameters

IFFT size (**N**) = **64** (52 used subcarriers + 1 DC + 11 guard subcarriers)

IFFT output duration (**T**) = 1 / subcarrier spacing = $1 / (312.5 \times 10^3) = \mathbf{3.2 \text{ us}}$

Cyclic prefix length = **T_g = 0.8 us** = T/4

Sample time (**T_s**) = $1 / (20 \times 10^6) = \mathbf{0.05 \text{ us}}$

Used BW (**B_{used}**) = 53 (52 + 1 DC) subcarriers x 312.5 kHz = **16.6 MHz** = OBW = Occupied BW

IEEE 802.11

Couche Liaison

Couche Liaison de données

Couche liaison de données	LLC 802.2 Contrôle de liaison logique
	MAC 802.11, sécurité, etc ... Contrôle d'accès au support

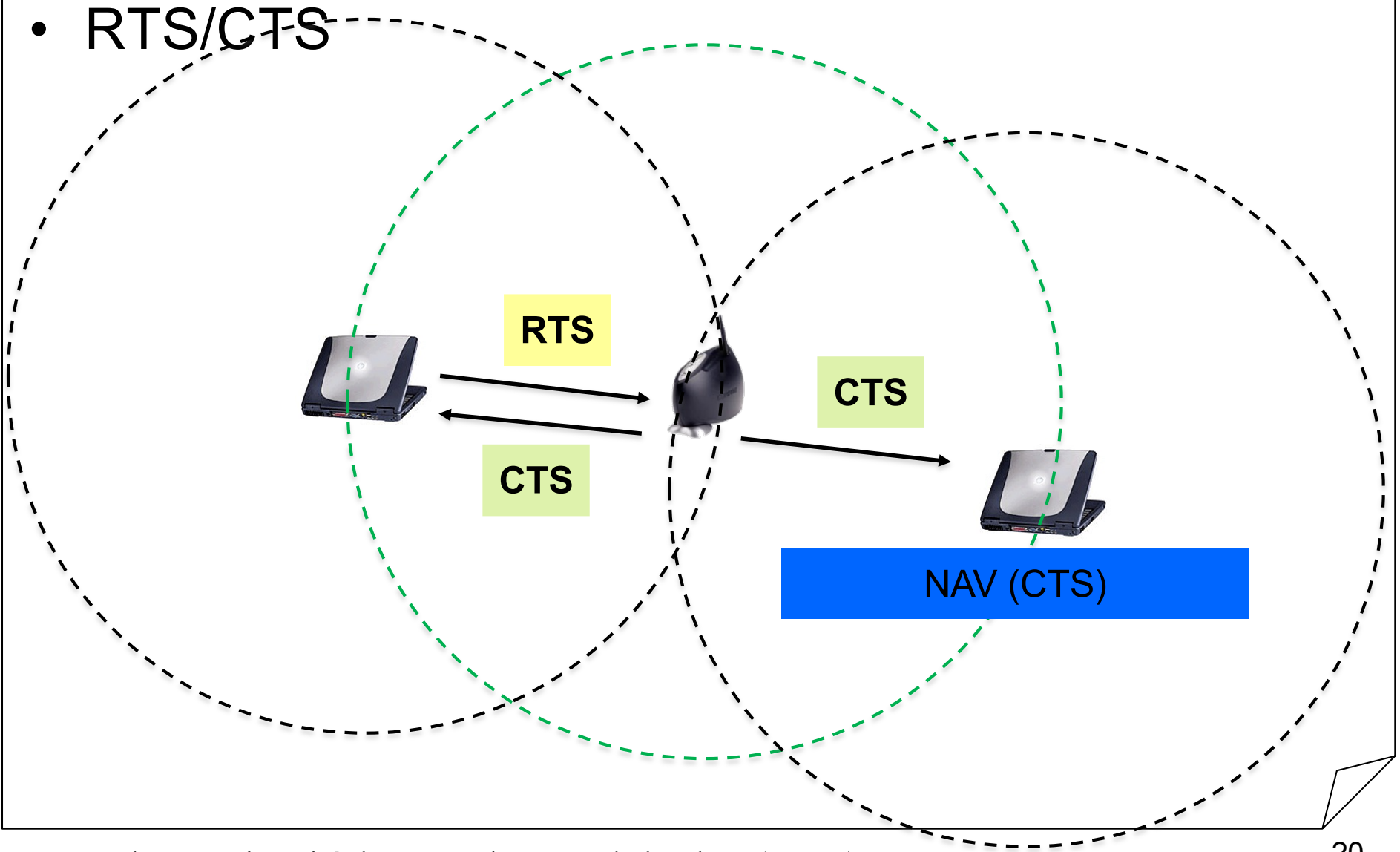
- La couche MAC définit 2 méthodes d'accès différentes
 - La méthode CSMA/CA utilisant la Distributed Coordination Function
 - La Point Coordination Function (PCF) : voix, vidéos ...
- La couche MAC offre 2 mécanismes de robustesse :
 - sommes de contrôle (CRC sur 32 bits)
 - fragmentation des paquets

CSMA/CA

- **Rappel** : dans un réseau **éthernet** filaire, utilisation de la méthode d'accès **CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection)**
- Pour un environnement sans fil : utilisation **CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)**
 - 2 stations communiquant avec un récepteur (AP) ne s'entendent pas forcément mutuellement en raison de leur rayon de portée.
 - Caractéristique : utilise un mécanisme d'esquive de collision basé sur un principe d'accusés de réception (RTS/CTS) réciproques entre l'émetteur et le récepteur
 - Ecoute du support et Network Allocation Vector (NAV)
 - Deux méthodes d'accès au canal basées sur CSMA/CA ont été implémentées pour les réseaux 802.11 : **DCF** et **PCF**

Problème du "terminal caché"

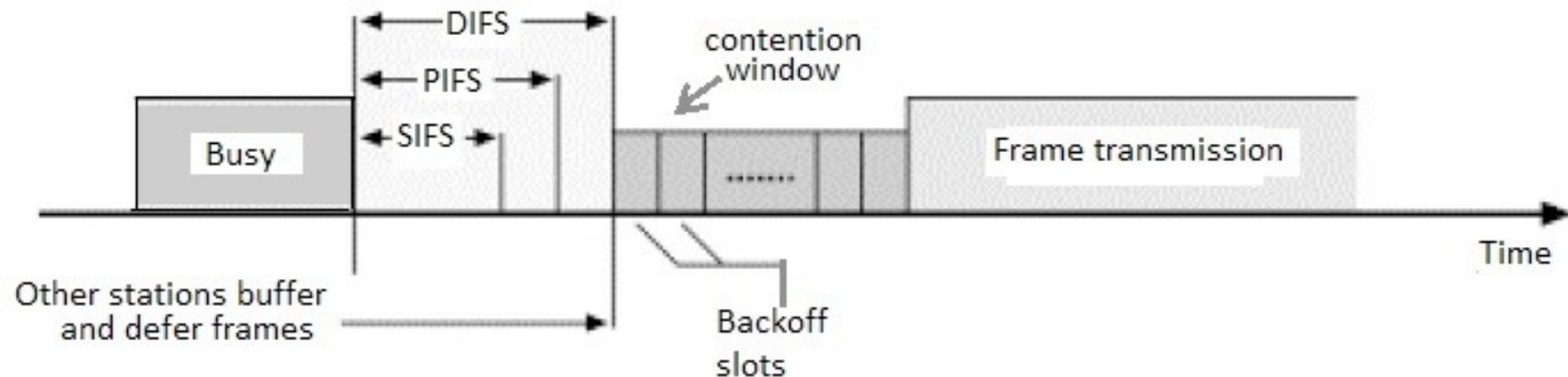
- RTS/CTS



Inter Frame Spacing

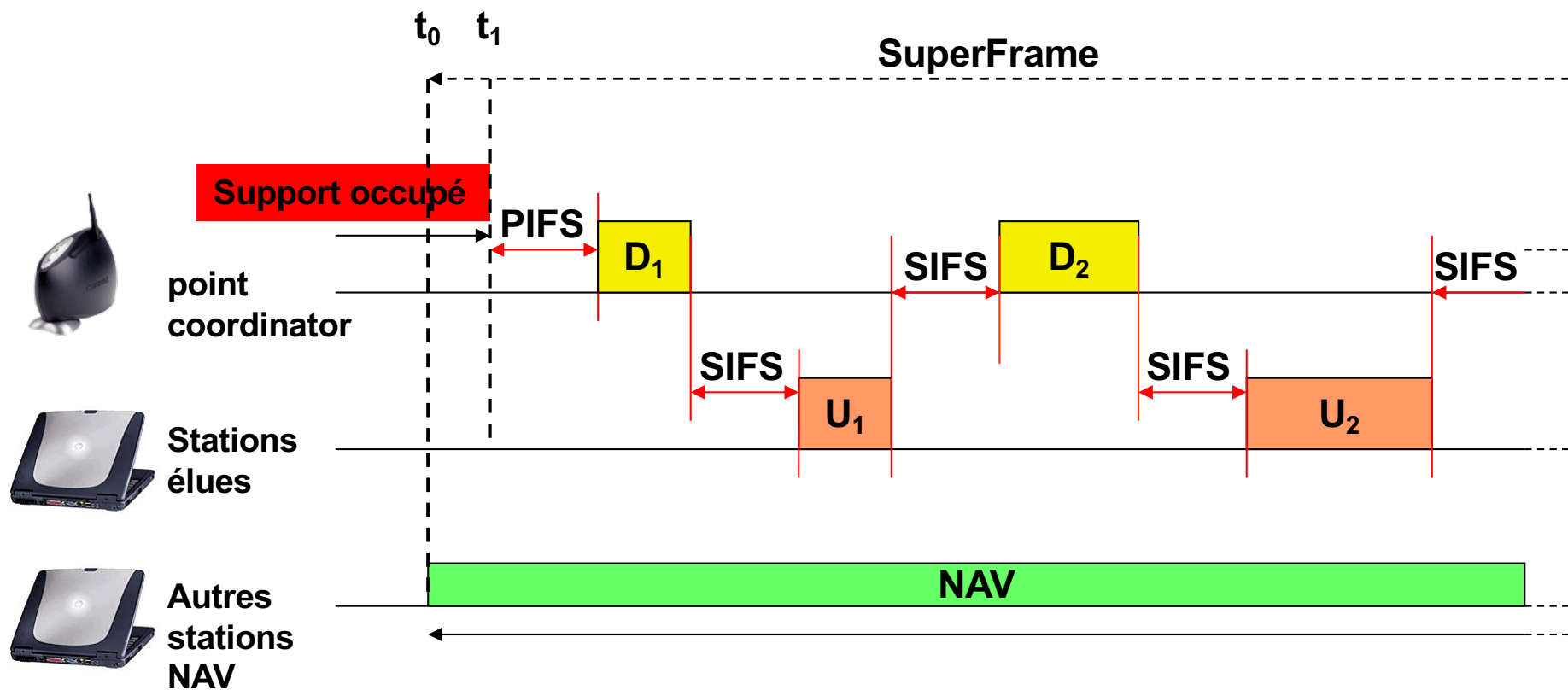
CSMA/CA est basé sur :

- Les temporisateurs IFS (Inter Frame Spacing)
 - SIFS (Short IFS) : Plus haute priorité pour ACK, CTS,...
 - PIFS (PCF IFS) : Priorité Moyenne, pour le PCF
 - DIFS (DCF IFS) : Priorité Faible pour le DCF
- Algorithme de Backoff: attente aléatoire dans la fenêtre de contention

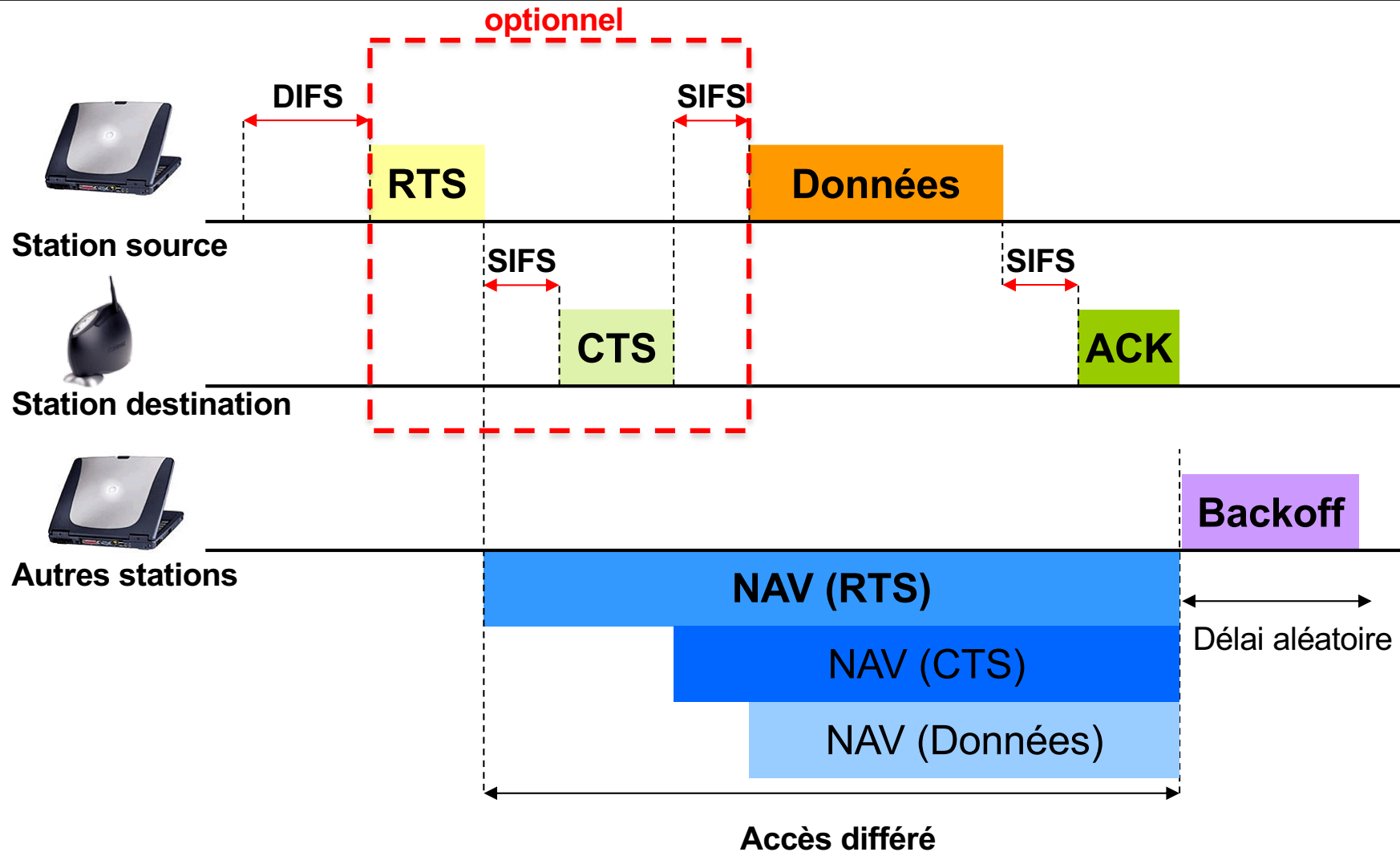


- Le but de l'attente aléatoire est de répartir le début des transmissions

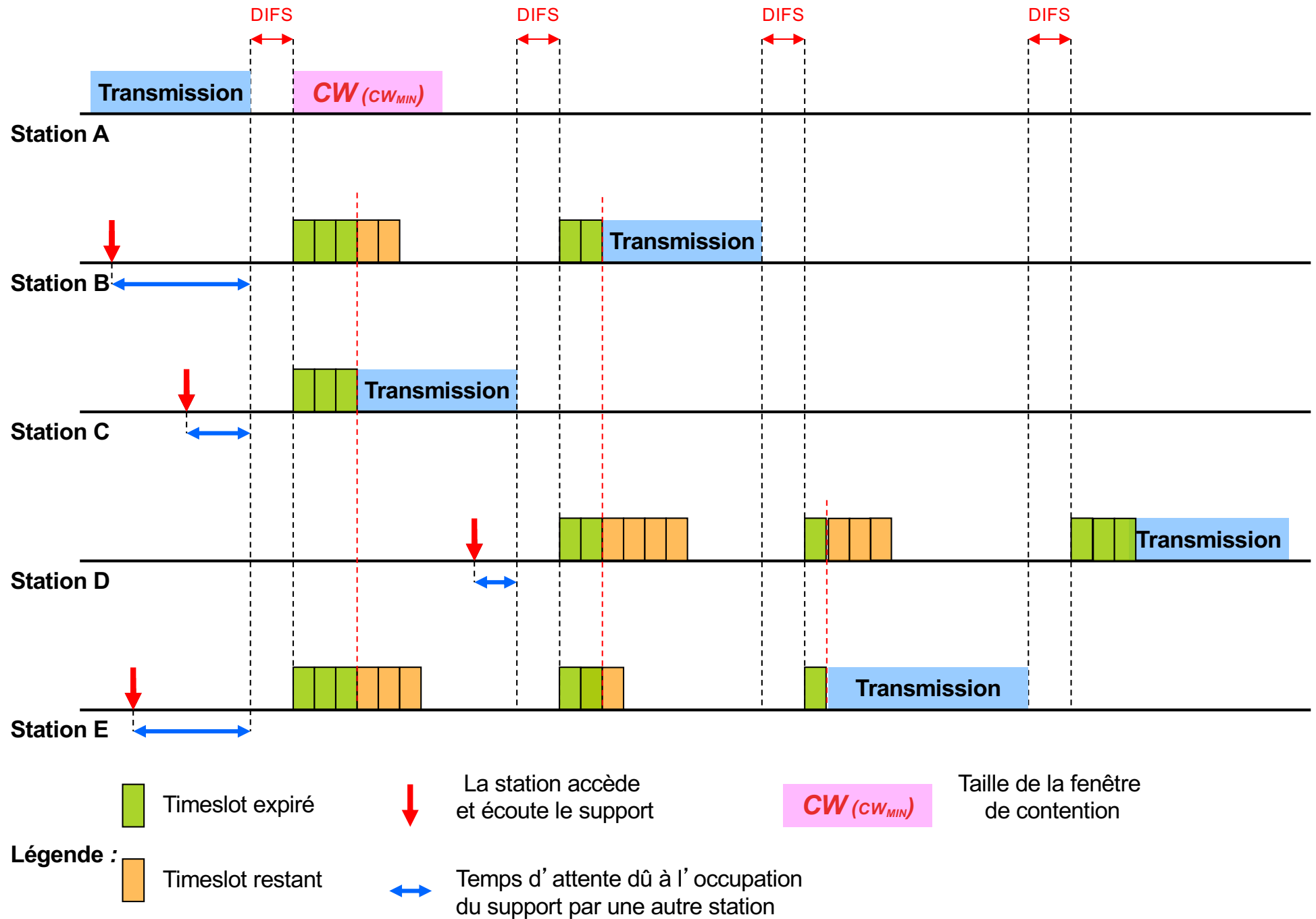
PCF (Point Coordination Function)



DCF (Distributed Coordination Function)

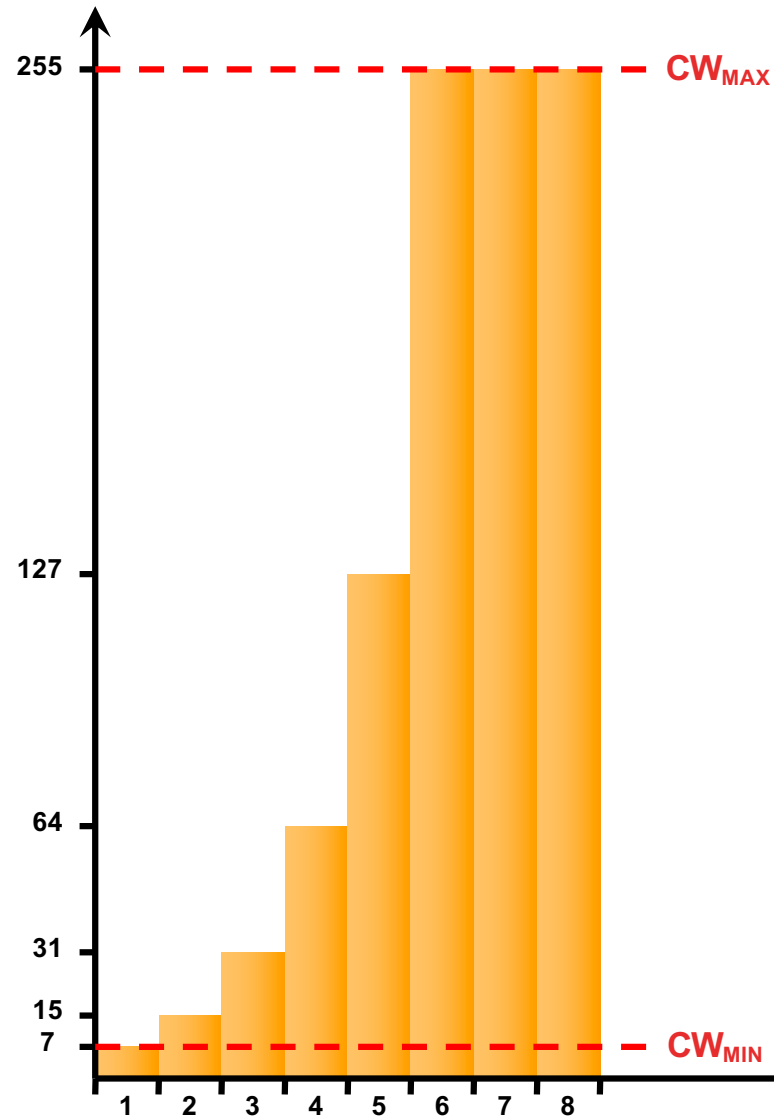


Supports empruntés à G. Pujolle



Durées

Taille de la fenêtre
de contention



	FHSS	DSSS	IR
Timeslot (μs)	50	20	8
SIFS (μs)	28	10	7
DIFS (μs)	128	50	19
PIFS (μs)	78	30	15

Additional mechanism in newer WiFi

- In Wi-Fi 6 (802.11ax)
 - OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) → AP divides the channel into small resource units
 - BSS Coloring → lets devices differentiate between their own network vs. neighbors, reducing unnecessary waiting
 - MU-MIMO (Multi-User MIMO) → allows multiple devices to talk simultaneously.
- In Wi-Fi 7 (802.11be) → adds more advanced coordination
 - Multi-Link Operation (MLO) → devices can use multiple bands/links at once, reducing congestion
 - Preamble Puncturing → avoids wasting whole channels if part is busy.
 - More simultaneous transmissions (enhanced OFDMA + MU-MIMO).