

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

M^{elle} CHIBANI Samia

&

M^{elle} HEULLALI Fethia

pour l'obtention du diplôme de Master en génie électrique

option : Réseau & Télécommunication

Thème

Étude et simulation d'une chaîne de transmission TETRA

Proposé par : Dr. ANOU Abderrahmane

Année Universitaire 2012-2013

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu « ALLAH » pour nous avoir permis d'arriver là où nous sommes, et d'avoir donné la force, la santé et la capacité pour réaliser ce modeste travail.

Nos sincères remerciements à nos chers parents qui étaient toujours derrière nos réussites et notre avancement dans nos études.

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements et notre profonde gratitude à Monsieur ANOU Abderrahmane notre encadreur, pour nous avoir dirigé et soutenu le long de ce travail.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à madame AZIN Houria, pour son aide et son soutien pendant la réalisation de ce projet et sa disponibilité à tout moment.

Nous adressons nos vifs remerciements aux membres du jury, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Sans oublier tous les enseignants qui nous ont encadrés durant nos années d'études.

Un grand merci à l'ensemble du personnel de département d'électronique, sans oublié notre délégué KHIAR Abdelbari

Et pour terminer, nous remercions vivement nos camarades de la promotion 2013, (H. Saida, N. Wissam, B. Nabila, A. Lilia, L. Meriem, Z. Chahra, H. Ghania, S. Akila) et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin



Je dédie ce travail :

À ma très chère mère pour son soutien et tous les efforts qu'on m'a donnée le long de mon parcours et je lui souhaite bonne santé et longue vie.

À mon père (الله يرحمه), depuis que tu nous as quittés, sache que je pense toujours à toi. Que je te porte tous les jours dans mon cœur. Tu es pour moi un exemple de père que j'aimerais devenir. Merci d'avoir toujours été le père que je rêvais d'avoir.

À mes sœurs : Leila et son marie, Nassima, Radia, Sabrina, en leurs souhaitant la réussite dans leurs vies.

À mes frères : «Djamel et son épouse Saliha» «Mohamed et sa femme Karima»

À mon petit frère Youcef.

À la joie de ma vie, les anges de paradis «Amine, abdeljallil, Wassim ».

À toute ma famille proche soit-elle ou lointaine.

À mon oncle Hakime et sa femme Razika.

À mon binôme Fethia et toute sa famille. En lui souhaitant le succès dans sa vie aussi bien professionnelle que familiale.

À tous mes amies :Affafe ,Kenza ,Khadîdja,

Messouda ,Wafa, Yamina, Amina, Meriem.

À tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail de prêt ou de loin.

Et à tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Samia

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes parents qui me sont les plus chers au monde.

À la joie de ma vie, un ange de paradis « Wassim »

*À mes chères sœurs: Amina et son mari Abdelkader, Asma,
Samira et Zineb.*

À mon cher frère : Abderrahim.

À toute la famille HEULLALI surtout mes grandes mères.

À mon soleil de ma vie: Amina. Et à ma lune: Meriem.

À mon compagnon de tous les jours: Samia et sa famille.

*À mes très chères amies: Wafa, Yamina, Soumia, Meriem
Khadidja, Selma, Nabila, Amina*

*À tous mes amis, mes camarades de la promotion 2013,
et mes collègues.*

À tous ceux qui me sont chers.

Fethia

ملخص: الهدف من هذا المشروع هو دراسة ومحاكاة لسلسلة من البث الرقمي على الوصلة الصاعدة لنظام تترا. ويستند تشغيل هذه الشبكة على تقنية من الوقت بالتقسيم فتحات TDMA 4 مرات / الناقل. العناصر الأساسية من هذه السلسلة هي ترميز / فك التشفير والتشكيل / الإستخلاص ($\pi / 4$ DQPSK)، و النمذجة سلسلة البث لدينا عبر SIMULINK / ماتلاب. وكانت جميع الكتل محاكاة والتحقق من صحتها، وتمت مناقشة دور كل كتلة وتقييمها.

كلمات جوهرية : AWGN, $\pi/4$ DQPSK, décodage de Viterbi, codage convolutif, TDMA, TETRA

Résumé: L'objectif de ce projet est l'étude et de simulation d'une chaîne de transmission numérique sur la voie montante d'un système TETRA. Le fonctionnement de ce réseau est basé sur la technique du multiplexage temporelle TDMA avec 4 times slots/porteuse. Les éléments essentiels de cette chaîne sont le codage/décodage, modulation/démodulation ($\frac{\pi}{4}$ DQPSK), en modélisant notre chaîne de transmission via le logiciel Simulink/Matlab. Tous les blocs ont été simulés et validés et le rôle de chaque bloc a été discuté et évalué.

Mots clés: TETRA, TDMA, codage convolutif, décodage de Viterbi, $\pi/4$ DQPSK, AWGN.

Abstract: The objective of this project is to study and simulate digital transmission chain of the rising of a TETRA system path. The operation of this network is based on the technique of time division multiplexing TDMA slots 4 times / carrier. The essential elements of this chain are the coding and decoding, modulation and demodulation $\pi / 4$ DQPSK, modeling our transmission chain via Simulink / Matlab. All blocks were simulated and validated, and the role of each block was discussed and evaluated.

Keywords: TETRA, TDMA, convolutional encoding, Viterbi decoding, $\pi / 4$ DQPSK, AWGN.

Listes des acronymes et abréviations

$\pi/4DQPSK$	Differential Quadrature Phase Shift Keying
(R)BS	(Radio) Base Station, Base Station
AACH	Assign and Access CHannel
AI	Air Interface
ASCCH	ASsociated Control CHannel
AVL	Automatic Vehicle Location
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCCH	Broadcast Common CHannel
BNCH	Broadcast Network CHannel
BSCH	Broadcast Synchronisation CHannel
BTS	Base Transceiver Station
CBS	Canal Binaire Symétrique
CC	Codage Convolutif
CCH	Common Control CHannel
CMCE	Circuit Mode Control Entity
DMO	Direct Mode Operation
DWS IF	Dispatcher WorkStation InterFace
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FAACH	Fast Assign and Access CHannel
FDMA	Frequency Division Multiplication Access
GSM	Global System for Mobile communications
GW IF	GateWay InterFaces
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISI	Inter System Interface
ISSI	Inter SubSystem Interface
IT	Intervalles de Temps
LCH	Linéarisation CHannel
LLC	Logical Link Control
LS	Location System
LSI	Ligne Station Interface
MAC	Media Access Control
MCCH	Main Control CHannel

MLE	Mobile/base Link control Entity
MM	Mobility Management
NMI	Network Management Interface
NRNSC	Non Récursifs et Non Systématiques
OQPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection
PA	PAquets
PD	Packet Data
PDO	Packet Data Optimized
Pe	Probabilité d'erreur
PEI	Peripheral Equipment Interface
PMR	Professional Mobile Radio
PSTN	Public Switched Telephone Network
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RS	Reed-SOLOMON
RSC	Récursifs et Systématiques
SAACH	Slow Assign and Access CHannel
SCCH	Secondary Control CHannel
SCH	Signalling CHannel
SDS	Short Data Service
TBS	TETRA Base Station
TDMA	Time Division Multiplication Access
TEB	Taux d'Erreur par Bit
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TMO	Trunked Mode Operation
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
V + D	Voice plus Data

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre 1 Transmission numérique	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Caractéristiques de transmission	4
1.3 Codage.....	5
1.3.1 Codage source	5
1.3.2 Codage canal	5
1.4 La modulation	8
1.4.1 La modulation QPSK.....	8
1.4.2 La modulation OQPSK.....	9
1.5 Canal de transmission.....	10
1.5.1 Canal binaire symétrique	10
1.5.2 Canal AWGN	11
1.6 Conclusion	12
Chapitre 2 La norme TETRA (Terrestrial Trunked Radio).....	13
2.1 Introduction.....	13
2.2 Système de radiocommunication à ressource partagé	13
2.3 Les services.....	14
2.3.1 Téléservices	14
2.3.2 Services supports (bearer services).....	16
2.3.3 Services supplémentaires offerts	18
2.3.4 Aspects touchant à la sécurité.	18
2.4 Un exemple d'un réseau TETRA simple.....	19
2.5 Un exemple d'un réseau TETRA à deux sites	21
2.6 Les interfaces de système TETRA	22
2.6.1 Les interfaces standard.....	23
2.6.2 Les interfaces non standards	24
2.7 Mode d'exploitation de système TETRA	25
2.8 Architecture hertzienne.....	26
2.8.1 Canal de signalisation	26
2.8.2 Occupation des canaux de trafic.....	27

2.8.3 Répartition des stations de base.....	28
2.9 Fonctionnement des liaisons radio	29
2.9.1 Gestion de la liaison radio entre mobiles et infrastructure.....	29
2.9.2 Signaux transmis sur l'interface air	31
2.10 Les canaux TETRA	35
2.10.1 Principe des canaux TETRA	35
2.10.2 Les différents canaux physiques TETRA.....	37
2.10.3 Les canaux logiques.....	39
2.11 Protocoles de communication	41
2.12 La différence entre TETRA et GSM	44
2.13 Avantages et inconvénients de TETRA.....	46
2.13.1 Les avantages	46
2.13.2 Les inconvénients	47
2.14 Conclusion	48
Chapitre 3 Simulation et résultats	49
3.1 Introduction.....	49
3.2 Implémentation de La chaine de transmission TETRA.....	49
3.2.1 Bloc de source	51
3.2.2 Bloc de codage canal	52
3.2.3 Bloc de modulation.....	57
3.2.4 Bloc filtre d'émission et de réception	64
3.2.5 Bloc du canal de transmission	66
3.2.6 Bloc de démodulateur	68
3.2.7 Bloc de décodage canal.....	69
3.2.8 Bits reçus.....	70
3.3 Résultats et interprétations.....	70
3.3.1 Le signal trajectoire	70
3.3.2 Le diagramme de constellation.....	71
3.3.3 La visualisation fréquentielle	72
3.4 Simulation de la chaîne de transmission sans codage	74
3.5 Conclusion	75
Conclusion générale.....	76

Liste des figures

<i>Figure 1. 1</i>	Chaîne de transmission d'un système de communications numériques.....	3
<i>Figure 1. 2</i>	Schéma d'implémentation d'un code convolutif à l'aide de registre à décalage.....	6
<i>Figure 1. 3</i>	Diagramme temporel QPSK	9
<i>Figure 1. 4</i>	Diagramme de constellation pour QPSK	9
<i>Figure 1. 5</i>	Diagramme temporel OQPSK	10
<i>Figure 1. 6</i>	Diagramme de constellation pour OQPSK	10
<i>Figure 1. 7</i>	Description d'un canal binaire symétrique.....	11
<i>Figure 1. 8</i>	Le modèle de canal Gaussien.....	12
<i>Figure 2. 1</i>	Présentation différents services de TETRA.....	14
<i>Figure 2. 2</i>	Appel individuel.....	15
<i>Figure 2. 3</i>	Appel de groupe.....	15
<i>Figure 2. 4</i>	Communication de groupe avec accusé de réception.....	15
<i>Figure 2. 5</i>	Appel de diffusion.....	16
<i>Figure 2. 6</i>	Mode direct.....	16
<i>Figure 2. 7</i>	Exemple de fonctionnement d'un réseau TETRA.....	20
<i>Figure 2. 8</i>	Exemple de fonctionnement d'un réseau TETRA à deux sites.....	21
<i>Figure 2. 9</i>	Les interfaces de système TETRA.....	22
<i>Figure 2. 10</i>	Interfaces standards et non standards.....	22
<i>Figure 2. 11</i>	La communication semi/full duplex.....	25
<i>Figure 2. 12</i>	Opération en mode direct.....	25
<i>Figure 2. 13</i>	Présentation la trame de TDMA.....	26
<i>Figure 2. 14</i>	Présentation de canal de signalisation sur un même site.....	27
<i>Figure 2. 15</i>	Diagramme d'organisation des paquets.....	32
<i>Figure 2. 16</i>	Les différents types de paquets.....	33
<i>Figure 2. 17</i>	Présentation d'un paquet.....	34
<i>Figure 2. 18</i>	Les différents canaux de système TETRA.....	36
<i>Figure 2. 19</i>	Classification des canaux.....	36
<i>Figure 2. 20</i>	Affectation des canaux physiques.....	39
<i>Figure 2. 21</i>	Les trois premières couches du modèle OSI.....	43
<i>Figure 2. 22</i>	Spécificités techniques de la norme TETRA.....	45
<i>Figure 3. 1</i>	Implémentation de la chaîne de transmission TETRA.....	50
<i>Figure 3. 2</i>	Bloc générateur Bernoulli.....	51
<i>Figure 3. 3</i>	Bloc codage canal.....	52
<i>Figure 3. 4</i>	Bloc codage convolutif.....	52
<i>Figure 3. 5</i>	Le registre à décalage du codage convolutif.....	54
<i>Figure 3. 6</i>	Bloc générateur PN.....	54
<i>Figure 3. 7</i>	Blocs convertisseurs.....	56
<i>Figure 3. 8</i>	Bloc de modulation.....	57
<i>Figure 3. 9</i>	Structure de la trame TETRA.....	58
<i>Figure 3. 10</i>	Bloc des bits d'extrémité.....	58

<i>Figure 3. 11</i> Bloc de séquence d'apprentissage.....	59
<i>Figure 3. 12</i> Bloc de l'information à transmettre.....	59
<i>Figure 3. 13</i> Bloc de matrice de concatination.....	60
<i>Figure 3. 14</i> Diagramme de constellation.....	62
<i>Figure 3. 15</i> Bloc de modulation DQPSK	62
<i>Figure 3. 16</i> Bloc d'intervalle de garde.....	63
<i>Figure 3. 17</i> Bloc motif de ramping.....	63
<i>Figure 3. 18</i> Bloc filtre d'émission.....	64
<i>Figure 3. 19</i> Bloc filtre de réception.....	65
<i>Figure 3. 20</i> Bloc canal de transmission AWGN.....	66
<i>Figure 3. 21</i> Bloc de retard.....	67
<i>Figure 3. 22</i> Bloc de démodulation.....	68
<i>Figure 3. 23</i> Bloc de démodulateur DQPSK	68
<i>Figure 3. 24</i> Bloc de décodage canal.....	69
<i>Figure 3. 25</i> Bloc de décodeur Viterbi.....	69
<i>Figure 3. 26</i> Signal trajectoire des points de constellation.....	70
<i>Figure 3. 27</i> Constellation Avant / Après canal (SNR=-10 dB).....	71
<i>Figure 3. 28</i> Constellations avant / après canal (SNR=0 dB).....	72
<i>Figure 3. 29</i> Constellations avant / après canal (SNR=30 dB).....	72
<i>Figure 3. 30</i> Spectre fréquentiel du signal avant le filtrage d'émission.....	73
<i>Figure 3. 31</i> Spectre fréquentiel du signal après le filtrage d'émission.....	73
<i>Figure 3. 32</i> Spectre fréquentiel du signal après le canal.....	74
<i>Figure 3. 33</i> Modélisation de la chaîne de transmission sans codage.....	74
<i>Figure 3. 34</i> Performances du système avec et sans codage.....	75

Liste des tableaux

<i>Tableau 1. 1</i> Vecteur de poinçonnage.....	7
<i>Tableau 2. 1</i> Débit TETRA en mode circuit.	17
<i>Tableau 2. 2</i> Les objectifs de sécurité et leurs rôles.	19
<i>Tableau 2. 3</i> Différents types de communications et nombres de canaux utilisés.....	27
<i>Tableau 2. 4</i> Comparaison de sites TETRA.....	28
<i>Tableau 2. 5</i> Comparaison des services offerts par le GSM et TETRA.....	44
<i>Tableau 2. 6</i> Résumé des différences entre GSM et TETRA.	45
<i>Tableau 3. 1</i> Paramètres de bloc générateur de Bernoulli.	51
<i>Tableau 3. 2</i> Paramètre de bloc codeur convolutif.	53
<i>Tableau 3. 3</i> Les polynômes générateurs du code convolutif utilisé.	53
<i>Tableau 3. 4</i> Paramètres de bloc générateur de séquence PN.	55
<i>Tableau 3. 5</i> Paramètres de bloc convertisseur.....	56
<i>Tableau 3. 6</i> Paramètre des blocs des bits d'extrémité.	59
<i>Tableau 3. 7</i> Paramètres de bloc matrice de concaténation.....	60
<i>Tableau 3. 8</i> Les bits d'information et leurs phases.....	61
<i>Tableau 3. 9</i> Paramètre de bloc modulation DQPSK	62
<i>Tableau 3. 10</i> Paramètres de bloc filtre d'émission.	65
<i>Tableau 3. 11</i> Paramètres de bloc filtre de réception.	66
<i>Tableau 3. 12</i> Paramètres de bloc AWGN.	67
<i>Tableau 3. 13</i> Paramètres de bloc de retard.....	67
<i>Tableau 3. 14</i> Paramètres de bloc décodeur Viterbi.	70

Introduction générale

Au cours des dernières années, la demande de services mobiles terrestres a augmenté régulièrement selon le besoin est pour cela la création des systèmes mobiles terrestres numériques de radiocommunication destinés aux opérations de dispatching et de gestion des flottes sont en cours de mise au point dans le monde entier. Certes, par conception, ces systèmes répondent avant tout aux impératifs des diverses applications générales, ou spécifiques, demandées par les groupes d'utilisateurs, mais il faut savoir également qu'ils partagent tous certains objectifs de base et certaines des caractéristiques principales.

Afin de couvrir les thèmes mentionnés ci-haut, le mémoire a été organisé comme suit :

Dans le premier chapitre nous allons présenter les principales notions de base utilisée dans notre étude, commençant par une description d'une chaîne de transmission numérique avec une étude sur le codage canal tel que le codage convolutif. Afin d'adapter le signal au canal et d'améliorer les performances, nous avons traité la modulation *QPSK* et *OQPSK* et nous avons terminé avec quelques types de canaux à savoir le canal binaire symétrique, le canal à bruit blanc additif gaussien.

Le deuxième chapitre décrit la norme TETRA « Terrestrial Trunked Radio » un standard « voix + données » ouvert développé par l'ETSI « European Telecommunications Standards Institute ». Cette technologie est utilisée principalement en Europe. L'ensemble des spécifications du système TETRA assure une capacité radio intégrée et complète pour des communications directes de mobile à mobile avec ou sans partage des ressources avec diverses options qui sont :

- communications vocales,
- transmission de données en mode circuit,
- transmission de brefs messages de données et services en mode paquet.

La norme TETRA offre une gamme tout particulièrement large de services supplémentaires, dont un grand nombre de fonctions exclusives. La norme TETRA peut fonctionner dans les bandes inférieures à 1 GHz et sa structure de canaux de 25 kHz lui permet de s'adapter aisément aux actuelles configurations de radiocommunication personnelle mobile. Elle utilise le principe TDMA. Les données sont aussi cryptées lors de la transmission. L'avantage majeur de cette technologie est fait qu'elle n'est pas propriétaire. De grandes marques telles Motorola, HYT, ou ICOM développées des produits utilisant cette technologie.

Le troisième chapitre est consacré pour les simulations et les performances de notre chaîne de transmission TETRA en MATLAB/SIMULINK afin de valider l'étude théorique.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale résume les idées présentées et énumérant les perspectives est donnée à la fin.

Chapitre 1 Transmission numérique

1.1 Introduction

Les systèmes de transmission numérique véhiculent de l'information entre une source et un destinataire en utilisant un support physique comme le câble, la fibre optique ou encore, la propagation sur un canal radioélectrique. Les signaux transportés peuvent être soit directement d'origine numérique, comme dans les réseaux de données, soit d'origine analogique (parole, image...) mais convertis sous une forme numérique. La tâche du système de transmission est d'acheminer l'information de la source vers le destinataire avec le plus de fiabilité possible comme c'est indiqué sur la figure 1.1.

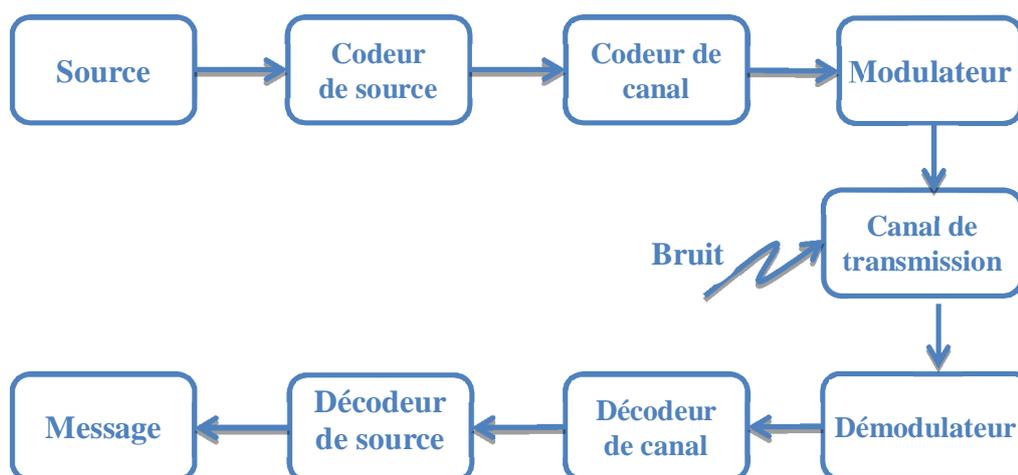


Figure 1. 1 Chaîne de transmission d'un système de communications numériques.

Les différents éléments de cette chaîne de transmission sont présentés comme suit :

- **Source:**
C'est le premier maillon de la chaîne de transmission. Il fournit le message porteur de l'information qui peut être soit de nature analogique ou numérique.
- **Codage source:**
Supprime les redondances contenues dans le message afin de rendre les éléments binaires mutuellement indépendants (diminué le débit binaire à transmettre).

- **Codage canal:**
Dont le but est de rajouter une redondance structurée aux symboles transmis pour protéger l'émission contre les erreurs. Au contraire du codage de source, le codage canal augmente le débit.
- **Modulation:**
A pour rôle d'adapter le signal au canal (milieu physique) sur lequel il sera émis.
- **Canal de transmission:**
Il représente la liaison entre l'émetteur et le récepteur et peut être de différentes natures selon le type de grandeur qu'il permet de véhiculer. Le canal de transmission est caractérisé par sa capacité et par sa bande passante.
- **Décodage canal:**
Consiste à détecter et éventuellement corriger les erreurs dues au canal de transmission. Original
- **Décodage source:**
Décomprime les données pour régénérer les symboles originaux.
- Enfin, le bloc message qui reçoit l'information restituée.

1.2 Caractéristiques de transmission

Les caractéristiques de la transmission permettent de comparer les différentes techniques de transmission.

1. La probabilité d'erreur par bit transmis « Pe » permet d'évaluer la qualité d'un système de transmission. Elle est en fonction de la technique de transmission utilisée, mais aussi du canal sur lequel le signal est transmis. En pratique, elle est estimée par le Taux d'Erreur par Bit « TEB », donné par la relation suivante :

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits faux}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad (1.1)$$

2. L'occupation spectrale du signal émis doit être connue pour utiliser efficacement la bande passante du canal de transmission. Nous sommes contraints d'utiliser de plus en plus des modulations à grande efficacité spectrale.

3. La complexité du récepteur est le troisième aspect important d'un système de transmission.

1.3 Codage

1.3.1 Codage source

Consiste à supprimer la redondance contenue dans les messages de la source d'information. Il peut être avec ou sans pertes d'information. La compression avec pertes vise les signaux numérisés (image, audio ou vidéo).

Après numérisation et codage, la source de message numérique est caractérisée par son débit binaire D . Défini par: $D = \frac{1}{T}$ (*bit/s*) avec T est la durée d'un bit.

1.3.2 Codage canal

Le codage canal a pour rôle de protéger l'information émise contre les perturbations dues au canal de transmission susceptible de modifier son contenu. Il s'agit de rajouter de la redondance de manière à détecter et éventuellement corriger les erreurs lors de la réception si la stratégie adoptée le permet. L'information $D(x)$ issue du codage source est transformée en séquence codée $C(x)$. Comme le décrit le théorème fondamental du codage canal, pour se rapprocher de la capacité du canal de transmission, il est nécessaire de coder l'information avant sa transmission [13]. Pour le codage correcteur d'erreur, plusieurs algorithmes sont disponibles suivant l'application. Parmi les codes correcteurs d'erreur nous trouvons le codage RS (Reed-SOLOMON), le codage CC (codage convolutif), codage en blocs etc...

a) Codage convolutif :

Les codes Convolutifs, introduits en 1955 par Elias, constituent une classe extrêmement souple et efficace de codes correcteurs d'erreurs. Ce sont les codes les plus utilisés dans les systèmes de télécommunications fixes et mobiles. Les codes convolutifs s'appliquent sur des séquences infinies de symboles d'information et génèrent des séquences infinies de symboles codés [17]. Le principe d'un code convolutif est d'ajouter de la redondance au message émis. Un mot d'information est également un vecteur de k bits et un mot de code un vecteur de n bits, mais nous allons introduire un nouveau paramètre, noté K , qui correspond à la longueur de contrainte du codeur. Chaque mot de code dépend du mot d'information présent en entrée du codeur, mais

également des $(K - 1)$ mots d'information ayant été introduits précédemment. De ce fait, un code convolutif (figure 1.2) peut être représenté par un ensemble de registres à décalage, tel que chaque sortie du codeur est une combinaison linéaire des $k \times K$ cellules du registre à décalage. La longueur de contrainte d'un codeur représente le nombre de blocs de k bits présents à l'intérieur du registre à décalage. Intuitivement, nous pouvons dès à présent voir que de par la mémoire d'un code convolutif, ces codes engendrent des séquences codées de longueurs infinies, qui ne peuvent pas être traitées par paquets de bits disjoints. Le rendement des codes cycliques généralement et pour le code convolutif spécialement est :

$$R = k/n \quad (1.2)$$

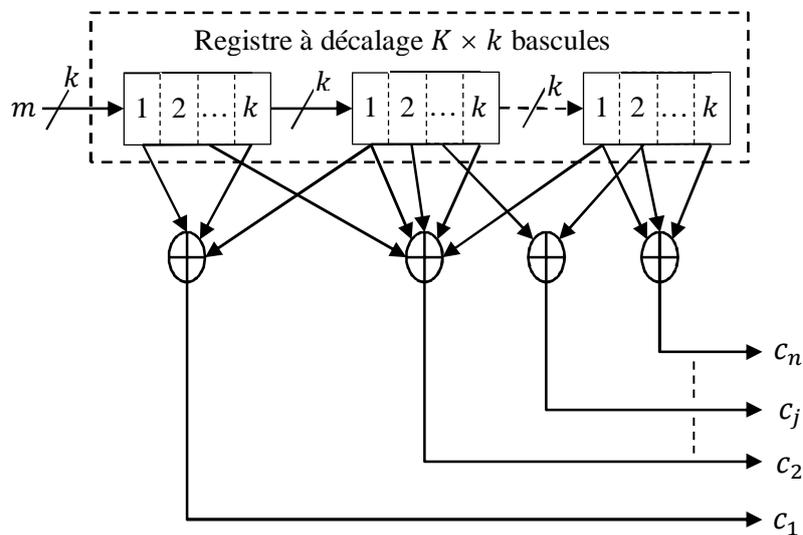


Figure 1. 2 Schéma d'implémentation d'un code convolutif à l'aide de registre à décalage.

Il existe différentes familles de codes convolutifs. Ces différentes familles peuvent être distinguées par deux termes: systématique et récursif.

- le terme systématique signifie que nous retrouvons les k bits d'entrée en sortie du codeur,
- le terme récursif signifie que les sorties du codeur peuvent dépendre des sorties précédentes. Dans cette configuration, le codeur possède des registres avec rétroaction (rebouclage de la sortie en entrée).

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux cas des codeurs de types Non Récursifs et Non Systématiques, noté «NRNSC», et des codeurs de types Récursifs et Systématiques, noté «RSC». Ces deux types de codes étant les plus

répandus dans les standards radio-mobiles. Un code convolutif peut être entièrement défini par ses 3 paramètres entiers (n , k et K) et par sa matrice génératrice. La matrice génératrice d'un code convolutif est composée de $k \times n$ polynômes générateurs qui sont soit de simples polynômes dans le cas d'un codeur de type NRNSC, soit des fractions rationnelles polynômiales dans le cas d'un RSC. Ces polynômes générateurs pourront également être représentés sous forme vectorielle ou encore en octal.

a).1 Polynôme générateur d'un code convolutif :

Le polynôme générateur (ou séquences génératrices) d'un code convolutif représente les différentes manières dont le code en question est construit; il traduit les relations qui lient le contenu des différents étages du registre à décalage. Chaque séquence du code est déterminée par le produit de convolution (d'où le qualificatif de "convolutif") entre la suite binaire présente à l'entrée du codeur et la réponse du codeur, définie par ses séquences génératrices. Soit $a(D)$ un polynôme générateur de degré L défini par :

$$a(D) = \sum_{t \geq 0}^L a(t).D^t = a(0) + a(1).D + \dots + a(L).D^L \quad (1.3)$$

où $a(t)$ est le $t^{\text{ième}}$ coefficient du polynôme.

a).2 Le Poinçonnage :

Généralement l'opération de codage canal est suivit d'un processus de poinçonnage, il consiste à éliminer systématiquement, les bits du flux à faible taux de la sortie du codeur, afin de réduire la quantité de données à transmettre. Ceci conduit à un code à taux élevé. Les bits sont effacés selon une matrice de poinçonnage, où la moyenne du bit rejeté s'annule [18]. Les différents taux qui peuvent être utilisés, sont 1/2, 2/3, 3/4 et 5/6. Les vecteurs de poinçonnage pour ces taux, sont donnés dans le tableau 1.1 :

Taux	Vecteur de poinçonnage
1/2	[1]
2/3	[1 ; 1 ; 1 ; 0]
3/4	[1 ; 1 ; 0 ; 1 ; 1 ; 0]
5/6	[1 ; 1 ; 0 ; 1 ; 1 ; 0 ; 0 ; 1 ; 1 ; 0]

Tableau 1. 1 Vecteur de poinçonnage.

b) Décodage de Viterbi :

Il est basé sur le principe du maximum de vraisemblance. Cet algorithme est une méthode optimale de décodage pour les codes convolutifs, ses performances dépendant de la qualité du canal de transmission utilisé. Par contre la complexité des systèmes de décodage augmentant exponentiellement avec la longueur de contrainte du code utilisé restreint leur emploi aux applications où le code a une petite longueur de contrainte. Il est utilisé dans les applications des systèmes de transmission sans fil [13].

1.4 La modulation

Le message numérique, en tant que suite d'éléments binaires, est une grandeur abstraite. Pour transmettre ce message il est donc nécessaire de lui associer une représentation physique, sous forme d'un signal. Plus précisément, la modulation consiste à associer à chaque mot de n éléments binaires issu du message, un signal $S_i(t)$, $i = 1, \dots, M$, de durée $T = nT_b$ choisi parmi $M = 2^n$ signaux, en fonction de ce mot. Le message binaire de débit D est donc représenté par un signal, dont nous définissons alors la rapidité de modulation R (exprimée en Bauds), comme le nombre de signaux émis par le modulateur par unité de temps: $R = \frac{1}{T}$ (Bauds). Nous parlons alors de transmission M -aire et dans ce cas, la rapidité de modulation R peut s'exprimer en fonction du débit binaire D par la relation: $R = \frac{D}{\log_2 M}$.

Dans notre projet, nous sommes intéressés à deux types de modulations numériques: la modulation à 4 états de phase $QPSK$ (Quadrature Phase Shift Keying) et la modulation de décalage en quadrature $OQPSK$ (Offset Quadrature Phase Shift Keying).

1.4.1 La modulation QPSK

La modulation $QPSK$ utilise quatre points sur le diagramme de constellation; les points sont également espacés sur le cercle. Avec quatre phases, $QPSK$ peut encoder deux bits par symbole. Les symboles a_k prennent les valeurs $1 + j$, $1 - j$, $-1 + j$, $-1 - j$. Chaque symboles est généré à partir d'un vecteur de 2 bits et :

$$S(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} i_k g(t - kT_s) \cos(2\pi f_0 t) - \sum_{k \in \mathbb{Z}} q_k g(t - kT_s) \sin(2\pi f_0 t) \quad (1.4)$$

Avec :

$$i_k = \text{Re}\{a_k\} \text{ et } q_k = \text{Im}\{a_k\}$$

$g(t - kT_s)$: la forme d'impulsion appelée « le forment »

Cette modulation produit deux signaux transportant l'information, l'un est sinusoïdal (Q) et l'autre cosinusoidal (I). Le codage est réalisé en fonction de la phase de ces signaux. Il y a deux phases possibles (séparées de 180°) pour chacun des deux signaux (I et Q), ce qui permet de réaliser 4 symboles différents (ligne Signal / Data ci-dessous).

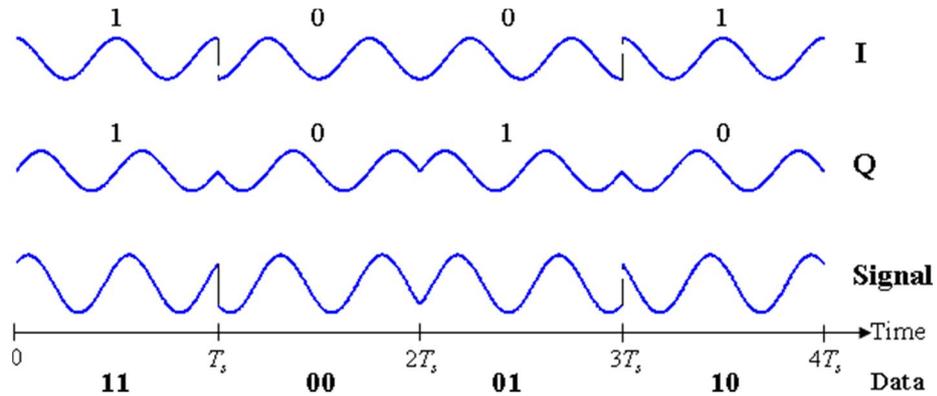


Figure 1.3 Diagramme temporel **QPSK**.

Ces 4 symboles peuvent être représentés sous la forme d'un diagramme de constellation $Q(I)$ (figure 1.4).

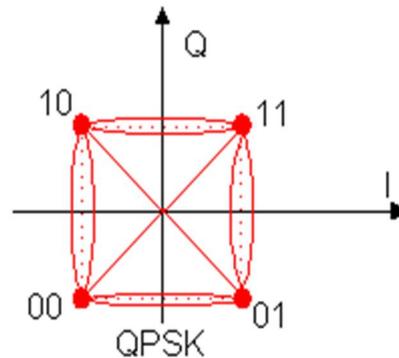


Figure 1.4 Diagramme de constellation pour **QPSK**.

1.4.2 La modulation OQPSK

Offset Quadrature Phase-Shift Keying (**OQPSK**) est une variante de modulation masquage de décalage de phase utilisant 4 valeurs différentes de la phase à transmettre comme **QPSK**. Prenant les quatre valeurs de la phase (deux bits) à un moment de construire un symbole **QPSK** peut permettre la phase du signal de sauter par autant que 180° à la fois. L'amplitude d'un signal **QPSK** est idéalement constante. Toutefois, lorsque les signaux **QPSK** sont impulsion en forme, ils perdent la propriété enveloppe constante. Le changement de phase occasionnelle de π radians peut causer de l'enveloppe du signal à passer par zéro pour juste un instant [1].

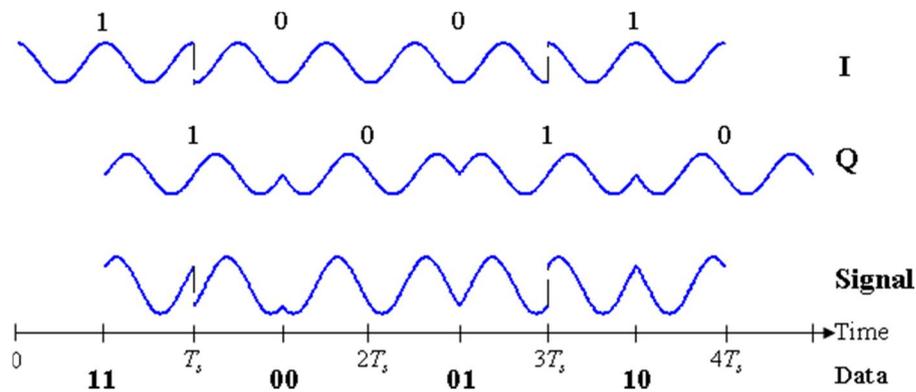


Figure 1. 5 Diagramme temporel **OQPSK**.

Le diagramme de constellation de la modulation *OQPSK* est présenté sur la figure suivante :

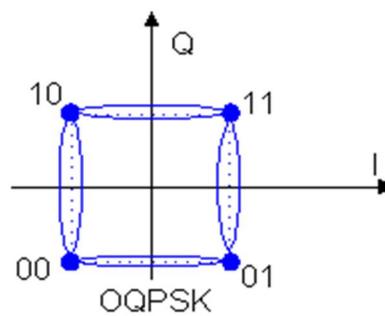


Figure 1. 6 Diagramme de constellation pour **OQPSK**.

1.5 Canal de transmission

Il représente la liaison entre l'émetteur et le récepteur et peut être de différentes natures selon le type de grandeur qu'il permet de véhiculer. Le canal de transmission est caractérisé par sa capacité et sa bande passante. Il existe plusieurs modèles théoriques du canal de transmission en fonction des types d'erreurs les plus fréquents, canal à Bruit Blanc Additif Gaussien (AWGN), un canal Rayleigh...etc. [13].

1.5.1 Canal binaire symétrique

Le canal binaire symétrique (CBS) est un canal discret dont les alphabets d'entrée et de sortie sont finis et égaux à 0 ou 1. Nous considérons dans ce cas que le canal comprend tous les éléments de la chaîne comprise entre le codeur du canal et le décodeur correspondant [19].

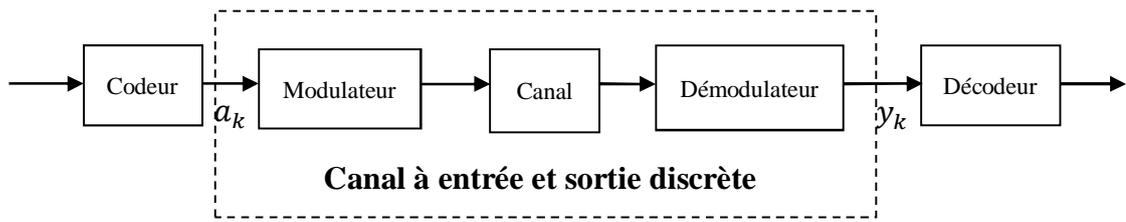


Figure 1. 7 Description d'un canal binaire symétrique.

Nous notons respectivement par a_k, y_k les éléments à l'entrée et à la sortie du CBS. Si le bruit et d'autres perturbations causent des erreurs statistiquement indépendantes dans la séquence binaire transmise avec une probabilité p , alors.

$$\text{prob}(y_k = 0 | a_k = 1) = \text{prob}(y_k = 1 | a_k = 0) = p \quad (1.5)$$

$$\text{prob}(y_k = 0 | a_k = 0) = \text{prob}(y_k = 1 | a_k = 1) = 1 - p \quad (1.6)$$

Chaque élément binaire à la sortie du canal ne dépendant que de l'élément binaire entrant correspondant, dans ce cas le canal est dit « sans mémoire ».

1.5.2 Canal AWGN

Le canal AWGN « Additive White Gaussian Noise » est le modèle le plus fréquemment utilisé pour caractériser un canal de transmission. Dans ce modèle (figure 1.8), le signal reçu $r(t)$ est la somme du signal transmis $s(t)$ et d'un bruit gaussien $n(t)$:

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (1.7)$$

Cette modélisation de canal a une grande importance théorique et pratique. Elle constitue en effet un modèle très précis pour certains types de canaux de transmission, pour les communications satellites et spatiales en particulier. Le bruit additif gaussien est la modélisation d'un bruit dont les sources sont internes ou externes. Les sources de bruit internes sont générées à l'intérieur des composants électroniques des équipements du système. Dans la majorité des cas c'est la source la plus significative et la plus facile à caractériser. Le bruit thermique est la plus importante d'entre elles. Les sources de bruit externes sont générées à l'extérieur du système, causées par les intempéries, le bruit industriel, etc. Elles sont difficiles à modéliser; Calcul de la variance du bruit gaussien en fonction du rapport signal bruit. Le bruit additif gaussien est caractérisé par

un processus aléatoire gaussien centré de densité spectrale $G(f)$ de puissance bilatérale égale à $N_0/2$.

$$G(f) = \frac{N_0}{2} \text{ Watts/hertz} \quad (1.8)$$

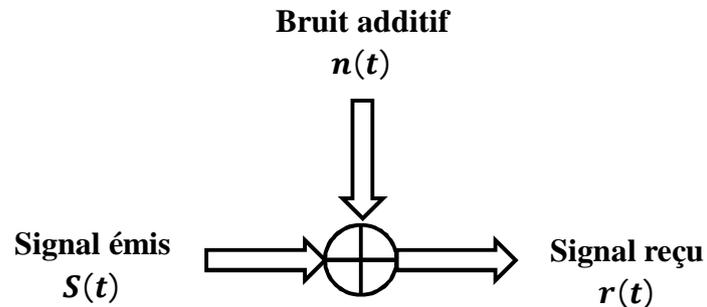


Figure 1. 8 Le modèle de canal Gaussien.

1.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les transmissions numériques. Nous avons détaillé une chaîne classique de transmission, de la source binaire jusqu'au destinataire. Pour pouvoir évaluer les performances des systèmes proposés dans la suite de cette thèse, il nous a paru intéressant de rappeler plusieurs notions de la théorie de l'information nous avons présenté les notions fondamentales du codage et des modulations numériques puis on a décrit les différents types de canaux de transmission.

Chapitre 2 La norme TETRA (Terrestrial Trunked Radio)

2.1 Introduction

TETRA est une norme cellulaire numérique de radiocommunication à ressources partagées, destinée à la transmission de la voix et de données. Malgré sa grande complexité, le principe technique unifié de TETRA devrait garantir une grande flexibilité et de trouver des solutions économiquement plus avantageuses. Elle a été conçue pour répondre à la demande des services de communication plus efficaces et plus souples émanant d'utilisateurs de radiotéléphonie tant à accès privé qu'à accès public, elle vise également à pouvoir apporter une réponse aux nombreux problèmes techniques et commerciaux liés au développement des systèmes de radiotéléphonie au cours du 21^{ème} siècle [3].

2.2 Système de radiocommunication à ressource partagé

Dès le début des années 90, l'Union Européenne a chargé l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) d'établir une norme européenne pour les radiocommunications professionnelles numériques.

Fin 1995, les différentes nations concernées ont adopté les composantes essentielles de la norme TETRA (Terrestrial Trunked Radio). Ces normes ont été déployées dans une soixantaine de pays. Les systèmes radio voix et données, à ressources partagées, sont destinés aux équipes de sécurité (police, pompiers, ambulances), à celles de gestion de flottes, au personnel d'usines, ou à tout autre groupe fermé d'utilisateurs. Ils se différencient des systèmes publics de téléphonie mobile, tels que le GSM ou l'UMTS, par la rapidité d'établissement des communications, la possibilité, d'une part, de chiffrement de bout en bout et, d'autre part, d'appels prioritaires et de groupe.



De plus, l'utilisation du mode optionnel DMO (Direct Mode Operation) permet à deux terminaux de communiquer à la façon d'un talkie-walkie, sans passer par une station de base.

2.3 Les services

Il est important pour l'utilisateur de savoir quels sont les services qui peuvent être fournis grâce à TETRA. Pour simplifier, nous pouvons dire que la norme TETRA permet presque tout ce qui était possible jusque-là avec les systèmes PMR (Professional Mobile Radio) conventionnels, en y ajoutant les possibilités variées qu'offre la transmission de données. Pour clarifier, une distinction a été faite entre différents groupes de services, c'est-à-dire les téléservices, les services supports (ou services de transmission de données) et les services supplémentaires. Nombre de ces services ne sont pas encore disponibles avec les systèmes publics de téléphonie mobile [3].

La liste ci-dessous n'est pas exhaustive et contient uniquement une sélection de services qui peuvent être fournis grâce à TETRA.

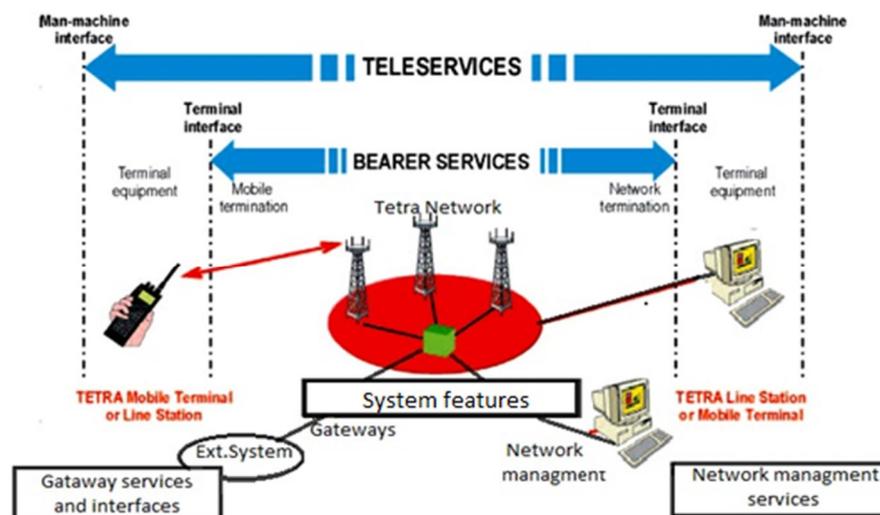


Figure 2. 1 Présentation différents services de TETRA.

2.3.1 Téléservices

❖ *Appel individuel (individual Call)*: Ce service correspond à la communication dans un système public de téléphonie mobile (GSM, UMTS). Il offre à un appel point par point établi entre deux parties de système TETRA. La partie appelante reçoit la reconnaissance du progrès d'appel [8].

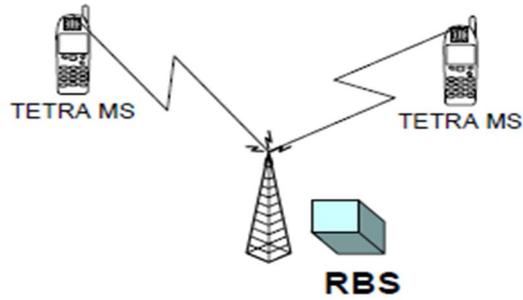


Figure 2. 2 Appel individuel.

❖ *Appel de groupe (group Call):* C'est un appel point à multipoint établi d'un utilisateur à plus d'une autre personne. Après l'installation d'appel immédiate, l'appelant ne reçoit aucune accusé de réception de l'une des personnes appelées à savoir si oui ou non ils sont prêts à communiquer [8].

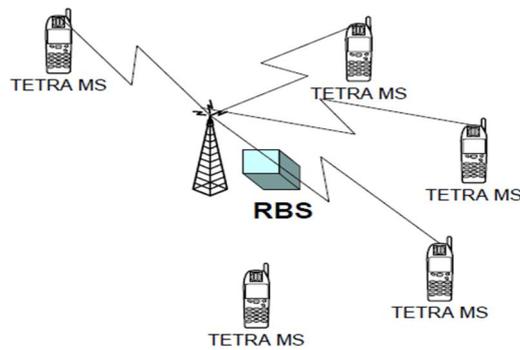


Figure 2. 3 Appel de groupe.

❖ *Communication de groupe avec accusé de réception (Acknowledged group call):* C'est le même que l'appel de groupe, décrit ci-dessus, sauf qu'un appel n'est pas établi, à moins que l'accusé de réception est reçue d'un nombre défini de parties appelées qui sont prêts à communiquer [8].

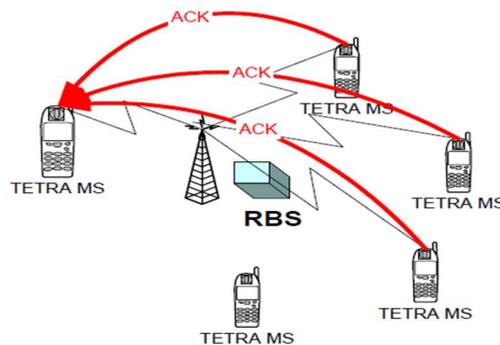


Figure 2. 4 Communication de groupe avec accusé de réception.

❖ **Communication de diffusion (broadcast Call):** Il s'agit d'une liaison point-multipoint unidirectionnelle dans une zone particulière. La zone et les usagers sont déterminés auparavant. Les différents usagers n'accusent pas réception de l'appel, ce qui signifie que l'appelant ne peut pas contrôler qui a reçu l'appel et qui ne l'a pas reçu [3].

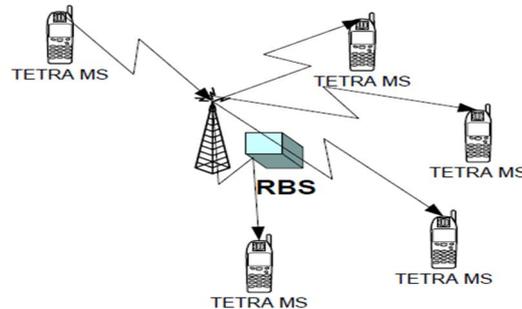


Figure 2. 5 Appel de diffusion.

❖ **Direct Mode (mode direct):** Le mode direct permet la communication entre deux ou plusieurs stations mobiles, sans passer par une station de base (talkie-walkie) [3].



Figure 2. 6 Mode direct.

❖ **Emergency Call (appel d'urgence):** Une touche d'urgence permet d'établir une communication à haute priorité avec un dispatcher ou un groupe d'utilisateurs prédéfini [3].

2.3.2 Services supports (bearer services)

Les services supports offrent à l'utilisateur la capacité nécessaire pour transmettre les signaux attendus. Ces services sont classés selon les types de fonctions de couche inférieure, typiquement limités aux couches 1 à 3 du modèle OSI. Les types des services supports comprendront:

- une fonction de transmission de données en mode circuit offrant un débit minimal de 7,2 kbit/s dans le cas de données non protégées et de 4,8 kbit/s dans le cas de données protégées;

- un service complémentaire de transmission de données en mode paquet avec ou sans connexion.

❖ **Mode circuit (Circuit Mode Data):** pour ce mode de transmission de données, l'infrastructure ouvre un lien de bout en bout qui immobilise une ressource radio TETRA pendant toute la durée de la communication. Cette ressource est au préalable négociée entre l'entité appelante et l'infrastructure suivant le même protocole d'interface air que celui d'une communication phonie. Les technologies numériques permettent des services de transmission de données plus étendus que l'analogique. Le débit offert doit être qualifié en fonction du taux. La norme TETRA offre une plus large plage de services en mode circuit, selon le nombre d'intervalles de temps (IT) utilisés sur le canal radio. Le tableau ci-dessous donne le nombre de time slots par porteuse TETRA nécessaires pour l'acheminement des données en fonction du débit :

Nombre d'IT	1	2	3	4
Sans protection	7,2 kb/s	14,4 kb/s	21,6 kb/s	28,8 kb/s
Basse protection	4,8 kb/s	9,6 kb/s	14,4 kb/s	19,2 kb/s
Haute protection	2,4 kb/s	4,8 kb/s	7,2 kb/s	9,6 kb/s

Tableau 2. 1 Débit TETRA en mode circuit.

❖ **Données par paquets (Packet Mode Data):** Processus d'acheminement dans lequel les messages sont découpés en paquets, chaque paquet comportant les adresses nécessaires à son routage; dans les nœuds du réseau, ces paquets sont reçus dans une file d'attente et retransmis, après analyse des adresses, sur la voie de transmission appropriée; à l'arrivée, nous reconstituons les messages à partir des paquets reçus. Puisqu'un paquet n'occupe une voie que pendant sa transmission, la voie est ensuite disponible pour la transmission d'autres paquets appartenant soit au même message, soit à d'autres messages.

❖ **Short Data Service (SDS):** Le SDS est un service de datagramme optimisé pour l'échange des messages prédéfinis de statut ou des messages définis par l'utilisateur. Les messages de SDS (personne, groupe et messages à diffusion générale) n'exigent pas un canal établi de leurs propres moyens et n'existent pas en tant qu'élément de la signalisation. Ainsi, des messages de SDS peuvent être envoyés ou reçus parallèlement à un appel actuel de la parole [8].

2.3.3 Services supplémentaires offerts

Les services supplémentaires de la norme TETRA, modifient ou complètent le service de base. Au total, il y a 30 services supplémentaires, qui peuvent être divisés en [9]:

a. Services supplémentaires de type «communication mobile personnelle» :

- ❖ Priorité d'accès, priorité avec préemption, communication prioritaire ;
- ❖ Comprend la communication, le transfert de gestion, l'accès tardif ;
- ❖ Communications autorisées par le répartiteur, écoute d'ambiance, écoute discrète ;
- ❖ Sélection de zone ;
- ❖ Numérotation d'adresse abrégée ;
- ❖ Identification du locuteur ;
- ❖ Affectation dynamique des numéros dans un groupe ; [9]

b. Services supplémentaires de type téléphonique :

- ❖ Appel sur liste de recherche ;
- ❖ Renvoi d'appel – sans condition/occupé/pas de réponse/impossibilité d'atteindre le correspondant ;
- ❖ Invitation d'appel – appel entrant/sortant ;
- ❖ Indication d'appel ;
- ❖ Appel en instance ;
- ❖ Maintien d'appel ;
- ❖ Présentation de l'identité de la ligne appelante/connectée ;
- ❖ Restriction d'identification de la ligne appelante/connectée ;
- ❖ Fin de communication sur abonné occupé/en cas de non-réponse ;
- ❖ Avis de tarification ;
- ❖ Rétention de communication [9].

2.3.4 Aspects touchant à la sécurité.

Le système TETRA offre un niveau de sécurité élevé [9]. Les objectifs de sécurité sont regroupés dans le tableau 2.2 suivant:

Les objectifs de sécurité	Rôles
<i>Exactitude de tarification</i>	Intéresse essentiellement les systèmes commerciaux
<i>Authenticité</i>	Établir la véritable identité des parties en communication et du réseau.
<i>Confidentialité de la communication</i>	Protection contre toute lecture non autorisée des informations transmises.
<i>Intégrité de la communication</i>	Protection contre toute modification non autorisée des informations transmises.
<i>Confidentialité</i>	Garantie aux personnes utilisant ou exploitant le réseau dans le cas, par exemple, d'informations personnelles d'identité, de lieu, etc...
<i>Confidentialité du flux de trafic</i>	Pour prévenir toute communication d'informations pouvant être déduites de l'observation des tendances de trafic.
<i>Surveillance</i>	Permettre le contrôle autorisé des communications, indépendamment des mécanismes de sécurité.
<i>Gestion de la sécurité</i>	administration d'un réseau sûr.

Tableau 2. 2 Les objectifs de sécurité et leurs rôles.

2.4 Un exemple d'un réseau TETRA simple

Pour illustrer le fonctionnement d'un réseau TETRA, voyons un cas d'utilisation simple. Une entreprise de travaux publics souhaite permettre à ses employé de communiquer entre eux sur un chantier. Elle utilise du matériel TETRA. Elle installe donc selon son besoin un appareil permettant de déployer un réseau simpliste, à savoir une antenne et une BTS. Les postes radios dans la zone de couverture peuvent instantanément établir des communications de groupes, en fonction de leurs assignments: le groupe manœuvre, le groupe chefs de chantier et autres [16].

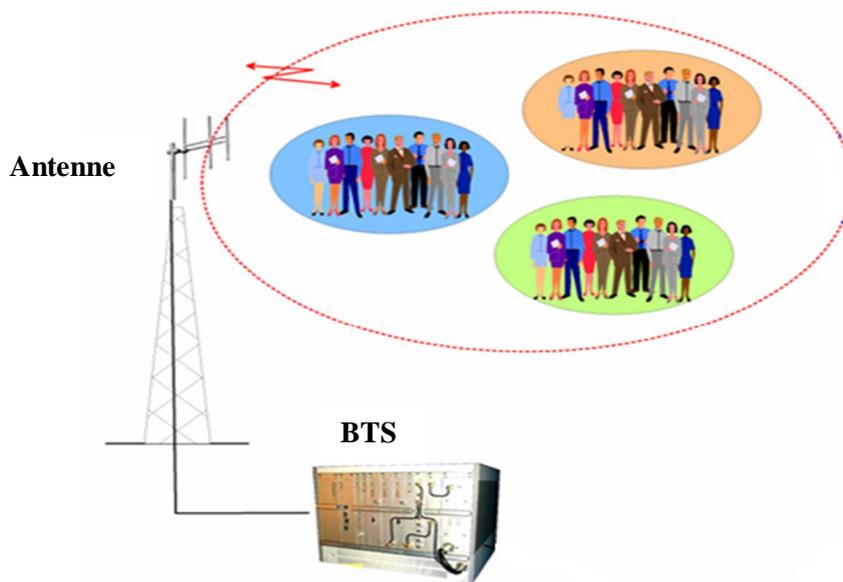


Figure 2. 7 Exemple de fonctionnement d'un réseau TETRA.

Ainsi, pour une fréquence de porteuse utilisée sur site, nous pourrions établir jusqu'à 3 communications de groupes simultanées, pour un nombre illimité de postes dans chaque groupe. Nous imaginons aisément le gain par rapport à un système analogique. La norme TETRA permet de plus d'autres fonctionnalités, tel que l'envoi de messages types SMS, les appels d'urgences, la localisation de terminaux... Tout ceci étant de plus soumis au contrôle total de l'administrateur du réseau grâce à une structure centralisée [16]. Il est possible d'adjoindre 2 fréquences de porteuses à une unique BTS, montant ainsi le nombre de communications simultanées à 7 (la voie balise est mutualisée pour les deux porteuses, nous avons donc 4 canaux au lieu de 3 pour la seconde porteuse). Évoquons également la possibilité des terminaux de fonctionner en mode direct. Si la BTS subit un dysfonctionnement, les terminaux basculent dans ce mode de fonctionnement, qui leur permet de communiquer en poste à poste comme le feraient des talkies walkies. Le service est dans ce cas limité aux seules communications phoniques et la portée est réduite à 400 mètres dans le meilleur des cas, mais un service minimal reste disponible. Cet exemple présentait un cas d'utilisation simple, mais est loin de dresser une liste exhaustive des capacités d'un réseau TETRA. Voyons un cas un peu plus complet mettant en jeu plusieurs spécificités de ces réseaux [16].

2.5 Un exemple d'un réseau TETRA à deux sites

L'utilisation d'une BTS seule permet de mettre en place rapidement et à moindre coût un réseau TETRA. Cependant, ce dernier sera limité en termes de fonctionnalités disponible. Étendons l'exemple précédent à un chantier situé sur 2 sites distants, qui doivent tout 2 être couverts et partager une même configuration. Nous souhaitons particulièrement que la répartition en groupe soit transparente, c'est-à-dire qu'un même groupe puisse être présent à la fois dans les multiples zones de couverture [16].

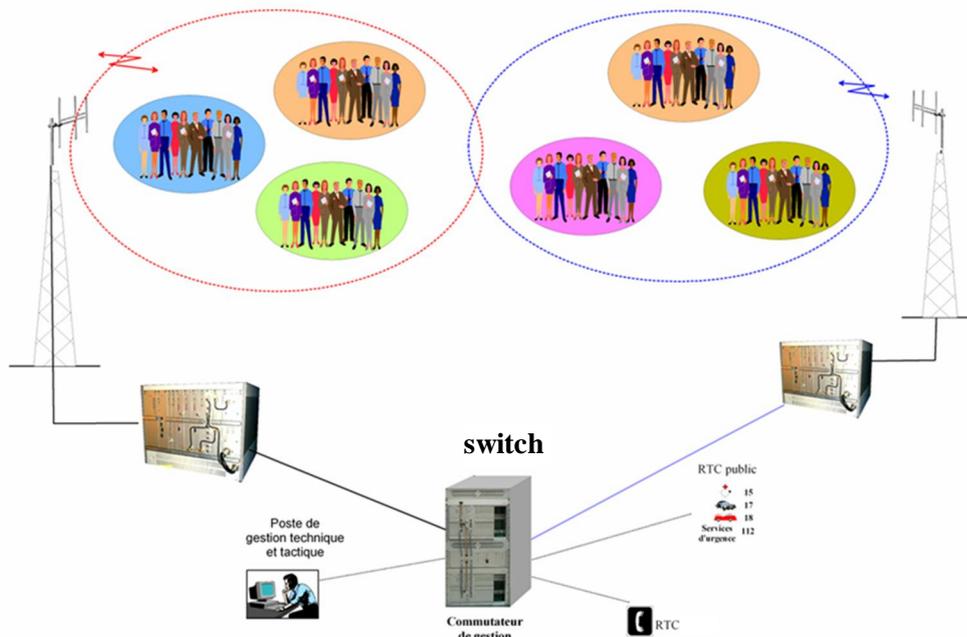


Figure 2. 8 Exemple de fonctionnement d'un réseau TETRA à deux sites.

Les deux BTS montrées sur ce schéma sont reliées entre elles par un switch TETRA (liaison câblée). En plus de permettre l'interconnexion des différentes zones de couvertures, cet appareil apporte de nombreuses fonctionnalités de configuration, de management et de contrôle de notre réseau. Pour notre exemple, nous partageons ainsi la répartition des groupes sur les deux sites. Une communication ayant pour cible le groupe des chefs de chantier atteindra ainsi tous les postes de ce groupe présents dans les deux zones de couvertures. Mais le gain ne s'arrête pas là. Il est de plus possible de donner un accès vers des communications extérieures, en couplant le switch au RTC privé (réseau téléphonique de l'entreprise) ou publique (réseau téléphonique publique). Les postes TETRA pourront ainsi joindre les réseaux téléphoniques ciblés, ou être joints de la même manière. Bien évidemment, cette fonctionnalité est contrôlée par l'administrateur du système, qui décide à qui donner les droits idoines [16].

2.6 Les interfaces de système TETRA

Pour garantir une norme ouverte et utilisable par de nombreux fabricants, TETRA spécifie les interfaces de base suivantes:

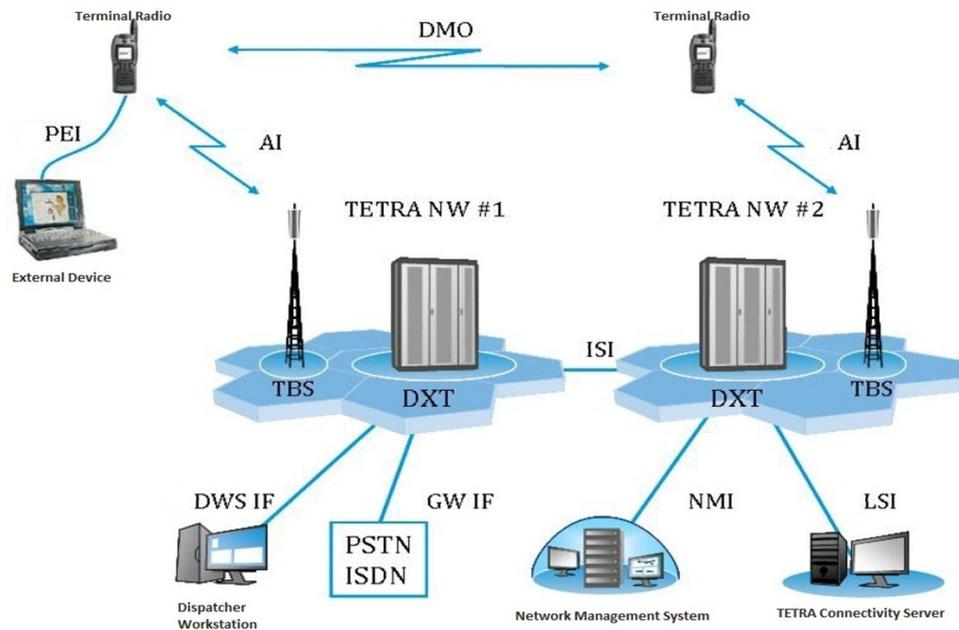


Figure 2. 9 Les interfaces de système TETRA.

D'après la figure ci-dessus, nous constatons que le système TETRA contient des interfaces standards et non standards présenté sur la figure suivante:

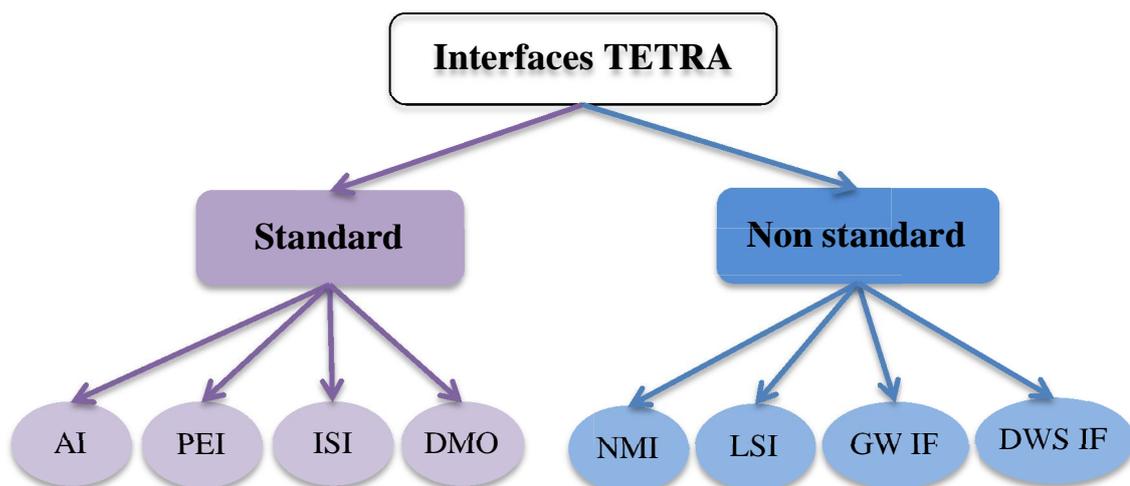


Figure 2. 10 Interfaces standards et non standars.

2.6.1 Les interfaces standard

Les interfaces de système TETRA contiennent quatre interfaces normalisées :

1. Air Interface (AI)

L'interface la plus importante dans les systèmes TETRA, pour ce travail est l'interface d'air qui assure l'interopérabilité entre les terminaux radio et les stations de base permettant le mode de communication de base généralement désigné sous le nom: « Trunked Mode Operation (TMO) » [2].

2. Peripheral Equipment Interface (PEI)

Cette interface normalise la connexion du terminal radio à un dispositif externe, et prend en charge la transmission de données entre des applications résidant sur le dispositif et le terminal radio TETRA connecté. Le PEI prend également en charge certains éléments de contrôle dans le terminal de radiocommunication à partir de l'appareil externe et/ou des applications telles que [2]:

- Rapport d'alarme ;
- Télémétrie ;
- Machines de billetterie pour les transports de bus ;
- Têtes de commande sur mesure pour les installations à bord des trains ;
- Localisation automatique des véhicules (AVL) ;
- Terminaux de données mobiles ;
- Fixes mobiles à distance pupitres de commande ;
- Command & Control ;

3. Inter System Interface (ISI)

Ce standard Inter-System Interface (ISI) permet des infrastructures fournies par différents TETRA fabricants pour inter-opérer les uns avec les autres permettant l'interopérabilité entre deux réseaux ou plus. Il existe deux méthodes d'interconnexion dans la norme, l'un couvrant le transfert d'informations en utilisant le mode circuit et l'autre en mode paquet. Les développeurs d'applications doivent utiliser cette interface dès qu'il sera disponible sur les réseaux TETRA.

4. Direct Mode Operation (DMO)

Permet les communications dans des zones hors de la couverture radio. Dans ce mode, des stations mobiles peuvent communiquer directement entre elles sans faire usage de l'infrastructure réseau.

2.6.2 Les interfaces non standards

Ces interfaces ne sont pas incluses dans la norme officielle de TETRA :

1. Network Management Interface (NMI)

Le NMI permet la configuration du réseau et des fonctions de maintenance. Au cours des activités de normalisation, il a été remarqué qu'une commune NMI n'était pas pratique donc cette interface n'appartient pas à la norme.

Sur la base des travaux de normalisation du NMI un guide d'application complète a été faite par l'Association TETRA pour aider les utilisateurs [2].

2. Ligne Station Interface (LSI)

Une interface désignée pour la connectivité d'applications 3ème partie. Cette interface est requise pour l'ajout de fonctionnalités de partie 3ème pour le système TETRA [2].

3. Gateway Interfaces (GW IF)

Les interfaces de la passerelle sont des données externes et les réseaux de téléphonie tels que le « PSTN (Public Switched Telephone Network) » ou « Integrated Services Digital Network (ISDN) » [2].

4. Dispatcher Workstation Interface (DWS IF)

Dispatching équipement est interfacé via l'interface propriétaire à part. Cette interface n'est pas standardisée pour permettre à des fabricants de développer la représentation d'interface la plus augmentée résultant des solutions d'infrastructure entière de technologie [2].

2.7 Mode d'exploitation de système TETRA

Dans le fonctionnement en mode ressources partagées, il existe toujours une station de base et le réseau pour basculer l'information entre un ou plusieurs utilisateurs. N'importe quel type de communication peut être [15]:

- Exploitation Full Duplex, échange simultané d'information; les usagers peuvent simultanément parler et écouter sur une fréquence porteuse pour l'émission et une autre fréquence pour la réception,
- Exploitation « Semi-duplex », échange d'information bidirectionnel ; un usager parle (émet), plusieurs usagers écoutent (reçoivent) sur une fréquence porteuse pour l'émission et une autre fréquence pour la réception ; généralement une presse sur le bouton PTT« Pach To Talk » est utilisé et la fin du discours est annoncée par « Over »,
- Exploitation Simplex, échange d'information bidirectionnel; un usager parle (émet), plusieurs usagers écoutent (reçoivent) sur une seule fréquence porteuse.

Afin d'éviter toute interférence, station de base et station mobile d'utiliser différents fréquences avec un duplex fixe décalés, par exemple 10 MHz.

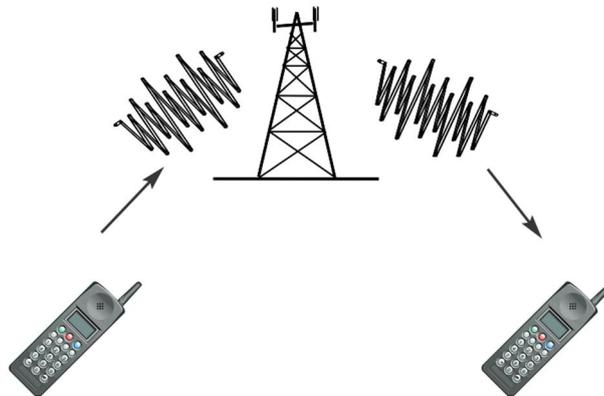


Figure 2. 11 La communication semi/full duplex.

Il y a aussi un fonctionnement en mode direct (DMO) étant utilisé lorsqu'il n'y a pas de station de base disponibles. Dans ce cas, un seul parti peut parler à la fois (simplex). Recevoir et transmettre les fréquences sont identiques (sans espacement duplex) [15].



Figure 2. 12 Opération en mode direct.

2.8 Architecture hertzienne

La technologie utilisée est une technologie TDMA (multiplex temporel) qui s'oppose à la technologie FDMA (multiplex fréquentiel) habituellement utilisée dans les systèmes analogiques; la radio est 'numérique' dans la mesure où les échanges sur l'interface air sont menés sous forme de paquets de données entre plusieurs utilisateurs, par opposition à la radio 'numérisée' qui conserve la technologie FDMA en transmettant le message audio sous forme numérique point à point (transmission en mode circuit) [10]. Chaque station de base émet et reçoit sur une porteuse de largeur 25 KHz ; en fait, cette porteuse comprend un couple de deux canaux, l'un est utilisé dans le sens station de base vers mobiles, l'autre dans le sens mobile vers stations de base. Les deux canaux présentent un écart duplex souvent égal à 10 MHz. Une porteuse comprend 4 voies de communications – une des voies de communication peut être utilisée comme canal de signalisation commun. Le nombre de stations de base par site radio dépend essentiellement du trafic à écouler dans la zone de couverture de chacun de ces sites.

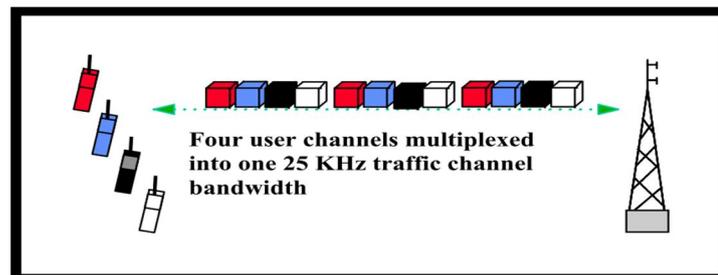


Figure 2. 13 Présentation la trame de TDMA.

TETRA opère à l'intérieur de la bande de fréquences des 380-400 MHz pour les services d'urgence et dans les bandes 410-430 MHz, 450-470 MHz et 870-880 MHz pour les applications civiles et privées (fréquences toutes inférieures à celles utilisées par la téléphonie mobile).

2.8.1 Canal de signalisation

Chaque porteuse comprend 4 voies de communication; en général, l'une des voies des porteuses d'un même site radio (site à plusieurs stations de base) est utilisée comme canal de signalisation commun pour toutes les stations de base du site (canal MCCH). Les autres voies sont utilisables comme voies de 'trafic'.

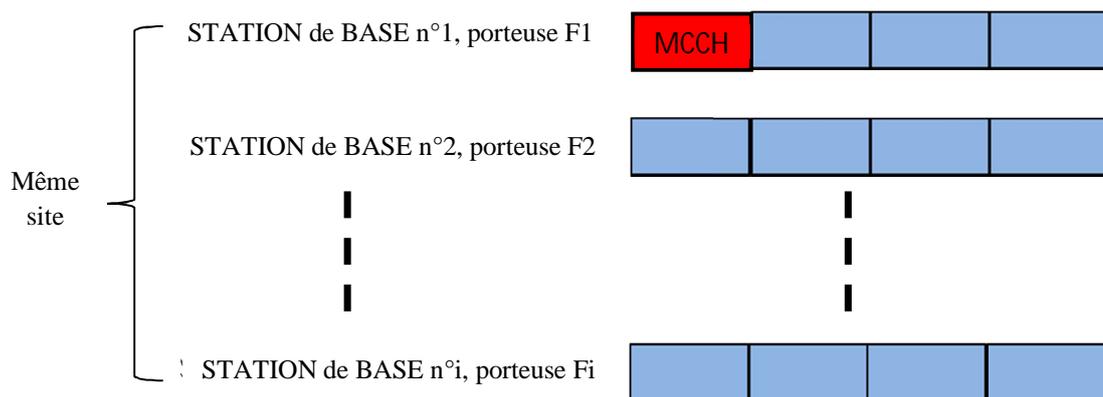


Figure 2. 14 Présentation de canal de signalisation sur un même site.

Ainsi, un site avec une seule station de base dispose de 3 canaux de trafic tandis qu'un site à deux stations de base en dispose de 7. Il est à noter que les canaux de trafic sont gérés dynamiquement et qu'ils peuvent être temporairement utilisés par le système comme canaux de renfort du canal de signalisation commun pour le cas où le trafic de celui-ci serait trop important (canaux SCCH et ASCCH) [10].

2.8.2 Occupation des canaux de trafic

L'occupation des canaux de trafic par les communications phonie (ou les communications de transmission de données en mode circuit) est fonction du type de communication [10].

Type de communication		Nombre total de canaux utilisés
Mobile / mobile	Duplex mono site	2 (sur le même site)
	Semi duplex mono site	1
	Duplex multi site	2 (1 par site)
	Semi duplex multi site	2 (1 par site)
Mobile / téléphone	Duplex ou semi duplex	1
Groupe (semi duplex)	Mono site	1
	Multi site	1 par site

Tableau 2. 3 Différents types de communications et nombres de canaux utilisés.

2.8.3 Répartition des stations de base

a. Cas de trafic dense :

Beaucoup de canaux radio sont nécessaires; il s'agit de les répartir. Se pose alors la question de savoir s'il est préférable de disposer de beaucoup de sites de faible portée ou d'un moindre nombre de sites ayant chacun un plus grand nombre de BS et de plus grande portée. Un grand nombre de facteurs influent sur le choix final; le comparatif ci-après montre quelques-unes des différences [10].

RESEAU TETRA à FORTE DENSITE de TRAFIC		
	Grand nombre de petits sites	Petit nombre de grands sites
<i>Densité hertzienne (minimum de canaux pour un même Besoin)</i>	Optimum en réduisant les puissances en dessous de la taille de cellule optimale	Moins avantageux
<i>Roaming</i>	Important (désavantageux)	Faible (avantageux)
<i>Canal ouvert multi site sans la technique synchrone</i>	Très désavantageux	Désavantageux
<i>Canal ouvert multi site avec la technique synchrone</i>	Avantageux	Avantageux
<i>Sécurité en cas de panne d'un site</i>	Très bonne (redondance de couverture)	Faible
<i>Capacité de mobilisation importante de ressources en un point donné</i>	Faible	Importante
<i>Couplage d'antenne</i>	Aucun	Difficile à très difficile
<i>Coût des liens fixes</i>	Un peu plus important par liaison fil, très important par faisceau hertzien	Faible
<i>Coût « logistique »</i>	Important	Faible
<i>Coût des équipements d'infrastructure</i>	Sensiblement équivalent	

Tableau 2. 4 Comparaison de sites TETRA.

Il y a également lieu d'ajouter l'effet de « quantification » du à TETRA: ainsi, en cas de forte densité globale de trafic, il est quasiment inutile de diminuer la taille des cellules en dessous d'une densité de trafic de trois ou quatre communications par site, quantité qui correspond à une BS élémentaire. Bien entendu, pour les sites à plusieurs BS, elles travaillent en mode étendu [10].

b. Cas des faibles densités des trafics :

Les réseaux à faible densité de trafic sont assez fréquents, surtout dans le domaine de la sécurité où il est important d'assurer une couverture sur tout le territoire (même dans les endroits les plus reculés) quitte à ce qu'un équipement de site n'achemine aucune communication durant toute sa durée de vie. Pour ce genre de réseau, il n'est pas question d'avoir une approche cellulaire et nous rechercherons toujours à minimiser le nombre de sites en choisissant les meilleurs endroits (ceux offrant le maximum de couverture). Le problème se présente donc différemment et nous cherchons avant tout à augmenter la couverture des sites puis à trouver un procédé permettant de minimiser le nombre de canaux. Avec TETRA, l'augmentation des performances d'un site passe par la diversité réception pour améliorer la liaison montante et par l'augmentation de puissance rayonnée pour améliorer la liaison descendante. Pour ces réseaux à faible densité de trafic, les architectures TETRA offrent une caractéristique essentielle par la capacité de mobilisation ponctuelle des ressources radio: en effet, le fait de disposer d'une BS à un endroit permet d'offrir une capacité de mobilisation de 4 communications à cet endroit en cas de besoin [10].

2.9 Fonctionnement des liaisons radio

2.9.1 Gestion de la liaison radio entre mobiles et infrastructure

Chaque terminal, à un instant donné, est pris en charge par un site radio. Une fois ainsi pris en charge, la liaison est surveillée en permanence par le terminal et par l'infrastructure. Cette surveillance prend quatre aspects principaux pour la partie transmission radio [10]:

a. Puissance maximale d'émission dans la cellule :

L'infrastructure diffuse une information générale à tous les mobiles indiquant la puissance maximale autorisée sous sa couverture. La première émission d'un mobile

arrivant dans une cellule est donc limitée à la plus faible des valeurs correspondant à sa propre puissance maximale d'émission et à la valeur indiquée par l'infrastructure. Le paramètre de niveau maximal d'émission est programmé comme un paramètre de site, commun à toutes les stations de base d'un même site [10].

b. Puissance émise par les mobiles

Chaque site diffuse également un paramètre proportionnel à la puissance qu'il rayonne (dans un canal TETRA de largeur 25 KHz) et à un niveau de champ de référence – ce paramètre est appelé « access level ».

En réalité:

$$\begin{array}{l}
 \text{Access level} = \text{puissance de sortie de l'émetteur infra} \\
 \quad - \text{Perte de couplage et de liaison} \\
 \quad + \text{Gain antenne émission infra} \\
 \quad - \text{Gain d'antenne réception infra} \\
 \quad + \text{Niveau de réception mobile vers infra désiré}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Access level} \\ \text{Perte de couplage} \\ \text{Gain antenne} \\ \text{Gain d'antenne} \\ \text{Niveau de réception} \end{array}} \right\} \text{ PAR} \\
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{Gain d'antenne} \\ \text{Niveau de réception} \end{array}} \right\} \text{ Niveau de} \\
 \hspace{10em} \text{consigne}
 \end{array}$$

À partir de cette information et de la mesure de champ reçu par le mobile, ce dernier est capable d'évaluer la perte de liaison dans le sens infra vers mobile ; il peut adapter sa puissance d'émission à partir de cette valeur de manière à ce que l'infrastructure le reçoive avec un niveau proche du niveau de consigne. En pratique, lorsque nous augmentons le paramètre « access level » d'un site TETRA, nous augmentons la puissance d'émission des mobiles [10].

c. Régulation de la puissance émise par les mobiles :

Lorsqu'une station de base reçoit un terminal avec un niveau de champ jugé excessif, elle lui demande de baisser sa puissance d'émission d'une manière quantifiée (en nombre de dB) afin d'éviter tout risque de pollution lointaine par ce mobile. Inversement, si le signal reçu est trop faible, l'infrastructure peut demander au mobile de relever sa puissance d'émission et, éventuellement, l'inciter à changer de site, en lui donnant des indications concernant les sites voisins (fréquence, classe de service,...). Cet asservissement ne peut être réalisé que lorsque le mobile est en mode « trafic », c'est à dire en communication (phonie ou données mode circuit) [10].

d. Niveau minimal de réception dans une cellule :

Sur chaque cellule, l'infrastructure diffuse une information indiquant aux mobiles le niveau minimum de champ qu'ils doivent recevoir pour pouvoir trafiquer dans cette cellule. En augmentant la valeur de ce paramètre, nous pouvons réduire la zone couverte pour une cellule, sans diminuer la puissance d'émission des stations de base, c'est à dire, sans sacrifier la qualité de liaison infrastructure vers mobile. Cette caractéristique est employée dans certaines situations particulières – par exemple dans le cas d'une cellule située en centre urbain à fort trafic, elle permet d'éviter que des mobiles en dehors de ce centre ne viennent surcharger le trafic de cette cellule ; ils sont ainsi invités à sélectionner des cellules de la périphérie [10].

e. Surveillance de la liaison par un terminal :

Cette surveillance porte sur le niveau de champ radio reçu et sur le coloriage de la station de base: chaque station dispose d'un code de coloriage qui lui est propre et avec lequel elle encode ses données. Le terminal connaît le code de la couleur utilisée, s'il ne reconnaît pas cette couleur dans les données reçues, il en déduit qu'il reçoit une autre station de base. Cette disposition est très utile pour protéger le mobile de la réception de stations de base lointaines qui utiliseraient la même fréquence radio [10].

f. Surveillance du temps de propagation :

Les éventuelles émissions d'un terminal mobile sont cadencées par le signal émis par l'infrastructure. L'infrastructure est donc capable de mesurer le temps écoulé pour que le signal fasse un aller et retour infra mobile infra. Si ce temps dépasse une valeur prédéterminée, l'infrastructure en déduit que le mobile est trop loin et qu'il convient de le ré aiguiser ailleurs [10].

2.9.2 Signaux transmis sur l'interface air

Les paquets sont organisés de manière hiérarchique en trame, multi trame et hyper trame, conformément au diagramme ci-après [10] :

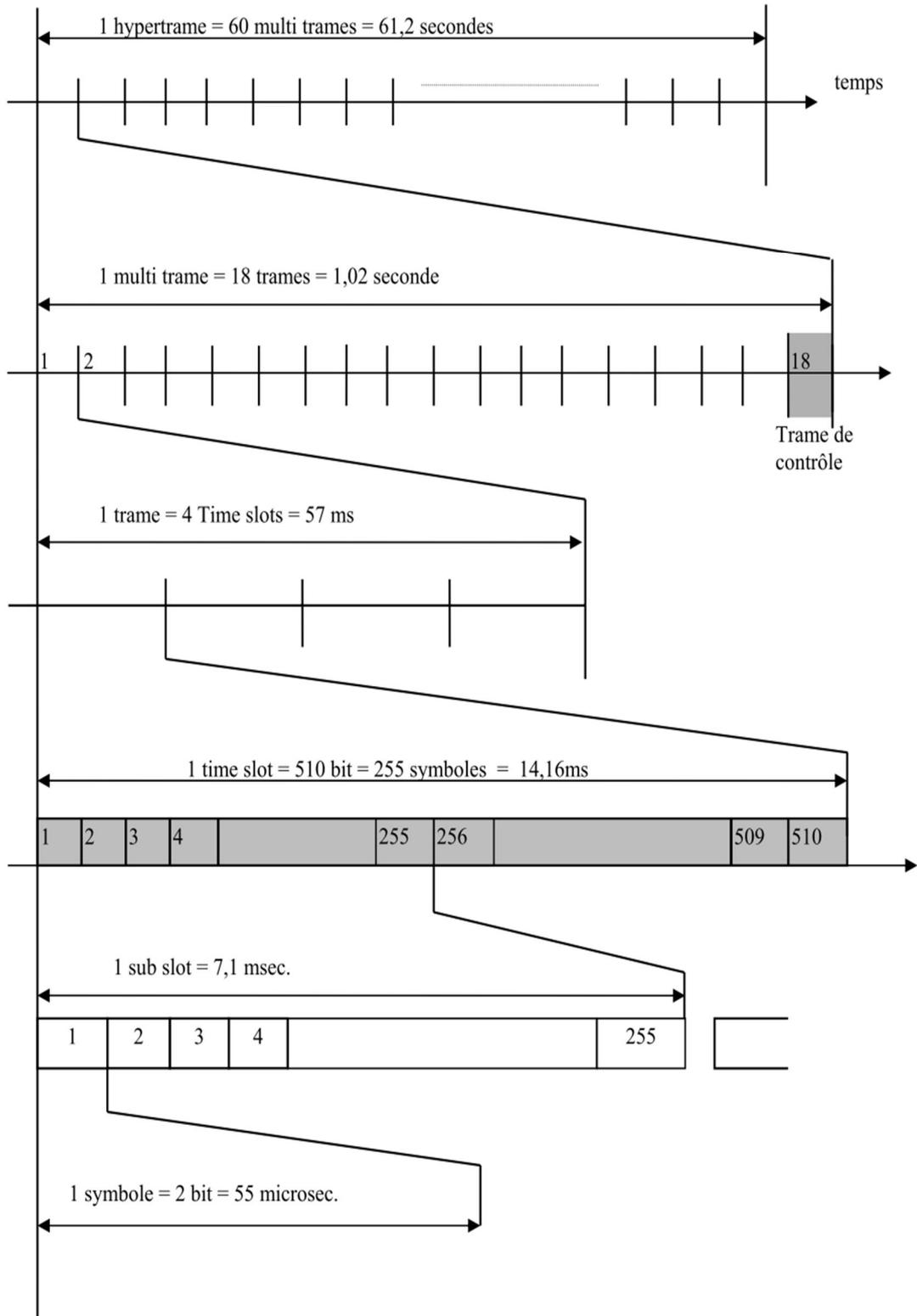


Figure 2. 15 Diagramme d'organisation des paquets.

Il existe 6 types de paquets possibles indiqué sur la figure suivante :

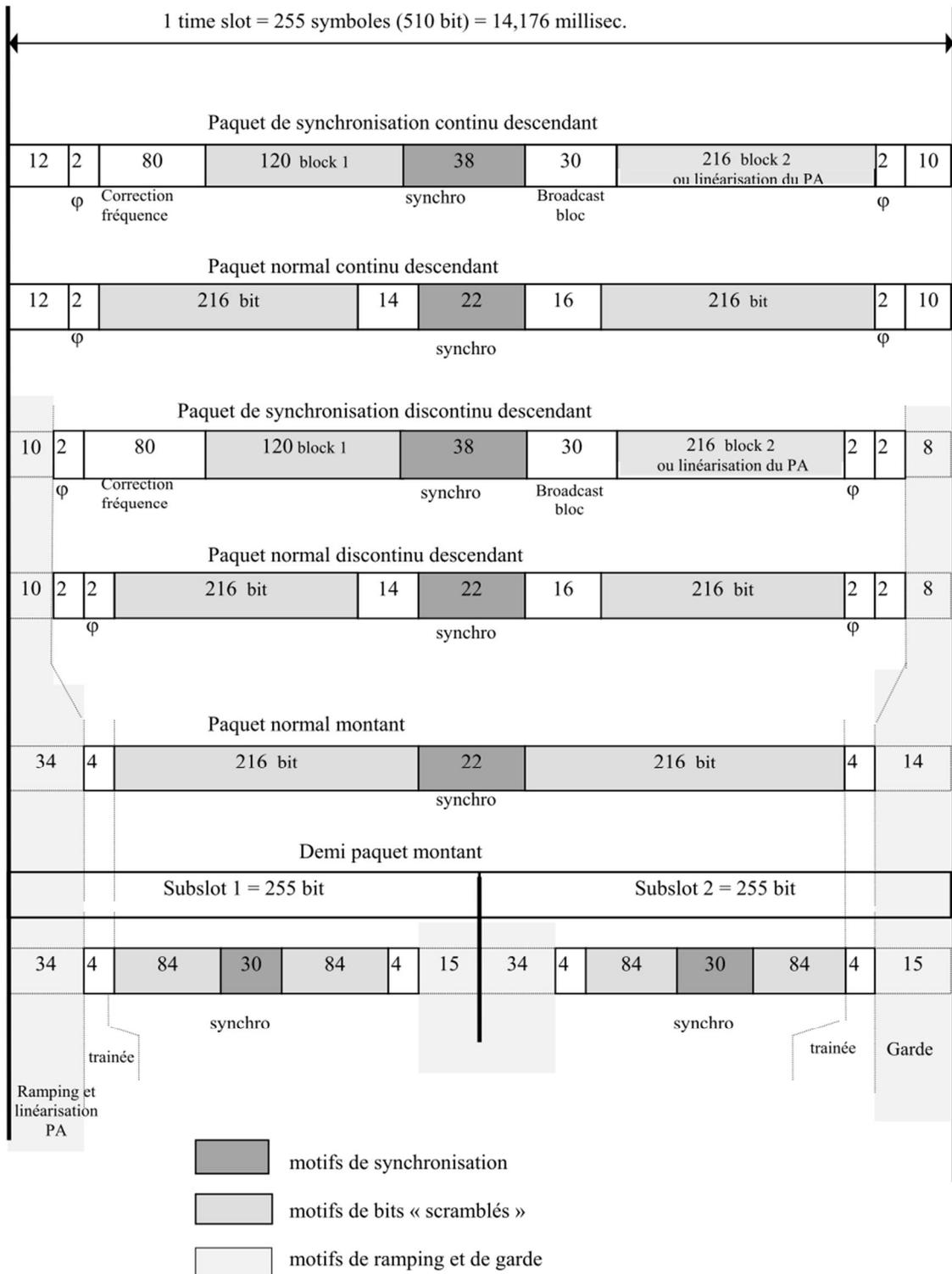


Figure 2. 16 Les différents types de paquets

a. Synchro paquet :

Les motifs de synchronisation TETRA sont placés exactement au milieu des paquets il en existe cinq types différents [10]:

- ❖ Un motif de 38 bit utilisé dans les paquets de synchronisation continus ou discontinus descendants ;
- ❖ Trois motifs différents de 22 bits utilisés dans les paquets normaux continus ou discontinus descendants et montants ;
- ❖ Un motif de 30 bits utilisés dans les demi-paquets montants.

b. Motifs de ramping et de linéarisation des PA :

Ces champs n'apparaissent que pour les paquets discontinus, en début de paquet; ils correspondent à la montée en puissance de l'émetteur TETRA; au cours de cette phase, les équipements peuvent effectuer des mesures de linéarité en sortie de PA pour calculer les corrections à apporter dans la suite du paquet. La montée en puissance elle-même doit donc être très rapide (inférieure à l'équivalent de 34 bit (17 symboles) pour les mobiles et 10 bit (5 symboles) pour les stations de base mais ne doit pas être trop rapide sous peine d'étaler le spectre du signal émis et de déborder dans les canaux adjacents; la forme de la montée et de la descente doit donc être parfaitement maîtrisée [10].

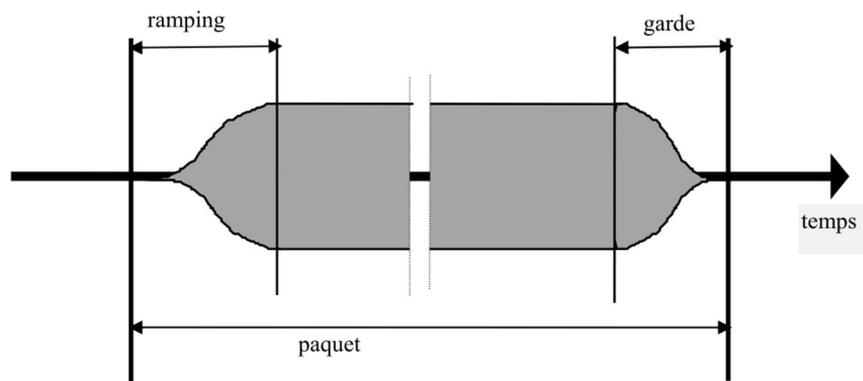


Figure 2. 17 Présentation d'un paquet.

c. Ajustage de phase :

L'ajustage de phase permet de faire en sorte que, après transmission d'un message en modulation $\pi/4$ DQPSK, la phase de la porteuse soit décalée d'une valeur constante - c'est à dire que, la déviation de phase globale due à ce message est constante et donc indépendante du contenu du paquet. Chaque élément d'ajustage de phase est de longueur de bit (un symbole), il est calculé sur un champ d'information défini selon le

type de paquet. Les bits d'ajustage de phase ont pour effet de présenter un décalage de phase de la porteuse constant de 45 degrés entre le début et la fin du paquet ; en conséquence, une porteuse modulée TETRA présente un décalage de fréquence de + 10 Hz par rapport à la porteuse non modulée [10].

d. Champs scramblés et champs non scramblés :

La plupart des champs de bit utiles sont « scramblés » c'est à dire que les bits y sont modifiés conformément à un code appelé « code de coloriage » Ce code de coloriage est spécifique à chaque station de base: un mobile en couverture d'une station de base connaît le code de cette station; si, pour une raison ou une autre, ce mobile reçoit le signal d'une autre station de base, le code de coloriage ne correspondra pas et les messages contenus dans les champs « scramblés » deviendront incompréhensibles. Tous les champs ne sont pas « scramblés »; en particulier, les champs donnant les indications générales relatives à la station de base (en particulier, le code de coloriage lui-même) ne sont pas coloriés [10].

e. Champ de correction de fréquence :

Ce champ contient une longue série de 64 bit valant zéro - il correspond à un sinus pur de fréquence décalée de +2,25 KHz par rapport à la porteuse; il permet à un récepteur de recaler très exactement sa base de temps; ce signal pur est entouré de deux brefs signaux de fréquence pure décalée de -6,75 KHz de la porteuse [10].

f. Symboles de traînée:

Ces champs ne se trouvent qu'aux extrémités des paquets montants, ils présentent 4 bits constants et ne servent que de tampon pour les effets des filtres émission et réception [10]

2.10 Les canaux TETRA

2.10.1 Principe des canaux TETRA

Les principaux canaux de la norme TETRA sont présentés sur le diagramme ci-dessous :

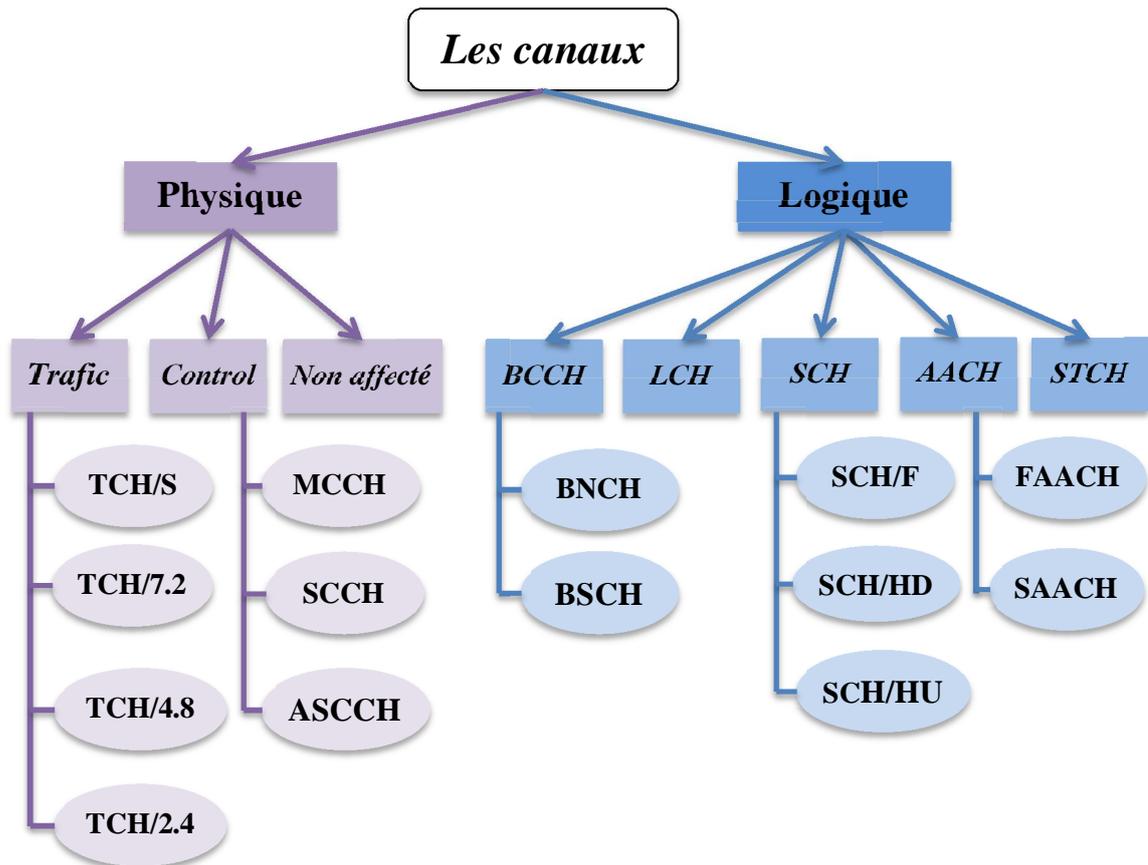


Figure 2. 18 Les différents canaux de système TETRA.

Nous distinguons deux niveaux de canaux :

- ❖ Les canaux physiques qui correspondent aux intervalles de temps ;
- ❖ Les canaux logiques ;

Ces canaux logiques sont des voies virtuelles de transmission affectées à des types de trafic particulier. Les canaux logiques sont transmis sur des canaux physiques et il y a 4 canaux physiques par porteuse TETRA sur un même site radio.

Il est à noter qu'à une échelle macroscopique portant sur plusieurs paquets, il y a transmission simultanée de plusieurs canaux à la fois [10].

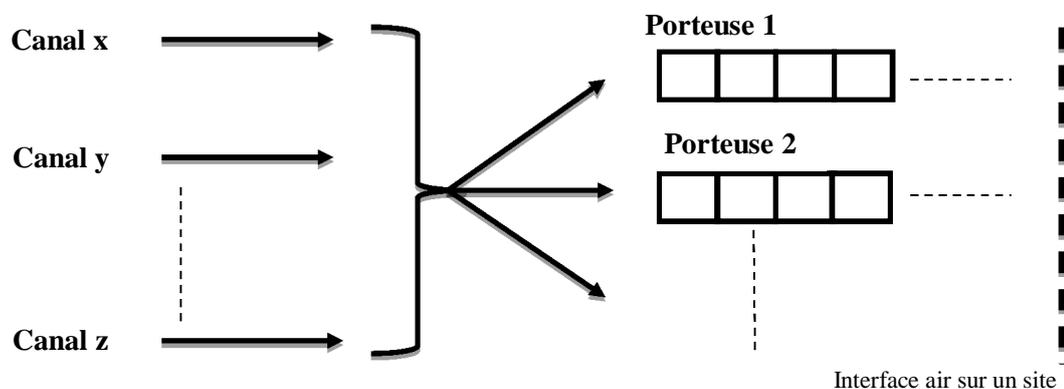


Figure 2. 19 Classification des canaux.

La notion de canal est relative à un site radio complet (équipé d'une ou de plusieurs stations de base) et donc relative à plusieurs porteuses radio, en revanche, un même canal ne peut pas être transmis simultanément sur plusieurs porteuses radio. Le débit d'un canal physique est constant, le débit d'un canal logique est très variable, fonction des paramètres suivants:

- ❖ La demande de débit éventuellement demandée (voir imposée) par les applications distantes ;
- ❖ La présence simultanée d'autres canaux à transmettre ;
- ❖ Le mode d'émission des stations radio .

Ce dernier point est lié au fait que, dans certaines conditions, nous pouvons utiliser les stations de base de manière «pulsée», c'est à dire non pas en émission continue mais en émission discontinue, avec un cycle émission/repos très variable. Certains canaux n'existent que dans un seul sens de transmission (infra vers mobile ou mobile vers infra), d'autres existent dans les deux sens [10].

2.10.2 Les différents canaux physiques TETRA

Les canaux physiques TETRA sont classés en trois groupes :

- ❖ Les canaux de trafic ;
- ❖ Les canaux de contrôle ;
- ❖ Les canaux non affectés .

C'est le switch TSW10 qui affecte dynamiquement tous les canaux physiques des BS qui lui sont rattachées. Dans le cas d'un relais automatique, ce canal est systématiquement ouvert sur le time slot 1 [10].

a. Les canaux de trafic :

Ce sont des canaux qui transportent soit de la parole, soit des données échangées en mode circuit.

Les canaux de trafic sont les suivants:

- ◆ TCH/S: canal de trafic supportant une voie audio,
- ◆ TCH/7.2: canal de trafic supportant une communication de données en mode circuit au débit de 7,2 Kb/s,
- ◆ TCH/4.8: canal de trafic supportant une communication de données en mode circuit au débit de 4.8 Kb/s,

- ◆ **TCH/2.4**: canal de trafic supportant une communication de données en mode circuit au débit de 2.4 Kb/s.

Dans la majorité des cas, les canaux de trafic sont utilisés en point à point, c'est à dire sélectivement entre deux équipements déterminés [10].

b. Les canaux de contrôle :

Les canaux de contrôle sont des entités qui servent de « porteurs » pour les canaux logiques de signalisation- ce sont des canaux **CCH** (**Common Control Channel**) qui se décomposent en:

- ◆ **Canal MCCH (Main Control Channel - canal de signalisation principal)** Il y a un et un seul MCCH par site radio, ce canal n'est donc associé qu'à une seule des fréquences radio utilisées sur le site. En général, ce canal est présent dans tous les times slot 1 des trames de 1 à 18. Lorsqu'un mobile arrive sur un site, c'est toujours le canal radio supportant le MCCH qu'il recherche. Sur un site, la station de base qui supporte le MCCH allume un voyant spécifique sur sa face avant. C'est le switch qui détermine quelle station de base supporte le MCCH en fonction des directives dans la base de données techniques et des éventuelles alarmes de site,
- ◆ **Canal SCCH (Secondary Control Channel)** c'est un canal de signalisation réservé pour certains groupes de mobiles. Lorsqu'un mobile appartenant à l'un de ces groupes se présente sur un site, il arrive sur le MCCH et il est invité à rejoindre son SCCH. Un canal SCCH peut être installé sur n'importe laquelle des fréquences radio utilisées sur un site – ainsi un canal SCCH peut être traité, sur le même site, par une station de base différente de la station de base portant le MCCH. La déclaration des canaux SCCH n'est pas implantée dans les versions actuelles,
- ◆ **Canal ASCCH (Associated Control Channel)** c'est un canal de signalisation utilisé en extension d'un canal MCCH ou SCCH. Un canal ASCCH doit être pris sur la même fréquence radio (sur la même BS) que le canal MCCH ou SCCH dont il est l'extension. Ce canal sert donc de dégagement en cas d'engorgement sur les canaux MCCH ou SCCH; ils sont utilisés de manière très particulière pour poursuivre des échanges commencés sur les canaux MCCH ou SCCH - en aucun cas, les requêtes initiales mobiles vers infrastructure ne sont transmises

sur ce canal, il n'y a donc aucun trafic événementiel sur ces canaux. C'est le switch TSW10 qui décide de l'affectation temporaire d'un canal ASCCH.

c. Les canaux non affectés:

Les canaux non affectés sont utilisés pour transmettre, dans certains cas, les canaux logiques de signalisation en diffusion (broadcast) [10].

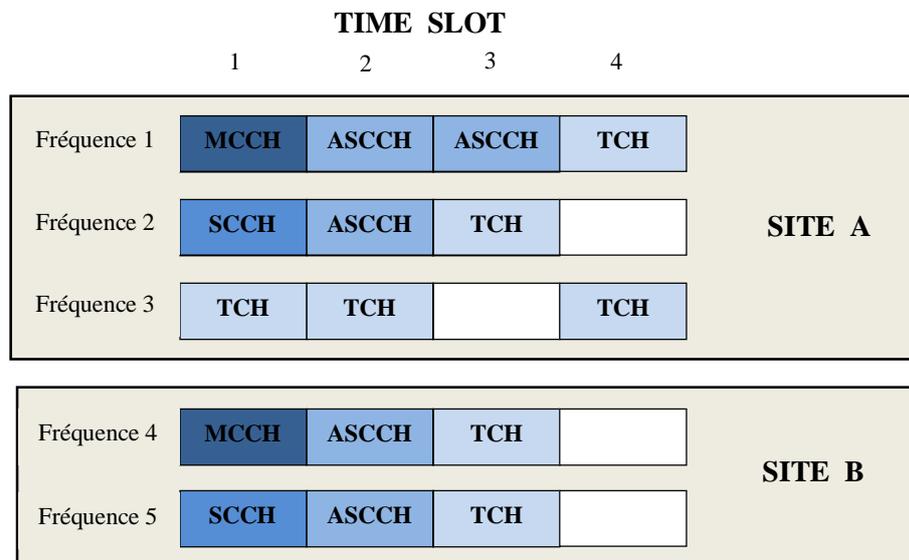


Figure 2. 20 Affectation des canaux physiques.

2.10.3 Les canaux logiques

Comme vu précédemment, les canaux logiques regroupent, pour chacun d'entre eux, des types d'information particuliers et, ces canaux logiques sont transmis soit sur des canaux physiques de contrôle, soit sur des canaux non affectés [10].

a. Les différents types de canaux logiques :

Nous distinguons les canaux suivants:

◆ **Canaux BCCH (Broadcast Common Channel)** ce sont des canaux de diffusion d'informations générales à destination de tous les mobiles, ils n'existent donc que dans le sens infra vers mobile (downlink). Il y a deux types de tels canaux :

➤ **Canal BNCH (Broadcast Network Channel):** l'infrastructure y diffuse toutes les informations relatives au réseau avec :

- La fréquence du MCCH du site ;
- Le nombre de canaux de signalisation auxiliaires ;
- La puissance maximale d'émission mobile autorisée dans la cellule ;
- Le niveau mini de réception dans la cellule ;

- L'identificateur de chiffrement ;
- Description des slots utilisés en cas de time sharing ;
- Des paramètres régissant le mode d'accès aléatoire ;
- La priorité ;
- Le numéro du réseau (numéro de pays et d'opérateur) ;
- La diffusion d'informations sur les cellules avoisinantes ;
- Le rappel ou non des tardifs .

➤ **Canal BSCH (Broadcast Synchronisation Channel)**: l'infrastructure y diffuse des informations nécessaires aux mobiles pour se synchroniser sur le réseau avec :

- Le code de coloriage ;
- Les numéros de time slot, trame, et multi trame ;
- Le détail des services offerts sur la cellule ;
- Le mode de partage (time sharing, frequency sharing) ;
- Les numéros de time slot réservés ;
- Inscription exigée ou non ;
- Dés inscription exigée ou non ;
- Indication de cellule préférentielle ou non ;
- Mode minimum possible ou non ;
- Possibilité de migration ;
- Possibilité de roaming ;
- Service phonie assuré ;
- Service données en mode circuit assuré ;
- Service données CONP et SCLNP assuré ;
- Chiffrement ;
- Advanced link.

Les indications suivantes sont également diffusées sur requête d'un seul mobile :

- Changement de cellule ;
- Seuils radio rapide et lent ;
- Hystérésis rapide et lent ;
- Charge de la cellule ;
- Heure TETRA ;
- Informations sur les cellules voisines ;
- Fréquence principale et fréquences supplémentaires ;

- Niveau minimum de champ pour le service ;
- Puissance max autorisée ;
- Niveau min pour accéder au service ;
- Classes d'utilisateurs admis ;
- Détail des services ;
- Informations sur le mode de partage temporel.

◆ **Canaux LCH (Linéarisation Channel)** c'est par un abus pratique de langage que sont ainsi dénommés les temps morts accordés aux équipements terminaux pour se linéariser, bien entendu, aucune information n'est transmise sur ce canal.

◆ **Canaux SCH (Signalling Channel):** ce sont les canaux de signalisation (que nous pouvons rapprocher des canaux de voie balise des systèmes trunk analogiques). Plusieurs types de canaux de signalisation sont distingués :

- **Canal SCH/F** canal de signalisation bidirectionnel utilisant des paquets entiers ;
- **Canal SCH/HD** canal de signalisation descendant utilisant des demi-paquets ;
- **Canal SCH/HU** canal de signalisation montant utilisant des demi-paquets ;

◆ **Canal AACH (Assign and Access Channel)** ce canal n'est utilisé que dans le sens descendant: il donne les affectations des différents intervalles de temps - en particulier, c'est donc lui qui porte les informations d'ALOHA, le canal AACH est dissocié en deux sous canaux :

- **Le canal FAACH (Fast AACH)** est porté sur les trames 1 à 17 ;
- **Le canal SAACH (Slow AACH)** est porté sur les trames 18 ;

◆ **Canal STCH (Stealing Channel)** c'est un canal de signalisation particulier utilisé pour transmettre de la signalisation depuis et vers un mobile pendant une communication, cette signalisation étant mélangée à la voix.

2.11 Protocoles de communication

Les protocoles de communication sont empilés en couches selon le modèle OSI, et sont spécifiés dans les normes TETRA.

Les couches 1 à 3 sont subdivisées comme indiqué à la figure 2.21.

– **La couche réseau (3)** assure la commutation et le routage des paquets entre les nœuds du réseau. Pour le modèle OSI, il existe deux méthodes principales d'acheminement: la commutation de circuits et la commutation de paquets. C'est cette couche qui gère les congestions sur les nœuds du réseau.

La couche réseau de la norme TETRA comprend :

- Un plan C correspond à toutes les informations de signalisation (gestion, données, ainsi que trafic de données en mode paquet),
- Des éléments MM, CMCE et PD sont définis à la figure 2.21,
- L'entité MLE (gestion de liaison mobile/base («Mobile/base Link control Entity»)) gère la connexion mobile/base mobile, la mobilité dans la zone d'enregistrement, la gestion d'identité, le choix de la qualité de service et la discrimination de protocole (acheminement vers les applications de couche supérieure).

– **La couche liaison (2)** a pour but de transmettre les données sans erreur. Elle décompose les données de l'émetteur en trames de données puis les envoie de façon séquentielle. Différentes méthodes permettant de protéger les données contre les erreurs sont utilisées, comme le codage de détection et de correction d'erreur.

Dans la norme TETRA nous distinguons deux sous couche de liaison LLC et MAC.

- La couche LLC (gestion de liaison logique « Logical Link Control ») programme les transmissions et retransmissions de données, les opérations de segmentation et de réassemblage et les opérations de traitement de la liaison logique,
- La couche MAC (gestion d'accès au support « Media Access Control ») assure les opérations de synchronisation de trame, d'entrelacement/désentrelacement (dans le codage des canaux), d'accès aléatoire, de fragmentation/réassociation et de mesure du taux d'erreur binaire (TEB) à des fins de gestion. Ainsi que les informations du plan U correspondent au trafic vocal en mode circuit ou au trafic de données en mode circuit.

– **La couche physique (1)** s'occupe de la connexion physique sur le réseau. Elle se charge de la transmission de bits à l'état brut sur un canal de transmission. Les problèmes de conception de cette couche concernent les interfaces électriques, la synchronisation, ainsi que les spécifications du support physique de transmis.

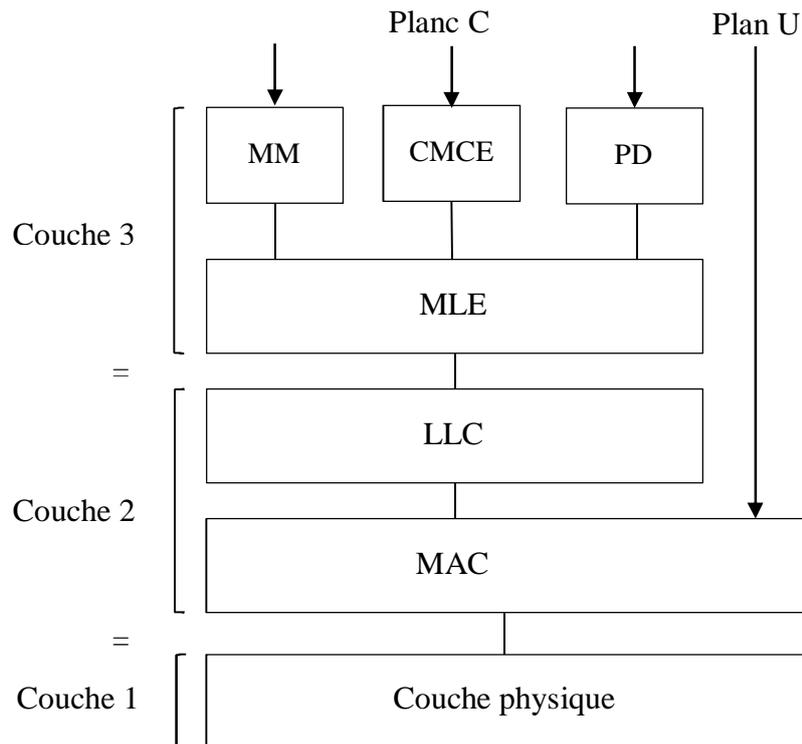


Figure 2. 21 Les trois premières couches du modèle OSI.

Trafic au niveau du Plan C:

- MM: Gestion de mobilité (Mobility Management)
Gère la mobilité et les transferts.
- CMCE: Unité de gestion de mode circuit (Circuit Mode Control Entity)
Commande de communication, services supplémentaires et service de données (messages brefs).
- PD: Données par paquets (Packet Data)
Commande la transmission de données par paquets, modes connexion/sans connexion.

Trafic au niveau du Plan U:

- Transmission de signaux vocaux en clair ou cryptés.
- Données non protégées en mode circuit.
- Données protégées en mode circuit (bas).
- Données protégées en mode circuit (haut).

2.12 La différence entre TETRA et GSM

TETRA n'est pas prévu pour ne concurrencer le GSM ou aucune autre technologie cellulaire; ils sont clairement faits à des fins différentes. Tandis que TETRA a été conçu pour les applications de PMR, GSM a été conçu pour la téléphonie cellulaire publique. Le tableau 2.5 montre un résumé de différents services mobiles et de sa disponibilité par nos deux normes appropriées [11].

Service	GSM	TETRA
<i>Appel individuel</i>	Disponible	Disponible
<i>Appel de groupe</i>	Non disponible	Disponible
<i>Appel d'urgence</i>	Disponible	Disponible
<i>Messages de données courts</i>	Disponible	Disponible
<i>Chiffrement</i>	Disponible	Disponible
<i>Authentification</i>	Non disponible	Disponible
<i>Services de données</i>	Disponible	Disponible
<i>La couverture du réseau</i>	Non disponible	Disponible

Tableau 2. 5 Comparaison des services offerts par le GSM et TETRA.

Il a été affirmé que TETRA est plus robuste que le GSM. TETRA offre certaines caractéristiques spécifiques qui ne peuvent être trouvés dans le GSM, y compris un certain nombre de caractéristiques conçues pour la sécurité et l'utilisation d'urgence. Par exemple, il permet un-à-un et un-à-plusieurs modes de communication, et grâce à sa technologie basée sur un système à quatre sous, elle peut utiliser plusieurs fréquences porteuses à augmenter de manière significative l'utilisation du canal radio [8]. Les services commerciaux de GSM ne sont pas à la mission critique, ils s'effondrent sous forte charge. En revanche, TETRA a prouvé la capacité de gérer mises à jour de localisation de milliers d'unités dans la ville dense domaines dans des conditions très exigeantes.

Les différences entre le système GSM et le système TETRA peuvent être récapitulées comme suit [11] :

	GSM	TETRA
Utilité	Téléphonie cellulaire public	Applications radio mobiles professionnels
Fréquences range	900 à 1910 MHz	380 à 430 MHz
Méthode d'accès au canal	Frequency Division Multiplication Access (FDMA) Et (TDMA)	Time Division Multiplication Access (TDMA)
Le temps d'installation des appels	Secondes. (Ne convient pas pour les services d'urgence)	Millisecondes. (Convient pour les services d'urgence)
Sécurité	Aucune authentification pour les parties à l'écoute	Authentification, plus le cryptage
La tolérance de réseau	Congestion dans des situations difficiles	Tolérance à la congestion dans des situations stressantes

Tableau 2. 6 Résumé des différences entre GSM et TETRA.

Le schéma ci-dessous montre les spécificités techniques de la norme.

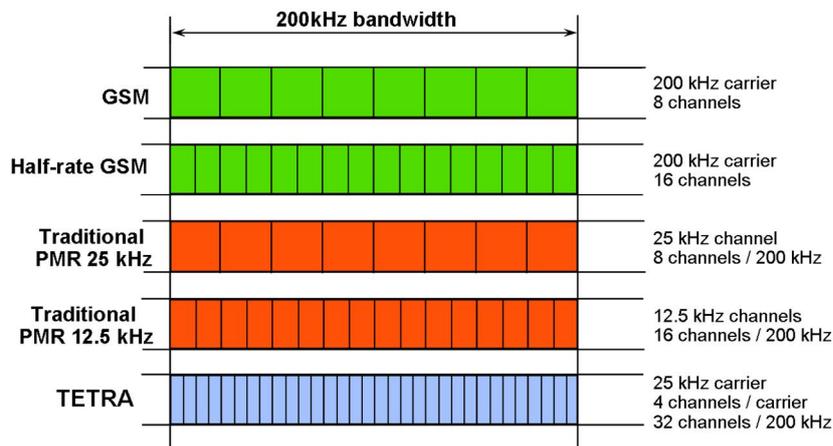


Figure 2. 22 Spécificités techniques de la norme TETRA.

2.13 Avantages et inconvénients de TETRA

2.13.1 Les avantages

Les avantages principaux de TETRA par rapport à d'autres technologies (telles que le GSM) sont :

- Une fréquence radio utilisée plus basse, ce qui permet une grande couverture géographique avec un petit nombre d'émetteurs, réduisant ainsi le coût d'infrastructure.
- Un établissement d'appel rapide - un appel de groupe (un vers tous) est généralement émis en 0,5 seconde (typiquement moins de 250 millisecondes pour un appel simple), comparé aux nombreuses secondes lors d'un appel sur le réseau GSM.
- Le fait que son infrastructure puisse être séparée de celle du réseau public mobile, et être rendue essentiellement plus diverse et résiliente par le fait que les stations de base peuvent être à une certaine distance du secteur couvert.
- À la différence de la plupart des technologies cellulaires, les réseaux TETRA fournissent typiquement un certain nombre de modes de secours tels que la capacité pour une station de base de passer des appels locaux en l'absence du reste du réseau, et « le mode direct » où les mobiles peuvent continuer à partager des canaux directement si l'infrastructure du réseau TETRA est hors service ou hors de portée.
- Un mode "passerelle" - où un mobile simple avec un raccordement au réseau peut agir en tant que relais pour d'autres mobiles voisins qui sont hors de portée avec l'infrastructure.
- L'infrastructure TETRA fournit également une fonction de point-à-point que les systèmes radio analogiques traditionnels des services de secours ne peuvent pas fournir.

Ceci permet à des utilisateurs d'avoir une liaison radio un-à-un entre mobiles sans devoir passer par un opérateur ou un dispatcher.

- À la différence des technologies cellulaires, qui relie un abonné à un autre abonné (un à un), TETRA est construit pour supporter les communications un à un, un à plusieurs et de plusieurs à plusieurs. Ces modes opérationnels sont parfaitement adaptés à la sécurité publique et aux utilisateurs professionnels.

- Avec TETRA, les communications, tant vocales que données, ne circulent pas en clair. Elles sont toujours chiffrées, aussi bien au niveau de l'émission que de bout à bout.
- Il existe aussi des possibilités d'appel de secours direct en court-circuitant les priorités des autres mobiles pour avoir un acheminement direct. Dans l'industrie, ce système peut aussi être couplé à un système de localisation et d'homme mort (utilisé dans les centrales nucléaires françaises par exemple).
- Au niveau sécurité, il y a la possibilité grâce à l'inscription des mobiles au démarrage de n'autoriser à l'inscription au réseau qu'une liste prédéfinie de mobiles [12].

2.13.2 Les inconvénients

Ses inconvénients principaux sont:

- TETRA ne peut supporter qu'un nombre de terminaux mobiles très inférieur à ce qu'un réseau GSM et les technologies semblables permettent dans un secteur donné. (Ceci n'est pas un problème dans les applications pour lesquelles il est normalement employé, mais cela limite la plupart du temps l'utilisation de TETRA à ces applications).
- Les combinés sont onéreux, à cause des économies d'échelle réduites, des modèles différents adaptés à des besoins variés, comparé au marché des téléphones mobiles grand public. La nécessité d'avoir un terminal sûr et robuste fait aussi augmenter son prix.
- Le transfert de données est lent à 7,2 kbit/s par time-slot (le flux de données utilisable n'est que de 3,5 kbit/s), bien que jusqu'à 4 time-slots puissent être combinés pour atteindre des taux plus élevés, en raison de l'adaptation nécessaire à la largeur des canaux de 25 kHz.
- En raison de la nature pulsée (burst) du TDMA utilisé par le protocole, les combinés peuvent interférer avec des dispositifs électroniques sensibles tels que les stimulateurs et défibrillateurs cardiaques, de même qu'avec d'autres équipements de transmission radio quand ils sont utilisés à proximité immédiate (en particulier à moins d'un mètre de distance.) [12].

2.14 Conclusion

Les réseaux radio à ressources partagées TETRA se positionnent comme une solution idéale pour permettre d'établir de façon rapide, fiable et sécurisée des réseaux radios privés selon les besoins de l'entreprise. Ils représentent aujourd'hui l'une des meilleures alternatives en la matière et aident à minimiser les coûts d'utilisation des fréquences, tout en favorisant les contrôles d'utilisation et la qualité de service.

L'accent sera également porté sur les interconnexions réseau, d'une part par des capacités accrues en matière de roaming (passage d'une cellule à l'autre de manière transparente et instantanée pour l'utilisateur), et d'autre part via des possibilités d'interconnexions avec des réseaux hétérogènes toujours plus poussées.

Chapitre 3 Simulation et résultats

3.1 Introduction

Il est important, pour bien comprendre les phénomènes de perturbations qui sont créés par le canal terrestre, de réaliser des mesures en conditions réelles et de simuler certains comportements qu'il ne serait pas possible de mesurer en pratique.

Au cours de ce chapitre, nous allons étudier par simulation une chaîne de transmission TETRA en liaison montante (uplink). Cette simulation a été faite sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Le choix des paramètres de simulations est basé sur les références utilisées.

3.2 Implémentation de La chaîne de transmission TETRA

Le schéma global de notre chaîne de transmission TETRA est donné par la figure ci-dessous, cette chaîne contient les éléments suivants:

- Une Source d'information,
- Un codeur/décodeur de canal,
- La modulation/démodulation propre au système TETRA,
- Un filtre d'émission et de réception,
- Et un canal de transmission.

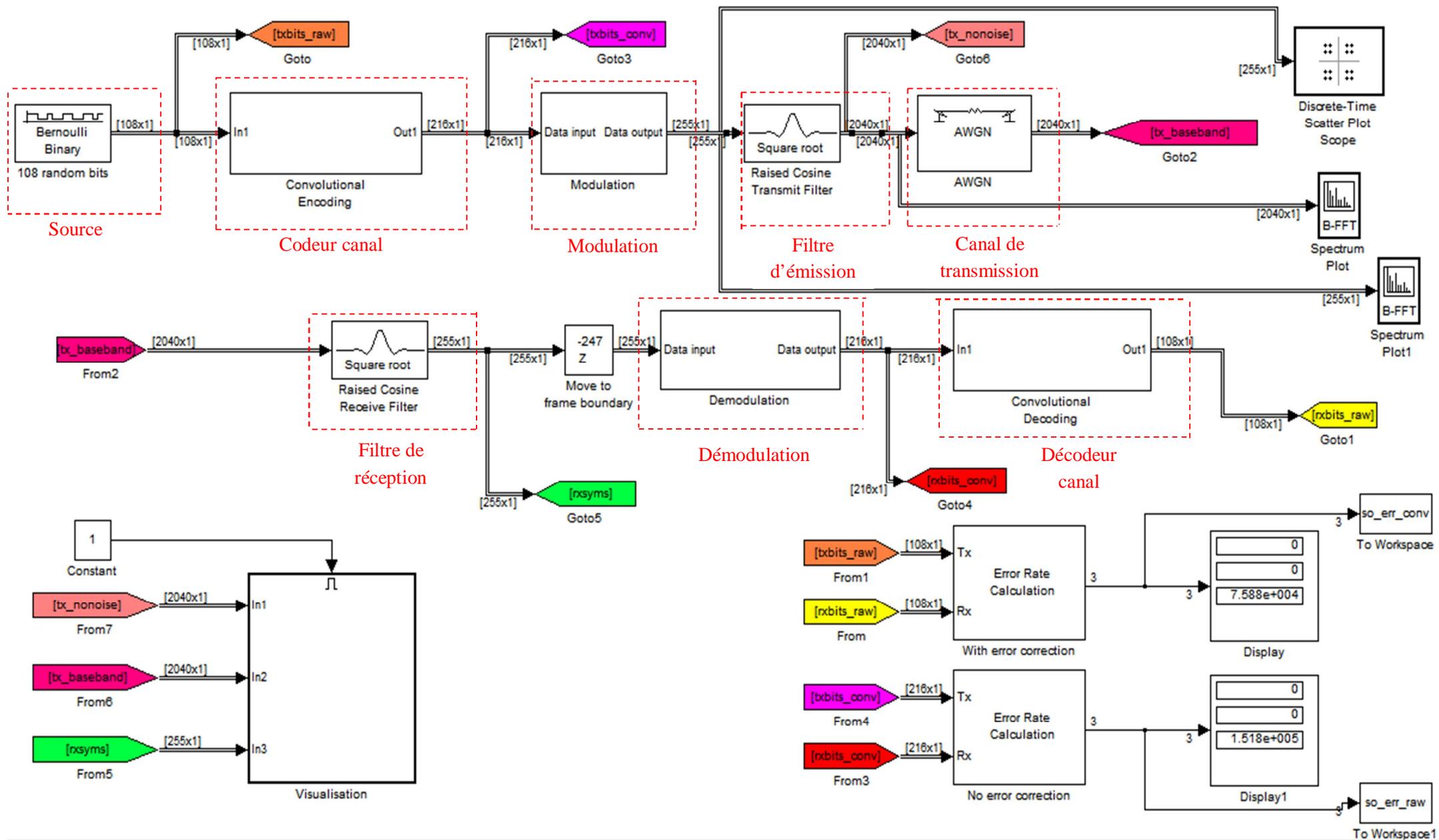


Figure 3. 1 Implémentation de la chaîne de transmission TETRA.

3.2.1 Bloc de source

Dans les systèmes de transmission il y a beaucoup de source d'information, dans le cadre de notre projet nous utilisons le générateur de Bernoulli.

❖ *Générateur de Bernoulli:*

Ce bloc est employé comme source de notre système pour générer des impulsions binaires aléatoires. La figure 3.2 nous montre les paramètres de configuration de cette source.

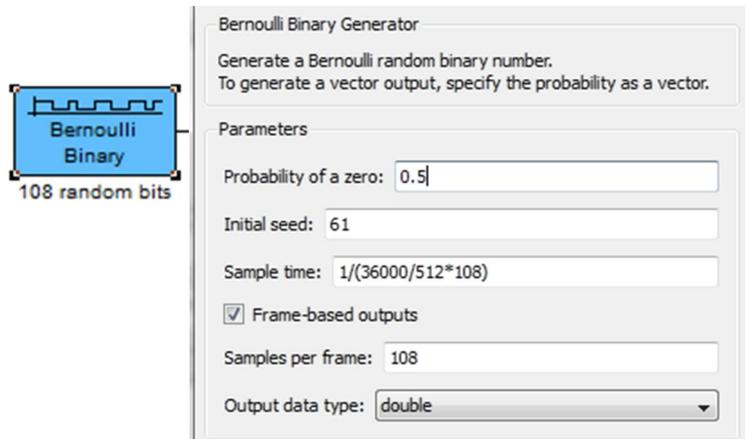


Figure 3. 2 Bloc générateur Bernoulli.

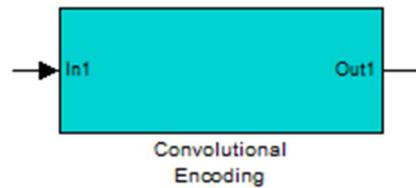
Les paramètres de configurations sont présentés sur le tableau suivant qui concerne spécifiquement le système TETRA et leur fonctionnement.

Paramètres	Valeurs	Commentaires
Probabilité d'un zéro (<i>Probability of a zero</i>)	0.5	Probabilité de 0,5 (50%) d'avoir un zéro
Valeur initial (<i>initial seed</i>)	61	La valeur de départ initiale du générateur de nombres aléatoires
Temps d'échantillonnage (<i>sample time</i>)	$1/(36000/512*108)$	Temps d'échantillonnage pour avoir un débit de 36 kbits/s
Sorties basées sur les trames (<i>frame-based outputs</i>)	Active	Détermine si la sortie est basée sur une trame ou à base d'échantillons
Échantillons par trame (<i>samples per trame</i>)	108	Nombre des bits transmis
type de données de sortie (<i>output data type</i>)	Double	Indique le type de donnée de sortie

Tableau 3. 1 Paramètres de bloc générateur de Bernoulli.

3.2.2 Bloc de codage canal

Dans notre projet nous utilisons un codage canal présenté sur la figure suivante:



Ce bloc contient des sous blocs suivants:

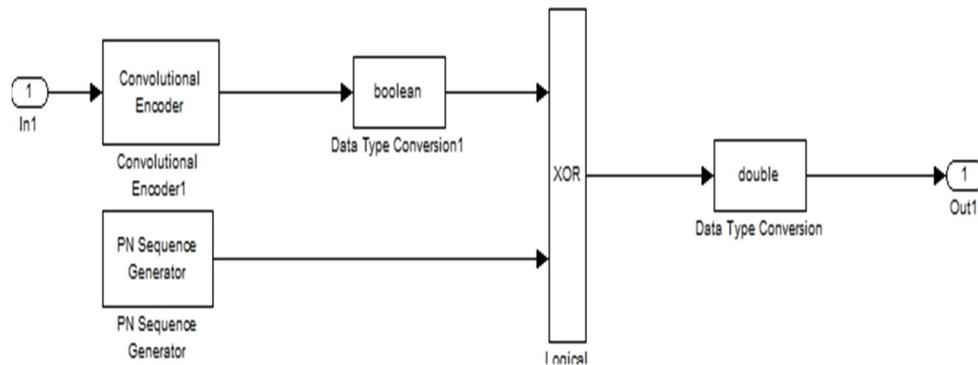


Figure 3. 3 Bloc codage canal.

Les différents sous blocs de codage canal sont présentés sur la forme suivante :

3.2.2.1 Implémentation de codeur convolutif

Dans cette étape nous pouvons implémenter le bloc de codage convolutif défini sur la figure ci-dessous.

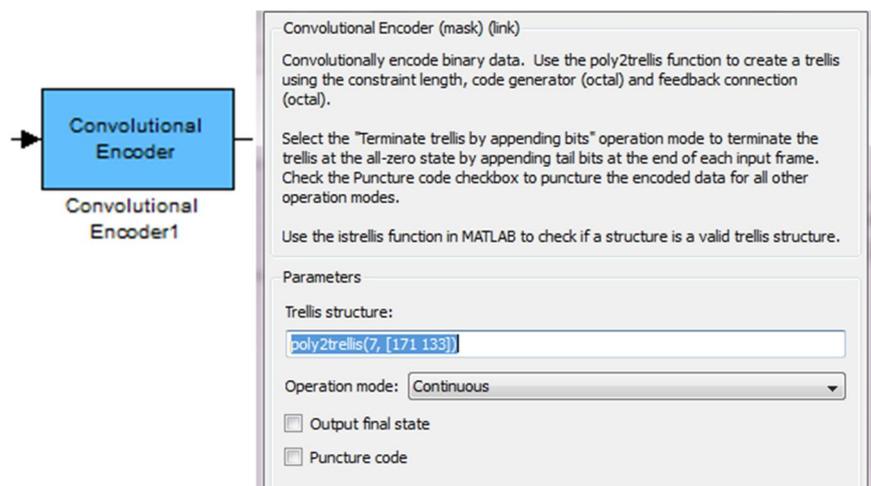


Figure 3. 4 Bloc codage convolutif.

Le tableau 3.2 représente les différents paramètres de notre codeur convolutif.

Paramètres	Valeurs	Commentaires
Structure en Trellis (<i>Trellis structure</i>)	poly2trellis (7,[171 133])	Structure MATLAB qui contient la description treillis du codeur à convolution
Mode de fonctionnement (<i>operation mode</i>)	Continuous	En mode continu, le bloc conserve les états du codeur à la fin de chaque entrée, pour une utilisation avec la trame suivante.

Tableau 3. 2 Paramètre de bloc codeur convolutif.

Lorsque nous comparons des milieux très bruités comme dans le cas des liaisons satellites ou terrestres, il convient de renforcer encore les mesures de protection des données à transmettre. Nous allons mettre en œuvre un code convolutif dont les bits sont indépendants. L'idée du code convolutif est de lier un bit à un ou plusieurs bits précédents de sorte à pouvoir retrouver sa valeur en cas de problème. Les bits de données sont codés par un codeur convolutif binaire, qui a un taux de 1/2 et une longueur de contrainte égale à 7. Les polynômes générateurs utilisés pour dériver les bits du codage des deux sorties X et Y , sont donnés sur le tableau suivant:

Polynôme générateur	En binaire	En octal
$G_1 = x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$	$G_1 = [1111001]$	$G_1 = [171]$
$G_2 = x^6 + x^4 + x^3 + x^1 + 1$	$G_2 = [1011011]$	$G_2 = [133]$

Tableau 3. 3 Les polynômes générateurs du code convolutif utilisé.

La figure (3.5) représente le codeur utilisé par le système TETRA:

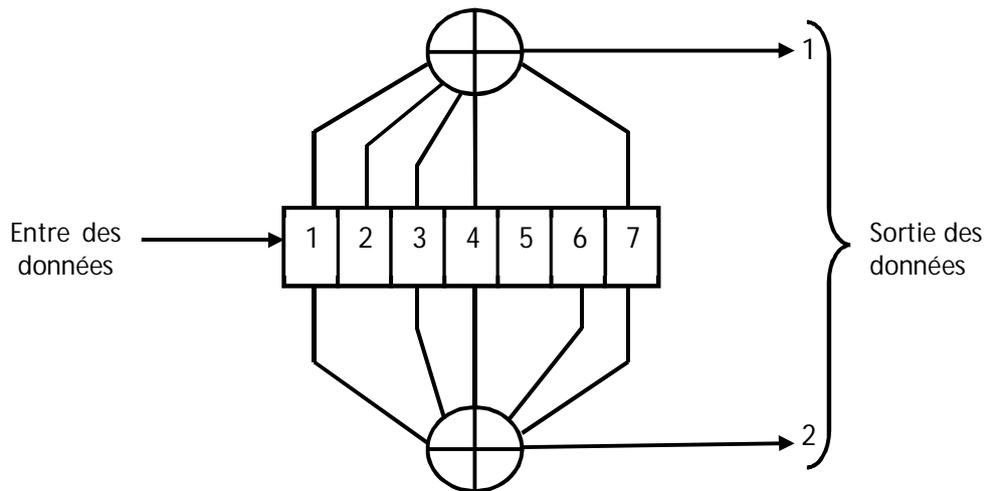


Figure 3. 5 Le registre à décalage du codage convolutif.

Nous constatons que chaque bit incident va générer deux bits en sortie et qu'il sera lié aux 6 bits précédents. Le bit 1 de sortie est un "OU exclusif" entre les bits 1, 2, 3, 4 et 7 tandis que le bit 2 de sortie est un "OU exclusif" des bits 1, 3, 4, 6 et 7.

3.2.2.2 Bloc générateur de séquences PN

Ce bloc génère une séquence de nombres binaires pseudo-aléatoires. Nous utilisons ce générateur dans notre système pour le but de chiffrer le message à transmettre. Il utilise un registre à décalage pour générer des séquences. Il est représenté par la figure 3.6.

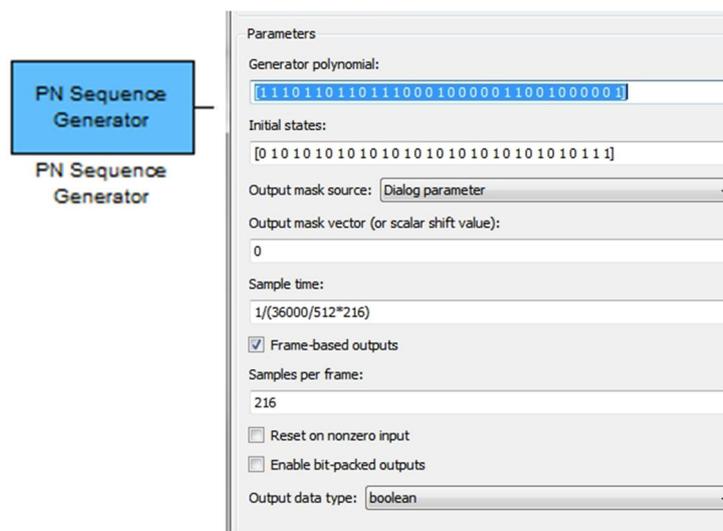


Figure 3. 6 Bloc générateur PN.

Les paramètres de configurations de bloc générateur PN sont présentés sur le tableau suivant:

Paramètres	Valeurs	Commentaires
Polynôme générateur (<i>Generator polynomial</i>)	[1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 1]	Polynôme qui détermine les connexions du registre à décalage.
États initiaux (<i>Initial states</i>)	[0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1]	Un vecteur spécifiant les valeurs initiales des registres
Collection de masque de sortie (ou de la valeur de décalage de scalaire) <i>Shift (or mask)</i>	0	Entier scalaire ou un vecteur binaire qui détermine le retard de la séquence PN à partir de l'instant initial
Temps d'échantillonnage (<i>Sample time</i>)	1/(36000/512*216)	Période de chaque élément du signal de sortie.
<i>Frame-based outputs</i>	Active	Détermine si la sortie est basée sur une trame ou à base d'échantillons
Échantillons par trame (<i>Samples per frame</i>)	216	Nombre de bit de sortie
type de données de sortie (<i>Output data type</i>)	Boolean	Le type de donnée en sortie

Tableau 3. 4 Paramètres de bloc générateur de séquence PN.

❖ *Polynôme générateur*

L'expression suivante montre le polynôme générateur utilisé:

$$G(x) = x^{32} + x^{31} + x^{30} + x^{28} + x^{27} + x^{25} + x^{24} + x^{22} + x^{21} + x^{20} + x^{16} + x^{10} + x^9 + x^6 + 1 \quad (3.1)$$

Nous mettons un convertisseur après le codeur convolutionnel (figure 3.7) pour convertir les données de sortie de type Double au Boolean afin qu'ils deviennent cohérentes avec les données de générateur PN. Ensuite nous faisons l'opération XOR pour les deux sorties de données. Une fois le résultat XOR obtenue nous remettons les données résultantes vert le type double par un autre convertisseur.

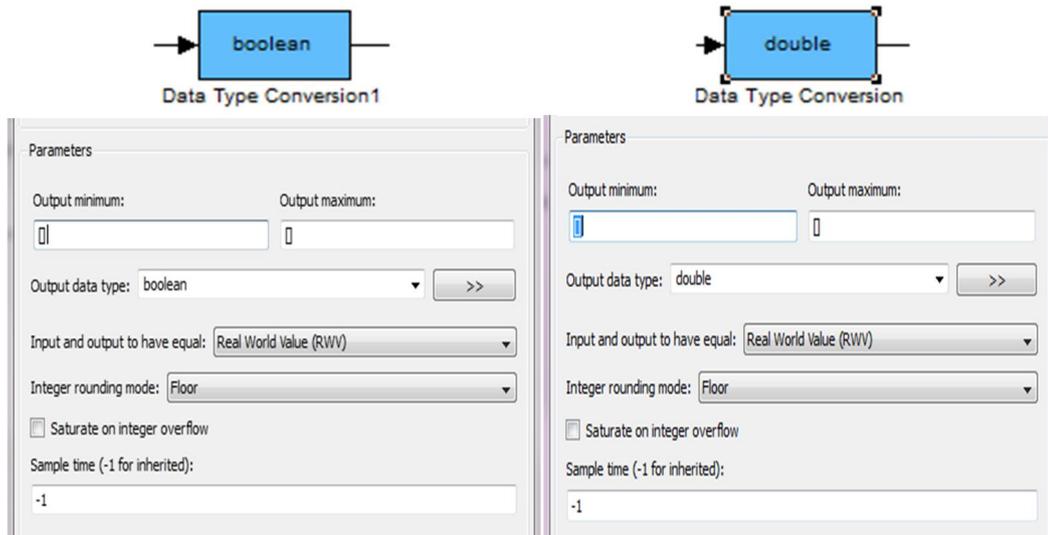


Figure 3. 7 Blocs convertisseurs.

Le tableau 3.5 représente les paramètres de configuration de bloc convertisseur.

Paramètres	Valeurs	Commentaires
minimum de sortie (<i>Output minimum</i>)	[] (non spécifié)	Valeur inférieure de la plage de sortie qui vérifie Simulink.
maximale de sortie (<i>Output maximum</i>)	[] (non spécifié)	Valeur supérieure de la plage de sortie qui vérifie Simulink
type de données de sortie (<i>Output data type</i>)	Double	Type de données de sortie est double.
À l'égalité d'entrée et de sortie' (<i>Input and output to have equal</i>)	Real World Value (RWV)	Spécifiez le type d'entrée et de sortie doivent être égales, dans le cadre de la représentation des données de point fixe
Mode d'arrondi un entier (<i>Integer rounding mode</i>)	Floor	Rounds deux nombres positifs et négatifs vers l'infini négatif. Équivalent à la fonction d'étage MATLAB.
Temps d'échantillon (<i>Sample time (-1 for inherited)</i>)	-1 (par défaut)	Entrez l'intervalle entre discrète échantillon coups de temps ou spécifier un autre moment approprié de l'échantillon comme continu ou hérité.

Tableau 3. 5 Paramètres de bloc convertisseur.

3.2.3 Bloc de modulation

Le message codé est transformé à partir d'un alphabet dont l'entrée correspond à une partie du signal à transmettre (i.e. un symbole). Le type de modulation utilisé dans la norme TETRA est la modulation $\pi/4$ DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying).

Implémentation: Après l'opération de codage canal nous passons à l'opération de modulation (figure 3.8):

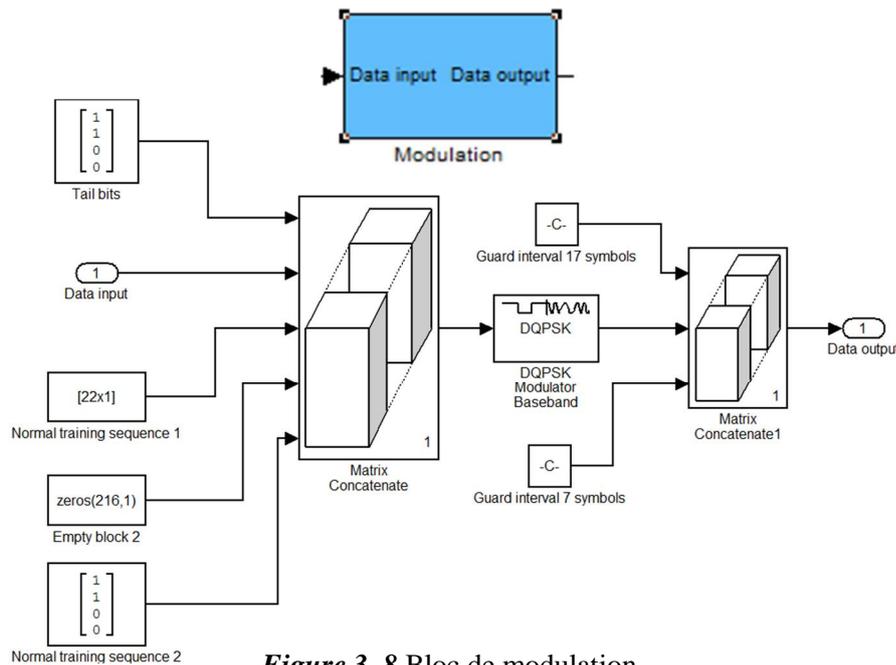


Figure 3. 8 Bloc de modulation.

Les différents sous blocs de la modulation sont présentés sur la forme suivante :

3.2.3.1 Multiplexage temporel

Une trame TDMA de TETRA dure 56.67 ms. Elle est formée de quatre trames radio de 14.167 ms transportant 510 bits de donnée chacune. Nous déduisons donc que le débit binaire brut est de 36 kbps. À cause de l'effet des bits de synchronisation et d'apprentissage du canal, le débit utile est bien de 28 kbps. 18 trames sont ensuite regroupées en une unique trame appelée super trame. La 18^{ème} trame (Control Frame ou CF) est réservée à la signalisation en mode circuit. Elle forme le Slow Associated Control Channel (SACCH) toujours disponible.

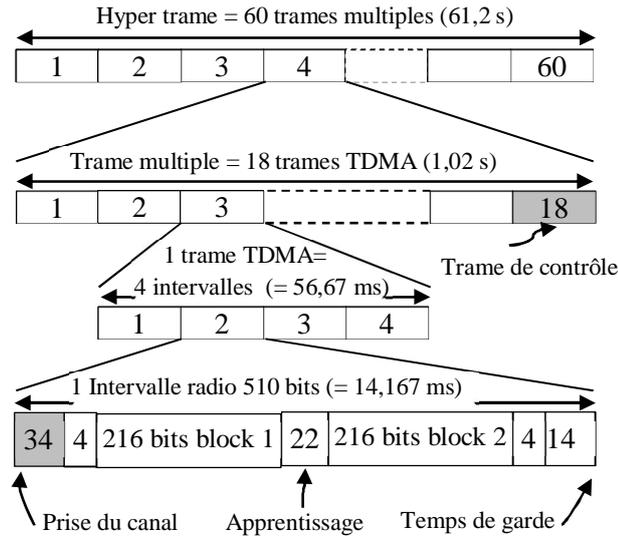


Figure 3. 9 Structure de la trame TETRA.

Les paquets de bits utilisés pour moduler la phase de la porteuse radio sont généralement constitués d'une partie utile contenant l'information à transmettre (2×216 bits), d'une séquence d'apprentissage (Training Sequence 22 bits), bits d'extrémité (Tail bits 2×4 bits) et des intervalles de garde (Guard interval) rajoutés au début et à la fin du chaque paquet.

Implémentation: Dans notre système nous choisissons le paquet de type montant. Pour transmettre ce dernier il faut rajouter des blocs contient des bits a l'émission de la modulation qui sont représentés sous la forme suivante:

❖ *bits d'extrémité (CP)*

Le bloc CP permet d'éviter la perte de performances du démodulateur au début et à la fin du chaque paquet et n'affecte pas les bits d'information utile. Ce bloc est représenté sur la figure 3.10:

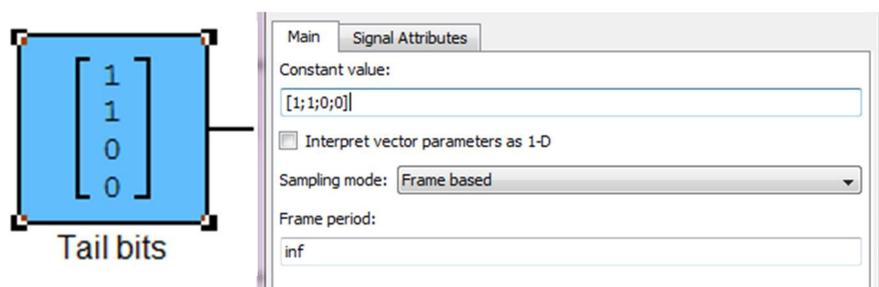


Figure 3. 10 Bloc des bits d'extrémité.

Les paramètres de configuration concernant le bloc des bits d'extrémité sont présentés sur le tableau ci-dessous :

Paramètres	Valeurs	Commentaires
La valeur de bloc constant (<i>Constant value</i>)	[1;1;0;0]	Spécifier la sortie de valeur constante du bloc
Mode d'échantillonnage (<i>Sampling mode</i>)	Frame based	Indiquez si le signal de sortie est à base d'échantillon ou trame en fonction
Période de trame (<i>Frame period</i>)	Inf [par défaut]	Spécifiez l'intervalle entre le temps que la sortie du bloc Constant peut changer pendant la simulation

Tableau 3. 6 Paramètre des blocs des bits d'extrémité.

❖ Séquence d'apprentissage

Elle sert à vérifier les données transmises et permet de synchroniser le burst (la séquence d'apprentissage de 22 bits). Les paramètres de ce bloc sont identiques à ce des bits d'extrémités (figure 3.11).

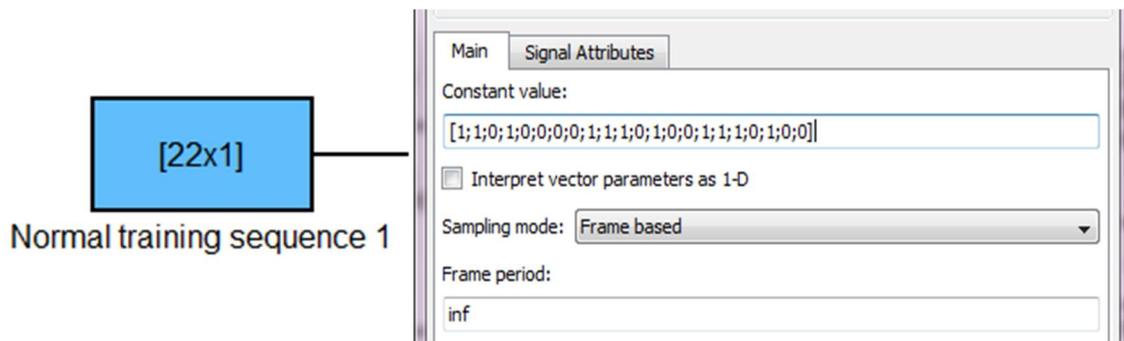


Figure 3. 11 Bloc de séquence d'apprentissage.

❖ Les données efficaces

Nous pouvons donc considérer qu'un burst transporte 2×216 bits de données efficaces (figure 3.12).

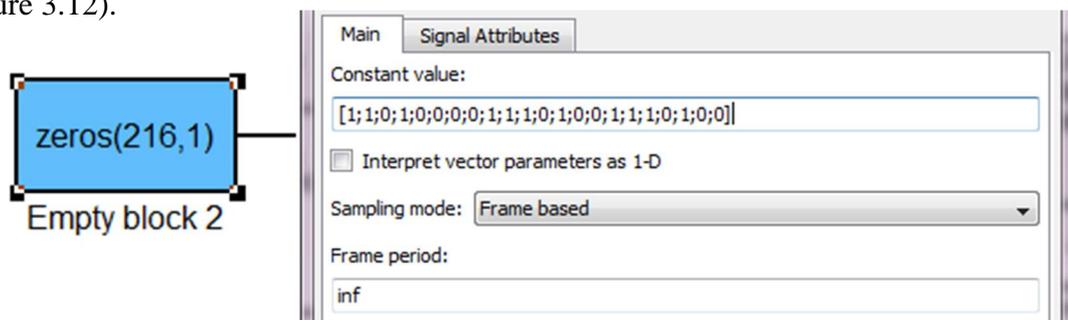


Figure 3. 12 Bloc de l'information à transmettre.

Pour concaténer les données de chaque paquet nous utilisons le bloc « Matrix Concatenate » à cinq entrées (figure 3.13). Les paramètres de configuration de bloc sont donnés sur le tableau 3.7.

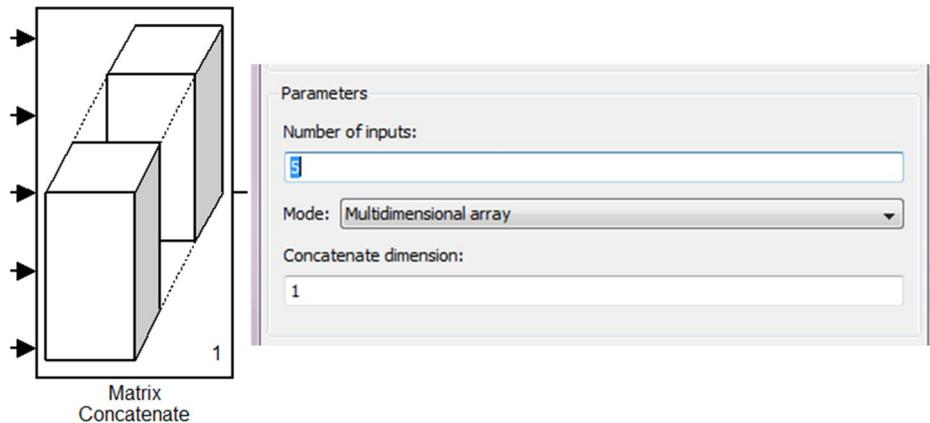


Figure 3. 13 Bloc de matrice de concaténation

Paramètres	Valeurs	Commentaire
Nombre d'entrée (<i>Number of inputs</i>)	5	Indique le nombre d'entrées pour le bloc
<i>Mode</i>	Multidimensional array	Sélectionnez le type de concaténation qui exécute ce bloc
Dimension de concaténation (<i>Concatenate dimension</i>)	1	Indique la dimension de sortie le long de laquelle de concaténer les tableaux d'entrée

Tableau 3. 7 Paramètres de bloc matrice de concaténation

Une fois les bits de données sont concaténés nous passons au bloc de modulation $\pi/4$ DQPSK.

3.2.3.2 Bloc modulation $\pi/4$ DQPSK

Cette technique de modulation numérique (Differential Quadrature Phase Shift Keying) est un cas particulier de la modulation de phase différentielle à quatre états ($D - MPSK$). Les bits d'information sont mappés dans les transitions de phase au lieu des valeurs de phase absolues. Le terme $\pi/4$ décalés apparaisse sur le contexte de diagrammes de constellation et sera expliqué plus tard. En plus, dans la modulation $\pi/4$ DQPSK, le déphasage maximal est limité à $\pm 135^\circ$ (contre 180° pour la modulation QPSK et 90° pour la modulation OQPSK).

Par conséquent, le signal à bande limitée de la modulation $\pi/4DQPSK$ préserve l'enveloppe constante bien mieux que $QPSK$ à une bande limitée, mais il est plus sensible aux variations de l'enveloppe que $OQPSK$ [14].

Les composantes en phase I et en quadrature Q de la modulation $\pi/4DQPSK$ peuvent être exprimées par les équations suivantes:

$$I(i) = I(i - 1) * \cos(\Delta\theta i) - Q(i - 1) * \sin(\Delta\theta i) \quad (3.2)$$

$$Q(i) = I(i - 1) * \sin(\Delta\theta i) + Q(i - 1) * \cos(\Delta\theta i) \quad (3.3)$$

Sachant que:

- ❖ $I(i)$ et $Q(i)$ sont les composantes en phase et en quadrature d'un symbole modulé en $\pi/4 DQPSK$ à l' $i^{\text{ème}}$ intervalle de signalisation.
- ❖ $\Delta\theta i$ est le déphasage entre les symboles à la $i^{\text{ème}}$ et $(i - 1)^{\text{ème}}$ intervalles de signalisations.

Phase shift mapping: Le déphasage $\Delta\theta i$ dépend du symbole d'entrée :

$$d_i = \{00, 01, 11, 10\}.$$

Les bits d'information constituant le symbole d'entrée sont codés en une transition de quatre phases possibles, définis par le tableau ci-après [14]:

b_{i1}	b_{i2}	$\Delta\theta i = f(b_{i1}, b_{i2})$
0	0	$\pi/4$
0	1	$3\pi/4$
1	0	$-3\pi/4$
1	1	$-\pi/4$

Tableau 3. 8 Les bits d'information et leurs phases

b_{i1} et b_{i2} représentent les bits d'information du symbole d'entrée b_i .

Constellation: La constellation de la modulation $\pi/4 DQPSK$ est une combinaison de deux constellations $QPSK$ décalée de $\pi/4$ (la figure 3.14) [14].

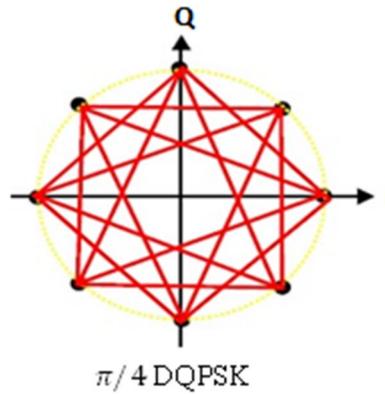


Figure 3. 14 Diagramme de constellation.

Le bloc de modulation $\pi/4$ DQPSK est représenté sur la figure suivante :

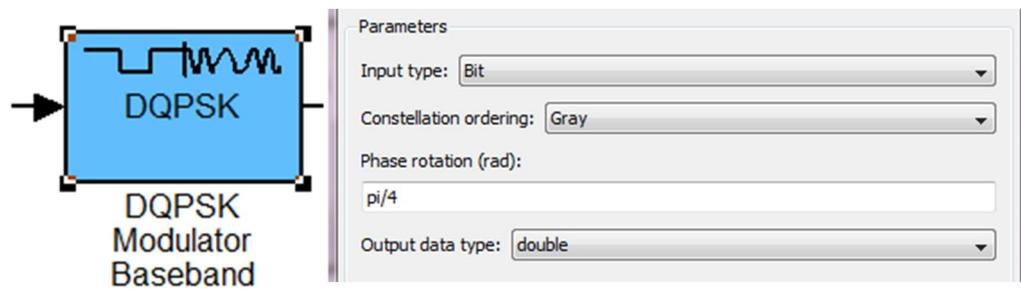


Figure 3. 15 Bloc de modulation **DQPSK**.

Le tableau ci-après regroupe les paramètres de configuration du bloc modulation **DQPSK**:

Paramètres	Valeurs	Commentaires
Type d'entrée (<i>Input type</i>)	Bit	Indique si l'entrée est constituée d'entiers ou des paires de bits
Commande de constellation (<i>constellation ordering</i>)	Gray	Détermine comment les cartes du bloc chaque paire de bits d'entrée à un nombre entier correspondant, en utilisant soit un binaire ou schéma de mapping Gray.
Rotation de phase (<i>phase rotation (rad)</i>)	Pi/4	La différence de phase entre les symboles modulés précédents et le courant lorsque l'entrée est égale à zéro
Type de données de sortie (<i>output data type</i>)	Double	Le type de données de sortie

Tableau 3. 9 Paramètre de bloc modulation **DQPSK**.

Ensuite, nous devons utiliser une autre matrice de concaténation de 3 entrées pour concaténer les informations modulés avec un intervalle de garde et un motif de ramping (montée en émission ou descente au repos progressive).

❖ *Intervalle de garde*

Correspondant à la différence de durée entre un burst et un slot. Ce délai sert à compenser les temps de transmission entre le mobile et la station de base. Ce bloc est présenté sur la figure suivante:

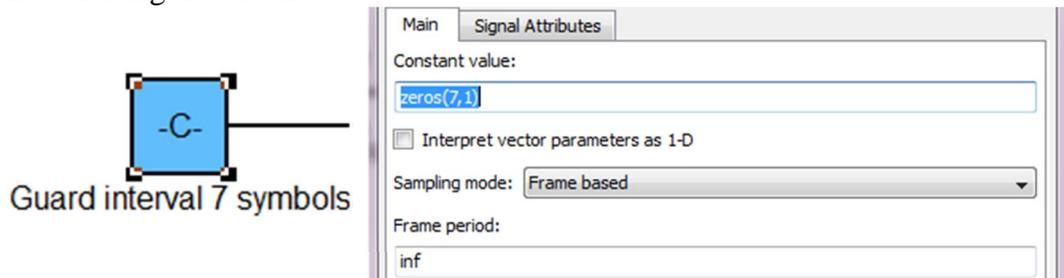


Figure 3. 16 Bloc d'intervalle de garde.

Les paramètres de ce bloc sont identiques à ceux des bits d'extrémités sauf qu'il contient une valeur de 7 symboles (14 bits).

❖ *Motif de ramping*

Ce bloc (figure 3.17) n'apparaît que pour les paquets discontinus, en début de chaque paquet; il correspond à la montée en puissance de l'émetteur TETRA; au cours de cette phase, les équipements peuvent effectuer des mesures de linéarité en sortie de chaque paquet pour calculer les corrections à apporter dans la suite de chaque paquet. La montée en puissance elle-même doit donc être très rapide (inférieure à l'équivalent de 34 bit (17 symboles) pour les mobiles) mais ne doit pas être trop rapide sous peine d'étaler le spectre du signal émis et de déborder dans les canaux adjacents; la forme de la montée et de la descente doit donc être parfaitement maîtrisée [10].

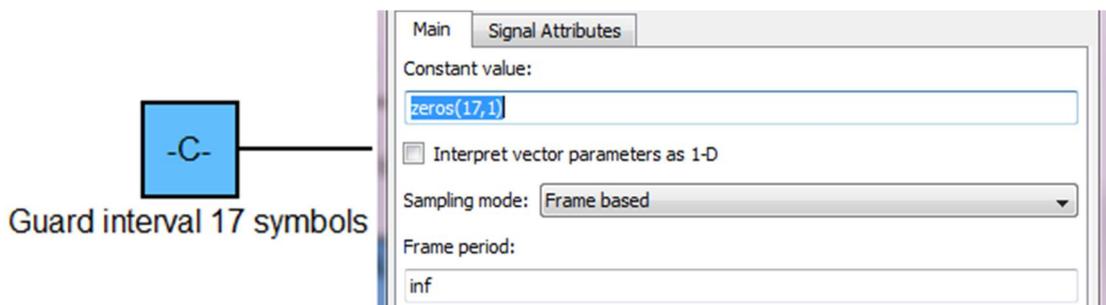


Figure 3. 17 Bloc motif de ramping.

3.2.4 Bloc filtre d'émission et de réception

La mise en forme du signal est effectuée avec un filtre en racine de cosinus surélevé. La réponse impulsionnelle de ce filtre est nulle à une période correspondant à celle de tous les symboles adjacents. Le filtre en cosinus surélevé (*RC*) satisfait le critère de Nyquist et est par conséquent très utilisé en communications numériques pour limiter l'ISI. Le filtre en racine de cosinus surélevé permet de répartir le filtre RC entre l'émetteur et le récepteur. Le filtre RC permet également de limiter la bande spectrale de transmission B occupée par le signal. Le facteur de Roll Off α est ajusté entre 0 et 1 pour obtenir une bande B telle que $B = R_s \cdot (1 + \alpha)$ ou R_s est le débit des symboles de modulation $\pi/4DQPSK$. Pour obtenir un maximum de performance, la plupart des systèmes de transmission utilisent deux filtres, l'un à l'émission, l'autre à la réception. Chacun d'eux est alors en racine carrée de cosinus relevé (Root Raised Cosine). La multiplication d'un tel filtre par lui-même donne alors un filtre de Nyquist.

3.2.4.1 Bloc filtre d'émission

La figure 3.18 montre le bloc filtre d'émission indiqué si dessous:

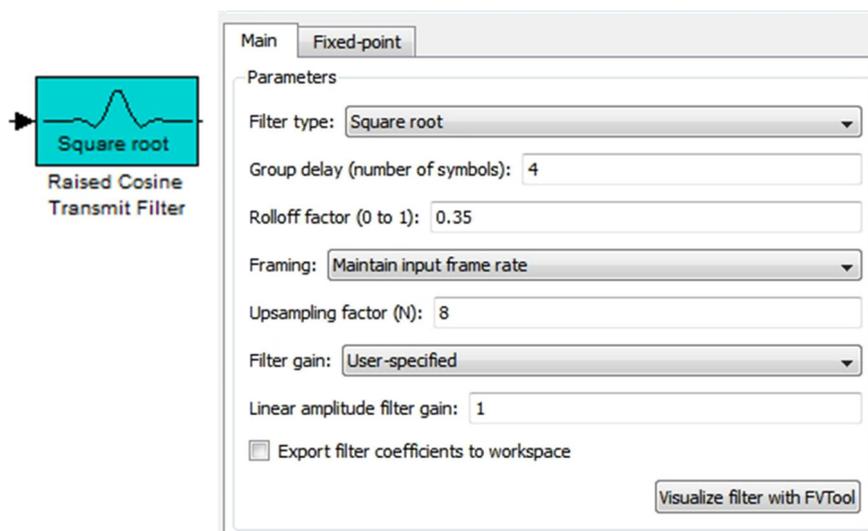


Figure 3. 18 Bloc filtre d'émission.

Les paramètres de configurations concernent le bloc filtre d'émission sont présenté sur le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs	Commentaires
Type de filtre (<i>Filter type</i>)	Square root	Filtre en racine de cosinus surélevé
retard de groupe (<i>Group delay (number of symbols)</i>)	4	Un nombre entier positif qui représente le nombre de périodes de symbole entre le début de la réponse du filtre et de son sommet
<i>Roll off factor (0 to 1)</i>	0.35	Le coefficient d'atténuation pour le filtre, un nombre réel compris entre 0 et 1
<i>Framing</i>	Maintain input frame rate	Présentation de l'entrée par une trame
Facteur de suréchantillonnage (<i>upsampling factor (N)</i>)	8	Un nombre entier supérieur à 1, représentant le nombre d'échantillons par symbole dans le signal de sortie filtré
Gain du filtre (<i>Filter gain</i>)	User-specified	Détermine la manière dont les échelles de bloquer les coefficients de filtrage
Linéaire gain du filtre d'amplitude (<i>Linear amplitude filter gain</i>)	1	Un scalaire positif utilisé pour redimensionner les coefficients de filtrage

Tableau 3. 10 Paramètres de bloc filtre d'émission.

3.2.4.2 Bloc filtre de réception

La figure 3.19 montre le bloc filtre de réception qui indiqué si dessous

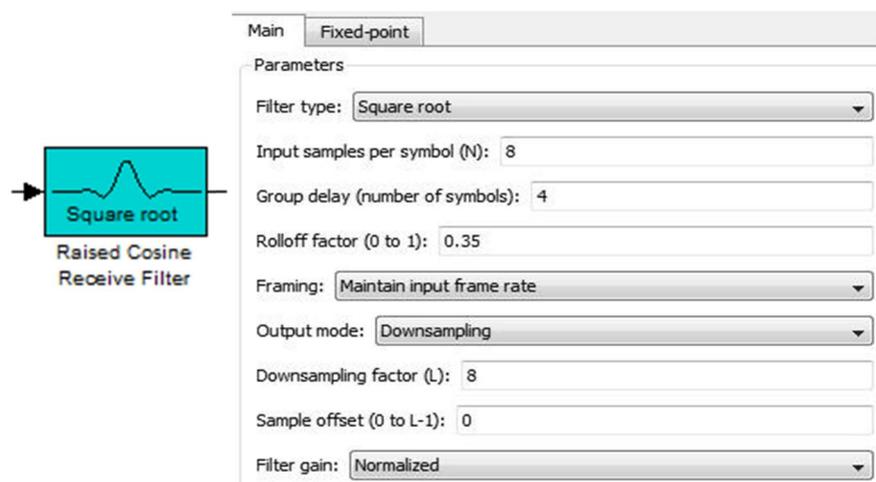


Figure 3. 19 Bloc filtre de réception.

Le tableau ci-après représente les paramètres de configuration de bloc filtre de réception:

Paramètres	Valeurs	Commentaires
Mode de sortie (<i>output mode</i>)	Downsampling	Indiqué le mode de sortie est souéchantillonnage
Facteur de souéchantillonnage (<i>downsampling factor</i>) (L)	8	Un nombre entier supérieur à 1, représentant le nombre d'échantillons par symbole dans le signal de sortie filtré
Décalage d'échantillonnage (<i>Sample offset</i>) (0 to $L-1$)	0	Décalage d'échantillonnage
Gain de filtre (<i>Filter gain</i>)	Normalized	Détermine la manière dont les échelles de bloquer les coefficients de filtrage

Tableau 3. 11 Paramètres de bloc filtre de réception.

3.2.5 Bloc du canal de transmission

Concernant notre projet nous utilisons un canal à bruit blanc additif gaussien (AWGN) montré sur la figure (3.20).

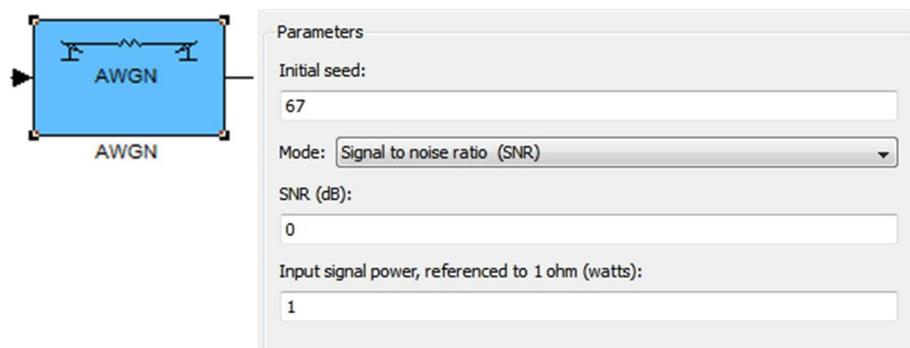


Figure 3. 20 Bloc canal de transmission AWGN.

Les paramètres de configuration de bloc AWGN sont représentés sur le tableau 3.12 :

Paramètres	Valeurs	Commentaires
Graine initiale (<i>Initial seed</i>)	67	La graine pour le générateur de bruit gaussien
Mode	Signal to noise ratio (SNR)	Le mode par lequel vous spécifiez la variance du bruit
SNR (dB)	[-10 0 30]	La valeur de SNR en dB
Puissance signal d'entrée (<i>Input signal power</i>), <i>referenced to 1 ohm</i> (watts)	1 (par défaut)	La puissance du signal d'entrée, référencée à 1 ohm
	1	La puissance du signal d'entrée, référencée à 1 ohm

Tableau 3. 12 Paramètres de bloc AWGN.

❖ Le retard

Ce bloc introduit un retard d'une durée spécifique (représentée par le nombre d'échantillons) indiqué sur la figure suivante :

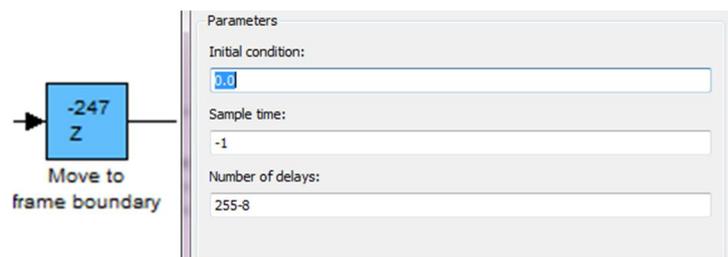


Figure 3. 21 Bloc de retard.

Les paramètres de configurations concernant le bloc de retard sont présentés sur le tableau suivant:

Paramètres	Valeurs	Commentaires
État initial (<i>Initial condition</i>)	0.0	Spécifier la sortie de la simulation du première période d'échantillonnage, au cours de laquelle la sortie du bloc de retard unitaire est par ailleurs définie.
Temps d'échantillon (<i>Sample time</i>)	-1	Le temps d'échantillonnage
<i>Number of delays</i>	255-8	Nombre de retard

Tableau 3. 13 Paramètres de bloc de retard.

3.2.6 Bloc de démodulateur

La figure 3.22 montre le bloc de démodulateur:

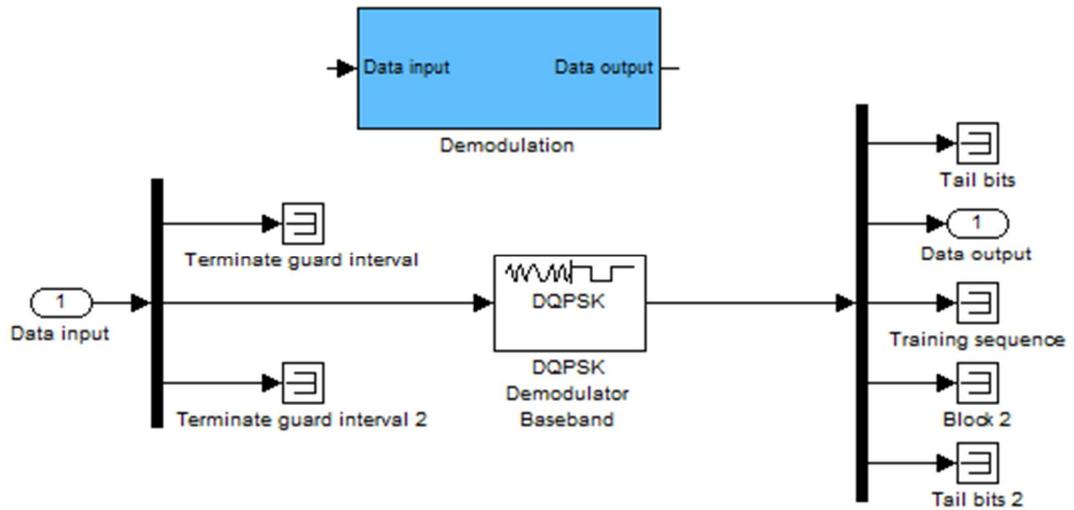


Figure 3. 22 Bloc de démodulation.

La démodulation est l'opération inverse de la modulation, Nous utilisons pour cela la fonction inverse du $\pi/4DQPSK - MOD$ ($\pi/4DQPSK - DEMOD$) indiqué sur la figure ci-après. Le bloc de démodulation $\pi/4DQPSK$ effectue le décodage de la maximum vraisemblance des symboles reçus et récupère les bits d'information.

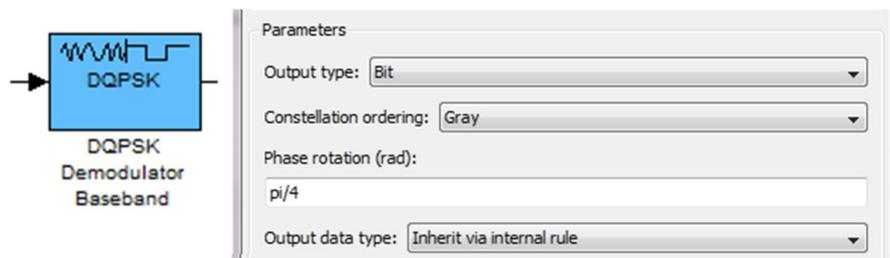


Figure 3. 23 Bloc de démodulateur $DQPSK$.

Les paramètres de démodulateur $DQPSK$ sont les même au modulateur sauf le type de sortie est « Inhetit via internal rule »

3.2.7 Bloc de décodage canal

Les différents sous blocs décodeur de canal sont présentés sur la figure 3.24 indiqués ci-dessous :

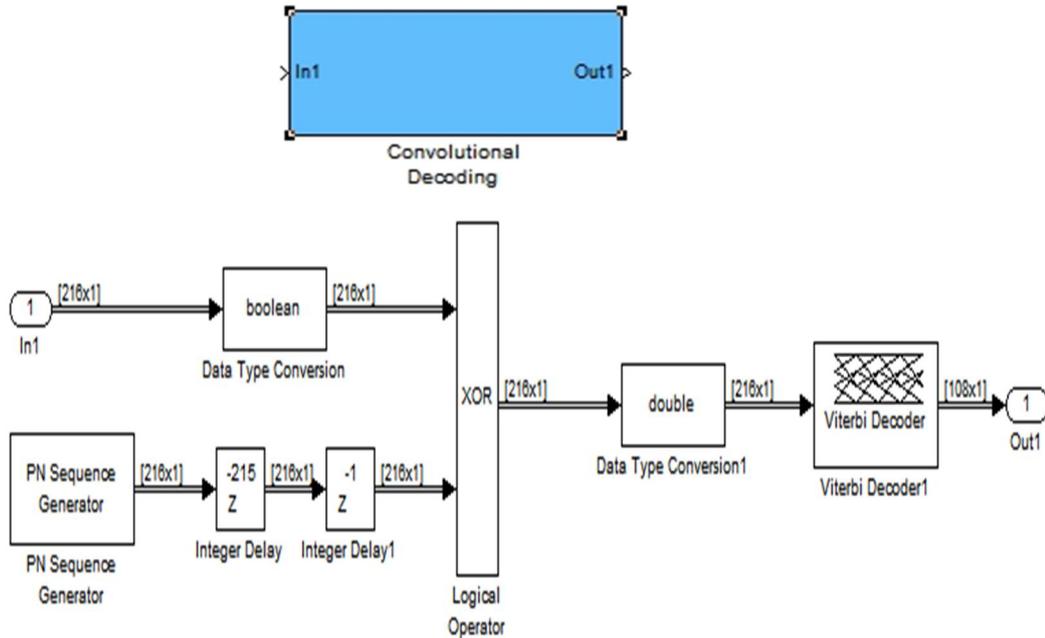


Figure 3. 24 Bloc de décodage canal.

Le décodeur canal est l'opération inverse de codeur canal sauf nous devons utiliser un décodeur « Viterbi » à la fin de décodeur de canal.

❖ Décodeur Viterbi

Le décodeur Viterbi (figure 3.25) a pour but de décoder l'entrée pour produire des symboles de sortie binaire. Ce bloc peut traiter plusieurs symboles à la fois pour des performances plus rapides.

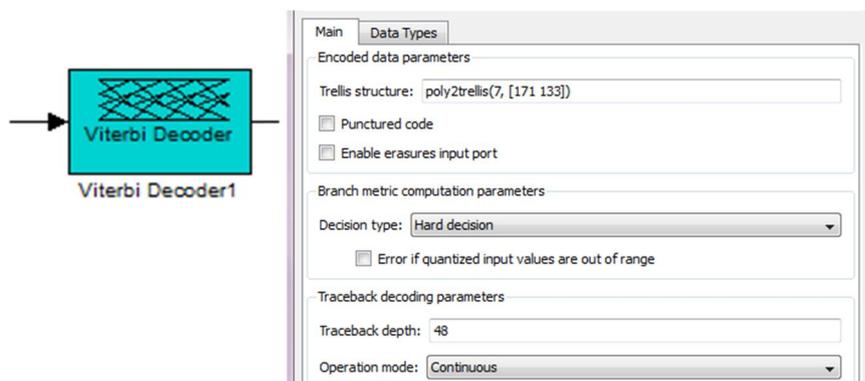


Figure 3. 25 Bloc de décodeur Viterbi.

Le tableau 3.14 représente les paramètres de configuration de bloc décodeur Viterbi.

Paramètres	Valeurs	Commentaires
Structure de Trellis (<i>trellis structure</i>)	poly2trellis (7,[171 133])	Structure MATLAB qui contient la description treillis du codeur à convolution
Type de décision (<i>decision type</i>)	Hard decision	Le type de décision
profondeur retraçage (<i>Traceback depth</i>)	48	Le nombre de branches treillis utilisé pour construire chaque chemin de retraçage
Le mode de fonctionnement (<i>operation mode</i>)	Continou	En mode continu, le bloc conserve les états du codeur à la fin de chaque entrée, pour une utilisation avec la trame suivante.

Tableau 3. 14 Paramètres de bloc décodeur Viterbi.

3.2.8 Bits reçus

En fin de chaîne s'effectue la réception des données mais nous pouvons aussi calculer le TEB final de la chaîne de transmission.

3.3 Résultats et interprétations

3.3.1 Le signal trajectoire

Sur le graphe de la figure (3.26) montre la constellation d'une modulation $\pi/4DQPSK$ dont les signaux modulants ont été filtrés en cosinus surélevés.

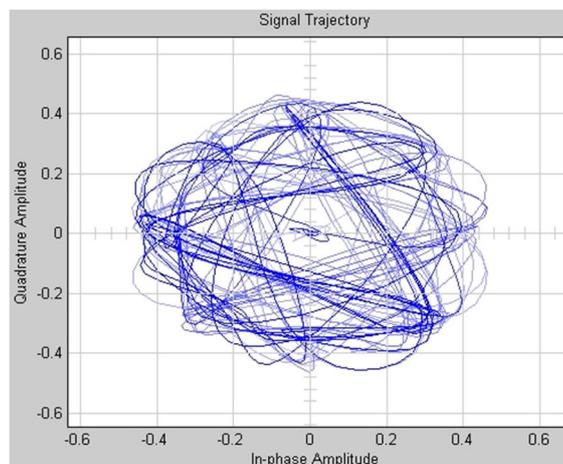


Figure 3. 26 Signal trajectoire des points de constellation.

La constellation de la modulation $\pi/4$ DQPSK est décrite comme *DPSK* car nous nous transmettons que la différence de phase par rapport au symbole précédent et comme la modulation *QPSK* car il y a 2 bits/symboles. Les changements de phase sont des multiples impairs de $\pi/4$ (45°). Il y a 8 points dans la constellation mais nous utilisons que 4 à la fois, cela permet d'éviter de passer par zéro lors des changements de symboles.

3.3.2 Le diagramme de constellation

Afin d'étudier l'effet du bruit du canal (distorsion du signal) sur l'information émise. Nous visualisons grâce au diagramme de constellations qui représente le signal modulé ($\pi/4$ DQPSK dans notre étude), différentes valeurs du SNR ($-10, 0, 30$) dB.

❖ **Pour SNR = -10dB:** nous remarquons qu'à la sortie du canal les points de constellations forment un nuage de point; cela est dû au bruit causé par le canal ce qui donne un signal de sortie fortement atténué et distordus présenté sur la figure 3.27.

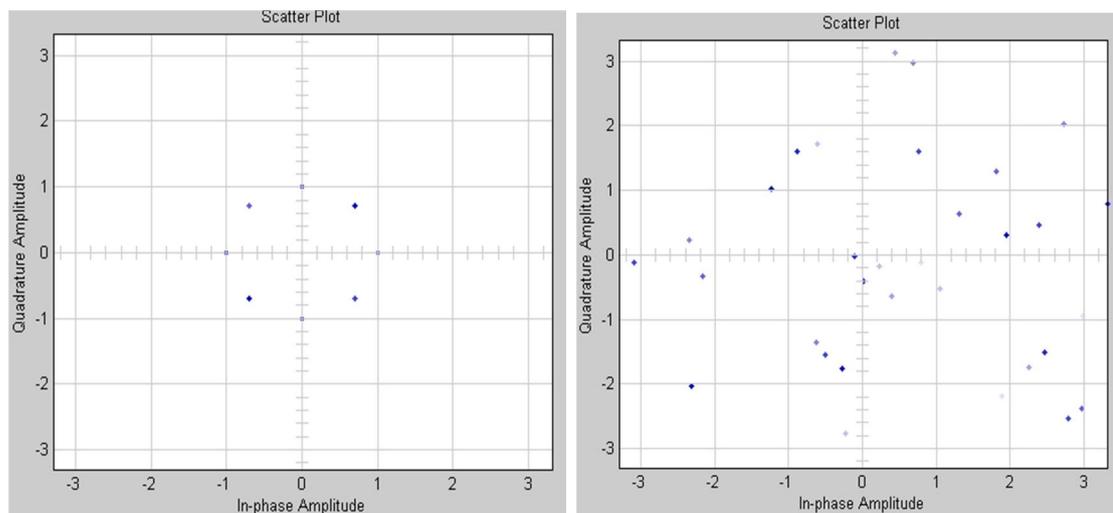


Figure 3. 27 Constellation Avant / Après canal (SNR=-10 dB).

❖ **Pour SNR=0dB:** la puissance du signal est égale à la puissance du bruit, nous observons qu'à la sortie du canal, les points de constellation forment un nuage cela est dus au bruit causé par le canal .nous aurons alors un signal atténué et distordus indiqué si dessous.

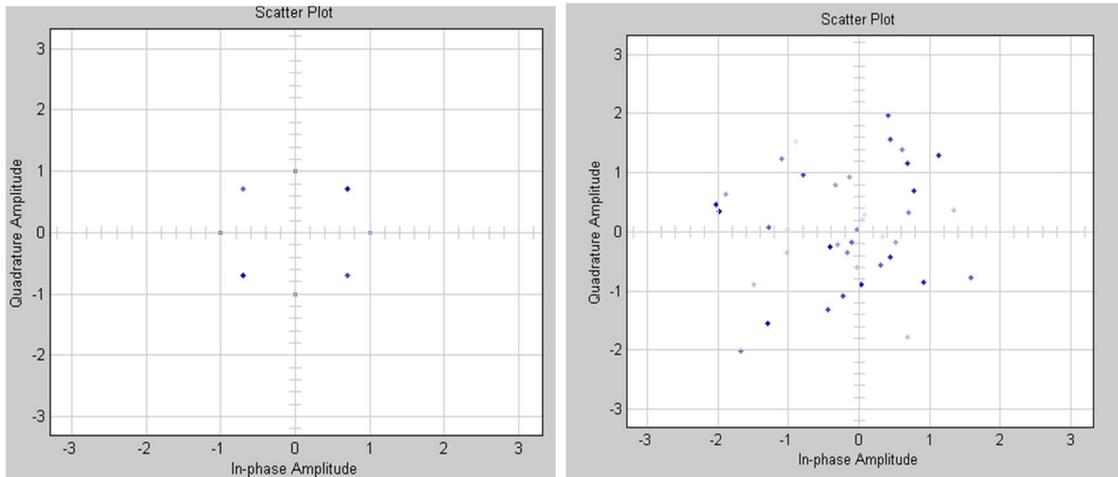


Figure 3. 28 Constellations avant / après canal (SNR=0 dB).

❖ **Pour SNR= 30dB**: nous notons que les points de constellation en sortie de canal parfaitement défini, ce qui nous donne un signal de sortie très peu atténués et non distordue comparé au signal de sortie d'une chaine de transmission (figure 3.29).

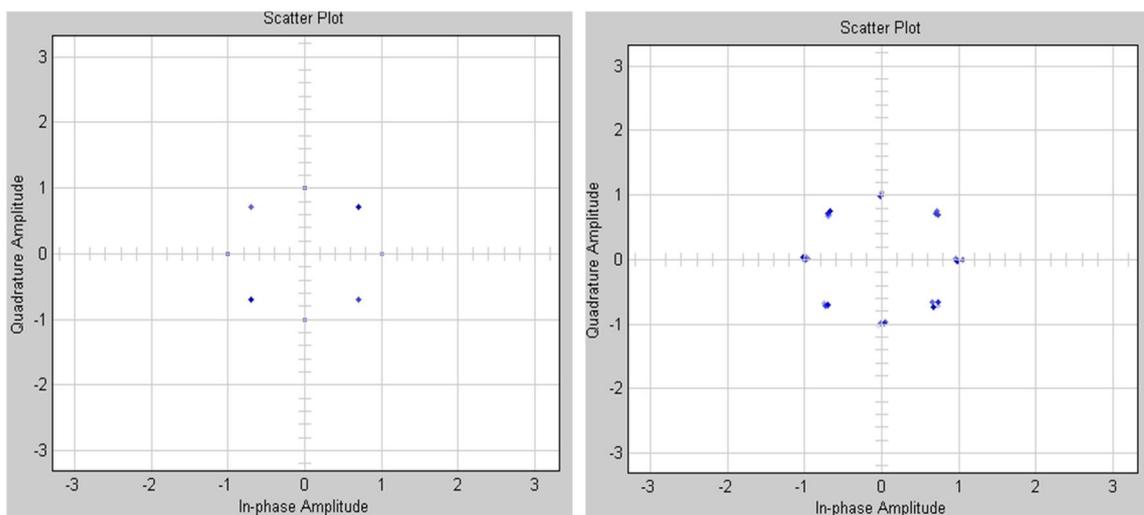


Figure 3. 29 Constellations avant / après canal (SNR=30 dB).

3.3.3 La visualisation fréquentielle

❖ Visualisation du spectre de signal avant le filtrage

La figure 3.30 présente le spectre fréquentiel du signal avant le filtrage, nous constatons qu'il a l'allure de bruit blanc.

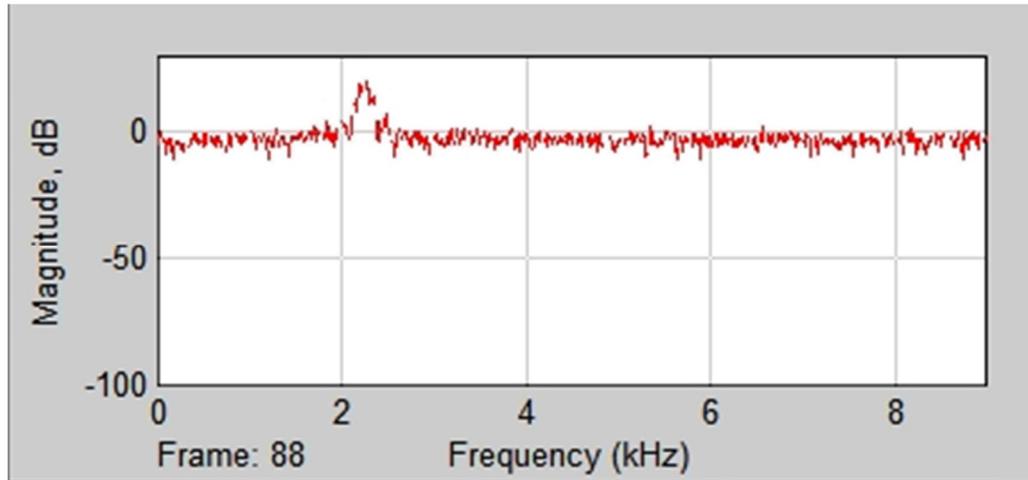


Figure 3. 30 Spectre fréquentiel du signal avant le filtrage d'émission.

❖ *Visualisation du spectre de signal après le filtrage*

Nous observons sur la figure 3.31 que le spectre de ce signal s'étend jusqu'à 25 KHz (étalement de spectre). Ce signal est filtré par un filtre cosinus surélevé afin d'adapter au canal.

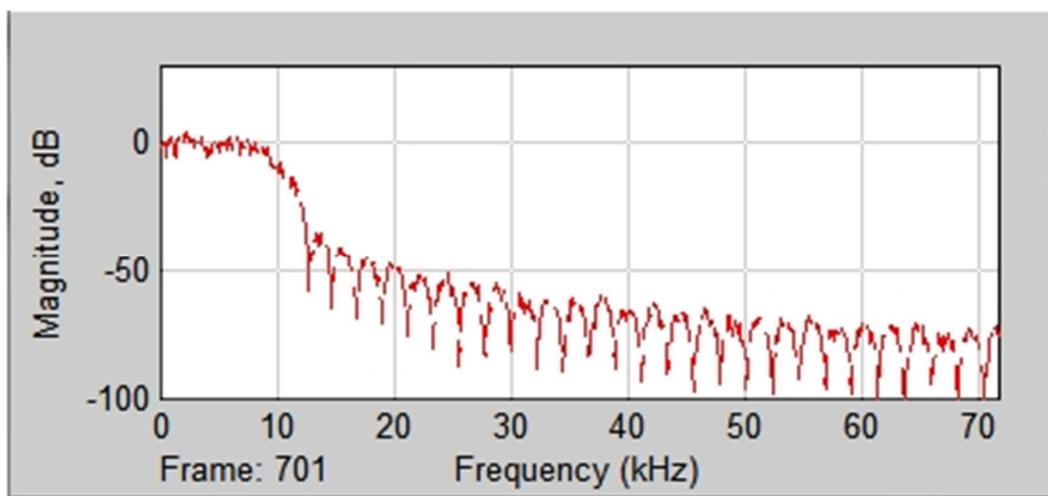


Figure 3. 31 Spectre fréquentiel du signal après le filtrage d'émission.

❖ *Visualisation du spectre de signal après le canal*

Nous observons dans la figure 3.32 que le signal est bruité à cause de canal AWGN

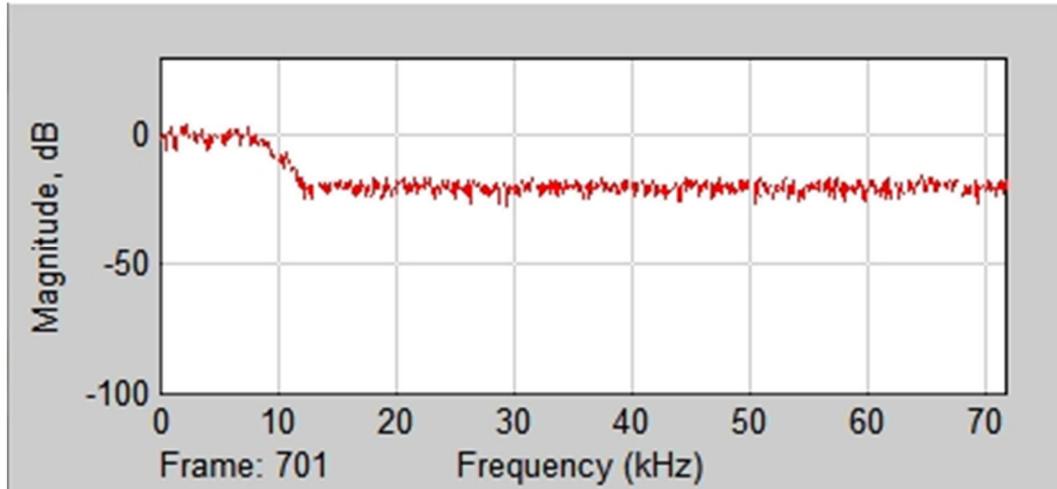


Figure 3. 32 Spectre fréquentiel du signal après le canal.

3.4 Simulation de la chaîne de transmission sans codage

Dans la figure 3.33 nous effectuons une comparaison entre la modulation $\pi/4$ DQPSK avec et sans codage convolutif utilisé au niveau d'émission et le décodage de Viterbi à la réception.

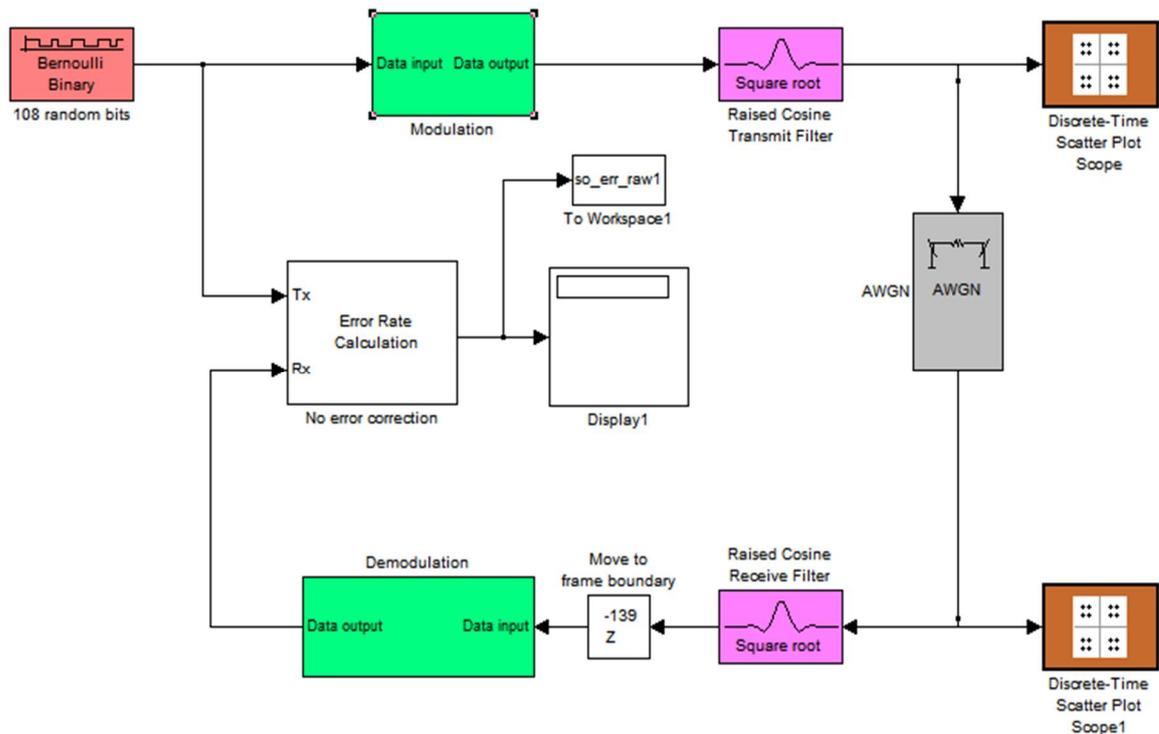


Figure 3. 33 Modélisation de la chaîne de transmission sans codage.

La performance du TEB du système TETRA avec et sans codage est présenté sur la figure suivante :

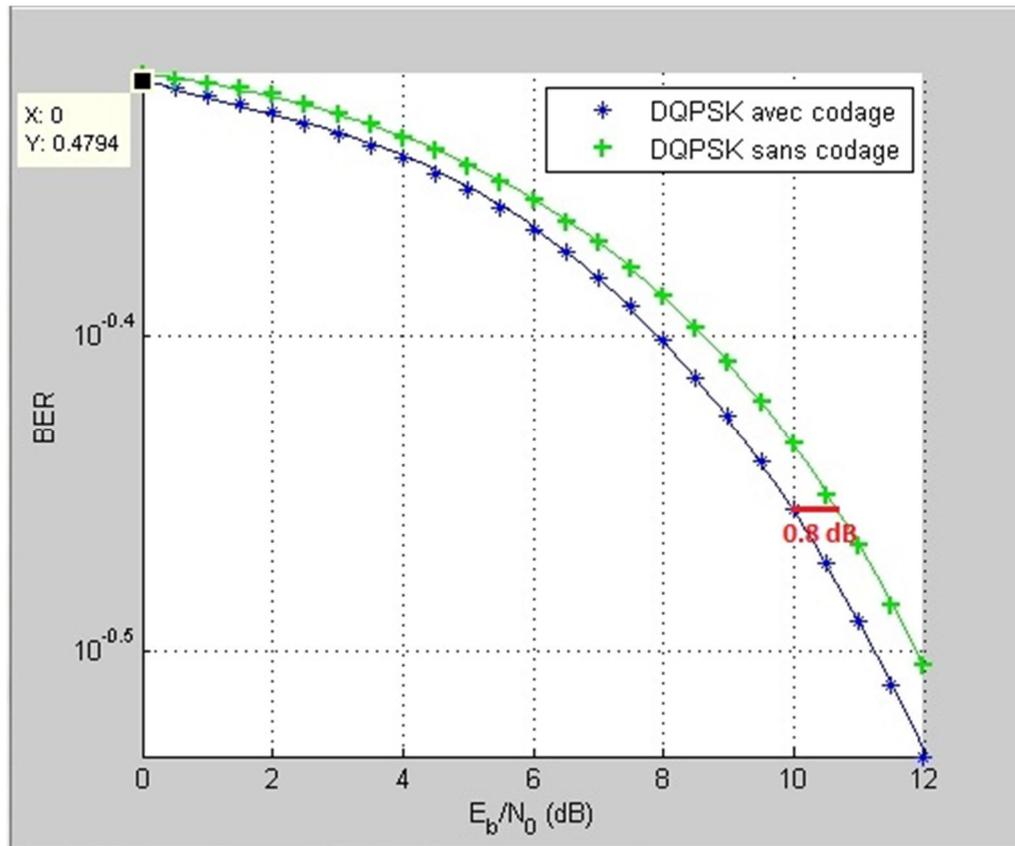


Figure 3. 34 Performances du système avec et sans codage.

D'après la figure ci-dessus, nous constatons lorsque le code convolutif est employé, nous pouvons observer un gain d'énergie de 0.8 dB dans la modulation $\pi/4\text{DQPSK}$ est obtenu pour un TEB de l'ordre de $10^{-0.54}$.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle de la chaîne de transmission TETRA d'un burst normal montant implémentée sous Simulink, tout en réalisant une étude concernant ses performances d'un point de vue du BER en fonction du E_b/N_0 .

Conclusion générale

L'objectif de ce projet est d'évaluer par le SIMULINK, la performance de la norme TETRA. Pour atteindre nos objectifs, en premier lieu, nous avons présenté une introduction au système de transmission numérique, exposé les caractéristique principale de transmission telles que: le codage canal, les types de modulations, les diagrammes de constellation de chaque types, canal de propagation. Dans la deuxième partie nous avons étudié notamment les services offerts par ce système, les interfaces formant la norme et les caractéristiques physiques régissant son fonctionnement notamment le format des trames transmises dans le réseau TETRA, les canaux de propagation et les performances minimales requises par les émetteurs et les récepteurs fonctionnant dans la norme.

Une simulation de la norme TETRA dans la voie montante a été réalisée sous l'environnement SIMULINK /MATLAB. À l'émission, la séquence d'information est traitée et modulée. À la réception, la séquence d'information est restituée par les blocs de démodulation et de traitement d'information. Nous avons ajoutés des compteurs BER pour compter toutes les erreurs s'effectuant lors de cette transmission. L'efficacité d'un modèle de transmission radio est jugée par le taux d'erreur BER, les différents résultats obtenus ont permis de constater que les performances de la norme restent fiables pour les différentes variations.

À travers ce projet, nous avons acquis un certain nombre de connaissances concernant le domaine des télécommunications et appris à travailler sur SIMULINK-MATLAB, et enfin ce petit pas dans la recherche scientifique nous incitons d'aller plus loin.

Bibliographie

- [1] <http://wireless-techbook.com/techniques-de-modulation/20-compenser-en-quadrature-phase-shift-keying-oqpsk.html>
- [2] Tuomas Järvinen: Master's Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Espoo, Finland: «Location System solution in TERrestrial Trunked RAdio (TETRA) Professional Mobile Radio networks» 22th January 2010.
- [3] OFCOM (Federal Office for Communications) «Notice d'information TETRA» version 2.2: 1er novembre 2005.
- [4] Lyvie GUERET-TALON : Master2 Management des Administrations Publiques «Les SDIS: Vers la Technologie Numérique» Année 2005/2006.
- [5] <http://www.senat.fr/rap/r02-052/r02-05248.html>
- [6] <http://www.sysoco.fr/tetra.htm>
- [7] Motorola, Ltd. Jays Close, Viables Industrial Estate, Basingstoke, Hampshire, RG22 4PD, UK Réseaux critiques de télécommunication «Télécommunications autoprotégées, sécurisées, fiables et efficaces pour les services d'urgence, le secteur public et les entreprises» 2007.
- [8] Christina Maria Hainbuchner: doctoral thesis «Technology acceptance of complex products and systems. The case of Terrestrial Trunked Radio (TETRA)» WU Vienna University of Economics and Business. November 2005.
- [9] RAPPORT UIT-R M.2014 «Systèmes mobiles terrestres numériques à haute efficacité spectrale pour trafic de dispatching» Question UIT-R 37/8 (1998).
- [10] http://membres.multimania.fr/krystof34/Doc_tetra_etelm.pdf «Reseaux TETRA ETELM» 23.09.2003.
- [11] Luis Corral, Alberto Sillitti, Giancarlo Succi «Managing tetra channel communications in android» Center for Applied Software Engineering, Free University of Bozen-Bolzano Piazza Domenicani 3, I-39100 Bozen-Bolzano, Italy 2010.
- [12] http://wikipedia.org/wiki/Terrestrial_Trunked_Radio

- [13] Houssein Jaber: Thèse de doctorat «conception architecturale haut débit et sûre de fonctionnement pour les codes correcteurs d'erreurs» École Doctorale IAEM – Lorraine. 9 décembre 2009.
- [14] Vijaya Chandran Ramasami, kuid 698659 «EECS 865 SIMULATION PROJECT» The University of Kansas 2007.
- [15] http://www.angelfire.com/folk/johnrhett/TETRA_introduction.pdf « introduction TETRA » 2001.
- [16] http://www-igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2006/site_rebhann/networks.html
- [17]http://wcours.gel.ulaval.ca/2006/h/64486/default/7references/codage_convolutif.pdf
- [18] KHETAAL Mohamed, TAIDIR Karim : « Implémentation et simulation de système Wimax norme IEEE802.16.2004 », Département d'électronique, Université de Blida, 2010.
- [19] John.G Proakis : « Digital Communication », McGraw-Hill Science, 2000.