

# 802.11ac

ou comment aller encore plus vite dans la  
bande des 5 GHz

# Principales différences entre 802.11n et 802.11ac

*Table 1-1. Differences between 802.11n and 802.11ac*

| 802.11n  | 802.11ac   |
|--|--|
| Supports 20 and 40 MHz channels                        | Adds 80 and 160 MHz channels   |
| Supports 2.4 GHz and 5 GHz frequency bands             | Supports 5 GHz only  |
| Supports BPSK, QPSK, 16-QAM, and 64-QAM                | Adds 256-QAM   |
| Supports many types of explicit beamforming            | Supports only null data packet (NDP) explicit beamforming                            |
| Supports up to four spatial streams                    | Supports up to eight spatial streams (AP); client devices up to four spatial streams |
| Supports single-user transmission only                 | Adds multi-user transmission   |
| Includes significant MAC enhancements (A-MSDU, A-MPDU) | Supports similar MAC enhancements, with extensions to accommodate high data rates    |

Gast 2013

# Quelques débits d'émission

Modulation and coding schemes

| MCS index <sup>[b]</sup> | Spatial Streams | Modulation type | Coding rate | Data rate (in Mbit/s) <sup>[14][c]</sup> |           |                 |           |                 |           |                  |           |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------|--|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|------------------|-----------|
|                          |                 |                 |             | 20 MHz channels                          |           | 40 MHz channels |           | 80 MHz channels |           | 160 MHz channels |           |
|                          |                 |                 |             | 800 ns GI                                | 400 ns GI | 800 ns GI       | 400 ns GI | 800 ns GI       | 400 ns GI | 800 ns GI        | 400 ns GI |
| 0                        | 1               | BPSK            | 1/2         | 6.5                                      | 7.2       | 13.5            | 15        | 29.3            | 32.5      | 58.5             | 65        |
| 1                        | 1               | QPSK            | 1/2         | 13                                       | 14.4      | 27              | 30        | 58.5            | 65        | 117              | 130       |
| 2                        | 1               | QPSK            | 3/4         | 19.5                                     | 21.7      | 40.5            | 45        | 87.8            | 97.5      | 175.5            | 195       |
| 3                        | 1               | 16-QAM          | 1/2         | 26                                       | 28.9      | 54              | 60        | 117             | 130       | 234              | 260       |
| 4                        | 1               | 16-QAM          | 3/4         | 39                                       | 43.3      | 81              | 90        | 175.5           | 195       | 351              | 390       |
| 5                        | 1               | 64-QAM          | 2/3         | 52                                       | 57.8      | 108             | 120       | 234             | 260       | 468              | 520       |
| 6                        | 1               | 64-QAM          | 3/4         | 58.5                                     | 65        | 121.5           | 135       | 263.3           | 292.5     | 526.5            | 585       |
| 7                        | 1               | 64-QAM          | 5/6         | 65                                       | 72.2      | 135             | 150       | 292.5           | 325       | 585              | 650       |
| 8                        | 1               | 256-QAM         | 3/4         | 78                                       | 86.7      | 162             | 180       | 351             | 390       | 702              | 780       |
| 9                        | 1               | 256-QAM         | 5/6         | N/A                                      | N/A       | 180             | 200       | 390             | 433.3     | 780              | 866.7     |
| 0                        | 2               | BPSK            | 1/2         | 13                                       | 14.4      | 27              | 30        | 58.5            | 65        | 117              | 130       |
| 1                        | 2               | QPSK            | 1/2         | 26                                       | 28.9      | 54              | 60        | 117             | 130       | 234              | 260       |
| 2                        | 2               | QPSK            | 3/4         | 39                                       | 43.3      | 81              | 90        | 175.5           | 195       | 351              | 390       |
| 3                        | 2               | 16-QAM          | 1/2         | 52                                       | 57.8      | 108             | 120       | 234             | 260       | 468              | 520       |
| 4                        | 2               | 16-QAM          | 3/4         | 78                                       | 86.7      | 162             | 180       | 351             | 390       | 702              | 780       |
| 5                        | 2               | 64-QAM          | 2/3         | 104                                      | 115.6     | 216             | 240       | 468             | 520       | 936              | 1040      |
| 6                        | 2               | 64-QAM          | 3/4         | 117                                      | 130.3     | 243             | 270       | 526.5           | 585       | 1053             | 1170      |
| 7                        | 2               | 64-QAM          | 5/6         | 130                                      | 144.4     | 270             | 300       | 585             | 650       | 1170             | 1300      |
| 8                        | 2               | 256-QAM         | 3/4         | 156                                      | 173.3     | 324             | 360       | 702             | 780       | 1404             | 1560      |
| 9                        | 2               | 256-QAM         | 5/6         | N/A                                      | N/A       | 360             | 400       | 780             | 866.7     | 1560             | 1733.3    |

67

MCS 8 (256-QAM + 3/4) + 1 SS + 160 MHz + Long GI => débit d'émission = 702 Mb/s

Qu'en est-il en pratique des performances  
des réseaux Wi-Fi ?

# Débit théorique vs. Débit réel

- **Capacité d'émission** = débit physique max
- Débit théorique utile (tel que calculé en TD)
- Qu'en est-il en pratique ?
  - Mesures expérimentales

# Exemples de mesures

| NSS | MCS | 20 long | Wiki 20 long | Ratio  | 20 short | Wiki 20 short | Ratio  | 40 long | Wiki 40 long | Ratio  | 40 short | Wiki 40 short | Ratio  | 80 long | Wiki 80 long | Ratio  | 80 short | Wiki 80 short | Ratio  |
|-----|-----|---------|--------------|--------|----------|---------------|--------|---------|--------------|--------|----------|---------------|--------|---------|--------------|--------|----------|---------------|--------|
| 1   | 0   | 4,91154 | 6,5          | 0,7556 | 6,42202  | 7,2           | 0,8919 | 11,365  | 13,5         | 0,8418 | 12,3428  | 15            | 0,8229 | 25,08   | 29,3         | 0,8560 | 27,5124  | 32,5          | 0,8465 |
| 1   | 1   | 11,0467 | 13           | 0,8497 | 12,3346  | 14,4          | 0,8566 | 22,6396 | 27           | 0,8385 | 24,963   | 30            | 0,8321 | 50,936  | 58,5         | 0,8707 | 55,8055  | 65            | 0,8585 |
| 1   | 2   | 16,8114 | 19,5         | 0,8621 | 18,7616  | 21,7          | 0,8646 | 34,3745 | 40,5         | 0,8488 | 38,0674  | 45            | 0,8459 | 75,107  | 87,8         | 0,8554 | 81,9652  | 97,5          | 0,8407 |
| 1   | 3   | 21,8066 | 26           | 0,8387 | 24,5473  | 28,9          | 0,8494 | 46,8046 | 54           | 0,8668 | 50,6541  | 60            | 0,8442 | 100,13  | 117          | 0,8558 | 108,809  | 130           | 0,8370 |
| 1   | 4   | 34,2726 | 39           | 0,8788 | 38,1324  | 43,3          | 0,8807 | 72,2462 | 81           | 0,8919 | 76,6503  | 90            | 0,8517 | 142,19  | 175,5        | 0,8102 | 151,748  | 195           | 0,7782 |
| 1   | 5   | 44,8851 | 52           | 0,8632 | 49,5987  | 57,8          | 0,8581 | 92,981  | 108          | 0,8609 | 104,206  | 120           | 0,8684 | 179,06  | 234          | 0,7652 | 194,268  | 260           | 0,7472 |
| 1   | 6   | 50,7905 | 58,5         | 0,8682 | 56,5732  | 65            | 0,8704 | 101,756 | 121,5        | 0,8375 | 112,968  | 135           | 0,8368 | 190,13  | 263,3        | 0,7221 | 214,209  | 292,5         | 0,7323 |
| 1   | 7   | 57,1624 | 65           | 0,8794 | 61,5224  | 72,2          | 0,8521 | 112,218 | 135          | 0,8312 | 122,82   | 150           | 0,8188 | 212,48  | 292,5        | 0,7264 | 231,162  | 325           | 0,7113 |
| 1   | 8   | 69,0289 | 78           | 0,8850 | 75,377   | 86,7          | 0,8694 | 133,498 | 162          | 0,8241 | 144,999  | 180           | 0,8055 | 239,14  | 351          | 0,6813 | 258,18   | 390           | 0,6620 |
| 1   | 9   | 76,3202 | 0            | ###    | 83,5073  | 0             | ###    | 148,565 | 180          | 0,8254 | 156,682  | 200           | 0,7834 | 255,69  | 390          | 0,6556 | 269,201  | 433,3         | 0,6213 |
| 2   | 0   | 11,0244 | 13           | 0,8480 | 12,1527  | 14,4          | 0,8439 | 22,355  | 27           | 0,8280 | 24,7534  | 30            | 0,8251 | 51,158  | 58,5         | 0,8745 | 54,472   | 65            | 0,8380 |
| 2   | 1   | 22,0922 | 26           | 0,8497 | 24,6311  | 28,9          | 0,8523 | 46,7385 | 54           | 0,8655 | 50,6674  | 60            | 0,8445 | 96,938  | 117          | 0,8285 | 107,998  | 130           | 0,8308 |
| 2   | 2   | 33,7713 | 39           | 0,8659 | 37,2171  | 43,3          | 0,8595 | 70,4498 | 81           | 0,8698 | 76,2444  | 90            | 0,8472 | 137,55  | 175,5        | 0,7838 | 154,759  | 195           | 0,7936 |
| 2   | 3   | 45,2346 | 52           | 0,8699 | 51,1482  | 57,8          | 0,8849 | 92,9202 | 108          | 0,8604 | 102,85   | 120           | 0,8571 | 175,47  | 234          | 0,7499 | 190,132  | 260           | 0,7313 |
| 2   | 4   | 69,015  | 78           | 0,8848 | 75,8872  | 86,7          | 0,8753 | 131,278 | 162          | 0,8104 | 142,779  | 180           | 0,7932 | 236,08  | 351          | 0,6726 | 255,513  | 390           | 0,6552 |
| 2   | 5   | 88,8423 | 104          | 0,8543 | 100,742  | 115,6         | 0,8715 | 168,155 | 216          | 0,7785 | 185,316  | 270           | 0,6864 | 285,99  | 468          | 0,6111 | 299,509  | 520           | 0,5760 |
| 2   | 6   | 100,378 | 117          | 0,8579 | 111,204  | 130,3         | 0,8534 | 184,763 | 243          | 0,7603 | 201,496  | 270           | 0,7463 | 299,32  | 526,5        | 0,5685 | 308,393  | 585           | 0,5272 |
| 2   | 7   | 110,428 | 130          | 0,8494 | 121,759  | 144,4         | 0,8432 | 198,686 | 270          | 0,7359 | 218,933  | 300           | 0,7298 | 315,27  | 585          | 0,5389 | 312,342  | 650           | 0,4805 |
| 2   | 8   | 129,957 | 156          | 0,8331 | 144,061  | 173,3         | 0,8313 | 231,758 | 324          | 0,7153 | 245,29   | 360           | 0,6814 | 319,9   | 702          | 0,4557 | 320,373  | 780           | 0,4107 |
| 2   | 9   | 142,559 | 0            | ###    | 153,281  | 0             | ###    | 247,49  | 360          | 0,6875 | 256,789  | 400           | 0,6420 | 307,04  | 780          | 0,3936 | 319,047  | 866,7         | 0,3681 |
| 3   | 0   | 16,9368 | 19,5         | 0,8686 | 18,6283  | 21,7          | 0,8584 | 34,3667 | 40,5         | 0,8486 | 37,9995  | 45            | 0,8444 | 71,608  | 87,8         | 0,8156 | 83,343   | 97,5          | 0,8548 |
| 3   | 1   | 34,3849 | 39           | 0,8817 | 37,7671  | 43,3          | 0,8722 | 70,7106 | 81           | 0,8730 | 77,2348  | 90            | 0,8582 | 138,52  | 175,5        | 0,7893 | 151,652  | 195           | 0,7777 |
| 3   | 2   | 50,5106 | 58,5         | 0,8634 | 56,2272  | 65            | 0,8650 | 101,236 | 121,5        | 0,8332 | 111,385  | 135           | 0,8251 | 195,26  | 263,3        | 0,7416 | 209,801  | 292,5         | 0,7173 |
| 3   | 3   | 67,3546 | 78           | 0,8635 | 77,4369  | 86,7          | 0,8932 | 133,822 | 162          | 0,8261 | 137,617  | 180           | 0,7645 | 244,03  | 351          | 0,6952 | 251,82   | 390           | 0,6457 |
| 3   | 4   | 100,824 | 117          | 0,8617 | 109,653  | 130           | 0,8435 | 188,609 | 243          | 0,7762 | 201,167  | 270           | 0,7451 | 304,31  | 526,5        | 0,5780 | 314,291  | 585           | 0,5372 |
| 3   | 5   | 128,273 | 156          | 0,8223 | 141,161  | 173,3         | 0,8145 | 229,927 | 324          | 0,7096 | 243,326  | 360           | 0,6759 | 319,55  | 702          | 0,4552 | 319,164  | 780           | 0,4092 |
| 3   | 6   | 141,217 | 175,5        | 0,8047 | 156,426  | 195           | 0,8022 | 247,268 | 364,5        | 0,6784 | 266,918  | 405           | 0,6591 | 319,38  | 0            | ###    | 323,616  | 0             | ###    |
| 3   | 7   | 156,838 | 195          | 0,8043 | 162,628  | 216,7         | 0,7505 | 260,779 | 405          | 0,6439 | 278,333  | 450           | 0,6185 | 322,07  | 877,5        | 0,3670 | 320,443  | 975           | 0,3287 |
| 3   | 8   | 174,955 | 234          | 0,7477 | 57,1407  | 260           | 0,2198 | 91,6121 | 486          | 0,1885 | 240,508  | 540           | 0,4454 | 303,45  | 1053         | 0,2882 | 284,832  | 1170          | 0,2434 |
| 3   | 9   | 121,88  | 260          | 0,4688 | 41,2755  | 288,9         | 0,1429 | 0       | 540          | 0,0000 | 217,144  | 600           | 0,3619 | 259,99  | 1170         | 0,2222 | 230,532  | 1300          | 0,1773 |

Stage M2 Paul Grangette

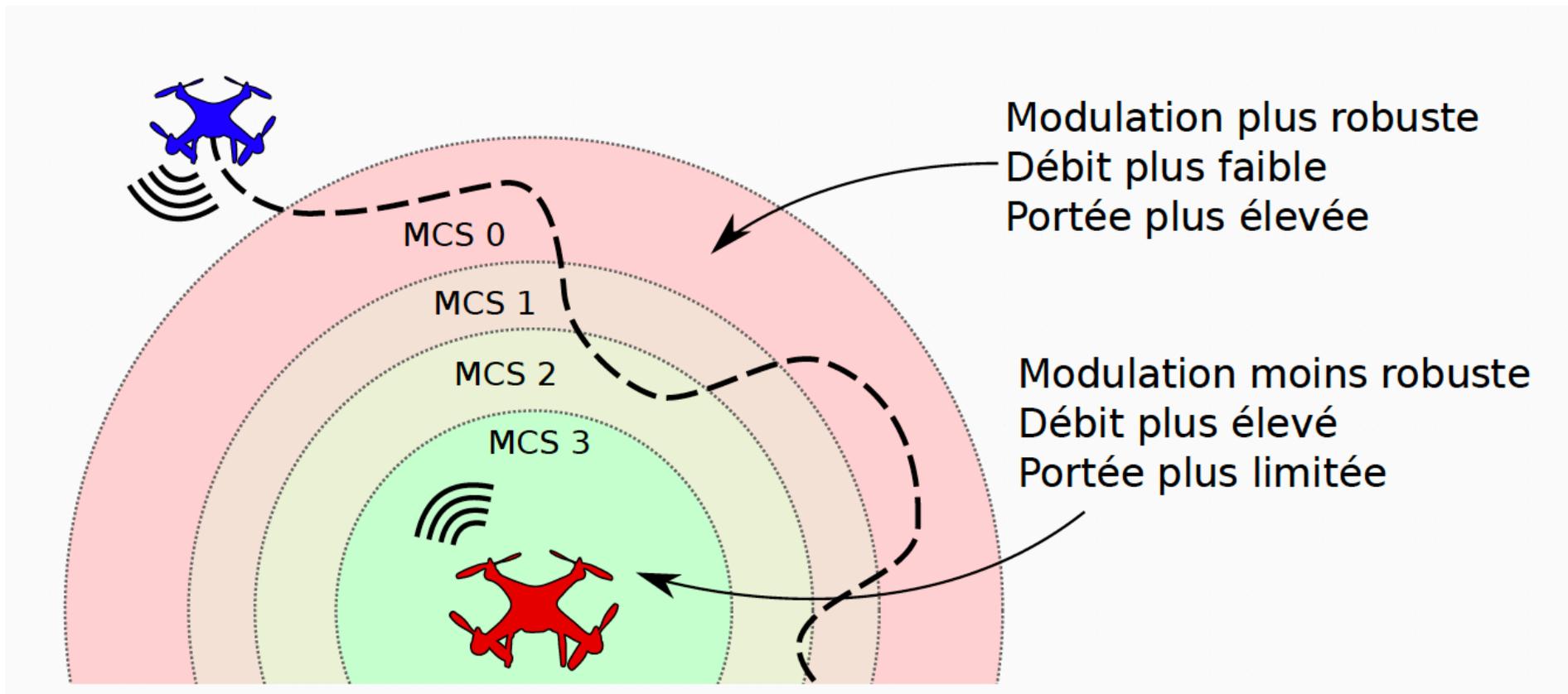
- Flux Iperf entre 1 source et 1 destination proches
- 802.11ac : MCS + nb SS + largeur canal + GI fixés
- Mesure du débit au niveau applicatif

# Adaptation de débits

- Multitude de débits d'émission possibles
- Lesquels utiliser ?
  - Paramétrage = MCS + nb SS + largeur bande + GI
  - Il y a des **paramétrages robustes**
    - Trames reçues correctement même si le canal radio est mauvais
  - Il y a des **paramétrages peu robustes**
    - Trames reçues souvent en erreur quand le canal radio n'est pas très bon
      - => retransmissions => baisse de débit utile

# Adaptation de débits

## Exemple



# De nombreux algorithmes d'adaptation de débits

Thèse R. Grünblatt

| Year        | Algorithm Name                                       | Abbreviation     | Hardware | NS-3 | OMNeT++ | 802.11n | 802.11ac |
|-------------|--|------------------|----------|------|---------|---------|----------|
| 1997        | Automatic Rate Fallback                              | ARF              | ?        | ✓    | ✓       | X       | X        |
| 2001        | Receiver Based Auto Rate                             | RBAR             | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| 2003        | Received Signal Strength Link Adaptation             | RSSLA            | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| 2004        | Adaptive Automatic Rate Fallback                     | AARF             | ?        | ✓    | ✓       | X       | X        |
| 2004        | Adaptive Multi Rate Retry                            | AMRR             | ?        | ✓    | X       | X       | X        |
| 2005        | Opportunistic Auto Rate                              | OAR              | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| 2005        | Full Auto Rate                                       | FAR              | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| 2005        | Onoe   | Onoe             | ?        | ✓    | ✓       | X       | X        |
| 2005        | SampleRate   | SampleRate       | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| 2005        | Power-controlled Auto Rate Fallback                  | PARF             | ?        | ✓    | X       | X       | X        |
| 2005        | Dynamic data rate and transmit power adjustment      | APARF            | ?        | ✓    | X       | X       | X        |
| 2006        | Robust Rate Adaptation Algorithms                    | RRAA             | ?        | ✓    | X       | X       | X        |
| 2006        | Collision Aware Rate Adaptation                      | CARA             | ?        | ✓    | X       | X       | X        |
| 2007        | Beacon Auto Rate Adaptation                          | BARA             | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| 2007        | <b>Minstrel</b>                                      | Minstrel         | ✓        | ✓    | X       | X       | X        |
| 2008        | Collision Detection for Auto Rate Fallback Algorithm | AARF-CD          | ?        | ✓    | X       | X       | X        |
| 2009        | <b>Minstrel-HT</b>                                   | Minstrel-HT      | ✓        | ✓    | X       | ✓       | ✓        |
| 2011        | Rate Adaptation for Multi Antenna Systems            | RAMAS            | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| 2011        | Rate Adaptation using Coherence Time                 | REACT            | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| 2013        | Agile Rate Adaptation for MIMO Systems               | ARAMIS           | ?        | X    | X       | ?       | ?        |
| ?           | IdealWifi  | IdealWifi        | X        | ✓    | X       | ✓       | ✓        |
| ?           | ConstantRate   | ConstantRate     | ✓        | ✓    | ✓       | ✓       | ✓        |
| <b>2019</b> | <b>Intel Rate Adaptation Algorithm</b>               | <b>IntelRate</b> | ✓        | ✓    | X       | ✓       | ✓        |

# Adaptation de débit dans les cartes Intel

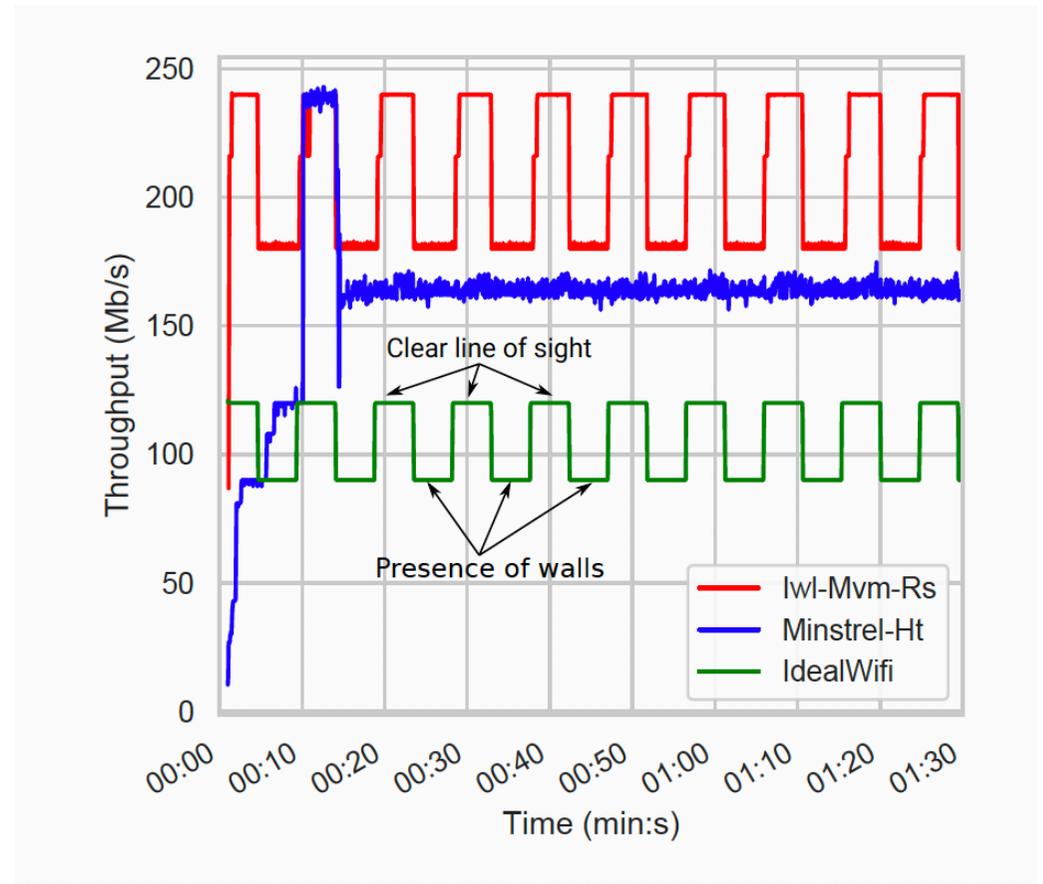
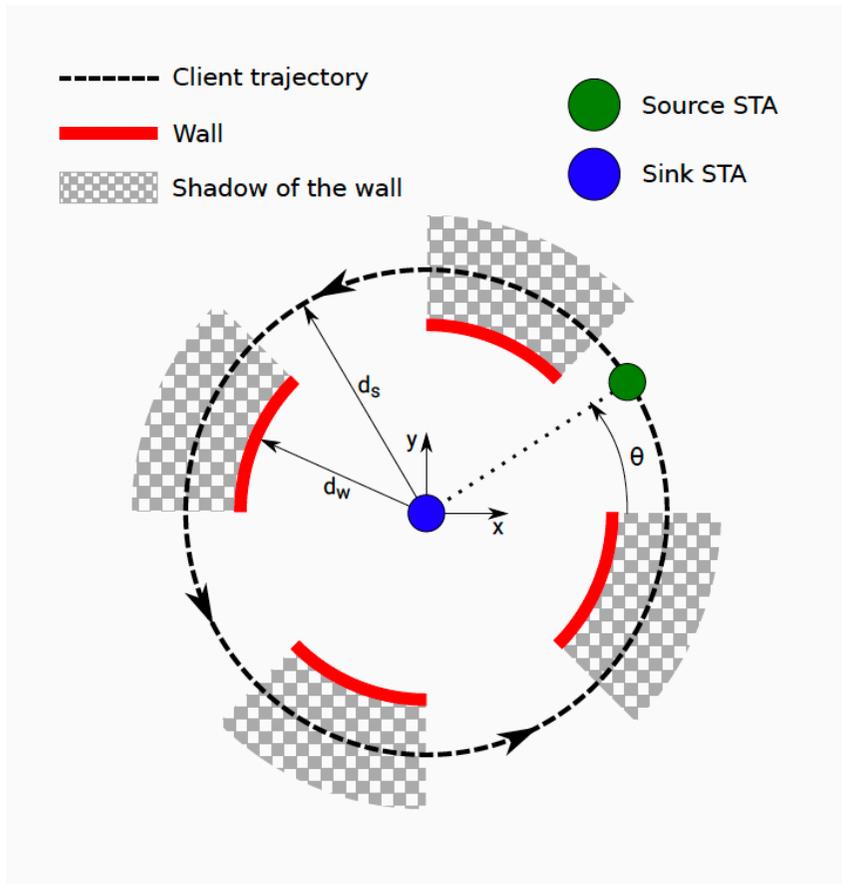
- Rétro-ingénierie de l'algo d'Intel
  - Iwl-Mvm-Rs
  - Plusieurs possibilités
    - Monitorer les trames envoyées sur le médium radio
    - Lire le driver quand cela est possible (et si l'algo se trouve dans le driver...)
  - Driver open source



Thèse R. Grünblatt



# Impact des algorithmes d'adaptation de débits

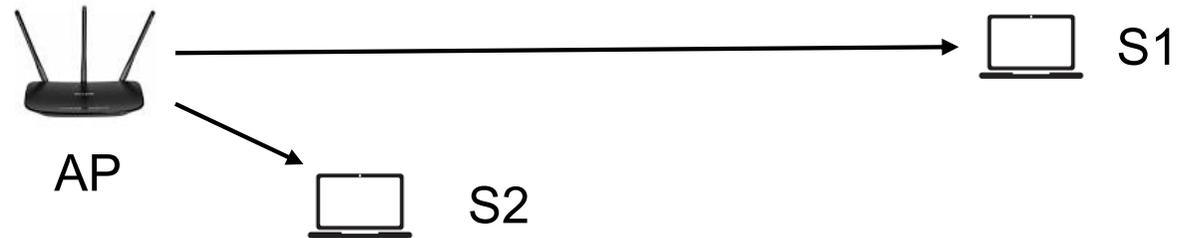


Thèse R. Grünblatt

# Partage du médium radio

- L'interopérabilité impacte les performances (comme vu en exercice)
- Le partage du médium radio aussi
  - et ce d'autant plus quand les flux qui se partagent le médium radio n'utilisent pas les mêmes débits d'émission
  - Anomalie de performances

# Pause TD



Considérons que l'AP a toujours des paquets à transmettre aux stations et qu'il alterne ses transmissions entre S1 et S2. S2 est proche de l'AP et donc le canal radio est bon. Le débit de transmission utilisé est 130 Mb/s.

En revanche S1 est très éloigné de l'AP et donc le canal radio est de mauvaise qualité. Le débit de transmission utilisé est 6 Mb/s.

Q. Quel est le débit utile obtenu par chacune des stations ? On supposera qu'il n'y a pas de perte de paquets. On utilisera le backoff moyen et les paramètres ci-dessous. Les trames envoyées ont 1000 octets de données utiles.

| Paramètre              | Valeur    |
|------------------------|-----------|
| DIFS                   | 28 micros |
| RIFS                   | 2 micros  |
| Slot                   | 9 micros  |
| CW initiale            | [0 ; 15]  |
| Temps en-tête physique | 20 micros |
| Taille en-tête MAC     | 40 octets |
| Taille ACK (niveau 2)  | 14 octets |

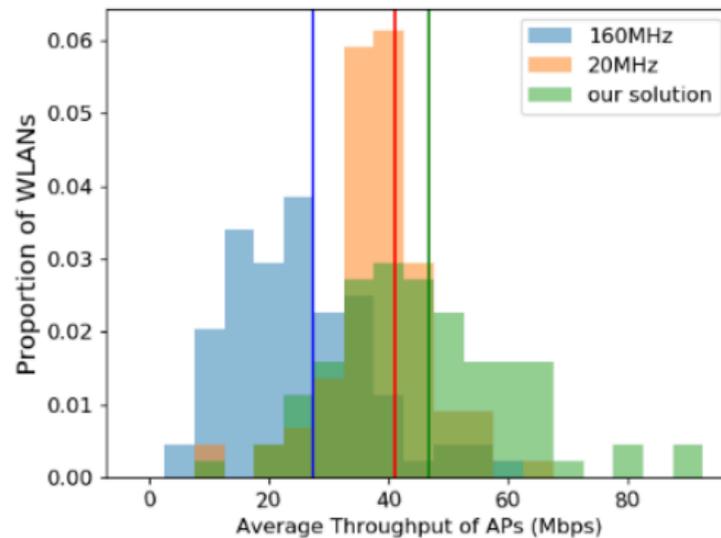
# Planification d'un réseau Wi-Fi

- Répondre à des questions comme :
  - Où mettre les APs ?
  - Utiliser combien d'APs ?
  - Quel canal allouer à chaque AP ?
  - Quel largeur de canal allouer à chaque AP ?
- Planification impacte les performances

# Planification d'un réseau Wi-Fi

## Impact sur les performances : un exemple

|          | <i>PF</i> (Mbps) |        |                 | <i>ST</i> (nb of APs) |        |                 | <i>TH</i> (Mbps) |        |                 |
|----------|------------------|--------|-----------------|-----------------------|--------|-----------------|------------------|--------|-----------------|
|          | 160 MHz          | 20 MHz | <b>Our sol.</b> | 160 MHz               | 20 MHz | <b>Our sol.</b> | 160 MHz          | 20 MHz | <b>Our sol.</b> |
| MCS 0-3  | 7.70             | 13.54  | <b>17.69</b>    | 7                     | 0      | <b>0</b>        | 17.54            | 15.16  | <b>21.18</b>    |
| MCS 4-7  | 19.22            | 43.60  | <b>49.74</b>    | 3                     | 0      | <b>0</b>        | 32.11            | 44.17  | <b>54.10</b>    |
| MCS 8-11 | 23.68            | 65.97  | <b>69.25</b>    | 2                     | 0      | <b>0</b>        | 36.38            | 66.20  | <b>75.35</b>    |
| All MCS  | 14.65            | 31.99  | <b>37.72</b>    | 5                     | 0      | <b>0</b>        | 27.36            | 41.02  | <b>46.79</b>    |



(c) *TH*: Average throughput of APs.

Stage M2 Amel C.

# Les nouveautés à venir en Wi-Fi

Nouvelle version du standard Wi-Fi publiée en février 2021 :

- accélération de la création d'un lien Wi-Fi
- transmissions dans les bandes 'sub 1 GHz'

Le fameux Wi-Fi 6

## Active Task Groups

| Name                          | Tag  | Description  | Status                  |
|-------------------------------|------|--|-------------------------|
| <a href="#">Task Group ax</a> | TGax | An amendment that supports High-efficiency wireless LAN. <ul style="list-style-type: none"> <li>o Improving spectrum efficiency and area throughput</li> <li>o Improving real world performance in indoor and outdoor deployments                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- in the presence of interfering sources, dense heterogeneous networks</li> <li>- in moderate to heavy user loaded APs</li> </ul> </li> </ul> | Approved March 2014     |
| <a href="#">Task Group ay</a> | TGay | An amendment that substantially increases the data rates of 802.11 in the 60 GHz frequency band .  | Approved March 2015     |
| <a href="#">Task Group az</a> | TGaz | Next Generation Positioning - improved accuracy, scalability and adding directionality .   | Approved September 2015 |
| <a href="#">Task Group ba</a> | TGba | Wake-up Radio - low power control radion   | Approved December 2016  |
| <a href="#">Task Group bb</a> | TGbb | Light Communications   | Approved May 2018       |
| Task Group bc                 | TGbc | Enhanced Broadcast Service   | Approved December 2018  |
| Task Group bd                 | TGbd | Enhancements for Next Generation V2X   | Approved December 2018  |
| <a href="#">Task Group md</a> | TGmd | P802.11 Revision md - maintenance actions and roll-in of approved amendments   | Approved March 2017     |

[https://www.ieee802.org/11/QuickGuide\\_IEEE\\_802\\_WG\\_and\\_Activities.htm](https://www.ieee802.org/11/QuickGuide_IEEE_802_WG_and_Activities.htm)