

**dans le temps** (en anglais *Time Division Duplexing, TDD*). Les créneaux temporels prévus pour la liaison descendante et la liaison montante sont clairement définis ; le rapport entre la liaison descendante et la liaison montante est actuellement de 4:1 (ou 80:20). Durant un cycle liaison descendante - liaison montante, la station de base émet donc au maximum pendant 80 % du temps tandis que 20 % du temps est réservé à la transmission du dispositif mobile vers la station de base. Le TDD est utilisé lorsque les données à transmettre sont beaucoup plus nombreuses sur la liaison descendante que sur la liaison montante. En outre, les liaisons descendante et montante ont les mêmes caractéristiques de propagation.

L'utilisation de la technologie FDD ou TDD ne dépend pas de la génération de téléphonie mobile, mais est spécifiée dans les concessions pour les fréquences respectives. En conséquence, le FDD est également utilisé pour la 5G entre 700 MHz et 2,6 GHz et le TDD en partie à 2,6 GHz et entre 3,4 et 3,8 GHz.

### 3.2 Prévision et mesure de la 5G

Les valeurs limites d'immissions (VLI) et les VLIInst spécifiées dans l'ORNI varient en fonction de la fréquence du rayonnement, mais elles ne dépendent pas de la technologie de téléphonie mobile ; elles s'appliquent donc indépendamment du fait qu'il s'agisse de la 2G (GSM), de la 3G (UMTS), de la 4G (LTE) ou de la 5G (*New Radio*). Les **prévisions** de rayonnement **calculées** dans le cadre de la procédure d'autorisation sont neutres sur le plan technologique. Elles sont donc également applicables à la 5G.

La technologie de téléphonie mobile utilisée ne joue un rôle que pour les **mesures de réception** après la mise en service, la forme du signal utilisée dépendant de la norme de téléphonie mobile. Dans le rapport technique « Méthode de mesure des stations de base 5G NR jusqu'à 6 GHz » du 18 février 2020, l'Institut fédéral de métrologie (METAS) a présenté les définitions des signaux 5G et les composantes du signal devant être mesurées. De plus amples informations à ce sujet figurent également sous le point 2.1 des « Explications concernant la méthode de mesure des antennes adaptatives » de l'OFEV du 30 juin 2020.

## 4 Antennes adaptatives et formation de faisceau

### 4.1 Construction d'antennes exploitables en mode adaptatif et définitions des termes

Une antenne exploitable en mode adaptatif est constituée d'un réseau d'antennes élémentaires (à polarisation croisée) ou d'éléments d'antenne en colonnes et en lignes, également appelée antenne réseau (cf. Figure 3) :

- L'interconnexion de plusieurs éléments d'antenne permet de générer un effet directionnel appliqué au rayonnement émis, se concluant en un faisceau (*beam*). En termes simplifiés, on peut dire que plus le nombre d'éléments d'antenne est élevé, plus l'effet directionnel possible est important, c'est-à-dire plus le faisceau émis est étroit et plus le gain d'antenne est élevé.
- Si les éléments d'antenne individuels ou interconnectés sont activés différemment (par exemple par des déphasages), la direction d'émission principale du faisceau peut être déplacée horizontalement et verticalement.

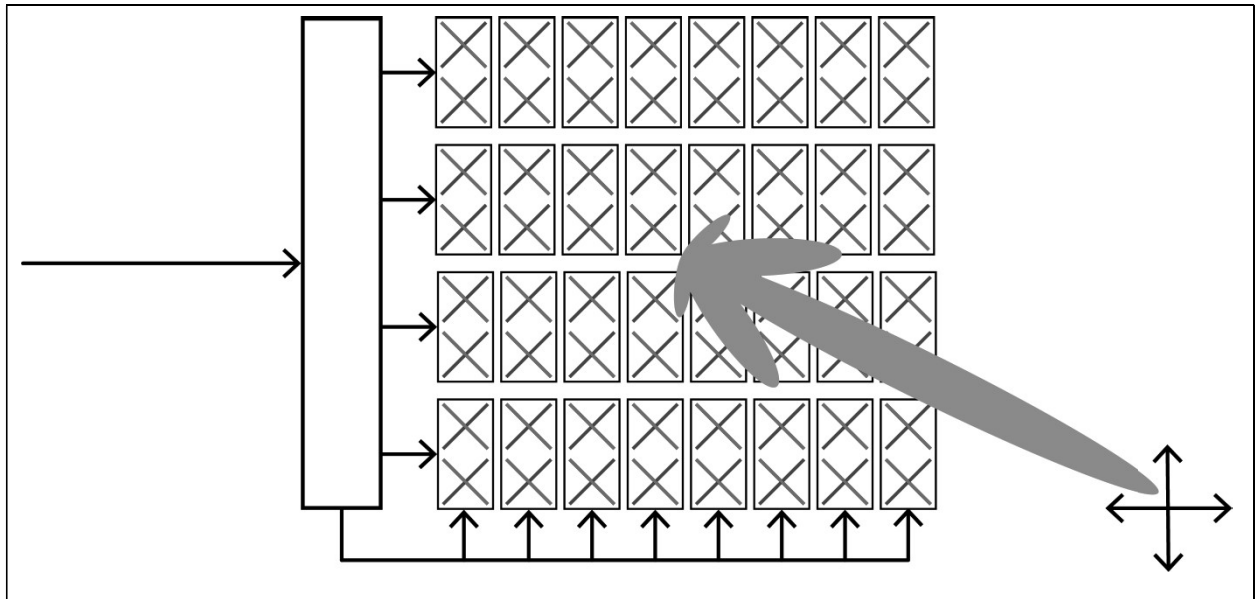


Figure 3 Schéma de principe d'une antenne adaptative dotée de 64 éléments d'antenne constitués de dipôles croisés (représentés en rouge et en vert). Dans cet exemple, deux éléments d'antenne sont à chaque fois couplés pour former un sub array. L'antenne est donc constituée de  $4 \times 8 = 32$  sub arrays.

Des notions utilisées dans le cadre du complément à l'aide à l'exécution de l'ORNI pour les antennes adaptatives sont définies ci-après.

Au sens de l'ORNI, les **antennes adaptatives** sont des antennes émettrices ou des systèmes d'antennes ajustant automatiquement leur direction d'émission et/ou leur diagramme d'antenne à intervalles rapprochés sans modification de la direction de montage..

Dans les antennes de téléphonie mobile couramment utilisées aujourd'hui, un **élément d'antenne** se compose de deux dipôles à polarisation croisée ; sur la Figure 3 le dipôle vert est polarisé à  $+45^\circ$  et le dipôle rouge à  $-45^\circ$ . Les signaux émis ont donc deux plans de polarisation différents.

Les éléments d'antenne couplés physiquement sont appelés **sub array**. Par exemple, si sur une antenne composée de 96 éléments d'antenne (= 192 dipôles) 3 éléments d'antenne sont interconnectés, l'antenne dispose de 32 sub arrays ; si 6 éléments d'antenne sont groupés, l'antenne dispose de 16 sub arrays. Autre exemple : une antenne composée de 64 éléments d'antenne (= 128 dipôles) dispose de 32 sub arrays si 2 éléments d'antenne sont interconnectés et de 16 sub arrays si 4 éléments sont interconnectés

Dans le présent exemple, chaque polarisation d'un sub array est desservie par une **voie d'émission** distincte, ou exprimé dans l'autre sens : une voie d'émission dessert toujours tous les dipôles interconnectés de même polarisation d'un sub array. Dans le cas des antennes constituées de dipôles à polarisation croisée, un sub array est donc desservi par deux voies d'émission.

Chaque voie d'émission est initiée via un étage de sortie distinct (appelé émetteur (*transmitter*) ou élément TX). Une voie d'émission correspond normalement aussi à une voie de réception (récepteur ou RX), alors que les signaux circulent dans le sens opposé lors de la réception. Une antenne dite 64T/64R dispose donc de plus de 64 voies d'émission, soit de 32 sub arrays, et une antenne 32T/32R dispose de plus de 32 voies d'émission, soit de 16 sub arrays (cf. Tableau 1).

Tableau 1 Exemples numériques en lien avec les dipôles, les éléments d'antenne, les sub arrays et les voies d'émission pour les antennes constituées de dipôles à polarisation croisée

| Nombre de dipôles | Nombre d'éléments d'antenne | Nombre d'éléments d'antenne physiquement interconnectés | Nombre de sub arrays | Nombre de voies d'émission | Étages de sortie (voie d'émission x voie de réception) |
|-------------------|-----------------------------|---|----------------------|----------------------------|--|
| 192               | 96                          | 3   | 32                   | 64                         | 64×64 ou 64T/64R                                       |
| 192               | 96                          | 6   | 16                   | 32                         | 32×32 ou 32T/32R                                       |
| 128               | 64                          | 2   | 32                   | 64                         | 64×64 ou 64T/64R                                       |
| 128               | 64                          | 4   | 16                   | 32                         | 32×32 ou 32T/32R                                       |

Le nombre de faisceaux qu'une antenne adaptative peut générer dépend du nombre d'unités d'antennes contrôlées de manière individuelle. En ce qui concerne l'exposition de l'être humain où les différents niveaux de polarisation ne jouent pas un rôle significatif, le nombre de sub arrays est donc pertinent. Le nombre de voies d'émission (ou d'émetteurs-récepteurs [*transciever*], par exemple 64T) est généralement publié dans les fiches techniques des antennes. Pour les antennes à deux plans de polarisation, cette information peut être divisée par deux pour obtenir le nombre de sub arrays par antenne.

#### 4.2 Technologies de formation de faisceaux (*beamforming*)

L'activation différenciée des divers éléments d'antenne est devenue possible grâce à la haute performance des ordinateurs actuels, qui peuvent traiter les signaux en moins de temps qu'auparavant. Selon l'endroit du processus de traitement du signal, où sont effectués les déphasages pour piloter différemment les éléments d'antenne, différents nombres de faisceaux émis simultanément sont possibles et la technologie de formation des faisceaux est désignée différemment, bien que les définitions ne soient pas toujours utilisées exactement de la même manière.

Si le déphasage appliqué au signal pour les différents éléments de l'antenne s'opère après la conversion du signal numérique en signal analogique (dans la partie haute fréquence de l'antenne), on parle de **formation de faisceau analogique**. Les antennes fonctionnant de cette manière ne peuvent émettre qu'un seul faisceau ou un seul diagramme de rayonnement spécifique à la fois. Des diagrammes ou des directions d'émission (faisceaux) différents doivent donc être émis successivement. En outre, le déphasage étant appliqué à toute la bande de fréquences, les différentes gammes de fréquences ne peuvent pas être émises simultanément dans des directions différentes. Dans la formation de faisceaux analogique, la phase est appliquée linéairement à tous les éléments d'une antenne, ce qui signifie que le nombre maximal de caractéristiques spatiales ou de faisceaux différents pouvant être généré est égal au nombre d'unités activables séparément dans l'antenne (sub arrays).

Si le signal est réparti entre les différents éléments d'antenne dans la partie numérique du traitement du signal et donc avant la conversion du numérique en analogique, on parle de **formation de faisceau numérique**. Avec la formation de faisceau numérique, il est théoriquement possible de générer simultanément un nombre quelconque de faisceaux dans n'importe quelle orientation, puisque chaque élément d'antenne peut se voir attribuer ses propres caractéristiques d'amplitude et de phase. De plus, le diagramme d'antenne ainsi formé ne doit pas nécessairement présenter une direction claire du faisceau principal. Par exemple, si la liaison avec la station de base n'est pas en visibilité directe, un canal peut être « taillé sur mesure » à un terminal en utilisant différentes voies de propagation.

Les antennes adaptatives utilisées aujourd'hui emploient souvent une combinaison de formations de faisceau analogique et numérique, appelée **formation de faisceau hybride**. Dans ce cas, plusieurs éléments d'antenne sont combinés en un « bloc fonctionnel », exploité avec une technologie de formation de faisceau analogique. Il en résulte une limitation du nombre de faisceaux pouvant être transmis simultanément. Si plusieurs faisceaux sont émis simultanément, la puissance d'émission dont dispose la station de base est répartie entre les différents faisceaux (OFCOM 2021).

#### 4.3 Applications de la formation de faisceaux

En plus des différentes manières de former des faisceaux, il existe également différentes façons d'appliquer la technologie de formation de faisceaux. En pratique, les variantes suivantes sont mentionnées, bien que les désignations ne soient pas toujours cohérentes entre les sources (OFCOM 2021) :