

Chapitre 3

Le Multi-Link Operation

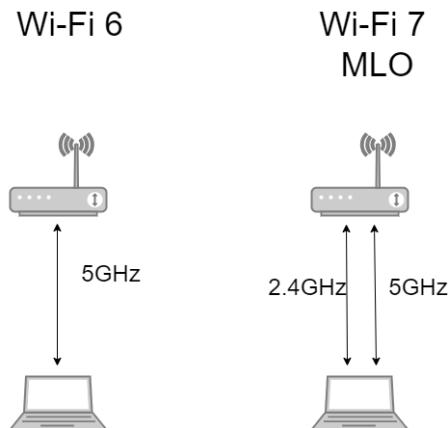
1. Présentation du MLO

Dans un monde où les besoins en connectivité rapide et fiable ne cessent de croître, les réseaux Wi-Fi sont soumis à des exigences sans précédent en termes de débit, de latence et de robustesse. La norme Wi-Fi 7 répond à ces nouveaux défis en introduisant une avancée majeure : le *Multi-Link Operation* (MLO). Cette technologie marque une rupture avec les générations précédentes, en permettant aux appareils d'exploiter plusieurs bandes de fréquences simultanément pour maximiser les performances.

Pour comprendre l'impact du MLO, imaginons les bandes de fréquences comme des modes de transport :

- La bande 2,4 GHz représente une route : elle est largement accessible, capable de transporter des données sur de longues distances, mais est fortement utilisée et peut être sujette à la congestion.
- La bande 5 GHz est un réseau ferroviaire : plus rapide, moins encombré, mais dont l'accès peut être limité par la densité des appareils et des obstacles.
- La bande 6 GHz est l'aviation : rapide et capable de transmettre de grands volumes de données sur des canaux larges, mais souvent réservée aux dispositifs les plus modernes.

Dans les générations précédentes de Wi-Fi, un appareil devait choisir une seule de ces « voies » à la fois, limitant sa capacité de transmission aux caractéristiques d'une bande unique. Avec le MLO, un dispositif compatible peut désormais basculer dynamiquement entre ces voies, ou même les utiliser simultanément, en fonction de la congestion et des besoins en bande passante. Cette flexibilité permet d'optimiser le flux de données en exploitant toujours le chemin le plus performant, assurant une connectivité stable et rapide, même dans des environnements denses.



L'implémentation du MLO dans la norme Wi-Fi 7 poursuit trois objectifs majeurs :

- L'amélioration du Débit : en autorisant l'utilisation simultanée de plusieurs canaux sur différentes bandes de fréquences, le MLO permet d'agrégier les débits, atteignant ainsi des performances bien supérieures aux générations précédentes. Les appareils peuvent ainsi atteindre des débits plus élevés en tirant parti de la capacité totale du spectre disponible.
- La réduction de la Latence : le MLO permet à un appareil de transmettre et de recevoir des données sur plusieurs bandes en parallèle, ce qui diminue considérablement les temps d'attente en cas de congestion sur une bande. Pour les applications en temps réel (comme les jeux en ligne ou les environnements industriels), cette réduction de la latence garantit une réactivité accrue et améliore l'expérience utilisateur.

- L'amélioration de la fiabilité : en permettant un basculement automatique des liens en fonction de l'état du réseau, le MLO assure une meilleure continuité des connexions. Par exemple, si une bande devient temporairement encombrée, un appareil peut basculer vers une autre bande sans interruption de service, garantissant ainsi une connectivité stable dans des environnements à forte densité de dispositifs, tels que les stades, les aéroports ou les conférences.

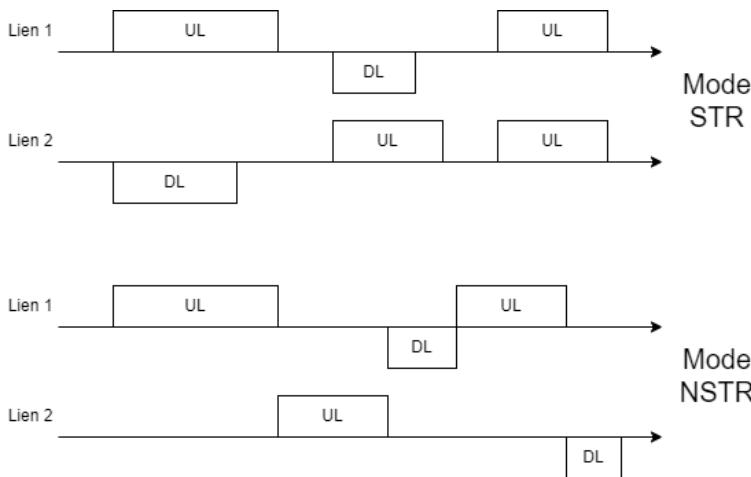
Afin de gérer efficacement cette utilisation multi-bande, le MLO introduit également le concept de *Multi-Link Device* (MLD), une architecture regroupant plusieurs interfaces radio sous une seule entité avec une adresse MAC unique. Cette structure simplifie la gestion des communications, permettant aux dispositifs de maintenir une connexion unique tout en exploitant plusieurs liens en parallèle.

Le MLO dans la norme Wi-Fi 7 propose deux modes principaux pour adapter son fonctionnement aux caractéristiques des appareils et aux contraintes du réseau :

- *Simultaneous Transmit and Receive* (STR) : ce mode permet la transmission et la réception simultanées de données sur plusieurs bandes de fréquences. Il offre un potentiel de débit maximal en exploitant toutes les bandes disponibles en parallèle, idéal pour les applications exigeant une bande passante élevée et une faible latence. Cependant, le STR introduit un défi technique important : les interférences croisées. Lorsqu'un dispositif utilise des canaux proches en fréquence, comme les bandes 5 GHz et 6 GHz, des interférences peuvent se produire, impactant la qualité des transmissions. Des solutions techniques supplémentaires telles que l'isolation des antennes et l'utilisation de filtres spécifiques sont nécessaires pour limiter ces interférences et tirer pleinement parti du mode STR.

– *Non-Simultaneous Transmit and Receive* (NSTR) : pour réduire le risque d'interférences, le mode NSTR impose une synchronisation des transmissions et des réceptions entre les différents liens, de sorte que les bandes ne puissent qu'émettre ou recevoir des données de façons simultanées. Bien que ce mode limite la flexibilité de l'appareil en termes de débit total, il est plus adapté aux appareils à faible consommation énergétique et dans des environnements où la gestion des interférences est cruciale. Le NSTR permet de garantir la qualité des transmissions même en présence de nombreux appareils connectés, en synchronisant les transmissions pour éviter les collisions et interférences.

Le schéma ci-dessous montre la différence entre les modes STR et NSTR :



L'adoption du MLO dans la norme Wi-Fi 7 apporte une flexibilité dans la gestion des transmissions sur plusieurs liens de fréquence simultanément. Cependant, tous les dispositifs ne disposent pas des mêmes capacités matérielles et leur implémentation du MLO dépend de leur architecture radio. En complément des modes de transmission STR et NSTR, les équipements peuvent être classés selon deux grandes catégories :

- les dispositifs à radio unique (*Single Radio*) ;
- les dispositifs multi-radio (*Multiple Radio*).

En fonction de cette classification, plusieurs variantes de MLO existent pour optimiser l'utilisation des ressources réseau en tenant compte des contraintes matérielles et énergétiques.

1.1 MLSR (Multi-Link Single Radio) - un seul lien actif

Le MLSR est une approche du MLO adaptée aux dispositifs équipés d'une seule radio. Un appareil MLSR ne peut activer qu'un seul lien à la fois et doit commuter dynamiquement entre les différentes bandes de fréquences en fonction des besoins.

Cette architecture présente l'avantage d'être énergétiquement efficace, car elle ne nécessite pas l'activation simultanée de plusieurs radios, ce qui est essentiel pour les appareils mobiles tels que les smartphones et les objets connectés. De plus, elle réduit la complexité matérielle, permettant une adoption plus large du MLO sans imposer des coûts excessifs aux fabricants d'équipements. Toutefois, le principal inconvénient du MLSR est le temps de transition entre les liens, qui peut impacter la fluidité des communications, notamment pour les applications nécessitant une latence minimale, comme les jeux en ligne ou la visioconférence.

1.2 EMLSR (Enhanced Multi-Link Single Radio) - un MLSR amélioré

Le EMLSR est une amélioration du MLSSR qui optimise la gestion des transitions entre les liens pour minimiser la latence et améliorer la réactivité. Contrairement au MLSR « classique », un dispositif EMLSR peut écouter simultanément sur plusieurs liens tout en maintenant une seule transmission active. Cette capacité d'écoute parallèle lui permet d'anticiper les transitions et d'accélérer le basculement d'un lien à un autre en cas de congestion ou de dégradation du signal.

En réduisant le temps de latence lors des changements de lien, l'EMLSR devient particulièrement intéressant pour les applications où la continuité du signal est critique, comme le streaming vidéo, le cloud gaming ou les environnements de travail collaboratifs en temps réel. Néanmoins, cette amélioration s'accompagne d'une complexité logicielle accrue, nécessitant une coordination plus avancée entre le matériel et les algorithmes de gestion des liens.

1.3 MLMR (Multi-Link Multiple Radio) - l'exploitation simultanée de plusieurs liens

Contrairement aux dispositifs MLSR et EMLSR, qui doivent alterner entre plusieurs liens, les appareils basés sur une architecture Multi-Link Multiple Radio (MLMR) sont dotés de plusieurs radios physiques, leur permettant d'exploiter plusieurs liens simultanément. Cette architecture est particulièrement avantageuse pour maximiser les performances et réduire la latence en évitant les interruptions liées aux commutations de lien.

Les appareils MLMR peuvent être classés en deux sous-catégories selon leur mode de gestion des transmissions :

- MLMR STR, les radios peuvent transmettre et recevoir en parallèle sur plusieurs liens.
- MLMR NSTR, plusieurs radios sont présentes, mais leur utilisation est alternée pour éviter les interférences.

1.4 MLMR STR - la performance maximale

Le MLMR STR (*Multi-Link Multiple Radio Simultaneous Transmit and Receive*) est l'implémentation la plus avancée du MLO en termes de performances. Grâce à la présence de plusieurs radios indépendantes, un équipement de ce type peut émettre et recevoir sur plusieurs liens en simultané, permettant ainsi d'agréger les débits et de réduire considérablement la latence.

Cette architecture est idéale pour les applications nécessitant un débit élevé et une latence ultra-faible, telles que la réalité virtuelle (VR), les jeux en ligne compétitifs, ou encore les applications industrielles en temps réel. En exploitant plusieurs bandes de fréquences simultanément, un terminal peut contourner les congestions réseau, garantissant ainsi une connectivité stable et rapide. Toutefois, cette approche consomme davantage d'énergie, ce qui peut limiter son adoption sur des appareils mobiles fonctionnant sur batterie. De plus, la présence de plusieurs radios pose des défis en termes de gestion des interférences et de coordination des bandes ce qui la rend très difficile à mettre réellement en œuvre.

1.5 MLMR NSTR - une alternative plus accessible

Le MLMR NSTR (*Multi-Link Multiple Radio Non-Simultaneous Transmit and Receive*) représente une alternative au STR, permettant d'exploiter plusieurs radios tout en évitant de les faire fonctionner en parallèle. Dans cette configuration, un appareil peut transmettre sur un lien et recevoir sur un autre, mais il ne peut pas effectuer ces opérations simultanément.

L'avantage principal de cette approche est qu'elle limite les interférences intra-appareil, qui peuvent survenir lorsque plusieurs radios émettent sur des bandes proches. Elle est particulièrement utile dans les environnements Wi-Fi denses, comme les bureaux, les centres commerciaux ou les événements où de nombreux appareils sont connectés en simultané. Par ailleurs, en évitant l'activation simultanée de plusieurs radios, cette architecture réduit la consommation énergétique par rapport au MLMR STR, tout en offrant une meilleure gestion des ressources spectrales. Cependant, le principal compromis du MLMR NSTR est que les performances en débit et en latence sont inférieures à celles du STR, car les transmissions doivent être alternées, ce qui peut créer des délais dans l'acheminement des données.

L'adoption du MLO dans la norme Wi-Fi 7 ouvre des possibilités étendues pour des applications modernes, particulièrement celles nécessitant une réactivité extrême et une bande passante élevée :

- La réalité augmentée et virtuelle : ces technologies, utilisées dans les domaines du divertissement, de la formation et de l'industrie, nécessitent une faible latence pour éviter tout décalage entre les actions de l'utilisateur et la réponse visuelle. Le MLO, en réduisant la latence et en assurant une connectivité ininterrompue, améliore grandement l'expérience utilisateur.
- Les jeux en ligne et cloud gaming : les jeux en ligne, en particulier ceux de type cloud gaming, dépendent de connexions rapides et stables pour une expérience fluide. Le MLO permet de maintenir des taux de transmission élevés tout en réduisant les interruptions dues à la congestion du réseau.
- Les applications industrielles : dans les environnements industriels, où la fiabilité de la connexion est cruciale pour la sécurité et l'efficacité, le MLO garantit une continuité de service en basculant automatiquement entre les liens en cas de congestion ou d'interférence.

En offrant la possibilité d'exploiter plusieurs bandes de manière simultanée ou adaptative, le *Multi-Link Operation* transforme l'expérience réseau, que ce soit pour les utilisateurs quotidiens cherchant une meilleure qualité de service ou pour les applications industrielles nécessitant des performances extrêmes, le MLO ouvre une nouvelle ère de connectivité sans fil, assurant flexibilité, robustesse et efficacité dans les environnements les plus exigeants. Tout au long de ce chapitre, nous allons explorer en profondeur l'implémentation du Multi-Link Operation. Nous analyserons les différents modes de fonctionnement, les mécanismes de gestion des interférences et les méthodes d'allocation des ressources qui permettent au MLO de répondre aux besoins spécifiques des environnements modernes. Nous examinerons également les défis techniques à surmonter pour en tirer pleinement parti, afin de fournir une compréhension complète de ces capacités.

2. Architecture des dispositifs Multi-Lien (MLD)

Dans les générations précédentes des normes Wi-Fi, chaque client connecté devait se limiter à l'utilisation d'une seule bande de fréquence à la fois, entraînant des limitations en termes de débit, de latence et de continuité de service, particulièrement en cas de congestion ou de perturbation réseau. Cette contrainte est devenue un obstacle pour répondre aux besoins croissants des applications modernes, qui exigent une connectivité rapide et stable, même dans des environnements densément peuplés. Pour surmonter ces limites, la norme Wi-Fi 7 introduit le Multi-Link Device, une nouvelle architecture conçue pour exploiter simultanément plusieurs bandes de fréquences, offrant ainsi une connectivité optimisée.

Dans cette section, nous examinerons comment les MLD permettent aux appareils de bénéficier d'une gestion des liens plus intelligente et dynamique, assurant des performances élevées et une meilleure résilience. Nous détaillerons également la structure des couches MAC et PHY de cette architecture, qui centralise les connexions multi-lien sous une adresse MAC unique, simplifiant ainsi la gestion et réduisant les interruptions de service. Cette architecture marque une étape cruciale dans l'évolution des réseaux Wi-Fi, ouvrant la voie à des connexions plus fiables et performantes dans les environnements réseau modernes.

2.1 Présentation des dispositifs Multi-Lien (MLD)

Traditionnellement, les appareils Wi-Fi se connectent via un seul lien sur une bande de fréquence donnée (par exemple, 2,4 GHz, 5 GHz ou 6 GHz), chaque bande ayant ses avantages et ses inconvénients en termes de portée, de débit et de sensibilité aux interférences. Cependant, cette approche à lien unique présente des limitations qui deviennent de plus en plus problématiques pour répondre aux besoins actuels. Par exemple, si un canal dans la bande 5 GHz devient encombré en raison d'un grand nombre de connexions, l'appareil ne peut rien faire pour contourner cette congestion autrement qu'en basculant manuellement vers un autre canal. Cependant, ce changement peut entraîner des interruptions, de la latence et des déconnexions temporaires, rendant l'expérience utilisateur frustrante pour des applications sensibles à la continuité de service.