

# Réseau de communication

## La technologie GSM-R

### ENCADRÉ AVEC LISERET

La révolution numérique bouleverse les rapports entre les personnes et leur environnement, entre les êtres humains et les machines. Elle modifie également la relation entre les machines elles-mêmes, capables d'échanger de façon autonome des quantités considérables d'informations en communiquant. Les flux d'information liés aux échanges entre un produit et son environnement numérique sont caractérisés en termes de quantité de données et de vitesse de transmission. Les objets communicants connectés et « l'internet des objets » sont propices à différents types d'études. Les connaissances associées dans les différents champs disciplinaires visent à apporter les bases nécessaires à la poursuite d'études supérieures scientifiques, en particulier sur le plan informatique via des protocoles standards de communication des objets dits intelligents (LoRa) ou via des bus de communication et réseaux, clients et serveurs.

Les produits supports des expérimentations sont multi-physiques. Les expérimentations peuvent s'effectuer sur tout ou partie du produit matériel ou son jumeau numérique.

### MOTS-CLÉS

Sciences de l'ingénieur, première, réseau communication, réseau GSM, réseau GSM-R, fréquence de travail réseau, trame, burst.

### RÉFÉRENCES AU PROGRAMME

Sur la thématique des territoires et des produits intelligents, de la mobilité des personnes et des biens, les réseaux de communication et d'énergie sont représentatifs des problématiques actuelles et permettent d'illustrer les enseignements dans toutes leurs modalités pédagogiques.

### CONNAISSANCES

Liaisons filaires et sans fil.

Natures et caractéristiques des signaux, des données, des supports de communication.

Protocole, trame.

Débit maximal, débit utile.

### PRÉREQUIS

Chaînes d'information et d'énergie.

Numération décimale et binaire, notion de signal analogique, numérique, et logique.

Notions d'optique ondulatoire : longueur d'onde, fréquence, célérité (Physique - Chimie, 2nde GT).

### COMPÉTENCES

ANALYSER

Analyser les principaux protocoles pour un réseau de communication et les supports matériels.

MODÉLISER ET RÉSOUDRE

Caractériser les échanges d'informations.

EXPÉRIMENTER - SIMULER

Relever les grandeurs caractéristiques d'un protocole de communication.

## SOMMAIRE

<b>Présentation</b> .....	<b>3</b>
<b>La technologie GSM-R</b> .....	<b>4</b>
<b>La cellule et sa station de base</b> .....	<b>5</b>
<b>La structure du réseau GSM</b> .....	<b>6</b>
<b>Les équipements du réseau GSM</b> .....	<b>7</b>
<b>Répartition des fréquences GSM (2G, 3G, 4G, 5G et GSM-R)</b> .....	<b>8</b>
<b>Exemple de fréquence de travail du GSM</b> .....	<b>9</b>
<b>La voie balise et la voie trafic</b> .....	<b>10</b>
<b>La structure du burst (l'unité élémentaire en GSM)</b> .....	<b>11</b>
<b>Le multiplexage temporel</b> .....	<b>12</b>
<b>Le contrôle par la base du début d'émission</b> .....	<b>13</b>
<b>La détection du changement de cellule</b> .....	<b>14</b>
<b>La structure temporelle du système GSM ou GSM-R</b> .....	<b>15</b>
<b>Le mobile en fonctionnement</b> .....	<b>16</b>
<b>Le principe de base de transmission de la voix vocodeur</b> .....	<b>17</b>
<b>La protection des données numériques</b> .....	<b>18</b>
<b>Le wifi dans les TGV</b> .....	<b>19</b>
<b>Exemple du GSM-R pour le client</b> .....	<b>19</b>
<b>Propositions d'activités</b> .....	<b>20</b>
• <b>Activité 1 : Analyse de protocoles</b> .....	<b>20</b>
• <b>Activité 2 : Caractérisation d'échanges d'informations</b> .....	<b>20</b>
• <b>Activité 3 : Test d'un protocole de communication entre deux produits en mouvement</b> .....	<b>20</b>
<b>Sitographie</b> .....	<b>21</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>21</b>

## Présentation

La SNCF, puis Réseau Ferré de France à partir de sa création en 1997, a pris en charge jusqu'en 2002 l'installation des infrastructures radio, le long des 14 400 km de voies ferrées.

Aujourd'hui, grâce au projet GSM-R, l'ensemble du réseau de télécommunications ferroviaires prend une nouvelle dimension, et évolue avec son temps vers une technologie numérique permettant le contrôle-commande en temps réel des trains équipés en ERTMS<sup>1</sup> et adaptée aux nouvelles exigences de la circulation ferroviaire en France et en Europe.

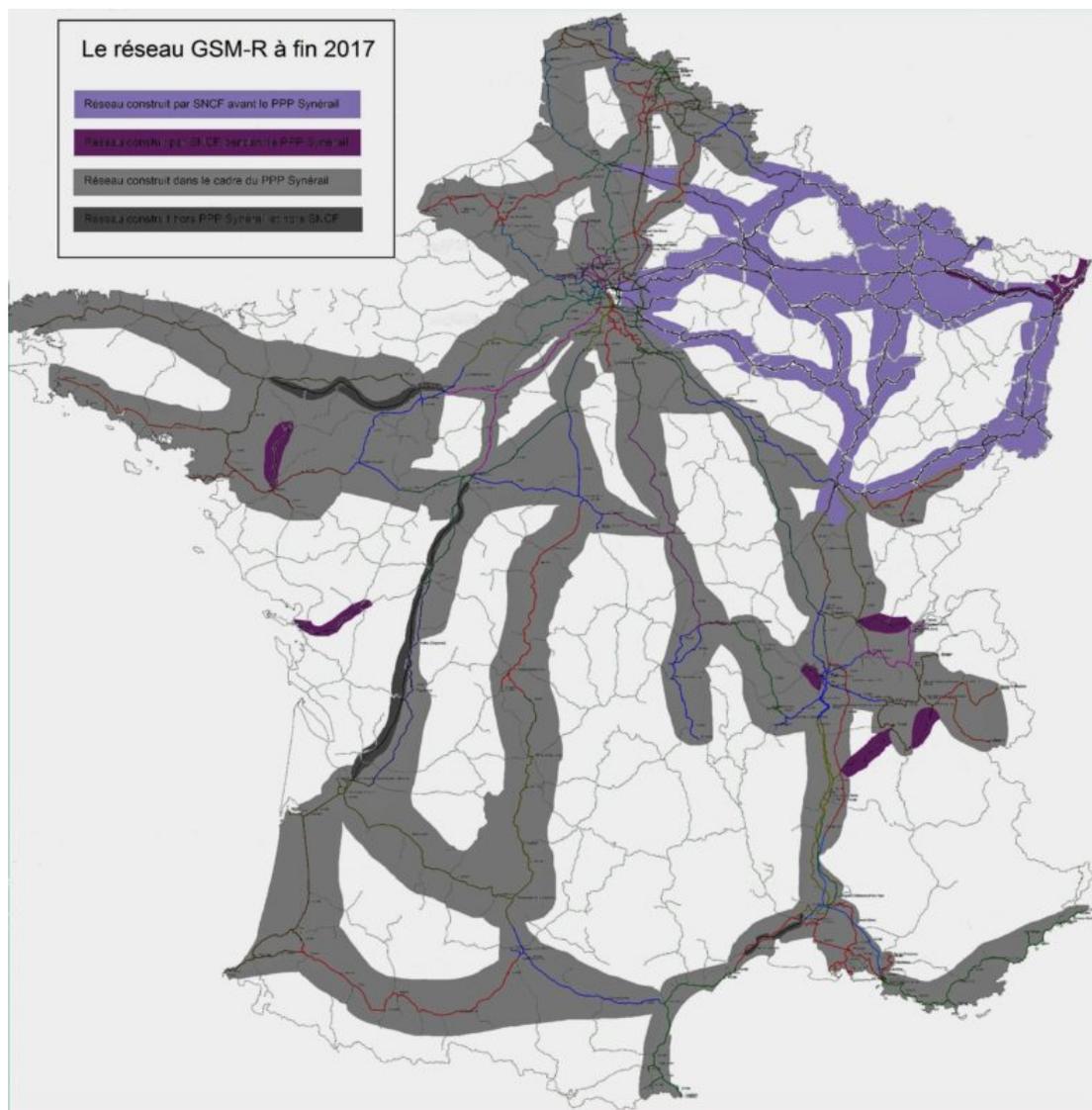


Figure 1 : Carte d'implantation du GSM-R en France

<sup>1</sup> ERTMS : European Rail Traffic Management System, en Français : système européen de gestion du trafic ferroviaire

## La technologie GSM-R

Le GSM-R (Global system for mobiles – Railways) est standard de communication sans fil développé spécifiquement pour les applications et les communications ferroviaires. Il permet aux trains dans son application principale de communiquer avec les postes de régulation du trafic ferroviaire. Il est une variante du GSM.

La norme EIRENE – MORANE (Mobile Radio for Railways Networks in Europe) spécifie une utilisation fonctionnelle et sans coupure de communication du GSM-R jusqu'à une vitesse de déplacement du train de 500 km/h.

Le GSM-R, qui est construit à partir de la technologie GSM, bénéficie des économies découlant de cet héritage. Il autorise une mutation numérique à un coût compétitif, permettant le remplacement de tous les systèmes de communication filaire (le long de la voie) et des réseaux radio ferroviaires analogiques existant dans chaque pays qui sont incompatibles entre eux : on comptabilise en effet plus de 35 systèmes de communication ferroviaire différents, rien qu'en Europe...

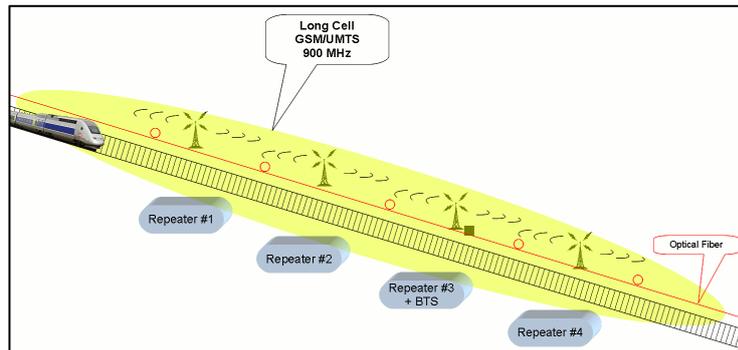


Figure 2 : Structure du GSM-R

Le GSM-R est une plateforme sécurisée pour les communications de voix et de données, entre les différents membres des équipes ferroviaires : conducteurs, régulateurs, membres de l'équipe de manœuvre, personnels à bord du train, chefs de gare. Il apporte des dispositifs tels que les appels de groupes, les annonces ou appels diffusés, les appels localisés, et la préemption des appels dans en cas d'urgence. Il pourra supporter des applications telles que le suivi des marchandises, la vidéo-surveillance dans les trains et dans les gares, ainsi que les services d'informations des usagers.

Ce standard qui est le résultat de plus de dix ans de collaboration entre les nombreuses compagnies ferroviaires Européennes, finalise l'interopérabilité par l'utilisation d'une plateforme de communication unique. Le GSM-R fait partie du nouveau standard ERTMS et permet le transport des informations de signalisation ferroviaire directement jusqu'au conducteur, permettant une vitesse de circulation du train plus élevée ainsi qu'un trafic plus dense, tout en maintenant un haut niveau de sécurité.

Le GSM-R a été choisi par 38 pays à travers le monde, incluant tous les états membres de l'Union Européenne, ainsi que des pays d'Asie, d'Eurasie et d'Afrique du Nord.

Le GSM-R utilise en général des tours relais (Base Transceiver Station) dédiées, proches de la voie ferrée. La distance entre chaque BTS est de 3-4 km. Cette proximité crée un haut degré de redondance et une plus grande couverture et fiabilité. Le train maintient une connexion numérique par modem vers le centre de régulation des trains tout le temps. Ce modem utilise une priorité plus grande que les autres utilisateurs. Si la connexion du modem est perdue, le train s'arrête automatiquement.

En Allemagne, en Italie et en France le réseau GSM-R compte entre 3000 et 4000 BTS.

Pour la suite des chapitres, on ne distinguera pas la technologie GSM-R de la technologie GSM.

## La cellule et sa station de base

Dans un réseau GSM, le territoire est découpé en petites zones appelées cellules.

Chaque cellule est équipée d'une station de base fixe munie de ses antennes installées sur un point haut (château d'eau, clocher d'église, immeuble...).

Les cellules sont dessinées hexagonales mais la portée réelle des stations dépend de la configuration du territoire arrosé et du diagramme de rayonnement des antennes d'émission. Dans la pratique, les cellules se recouvrent donc partiellement.



Figure 4 : La station de base du réseau GSM.

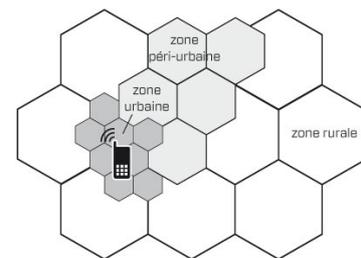
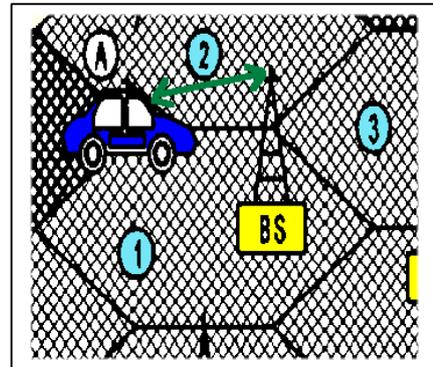


Figure 3 : Taille des cellules

Dans une cellule GSM typique (macrocellule), les mobiles peuvent être situés jusqu'à 35 km de la station de base pour le GSM900 et 2 km (minicellule) pour le DCS1800 (puissance plus faible, atténuation plus importante avec la distance).

La taille limitée des cellules permet de limiter la puissance d'émission nécessaire pour la liaison et donc augmenter l'autonomie des mobiles.



Figure 5 : Antenne de microcellule

Pour les piétons qui évoluent moins vite qu'une voiture et au niveau du sol, on ajoute des sous-stations de petites dimensions sur un site peu élevé et sur les murs des immeubles.

## La structure du réseau GSM

Lorsqu'on téléphone à partir d'un mobile GSM :

- le mobile transmet par radio la communication vers la station de base de sa cellule ;
- la conversation est ensuite acheminée de façon plus classique (câble, fibre optique ...) vers le correspondant s'il est raccordé au réseau téléphonique filaire, ou à sa station de base s'il est équipé d'un mobile ;
- cette station de base transmet finalement la conversation par radio au correspondant.

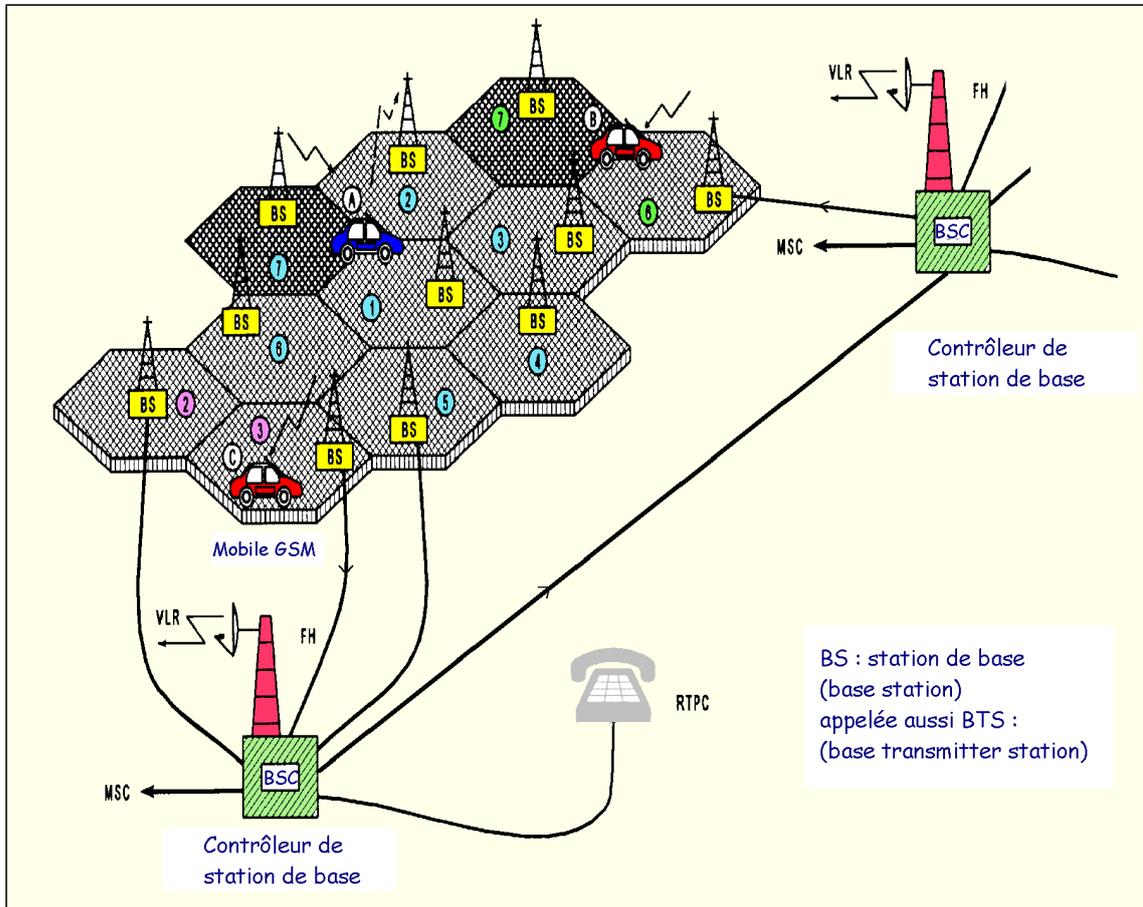


Figure 6 : Structure cellulaire du réseau GSM

Même si deux personnes se trouvent dans la même cellule et se téléphonent, la conversation ne passe jamais directement d'un GSM à l'autre.

Au cours d'un déplacement, il est possible qu'on sorte d'une cellule. Il est nécessaire alors de changer de station de base tout en maintenant la communication : c'est le transfert intercellulaire ou handover.

Pour gérer ce transfert :

- le téléphone GSM mesure en permanence la force du signal radio reçu de la station de base et écoute aussi régulièrement les stations de base des cellules voisines.
- lorsqu'il constate qu'il reçoit mieux une autre station de base que celle avec laquelle il échange les signaux, il en informe sa station de base.
- la station de base décide alors de passer le relais à la station de base voisine et met en œuvre la procédure de handover.

Ce processus oblige tous les mobiles GSM à écouter les stations de base des cellules voisines en plus de la station de base de la cellule dans laquelle il se trouve.

# Les équipements du réseau GSM

Les fonctions mises en œuvre dans le réseau GSM sont celles requises dans tout réseau de mobiles comme la numérotation, l'acheminement vers un usager mobile, le transfert de cellules. Etc...

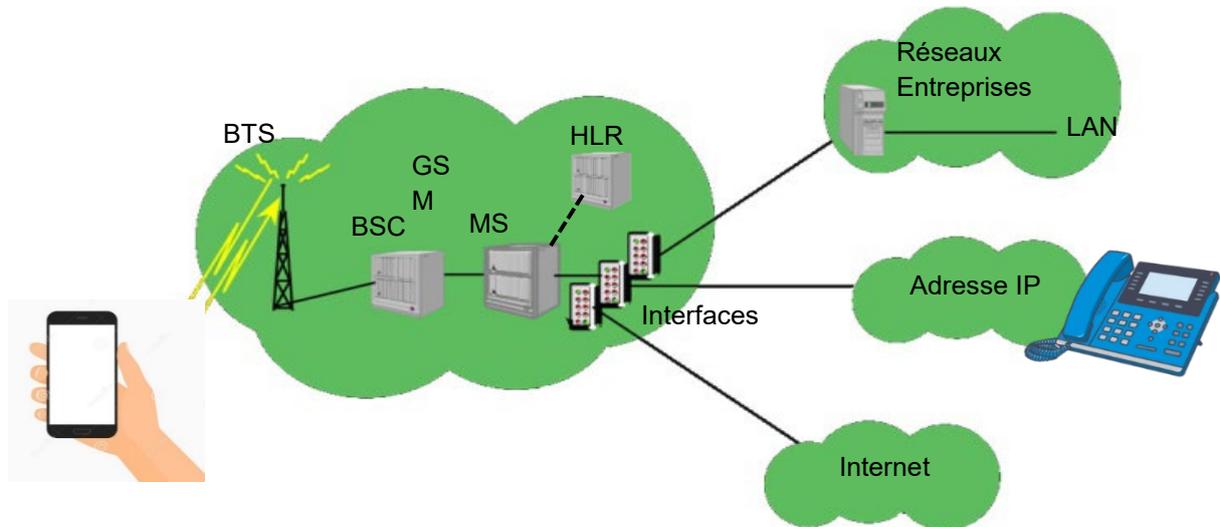


Figure 7: Structure générale d'un réseau GSM

Le téléphone GSM ou **station mobile** est caractérisée par deux identités :

- le numéro d'équipement, **IMEI** (International Mobile Equipment Identity) mis dans la mémoire du mobile lors de sa fabrication ;
- le numéro d'abonné **IMSI** (International Mobile Subscriber Identity) se trouvant dans la carte **SIM** (Subscriber Identity Module) de l'abonné.

Le système de communication radio est l'équipement qui assure la couverture de la cellule et comprend :

- les stations de transmission de base **BTS** (Base Transmitter Station) ;
- le contrôleur de stations de base **BSC** (Base Station Controller) qui gère entre 20 et 30 BTS et possède son registre d'abonnés visiteurs stockant les informations de l'abonné liées à sa mobilité.

Le réseau GSM est constitué des entités suivantes :

- **BTS** (base transceiver station) : équipement composé des émetteurs/récepteurs radio ;
- **BSC** (base station controller) : gère la ressource radio (allocation de canal, hand-over) ;
- **MSC** (mobile-service switching center) : commutateur gérant les appels départ et arrivée ;
- **HLR** (home location register) : base de données contenant les profils et localisation des abonnés.

Le commutateur de services mobiles **MSC** est un autocommutateur qui assure les fonctions de commutation nécessaires en aiguillant les conversations vers la MSC du correspondant ou vers d'autres réseaux (IP, Internet, LAN...) à travers des interfaces appropriées.

Le registre des abonnés nominaux ou **HLR** (Home Local Register) est une base de données utilisée pour la gestion des abonnés mobiles et contenant deux types d'informations :

- les informations d'abonnés, le numéro d'abonné (IMSI) ;
- les informations sur la localisation de l'abonné, permettant aux appels entrant dans le réseau d'être acheminés jusqu'à ce mobile.

# Répartition des fréquences GSM (2G, 3G, 4G, 5G et GSM-R)

La répartition des fréquences entre les différents opérateurs n'est pas figée mais est amenée à évoluer au cours du temps suivant le degré de saturation des cellules en environnement urbain.

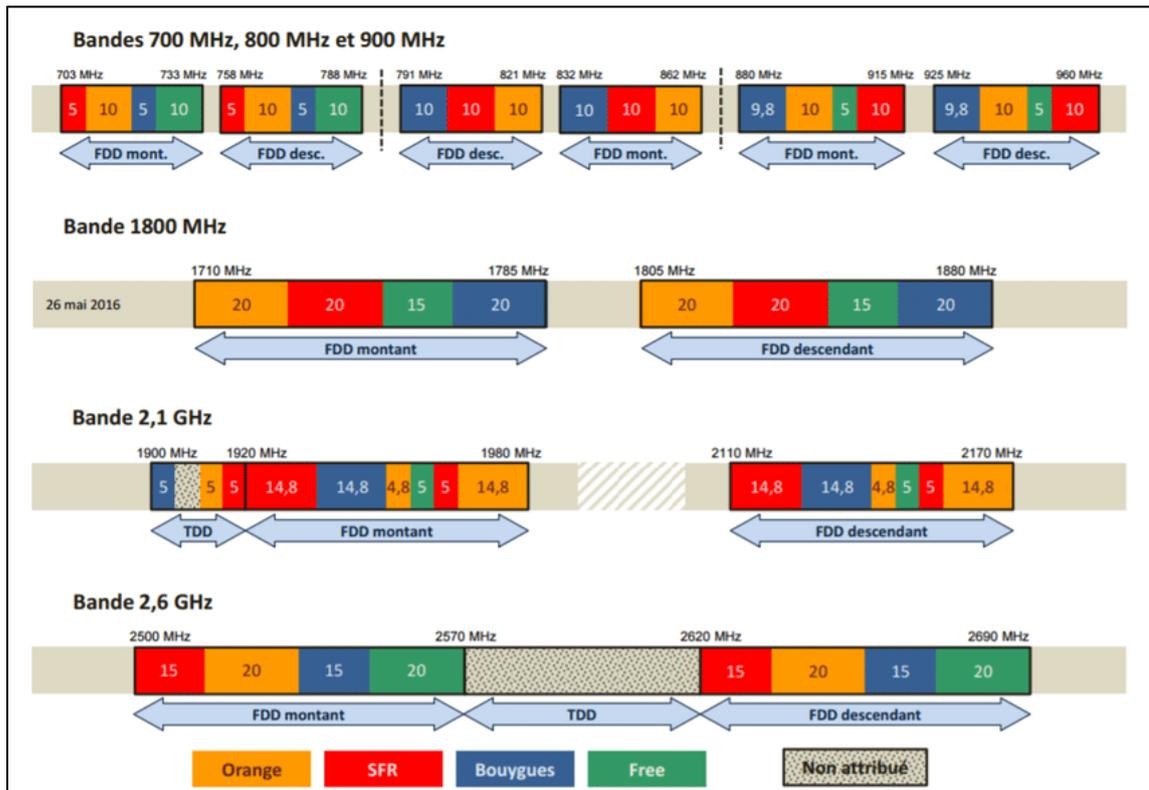


Figure 8 : Fréquence utilisée par les opérateurs en France

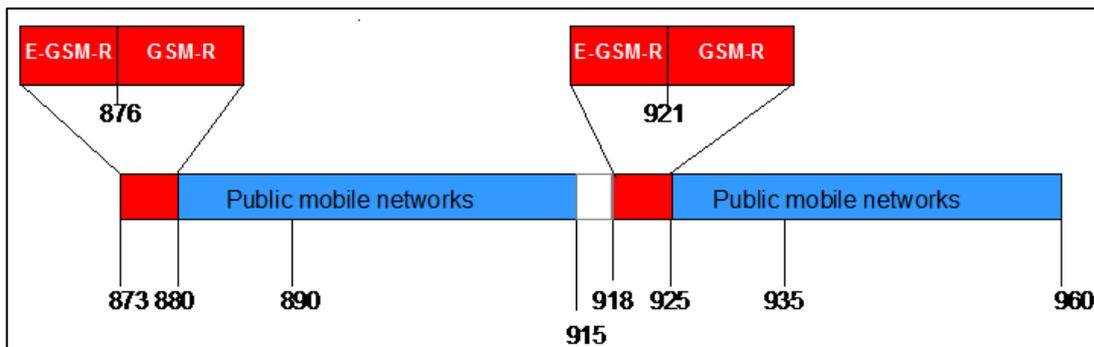


Figure 9 : Fréquence réservée par les transports ferrés européens

GSM-R : fréquence utilisée par les opérateurs ferrés (SNCF, Eurostar...)

E-GSM-R : extension de la bande de fréquence pour ces opérateurs ferrés

Évolution des bandes et de leur utilisation au cours du temps et leur débit théorique

Réseau	Génération	Débit	Fréquences
2G	2 <sup>ème</sup> génération	9,6 Kbit/s	900 et 1800 MHz
GPRS	2 <sup>ème</sup> génération	De 40 Kbit/s à 171 Kbit/s	900 et 1800 MHz
3G	3 <sup>ème</sup> génération	1,9 Mbit/s	1800 et 2100 MHz
H+	3 <sup>ème</sup> génération	42 Mbit/s	1900 et 2100 MHz
4G LTE	4 <sup>ème</sup> génération	150 Mbit/s	800, 1800 et 2600 MHz
4G+	4 <sup>ème</sup> génération	1 Gbit/s	800, 1800 et 2600 MHz
5G	5 <sup>ème</sup> génération	En test	1242 - 1492 MHz

## Exemple de fréquence de travail du GSM

Dans le système GSM/DCS, deux bandes de fréquences sont utilisées, l'une autour des 900 MHz et l'autre autour de 1,8 GHz.

Chaque bande est divisée en deux sous-bandes, servant l'une pour le transfert d'informations entre le mobile et la station de base (**voie montante**), et l'autre pour la liaison entre la station de base et le mobile (**voie descendante**) :

- bande EGSM étendue (bande de largeur totale 35 MHz) :
  - de 880 à 915 MHz du mobile vers la base ;
  - de 925 à 960 MHz de la base vers le mobile ;
  - écart entre les deux fréquences 45 MHz ;
  - 174 canaux espacés de 200 kHz.
- bande DCS (bande de largeur totale 75 MHz) :
  - de 1710 à 1785 MHz du mobile vers la base ;
  - de 1805 à 1880 MHz de la base vers le mobile ;
  - écart entre les deux fréquences 95 MHz ;
  - 374 canaux espacés de 200 kHz.

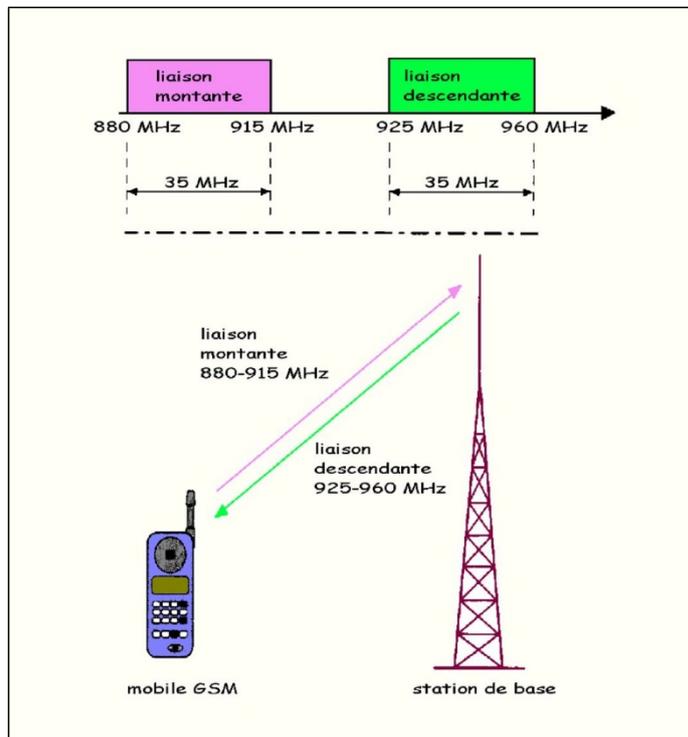


Figure 10 : liaison entre le mobile et la station de base pour le GSM

Chaque porteuse GSM ou DCS est identifiée de manière unique par un numéro  $n$ , désigné par le sigle ARFCN, codé sur 10 bits conformément au plan suivant où la fréquence de la voie descendante est exprimée en MHz:

pour $1 \leq n \leq 124$	$f = 935 + (0,2 \times n)$	(GSM)
pour $975 \leq n \leq 1024$	$f = 935 + (0,2 \times (n-1024))$	(GSM étendu EGSM)
pour $512 \leq n \leq 885$	$f = 1805,2 + (0,2 \times (n-512))$	(DCS 1800)

### Exemple :

pour  $n=10$ , voie descendante à  $935 + (0,2 \cdot 10) = 937$  MHz et voie montante à  $f_d - 45 = 892$  MHz

**Remarque** : ce numéro de canal peut changer durant une communication lorsque la qualité devient insuffisante (**saut de fréquence** ou **frequency hopping**).

## La voie balise et la voie trafic

Chaque BTS est équipé pour travailler sur un certain nombre de canaux, en général 5 ou 6, qui sont autant de paires de fréquences émission-réception.

Toute BTS émet en permanence des informations sur son canal **BCH** (Broadcast Channel) appelé aussi **voie balise**. Ce signal constitue le lien permanent reliant mobile et station de base à partir de la mise en route du mobile jusqu'à sa mise hors service, qu'il soit en communication ou non.

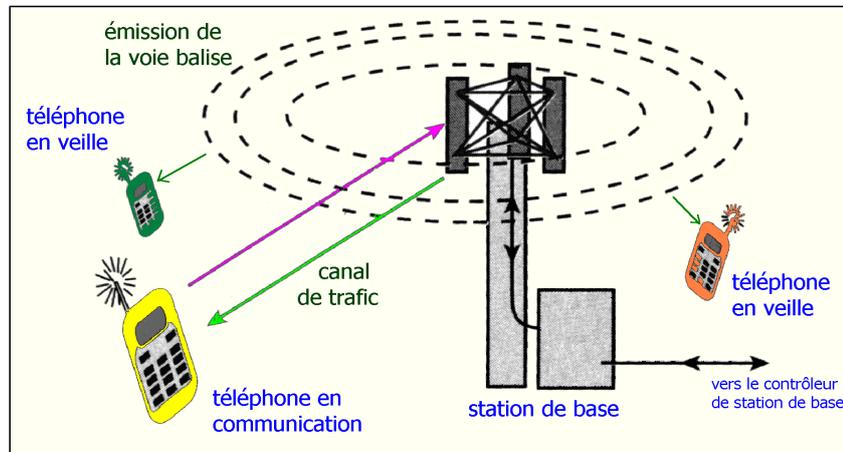


Figure 11 : Par la voie balise, la base diffuse ses informations vers tous les mobiles de la cellule

Le fonctionnement du mobile se décompose en 2 phases :

⇒ **Mobile en veille** : le mobile échange avec sa base des signaux de contrôle **sur la voie balise** (émission en slot 0 à f1, réception en slot 0 à f1 + 45 MHz)

Le niveau de la voie balise (BCH) est connu et sert pour un certain nombre de fonctions de contrôle :

- à la mise en route du mobile, son récepteur scrute la bande GSM pour chercher le signal BCH de niveau le plus élevé. C'est avec la station de base correspondante que le mobile se mettra en communication.
- ce signal contient des informations concernant les opérateurs (SFR, Orange, Free, Bouygues) et les fréquences balise des cellules voisines
- ce signal véhicule les messages qui seront affichés sur l'écran du mobile
- toutes les 15 secondes si le signal reçu est fort et toutes les 5 secondes s'il est faible, le récepteur écoute les balises des cellules voisines pour détecter un changement de cellule.
- l'émission balise n'occupe le canal de transmission que dans le sens base - mobile. La liaison montante pourra donc être utilisée par le mobile pour signaler son désir de se connecter au réseau pour une communication (RACH : random access channel).

⇒ **Mobile en communication** : le mobile échange avec la base des signaux de parole et de contrôle. **Sur la voie de trafic** (émission en slot i à f2, réception en slot i à f2 + 45 MHz)

Il émet et reçoit maintenant sur une nouvelle paire de fréquences allouées par la base pour la durée de la communication : c'est le TCH (Traffic CHannel)

Parallèlement à cette activité principale, il écoute périodiquement les voies balises de la cellule et des cellules voisines pour détecter une variation de niveau lui indiquant un changement de cellule.

## La structure du burst (l'unité élémentaire en GSM)

A l'intérieur d'une cellule, on dispose donc d'un certain nombre de canaux (61 pour la bande GSM simple) qu'il faut répartir entre les différents utilisateurs.

Les bandes GSM sont divisées en canaux de largeur 200 kHz. Mais lors d'une conversation courante, à cause des silences intervenant dans le dialogue et surtout grâce aux techniques de compressions de débit, un téléphone mobile n'a pas besoin du canal de transmission en permanence.

C'est pour cette raison que chaque porteuse est divisée en 8 intervalles de temps appelés **time-slots**. La durée d'un slot a été fixée pour le GSM à 7500 périodes du signal de référence fourni par un quartz à 13 MHz qui rythme tous les mobiles GSM :

$$T_{\text{slot}} = 7500/13 \text{ MHz} = 0,5769 \text{ ms} \quad \text{soit environ } 577 \mu\text{s}$$

Les données échangées entre le téléphone mobile et la base (voix ou signaux de contrôle) sont toujours transmises sous une forme précise :

- 57 bits de données (voix ou signaux de contrôle) ;
- 26 bits (toujours les mêmes dans une cellule) d'une séquence de formation (training séquence), qui a pour mission de mesurer les propriétés du canal de transmission ;
- 57 bits de données (voix ou signaux de contrôle) ;
- quelques bits d'encadrement et indicateurs.

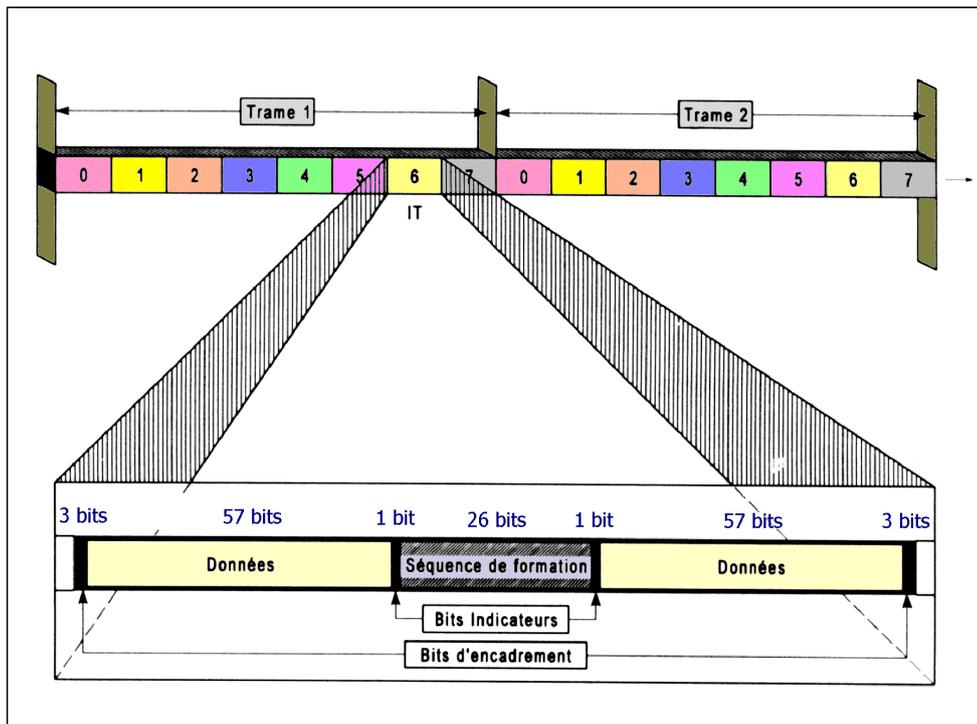


Figure 12 : Structure du signal émis dans un time slot

Dans chaque trame, le téléphone reçoit donc 114 bits d'informations utiles regroupés dans le time-slot affecté à la communication.

Ces 114 bits peuvent correspondre :

- à de la voix uniquement ;
- à de la voix mélangée à des données de contrôle.

## Le multiplexage temporel

Un mobile GSM en communication n'utilisera qu'un time-slot, on pourra ainsi faire travailler jusqu'à 8 mobiles différents sur la même fréquence de porteuse. Un slot accueille un élément de signal radioélectrique appelé **burst**.

L'accès TDMA permet à différents utilisateurs de partager une bande de fréquence donnée. Sur une même porteuse, les slots sont regroupés par paquets de 8.

La durée d'une trame TDMA est donc :  $T_{TDMA} = 8 T_{slot} = 4,6152 \text{ ms}$

Chaque utilisateur utilise un slot par trame TDMA. Les slots sont numérotés par un indice TN qui varie de 0 à 7. Un « canal physique » est donc constitué par la répétition périodique d'un slot dans la trame TDMA sur une fréquence particulière.

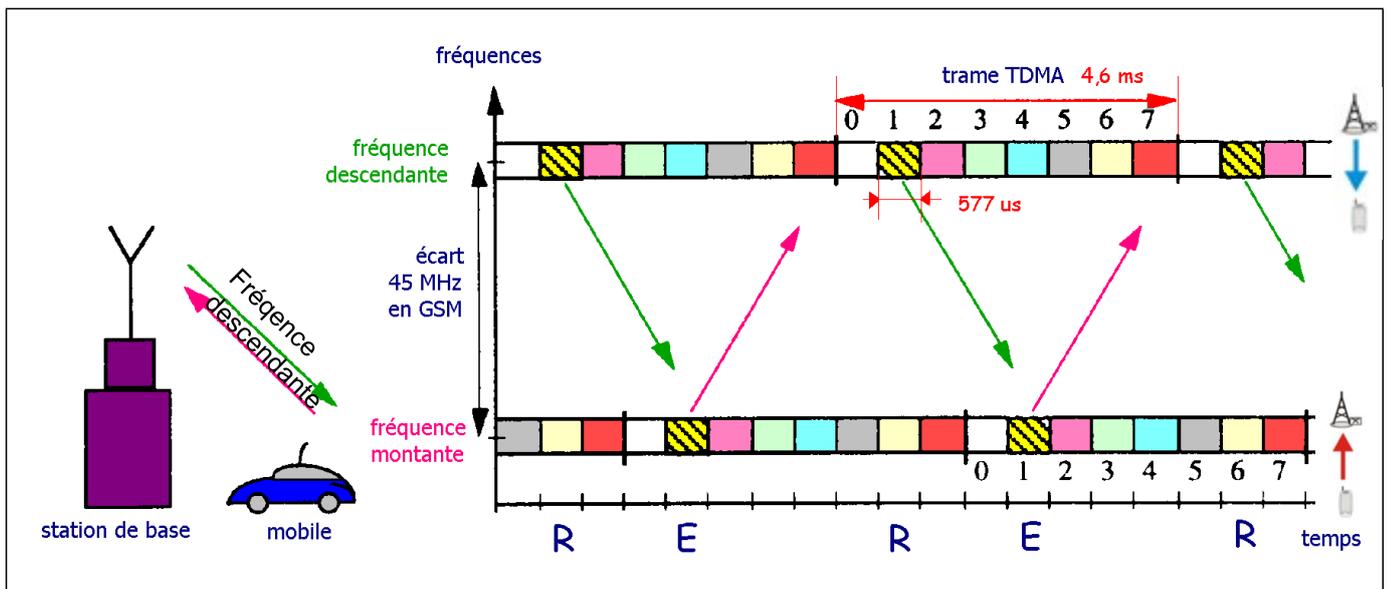


Figure 13 : Mobile en conversation sur le time-slot 1

Durant une communication téléphonique, le mobile GSM reçoit des informations de la station de base et émet des informations vers celle-ci :

- ces échanges se font sur deux fréquences différentes et n'ont pas lieu au même moment ;
- au niveau du mobile, l'émission et la réception sont décalés dans le temps de 3 time-slots ;
- pour conserver la même numérotation des slots, le début de la trame TDMA du mobile est décalée de 3 time-slots / début de la trame de la base.

Le mobile reçoit donc le signal émis par la base sur la fréquence descendante  $f$  durant un time slot soit  $577 \mu\text{s}$ , puis 3 time-slots soit  $1,7 \text{ ms}$  plus tard, émet son signal vers la station de base sur la fréquence montante plus basse ( $f-45 \text{ MHz}$  pour le GSM).

## Le contrôle par la base du début d'émission

Les différents utilisateurs d'un système cellulaire sont à des distances variables de leur station de base et endurent des délais de propagation variables. Or l'onde électromagnétique se propage à la vitesse de la lumière soit  $c = 300\,000\text{ km/s}$ .

Cette vitesse est très élevée, mais pas infinie et les retards engendrés par la distance se font sentir sur le timing puisqu'une distance de **30 km** cause un retard de **100  $\mu\text{s}$** .

Prenons l'exemple de deux mobiles MS1 et MS2 appartenant à la même cellule. Le premier MS1 est en limite de cellule alors que le second, MS2 est situé près de la station de base.

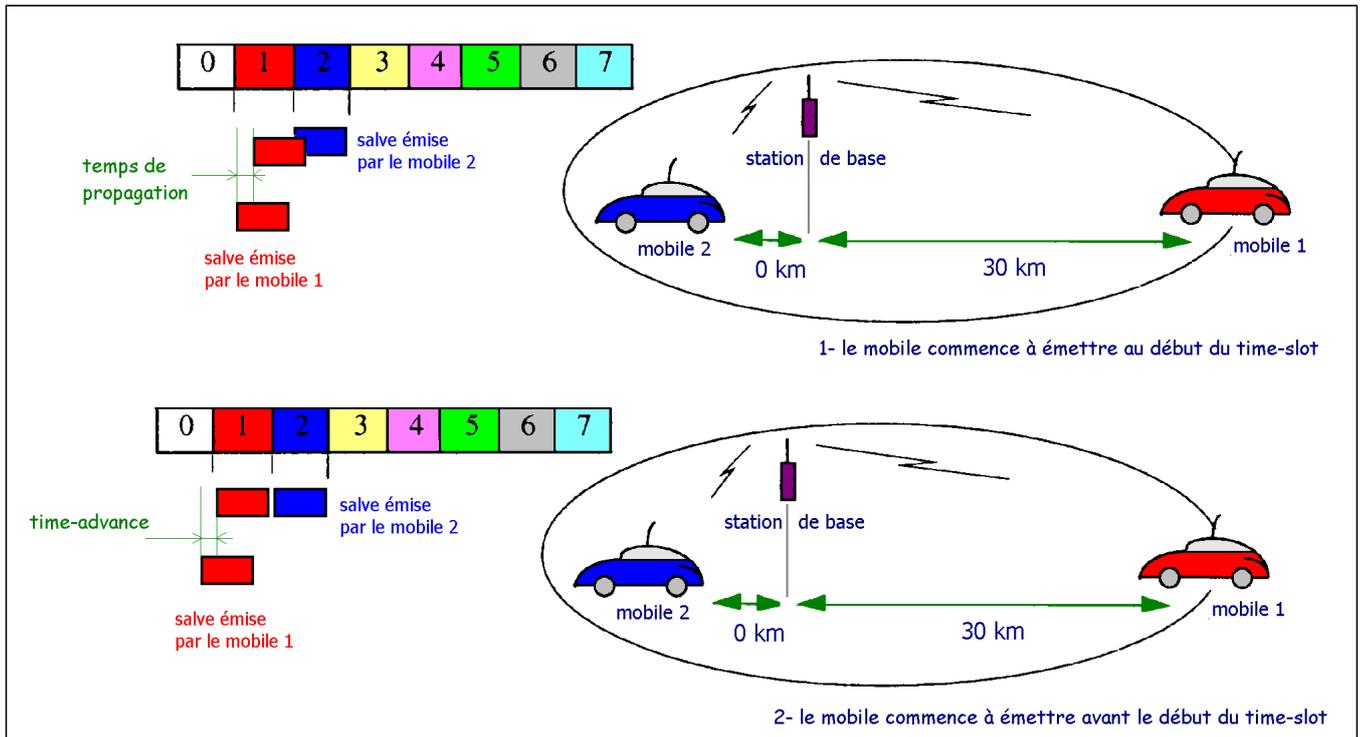


Figure 14 : Importance du paramètre de Time Advance

On suppose que ces deux mobiles utilisent des slots consécutifs sur la même porteuse : MS1 émet dans le slot 1, MS2 dans le slot 2 :

- en l'absence de compensation du temps de propagation, les bursts émis par chacun des mobiles se chevaucheraient au niveau du récepteur de la BS ;
- pour pallier à cette difficulté, la station de base va compenser ce retard en gérant un paramètre TA (Time Advance) correspondant au temps de propagation aller-retour ;
- le mobile éloigné doit avancer l'émission de chacun de ses bursts par rapport à l'instant nominal de début de slot ;
- la distance entre mobile et station de base étant susceptible de varier en permanence, ce paramètre TA est réajusté à chaque trame et pourra prendre une valeur comprise entre 0 et 63.

**Remarque** : la détermination du paramètre TA permet à la base de connaître la distance à laquelle se trouve le mobile. Par triangulation avec une deuxième station de base, on pourra donc déterminer la position exacte d'un mobile.

## La détection du changement de cellule

Pendant un échange de données, le mobile continue l'écoute des balises des cellules voisines pour détecter un éventuel changement de cellule.

Cette écoute se fait entre l'émission et la réception du burst suivant. Vu le faible temps disponible, le mobile ne pourra faire qu'une mesure de niveau.

Pour décoder les informations provenant de la balise d'une cellule voisine, il lui faut davantage de temps, surtout qu'il faut « attraper » le time-slot 0 qui contient les informations recherchées.

C'est la raison pour laquelle le mobile s'arrête d'émettre et de recevoir toutes les 26 trames (slot idle) ce qui lui permet d'écouter et de décoder le canal de contrôle d'une cellule voisine.

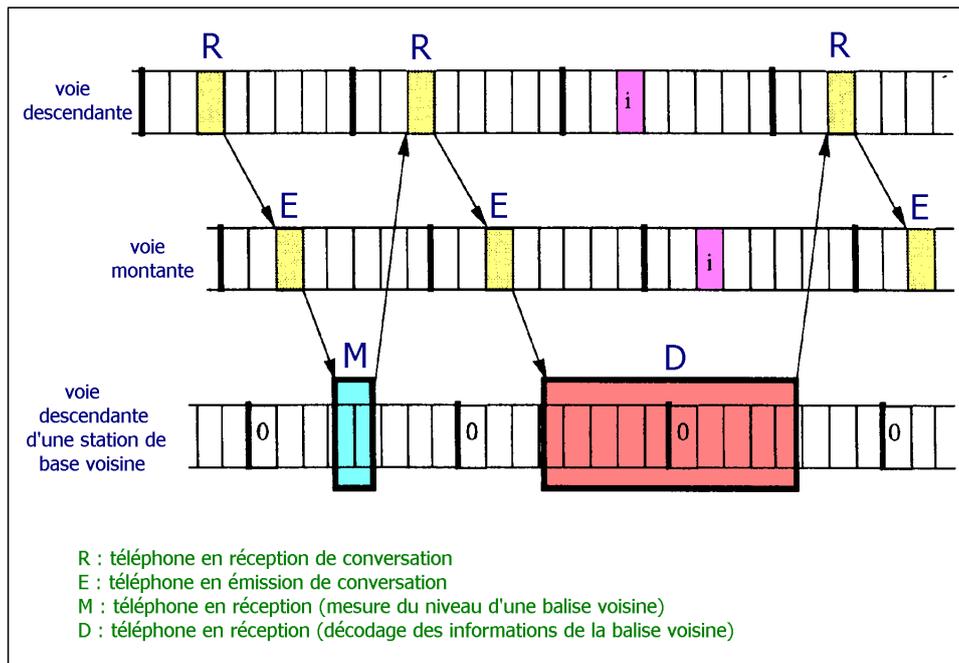


Figure 15 : Mesure de niveau et décodage des BCCH des cellules voisines

L'enregistrement de l'activité en émission d'un mobile GSM montre bien l'arrêt de l'émission toutes les 26 trames, soit toutes les 120 ms.

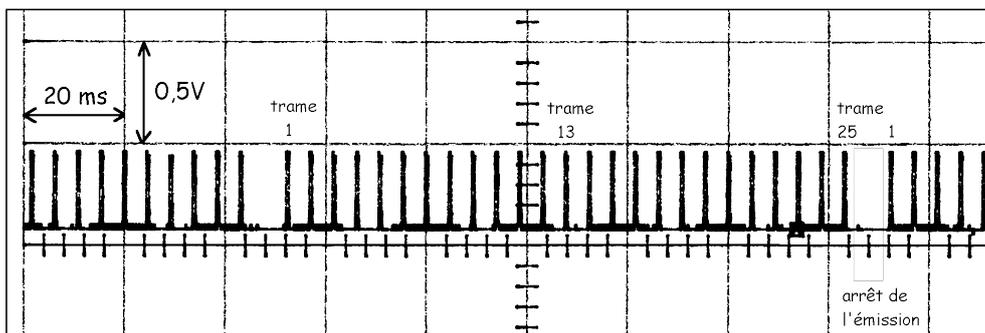


Figure 16 : Mise en évidence de la trame de décodage des voies balise des cellules voisines

Durant cette trame 26, le mobile GSM doit écouter et décoder la voie balise de l'une des cellules voisines.

## La structure temporelle du système GSM ou GSM-R

Chaque porteuse est divisée en intervalle de temps, le plus petit élément de ces structures est le slot, d'une durée de 0,5769 ms il permet de véhiculer avec une périodicité bien définie des éléments d'informations appelés "burst".

Les slots ou "Time slot" sont groupés par huit afin de définir l'élément essentiel du système GSM : la trame TDMA, sa durée est de  $8 \times 0,5769 = 4,6152$  ms. Chaque utilisateur utilise un slot par trame TDMA, ces slots sont numérotés avec un indice TN (Time slot Number) allant de 0 à 7.

Pour simplifier, la Multi-trame est composé de 26 trames TDMA, d'une durée de 120 ms.

La Super-trame n'a pas de fonction essentielle, son seul rôle est de contribuer à la définition de l'Hyper-trame.

Composé de 2048 Super-trames, sa période de l'Hyper-trame est de 3h 28mn 53s 760 ms. Elle va servir de base à la création d'un code de temps : "Time code". Chaque trame TDMA composant l'Hyper-trame se voit attribuer un numéro : "Frame Number". Ce compteur va permettre au mobile de se synchroniser finement avec la cellule en se verrouillant dessus, le "Time code" démarre au même instant pour toutes les fréquences d'une même BTS.

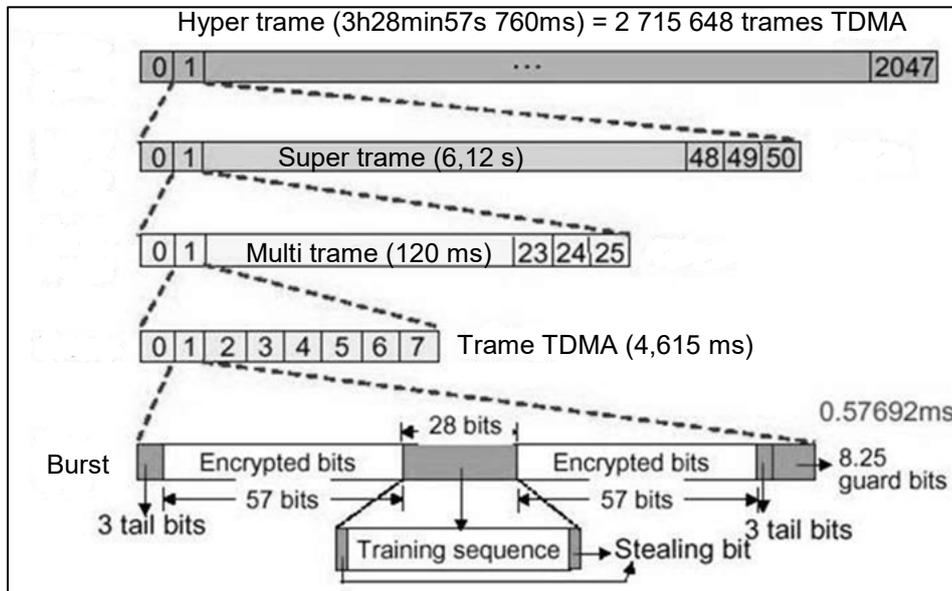


Figure 17 : Structure temporelle du système GSM

Le burst est utilisé GSM-R.

La notion de burst est présente dans les systèmes 2G, 4G et 5G même si c'est un peu plus compliqué en 4G/5G. En 3G, elle est présente mais seulement pour l'accès initial. C'est-à-dire : je n'utilise pas mon portable pendant quelques minutes puis je fais un appel, j'envoie un SMS, je consulte un site : la première transmission par le terminal est un burst. Ensuite c'est plutôt une transmission continue pendant une longue durée.

Enfin le burst est utilisé dans le système Sigfox (opérateur télécom français de l'internet de l'objet). Il fait partie des réseaux dits à longue portée et à faible consommation.

## Le mobile en fonctionnement

A la **mise sous tension** se passent les opérations suivantes :

- l'utilisateur valide sa carte SIM en tapant au clavier son numéro de code PIN ;
- le récepteur du GSM scrute les canaux de la bande GSM et mesure le niveau reçu ;
- le mobile repère la voie balise de niveau le plus élevé correspondant à son opérateur ;
- le mobile récupère les informations de correction de fréquence lui permettant de se caler précisément sur les canaux GSM ;
- le mobile récupère le signal de synchronisation de la trame TDMA diffusé sur le BCCH (broadcast control channel) et synchronise sa trame ;
- le mobile lit sur le BCCH les infos concernant la cellule et le réseau et transmet à la BTS l'identification de l'appelant pour la mise à jour de la localisation.

Le mobile a alors achevé la phase de mise en route et se met en **mode veille**, mode dans lequel il effectue un certain nombre d'opérations de routine :

- lecture du Paging Channel qui indique un appel éventuel ;
- lecture des canaux de signalisation des cellules voisines ;
- mesure du niveau des BCH des cellules voisines pour la mise en route éventuelle d'une procédure de hand-over.

A la **réception d'un appel** :

- l'abonné filaire compose le numéro de l'abonné mobile : 06 XX XX XX XX ;
- l'appel est aiguillé sur le MSC (commutateur de services mobiles) le plus proche qui recherche l'IMSI dans le HLR et la localisation du mobile dans le VLR ;
- le MSC le plus proche du mobile (Visited MSC) fait diffuser dans la zone de localisation, couvrant plusieurs cellules, un message à l'attention du mobile demandé (par le Paging Channel) ;
- le mobile concerné émet des données et un niveau de puissance fixé par le réseau (ces paramètres seront ajustés ultérieurement) ;
- le réseau autorise l'accès et affecte au mobile une fréquence et un time-slot ;
- l'appelé est identifié grâce à la carte SIM ;
- le mobile reçoit la commande de sonnerie ;
- décrochage de l'abonné et établissement de la communication.

Lors de l'**émission d'un appel** :

- l'abonné mobile compose le numéro du correspondant du réseau téléphonique commuté ;
- la demande arrive à la BTS de sa cellule par le Random Access Channel ;
- la demande traverse le BSC pour aboutir dans le commutateur du réseau MSC ;
- l'appelant est identifié et son droit d'usage vérifié ;
- l'appel est transmis vers le réseau public ;
- le BSC demande l'allocation d'un canal pour la future communication ;
- décrochage du correspondant et établissement de la communication.

## Le principe de base de transmission de la voix vocodeur

Le vocodeur du GSM est assez performant puisqu'il permet de conserver une qualité satisfaisante du message vocal en réduisant par un facteur d'environ 8 la quantité de données binaires nécessaires à la transmission de ce message.

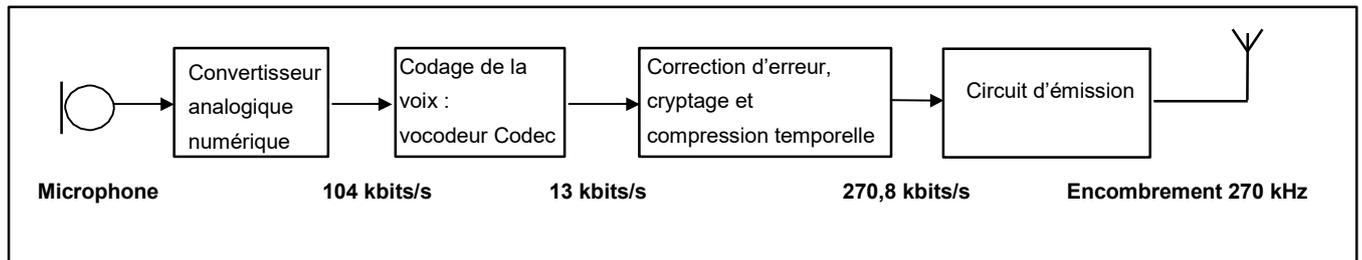


Figure 18 : Réduction de débit apportée par le vocodeur

Le **vocodeur** utilise les propriétés du signal vocal pour réduire le débit numérique. L'appareil phonatoire humain peut être vu comme un filtre acoustique, dont les caractéristiques varient quand on parle, excité par un signal périodique provenant de la vibration des cordes vocales.

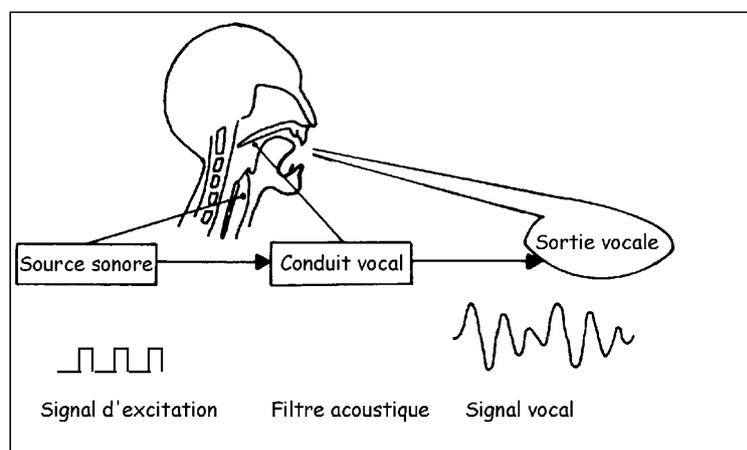


Figure 19 : L'appareil phonatoire humain

Lorsqu'on parle dans le microphone d'un mobile GSM, le vocodeur découpe la voix numérisée en tranches de durée 20 ms, soit 160 échantillons codés sur 13 bits et donc 2280 bits.

Pour chacune de ces tranches de signal, le vocodeur modélise le conduit vocal sous la forme de deux filtres numériques en cascade et détermine le signal d'excitation RPE (regular pulse excitation) défini par son amplitude et sa fréquence qu'il faut mettre à l'entrée des filtres précédents pour reconstituer le signal de parole.

Le vocodeur va donc remplacer les échantillons du signal vocal par les paramètres des deux filtres et du signal d'excitation et ce sont ces paramètres qui seront transmis par radio vers la base.

La station de base mettra en œuvre les deux filtres, les attaquera par le signal d'excitation adéquat et pourra ainsi reconstituer le message vocal.

Ce processus est bien-sûr aussi mis en œuvre dans le mobile GSM lors de la réception d'un message de la station de base

## La protection des données numériques

Une fois le débit vocal compressé par le vocodeur, il faut protéger le signal numérique contre les erreurs de transmission.

Les 260 bits produits par le vocodeur toutes les 20 ms n'ont pas tous la même importance vis-à-vis de la qualité du signal vocal. C'est la raison pour laquelle ils sont groupés en 3 classes :

- 50 bits très importants ;
- 132 bits importants ;
- 78 bits peu importants.

Les bits de la première catégorie sont particulièrement bien protégés contre les erreurs par un codage convolutionnel introduisant une certaine redondance, et des bits de vérification permettant la détection des erreurs et la demande de retransmission du signal erroné.

Les deuxièmes et troisièmes classes sont respectivement moins bien ou pas du tout protégées contre les erreurs de transmission.

A l'issue de cette protection contre les erreurs de transmission, le débit binaire aura augmenté et sera passé de 13 kbits/s à **22,8 kbits/s**.

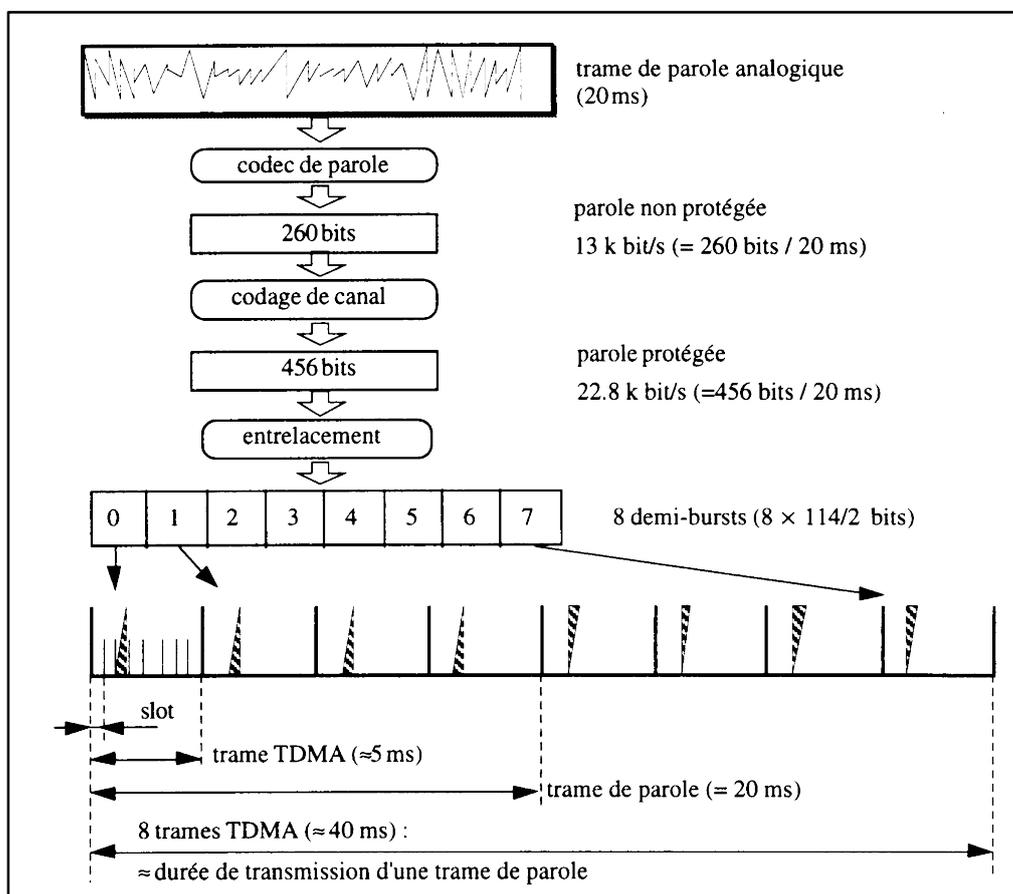


Figure 20 : Répartition d'une trame de parole dans les bursts.

Pour protéger les données durant la transmission, elles sont réparties dans 8 time-slots, mélangées aux données de la trame précédente et de la trame suivante.

Le message vocal a été numérisé, le débit a été compressé par le vocodeur, et les données numériques résultantes ont été protégées contre les erreurs, cryptées et entrelacées.

Elles sont maintenant prêtes à moduler la porteuse.

## Le wifi dans les TGV

Concrètement, la SNCF va utiliser les antennes 3G et 4G déployées par Orange le long des voies pour créer un réseau Wi-Fi à bord de ses TGV. Pour cela, il faudra équiper chaque rame d'un boîtier Wi-Fi et de plusieurs répéteurs par voiture. Chaque rame aura une capacité de 80 Mbit/s au minimum.

Les tunnels sont les sites les plus difficiles à couvrir.

Dernière difficulté enfin : les gares très encaissées et les tunnels. Dans ces cas particuliers, il faut passer par le réseau GSM-R interne de la SNCF qui sert d'ordinaire aux employés ferroviaires. Les installations sont financées ensuite en mutualisation avec le maximum d'opérateurs et la SNCF elle-même. La couverture de ces zones est longue est difficile car il faut intervenir quand le trafic est interrompu. Et ce sont des agents de la SNCF eux-mêmes qui installent les antennes à cause de la dangerosité des sites. Les travaux se négocient donc tunnel par tunnel, gare par gare. D'où une progression lente de la couverture 3G et 4G et, par ricochet, du Wi-Fi.

## Exemple du GSM-R pour le client

Sur l'écran dans les cabines, nous observons la présence d'information instantanée pour le client, heure de départ, heure d'arrivée pour les prochaines gares, la position du train sur une carte, la vitesse du train, les correspondances au prochain arrêt...



Figure 21 : Ecran d'information instantanée dans le train

L'implantation des antennes le long des voies de chemin de fer et des opérateurs téléphoniques sont de 3 antennes à 120° pour les opérateurs grands publics et 2 antennes à 180° pour la SNCF.

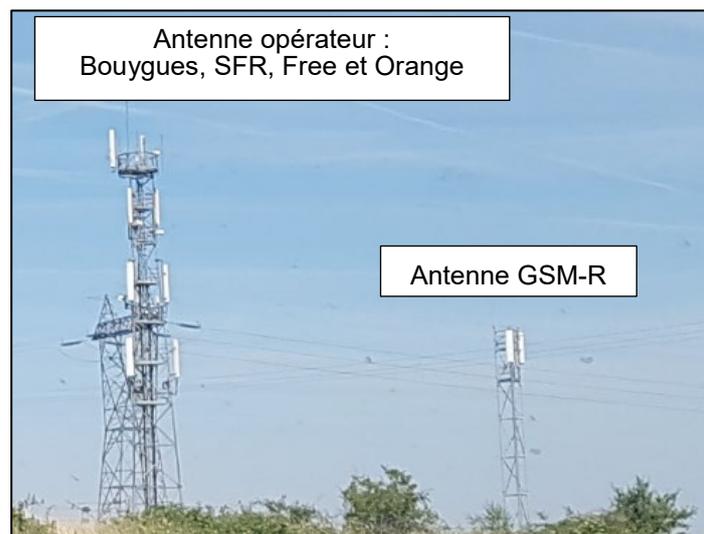


Figure 22 : Implantation des antennes

# Propositions d'activités

## Activité 1 : Analyse de protocoles

Pour différents protocoles de communication, analyser et comparer des vitesses de transmission d'information selon différentes distances entre tours relais.

Déterminer la structure cellulaire la plus appropriée à un usage donné.

## Activité 2 : Caractérisation d'échanges d'informations

Sur la base de la définition de fréquences de travail du système GSM allouées, caractériser les informations transmises en émission-réception.

Proposer des solutions alternatives à la transmission d'information lorsqu'un signal reçu par un mobile est trop faible.

Décrire les risques d'erreurs potentielles quant à la transmission ou à la réception de données dans le cas d'une synchronisation de mauvaise qualité.

## Activité 3 : Test d'un protocole de communication entre deux produits en mouvement

Repérer les bits d'informations utiles regroupés dans le time-slot affecté à une communication.

Distinguer les informations transmises par l'utilisation de plusieurs mobiles sur les slots d'une trame TDMA (time division multiple access).

Simuler l'affichage sur un écran de modifications d'informations à transmettre en temps réel (ex : modifier l'horaire de l'arrivée d'un train suite à une avance ou à un retard d'un train par rapport à son horaire d'arrivée prévisionnel).

Chacune de ces trois activités peut être contextualisée sur de multiples supports matériels, dans différentes situations nécessitant la mise en œuvre de communications homme-machine, machine-machine dans le cadre de thématiques des territoires et des produits intelligents, de la mobilité des personnes et des biens, de réseaux de communication...

## Sitographie

<https://www.techno-science.net/definition/14875.html>

<http://www.ta-formation.com/>

<https://huralu.pagesperso-orange.fr/monitoring/technique.htm>

<https://www.echosdunet.net/dossiers/reseaux-mobiles-differences-entre-2g-3g-et-4g>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/GSM-R>

[https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/loT/SNCF\\_R%C3%A9seaux\\_2016\\_06\\_21\\_R%C3%A9ponses\\_Question\\_Arcep\\_bande\\_%C3%A9tendue\\_Venvoy%C3%A9e.pdf](https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/loT/SNCF_R%C3%A9seaux_2016_06_21_R%C3%A9ponses_Question_Arcep_bande_%C3%A9tendue_Venvoy%C3%A9e.pdf)

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Sigfox>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Internet\\_des\\_objets](https://fr.wikipedia.org/wiki/Internet_des_objets)

<https://www.sncf-reseau.com/fr/entreprise/newsroom/sujet/entreprise-ambition-reseau-futur>

<https://www.cheminots.net/forum/topic/23832-gsm-r/>

<https://www.synerail.com/>

<https://www.01net.com/actualites/la-sncf-choisit-orange-pour-connecter-300-rames-de-tgv-en-wi-fi-d-ici-2017-966312.html>

## Bibliographie

Réseau GSM-DCS de Xavier Lagrange, Philippe Godlewski et Sami Tabbane, Hermes

Fun Mooc de Xavier Lagrange Professeur Dépt. Système Réseaux, Cybersécurité et Droit Numérique à l'IMT Atlantique