

*Chapitre III :*  
*Les liaisons sans fil*

# Chapitre III : liaisons sans fil

## I Introduction

Aujourd'hui, la majorité des ordinateurs et la quasi-totalité des appareils « mobiles » (tels que les téléphones portables) disposent de moyens de connexion à un ou plusieurs types de réseaux sans fil comme le Wifi, le Bluetooth ou l'infrarouge. Ainsi, il est très facile de créer en quelques minutes un réseau « sans fil » permettant à tous ces appareils de communiquer.

## II réseau sans fil

### II.1 Définition

Un réseau sans fil est un ensemble d'appareils connectés entre eux et qui peuvent s'envoyer et recevoir des données sans qu'aucune connexion « filaire » physique reliant ces différents composants entre eux ne soit nécessaire.

### II.2 Techniques de transmission dans les réseaux sans fil

Il existe principalement deux méthodes pour la transmission dans les réseaux sans fil:

#### • Transmission par les ondes infrarouges

la transmission par les ondes infrarouges nécessite que les appareils soient en face l'un des autres et aucun obstacle ne sépare l'émetteur du récepteur.(car la transmission est directionnelle).cette technique est utilisée pour créer des petits réseaux de quelques dizaines de mètres. (Télécommande de : télévision, les jouets, voitures...).

**•Transmission par les ondes radios.**

La transmission par les ondes radios est utilisée pour la création des réseaux sans fil qui a plusieurs kilos mètres. Les ondes radios ont l'avantage de ne pas être arrêtés par les obstacles car sont émises d'une manière omnidirectionnelle. Le problème de cette technique est perturbations extérieures qui peuvent affecter la communication à cause de l'utilisation de la même fréquence par exemple.

**II.3 Avantages des liaisons sans Fil**

- Liberté de mouvement des usagers et des terminaux.
- Moins de risques de rupture de liens que dans le filaire (coupure du câble, abîmer les connecteurs et prises, etc...).
- Délais de mise en service du réseau plus faibles.
- Des économies à long terme (retour sur investissements)

**II.4 Domaines d'application**

- Tous les métiers dont la mobilité est nécessaire pour augmenter la productivité
- Hôpitaux (gestion des fichiers patients, ...).
- Restaurants (communications rapides entre serveurs et cuisiniers, ..).
- Home and Small Office (éviter de câbler, coûts réduits, ...).
- Environnement d'installation difficile des médias filaires.

**II.5 Les catégories de réseaux sans fil**

On distingue quatre catégories selon le périmètre géographique offrant une connexion (appelé Zone de couverture).

**❖ Les réseaux personnels sans fil (WPAN:Wireless Personal Area Network)**

Faible portée : quelques dizaines de mètres autour de l'utilisateur.se déplacent avec l'utilisateur

Sert à relier des périphériques (imprimante, téléphones portables avec un ordinateur). Ou deux machines très peu distantes.

**Pas de station relais**

Bluetooth : (IEEE 802.15, débit: 1Mbps, bande: entre 2400 et 2483.5 Mhz, portée max=30m). IrDA (infrarouge) : (débit max=4Mbps, portée =quelques mètres (2m)).

Home RF (Home Radio-Frequency: lancé par Home RF Working Group formé par Compaq, HP, Intel, Siemens, Motorola et Microsoft, débit= 10Mbits/s, portée max=100m, bande=2.4Ghz).

**Réseaux locaux sans fil (WLAN: Wireless Local Area Network)**

De 50 à quelques centaines de mètres couvrent une localisation fixe

**Station relais**

IEEE 802.11 (standards d'USA) (entre 4 et 54 Mbps, bande 2.4GHZ à 2,4835 GHz).

HiperLan (High Performance LAN, European Telecommunications Standards Institute). (HiperLan1: débit 20 Mbps, portée: 100mètres, bande de fréquences=5.3Ghz, HiperLan2: débit 54Mbps).

**Les réseaux métropolitains sans fil (WMAN : Wireless Métropolitain Area Network)**

- IEEE 802.16.
- débit=110Mbps.
- Portée de 4 à 10 kilomètres.
- Fournit un accès réseau sans fils à des immeubles connectés par radio à travers une antenne extérieure à des stations centrales reliées au réseau filaire. Le réseau sans fil (MAN – Métropolitain Area Network) appelé aussi «Last Mile Broadband Access Solution» permet des raccordements à des réseaux à large bande dans les secteurs qui ne sont pas servis par le câble ou le xDSL (Cross Digital Subscriber Line).

**Les réseaux étendus sans fil (WWAN: Wireless Wide Area Network)**

- GSM (Global System for Mobile communications).
- GPRS (General Packet Radio Service),
- UMTS (Universal Mobile Télécommunications System)

- WiMax standard de réseau sans fil poussé par Intel et Nokia offrant un débit max =70Mbps sur une portée de 50 kilomètres. Bande (2 à 11Ghz).

### Réseau local sans fil Wifi

La norme Wifi (Wireless Fidelity) est le nom commercial donné à la norme IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers – l'organisme de certifications des normes réseaux) 802.11b(1999) et 802.11g (2001) par la Wifi Alliance, autrefois appelé Weca (association commerciale d'industrie avec plus de 200 compagnies de membre consacrées à favoriser la croissance des réseaux locaux sans fil). Ce standard est actuellement l'un des standards les plus utilisés au monde. Les débits théoriques du 802.11b sont de 11 Mb/s et 54 Mb/s pour le 802.11g.

### Différents matériels utilisés

- Carte Wifi (Adaptateur sans fil) dans un ordinateur. (Carte PCI, carte PCMCIA, adaptateur USB,...). Comme une carte réseau classique (Ethernet) elle fonctionne :
- en mode client avec une borne WIFI (point d'accès).
- en mode point à point (dialogue avec une autre carte réseau).
- Point d'accès (ou borne WIFI): similaire à un switch : tous les paquets passent par la borne. il permet à la station sans fil qui se trouve à son voisinage d'accéder au réseau filaire (auquel il est Raccordé).

### II.6 Les modèles de déploiement

Il existe deux modes de déploiement

#### Le mode infrastructure :

c'est un mode de fonctionnement qui permet de connecter les ordinateurs équipés d'une carte réseau Wifi entre eux via un ou plusieurs points d'accès qui agissent comme des concentrateurs. Chaque ordinateur se connecte à un point d'accès via une liaison sans fil.

- L'ensemble formé le point d'accès et les stations situés dans sa zone de couverture est appelé ensemble de service de base (basic service set *BSS*) et constitue une cellule. Chaque *BSS* est identifié par un *BSSID* (un identifiant de 6 octets (48 bits)). Dans le

mode infrastructure le *BSSID* correspond à l'adresse Media Access control) du point d'accès.

- Il est possible de relier plusieurs points d'accès entre eux par une liaison appelé système de distribution (*DS* : Distribution System) afin de constituer un système un système de services étendu (extended service set : *ESS*). Le système de distribution peut être un réseau filaire ou un réseau sans fil.
- Le ESS est repéré par un *ESSID* (service set identifier) un identifiant de 32 caractères de long au format ASCII. ESSID est abrégé *SSID*. Il représente le nom du réseau en quelque sorte un premier niveau de sécurité dans la mesure où la connaissance de SSID est nécessaire pour pour qu'une station se connecte au réseau étendu.
- Lorsque un utilisateur passe d'un BSS vers un autre BSS de même ESS l'adaptateur sans son carte est capable de changer le point d'accès selon la qualité de réception des signaux provenant des différents point d'accès. Les points d'accès communiquent entre eux grâce au système de distribution afin d'échanger des informations sur les stations et permettre de transmettre les données des stations mobiles. Cette caractéristique permet aux stations de passer de façon transparente d'un point d'accès à un autre. Est appelé *itinérance (roaming)*.

#### ***Communication avec le point d'accès***

Lors de l'entrée d'une station dans une cellule celle-ci diffuse sur chaque canal une requête de sondage (probe request) contenant l'ESSID pour lequel elle est configurée et le débit que son adaptateur sans fil supporte. Si aucun ESSID n'est configuré, la station écoute le réseau à la recherche d'un SSID.

Chaque point d'accès diffuse régulièrement (0.1 secondes) une trame balise (beacon) donnant des informations sur son BSSID ses caractéristiques et ESSID. ESSID est diffusé par défaut mais il est possible de désactiver cette option.

A chaque requête de sondage reçue, le point d'accès vérifie l'ESSID et la demande de débit présent dans la trame si l'ESSID correspond à celui du point d'accès, ce dernier envoie une réponse contenant des informations sur sa charge et des données de synchronisation. La station recevant la réponse peut être constaté la qualité du signal émis par le point d'accès afin de juger de la distance à laquelle il se situe. (Plus le point d'accès est proche le débit est meilleur).

Une station se trouvant à la portée de plusieurs points d'accès (possédant l'ESSID) pourra choisir les points d'accès offrant le meilleurs compromis de débit et de la charge.

### **Le mode « AdHoc » (IBSS: Independent Basic Service Set)**

C'est un mode de fonctionnement qui permet de connecter directement les ordinateurs équipés d'une carte réseau Wifi, sans utiliser un matériel tiers tel qu'un point d'accès. Ce mode est idéal pour interconnecter rapidement des machines entre elles sans matériel supplémentaire.

- L'ensemble formé par les différentes stations est appelé ensemble de services de base indépendants (Independent Basic Service Set: IBSS).
- L'IBSS est identifié par un SSID
- Topologie dynamique
- les machines utilisateurs servent des routeurs entre elles

### **II.7 couches protocolaires**

<i>LLC (logical Link control) 802.2</i>	La couche liaison
Mac (Media Access Control)	
<i>802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11g</i>	Couche physique

**Tableau III.1 : les couches protocolaires**

#### **La couche physique**

- Bande de fréquence ISM (Industrie Science et Médecine).
- Aucune autorisation nécessaire 2,4GHz, 4835 GHz.
- 802.11 (1997) 1 Mégabit/s, bande 2,4 Gigahertz.
- 802.11b (1999) 11 Mégabit/s, bande 2,4 Gigahertz.
- 802.11a (1999) 6 à 54 Mégabit/s, bande 5 Gigahertz.
- 802.11g (depuis 2001) jusqu'à 54 Mégabit/s, bande 2,4 Gigahertz.
- Bientôt le 802.11n jusqu'à 540 Mégabit/s (premières cartes en 2006, norme pour 2008) bande 2,4 GHz et 5 GHz.

### II.8 différentes Technologies de transmission

- DSSS Direct Sequence Spread Spectrum. (802.11 b ET g).
- FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum.
- OFDM (802.11 a et g)

1.Étalement du Spectre par Séquence Directe (DSSS : Direct Séquence Spread Spectrum) la technique DSSS consiste à transmettre pour chaque bit une séquence Barker (bruit pseudo aléatoire) de bits. Chaque valant 1 est remplacé par une séquence de bits et chaque bit valant 0 est remplacé 0 par son complément.

La couche physique 802.11:

- définit une séquence de 11bits.
- remplace un bit à 1 par **11101100011** et le bit à 0 par **00010011100**.
- La résistance aux interférences augmente avec le CC (Chipping Code)=11.



2.Étalement de spectre par saut de Fréquence (FHSS : Frequency Hopping Spread Spectrum)

Consiste à découper la bande de fréquence en un minimum de 75canaux (hop ou saut d'une largeur de 1MHZ).ensuite de transmettre en utilisant une combinaison de canaux connue de toutes les stations de cellule. Dans la norme 802.11 la bande de fréquence (2.42.4835 GHZ).est découpé :

- en 79 canaux de largeur 1 Mhz.
- Transmission sur un canal puis sur un autre pendant une courte période de temps.
- Fréquence maintenue au maximum 400 ms.
- Bonne résistance à la propagation multi trajet
- Bonne résistance au brouillage (interférence radio)
- Relativement faible débit.

3.802.11a OFDM (Orthogonal Frequency Data Multiplexing)

- Multiplexage Orthogonal en Répartition de Fréquence (Orthogonal Frequency Data Multiplexing)
- Débit : 54Mbit/s



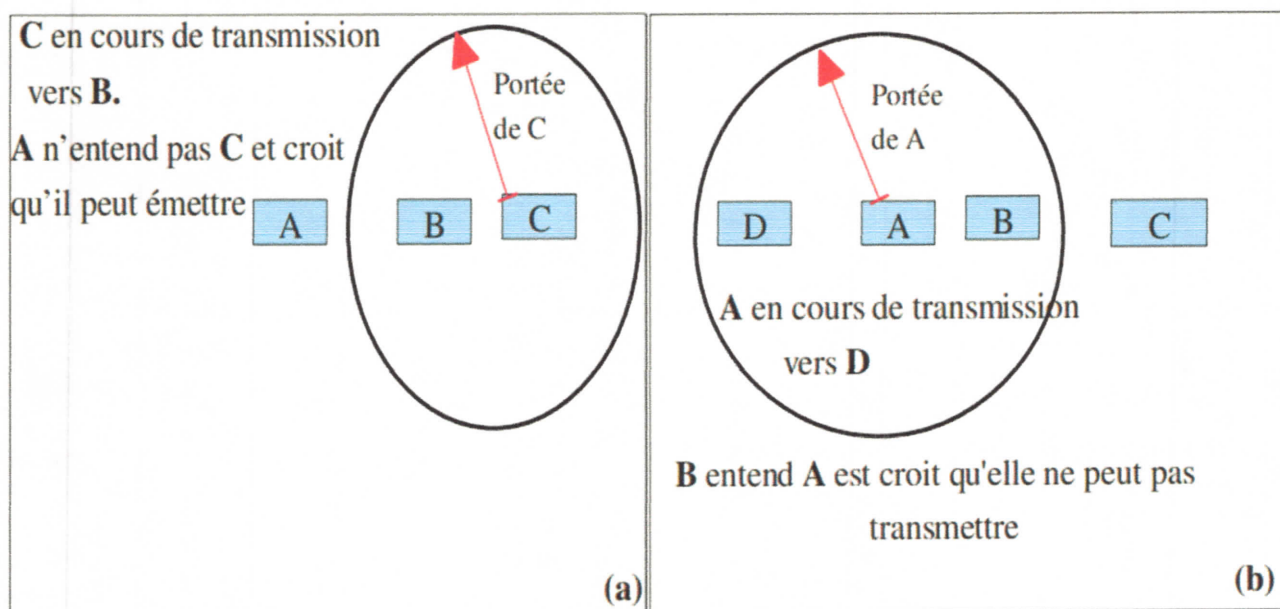
➤ Bande de fréquences des 5GHz.

#### 4. Infrarouge

##### La couche MAC (802.11)

Dans un réseau local Ethernet classique, la méthode d'accès utilisée par les machines est le CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect). Chaque machine envoyant un message vérifie qu'aucun autre message n'a été envoyé en même temps par une autre machine. Si c'est le cas les deux machines patientent pendant un temps aléatoire avant de recommencer à émettre.

Dans un environnement sans fil ce procédé n'est pas possible dans la mesure où deux stations communiquant avec le récepteur ne s'entendent pas forcément mutuellement en raison de leur rayon de portée. Voir (Figure III.1)



**Figure III.1 :** l'effet du rayon de portée.

La norme 802.11 propose deux méthodes d'accès:

**CSMA/CA** (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

La station voulant émettre écoute le réseau si le réseau est encombré, la transmission est différée. Dans le cas contraire (si le canal est libre pendant un temps donné DIFS: Distributed Inter Frame Space), alors la station peut émettre. La station commence par la transmission un message RTS (Ready To send) (prêt à émettre) contenant des informations

sur le volume des données qu'elle souhaite émettre et sa vitesse de transmission. Le récepteur lui répond par CTS (Clear To Send) le champ est libre pour émettre puis la station commence l'émission de données. A la réception de toutes les données émises par la station le récepteur envoie un accusé de réception (ACK).

#### **PCF (Point Coordination Function)**

Le point coordination Function appelé mode d'accès contrôlé. Elle fondée sur l'interrogation à tour de rôle des stations ou pollings, contrôlée par le point d'accès. Une station ne peut émettre que si elle est autorisée et elle ne peut recevoir que si elle est sélectionnée. Cette méthode est conçue pour les application a temps réel nécessitant une gestion de délai lors des transmission de données.

- La base (le point d'accès) contrôle tout le trafic : il n'y a jamais de collisions
- Elle interroge (Poll) les autres stations pour savoir si elles ont des trames à transmettre :
  - envoi d'une trame de signalisation (Beacon frame) 10 à 100 fois par seconde
  - cette trame contient des informations système, des informations de synchronisation, etc.
  - elle invite aussi les nouvelles stations à se faire connaître pour rentrer dans la séquence de polling.

### **III. Propagation et rayonnement**

Il est devenu nécessaire aujourd'hui pour les ingénieurs de conception, de prédire le comportement des systèmes avec des modèles rigoureux.

Les modèles sont basées sur les équations qui régissent le champ électromagnétique et qui ont été établies par Maxwell vers 1864. La préoccupation a longtemps porté sur la recherche de solutions de ces équations en présence de géométries quelconques.

Si certaines méthodes numériques étaient connues depuis longtemps, leur utilisation était cependant très vite limitée par les faibles moyens de calcul qui existaient à l'époque. Avec le développement rapide des ordinateurs, ces méthodes ainsi que de nouvelles approches sont aujourd'hui très actuelles.

Leur développement permet maintenant la résolution de problèmes ou la géométrie et les milieux peuvent être quelconques avec, cependant, des limitations.

La formulation du problème est une étape incontournable qui précède l'application de la méthode numérique de résolution. Elle demande une bonne connaissance de l'électromagnétisme et, dans une certaine mesure, une connaissance mathématique approfondie sur la manipulation et les propriétés des opérateurs. En effet, les équations mathématiques qui décrivent un phénomène physique peuvent être directement résolues ou être manipulées afin d'éliminer certaines grandeurs inconnues.

Dans la plupart des cas, les équations doivent être résolues numériquement.

### III.1 Equations de Maxwell

Dans un milieu homogène linéaire et isotrope les équations de Maxwell s'écrivent :

$$\nabla \wedge E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

(1.1)

$$\nabla \wedge H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

(1.2)

$$\nabla \cdot D = \rho$$

(1.3)

$$\nabla \cdot B = 0$$

(1.4)

Avec :

$$D = \varepsilon E$$

(1.5)

$$B = \mu H$$

(1.6)

La loi de conservation de la charge s'écrit :

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

(1.7)

En régime harmonique les deux premières équations de Maxwell et la loi de conservation de la charge deviennent :

$$\nabla \wedge E = -j\omega\mu H \quad (1.8)$$

$$\nabla \wedge H = J + j\omega\epsilon E \quad (1.9)$$

$$\nabla \cdot J + j\omega\rho = 0 \quad (1.10)$$

#### Equations de propagation des champs E et H :

En manipulant les équations de Maxwell on obtient les équations de propagation du champ E et du champ H :

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu\epsilon E = j\omega\mu J + \nabla\left(\frac{\rho}{\epsilon}\right) \quad (1.11)$$

$$\nabla^2 H + \omega^2 \mu\epsilon H = -\nabla \wedge J \quad (1.12)$$

Assez difficiles à résoudre.

On préfère travailler avec les équations de propagation des potentiels : le potentiel vecteur A et le potentiel scalaire  $\phi$ . Une fois ces potentiels déterminés il est plus facile de retrouver les expressions du champ E et du champ H.

Equations d'onde des potentiels A et  $\phi$  :

Les équations de propagations des potentiels appelées aussi équations d'onde de Helmholtz sont des équations de Maxwell différentielles inhomogènes qui s'obtiennent à partir des équations de Maxwell de la même manière que précédemment.

Sachant que :

$$B = \nabla \wedge A \quad (1.13)$$

$$E = -\nabla\phi - j\omega A \quad (1.14)$$

En tenant compte de la jauge de Lorentz :  $\nabla \cdot A + j\omega\epsilon\mu\phi = 0$ , on a finalement :

$$\nabla^2 A + \omega^2 \mu\epsilon A = -\mu J \quad (1.15)$$

On a aussi :

$$\nabla^2 \phi + \omega^2 \mu \varepsilon \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.16)$$

En résumé les équations d'onde de Helmholtz pour les potentiels  $A$  et  $\phi$  s'écrivent :

$$\nabla^2 A + \omega^2 \mu \varepsilon A = -\mu J \quad (1.17)$$

$$\nabla^2 \phi + \omega^2 \mu \varepsilon \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.18)$$

Ou sous forme condensée :

$$[\nabla^2 + K^2] F = -S \quad (1.19)$$

Avec :

$$F = \begin{Bmatrix} A \\ ou \\ \phi \end{Bmatrix} \quad S = \begin{Bmatrix} \mu J \\ ou \\ \frac{\rho}{\varepsilon} \end{Bmatrix} \quad \text{Et } K^2 = \omega^2 \mu \varepsilon \quad (1.20)$$

$F$  étant la fonction potentielle ( $A$  vecteur et  $\phi$  potentiel scalaire)

$S$  étant la fonction source ( $J$  densité de courant et  $\rho$  densité de charge)

$K$  étant le nombre d'onde

La solution des équations différentielles de Helmholtz peut s'obtenir par inversion de l'opérateur  $[\nabla^2 + K^2]$ , ce qui donne :

$$F = -[\nabla^2 + K^2]^{-1} S \quad (1.21)$$

**Propagation guidée des O.E.M.**

La propagation guidée des O.E.M., contrairement à la propagation en espace libre où le milieu est infini, a lieu dans un milieu de dimensions finies. Les champs sont confinés dans une ou deux dimensions de l'espace, et libres d'aller selon la troisième dimension : ils se propagent en ondes guidées

Par rapport à un système de coordonnées  $x, y, z$  l'expression du champ électrique  $\mathbf{E}$  et magnétique  $\mathbf{H}$  d'une onde se propageant le long d'un guide dont l'axe est la coordonnée  $z$ , est de la forme :

$$F(x, y, z, t) = F(x, y) e^{-\gamma z} e^{j\omega t} \quad (1.22)$$

Avec :

$$F = \left\{ \begin{array}{l} E \\ \text{ou} \\ H \end{array} \right\} \quad (1.23)$$

Où  $\gamma$  est le facteur de propagation le long l'axe du guide,  $\omega$  la pulsation du champ et  $t$  le temps.

L'étude d'un guide d'onde revient à déterminer :

- le facteur de propagation  $\gamma = \alpha + j\beta$  où  $\alpha$  est le coefficient d'atténuation et  $\beta$  la constante de phase ; la longueur d'onde guidée étant :  $\lambda_g = 2\pi/\beta$  et la vitesse de phase :  $v_\phi = \omega/\beta$
- le champ  $F(x, y) = E(x, y)$  ou  $H(x, y)$  dont la connaissance détermine la cartographie du champ électromagnétique

Le problème est bidimensionnel si la structure est uniforme le long de l'axe de propagation. L'étude se ramène donc à la recherche des solutions de l'équation de Helmholtz associée aux conditions aux limites sur la section droite du guide.

Dans la partie diélectrique du guide les champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$  doivent satisfaire l'équation d'onde homogène de Helmholtz :

$$\left[ \nabla^2 + K^2 \right] F = \left[ \nabla^2 - \gamma_0^2 \right] F = 0 \quad (1.24)$$

Avec :

$$F = \left\{ \begin{array}{l} E \\ \text{ou} \\ H \end{array} \right\} \quad \text{et} \quad \gamma_0^2 = -K^2 = -\omega^2 \mu \epsilon \quad (1.25)$$

$K$  étant le nombre d'onde

Comme le Laplacien peut être décomposé en deux parties, l'une transversale et l'autre longitudinale :

$$\nabla^2 = \nabla_T^2 + \gamma^2 \quad (1.26)$$

$$\text{Avec : } \nabla_T^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

L'équation d'onde de Helmholtz s'écrit de nouveau :

$$\left[ \nabla_T^2 + (\gamma^2 - \gamma_0^2) \right] F = -S \quad (1.27)$$

Les composantes transversales des champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$  s'obtiennent à partir des composantes longitudinales

$$\text{Posons : } K_c^2 = \gamma^2 - \gamma_0^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon$$

$$K_c^2 E_x = -\gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} - j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$K_c^2 E_y = -\gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x}$$

$$K_c^2 H_x = j\omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x}$$

$$K_c^2 H_y = -j\omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial x} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

Dans l'approximation quasi-T.E.M.  $E_z = H_z = 0$  il est donc nécessaire d'égaliser le terme  $K_c^2 = \gamma^2 - \gamma_0^2$  à 0 [?]

$$\text{Donc } \gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon = -\omega^2 \mu (\epsilon' + j\epsilon'')$$

Dans le cas des lignes sans pertes :  $\gamma^2 = j^2 \omega^2 \mu \epsilon'$

Ceci a pour conséquence de ramener l'équation de Helmholtz pour le potentiel 1.27 à l'équation de Poisson transversale pour le potentiel électrique  $\phi$  [?]

$$\nabla_T^2 \phi = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (1.28)$$

Et dans le cas de milieux sans charges et sans courant, a l'équation de Laplace dans le plan transverse pour les champs **E** et **H**

$$\nabla_T^2 F = 0 \quad (1.29)$$



### III.2 Rayonnement des O.E.M.

A partir d'une antenne encore appelée élément rayonnant ou aérien, des ondes sont émises et se propagent dans l'espace libre ou dans tout autre diélectrique.

Ce sont les sources (  $J$  et  $\rho$  ) localisés sur l'antenne qui sont à l'origine du champ E.M. rayonné dans l'espace.

Sur l'antenne les champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$  s'obtiennent à partir des équations de propagation pour  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$  :

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E} = j\omega \mu \mathbf{J} + \nabla \left( \frac{\rho}{\epsilon} \right) \quad (1.30)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{H} = -\nabla \wedge \mathbf{J} \quad (1.31)$$

La 1<sup>ère</sup> équation peut être réécrite en tenant compte de l'équation de conservation de la charge :

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + j\omega \rho \Rightarrow \rho = -\frac{\nabla \cdot \mathbf{J}}{j\omega} \quad (1.32)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \epsilon \mathbf{E} = j\omega \mu \mathbf{J} - \nabla \left( \frac{\nabla \cdot \mathbf{J}}{j\omega \epsilon} \right) \quad (1.33)$$

Loin de l'antenne les équations de propagation des potentiels  $A$  et  $\phi$  :

$$\nabla^2 A + \omega^2 \mu \epsilon A = -\mu \mathbf{J} \quad (1.34)$$

$$\nabla^2 \phi + \omega^2 \mu \epsilon \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1.35)$$

Permettent de calculer les champs  $\mathbf{E}$  et  $\mathbf{H}$  à partir de :

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}$$

(1.36)

$$E = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times H \quad (1.37)$$

#### IV Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la technologie WIFI, nous avons visualisé les modèles de déploiement.

Nous avons présenté les techniques de transmission dans les réseaux sans fil et les domaines d'application.

Nous avons ensuite rappelé les termes et concepts fondamentaux des réseaux : le modèle OSI et ces couches et les principaux types de réseaux : PAN, LAN, MAN, WAN et leurs variantes sans fil.

En fin, nous avons donné une rappelle sur la propagation et le rayonnement et on a développé les équations de maxwell.