

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Saad Dahleb Blida

Faculté de Science

Département d'électronique



Mémoire de fin d'étude proposé pour l'obtention d'un master

En Télécommunication

Option : **Réseau et Télécommunications**

THEME

Analyse et mise en œuvre de la norme GSM-Rail dans L'axe

Boughezoul – Tissemsilt

Sous la direction de :

Dr.DAHMANI Samir

Préparé par :

Mr.BENBOUAICHA Mohamed Oualid

Année universitaire

2022-2023

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier toute personne ou organisme qui m'a aidée à bien mener ce projet et en particulier:

Avant tous Je remercie Monsieur DAHMANI Samir pour son encadrement et je tien à lui exprimer toute ma gratitude.

Mes remerciements aux membres du jury :

Messieurs : BERSALI , et AIT-SAADI Hocine

Mes remerciements à la direction ESTEL

Je remercie aussi : OUTAOUATT Badr Eddine , pour leur soutien.

Je remercie également l'ensemble des enseignants et administrateurs du département d'électronique

Et en fin je remercie tous ceux qui mon aider a élaboré ce travail soit de prés ou de loin.

Mr BENBOUAICHA M.Oualid

Dédicaces

A mes Chers parents (Hadj, Dahmas Mahdjouba)

A mes deux sœurs Abir et Rania

A mon Frère Rafik

A tous mes amis (es) en particulier à toi

Nabil.

Mr BENBOUAICHA M.Oualid

TABLE DE MATIERS

INTRODUCTION GENERALE	2
I. CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES GSM.....	3
I.1 INTRODUCTION.....	4
I.2 Historique	4
I.3 Le concept cellulaire	5
I.4 Concept de mobilité	6
I.5 Synthèse des principales caractéristiques du GSM :.....	6
I.6 Architecture du réseau :.....	7
I.6.1 <i>Le sous-système radio BSS (Base Station Sub-system).....</i>	<i>9</i>
I.6.2 <i>La station de base BTS (Base Transceiver Station).....</i>	<i>9</i>
I.6.3 <i>Le contrôleur de station de base (BSC).....</i>	<i>9</i>
I.7 Le sous-système réseau NSS (Network Station Sub-system) :.....	10
I.7.1 <i>Le MSC (Mobile Services Switching Center).....</i>	<i>10</i>
I.7.2 <i>Le HLR (Home Location Register)</i>	<i>11</i>
I.7.2.1 Les informations de type permanent	11
I.7.2.2 Les informations de type dynamique.....	11
I.7.3 <i>L'AuC (Authentication Center)</i>	<i>12</i>
I.7.4 <i>Le VLR (Visitor Location Register)</i>	<i>12</i>
I.7.5 <i>L'enregistreur des identités des équipements (EIR)</i>	<i>12</i>
I.8 Le sous-système opérationnel OSS (Operating Sub-System) :.....	13
I.9 Les interfaces.....	13
I.9.1 <i>L'interface Um.....</i>	<i>13</i>
I.9.2 <i>L'interface Abis.....</i>	<i>13</i>
I.9.3 <i>L'interface A</i>	<i>13</i>
I.10 La modulation utilisée dans le GSM.....	14
I.11 Classification des canaux radio	14
I.11.1 <i>Les canaux physiques.....</i>	<i>15</i>
I.11.2 <i>Les canaux logiques :.....</i>	<i>16</i>
I.11.3 <i>Les canaux de contrôle (signalisation).....</i>	<i>16</i>
I.11.4 <i>Les canaux de trafic:.....</i>	<i>16</i>
I.11.4.1 Broadcast Channel BCH.....	16
I.11.4.2 Frequency Correction Channel FCCH.....	17
I.11.4.3 Synchronisation Channel SCH	17

I.11.4.4	Broadcast Control.....	17
<i>I.11.5</i>	<i>Common Control Channel CCCH.....</i>	<i>18</i>
I.11.5.1	Random Access Channel RACH.....	18
I.11.5.2	Access Grant Channel AGCH.....	18
I.11.5.3	Paging Channel PCH.....	18
I.11.5.4	Cell Broadcast Channel CBCH.....	19
<i>I.11.6</i>	<i>Dedicated Control Channel DCCH.....</i>	<i>19</i>
I.11.6.1	Standalone Dedicated Control Channel SDCCCH.....	19
I.11.6.2	Slow Associated Control Channel SACCH.....	19
I.12	Déroulement des communications.....	20
<i>I.12.1</i>	<i>Les définitions élémentaires.....</i>	<i>20</i>
I.12.1.1	Handover.....	20
<i>I.12.1.1.1</i>	<i>Le Handover intracellulaire.....</i>	<i>20</i>
<i>I.12.1.1.2</i>	<i>Le Handover intercellulaire.....</i>	<i>21</i>
I.12.1.2	Le paging.....	21
I.12.1.3	La Localisation.....	21
I.12.1.4	Le Roaming « l'itinérance ».....	21
I.13	Conclusion.....	21
II. CHAPITRE II : AVANTAGES ET DEFIS DE LA MISE EN ŒUVRE DE LA NORME GSM-Rail SUR LES COMMUNICATIO FERROVIAIRES.....22		
II.1	INTRODUCTION.....	23
II.2	La technologie GSM-Rail :.....	23
II.3	Histoire.....	24
II.4	Origines du GSM-R.....	24
II.5	Répartition des fréquences GSM.....	25
II.6	Système supérieur.....	25
II.7	Bande de fréquence.....	25
II.8	Application.....	26
<i>II.8.1</i>	<i>Première application.....</i>	<i>26</i>
<i>II.8.2</i>	<i>Autres applications.....</i>	<i>26</i>
II.9	Fonctionnalités GSM-R.....	27
<i>II.9.1</i>	<i>Dispositifs ASCI (Advanced Speech Call Items).....</i>	<i>27</i>
<i>II.9.2</i>	<i>VGCS (Voice Group Call Service).....</i>	<i>27</i>
<i>II.9.3</i>	<i>VBS (Voice Broadcast Service).....</i>	<i>27</i>
<i>II.9.4</i>	<i>REC (Railway Emergency Call : Appel d'urgence train).....</i>	<i>27</i>
<i>II.9.5</i>	<i>Service eMLPP (Multi-Level Precedence and Pre-emption Service)....</i>	<i>27</i>
II.10	Dispositifs EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network).....	28

II.10.1	<i>Gestion de numéro fonctionnel (Functional Number)</i>	28
II.10.2	<i>Confirmation d'appel</i>	28
II.10.3	<i>Mode manœuvre (Shunting mode)</i>	29
II.10.4	<i>Mode direct (Direct mode)</i>	29
II.11	Standard ERTMS	29
II.12	ARCHITECTURES D'INFRASTRUCTURE ET DU SYSTEME DE SIGNALISATION	29
II.12.1	<i>Principe</i>	30
II.12.2	<i>Sous-system bord</i>	30
II.12.3	<i>Sous-système sol</i>	31
II.12.4	<i>La localisation sur le plan de voie</i>	32
II.13	Niveaux d'application.....	33
II.13.1	<i>Niveau 0 : le train est équipé d'ERTMS/ETCS Bord, et la voie circulée est soit :</i> 33	
II.13.2	<i>Le niveau NTC : la rétrocompatibilité avec les systèmes de classe B...</i>	34
II.13.3	<i>Le niveau 1 : la modernisation basée sur l'existant</i>	34
II.13.4	<i>Le niveau 2 : la signalisation par radio</i>	35
II.13.5	<i>Le niveau 3: infrastructure légère</i>	36
II.13.6	<i>Le niveau 3 hybride</i>	37
II.14	Architecture de l'ERTMS/ETCS ERTMS	38
II.14.1	<i>La partie bord de l'ETCS comprend :</i>	38
II.15	ERTMS/ATO : le futur train autonome.....	39
II.16	ATO over ETCS	39
II.17	Les avantages du GSM-R sur les balises.....	39
II.18	Conclusion.....	40
III. CHAPITRE III : ANALYSE DES AVANTAGES ET DEFIS DE LA MISE EN OEUVRE DE LA NORME GSM-Rail SUR LES COMMUNICATIONS		41
III.1	INTRODUCTION.....	42
III.2	Groupes constituant le marché GSM-R.....	42
III.2.1	<i>Le gestionnaire de l'infrastructure et les opérateurs ferroviaires</i>	42
III.3	Réseau et services.....	42
III.4	DESCRIPTION DU RESEAU DE SIGNALISATION.....	43
III.4.1	<i>SIGNALISATION BSS</i>	43
III.4.2	<i>Signalisation Abis</i>	43
III.4.3	<i>Signalisation interface A</i>	43
III.5	PRESENTATION GENERALE	44
III.6	SERVICES ET EQUIPEMENTS	45

III.7	SERVICES ASSURES	45
III.8	EQUIPEMENTS	45
III.8.1	CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS MOBILES.....	45
III.8.2	CARACTERISTIQUES DES BTS.....	46
III.9	SYSTÈME DE COUPLAGE POUR LES BTS.....	46
III.10	MODELES DE PROPAGATION RADIO	47
III.11	ANALYSE SPECTRALE DE LA BANDE GSM-R DE LA LIGNE	47
III.11.1	GÉNÉRALITÉS	47
III.12	OUTILS DE MESURES	48
III.12.1	RÉSULTATS DES MESURES.....	48
III.13	INGENIERIE RADIO	49
III.13.1	OUTIL DE PLANIFICATION RADIO.....	49
III.14	BILANS DE LIAISON	49
III.14.1	Overlapping Margin (Marge de recouvrement de cellule).....	50
III.14.2	Quality Margin (Marge de Qualité).....	50
III.14.3	Train Rooftop Margin (Marge d'écran causé par le train)	50
III.14.4	Shadow Margin (Marge d'effet de masques).....	51
III.15	COUVERTURE RADIO.....	51
III.15.1	STRATEGIE DE COUVERTURE RADIO	51
III.16	STRATEGIE DU PLAN DE FREQUENCE	52
III.17	RESULTATS DE LA PLANIFICATION RADIO.....	52
III.17.1	POSITIONS ET CARACTERISTIQUES DES SITES	52
III.17.2	CARTES DE COUVERTURE PAR SITE	53
III.17.3	CARTES D'INTERFERENCES.....	55
III.18	Conclusion.....	56
IV.	Conclusion générale.....	57
V.	Références.....	58

Liste Des Figures

Figure 1 : Structure cellulaire du réseau GSM.....	5
Figure 2 : Liaison entre mobile et station de base pour GSM900.....	7
Figure 3 : ARCHITECTURE DU RESEAU GSM [2]	8
Figure 4 : Tableau récapitulatif des interfaces du réseau GSM	14
Figure 5 : Bande Fréquentiel du GSM900	15
Figure 6 : STRUCTURE D'UN BURST	16
Figure 7 : Frequency Correction Burst (FCB)	17
Figure 8 : Synchronisation Burst (SB).....	17
Figure 9 : Access Burst (AB).....	18
Figure 10 : Canaux logiques du GSM [4]	20
Figure 11 : Structure du GSM-R.....	23
Figure 12 : Fréquence réservé par les transports ferrés européens	25
Figure 13 : DMI ETCS	31
Figure 14 : EVC-CAF	31
Figure 15 : Eurobalise	32
Figure 16 : Principaux éléments de l'ERTMS/ETCS.	33
Figure 17 : <i>ETCS est installé au sol et embarqué à bord du train. Les données sont échangées par transmission ponctuelle du sol (voie) au train par le biais de balises ETCS.</i>	35
Figure 18 : Niveau 1 étendu, avec transmission de données ETCS en continu par GSM-R. Au sol, un RBC contrôle tous les mouvements de trains dans la zone couverte.	36
Figure 19 : L'équipement de voie a disparu. Le positionnement du train et son intégrité ne reposent pas sur des équipements au sol (signaux, des circuits de voie ou des compteurs d'essieux), mais sont gérés par le train et le RBC.....	36
Figure 20 : Les différents groupes qui constituent le marché du GSM-R [10]	42
Figure 21 : Trafic de signalisation BSS	43
Figure 22 : Description de la ligne Tissemsilt - Boughezoul en PK.....	44
Figure 23 : Caractéristiques des mobiles	45
Figure 24 : CARACTERISTIQUES des BTS	46
Figure 25 : Synoptique des aériens O1+1 (TDMA simple).	46
Figure 26 : Mesure Scan de la ligne en Uplink	48
Figure 27 : Mesure Scan de la ligne en Downlink	49
Figure 28 : Positionnement géographique des sites candidats [11]	53
Figure 29 : Carte de de couverture par Site de la gare de Tissemsilt à la gare de Boughezoul	54
Figure 30 : Carte d'interférence C/I de la gare de Tissemsilt à la gare de Boughezoul	55
Figure 31 : Carte de couverture par site entre la gare de Tissemsilt au PK10 en désactivant TB02.....	55
Figure 32 : Carte de couverture par site entre la gare de Tissemsilt au PK10 avec déplacement du site TB03 [11].....	56

ملخص

قمنا في هذا العمل بدراسة ميدانية حول مشروع نظام التواصل السككي المتنقل العالمي (ج س م) المعتمد من طرف الدولة على طول خط السكة الحديدية (خط الهضاب العليا) من بوغزول الى تيسمسيلت والذي يسمح بالتقليل من الحوادث وزيادة الحماية والتحكم في سرعة القطارات خلال التنقل، وهذا عبر تثبيت نظام التشابك لتحديد المسارات ونقل المعلومات المتعلقة بالمسار الى السائق.

الكلمات المفتاحية نظام التحكم (ج س م)

RESUME

Le système GSM-Rail (Global Système for Mobil Communication – Railway) est un système de communications sans fil basse sur le système GSM, Dans ce travail, nous avons mené une étude de terrain sur le projet du système mondial de communication ferroviaire mobile approuvé par l'État le long de la ligne de chemin de fer (Ligne du Haut Plateau) de Boughzoul à Tissemsilt, qui permet de réduire les accidents, d'augmenter la protection et de contrôler la vitesse des trains pendant les trajets, en installant un système d'enchevêtrement pour déterminer les itinéraires et transmettre les informations relatives à la voie au conducteur..

ABSTRACT

The GSM-Rail system is a digital radio communication system designed for railway-specific communication needs. In this work, we conducted a field study on the project of the global mobile rail communication system approved by the state along the railway line (High Plateau Line) from Boughzoul to Tissemsilt, which allows reducing accidents, increasing protection and controlling the speed of trains during commuting, by installing a system of entanglement to determine the routes and transmit the information related to the track to the driver.

INRODUCTION GENRALE

Le secteur ferroviaire est confronté à de nombreux défis en matière de communication et de signalisation pour assurer la sécurité, l'efficacité et la fiabilité des opérations ferroviaires. Dans ce contexte, la norme GSM-Rail a émergé comme une solution de communication sans fil spécifiquement conçue pour répondre aux besoins du secteur ferroviaire.

Cependant, l'adoption de la norme GSM-Rail dans les systèmes de communication ferroviaire ne se fait pas sans défis. Il est essentiel de comprendre les avantages potentiels qu'elle peut offrir ainsi que les obstacles qui pourraient entraver sa mise en œuvre efficace. Cela nécessite une analyse approfondie des aspects techniques, opérationnels, financiers et de sécurité associés à la mise en place de la GSM-Rail dans les systèmes de communication ferroviaire existants.

Notre projet vise donc à étudier et analyser de manière approfondie les avantages et les défis de la mise en œuvre de la norme GSM-Rail dans les systèmes de communication ferroviaire.

Nous examinerons les bénéfices potentiels en termes de fiabilité, de couverture et de priorité des appels d'urgence, ainsi que les défis tels que les coûts, l'interopérabilité et la sécurité.

I. CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES GSM

I.1 INTRODUCTION

Le GSM (Global Système For Mobile Communication) est une norme de communication sans fil utilisée dans les réseaux de téléphone mobile à travers le monde. Il s'agit d'une technologie de deuxième génération (2G) qui a été introduite pour la première fois dans les années 1990.

Le GSM a révolutionné les communications mobiles en permettant des appels vocaux de haute qualité, des messages texte (SMS) et des services de données à faible débit. Il a établi les bases des réseaux de téléphonie mobile modernes et a ouvert la voie à l'essor des technologies de communication mobile ultérieure, telles que la 3G, la 4G et la 5G.

Le GSM fonctionne en utilisant des fréquences radio spécifiques pour la transmission des signaux. Il utilise une technique de modulation numérique pour convertir les signaux vocaux ou les données en signaux numériques, qui sont ensuite transmis par voie radio entre le téléphone mobile et les stations de base du réseau. Les stations de base, également appelées tours cellulaires, sont réparties géographiquement pour assurer une couverture étendue du réseau.

La GSM a apporté plusieurs avantages aux utilisateurs de téléphone mobiles, notamment une plus grande portée géographique, une meilleure qualité audio et une meilleure sécurité des communications. Il a également permis l'interopérabilité entre les différents opérateurs de téléphonie mobile, ce qui signifie que les utilisateurs peuvent se déplacer entre différents réseaux et pays tout en conservant leur connectivité.

Au fil du temps, le GSM a été progressivement remplacé par des technologies plus avancées, offrant des vitesses de transmission de données plus élevées et des fonctionnalités plus avancées. Cependant le GSM reste encore utilisé dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les zones rurales ou les réseaux plus récents ne sont pas encore déployés de manière extensive.

La norme GSM a ouvert la voie à l'ère de la communication mobile et a eu un impact significatif sur la société en permettant des communications sans fil accessibles à un large public. Son héritage se perpétue dans les générations de technologies de communication mobile qui ont suivi, et il reste un jalon important dans l'histoire des télécommunications.

I.2 Historique

L'histoire de la téléphonie mobile (numérique) débute réellement en 1982. En effet, à cette date, le Groupe Spécial Mobile, appelé GSM2, est créé par la Conférence Européenne des administrations des Postes et Télécommunications (CEPT) afin d'élaborer les normes de communications mobiles pour l'Europe dans la bande de fréquences de 890 à 915 [MHz] pour l'émission à partir des stations mobiles³ et 935 à 960 [MHz] pour l'émission à partir de stations fixes. Il y eut bien des systèmes de mobilophonie analogique (MOB1 et MOB2, arrêté en 1999), mais le succès de ce réseau ne fut pas au rendez-vous. Les années 80 voient le développement du numérique tant au niveau de la transmission qu'au niveau du traitement des signaux, avec pour dérivés des techniques de transmission fiables, grâce à un encodage particulier des signaux préalablement à l'envoi dans un canal, et l'obtention de débits de transmission raisonnables pour les signaux (par exemple 9,6 kilobits par seconde, noté [kb/s], pour

un signal de parole). Ainsi, en 1987, le groupe GSM fixe les choix technologiques relatifs à l'usage des télécommunications mobiles : transmission numérique, multiplexage temporel des canaux radio, chiffrement des informations ainsi qu'un nouveau codage de la parole. Il faut attendre 1991 pour que la première communication expérimentale par GSM ait lieu. Au passage, le sigle GSM change de signification et devient Global System for Mobile communications et les spécifications sont adaptées pour des systèmes fonctionnant dans la bande des 1800 [MHz]. En Belgique, c'est en 1994 que le premier réseau GSM (proximus) est déployé ; Mobistar et Orange (rebaptisé Base) viendront plus tard. Aujourd'hui, le nombre de numéros attribués pour des communications GSM dépasse largement le nombre de numéros dédiés à des lignes fixes et cette tendance se poursuit.

I.3 Le concept cellulaire

Le concept de réseau cellulaire tient son origine des réseaux de première génération mis en service au début des années 1980. Plusieurs pays développent à leur tour des réseaux exploitant leurs propres systèmes dits analogiques (les conversations sont transmises en clair), fonctionnant sur des bandes de fréquences souvent différentes d'un État à un autre. Les réseaux sont organisés au mieux, selon des zones (des cellules) de tailles variables correspondant grosso modo à des cercles de 30 à 50 kilomètres de rayon, jointifs ou pas, au centre de chacun desquels est installée une antenne-relais. Selon la topographie, il est possible que certaines cellules couvrent une même portion de territoire. Quand un abonné au service met en marche son terminal (téléphone mobile le plus souvent embarqué), celui-ci effectue automatiquement par balayage radio, la recherche d'une station de base (BTS). Si plusieurs stations de base sont trouvées, la connexion au réseau du terminal embarqué se fait avec la station proposant la meilleure qualité de signaux nécessaires à la communication.

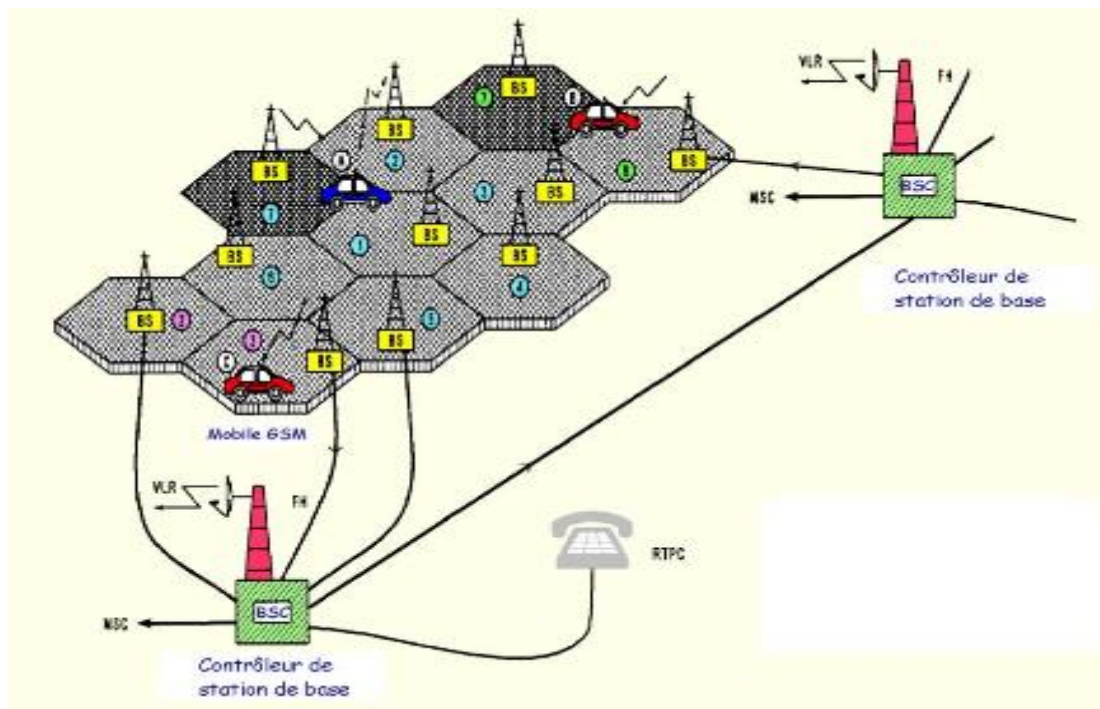


FIGURE 1 : STRUCTURE CELLULAIRE DU RESEAU GSM

Graphiquement, on représente une cellule par un hexagone car cette forme approche celle d'un cercle. Cependant, en fonction de la nature du terrain et des constructions, les cellules n'ont pas une forme circulaire. De plus, afin de permettre à un utilisateur passant d'une cellule à une autre de garder sa communication, il est nécessaire que les zones de couverture se recouvrent de 10 à 15%, ce qui renforce la contrainte de ne pas avoir une même bande de fréquences dans deux cellules voisines.

Pour éviter les interférences à plus grande distance entre cellules utilisant les mêmes fréquences, il est également possible d'asservir la puissance d'émission de la station de base en fonction de la distance qui la sépare de l'utilisateur. Le même processus du contrôle de la puissance d'émission est également appliqué en sens inverse. En effet, pour diminuer la consommation d'énergie des mobiles et ainsi augmenter leur autonomie, leur puissance d'émission est calculée en fonction de leur distance à la station de base. Grâce à des mesures permanentes entre un téléphone mobile et une station de base, les puissances d'émission sont régulées en permanence pour garantir une qualité adéquate pour une puissance minimale.

En résumé, une cellule se caractérise :

par sa puissance d'émission nominales ce qui se traduit par une zone de couverture à l'intérieur de laquelle le niveau du champ électrique est supérieur à un seuil déterminé par la fréquence de porteuse utilisée pour l'émission radioélectrique et par le réseau auquel elle est interconnectée.

I.4 Concept de mobilité

La mobilité des abonnés dans un réseau cellulaire a deux conséquences :

Pour établir une communication, il faut savoir dans quelle cellule l'abonné se trouve.

C'est la fonction de gestion de localisation.

Il doit y avoir continuité de la communication lorsque l'abonné passe d'une cellule à

Une autre (transfert intercellulaire, communément appelé handover).

Si la mobilité d'un abonné s'étend à plusieurs pays, des accords de roaming doivent

Alors être passés entre les différents opérateurs pour que les communications d'un abonné étranger soient traitées et aboutissent.

I.5 Synthèse des principales caractéristiques du GSM :

La norme GSM prévoit que la téléphonie mobile par GSM occupe deux bandes de fréquences aux alentours des 900 [MHz] :

1. la bande de fréquence 890 – 915 [MHz] pour les communications montantes (du mobile vers la station de base)

2. la bande de fréquence 935 – 960 [MHz] pour les communications descendantes (de la station de base vers le mobile).

Comme chaque canal fréquentiel utilisé pour une communication a une largeur de bande de 200 [kHz], cela laisse la place pour 124 canaux fréquentiels à répartir entre

les différents opérateurs. Mais, le nombre d'utilisateurs augmentant, il s'est avéré nécessaire d'attribuer une bande supplémentaire aux alentours des 1800 [MHz]. On a donc porté la technologie GSM 900 [MHz] vers une bande ouverte à plus haute fréquence. C'est le système DCS-1800 (Digital Communication System) dont les caractéristiques sont quasi identiques au GSM en termes de protocoles et de service. Les communications montantes se faisant alors entre 1710 et 1785 [MHz] et les communications descendantes entre 1805 et 1880 [MHz]. [1]

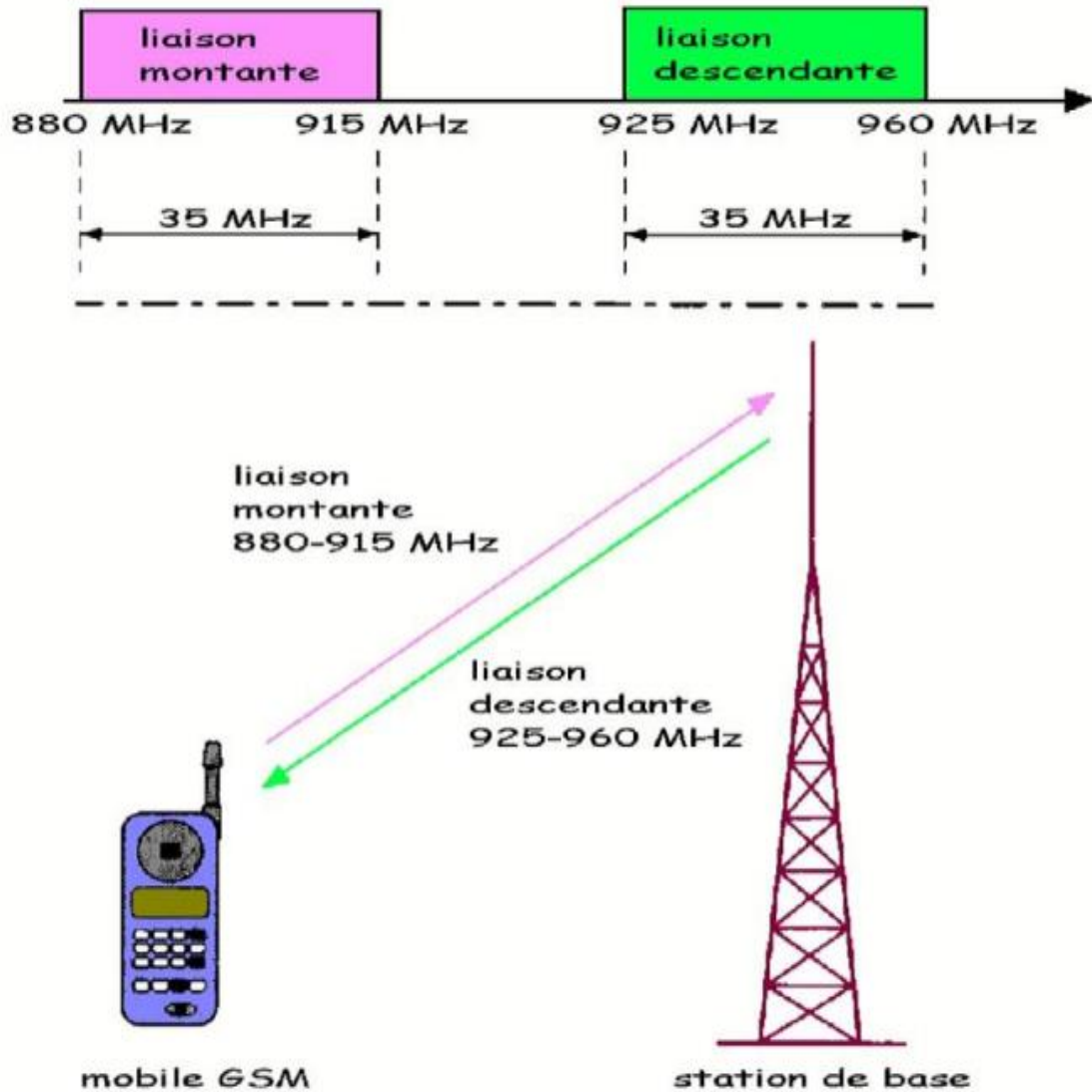


FIGURE 2 : LIAISON ENTRE MOBILE ET STATION DE BASE POUR GSM900

I.6 Architecture du réseau :

L'architecture d'un réseau GSM peut être divisée en trois sous-systèmes :

1. Le sous-système radio contenant la station mobile, la station de base et son contrôleur (**BSS**).
2. Le sous-système réseau ou d'acheminement (**NSS**).

3. Le sous-système opérationnel ou d'exploitation et de maintenance (OSS).

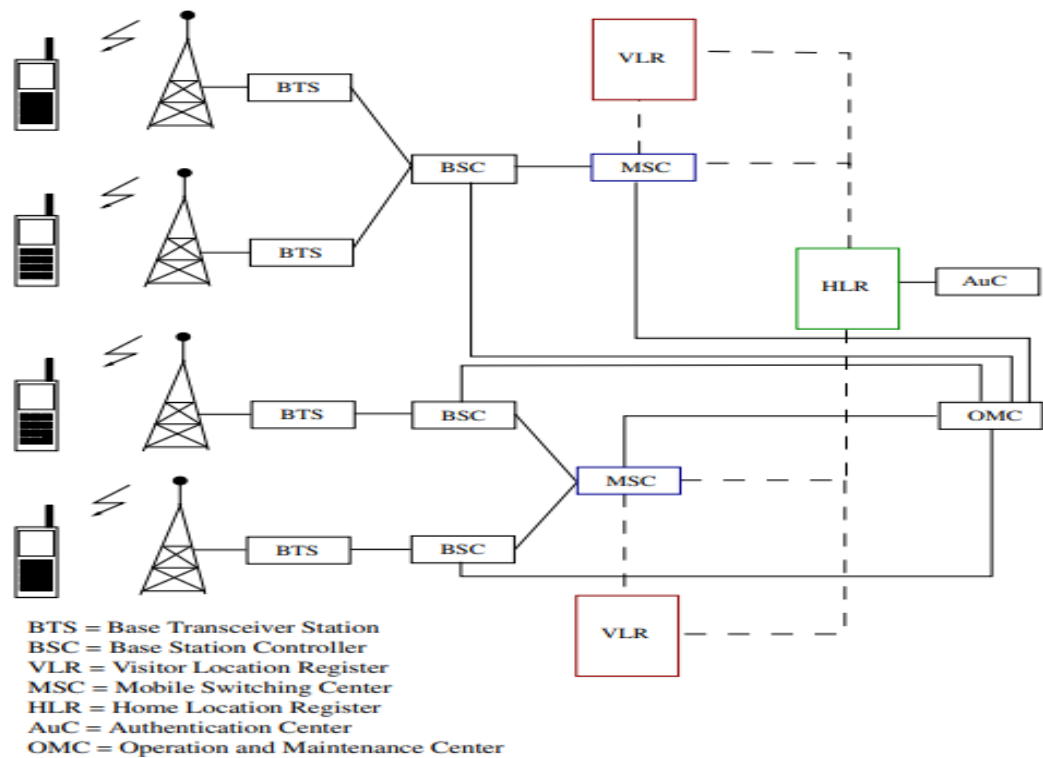


FIGURE 3 : ARCHITECTURE DU RESEAU GSM [2]

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 radios
- **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.

I.6.1 Le sous-système radio BSS (Base Station Sub-system)

Sa fonction principale est la gestion de l'attribution des ressources radio, indépendamment des abonnés, de leur identité ou de leur communication. On distingue dans le BSS :

I.6.2 La station de base BTS (Base Transceiver Station)

La station de base est l'élément central, que l'on pourrait définir comme un ensemble émetteur/récepteur pilotant une ou plusieurs cellules. Dans le réseau GSM, chaque cellule principale au centre de laquelle se situe une station base peut-être divisée, grâce à des antennes directionnelles, en plus petites cellules qui sont des portions de celle de départ et qui utilisent des fréquences porteuses différentes. En Belgique, il est fréquent d'avoir des antennes tri-sectorielles, qui couvrent un peu plus de 120 degrés. Ces antennes ont l'allure de paires de segments verticaux, disposées en triangle (cf. figure 3). C'est la station de base qui fait le relais entre le mobile et le sous-système réseau. Comme le multiplexage temporel est limité à 8 intervalles de temps, une station de base peut gérer tout au plus huit connections simultanées par cellule. Elle réalise les fonctions de la couche physique et de la couche liaison de données. En cas de besoin, on peut exploiter une station de base localement ou par télécommande à travers son contrôleur de station de base.

I.6.3 Le contrôleur de station de base (BSC)

Le contrôleur de station de base gère une ou plusieurs stations de base et communique avec elles par le biais de l'interface A-bis. Ce contrôleur remplit différentes fonctions tant au niveau de la communication qu'au niveau de l'exploitation.

Pour les fonctions des communications des signaux en provenance des stations de base, le BSC agit comme un concentrateur puisqu'il transfère les communications provenant des différentes stations de base vers une sortie unique. Dans l'autre sens, le contrôleur commute les données en le dirigeant vers la bonne station de base.

Dans le même temps, le BSC remplit le rôle de relais pour les différents signaux d'alarme destinés au centre d'exploitation et de maintenance. Il alimente aussi la base de données des stations de base.

Enfin, une dernière fonctionnalité importante est la gestion des ressources radio pour la zone couverte par les différentes stations de base qui y sont connectées. En effet, le contrôleur gère les transferts intercellulaires des utilisateurs dans sa zone de couverture, c'est-à-dire quand une station mobile passe d'une cellule dans une autre. Il doit alors communiquer avec la station de base qui va prendre en charge l'abonné et lui

communiquer les informations nécessaires tout en avertissant la base de données locale VLR (Visitor Location Register) de la nouvelle localisation de l'abonné.

C'est donc un maillon très important de la chaîne de communication et il est, de plus, le seul équipement de ce sous système à être directement gérable (via l'interface X25 qui le relie au sous-système d'exploitation et de maintenance).

I.7 Le sous-système réseau NSS (Network Station Sub-system) :

Il assure principalement les fonctions de commutation et de routage. C'est donc lui qui permet l'accès au réseau public RTCP ou RNIS. En plus des fonctions indispensables de commutation, on y retrouve les fonctions de gestion de la mobilité, de la sécurité et de la confidentialité qui sont implantées dans la norme GSM. Le NSS est constitué de :

- Mobile Switching Center (MSC)
- Home Location Register (HLR) / Authentication Center (AuC)
- Visitor Location Register (VLR)
- Equipment Identity Register (EIR)

I.7.1 Le MSC (Mobile Services Switching Center)

Le Mobile Switching Centre (MSC) est l'élément central du NSS. Il gère grâce aux informations reçues par le HLR et le VLR, la mise en route et la gestion du codage de tous les appels directs et en provenance de différents types de réseau tels que PSTN, ISDN, PLMN et PDN. Il développe aussi la fonctionnalité du gateway face aux autres composants du système et de la gestion des processus de handover, et il assure la commutation des appels en cours entre des BSC différents ou vers un autre MSC.

A l'intérieur de la surface de service on peut retrouver plusieurs MSC et chacun d'entre eux est responsable de la gestion du trafic d'un ou de plusieurs BSS et à partir du moment où les usagers se déplacent sur toute la surface de couverture, les MSC doivent être capables de gérer un nombre d'utilisateurs variables quant à la typologie et à la quantité et être capables d'assurer à chacun un niveau de service constant.

D'autres fonctions fondamentales du MSC sont décrites ci-après :

L'authentification de l'auteur de l'appel : l'identification de la MS à l'origine de l'appel est nécessaire pour déterminer si l'utilisateur est en droit de bénéficier du service. La discrétion quant à l'identité de l'utilisateur, pour pouvoir garantir la réserve sur son identité sur le canal radio, même si toutes les informations sont cryptographiées, le système se garde toujours de transmettre l'IMSI attribué lors de la signature du contrat par l'utilisateur. Par contre l'on attribue le Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI), au moment de l'appel car il ne présente qu'une utilité temporaire :

Le MSC a aussi pour mission de mettre en relation le TMSI et l'IMSI et lorsque le mobile se déplace sur l'aire de location contrôlée par un autre MSC, il doit lui attribuer un nouveau TMSI.

Le processus de handover: Un utilisateur peut, sur le réseau GSM, continuer d'utiliser le service même quand, pendant une conversation, il franchit les limites de la cellule dans laquelle il se trouve. Il peut se présenter deux cas :

1. La MS se déplace dans une cellule contrôlée toujours par le même MSC dans ce cas le processus de handover est géré par le même MSC.

2. La nouvelle cellule dans laquelle la MS évolue, est sous le contrôle d'un autre MSC ; dans le cas présent le processus de handover est effectué par deux MSC sur la base des relevés du signal effectués par les BTS récepteurs de la MS.

I.7.2 Le HLR (Home Location Register)

Lorsqu'un utilisateur souscrit à un nouvel abonnement au réseau GSM, toutes les informations qui concernent son identification sont mémorisées sur le HLR. Il a pour mission de communiquer au VLR quelques données relatives aux abonnés, à partir du moment où ces derniers se déplacent d'une location area à une autre. A l'intérieur du HLR les abonnés sont identifiés comme suit :

MSISDN = CC / NDC / SN, Où :

CC = Country Code, indicatif international (le CC Algérie est 213,)

NDC = National Destination Code, indicatif national de l'abonné sans le zéro

SN = Subscriber Number, numéro qui identifie l'utilisateur mobile

Home Location Register (HLR) est une base de données qui peut être soit unique pour tout le réseau soit distribuée dans le système ; il peut ainsi y avoir des MSC privés de HLR, mais connectés à celle d'autres MSC. Dans le cas où il existe plusieurs HLR, chacun d'eux se voit attribuer une aire de numérotation c'est à dire un ensemble de Mobile Station ISDN Number(MSISDN).

Le MSISDN identifie exclusivement un abonnement d'un téléphone mobile sur le plan de numérotation du réseau public international commuté.

Le HLR, comme toutes les autres bases des données que l'on va examiner par la suite, est inséré dans des stations de travail dont les services (mémoire, processeurs, capacité des disques) peuvent être mis à jour au fur et à mesure de l'augmentation du nombre d'abonnés. Il contient toutes les données relatives aux abonnés et ses informations détaillées :

I.7.2.1 Les informations de type permanent

L'International Mobile Subscriber Identity (IMSI), information qu'identifie exclusivement l'abonné à l'intérieur de tout réseau GSM et qui se trouve aussi bien dans la carte SIM. Le Mobile Station ISDN Number (MSISDN).

Tous les services auxquels l'abonné a souscrit et auxquels il est capable d'accéder (voix, service de données, SMS, éventuels verrouillages des appels internationaux, et d'autres services complémentaires).

I.7.2.2 Les informations de type dynamique

La position courante de la station mobile MS, autrement dit l'adresse de VLR sur lequel elle a été enregistrée.

Eventuellement la situation d'un certain nombre de services auxiliaires.

Si l'on veut résumer, les fonctions exercées par le HLR sont :

- La sécurité : dialogue avec l'AUC et le VLR.

- L'enregistrement de la position : dialogue avec le VL eu avec le MSC.
- La gestion des données relatives à l'abonné : dialogue avec l'OMC et le VLR.

I.7.3 L'AuC (Authentication Center)

Le Centre d'authentification est une fonction du système qui a pour but de vérifier si le service est demandé par un abonné autorisé, et ceci en fournissant soit les codes pour l'authentification que pour le chiffage.

Le mécanisme d'authentification vérifie la légitimité de la SIM sans transmettre, pour autant, sur le canal radio les informations personnelles de l'abonné, telles le IMSI et la clef de chiffage dans le but de vérifier si l'abonné qui essaye d'accéder au service est autorisé et n'est pas abusif ; le chiffage par contre génère quelques codes secrets qui serviront pour cryptographier tous les échanges qui ont lieu sur le canal radio. Les codes d'authentification et de chiffage sont obtenus par hasard pour chaque abonné grâce à quelques ensembles d'algorithmes définis par le standard et sont mémorisés soit sur l'AUC que sur la SIM.

L'authentification se fait de façon systématique chaque fois que la MS se connecte au réseau et plus précisément dans les cas suivants :

- Chaque fois que la MS reçoit ou émet un appel.
- A chaque mise à jour de la position de la MS (location updating).
- A chaque demande de mise en activité, de cessation d'activité ou de l'utilisation des services supplémentaires.

I.7.4 Le VLR (Visitor Location Register)

Le Visitor Location Register (VLR) est une base de données qui mémorise de façon temporaire les données concernant tous les abonnés qui appartiennent à la surface géographique qu'elle contrôle. Ces données sont réclamées à l'HLR auquel l'abonné appartient. Généralement pour simplifier les données réclamées et ainsi la structure du système, les constructeurs installent le VLR et le MSC côte à côte, de telle sorte que la surface géographique contrôlée par le MSC et celle contrôlée par le VLR correspondent.

Plus précisément il contient les informations suivantes :

Temporary Mobile Subscriber Identity (TMSI), il est employé comme garant de la sécurité du IMSI, et il est attribué à chaque changement de LA.

- La condition de la MS (en veille, occupée, éteinte)
- L'état des services complémentaires comme Call Waiting, Call Divert, Call Barring, etc.
- Les types de services auxquels l'abonné a souscrit et auxquels il a droit d'accès (voix, service de données, SMS, d'autres services auxiliaires).
- La Location Area Identity (LAI) qui comprend la MS faisant partie du groupe contrôlé par le MSC/VLR.

I.7.5 L'enregistreur des identités des équipements (EIR)

Malgré les mécanismes introduits pour sécuriser l'accès au réseau et le contenu des communications, le téléphone mobile doit potentiellement pouvoir accueillir

n'importe quelle carte SIM de n'importe quel réseau. Il est donc imaginable qu'un terminal puisse être utilisé par un voleur sans qu'il ne puisse être repéré. Pour combattre ce risque, chaque terminal reçoit un identifiant unique (International Mobile station Equipment Identity, IMEI) qui ne peut pas être modifié sans altérer le terminal. En fonction de données au sujet d'un terminal, un opérateur peut décider de refuser l'accès au réseau. Tous les opérateurs n'implémentent pas une telle base de données.

I.8 Le sous-système opérationnel OSS (Operating Sub-System) :

Il assure la gestion et la supervision du réseau. C'est la fonction dont l'implémentation est laissée avec le plus de liberté dans la norme GSM. La supervision du réseau intervient à de nombreux niveaux :

- Détection de pannes.
- Mise en service de sites.
- Modification de paramétrage.
- Réalisation de statistiques.

Dans les OMC (Operation and Maintenance Center), on distingue l'OMC/R (Radio) qui est relié à toutes les entités du BSS, à travers les BSC, l'OMC/S (System) qui est relié au sous-système NSS à travers les MSC. Enfin l'OMC/M (Maintenance) contrôle l'OMC/R et l'OMC/S.

I.9 Les interfaces

I.9.1 L'interface Um

C'est l'interface entre les deux sous-systèmes **MS** (Mobile Station) et le **BSS** (Base Station Sub-system. On la nomme couramment « interface radio » ou « interface air ».

I.9.2 L'interface Abis

C'est l'interface entre les deux composants du sous-système BSS : la **BTS** (Base Station Transceiver) et le **BSC** (Base Station Controller).

I.9.3 L'interface A

C'est l'interface entre les deux sous systèmes **BSS** (Base Station Sub System) et le **NSS** (Network Sub System).

Nom	Localisation	Utilisation
Um	MS – BTS	Interface Radio
A bis	BTS – BSC	Divers
A	BSC – MSC	Divers
B	MSC – VLR	Divers
C	GMSC – HLR	Interrogation HLR pour appel entrant
	SM-GMSC – HLR	Interrogation HLR pour message court entrant
D	VLR – HLR	Gestion des informations d'abonnés et de localisation
	VLR – HLR	Services supplémentaires
E	MSC – MSC	Exécution des handover
	MSC – SM-GMSC	Transport des messages courts
F	MSC – EIR	Vérification de l'identité du terminal
G	VLR – VLR	Gestion des informations d'abonnés
H	HLR – AUC	Échange des données d'authentification

FIGURE 4 : TABLEAU RECAPITULATIF DES INTERFACES DU RESEAU GSM

I.10 La modulation utilisée dans le GSM

La modulation des signaux utilisée dans les réseaux GSM est la modulation GMSK (Gaussian Minimum Phase-shift Keying), Il s'agit d'une modulation MSK à laquelle on a ajouté un filtre passe-bas Gaussien dans le but de diminuer l'occupation spectrale du signal modulé.

La GMSK est choisie comme une méthode de modulation travaillant avec deux fréquences entre lesquelles elle transite facilement. L'avantage important de cette méthode est qu'elle ne module pas l'amplitude, et que la largeur de bande de transmission de fréquence est de 200 kHz, qui est une largeur de bande utilisée par les standards [3]

I.11 Classification des canaux radio

Pour être mobile, les terminaux d'un système de communications ne doivent pas être reliés entre eux physiquement au réseau. L'interface radio entre le mobile et la BTS, en ce qui concerne la couche physique, est constitué d'une série de canaux physique dont le débit brut est de l'ordre de 24,7 Kbit/s ces canaux physiques sont utilisés soit pour le trafic (parole ou données) soit pour la signalisation

I.11.1 Les canaux physiques

Le GSM900 utilise deux bandes de fréquences de largeur de bande de 25 Mhz. La voie montante : 890-915 MHz est utilisé dans le sens mobile vers la BTS (uplink). La voie descendante : 935-960 MHz est utilisé dans le sens BTS vers le mobile (downlink). Ainsi, la bande totale allouée au système et divisée en deux sous bandes séparées par un intervalle fréquentiel qui n'est pas attribué au système, appelée écart duplex égal à 45 MHz.

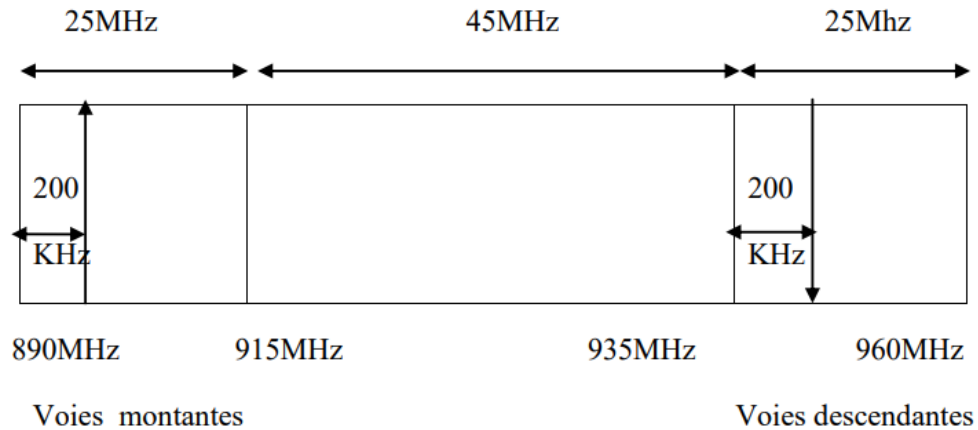


FIGURE 5 : BANDE FREQUENTIEL DU GSM900

Soit au total 124 paires de fréquences porteuses (RFCH : radio frequencies channel) sont utilisées, espacées de 200 KHz (exemple : la paire 890.2/935.2) Chaque cellule dans le réseau cellulaire dispose d'un certain nombre de paires habituellement comprise entre 1 et 15. Le spectre est ensuite réparti dans le temps par la méthode d'accès : AMRT (TDMA) : chaque porteuse est divisées dans le temps en 8 TS (TS : time slot= intervalle de temps) d'une durée égale à :

$$\text{Slot} = (75/130) * 10^{-3} \text{ soit environ } 0.5769 \text{ ms.}$$

Les slots sont numérotés de 0 à 7, et chaque TS est divisé en 156.25 périodes de bit, accueillant un élément de signal radioélectrique appelé Burst (salve) de durée 0.546 ms, un peu plus petite que TS à cause d'un temps de garde entre TS (time slot) égal à 8.25 bits. La trame TDMA, est constituée donc de 8 TS pour une durée de 4.615 ms. Un Burst représente l'agencement des informations dans un slot TDMA. Il existe plusieurs types de Burst, dédiés à des fonctions particulières, telles que la synchronisation, l'accès initial où le plus couramment, la transmission de données. Dans ce dernier cas, on parle Burst normal, qu'on peut illustrer de la manière suivante.

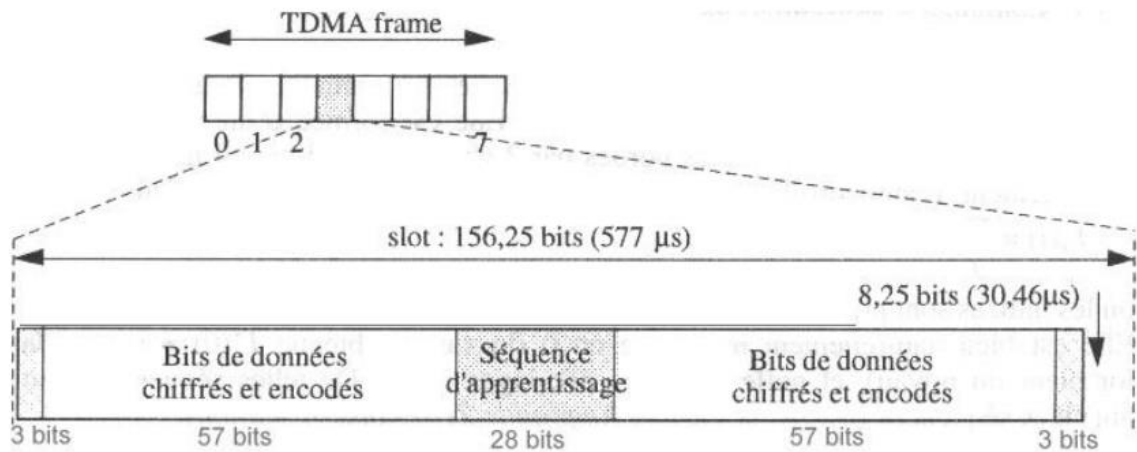


FIGURE 6 STRUCTURE D'UN BURST

I.11.2 Les canaux logiques :

Il y a deux types :

I.11.3 Les canaux de contrôle (signalisation)

Transmission des messages de control entre MS et BTS. Il y plusieurs types de canaux logiques de contrôle :

- ✚ Broadcast.
- ✚ Commun.
- ✚ Dédié.

I.11.4 Les canaux de trafic:

- ✚ Pour envoyer les données/voix entre la BTS et MS.

Les canaux de trafic:

- ➔ Pour envoyer les données/voix entre la BTS et MS.

Full Rate 13 Kbit/s

Une TS pour un canal de trafic est réservé à un utilisateur. Chaque canal de trafic a un canal de control associé dans la même TS.

I.11.4.1 Broadcast Channel BCH

Groupe de canaux logiques non dédiés

- Frequency Correction Channel FCCH
- Synchronisation Channel SCH
- Broadcast Control Channel BCCH

Emis sur la voie balise

- Uniquement sur la voie descendante
- Présente dans toutes les cellules

I.11.4.2 Frequency Correction Channel FCCH

Consiste en un burst particulier

- Emis toutes les 50 ms environ
- ❖ 148 bits à zéro

Emis sur la fréquence de la voie balise

- Signal sinusoïdale parfait
- Permet le calage du mobile en fréquence

Head Bits 3	Fixed Bits 142	Tail Bits 3	Guard Period 8.25
-----------------------	--------------------------	-----------------------	-----------------------------

FIGURE 7 : FREQUENCY CORRECTION BURST (FCB)

I.11.4.3 Synchronisation Channel SCH

Deux types de synchronisations :

- Fine : détermination du Timing Advance (TA)
- Logique : détermination du Frame Number (FN)

Format du Burst

- La séquence d'apprentissage est identique dans tout le Public Land
- Mobile Network (PLMN) car c'est le premier burst qu'un mobile décode !
- Données transportées
- Reduced Frame Number RFN (19 bits)
- BSIC : numéro permettant de distinguer 2 cellules émettant leur voie balise sur la même fréquence

Head Bits 3	Encrypted Sync Bits 39	Extended Training Sequence 64	Encrypted Sync Bits 39	Tail Bits 3	Guard Period 8.25
-----------------------	----------------------------------	---	----------------------------------	-----------------------	-----------------------------

FIGURE 8 : SYNCHRONISATION BURST (SB)

I.11.4.4 Broadcast Control

Broadcast Control Channel BCCH

Permet la diffusion d'informations sur les caractéristiques de la cellule Plusieurs types d'informations émises à des périodes différentes suivant la rapidité avec laquelle on désire qu'un mobile les apprenne

Chaque information

- Mot de 23 octets, 184 bits, après codages 456 bits divisés en 8 blocs de 57 bits
- Emission en blocs entrelacés sur 4 bursts normaux.

Paramètres de sélection de la cellule permettant au mobile de savoir s'il peut se mettre en veille Numéro de la zone de localisation Paramètres du mode d'accès aléatoire (éventuellement interdire cette cellule aux mobiles qui n'arrivent pas par Handover) Description de l'organisation des canaux logiques

Description de l'organisation du CBCH Description des cellules voisines

– Fréquences des voies balises

I.11.5 Common Control Channel CCCH

Groupe de canaux non dédiés

I.11.5.1 Random Access Channel RACH

- Voie montante

Uniquement sur la voie montante Permet l'accès aléatoire au réseau

- Lorsqu'un mobile désire accéder au réseau
- Emission d'un burst « court »
 - Parce que le délai de propagation n'est pas connu !
 - Ne doit pas chevaucher des slots voisins : d'où une garde de 252 μ secondes soit 37,8 Km (cellule max rayon 35 km !)
- Mode Slotted ALOHA
- Informations : catégorie de service demandé, code BSIC de la station à laquelle on s'adresse, un nombre aléatoire

Head Bits 8	Training Sequence 41	Encrypted Bits 36	Tail Bits 3	Guard Period 68.25
----------------	-------------------------	----------------------	----------------	-----------------------

FIGURE 9 : ACCESS BURST (AB)

I.11.5.2 Access Grant Channel AGCH

- Voie descendante

Lorsqu'une BTS reçoit une demande d'un mobile

- Elle lui alloue un canal de signalisation dédié (SDCCH) Message d'allocation du SDCCH envoyé sur l'AGCH.
- Numéro de porteuse, numéro de slot
- Description du saut en fréquence si celui-ci est activé Message de 23 octets codé sur des bursts classiques en 8 blocs de 57 bits (4 bursts)

I.11.5.3 Paging Channel PCH

- Voie descendante

Lorsque le réseau désire communiquer avec un mobile

- Appel, SMS ou authentification

Elle diffuse l'identité du mobile sur le PCH

- Le mobile réalisera un demande d'accès sur le RACH Plusieurs messages d'appel peuvent être diffusés simultanément dans un mot de 23 octets

- 8 blocs de 57 bits envoyés sur 4 bursts classiques

I.11.5.4 Cell Broadcast Channel CBCH

- Voie descendant

CBCH Canal permettant de diffuser à l'ensemble des mobiles de la cellule des informations spécifiques

- Météo
- Informations routières etc... A la discrétion de l'opérateur

I.11.6 Dedicated Control Channel DCCH

Groupe de canaux dédiés

- bidirectionnels Standalone Dedicated :

I.11.6.1 Standalone Dedicated Control Channel SDCCH

Les informations provenant des couches applicatives du système sont des données, transportées par des canaux TCH ou de la signalisation transportée par des canaux SDCCH 184 bits utiles, codés en 456 bits, soit 8 sous blocs de 57 bits, émis sur 4 bursts classiques Canal bidirectionnel

I.11.6.2 Slow Associated Control Channel SACCH

La liaison radio étant fluctuante, elle doit donc être instrumentée en permanence

- Mesures/ajustement des paramètres radio Les canaux TCH et SDCCH constituent les deux canaux bidirectionnels constants qui peuvent être établis entre un mobile et une station
- Ils sont instrumentés par un canal SACCH spécifique qui leur ait attribué

Le canal transporte les informations suivantes :

- Contrôle de puissance d'émission du mobile
 - Contrôle de la qualité du lien radio
 - Rapatriement des mesures effectuées sur les stations voisines
- Update : Timing advance et niveau de puissance 184 bits utiles, codés sur 456 bits, soit 8 sousblocs de 57 bits transmis sur 4 bursts classiques

Catégorie	Nom	Sens	Rôle
Diffusion (commun)	BCCH (Broadcast Control CHannel)	Descendant	Diffusion d'informa spécifique à la
	FCCH (Frequency correctionChannel)	Descendant	Synchronisation fré
	SCH (Synchronization CHannel)	Descendant	Synchronisation ter identification de l
Contrôle (Commun)	AGCH (Access Grant Channel)	Descendant	Réponse du réseau initial
	CBCH (Cell Broadcast Channel)	Descendant	Diffusion de mess
	PCH (Paging Channel)	Descendant	Appel du mo
	RACH (Random Access CHannel)	Montant	Accès initial du
Contrôle (dédié)	FACCH (Fast Associated Control CHannel)	Bidirectionnel	Signalisation r
	SACCH (Slow Associated Control CHannel)	Bidirectionnel	Contrôle de la tran
	SDCCH (Stand-Alone Dedicated Control Channel)	Bidirectionnel	Signalisati
Trafic (dédié)	TCH (Traffic CHannel)	Bidirectionnel	Transmission de

FIGURE 10 : CANAUX LOGIQUES DU GSM [4]

I.12 Déroulement des communications

I.12.1 Les définitions élémentaires

I.12.1.1 Handover

Une des plus importantes caractéristiques de la téléphonie mobile est de pouvoir continuer l'appel tout en se déplaçant d'une BTS à une autre ou d'une BSC à une autre, cette caractéristique est appelée Handover, pour ce faire, des mesures de qualité de signal sont échangées (chaque 480 ms) entre le MS et le BSC à travers la BTS pour décider sur quelle nouvelle station on va « muter » l'appel. En réalité on distingue deux types de Handover, intercellulaire (hard-handover) et intracellulaire (soft-handover) correspondant à 3 cas de figures. —

I.12.1.1.1 LE HANDOVER INTRACELLULAIRE

Le Handover entre canaux radio d'une même BTS ceci peut se produire par exemple, dans les situations suivantes :

- Le canal radio utilisé par la communication est l'objet d'interférences trop fortes.
- Le canal radio utilisé par la communication est mis hors service par la maintenance ou par défaillance.
-

I.12.1.1.2 LE HANDOVER INTERCELLULAIRE

- a. le Handover entre BTS du même commutateur MSC, en vue d'assurer la continuité de la communication quand un mobile passe d'une cellule à une autre cellule.
- b. Le Handover entre BTS de différents MSC du même PLMN.

I.12.1.2 Le paging

Le paging est un message de recherche pour un éventuel établissement d'appel envoyé par le BSC aux BTS situées dans une zone de localisation. Ces BTS diffusent ce message sur l'interface air sur le canal PCH. La recherche du Mobile s'effectue en utilisant le numéro IMSI ou TMSI.

I.12.1.3 La Localisation

Du fait de sa mobilité, la station mobile n'a pas de localisation fixe, donc pour être joint, il faut que le système ait l'information de sa localisation en permanence, pour cela, quatre types de localisation sont générés :

- Normal LU : lorsque l'abonné allume son poste mobile.
- Periodic LU : pour permettre au système de savoir que le MS est toujours en veille.
- IMSI ATTACH : lorsque l'abonné mis sous tension son mobile.
- IMSI DETTACH : lorsque l'abonné éteint son poste mobile.
- Le système a besoin de connaître à n'importe quel moment la localisation de l'abonné.

I.12.1.4 Le Roaming « l'itinérance »

Pour être joint n'importe quand et n'importe où, un abonné mobile peut utiliser sa ligne GSM (avec le même MSISDN) dans un autre réseau mobile d'un autre opérateur à l'extérieur du pays, cette possibilité est assurée après un commun accord entre les opérateurs ; on parle alors de l'opérateur du roaming par les abonnées mobile.

I.13 Conclusion

En conclusion, ce premier chapitre nous a permis de comprendre les bases du GSM (Global system for Mobil Communications). Ce chapitre a porté sur les composants essentiels des systèmes de télécommunications mobiles, notamment le MS (Mobile Station), le BSS (Base Station Subsystem), le NSS (Network Subsystem) et L'OSS (Operation System).

**II. CHAPITRE II :
AVANTAGES ET DEFIS DE LA
MISE EN ŒUVRE DE LA
NORME GSM-Rail SUR LES
COMMUNICATIO
FERROVIAIRES**

II.1 INTRODUCTION

Le **GSM-R** (*Global system for mobiles - Railways*) est un sous-système de l'ERTMS (Système européen de surveillance du trafic ferroviaire). Le **GSM-R** est standard de communication sans fil développé spécifiquement pour les applications et les communications ferroviaires. Il permet au train de communiquer avec les postes de régulation du trafic ferroviaire. Il est une variante du GSM.

Les normes *EIRENE - MORANE* spécifient une utilisation fonctionnelle et sans coupure de communication du GSM-R jusqu'à une vitesse de déplacement du train de 500 km/h.

II.2 La technologie GSM-Rail :

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...

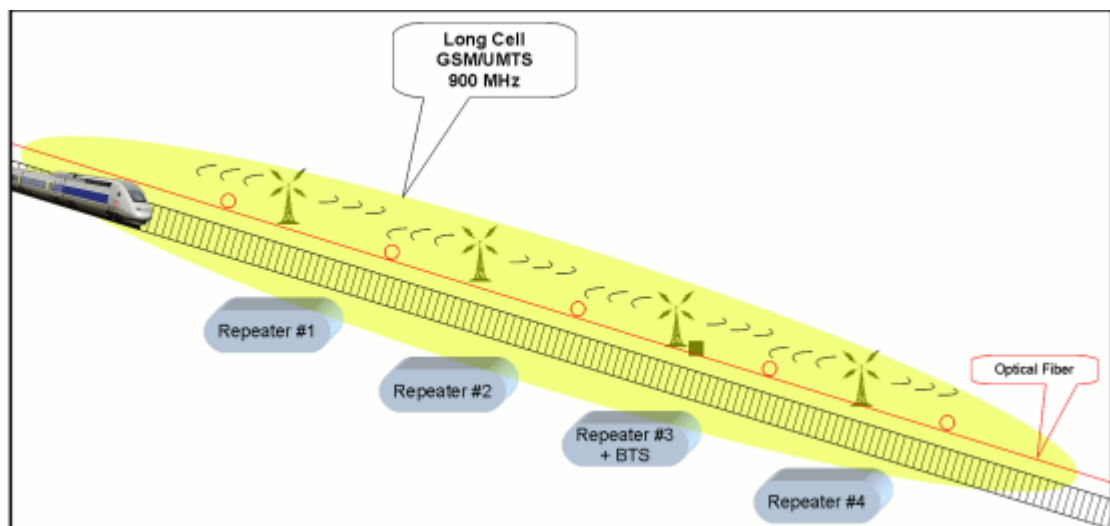


FIGURE 11 : STRUCTURE DU GSM-R

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 et En **ALGERIE**. 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.

II.3 Histoire

Le standard GSM-R à été développé dans le cadre de la mission que s'est donnée l'Union internationale des chemins de fer (UIC). Son but initial était la standardisation et l'amélioration des conditions de construction et d'exploitation des chemins de fer, particulièrement en matière de trafic international. Afin de développer ce standard le projet EIRENE a été mis en place en 1993 par l'UIC. C'est au sein de ce projet que les spécifications auxquelles le réseau GSM-R doit satisfaire ont été développées.

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...

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 (VGCS), les annonces ou appels diffusés (VBS), 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.

II.4 Origines du GSM-R

Le contrôle-commande signalisation (CCS) figure dans une STI européenne (décision 2012/88 / UE). Cette STI spécifie les exigences qui sont nécessaires pour assurer l'interopérabilité et la conformité du système ferroviaire transeuropéen aux exigences essentielles. Le système de radiocommunication utilisé est le **GSM-R**. Suite à la décision d'adopter le GSM, l'UIC a lancé un projet en 1992, en collaboration

avec l'Union Européenne et les chemins de fer, appelé **EIRENE** (European Integrated Radio Enhanced Network).

Une première version de ces spécifications **EIRENE** a été finalisée en 1995. Comme ces caractéristiques devaient être incorporées dans les normes GSM, il a été nécessaire de travailler de concert avec des groupes de travail spécialisés ETSI (European Telecommunications Standards Institute).

La concrétisation technique des spécifications d'EIRENE fit appel à un projet qui fût lancé par trois réseaux ferroviaires, des fournisseurs de télécommunication et des laboratoires, sous le nom de **MORANE** (MOBILE radio for RAILway Networks in Europe).

Les deux projets EIRENE et MORANE ont finalement été conclu à la fin 2000 avec la livraison des FRS (Functional Requirements Specification) et des SRS (System Requirements Specification), Un MoU a été signé par 37 réseaux ferroviaires, y compris hors Europe, pour n'utiliser que les spécifications du GSM-R. [5]

II.5 Répartition des fréquences GSM

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.

Le GSM-R occupe deux espaces dans le spectre des fréquences disponibles :

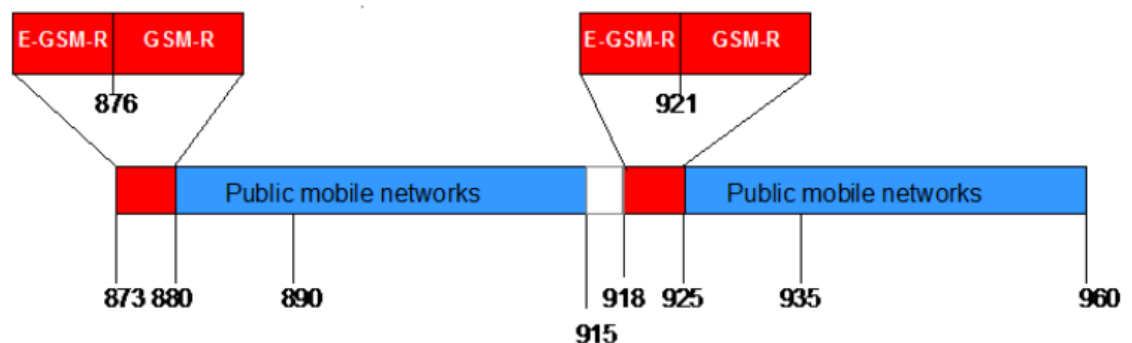


FIGURE 12 : FREQUENCE RESERVE PAR LES TRANSPORTS FERRES EUROPEENS

II.6 Système supérieur

Le GSM-R est une composante de l'ERTMS qui comprend :

- L'ETCS (système européen du contrôle des trains).
- Le GSM-R

II.7 Bande de fréquence

En Europe, le GSM-R utilise les bandes de fréquences dédiées suivantes :
876,2 MHz - 915 MHz : pour la transmission de données (liaison montante)
921,2 MHz - 960 MHz : pour la réception de données (liaison descendante)
Séparation de fréquence entre chaque canal physique 200 kHz. La modulation est de type GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Le GSM-R est également un système TDMA (« Time Division Multiple Access »), Time Division Multiplexing, dans lequel la transmission des données est organisée pour chaque porteuse (ou canal physique) par des trames TDMA périodiques (période 4,615 ms). Chaque trame TDMA est divisée en 8 intervalles de temps ("slots"), également appelés canaux logiques (chacun d'une durée

de 577 μ s), constitués de 148 bits d'information. Le GSM-R utilise une extension inférieure de la fréquence GSM 900 MHz (bande 890 MHz - 915 MHz pour l'émission et bande 935 MHz - 960 MHz pour la réception). En Chine, le GSM-R utilise la gamme 4 MHz de la bande E-GSM (GSM 900Mhz).

II.8 Application

Le GSM-R permet de nouveaux services et applications ; il offre notamment des possibilités de communication mobile dans les domaines de :

- la maîtrise et de la protection (Surveillance automatique des trains (Automatic Train Control/ETCS) et ERTMS)
- la communication entre le *mécanicien* et le dirigeant de service,
- la communication pour le personnel de train, ainsi que les équipes travaillant à bord du train
- l'envoi de message du train pour le service de contrôle du train
- la communication pour le personnel sur les gares, les sites de marchandises et sur les voies
- des applications spécifiques à chaque pays, comme la communication dans les tunnels, le transfert et l'analyse des données de service, des données de contrôle...

II.8.1 Première application

Il sert à transmettre les données entre les trains et les postes de régulation du trafic ferroviaire avec les niveaux 2 et 3 du système ETCS. Ainsi quand le train arrive sur une des Eurobalises, il communique sa nouvelle position et sa vitesse et reçoit en retour l'autorisation d'entrer ou non sur le canton suivant et la nouvelle vitesse maximale. Il n'y a donc plus besoin de signalisation latérale. [6]

II.8.2 Autres applications

Tout comme les équipements de téléphonie GSM, les équipements GSM-R permettent de transmettre des données et également de la voix. Les fonctionnalités nouvelles apportées par le GSM-R en termes de communication mobile, s'appuient sur les normes GSM, et sont décrites par les normes du projet EIRENE. On trouve notamment pour les appels :

- l'appel point-à-point (**PtP Call** : *Point-to-Point Call*), appel identique à ceux d'un GSM normal
- l'appel de groupe (**VGCS** : *Voice Group Call System*), sorte de communication semblable à l'alternat en Radiotéléphonie
- l'appel de diffusion (**VBS** : *Voice Broadcast System*), où il n'y a qu'une seule personne qui peut parler (les autres écoutent seulement)
- l'appel d'urgence (**REC** : *Railways Emergency Call*), qui est une sorte d'appel de groupe dédié à une urgence
- une gestion des différents types appels (PtP, VGCS, VBS et REC) par priorité

On trouve également les fonctionnalités suivantes :

- l'adressage fonctionnel (*Functional Addressing*), système d'alias qui permet d'enregistrer auprès du réseau GSM-R le numéro d'un téléphone en tant qu'une fonction temporaire occupée par son utilisateur (conducteur, contrôleur d'un train particulier...)

- un mode de fonctionnement spécifique aux manœuvres (*Shunting*), c'est-à-dire le travail sur les voies à l'élaboration où le stockage d'un convoi ferroviaire.

II.9 Fonctionnalités GSM-R

II.9.1 Dispositifs ASCI (Advanced Speech Call Items)

II.9.2 VGCS (Voice Group Call Service)

Le VGCS permet à un grand nombre d'utilisateurs de participer au même appel. Ce dispositif imite l'appel de groupe PMR (Private Mobile Radio) analogique avec le bouton PTT (*Push-to-Talk*).

Trois sortes d'utilisateurs sont définies : le Talker (*Celui qui parle*), le Listener (*Celui qui écoute*) et le Dispatcher (*Le Régulateur*). Le talker peut devenir un listener en relâchant le bouton PTT et le listener devient un talker' en appuyant sur le bouton PTT.

Le principal avantage du VGCS comparé à un appel *multi-party* (le dispositif d'appel de conférence du GSM) est l'optimisation de l'occupation de la bande de fréquence. Ainsi, quand de nombreux utilisateur sont dans la même cellule (GSM) ils vont utiliser une fréquence pour tous les listeners et deux fréquences pour le talker (comme pour un appel point-à-point). Lors d'un appel *multi-party* il y a deux fréquences utilisées pour chaque utilisateur.

II.9.3 VBS (Voice Broadcast Service)

Le VBS est un appel de diffusion : à la différence d'un VGCS, seule la personne ayant initié cet appel peut parler, les autres participants à l'appel ne peuvent qu'écouter. Ce type d'appel est utilisé principalement pour diffuser des messages pré-enregistrés ou faire des annonces.

II.9.4 REC (Railway Emergency Call : Appel d'urgence train)

Le REC est appel de groupe, ou VGCS, dédié à une urgence. Il possède une priorité supérieur à celle des autres appels (un REC a une priorité de niveau 0 - voir ci-dessous : eMLPP)

II.9.5 Service eMLPP (Multi-Level Precedence and Pre-emption Service)

Ce service définit des priorités pour les appels des utilisateurs. On trouve les niveaux de priorité suivant :

- A et B : Niveau de priorité les plus importants (Réservés au message du réseau)

- 0 : Niveau le plus prioritaire parmi le service ASCI (Principalement utilisé pour l'appel d'urgence train - REC)
- 1 : Niveau moins prioritaire que le niveau 0
- 2 : Niveau moins prioritaire que le niveau 1
- 3 : Niveau moins prioritaire que le niveau 2
- 4 : Niveau le moins prioritaire (Priorité par défaut, elle est attribuée aux appels point à point)

Un système de réponse automatique (*Auto-Answering*) temporisé est également disponible pour les appels de priorité 0, 1 et 2.

II.10 Dispositifs EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network)

II.10.1 Gestion de numéro fonctionnel (*Functional Number*)

- Adressage par numéro fonctionnel Permet d'appeler un terminal mobile (*MS* ou *Mobile Station*) à partir de sa fonction : Conducteur du train xxx...

Cette fonction utilise les fonctions *USSD* et *Follow Me* la fonction *UUSI* (pour l'affichage du numéro fonctionnel)

- Adressage dépendant de la localisation
 - Amélioration du principe d'adressage par numéro fonctionnel
 - Permet d'appeler le plus proche *MS* rattaché à une fonction : plus proche conducteur, plus proche contrôleur, ...

II.10.2 Confirmation d'appel

Le système de confirmation d'appel n'est valable que pour les appels de groupes (VGCS) et les appels de diffusion (VBS) de priorité 0 (voir eMLPP).

Le principe consiste pour chaque terminal mobile ayant participé à l'appel (initiateur compris), à envoyer un rapport lorsque l'appel est quitté ou terminé. Ce rapport doit contenir comme information :

- Le type d'appel
- La durée de l'appel
- L'identification du mobile émetteur du rapport
- La cause de la fin de l'appel (Normal, fin volontaire par l'utilisateur, extinction du mobile volontaire, extinction pour cause batterie déchargé,...)
- Si le rapport n'a pas pu être envoyé (extinction du terminal mobile volontaire ou pour cause de batterie déchargé), le terminal mobile essaie à nouveau de le renvoyer lors de son redémarrage.

II.10.3 Mode manœuvre (*Shunting mode*)

Le mode "Shunting" est le terme utilisé pour décrire l'application qui régule et contrôle les utilisateurs qui accèdent aux communications *shunting*.

Un signal sonore, le "LAS" (*Link Assurance Signal*) est émis dans le but de confirmer au mécanicien (conducteur du train) que le lien radio est opérationnel et fonctionne.

II.10.4 Mode direct (*Direct mode*)

Le mode direct est le mode de communication par alternat (talkie-walkie) où les terminaux mobiles communiquent ensemble sans utiliser le réseau mobile. Il a été proposé par le projet Eirene, même s'il n'a jamais été mis en application depuis lors.

SAGEM dit avoir développé un mode direct GSM, actuellement non reconnu dans les spécifications GSM-R, et pour lequel aucune fréquence n'est encore allouée. [6]

II.11 Standard ERTMS

Le système européen de surveillance du trafic ferroviaire (ERTMS) a été introduit pour garantir l'interopérabilité entre des différents pays et fabricants en créant un standard européen pour les systèmes de contrôle-commande des trains. Il est constitué de deux composants : le système européen de contrôle des trains (ETCS) et le GSM-R qui est un standard de communication sans fil basé sur le GSM pour les applications et les communications ferroviaires. L'ETCS comporte trois niveaux. Les ETCS niveau 1 et niveau 2 sont appliqués largement en Europe et en Asie. L'ETCS niveau 3 est encore en phase de développement. Dans l'ETCS niveau 1, la transmission d'informations du sol au train dépend totalement des balises qui sont installées sur le sol. Le conducteur conduit le train en fonction des signaux latéraux.

Dans l'ETCS niveau 2, les informations sont transmises par radio. La description des voies est affichée directement dans la cabine pour le conducteur, de sorte que les signaux latéraux ne sont plus nécessaires. Les balises aident le train à déterminer et à corriger sa position. Des circuits de voie permettent de suivre la position du train dans le système de signalisation ferroviaire.

Dans l'ETCS niveau 3, la vérification de l'intégrité du train se fait par le train lui-même, donc les circuits de voie ne sont plus nécessaires. Les balises sont utilisées pour mettre à jour des informations de position et transmettre les données par GSM-R.

II.12 ARCHITECTURES D'INFRASTRUCTURE ET DU SYSTEME DE SIGNALISATION

L'infrastructure ferroviaire comprend généralement une plateforme, une interface avec la voie (ballast, dalle béton...), la voie ferrée (ensemble rails, attaches, traverses) avec ses raccordements et bifurcations, les câbles faible puissance et télécommunication, des armoires et boîtiers systèmes (circuits de voie, signalisation, piles...), éventuellement complétée d'une infrastructure de puissance pour

l'alimentation directe en énergie électrique des trains. Dans le cadre de ce projet, notre intérêt se porte sur le plan de voie, le cantonnement et le profil de ligne, ainsi que le système de signalisation. Le système de signalisation assure la protection des itinéraires et circulations. En fonction des systèmes, plusieurs modes de fonctionnement coexistent, pour ERTMS ont été définis le mode FS (Full Supervision), les modes dégradés OS (On Sight) et SR (Staff Responsible) où la sécurité repose sur le respect de procédures communes à l'ensemble des systèmes présents sur la ligne. Regroupés au sein du groupe de travail Unisig, les principaux équipementiers ferroviaires ont travaillé à la convergence de l'interprétation des spécifications européennes, garante d'une réelle interopérabilité. [7]

II.12.1 Principe

Le point de départ est l'autorité de mouvement (Movement Authority – MA), c'est-à-dire l'autorisation pour un train d'opérer sa marche à une vitesse maximale donnée jusqu'à un point donné (ce point étant la fin de l'autorité de mouvement).

Dans les premiers jours du ferroviaire, l'autorité de mouvement était un signal à main donné par un agent au sol, puis par des signaux mécaniques et lumineux implantés le long des voies. Les ATP nationaux dédiés à la grande vitesse, comme la TVM (France) ou le LZB (Allemagne), affichent en cabine l'autorité de mouvement au conducteur.

L'objectif de l'ERTMS/ETCS est de pouvoir transmettre l'autorité de mouvement du sol vers le bord, afin que l'information soit affichée au conducteur, sur l'écran en cabine. Le bord contrôle que l'action du conducteur respecte cette autorité de mouvement. Un autopilote peut également être utilisé, et à ce moment-là, l'information de signalisation est transmise informatiquement à l'autopilote : c'est la solution ATO over ETCS. Afin de pouvoir réaliser ses fonctions, l'ERTMS/ETCS est constitué de plusieurs sous-systèmes, certains étant au sol, et d'autres à bord du train.

II.12.2 Sous-système bord

Le sous-système bord contient les équipements permettant :

- la transmission de l'autorité de mouvement au conducteur,
- l'application du freinage d'urgence en cas de survitesse,
- l'application du freinage d'urgence en cas de dépassement de la fin d'autorité de mouvement,
- le positionnement du train sur le plan de voie.



FIGURE 13 : DMI ETCS

Le sous-système bord repose sur un ordinateur de sécurité (EVC : *European Vital Computer*), entouré de plusieurs dispositifs, notamment :

- l'afficheur en cabine : le DMI (Driver Machine Interface),
- les antennes permettant la récupération des données de signalisation provenant du sous-système sol, l'odomètre permettant d'estimer la position du train sur le plan de voie



FIGURE 14 : EVC-CAF

II.12.3 Sous-système sol

Le sous-système sol contient les équipements permettant de récupérer les informations nécessaires, entre autres, à l'élaboration de l'autorité de mouvement, et à sa transmission au sous-système bord.

Les éléments fondamentaux du sous-système sol sont :

- Les codeurs (LEU), qui récupèrent l'état du signal ou de l'enclenchement, et le convertissent en autorité de mouvement ERTMS/ETCS fournie aux Eurobalises,
- Les Eurobalises, qui transmettent des informations fixes ou commutables (provenant des codeurs) au passage du train,

- Le Radio Block Center (RBC), qui transmet par radio les autorités de mouvement, sur la base des informations récupérées directement auprès de l'enclenchement.



FIGURE 15 : EUROBALISE

II.12.4 La localisation sur le plan de voie

En signalisation ETCS, l'équipement à bord détermine où il se situe sur le plan de voie. Pour cela, la ligne fait l'objet d'une étude afin d'en établir ses caractéristiques et sa topologie. Cette étude peut se faire sous la forme d'un sondage, c'est-à-dire l'envoi d'un train de mesures équipé de nombreux capteurs. Ce sondage procure des données qui alimentent une description topologique, utilisée par le système.

L'ETCS à bord se positionne sur cette description topologique à l'aide d'un système d'odométrie. Le problème est que l'odométrie présente une erreur qui croît avec le temps. Pour corriger cette erreur, des Eurobalises sont placées régulièrement à la voie, et renseignées dans la description de la ligne. Ainsi, lorsque le train passe au-dessus d'une Eurobalise, l'ETCS bord se repositionne immédiatement sur le plan de voie, car l'emplacement de cette balise est fixe et connu. C'est de cette manière que l'erreur cumulative des systèmes d'odométrie est corrigée.

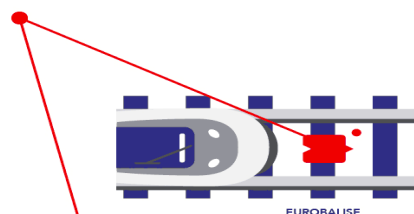
LES EUROBALISES

Passives, elles sont alimentées par l'antenne du train. À son passage, elles transmettent des informations fixes ou dépendantes de la signalisation.



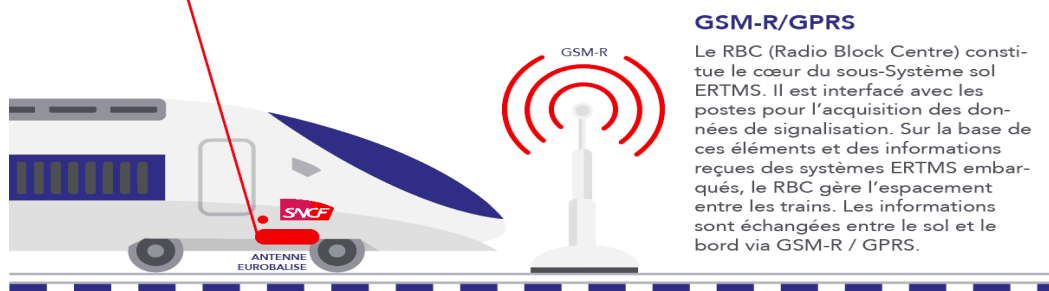
CONTRÔLE DE VITESSE

L'ERTMS repose sur l'émission par le sol d'une autorisation de mouvement qui donne un point but et une vitesse but. Connaissant ses performances de freinage et les caractéristiques de l'infrastructure, le train calcule la courbe de vitesse qu'il ne doit pas dépasser pour respecter sa vitesse but au point but.



LE LEU (LINESIDE ELECTRONIC UNIT)

Les informations d'un signal (ou de l'enclenchement) sont transformées en messages informatiques à destination des balises dépendantes de la signalisation.



GSM-R/GPRS

Le RBC (Radio Block Centre) constitue le cœur du sous-Système sol ERTMS. Il est interfacé avec les postes pour l'acquisition des données de signalisation. Sur la base de ces éléments et des informations reçues des systèmes ERTMS embarqués, le RBC gère l'espacement entre les trains. Les informations sont échangées entre le sol et le bord via GSM-R / GPRS.

FIGURE 16 : PRINCIPAUX ELEMENTS DE L'ERTMS/ETCS.

II.13 Niveaux d'application

Les niveaux d'application de l'ERTMS/ETCS correspondent aux modes de fonctionnement possibles entre les équipements au sol et à bord. Ces niveaux sont dépendants de l'équipement sol utilisé, et de la manière dont l'information est transmise à bord.

Ces différents niveaux ont été introduits, afin de laisser le choix aux gestionnaires d'infrastructure de déployer le niveau le plus pertinent selon leur stratégie de modernisation du réseau.

II.13.1 Niveau 0 : le train est équipé d'ERTMS/ETCS Bord, et la voie circulée est soit :

- non équipée d'ERTMS/ETCS ou bien d'un système de classe B,
- équipée d'ERTMS/ETCS ou d'un système de classe B mais l'opération sous leur supervision est impossible.

–**Niveau NTC** : le train est équipé d'ERTMS/ETCS Bord opérant sur une ligne équipée d'un système de classe B.

–**Niveau 1** : le train est équipé d'ERTMS/ETCS Bord opérant sur une ligne équipée de la signalisation latérale, avec ERTMS/ETCS en superposition

par l'ajout d'Eurobalises et éventuellement de dispositifs d'anticipation (Euroloop et/ou radio infill).

–**Niveau 2** : le train est équipé d'ERTMS/ETCS Bord opérant sur une ligne contrôlée par un Radio Block Center (RBC), équipée d'Eurobalises et d'Euroradio. La détermination de la position du train et son contrôle d'intégrité sont réalisés par l'enclenchement, via des circuits de voie ou compteurs d'essieux. La signalisation latérale n'est plus nécessaire.

–**Niveau 3** : le train est équipé d'ERTMS/ETCS Bord opérant sur une ligne contrôlée par un Radio Block Center (RBC), équipée d'Eurobalises et d'Euroradio. La détermination de la position du train, ainsi que son contrôle d'intégrité, sont de la responsabilité du système ERTMS/ETCS. Les circuits de voie ou compteurs d'essieux ne sont plus nécessaires. La signalisation latérale n'est plus nécessaire. [8]

II.13.2 Le niveau NTC : la rétrocompatibilité avec les systèmes de classe B

Le remplacement des systèmes nationaux par l'ERTMS/ETCS doit être fait de manière synchronisée sur les voies et sur les trains. Cela représente un immense défi de migration. Pour le faciliter, le système ERTMS/ETCS à bord a été conçu pour cohabiter avec des systèmes nationaux. Cette cohabitation est permise par le niveau NTC (National Train Control).

En niveau NTC, le train est équipé du système ERTMS/ETCS et la voie est encore équipée du système national. La partie Bord du système national peut être connectée à l'ERTMS/ETCS Bord, afin de pouvoir réaliser des transitions automatiques et pour accéder à des ressources comme l'afficheur en cabine ou l'odométrie. Cette connexion se fait via un module appelé STM (Specific Transmission Module), et l'interface entre STM et ERTMS/ETCS est standardisée. Le STM est responsable de la supervision du train en niveau NTC, et réalise les fonctions du système national.

II.13.3 Le niveau 1 : la modernisation basée sur l'existant

Le niveau 1 permet la transmission ponctuelle d'informations, en superposition au système de signalisation latérale de la ligne. L'autorité de mouvement est générée au sol et transmise au bord par les Eurobalises, alimentées par des codeurs (LEU).

Ce niveau permet le contrôle de vitesse (alerte puis application du freinage d'urgence en cas de survitesse), ainsi que la protection du dépassement de l'autorité de mouvement.

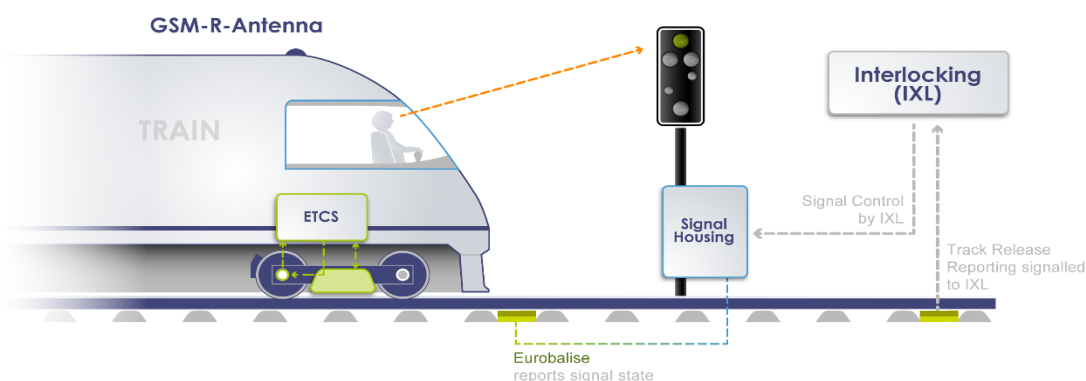


FIGURE 17 : ETCS EST INSTALLÉ AU SOL ET EMBARQUE À BORD DU TRAIN. LES DONNÉES SONT ÉCHANGÉES PAR TRANSMISSION PONCTUELLE DU SOL (VOIE) AU TRAIN PAR LE BIAIS DE BALISES ETCS.

Une étape fondamentale d'un projet ERTMS/ETCS niveau 1, est l'étude d'ingénierie de la ligne. Cette phase permet la mise au point des données ERTMS/ETCS, de la ligne faisant l'objet d'un déploiement.

Ces données alimentent les codeurs installés sur la ligne. Les codeurs peuvent être reliés directement au signal, ou bien à l'enclenchement, lorsque celui-ci s'y prête. Ces codeurs s'appellent LEU (Lineside Electronic Unit) et envoient à la balise, selon l'état du signal ou de l'enclenchement, la donnée ERTMS/ETCS associée qui a été déterminée lors de la phase d'ingénierie.

II.13.4 Le niveau 2 : la signalisation par radio

En niveau 2, l'autorité de mouvement est générée par le Radio Block Center (RBC), sur la base des informations récupérées du système d'enclenchement. L'autorité de mouvement est transmise au bord par une liaison radio : Euroradio. Des Eurobalises restent utilisées pour corriger l'erreur odométrique, et envoyer des informations fixes.

Comme en niveau 1, le système permet le contrôle de vitesse et la protection du dépassement de l'autorité de mouvement. En revanche, l'utilisation d'un RBC relié directement au système d'enclenchement peut nécessiter une modernisation de la ligne par le remplacement des enclenchements obsolètes et disparates par un (ou plusieurs) enclenchements de conception moderne.

Le niveau 2 permettant une communication continue entre le bord et le sol, la signalisation latérale peut être supprimée.

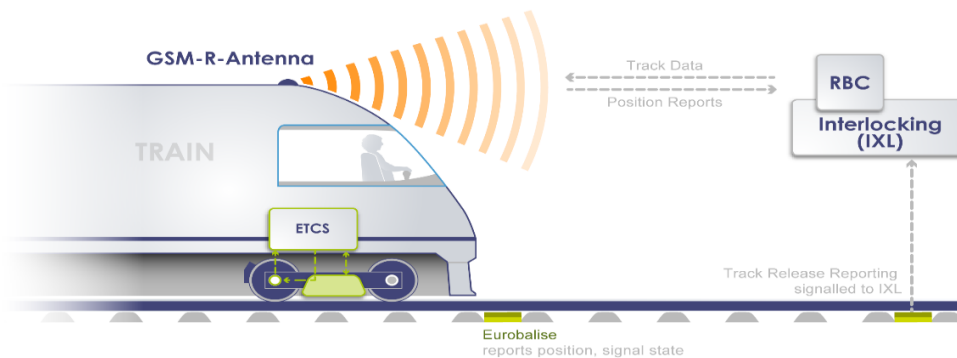


FIGURE 18 : NIVEAU 1 ETENDU, AVEC TRANSMISSION DE DONNEES ETCS EN CONTINU PAR GSM-R. AU SOL, UN RBC CONTROLE TOUS LES MOUVEMENTS DE TRAINS DANS LA ZONE COUVERTE.

II.13.5 Le niveau 3: infrastructure légère

En niveau 3, l'autorité de mouvement est générée par le Radio Block Center (RBC), selon la localisation du train, et de son intégrité. L'autorité de mouvement est transmise au bord par une liaison radio : Euroradio.

Dans ce niveau, le train reporte au RBC sa localisation sur le plan de voie, ainsi que son contrôle d'intégrité (c'est-à-dire vérifier qu'aucune partie du train ne s'est décrochée). C'est le rôle du TIMS (*Train Integrity Monitoring System*).

Ainsi, en niveau 3, il n'est plus nécessaire d'avoir des circuits de voie, ou compteurs d'essieux, pour vérifier l'état d'occupation des cantons. Comme il n'y a plus de contrainte physique de découpage des cantons, il devient possible d'utiliser le principe du canton mobile (moving block). La signalisation latérale n'est plus nécessaire, à l'instar du niveau 2. Des Eurobalises de relocalisation sont installées si le positionnement du train est estimé par odomètres. Si le positionnement est estimé à l'aide d'une navigation embarquée, dont l'erreur de positionnement n'est pas cumulative dans le temps, alors le nombre de balises de relocalisation peut être réduit.

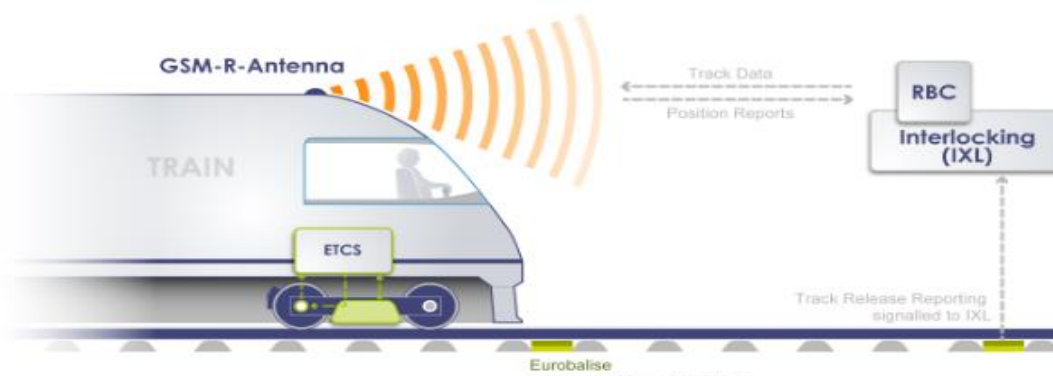


FIGURE 19 : L'EQUIPEMENT DE VOIE A DISPARU. LE POSITIONNEMENT DU TRAIN ET SON INTEGRITE NE REPOSENT PAS SUR DES EQUIPEMENTS AU SOL (SIGNAUX, DES CIRCUITS DE VOIE OU DES COMPTEURS D'ESSIEUX), MAIS SONT GERES PAR LE TRAIN ET LE RBC.

II.13.6 Le niveau 3 hybride

Le niveau 3 hybride est une méthode d'implémentation particulière du niveau 3, mise au point par le groupe d'utilisateurs de l'ERTMS dans une spécification dédiée. Elle repose sur l'utilisation de cantons virtuels fixes, pour gérer l'espacement des trains qui sont équipés d'un TIMS. Un système au sol de détection des trains reste utilisé, pour gérer l'espacement des trains qui ne sont pas équipés d'un TIMS, ainsi que les modes dégradés.

Le niveau 3 repose sur des pré-conditions, difficilement atteignables à ce jour. Notons entre autres :

- E
n niveau 3, l'espacement des trains est directement géré par ERTMS/ETCS, reposant sur la position, la longueur et l'intégrité des trains. Chaque train doit être équipé d'un TIMS, qui surveille l'intégrité du train, et la reporte au bord ERTMS/ETCS. Le bord utilise cette information lors de l'envoi de sa position au sol ERTMS/ETCS. A ce jour, l'utilisation de TIMS pour les trains à composition variable est complexe. Les trains de fret posent particulièrement problème.
- L
l'absence totale de système au sol de détection des trains, suppose que le sol ERTMS/ETCS niveau 3 connaît à tout instant la position et l'intégrité de l'ensemble des trains présents sur sa zone de supervision. En pratique, cela n'est pas toujours possible pour différentes raisons :
 - L
le train est en mouvement via des procédures opérationnelles, et n'est plus sous la supervision totale d'ERTMS/ETCS,
 - P
perte de liaison radio.
- L
Le niveau 3 hybride est une réponse intéressante aux problématiques posées par le niveau 3. En effet, le maintien d'un système de détection des trains permet, entre autres :
 - d
de gérer des trains de fret, dont la gestion de l'intégrité est complexe à ce jour. Elle sera facilitée par la mise en œuvre du coupleur automatique numérique (DAC) d'ici plusieurs décennies,
 - d
de gérer les trains déconnectés du sol en niveau 3 hybride, puisqu'ils restent détectés par le système de détection au sol. Cela est particulièrement intéressant pour les mouvements par procédure (le bord est déconnecté du niveau 3 hybride), ou en cas de redémarrage du sol suite à un crash,
 - D
Dans son concept, le niveau 3 hybride n'utilise pas le canton mobile virtuel, mais le canton fixe virtuel. Ce choix est justifié pour des raisons de meilleure compatibilité avec les équipements existants de signalisation : RBC, Enclenchements et Gestion de trafic. Si le découpage des cantons fixes

virtuels est assez fin, alors la performance atteignable peut-être similaire au canton mobile virtuel.

II.14 Architecture de l'ERTMS/ETCS ERTMS

Lors de la spécification du système ERTMS/ETCS, l'interopérabilité mais aussi l'interchangeabilité des composants étaient des conditions de départ. En effet : l'objectif est de pouvoir passer les frontières sans encombre, mais aussi de pouvoir faire fonctionner un équipement ETCS Bord d'Alstom avec un équipement ETCS Sol de Siemens par exemple. Ceci afin d'éviter tout problème de compatibilité entre des équipements ETCS provenant de fournisseurs différents.

La spécification ERTMS/ETCS a abouti à un système dont l'architecture est ouverte, avec des interfaces FFFIS (Form-Fit Function Interface Specification).

II.14.1 La partie bord de l'ETCS comprend :

- **BIU/TIU** : le module en interface avec le train, notamment pour activer le freinage d'urgence
- **DMI** : l'écran en cabine
- **Juridical data** : la fonction d'interface avec l'enregistreur juridique à bord du train
- **BTM** : Balise Transmission Module, le dispositif de communication avec les Eurobalises
- **LTM** : Loop Transmission Module, le dispositif de communication avec les Euroloops
- **Euroradio** : le module de communication radio via GSM-R
 - La partie sol de l'ETCS comprend :
- **RIU** : Radio Infill Unit, un dispositif d'anticipation par radio en amont du signal
- **RBC** : Radio Block Center, le système élaborant les messages en fonction de l'état d'occupation des circuits de voie et itinéraires verrouillés par le système d'enclenchement. Ces messages transmettent notamment l'autorité de mouvement
- **Eurobalises** : un dispositif ponctuel de transmission de données
- **Euroloop** : un dispositif d'anticipation par boucles inductives en amont du signal

Les systèmes autour du scope ETCS (en vert) sont :

- **LEU/Interlocking** :
 - **LEU** : les électroniques au pied de signal dont l'objectif est de convertir l'état du signal en télégramme ETCS
 - **Interlocking** : les systèmes d'enclenchement
- **Control Centre** : système de gestion de trafic
- **National System** : le système national de signalisation (dont les systèmes de classe B)

- **KMC** : Key Management Centre, le gestionnaire des clés cryptographiques, utilisées pour sécuriser les communications Euroradio
- **PKI** : Public Key Infrastructure, le gestionnaire de certificats numériques

Le déploiement de l'ERTMS peut alors être réalisé sous la contrainte :

- **Economique** : afin de pouvoir bénéficier de subventions européennes, par exemple pour la construction de lignes nouvelles,
- **Technique** : si le fournisseur du système de classe B décide de ne plus le maintenir.

Mais plutôt que de subir le déploiement de l'ERTMS, il est possible de le tourner en un avantage pour les entreprises ferroviaires. Cet avantage-là, c'est pouvoir alimenter un équipement ETCS-Bord avec une information qui existe déjà : la signalisation latérale. C'est le principe du niveau 1, avec le LEU qui récupère l'état du signal, et qui transmet le télégramme ETCS associé à la balise.

Plutôt que de déployer des équipements le long de la voie (LEU et balises), pourquoi ne pas faire cette acquisition directement à bord ? Les progrès techniques permettent aujourd'hui d'envisager ce cas.

II.15 ERTMS/ATO : le futur train autonome

Le train autonome fait l'objet de spécifications, développements et essais. Il figure parmi les éléments clés pour augmenter la capacité et la flexibilité du système ferroviaire.

L'ERTMS/ETCS est un élément central du train autonome. En effet, il est indispensable dans la solution ATO over ETCS (aussi appelée ERTMS/ATO), permettant la traction et le freinage automatique, en présence d'un conducteur. A terme, il aura pour objectif de superviser le train dans les niveaux d'autonomie GoA3 et GoA4.

II.16 ATO over ETCS

Lors de la conception de l'ERTMS/ETCS, il n'était pas prévu d'y accoler un autopilote, permettant de gérer automatiquement la traction et le freinage du train en présence d'un conducteur (GoA2).

ATO over ETCS intégrera la révision 2022 de la spécification technique d'interopérabilité – Contrôle-Commande et Signalisation. [9]

II.17 Les avantages du GSM-R sur les balises

Nous avons vu précédemment que les systèmes ETCS niveau 1 et 2 utilisent des **eurobalises** pour transmettre les données nécessaires au recalage de l'odométrie. Les informations du sol (données relatives à la voie, à l'itinéraire, ...) sont transmises :

- En ETCS niveau 1, **uniquement par les eurobalises** ;
- En ETCS niveau 2, périodiquement et lors de toute modification, par **le RBC** (Radio Block Center) via la liaison **GSM-R**.

Les eurobalises ont pour inconvénients de ne transmettre de l'information que **ponctuellement**, de sorte que le train s'en tient aux dernières informations transmises avant de pouvoir obtenir de nouvelles informations aux balises suivantes, ce qui fait perdre de précieuses secondes, voire une bonne minute. Ainsi, un train qui a été invité à freiner et à rouler à 40km/h devra attendre son passage au-dessus des balises suivantes, parfois lointaines, avant d'obtenir une nouvelle information lui indiquant qu'il peut reprendre de la vitesse. Cette perte de temps limite la capacité d'une voie en trains par heure.

De manière schématique, le GSM-R évite ces inconvénients. Il transmet les informations **de manière permanente**, et non plus ponctuellement, quelle que soit la position du train. Cela permet, si les conditions sont remplies, de déclencher une invitation à la reprise de vitesse **à tout moment**, ce qui peut faire gagner de précieuses secondes.

II.18 Conclusion

20 ans après avoir été spécifié par les opérateurs et industriels, le système européen de signalisation ERTMS/ETCS reste encore peu déployé, que ce soit sur les infrastructures au sol, ou bien sur les engins moteurs.

La lente progression de l'ERTMS/ETCS permet de maintenir en place des systèmes de classe B, obsolètes et propriétaires. Ils représentent une barrière technique pour l'accès à un marché, et un casse-tête pour les opérateurs de passagers et de fret traversant plusieurs frontières.

L'analyse de la norme GSM-Rail permettra d'évaluer sa capacité à étendre la couverture des communications, ce qui est essentiel pour assurer une connectivité constante tout au long du réseau ferroviaire.

III. CHAPITRE III : ANALYSE DES AVANTAGES ET DEFIS DE LA MISE EN OEUVRE DE LA NORME GSM-Rail SUR LES COMMUNICATIONS FERROVIAIRES

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, On a fait une analyse de la mise en œuvre de la norme GSM-Rail sur les communications ferroviaires en l'Algérie.

Sur la ligne des hauts-plateaux de BOUGHEZOUL a TISSEMSILT.

Projet Tissemsilt-Boughezoul (TB) GSM-R chez ANESRIF, le bureau de contrôle, ESTEL RAIL AUTOMATION spa.

III.2 Groupes constituant le marché GSM-R

III.2.1 Le gestionnaire de l'infrastructure et les opérateurs ferroviaires

Pays	Gestionnaire infrastructure :	Opérateur(s) ferroviaire(s) :
Algérie	ANESRIF	SNTF
Allemagne	DB Netz	DBAG
Belgique	Infrabel	SNCB
Espagne	ADIF	RENFE
Finlande	RHK	VR
France	SNCF Réseau Eurotunnel	SNCF
Royaume Uni	Network Rail	Liste des

FIGURE 20 : LES DIFFERENTS GROUPES QUI CONSTITUENT LE MARCHÉ DU GSM-

R [10]

III.3 Réseau et services

Le réseau GSM-R est composé de 3 sous-systèmes principaux :

- Le sous-système BSS (réseau d'accès)
- Le sous-système NSS (réseau cœur par commutation de circuits).
- Les plates-formes d'application sont connectées au NSS afin de fournir les services nécessaires aux applications ferroviaires GSM-R.

Les hypothèses d'implantation des équipements sont :

- Abris dédiés GSM-R le long des voies (Gares ou PCG)
- Isolé entre deux stations ou dans le périmètre d'une gare

III.4 DESCRIPTION DU RESEAU DE SIGNALISATION

III.4.1 SIGNALISATION BSS

Le schéma ci-dessous représente le trafic de signalisation dans les interfaces Abis, Ater, A :

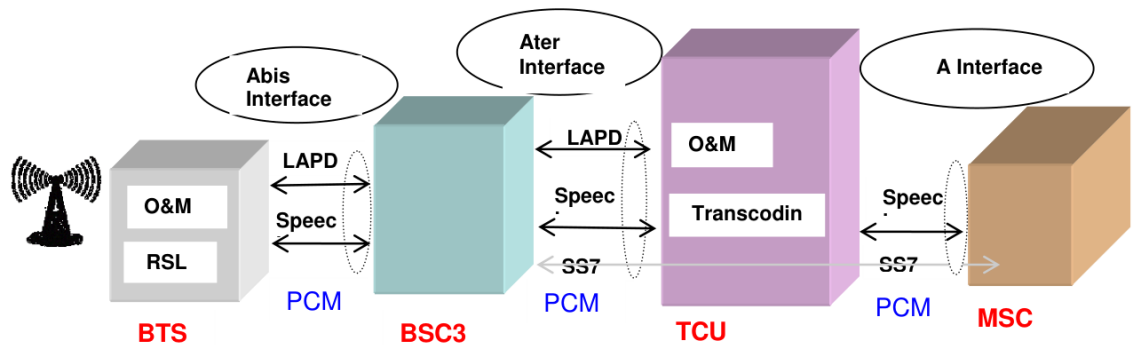


FIGURE 21 : TRAFIC DE SIGNALISATION BSS

III.4.2 Signalisation Abis

Deux types de signalisation sont transportés par l'interface Abis. Le premier type se réfère à l'« Opération et Maintenance » et concerne tous les composants (BCF, TRX, système de Couplage, PA,...).

Le second concerne la gestion du trafic et est destiné au module TRX. Tous les modules reçoivent la signalisation O&M, mais seul le TRX reçoit la signalisation « O&M et gestion du trafic » provenant de l'interface Abis. Ces 2 types de signalisation sont transportés par le canal LAPD.

Un seul canal LAPD par BTS est nécessaire pour la signalisation de la BTS6000 en configuration standard

Signalisation Ater

L'interface Ater transporte la signalisation suivante :

LAPD, en utilisant des liens LAPD pour des messages de contrôles entre BSC3000 et TCU3000 avec un débit de 64Kb/s.

III.4.3 Signalisation interface A

La signalisation interface A est transportée avec des canaux de sémaphore du protocole CCS7 et sert à la connexion au MSC du réseau.

III.5 PRESENTATION GENERALE

Ce document détaille la solution d'ingénierie radio de la couverture par un réseau GSM-R de la ligne Tissemsilt – Boughezoul de toute la ligne du PK 0 (Gare de Tissemsilt) au PK 131 (Boughezoul)

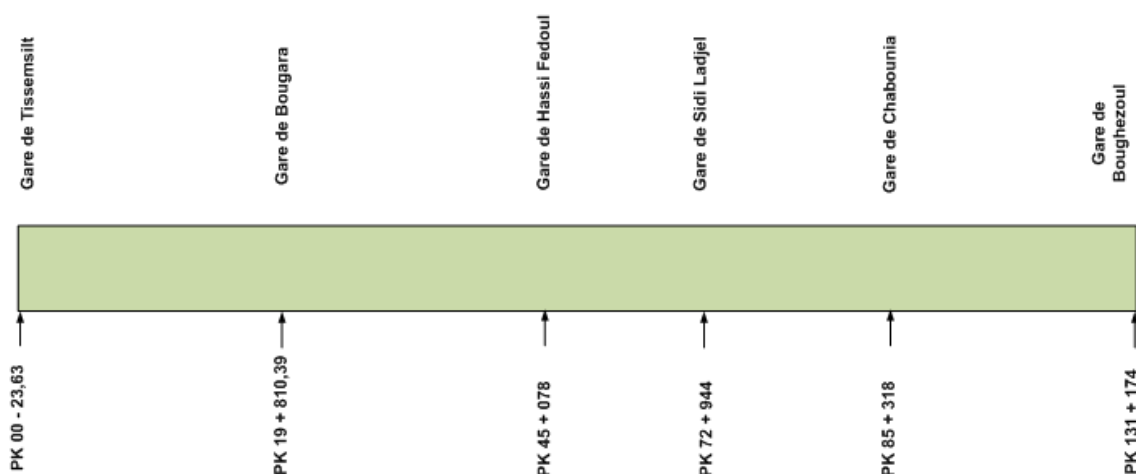


FIGURE 22 : DESCRIPTION DE LA LIGNE TISSEMSILT - BOUGHEZOUL EN PK

Cette ligne ferroviaire comporte les gares suivantes :

- Gare de Tissemsilt (PK00 -23,63) Gare Voyageurs et marchandises.
- Gare de croisement 16 (PK11+055) Gare Optionnelle.
- Gare de Colonel Bougara (PK19 + 810,39) gare secondaire.
- Gare de croisement 17 (PK 31+505).
- Gare de Hassi Fedoul (PK45 + 078) gare secondaire.
- Gare de croisement 18 (PK58+356) Gare Optionnelle.
- Gare de Sidi Ladjel (PK72+944) gare secondaire.
- Gare de Chabounia (PK85+318) gare secondaire.
- Gare de croisement 19 (PK97+563) Gare Optionnelle.
- Gare de croisement 19a (PK 108+298).

- Gare de croisement 20 (PK118+222) Gare Optionnelle [11]

III.6 SERVICES ET EQUIPEMENTS

III.7 SERVICES ASSURES

Conformément aux exigences contenues dans l'appel d'offre, le réseau GSM-R assurera les services voix (appels point à point, appel d'urgence, diffusion d'appel, appel de groupe et conférence) et les services données (Transmission de données).

D'un point de vue couverture radio, le service assuré a les caractéristiques suivantes :

- Une probabilité de couverture de 95% basée sur un niveau de champ de 38,5 dB μ V/m (-98 dBm), conformément aux recommandations EIRENE.
- La couverture est simple, et non double, c'est-à-dire qu'il y a assez de recouvrement entre deux sites adjacents pour satisfaire le succès des procédures de handover et de reselection dans le cas de deux sites adjacents fonctionnels.
- Le niveau de couverture doit être supérieur ou égal au seuil au moins durant 95% du temps, et sur 95% de la zone de couverture pour un équipement radio installé sur un véhicule avec une antenne extérieure.
- Le système est conçu pour soutenir des communications voix et des données non critiques à une vitesse maximale du train de 160 Km/h.

III.8 . EQUIPEMENTS

III.8.1 CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS MOBILES

Le réseau GSM-R sera dimensionné pour des modules radios de type cabine et des combinés portatifs ayant les caractéristiques suivantes :

Equipement mobile	Puissance de sortie du mobile	Sensibilité du mobile
Module radio de type cabine	8 W / 39 dBm	-104 dBm
Mobile radio à usage général ou opérationnel	2 W / 33 dBm	-102 dBm

FIGURE 23 : CARACTERISTIQUES DES MOBILES

Cab radio 8W :

- Puissance en sortie : 8 W (39 dBm).
- Sensibilité RX : -104 dBm.
- Pertes du câble : 2.0 dB.
- Gain d'antenne: 0 dBd (2 dBi).
- Hauteur de l'antenne : 4 m par rapport au sol.

Combinés portatifs 2W:

- Puissance en sortie : 2 W (33 dBm).
- Sensibilité RX : -102 dBm.
- Pertes du câble : 0 dB.
- Gain d'antenne : -2 dBi

- Hauteur d'antenne : 1,5 m par rapport au sol.

III.8.2 CARACTERISTIQUES DES BTS

Le tableau ci-dessous indique les principales caractéristiques de la BTS 6000

Type de BTS	Sensibilité BTS sans diversité	Sensibilité BTS avec diversité	Puissance de sortie de la BTS	Pertes du duplexeur
BTS 6000	-110 dBm	- 114 dBm	60W	1.4 dB

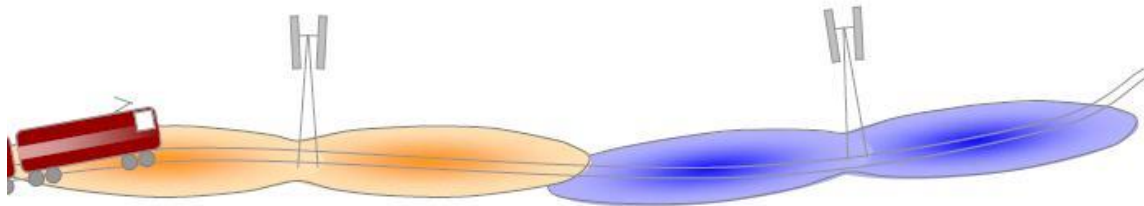
FIGURE 24 : CARACTERISTIQUES DES BTS

Les BTS 6000 sont des stations de base radio placées dans des locaux techniques

III.9 SYSTÈME DE COUPLAGE POUR LES BTS

La configuration standard utilisée dans les réseaux GSM-R est monocellulaire obtenue avec des antennes sectorisées évitant ainsi un changement de cellule (Handover) au pied du site et améliore la qualité globale de service.

La BTS est connectée à deux jeux d'antennes pour constituer une cellule avec une configuration à deux TRX (BTS de type O1+1).



Caractéristiques des BTS

La hauteur des pylônes sur laquelle s'est basé le dimensionnement est de 30m à 40m le long des voies.

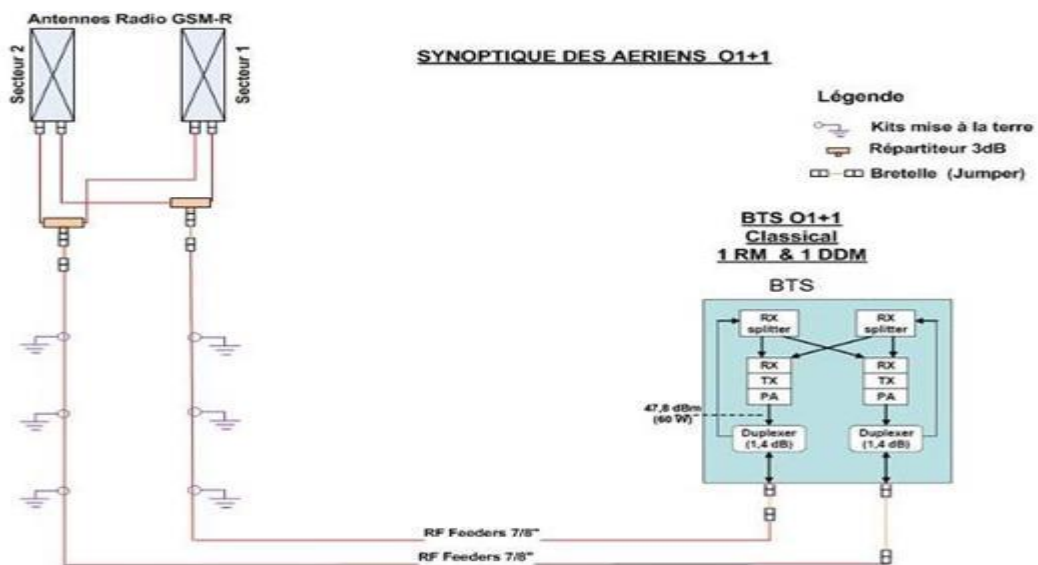


FIGURE 25 : SYNOPTIQUE DES AERIENS O1+1 (TDMA SIMPLE).

III.10 MODELES DE PROPAGATION RADIO

Les modèles de propagation utilisés selon les différents environnements sont issus de la réalisation de

plusieurs campagnes de calibration de modèles de calibration sur l'Algérie et de l'expérience de Kapsch dans des environnements similaires pour des projets GSM-R.

La formule de base est la suivante :

$$P_{RX} = P_{TX} + K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(H_{Tx,eff}) + K_4 \text{Diffraction} + K_5 \log(H_{Tx,eff}) \log(d) + K_6 (H_{Rx,eff}) + K_{clutter} +$$

P_{TX} : Puissance d'émission (PIRE) en dBm

P_{RX} : Puissance de réception en dBm

K_1 : Facteur d'offset constant

K_2 : Facteur relatif à l'impact de la distance entre l'émetteur et le récepteur

K_3 : Facteur relatif à la hauteur effective de l'antenne émettrice

K_4 : Facteur relatif au phénomène de la diffraction

K_5 : Facteur relatif à la hauteur effective de l'antenne émettrice et la distance entre l'émetteur et le récepteur

K_6 : Facteur correctif pour la hauteur du mobile

D : Distance en mètres du mobile par rapport au site

H_{eff} : Hauteur effective de l'antenne par rapport au sol

$K_{clutter}$: relatif à l'impact du type de clutter sur l'atténuation

Gant : Gain de l'antenne

III.11 ANALYSE SPECTRALE DE LA BANDE GSM-R DE LA LIGNE

III.11.1 GÉNÉRALITÉS

Une analyse spectrale a été réalisée le long de la ligne. Le but de cette analyse est de s'assurer de l'absence de tout émetteur dans la bande GSM-R pouvant perturber les futurs BTS et créer de l'interférence. L'analyse spectrale a portée sur le sens Uplink et Downlink.

Il est convenu dans le domaine de la radio, qu'un signal est considéré comme négligeable et n'est pas nuisible si son niveau est inférieur à -95dBm.

III.12 OUTILS DE MESURES

L'analyse spectrale a été faite par l'outil de mesure le scanner TSML-CW Rohde & Schwartz : Analyseur de spectre 80 kHz à 6 GHz

III.12.1 RÉSULTATS DES MESURES

Les deux figures montrent les résultats du scan de la ligne Tissemsilt-Boughezoul

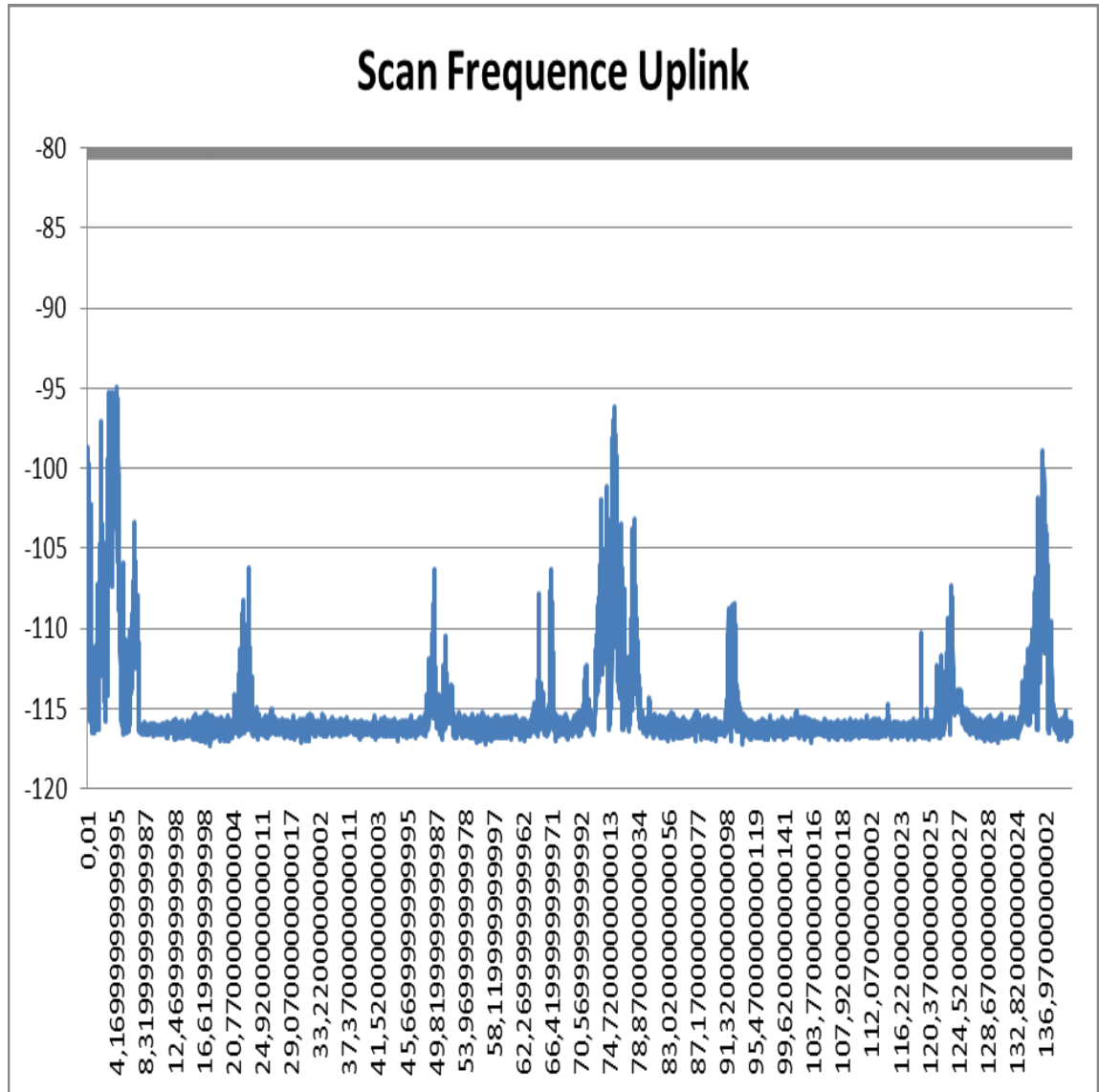


FIGURE 26 : MESURE SCAN DE LA LIGNE EN UPLINK

Les mesures radio de la ligne Tissemsilt à Boughezoul ont confirmées que dans la bande fréquentielle du GSM-R, les signaux reçus sont en majorité inférieurs à -100 dBm ce qui atteste la pureté de cette bande (le seuil étant fixé à -95 dBm).

Cependant il a été constaté quelques pics de niveau de signal radio (-95dBm) à l'approche de site GSM et ceci est le résultat des produits d'intermodulation dans la bande GSM-R.

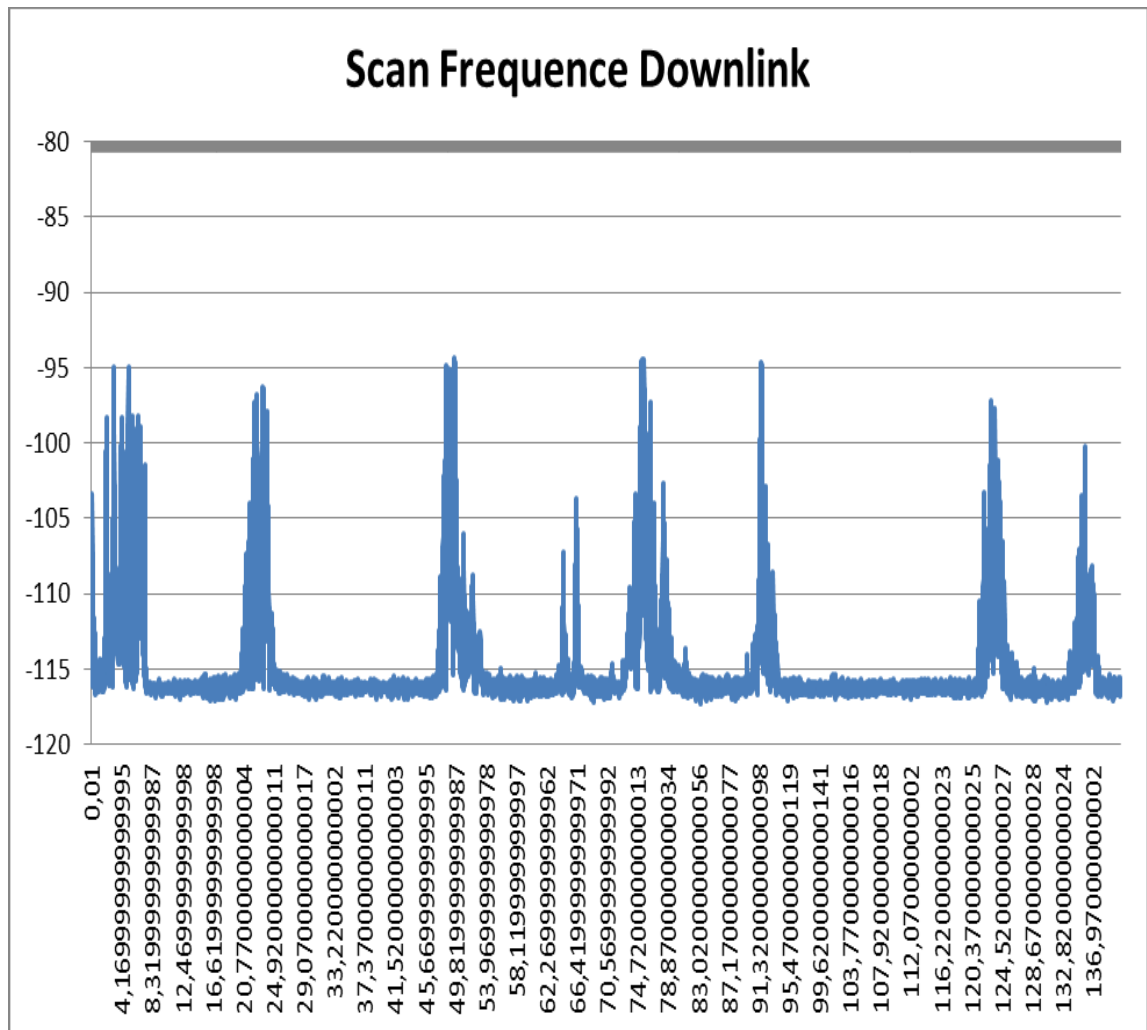


FIGURE 27 : MESURE SCAN DE LA LIGNE EN DOWNLINK

III.13 INGENIERIE RADIO

III.13.1 OUTIL DE PLANIFICATION RADIO

Les prévisions de propagation radio et la planification radio ont été réalisées en utilisant l’outil desimulation **Atoll Version 3.2.1**.

III.14 BILANS DE LIAISON

Le bilan de liaison est utilisé pour calculer l’affaiblissement maximum du signal radio en dB (path loss) entre le mobile et la BTS, correspondant à une configuration d’équipement spécifique, et pour une application donnée.

Un bilan de liaison est calculé pour le sens montant (mobile vers BTS) et pour le sens descendant (BTS vers mobile).

Deux bilans de liaison sont calculés correspondant au cas d’un mobile 8W (Cab radio) et le cas d’un mobile 2W (téléphone portatif).

Les données d’entrées nécessaires pour effectuer ce calcul sont déclinées en trois catégories :

- Les paramètres généraux (liés à la BTS, hauteurs d’antennes, etc..) qui sont indépendants du

- type de service.
- Les paramètres qui dépendent du type de service (par exemple type de mobile).
- Les marges d'ingénierie qui dépendent du type de service, de la vitesse du train et qui
 - permettent de s'assurer que les critères de qualité de service sont respectés.

Les résultats de calcul du bilan de liaison sont :

- PIRE (Puissance Isotropique Rayonnée Emise) ($\text{PIRE [dBm]} = \text{Puissance de transmission [dBm]} - \text{Pertes dans les câbles et connecteurs [dB]} + \text{Gain de l'antenne [dBi]}$),
- OMF : Seuil de Couverture en extérieur (OMF, Outdoor Minimum Field) correspond au niveau de champ spécifié par les standards EIRENE pour les mobiles 8W.

La conformité aux spécifications GSM-R nécessite la satisfaction de 2 types de critère :

- un niveau de couverture,
- une qualité de service.

III.14.1 Overlapping Margin (Marge de recouvrement de cellule)

'L'overlapping margin' a pour but de fournir en bordure de cellule une couverture radio additionnelle pour permettre au mobile se déplaçant à grande vitesse de réaliser dans de bonnes conditions le 'handover' et la re-sélection de cellule.

La valeur de ce paramètre dépend de la durée du processus, des paramètres de la cellule, ainsi que de la vitesse du train.

III.14.2 Quality Margin (Marge de Qualité)

Cette marge a pour but de s'assurer que le récepteur satisfait aux taux d'erreur binaire spécifié pour la vitesse maximale du train, et pour le service concerné (Voix, données en mode Circuit ou Paquet).

La haute vitesse du mobile en environnement GSM-R introduit de l'effet Doppler, ce qui a pour effet de rendre non stationnaire la réponse du canal radio. La marge de qualité prend en compte ce phénomène.

III.14.3 Train Rooftop Margin (Marge d'écran causé par le train)

Cette marge prend en compte l'environnement immédiat de l'antenne du cab radio, notamment la présence de caténaires, air conditionné, etc.

Le placement de l'antenne au milieu d'un tel environnement perturbateur produit des évanouissements du signal radio qui doivent être pris en compte par le biais de cette marge.

Ce paramètre ne concerne pas les combinés portatifs.

III.14.4 Shadow Margin (Marge d'effet de masques)

L'impact des obstacles sur la propagation des ondes radio se traduit par une distribution du niveau de champ suivant une loi log-normale, centrée sur la valeur moyenne. Ce phénomène est plus couramment désigné slow fading ou 'shadowing'. La marge correspondante est celle appliquée au paramètre OMF (Champ minimum en extérieur) pour atteindre la qualité de couverture requise dans la zone concernée.

III.15 COUVERTURE RADIO

III.15.1 STRATEGIE DE COUVERTURE RADIO

Le design radio en extérieur est réalisé en simple couverture (voies chemins de fer, gares, locaux techniques, quais, plateformes tout le long de la voie).

Du fait de la grande mobilité des trains, un plus large recouvrement des cellules est requis pour permettre que le 'handover' et la resélection de cellule soient assurés sans interruption des communications.

Ce point est particulièrement important en GSM-R car les usagers mobiles engagés dans un appel de diffusion ou un appel de groupe (VBS/VGCS) en mode réception réalisent une re-sélection de cellule lors du passage entre deux cellules.

La hauteur des pylônes à 30 mètres a été privilégiée le long des voies. Cette valeur conservatrice permet de contrôler plus précisément l'étendue de la couverture radio dans tous les environnements de propagation.

Néanmoins et afin d'augmenter la distance intersites, lorsque les conditions de propagations le permettent (milieu ouvert), l'emploi de pylônes de 40 mètres de hauteur et d'antennes à haut gain est privilégié permettant ainsi une meilleure couverture.

Lors de la planification radio, les gares et points de signalisation ferroviaire de chaque tronçon ont été pris en considération et utilisés en priorité comme emplacement pour les BTS de sorte à maximiser la réutilisation de l'infrastructure existante. La liste des gares de croisement fourni par **ESTEL RAIL AUTOMATION** spa ont été privilégié comme emplacements des futurs sites à chaque fois que les contraintes techniques de la couverture radio et de la qualité de services le permettaient.

Afin d'optimiser le nombre de sites requis pour couvrir la ligne Tissemsilt Boughezoul, la BTS de puissance maximale égale à 60W est utilisée pour assurer la couverture radio.

Des antennes à polarisation croisées sont utilisées afin d'avoir de la diversité de polarisation, ce qui permet de maximiser la sensibilité de la BTS et augmenter la qualité de couverture. [11]

III.16 STRATEGIE DU PLAN DE FREQUENCE

La bande de fréquence attribuée au GSM-R par les instances de normalisation est de :

[876 Mhz – 880 Mhz] en sens montant (Uplink)

[921 Mhz -925 Mhz] en sens descendant (Downlink).

L'espace entre deux canaux consécutifs est de 200Khz; La bande spectrale allouée au GSM-R contient 20x200 KHz canaux. Le canal de fréquence la plus haute est un canal réservé appelé canal de garde.

Seul 19 canaux sont donc disponibles pour l'établissement du plan de fréquence.

L'objet du plan de fréquences est de minimiser le niveau d'interférences radio au sein du réseau dans la mesure où le même lot de 19 fréquences est réutilisé.

Le principe de l'établissement du plan de fréquence dans un réseau GSM-R est d'allouer des fréquences fixes. Cette allocation est faite de telle façon à avoir une séparation maximale de Co-canal et de canal adjacent des cellules voisines. La distance de réutilisation des fréquences est ainsi maximale afin d'assurer une bonne isolation entre les canaux.

Afin de réduire le niveau d'interférence, Kapsch recommande un minimum de 600 KHz entre deux fréquences appartenant au même site et un minimum de 400 KHz entre deux fréquences appartenant à deux sites voisins.

III.17 RESULTATS DE LA PLANIFICATION RADIO

III.17.1 POSITIONS ET CARACTERISTIQUES DES SITES

Le tableau 7-1 contient la liste des sites résultant des études de simulation et affinés par les observations.

Dans ce tableau et pour chaque site, les caractéristiques radios suivantes sont indiquées :

- Position du site, en format Latitude/Longitude (données: WGS84, UTM zone: 31N)
- Hauteur de pylônes/mats et hauteur à la base de l'antenne.
- Azimut.

La figure donne une vue générale des sites candidats le long de la ligne.



FIGURE 28 : POSITIONNEMENT GEOGRAPHIQUE DES SITES CANDIDATS [11]

III.17.2 CARTES DE COUVERTURE PAR SITE

- TB01 : Gare de Tissemsilt
- TB02 Gare de Tissemsilt + 4,994
- TB03 : Gare de Tissemsilt + 9,533
- TB04 : Gare de Tissemsilt + 14,626
- TB05 : Gara de Bougara
- TB06 :PCG17
- TB07 : Gare de Hassi Fedoul
- TB08 : Gare de Hassi Fedoul + 13,271
- TB09 : Gare de Sidi Laadjel
- TB10 : Gare de Chahbounia
- TB11 : Gare de Chahbounia + 9,556

- TB12 : PCG19a
- TB13 : PCG19a +12,463
- TB14 : Gare de Boughezoul

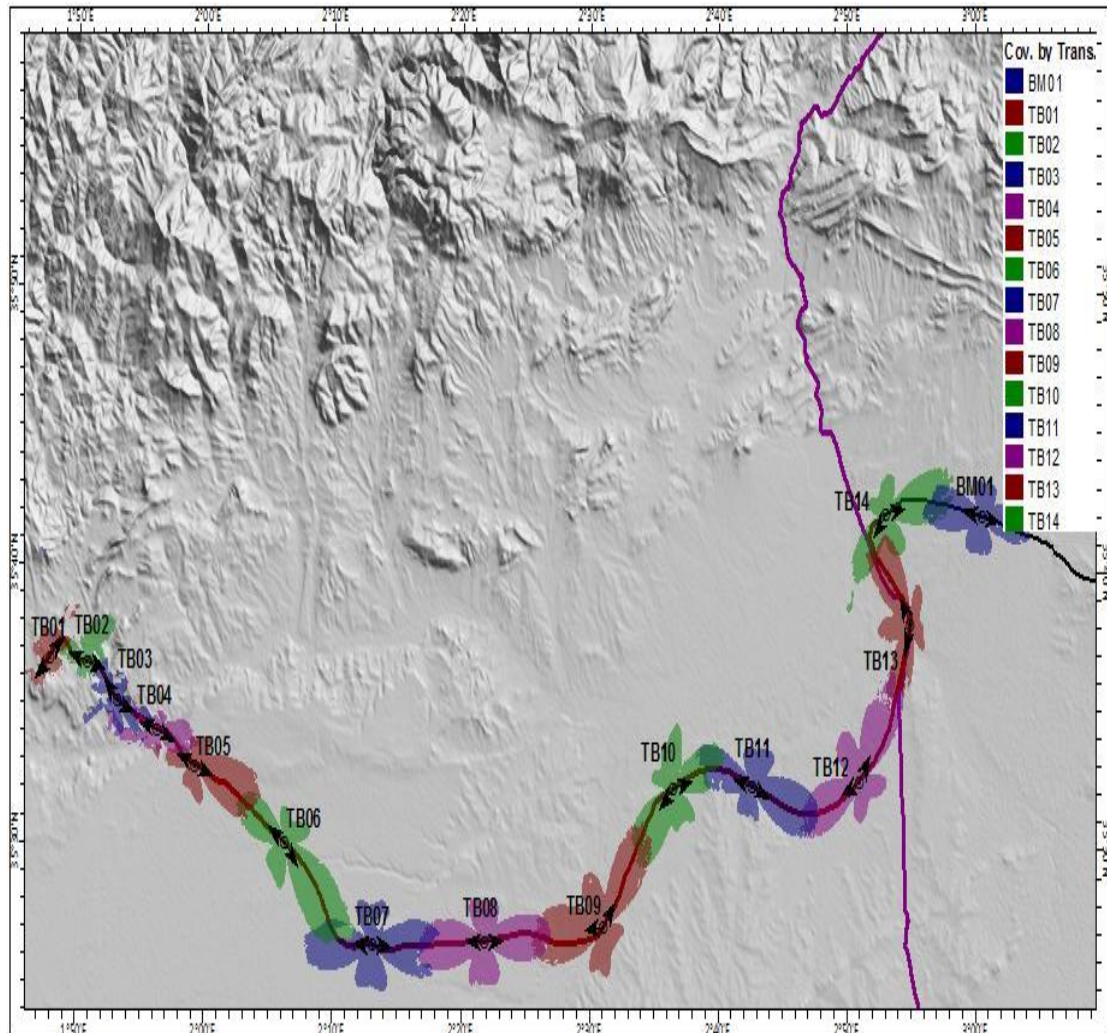


FIGURE 29 : CARTE DE DE COUVERTURE PAR SITE DE LA GARE DE TISSEMSILT A LA GARE DE BOUGHEZOUL

III.17.3 CARTES D'INTERFERENCES

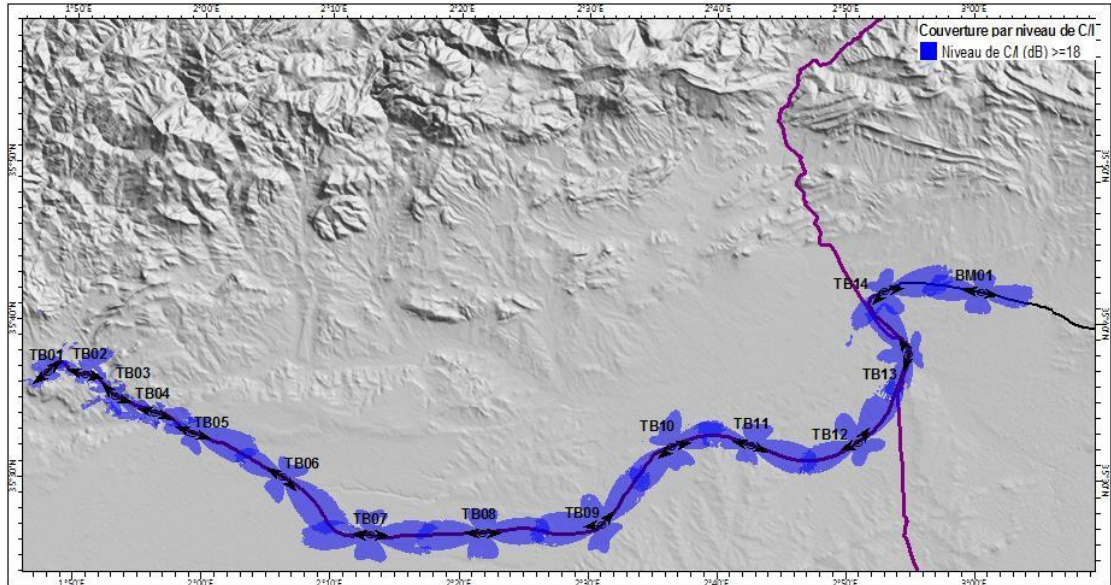


FIGURE 30 : CARTE D'INTERFERENCE C/I DE LA GARE DE TISSEMSILT A LA GARE DE BOUGHEZOUL

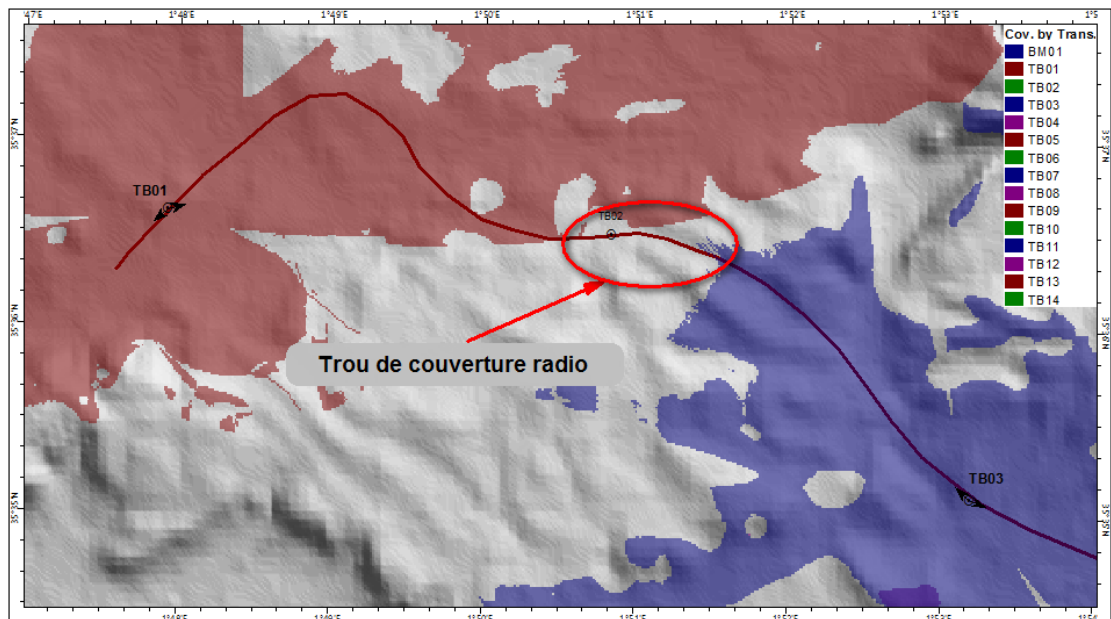


FIGURE 31 : CARTE DE COUVERTURE PAR SITE ENTRE LA GARE DE TISSEMSILT AU PK10 EN DESACTIVANT TB02

- On constate un trou de couverture radio entre la gare de Tissemsilt et le PK 10.

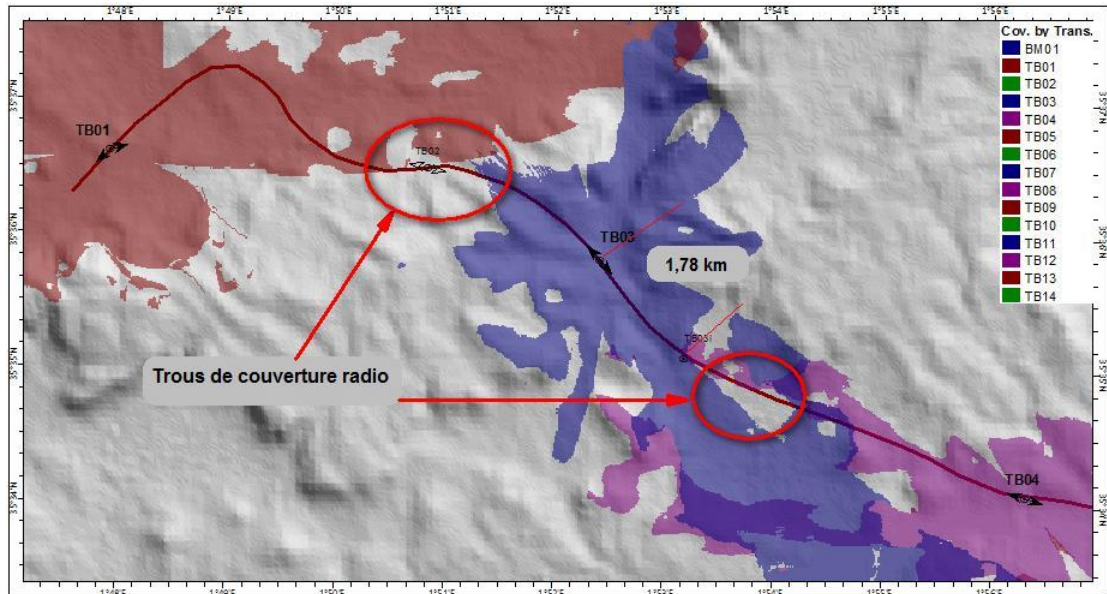


FIGURE 32 : CARTE DE COUVERTURE PAR SITE ENTRE LA GARE DE TISSEMSILT AU PK10 AVEC DEPLACEMENT DU SITE TB03 [11]

La figure ci-dessus montre la carte de couverture par site entre la gare de Tissemsilt au PK10 en déplaçant le site TB03 de 1,7 km en direction de TB01 afin de combler le trou de couverture radio en désactivant le site TB02.

Toutefois le trou de couverture radio n'est pas complété par contre on constate un deuxième trou en direction du TB04.

Le site TB02 est bien nécessaire à notre couverture radio entre Tissemsilt et le PK10.

III.18 Conclusion

Les réseaux de communications ferroviaires doivent être en mesure de fournir une couverture étendue pour garantir des communications sans interruption, même dans les zones rurales et isolées. L'analyse de la norme GSM-Rail permettra d'évaluer sa capacité à étendre la couverture des communications, ce qui est essentiel pour assurer une connectivité constante tout au long du réseau ferroviaire. Même dans les situations d'urgence, il est crucial de garantir une communication prioritaire pour les appels d'urgence entre les trains et les centre de contrôle.

IV. Conclusion générale

Les systèmes de communication jouent un rôle crucial dans la sécurité et l'efficacité des opérations ferroviaires. L'analyse de la norme GSM-Rail permettra d'évaluer son potentiel à améliorer la fiabilité des communications entre les trains, les opérateurs et les centres de contrôle. Une meilleure fiabilité des communications peut réduire les risques d'incidents et d'accidents ferroviaires.

Une communication efficace et fiable contribue à l'efficacité des opérations ferroviaires en permettant une coordination optimale entre les différentes entités des systèmes, telles que les conducteurs de train, les opérateurs et les centres de contrôle. L'analyse de la norme GSM-Rail permettra de comprendre comment elle peut améliorer l'efficacité opérationnelle en facilitant les échanges d'informations et en réduisant les retards et les erreurs de communications.

Évolution des technologies de communication : Dans un contexte où les technologies de communication évoluent rapidement, il est essentiel de comprendre les avantages et les défis de l'adoption de nouvelles normes telles que la GSM-Rail.

L'analyse de cette norme permettra d'anticiper les opportunités et les contraintes liées à son implémentation, tout en favorisant une prise de décision éclairée sur l'adoption de technologie de communication ferroviaire.

V. Références

- 1] [«eduscol.education.fr,» [En ligne]. Available: <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/12390/12390-ressource-gsm-r.pdf>.
- 2] [C. DEMOULIN, 'Principe de Base du Fonctionnement du réseau GSM, 2004.
- 3] [M. Charbit, 'Système de communication et théorie de l'information', 2003.
- 4] [F. Xiong., "Digital Modulation Techniques", Artech house, Artech house.
- 5] [«www.mediarail.be,» [En ligne]. Available: <https://www.mediarail.be/Infrastructure/Signalisation/ERTMS/GSM-R.htm>.
- 6] [«www.techno-science.net,» [En ligne]. Available: <https://www.techno-science.net/definition/9700.html>.
- 7] [O. M. N. B. J. L. M. W. Grégory Buchheit, «hal.science,» [En ligne]. Available: <https://hal.science/hal-00589555>. [Accès le 29 Apr 2011].
- 8] [«<https://www.thalesgroup.com/fr/marches/transport/signalisation/solution-s-signalisation-des-grandes-lignes/european-train-control>,» [En ligne].
- 9] [«voie-libre.com,» [En ligne]. Available: <https://voie-libre.com/ertms/>.
- 10] [«fr.wikipedia.org,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/GSM-R>.
- 11] [ESTEL Rail Automation Spa, Radio Design, 2017.