

**Titre:** Performances d'un protocole SR ARQ avec retransmissions de NAKS  
Title: sur des canaux terrestres et par satellites

**Auteur:** Violeta Dimitrieska  
Author:

**Date:** 1996

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Dimitrieska, V. (1996). Performances d'un protocole SR ARQ avec retransmissions de NAKS sur des canaux terrestres et par satellites [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8982/>  
Citation:

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/8982/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** David Haccoun  
Advisors:

**Programme:** Unspecified  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**PERFORMANCES D'UN PROTOCOLE SR ARQ AVEC  
RETRANSMISSIONS DE NAKS SUR DES CANAUX  
TERRESTRES ET PAR SATELLITES**

par

**Violeta DIMITRIESKA**

**DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE  
ET DE GÉNIE INFORMATIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU  
GRADE DE MAÎTRE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)**

**Septembre 1996**



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*

*Our file* *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26463-7

Canada

**UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL**  
**ÉCOLE POLYTECHNIQUE**

Ce mémoire intitulé:

**PERFORMANCES D'UN PROTOCOLE SR ARQ AVEC RETRANSMISSIONS  
DE NAKS SUR DES CANAUX TERRESTRES ET PAR SATELLITES**

présenté par: **Violeta DIMITRIESKA**

en vue de l'obtention du grade de: **M.Sc.A.**

est soumis au jury d'examen constitué de:

**M. CONAN Jean, Ph. D., Président**

**M. HACCOUN David, Ph. D., Directeur de recherche**

**M. DESPINS Charles, Ph. D., Codirecteur de recherche**

**M. PIERRE Samuel, Ph. D., Membre**

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Dr. David Haccoun, pour la qualité de sa supervision, ses excellentes suggestions ainsi que pour l'aide financière qu'il m'a octroyée.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à mon codirecteur de recherche, Dr. Charles Despins, pour ses nombreux conseils, son fort support professionnel et humain, ainsi que pour son aide financière.

J'aimerais remercier mes amis et collègues du laboratoire, Melita, Véronique, Zohair, Eric, Martin, Naoufel, ... pour toute l'aide, le support et les sentiments chaleureux qu'ils m'ont donnés.

Un grand merci à ma famille, surtout mes grands parents, mes parents et mon frère, pour leur amour, leur confiance et soutien constant durant toute la période de ma recherche.

Finalement, je désire remercier mes amis proches pour leur encouragement, la patience et toutes les jolies surprises qu'ils m'ont apportés.

# RÉSUMÉ

v

Ce mémoire porte sur une modification du protocole de retransmission standard SR ARQ utilisé dans les communications terrestres et par satellites. Cette modification a donné lieu à une amélioration significative de l'efficacité du débit sans avoir recours au mécanisme de time-out, surtout dans le cas où le canal de retour est bruité.

La modification consiste à remplacer un seul NAK sur la trame de données dans le protocole SR ARQ standard par une trame entière de NAKs. L'introduction d'une ou plusieurs trames de NAKs rend la probabilité de perdre la demande de la retransmission (NAK) aussi petite que désirée. La technique est analysée et les avantages et inconvénients du nouveau protocole sont évalués dans différents types de canaux.

Après avoir présenté les limitations du protocole SR ARQ standard, nous introduisons le modèle du nouveau protocole SR ARQ, en insistant sur les points de modifications par rapport au protocole standard. Nous montrons que le nombre de trames de NAKs peut influencer les performances du nouveau protocole. Par conséquent, nous proposons que notre modèle du nouveau protocole réalise la transmission correcte de NAK par la transmission d'une seule trame de NAKs dans différents types de canaux.

Dans la suite, nous établissons un modèle pour le protocole standard et un modèle pour le protocole modifié. À l'aide de ces deux modèles nous effectuons l'évaluation du nouveau protocole par rapport au protocole standard. Les résultats de simulations concernant les canaux binaires symétriques et les canaux à évanouissements de Rayleigh, montrent la supériorité du nouveau protocole au niveau du throughput. Cette constatation reste vraie dans les communications par satellites. En général, le nouveau protocole permet une réduction de la mémoire exigée à l'émetteur et requiert une petite augmentation de la mémoire du récepteur. Les deux protocoles SR ARQ fournissent approximativement le même délai moyen de transmission. En effet, pour les communications par satellites les deux protocoles engendrent de très grands délais.

## ABSTRACT

This work considers one modification of the SR ARQ standard protocol which is used in terrestrial and satellite communications. This modification eliminates the need for a time-out mechanism and yields higher throughput with maximum improvement when the feedback channel is noisy.

The new protocol is sending an entire frame of repeated NAKs instead of "piggybacking" one NAK on a data frame as is usually performed with the standard SR ARQ protocol. The introduction of one or a few frames of repeated NAKs allows that the probability of a NAK not reaching the transmitter can be made as small as desired. The objective of this work is to analyse this technique and to evaluate its advantages and drawbacks in different types of channels.

Following the limitations of the standard SR ARQ protocol, the model of the new SR ARQ protocol is introduced, emphasizing the modifications performed on the standard version. It is also shown that the number of frames of repeated NAKs may affect the performance of the new protocol. Therefore, it is shown that the new protocol, simulated in our research, always achieves the correct transmission of a NAK in different types of channels by transmitting only one frame of repeated NAKs

Our evaluation of the new protocol is based on its comparison with the standard protocol and it starts by refining the models for both protocols. The results of simulations show that on binary symmetric channels as well as on Rayleigh fading channels, the new protocol yields higher throughput efficiency than the conventional protocol. This gain is equally achieved in satellite communications. In general, the new protocol allows lower transmitter buffer storage and requires slightly larger receiver buffer. Both protocols yield very similar average round trip delay (ARTD) which is quite large in satellite communications which simply results as an inevitable reflection of long distances.

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>iv</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>xiii</b>
<b>CHAPITRE 1</b>	
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Définition du projet de recherche .....	3
1.2 Contributions .....	3
1.3 Contenu du mémoire .....	4
<b>CHAPITRE 2</b>	
<b>PROTOCOLES DE RETRANSMISSION ARQ: NOTIONS DE BASE .....</b>	<b>6</b>
2.1 Principes de base des protocoles ARQ .....	7
2.2 Descriptions des protocoles ARQ .....	8
2.3 Efficacité de débit et fiabilité des protocoles ARQ .....	12
2.3.1 Throughput du SR ARQ .....	14
2.3.2 Throughput du go-back-N ARQ .....	14
2.3.3 Throughput du stop-and-wait ARQ .....	15
2.4 Problématique des protocoles ARQ .....	16
<b>CHAPITRE 3</b>	
<b>PROTOCOLE SR ARQ MODIFIÉ .....</b>	<b>18</b>
3.1 Description du protocole SR ARQ modifié .....	19
3.1.1 Illustrations .....	22

3.2 Influence du nombre de trames de NAKs sur les performances du protocole SR ARQ modifié .....	25
<b>CHAPITRE 4</b>	
<b>ÉVALUATION DES DEUX PROTOCOLES SR ARQ DANS UN CANAL BINAIRE SYMÉTRIQUE .....</b>	<b>28</b>
4.1 Paramètres d'expérimentation pour les communications terrestres .....	29
4.1.1 Choix du canal .....	29
4.1.1.1 Canal binaire symétrique .....	30
4.1.2 Simulation du système .....	31
4.1.3 Valeurs représentatives .....	37
4.2 Définition des paramètres d'évaluation des deux protocoles SR ARQ .....	37
4.2.1 Throughput .....	38
4.2.2 Valeur moyenne de délai aller-retour, ARTD .....	38
4.2.3 Nombre moyen de transmissions par trame .....	38
4.2.4 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur .....	39
4.3 Évaluation des deux protocoles SR ARQ .....	39
4.3.1 Analyse de throughput .....	39
4.3.2 Analyse de ARTD .....	41
4.3.3 Analyse du nombre moyen de transmissions par trame .....	41
4.3.4 Analyse du nombre moyen de trames dans le tampon de récepteur .....	42
4.4 Paramètres d'expérimentation pour les communications par satellites .....	43
4.4.1 Choix du type de communication .....	44
4.4.2 Choix du canal .....	45
4.4.3 Choix du code .....	46
4.4.4 Valeurs représentatives .....	46

4.4.5 Méthode de simulation .....	47
4.5 Définition des paramètres d'évaluation des deux protocoles SR ARQ .....	47
4.6 Évaluation des deux protocoles SR ARQ .....	47
4.6.1 Analyse de throughput .....	52
4.6.2 Analyse de ARTD .....	52
4.6.3 Analyse du nombre moyen de transmissions par trame .....	53
4.6.4 Analyse du nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur....	53
4.7 Comparaison des deux protocoles et conclusions .....	54
<b>CHAPITRE 5</b>	
<b>ÉVALUATION DES DEUX PROTOCOLES SR ARQ DANS UN CANAL À ÉVANOISSEMENTS .....</b>	<b>55</b>
5.1 Canal à évanouissements .....	56
5.1.1 Fréquence Doppler $f_D$ du canal .....	58
5.1.2 Canal à évanouissements de Rayleigh .....	59
5.1.3 Rapport signal à bruit .....	59
5.2 Paramètres d'expérimentation pour les communications terrestres .....	60
5.2.1 Choix du modèle de simulateur du canal .....	60
5.2.2 Choix du code .....	62
5.2.3 Choix du nombre de NAKs à l'intérieur d'une trame de NAKs .....	62
5.2.4 Valeurs représentatives .....	68
5.2.5 Méthode de simulation .....	69
5.3. Vérification des simulateurs .....	69
5.3.1 Vérification du simulateur du canal à évanouissements lents .....	69
5.3.2 Vérification du simulateur du protocole SR1 ARQ dans plusieurs canaux à évanouissements .....	70

5.4 Évaluation des performances des deux protocoles .....	72
5.4.1 Analyse du throughput .....	72
5.4.2 Analyse du ARTD .....	74
5.4.3. Analyse du nombre moyen de transmissions par trame .....	75
5.4.4. Analyse du nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur .....	76
5.5 Paramètres d'expérimentation pour les communications par satellites .....	76
5.5.1 Choix du type de communication .....	76
5.5.2 Choix du canal .....	77
5.5.3 Choix du code .....	78
5.5.4 Valeurs représentatives .....	78
5.5.5 Méthode de simulation .....	79
5.6 Évaluation des deux protocoles dans des canaux à évanouissements pour les communications par satellites .....	79
5.6.1 Analyse du throughput .....	79
5.6.2 Analyse du ARTD .....	80
5.6.3 Analyse du nombre moyen de transmissions par trame .....	81
5.6.4 Analyse du nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur .....	81
5.7 Comparaison des deux protocoles et conclusions .....	82
<b>CHAPITRE 6</b>	
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>100</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>103</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Probabilités de perdre un NAK pour SR1 et SR2 en fonction de différentes probabilités d'erreur par bit sur le canal de retour, $\alpha=500$ bits et $\beta=20$ bits.....	23
Tableau 3.2 Probabilités de perdre un NAK pour SR1 et SR2 en fonction de différentes probabilités d'erreur par bit sur le canal de retour, $\alpha=500$ bits et $\beta=25$ bits .....	24
Tableau 3.3. Probabilités de perdre un NAK pour SR2 en fonction de différentes probabilités d'erreur par bit sur le canal de retour et différent nombre de trames de NAKs; $\alpha=500$ bits et $\beta=20$ bits .....	25
Tableau 3.4 Probabilités de perdre un NAK pour SR1 et SR2 en fonction de différentes probabilités d'erreur par bit sur le canal de retour, $\alpha=500$ bits et $\beta=20$ bits .....	26
Tableau 3.5. $P_{NAK\text{-perdu}}$ pour le protocole SR2 en fonction de $P_b$ et différentes valeurs de nombre des trames $\Lambda$ , pour $\alpha=500$ bits et $\beta=20$ bits .....	27
Tableau 4.1 Probabilités que la trame soit correctement reçue sur le canal direct dont la probabilité d'erreur par bit est $P_{b1}$ . La trame contient 500 bits .....	40
Tableau 5. 1 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements rapides $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ ; rapport signal à bruit $E_b/N_0= 20$ dB; La longueur de trame est $\alpha=500$ bits et la longueur d'un NAK est égale à $\beta=20$ bits .....	63

.Tableau 5. 2 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements rapides $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ ; rapport signal à bruit $E_b/N_0= 10$ dB; La longueur de trame $\alpha=500$ bits et la longueur d'un NAK est égale à $\beta=20$ bits .....	64
Tableau 5.3 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements moyens $f_D T=1.5 \cdot 10^{-3}$ ; rapport signal à bruit $E_b/N_0= 20$ dB; La longueur de trame $\alpha=500$ bits et la longueur d'un NAK est égale à $\beta=20$ bits .....	65
Tableau 5.4 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements lents $f_D T=3.8 \cdot 10^{-4}$ ; rapport signal à bruit $E_b/N_0= 20$ dB; La longueur de trame $\alpha=500$ bits et la longueur d'un NAK est égale à $\beta=20$ bits .....	66
Tableau 5.5 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements lents $f_D T=3.8 \cdot 10^{-4}$ ; rapport signal à bruit $E_b/N_0= 10$ dB; La longueur de trame $\alpha=500$ bits et la longueur d'un NAK est égale à $\beta=20$ bits .....	67
Tableau 5.6 Les probabilités d'erreur par bit $P_b$ en fonction de différents rapports signal à bruit. Le canal de transmission est le canal à évanouissements lents du type de Rayleigh .....	70
Tableau 5.7 Throughput du protocole SR ARQ standard obtenu par notre simulateur et comparé avec les résultats de Chuang; Le canal de transmission est le canal à évanouissements moyens ( $f_D T=1.5 \cdot 10^{-3}$ ) et le canal à évanouissements lents ( $f_D T= 3.8 \cdot 10^{-4}$ ) .....	71

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Schéma de principe d'un système de communication ARQ en utilisant une technique de codage et de décodage .....	7
Figure 2.2 Flot de données du stop-and-wait ARQ .....	9
Figure 2.3 Illustration du protocole go-back-N ARQ avec N=7 .....	11
Figure 2.4 Illustration du protocole Selective-Repeat ARQ avec RTD=7 .....	12
Figure 4.1 Canal binaire symétrique .....	30
Figure 4.2 Système de communication ARQ utilisant une technique de codage et décodage. Le canal de transmission est un canal discret .....	31
Figure 4.3 Système de communication ARQ sans utiliser une technique de codage et décodage Le canal de transmission est un canal discret .....	32
Figure 4.4 Throughput en fonction de $P_{c2}$ . $\alpha=500$ , $\beta=25$ , $\Lambda=1$ pour atteindre $P_{NAK-perdu}$ désirée $=10^{-11}$ , "BSC". Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	33
Figure 4.5 ARTD en fonction de $P_{c2}$ . $\alpha=500$ , $\beta=25$ , $\Lambda=1$ pour atteindre $P_{NAK-perdu}$ désirée $=10^{-11}$ , "BSC". Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	34

Figure 4.6 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de $P_{c2}$ . $\alpha=500$ , $\beta=25$ , $\Lambda=1$ pour atteindre $P_{NAK-perdu}$ désirée $=10^{-11}$ , "BSC". Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	35
Figure 4.7 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de $P_{c2}$ . $\alpha=500$ , $\beta=25$ , $\Lambda=1$ pour atteindre $P_{NAK-perdu}$ désirée $=10^{-11}$ , "BSC". Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	36
Figure 4.8 Communication usager - satellite - usager du type duplex .....	45
Figure 4.9 Throughput en fonction de $P_{c2}$ . $\alpha=500$ , $\beta=25$ , $\Lambda=1$ pour atteindre $P_{NAK-perdu}$ désirée $=10^{-11}$ , "BSC", RTD=durée de 30 trames. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	48
Figure 4.10 ARTD en fonction de $P_{c2}$ . $\alpha=500$ , $\beta=25$ , $\Lambda=1$ pour atteindre $P_{NAK-perdu}$ désirée $=10^{-11}$ , "BSC", RTD=durée de 30 trames. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	49
Figure 4.11 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de $P_{c2}$ . $\alpha=500$ , $\beta=25$ , $\Lambda=1$ pour atteindre $P_{NAK-perdu}$ désirée $=10^{-11}$ , "BSC", RTD=durée de 30 trames. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	50
Figure 4.12 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de $P_{c2}$ . $\alpha=500$ , $\beta=25$ , $\Lambda=1$ pour atteindre $P_{NAK-perdu}$ désirée $=10^{-11}$ , "BSC", RTD=durée de 30 trames. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	51

Figure 5.1 Modèle utilisé pour la simulation des évanouissements du type Rayleigh ..... 60

Figure 5.2 Throughput en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements rapides  $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie ..... 83

Figure 5.3 Throughput en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements moyens  $f_D T=1.5 \cdot 10^{-3}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie ..... 84

Figure 5.4 Throughput en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements lents  $f_D T=3.8 \cdot 10^{-4}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie ..... 85

Figure 5.5 Throughput en fonction de  $f_D T$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=30$  dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie ..... 86

Figure 5.6 Throughput en fonction de  $f_D T$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=20$  dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie ..... 87

Figure 5.7 La valeur moyenne de RTD en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements rapides  $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie ..... 88

Figure 5.8 La valeur moyenne de RTD en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements moyens  $f_D T=1.5 \cdot 10^{-3}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie ..... 89

Figure 5.9 La valeur moyenne de RTD en fonction de $E_b/N_0$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements lents $f_D T=3.8 \cdot 10^{-4}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	90
Figure 5.10 La valeur moyenne de RTD en fonction de $f_D T$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant $E_b/N_0=30$ dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	91
Figure 5.11 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de $E_b/N_0$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements rapides $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	92
Figure 5.12 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de $f_D T$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant $E_b/N_0=30$ dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	93
Figure 5.13 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de $E_b/N_0$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements rapides $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	94
Figure 5.14 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de $f_D T$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant $E_b/N_0=20$ dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	95
Figure 5.15 Communication usager-satellite-usager du type duplex en présence des arrêts .....	77

Figure 5.16 Throughput en fonction de $f_D T$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ , RTD=durée de 30 trames, la période de time-out pour SR1 ARQ=durée de 40 trames. Le rapport signal à bruit est constant $E_b/N_0=20$ dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	96
Figure 5.17 La valeur moyenne de RTD en fonction de $f_D T$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ , RTD=durée de 30 trames, la période de time-out pour SR1 ARQ=durée de 40 trames. Le rapport signal à bruit est constant $E_b/N_0=20$ dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	97
Figure 5.18 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de $f_D T$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ , RTD=durée de 30 trames, la période de time-out pour SR1 ARQ=durée de 40 trames. Le rapport signal à bruit est constant $E_b/N_0=20$ dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	98
Figure 5.19 Nombre moyen de trames dans le tampon du Rx en fonction de $f_D T$ . $\alpha=500$ , $\beta=20$ , $\Lambda=1$ , RTD=durée de 30 trames, la période de time-out pour SR1 ARQ=durée de 40 trames. Le rapport signal à bruit est constant $E_b/N_0=20$ dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie .....	99

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

Dans toutes les formes de communication, verbale, écrite ou visuelle, de l'information est échangée. Le principe mathématique qui modèle tous les aspects du transfert d'information est connu sous le nom théorie de l'information.

Claude Schannon, généralement reconnu comme le père de la théorie de l'information a tout d'abord analysé la notion de l'information et son transfert en utilisant des modèles mathématiques pratiques. Le résultat le plus important a été la possibilité de modéliser tout le processus de communication d'une manière relativement simple en fixant des limites clés à ces processus. Claude Schannon a montré qu'il est possible de transmettre de l'information à haute vitesse sur des voies bruitées avec une très faible probabilité d'erreur. Il s'agit d'introduire une redondance dans l'information à transmettre, définie comme le code approprié pour cette information. L'existence de ces codes pour différentes transmissions de l'informations a été prouvée. Par contre leur composition reste toujours le sujet de recherche sur les techniques de codage à l'échelle mondiale.

Le développement de divers téléservices vocaux, vidéo et de données a entraîné l'apparition de systèmes de communication numérique de plus en plus fiables et efficaces. Afin d'atteindre de telles performances, des techniques avancées de codage ont dû être utilisées. En général, ces techniques peuvent être subdivisées en deux classes. La première classe correspond aux techniques où la redondance est utilisée pour la détection des erreurs. Une retransmission des données est alors demandée (ARQ: en anglais, *Automatic Repeat Request*). La deuxième classe quant à elle englobe les techniques permettant la correction des erreurs (FEC: en anglais, *Forward Error Correction*).

Présentement, les contraintes les plus importantes d'un système de communications sont la fiabilité de la transmission, les limitations liées aux caractères particuliers des applications ainsi que le coût d'implantation. Par conséquent, nous allons parler des systèmes ARQ et FEC en ayant ces trois contraintes en perspective.

Un système ARQ est en général, très fiable et efficace sur les canaux réels. Son implantation, ni très coûteuse ni complexe, est souhaitable dans le cadre des réseaux terrestres à commutation de paquets ainsi que des réseaux d'ordinateurs [21]. Cependant, ce système présente les inconvénients d'être caractérisé par un canal de retour, un délai de décodage variable ainsi que des problèmes rattachés à la livraison dans l'ordre des trames décodées.

Le fonctionnement d'un système FEC est possible sans canal de retour, permettant ainsi la communication et le stockage de données si un canal de retour n'est pas disponible. Le débit effectif est constant de même que le délai de décodage exprimé comme une fonction du décodeur. Toutefois, les décodeurs utilisés sont complexes et très sensibles aux dégradations du canal, ce qui résulte en un niveau de fiabilité plus faible que celui du système ARQ.

Une troisième technique consiste à combiner les deux techniques précédentes pour créer un système hybride FEC/ARQ. Celui-ci utilise à la réception un code correcteur d'erreurs suivi d'un code détecteur d'erreurs. Le premier permet de réduire le nombre d'erreurs, diminuant ainsi le nombre de demandes de retransmissions par le code détecteur d'erreurs. Il permet également de diminuer les problèmes liés au délai, mais ce, au prix d'une augmentation de la complexité et d'une expansion de la largeur de bande.

Les recherches actuelles sont focalisées sur l'élimination de certains inconvénients de ces techniques de codage, tout en conservant, dans la mesure du possible, leurs avantages. Notre intérêt porte ainsi sur l'amélioration d'un type de système ARQ. De façon générale, les systèmes ARQ peuvent être classés en trois types de base: stop-and-wait ARQ, go-back-N ARQ et selective-repeat (SR) ARQ.

Dans ce mémoire, nous présentons les résultats de nos recherches portant sur la modi-

fication du système SR ARQ existant en tant que protocole de communication pour des applications terrestres et par satellites. La modification proposée est analysée en détail et les avantages et inconvénients du nouveau protocole SR ARQ sont évalués dans différents types de canaux.

### **1.1 Définition du projet de recherche**

Tel que déjà mentionné, ce projet porte sur une nouvelle variante de protocole SR ARQ standard. Nous essayerons notamment de répondre aux questions suivantes:

*1- Quels sont les avantages et inconvénients du nouveau protocole SR ARQ dans les canaux binaires symétriques? Quels sont les avantages et inconvénients de ce protocole dans différents types de canaux d'évanouissements?*

*2- Quel est le rapport de performance du nouveau protocole SR ARQ par rapport au protocole SR ARQ standard dans les canaux binaires symétriques? Est-ce que ce rapport change pour différents types de canaux d'évanouissements présentés dans ce mémoire?*

*3- Quel est l'effet des grandes distances inhérentes aux communications par satellites sur les performances des deux protocoles? Est-ce que cet effet existe dans tous les types de canaux présentés dans ce mémoire? Peut-on diminuer cet effet?*

### **1.2. Contributions**

Les recherches effectuées durant ce projet ont permis d'apporter les contributions suivantes:

*1- L'introduction d'une nouvelle variante du protocole SR ARQ standard. La nouvelle variante change le principe de transmission sur le canal de retour, surmontant significativement les effets du bruit sur le canal de retour. Le modèle de cette variante ainsi que l'évaluation de sa réalisation pratique, sont présentés en détail.*

2- L'évaluation complète des performances des deux protocoles SR ARQ dans un canal binaire symétrique. Cette évaluation inclut les applications terrestres et par satellites. Les résultats d'évaluation ont favorisé l'analyse plus poussée du nouveau protocole. Par conséquent, l'analyse a été approfondie en présence d'évanouissements.

3- L'évaluation complète des performances des deux protocoles SR ARQ dans différents canaux à évanouissements. Cette évaluation inclut également les applications terrestres et par satellites. Les résultats obtenus par les simulations très complexes montrent la supériorité du nouveau protocole en présence d'évanouissements.

4- La comparaison des deux protocoles SR ARQ pour les applications terrestres et satellites. En plus, la comparaison suggère une amélioration de la qualité des services de communication aujourd'hui en remplaçant le protocole standard SR ARQ par le nouveau protocole.

### 1.3 Contenu du mémoire

Ce mémoire se divise en six chapitres. Le chapitre 2 porte sur les systèmes de base ARQ, en mettant l'accent sur leurs limitations. Ces notions sont essentielles à la compréhension et à l'évaluation de la modification proposée.

Le chapitre 3 décrit en détails les étapes de réalisation du nouveau protocole SR ARQ. La technique est ensuite abordée d'un point de vue analytique avec vérification des résultats par simulations.

Les performances du protocole SR ARQ standard et du nouveau protocole SR ARQ dans un canal binaire symétrique sont évaluées au chapitre 4. Une comparaison est effectuée pour deux applications possibles, notamment les systèmes terrestres et satellites.

Le chapitre 5 représente la contribution principale de ce mémoire. Il est consacré à l'évaluation des deux protocoles dans divers canaux à évanouissements. Au début de ce chapitre, les notions de base sur un canal à évanouissements sont présentées. Les paramètres

essentiels d'un canal à évanouissements sont également donnés. Dans la suite, notre étude détermine la variation des caractéristiques des deux protocoles SR ARQ par rapport aux paramètres essentiels d'un canal à évanouissement. L'étude couvre les communications terrestres et par satellites.

Finalement, les conclusions de cette recherche sont présentées au chapitre 6. Des recommandations pour des recherches ultérieures sont également énumérées.

## CHAPITRE 2

# PROTOCOLES DE RETRANSMISSION ARQ: NOTIONS DE BASE

Afin de cerner le sujet de notre recherche nous allons rassembler dans ce chapitre les informations de base sur les protocoles ARQ. Dans ce chapitre chacun des protocoles ARQ considéré est traité en trois points:

- une description concise du protocole,
- quelques remarques sur ses performances, introduisant l'efficacité et la fiabilité,
- une discussion concernant les avantages, inconvénients et limitations du protocole.

La plupart des travaux antérieurs sur l'analyse des protocoles ARQ ont été simplifiés en supposant un canal de retour sans erreur. Bien que l'analyse précise des performances de protocoles ARQ peut être effectuée avec la méthode des graphes [23] [8], ou en utilisant le temps de la transmission virtuelle [6], les deux méthodes mentionnées deviennent très laborieuses dans le cas où le canal de retour est bruité. D'autre part, les résultats des recherches en supposant un canal de retour sans erreur [21] [22], ont donné de bonnes indications sur les caractéristiques de chacun des protocoles ARQ. Par conséquent, ce chapitre porte sur les principes des protocoles ARQ, leur applications et les mesures de performance en supposant un canal de retour sans erreur. Ce n'est que dans la dernière section de ce chapitre que les notions d'un canal de retour bruité sont introduites. Ces notions seront ensuite utilisées tout au long de ce mémoire.

La première section de ce chapitre expose le concept général des protocoles ARQ.

Les descriptions de tous les protocoles ARQ de base sont présentées dans la section 2.2. La section 2.3 est consacrée à l'efficacité et à la fiabilité des protocoles ARQ. Finalement, la section 2.4 porte sur les problèmes rattachés aux limitations des protocoles ARQ.

## 2.1 Principes de base des protocoles ARQ

Le schéma de base d'un système ARQ est illustré à la figure 2.1. Dans un système ARQ les données sont délivrées de la source à l'émetteur [10]. L'émetteur les organise en blocs de données en attachant des bits de contrôle et de synchronisation. Le codeur bloc accepte un message de  $k$  bits et lui ajoute les  $n-k$  bits de parité, spécifiés par le code utilisé dont le taux de codage est défini par  $R = k/n$ . La trame ainsi créée est transmise vers l'utilisateur sur un canal bruité, et peut donc être reçue avec des erreurs.

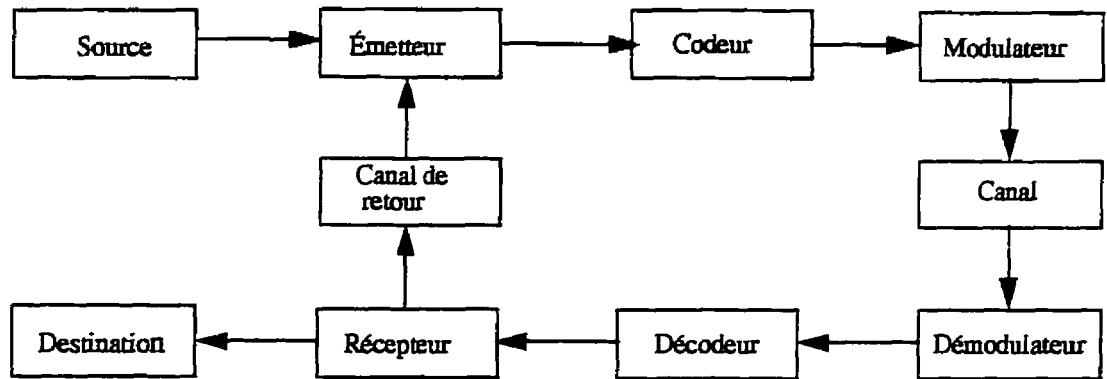


Figure 2.1 Schéma de principe d'un système de communication ARQ en utilisant une technique de codage et de décodage

À l'autre extrémité du canal, la trame est démodulée et puis fournie au récepteur en passant par le décodeur. Pour chaque trame le décodeur calcule les bits de parité à partir des bits de données reçus et puis les compare avec les bits de parité reçus. S'il n'y a pas de désac-

cord, les bits de parité sont retirés, le message est délivré à l'usager et le récepteur transmet un accusé de réception positif (ACK) sur le canal de retour. Un désaccord néanmoins signifie la présence d'erreur dans la trame reçue. Dans ce cas, le récepteur ne délivre pas le message reçu et transmet un accusé de réception négatif (NAK). L'émetteur recevra le NAK sur le canal de retour lui sollicitant la retransmission de la trame en question. La retransmission continue jusqu'à la réception d'un ACK.

Avec ce système de contrôle d'erreur, l'usager ne reçoit des données erronées que si le récepteur n'a pu détecter l'erreur. Par conséquent, un code ayant une capacité de détection très élevée, peut garantir une très faible probabilité de non détection d'erreur.

Les protocoles ARQ sont largement utilisés pour le contrôle des erreurs dans les systèmes de communication des données et ce pour deux raisons: leur simplicité et leur très grande fiabilité.

Par contre, ils comportent un inconvénient majeur que tous les protocoles ARQ ont tenté de combattre: leur efficacité n'est pas constante et décroît rapidement lorsque le taux d'erreur dans le canal augmente [21].

## 2.2. Descriptions des protocoles ARQ

Il existe trois types de protocoles ARQ qui s'appuient sur des stratégies de retransmission différentes: stop-and-wait ARQ, go-back-N ARQ et selective repeat (SR) ARQ. Ils présentent trois solutions alternatives au stockage des trames dans les tampons de l'émetteur et du récepteur et à la retransmission des trames reçues en erreur.

### Stop-and-wait ARQ

Le stop-and-wait ARQ, illustré à la figure 2.2 est le plus simple des protocoles ARQ. L'émetteur envoie la trame puis attend un accusé de réception du récepteur. Si l'accusé de

réception est un ACK, alors l'émetteur transmet la trame suivante alors que si c'est un NAK, l'émetteur retransmet la trame en question jusqu'à réception d'un ACK.

Comme les problèmes de mise en ordre des trames reçues ne sont pas présents, le récepteur ne demande pas beaucoup de mémoire. À cause de sa simplicité, le stop-and-wait ARQ a été mis en oeuvre dans le protocole BISYNC (en anglais, Binary Synchronous Communication) par IBM [16].

L'inconvénient principal de ce concept est le temps mort où l'émetteur doit attendre un accusé de réception pour la trame transmise résultant en une utilisation inefficace du système de transmission. Ceci rend le protocole inapproprié aux applications à débits élevés et aux communications par satellite.

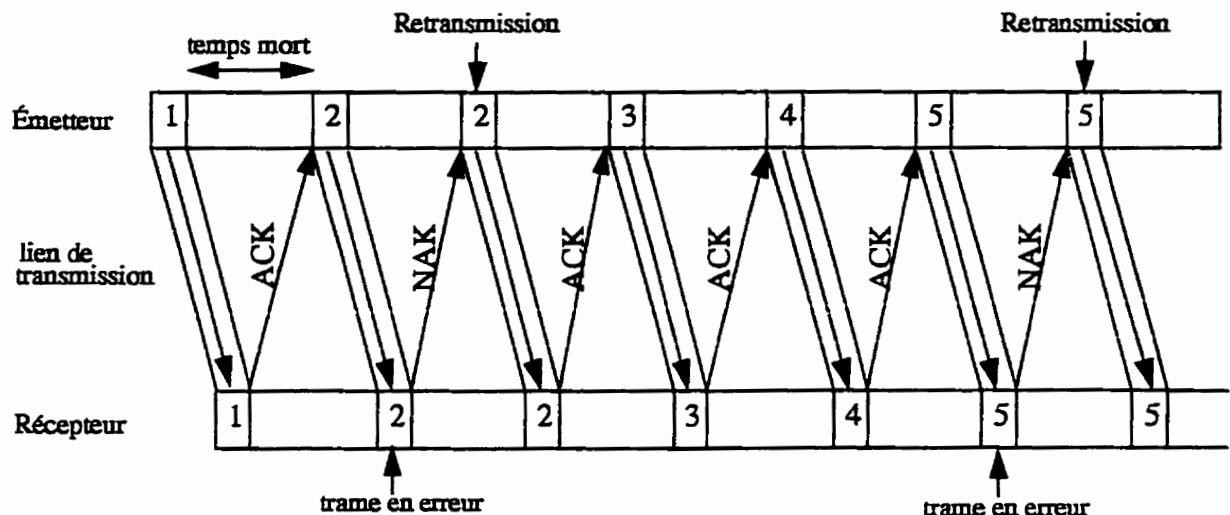


Figure 2.2 Flot de données du stop-and-wait ARQ

## Go-back-N ARQ

Le concept du protocole go-back-N est illustré à la figure 2.2. L'émetteur n'attend pas l'accusé de réception pour la trame transmise et continue à transmettre les trames suivantes. L'accusé de réception arrive après un délai de propagation aller-retour (en anglais, Round Trip Delay RTD) défini comme l'intervalle de temps entre la transmission d'une trame et la réception de son accusé de réception.

Quand un NAK est reçu, l'émetteur termine la transmission de la trame courante et recule jusqu'à la trame reçue en erreur, puis retransmet cette trame ainsi que les N-1 trames suivantes qui avaient été transmises pendant le RTD de cette trame. Cette stratégie de retransmission nécessite de l'émetteur un tamponnage approprié. Le récepteur rejette la trame erronée ainsi que toutes celles qui suivent (erronées ou pas) jusqu'à nouvelle réception de cette trame.

Le go-back-N ARQ permet une transmission continue en gardant l'ordre correct des trames. Par contre, si le RTD est long et le débit est élevé, le système devient inefficace car il nécessitera la retransmission d'un grand nombre de trames possiblement correctes lorsqu'elles suivent une trame erronée. Le meilleur exemple est donné dans les applications par satellite: avec une longueur de trame de 500 bits, un débit de 1 Mb/s et un RTD de 70 ms, on peut facilement constater qu'au cours d'un RTD l'émetteur transmet 140 trames (70 000 bits) de manière continue. Après la détection d'une erreur, ces 140 trames seront rejetées.

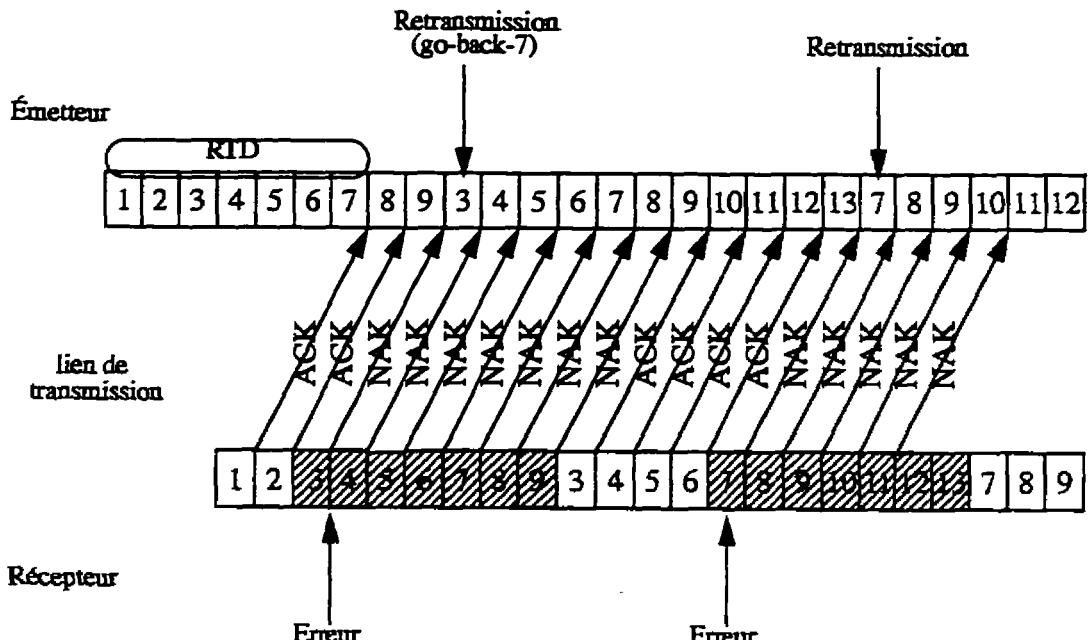


Figure 2.3 Illustration du protocole go-back-N ARQ avec  $N=7$

De ce fait, le protocole go-back-N ARQ n'est pas efficace dans le cas d'applications où le débit est élevé et où le RTD est élevé. Toutefois, il est plus efficace que le stop-and-wait ARQ et peut être implémenté à un coût raisonnable. Ses applications sont limitées aux protocoles comme le SDLC (en anglais, Synchronous Data Link Control) [20] et le ADCCP (en anglais, Advanced Data Communications Control Procedure) [1].

### Selective repeat ARQ

Afin d'éviter la retransmission des trames correctes qui suivent une trame erronée, on a introduit une nouvelle stratégie de retransmission: la retransmission sélective. Dans le protocole SR ARQ, l'émetteur ne retransmet que les trames correspondant à un NAK. Pour cela, le récepteur dispose d'un tampon et d'une logique qui réalise la remise en ordre des trames qui y

sont stockées.

Émetteur

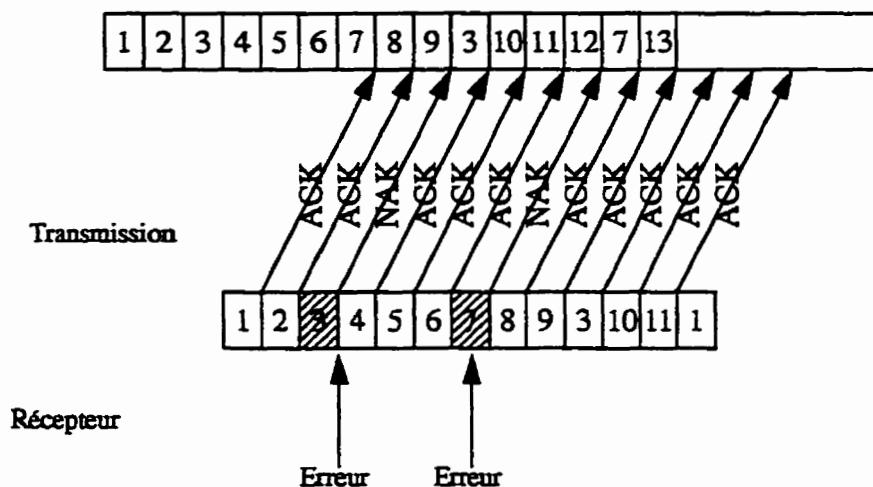


Figure 2.4. Illustration du protocole selective-repeat ARQ avec RTD=7

Lorsque la première trame en question est reçue correctement, le récepteur libère consécutivement du tampon toutes les trames reçues sans erreur jusqu'à l'arrivée de la prochaine trame erronée [22]. Ceci nécessite une taille de tampon appropriée. Il faut en effet éviter un débordement du tampon et donc la perte des trames stockées.

Le protocole SR ARQ comparé au protocole go-back-N ARQ évite les retransmissions supplémentaires, mais nécessite une logique plus complexe et un tampon élastique au récepteur.

### 2.3. Efficacité de débit et fiabilité des protocoles ARQ

Les avantages les plus importantes des protocoles ARQ sont leur fiabilité (très faible probabilité de non détection d'erreur) et une relative absence de sensibilité de cette fiabilité aux caractéristiques de canal [10]. Comme nous l'avons déjà mentionné dans la section 2.1, le récepteur dans les systèmes ARQ commet une erreur de décodage seulement s'il reçoit une

trame entachée d'une erreur non détectable.

Supposons qu'un code linéaire  $C(n,k)$  soit utilisé pour la détection d'erreur dans un système ARQ. Les probabilités d'intérêt [21] sont définies comme suit:

$P_c$  = probabilité que la trame reçue soit sans erreur

$P_d$  = probabilité que la trame reçue contienne une erreur ou un ensemble d'erreurs détectables

$P_e$  = probabilité que la trame reçue contienne une erreur ou un ensemble d'erreurs non détectables.

La somme de toutes les trois probabilités est égale à 1, c'est à dire  $P_c + P_d + P_e = 1$ . La probabilité  $P_c$  dépend uniquement des statistiques d'erreur de canal, tandis que les probabilités  $P_d$  et  $P_e$  dépendent en plus des paramètres du code détecteur d'erreur. Une trame reçue est acceptée par le récepteur si elle ne contient aucune erreur détectable.

La probabilité  $P_e$  peut être très faible par rapport à  $P_c$  si le code  $C$  est bien choisi. Par conséquent, la fiabilité du système ARQ est très élevée. Deux codes sont fréquemment utilisés dans les systèmes ARQ: le code long de Hamming et le code long, primitif BCH, le correcteur de double erreur [22].

Comme tous les systèmes ARQ utilisant le même code  $C$  ont la même fiabilité, l'efficacité du débit (en anglais, "throughput")\* est considérée comme la plus importante mesure de performance d'un système ARQ [22] [10]. Le throughput est défini comme le rapport entre le nombre moyen de bits d'information acceptés par le récepteur au cours d'une unité de temps et le nombre total de bits qui pourraient être transmis au cours d'une unité de temps [3] [5]. Dans la suite de cette section nous dériverons le throughput de tous les systèmes de base ARQ en supposant un canal de retour idéal ainsi que des tampons de taille suffisamment grande pour ne pas avoir de débordements [21] [22].

\* En conformité avec l'appellation courante, on utilisera la terminologie throughput.

### 2.3.1 Throughput du SR ARQ

La probabilité qu'une trame reçue soit acceptée par le récepteur du SR ARQ est:

$$P = P_c + P_e \quad (2.1)$$

En considérant que  $P_e$  est beaucoup plus petite que  $P_c$ , la probabilité qu'une trame reçue soit retransmise s'exprime par:

$$P_d = 1 - P \approx 1 - P_c \quad (2.2)$$

Le nombre moyen de retransmissions incluant la transmission initiale, pour une trame acceptée par le récepteur est de la forme:

$$T_{SR} = 1P + 2P(1-P) + 3P(1-P)^2 + \dots + lP(1-P)^{l-1} + \dots = \frac{1}{P} \quad (2.3)$$

Le throughput du SR ARQ qui utilise un code C(n,k) de taux de codage  $R=k/n$  est donc:

$$\eta_{SR} = \frac{1}{T_{SR}} \times \left(\frac{k}{n}\right) = \left(\frac{k}{n}\right) \times P \quad (2.4)$$

Il est évident que le throughput du SR ARQ pour un code de taux de codage donné ne dépend que du taux d'erreur de canal.

### 2.3.2 Throughput du go-back-N ARQ

Le nombre moyen de retransmissions incluant la transmission initiale, pour une trame

acceptée par le récepteur du go-back-N est:

$$T_{GBN} = 1P + (N+1)P(1-P) + (2N+1)P(1-P)^2 + \dots$$

$$(IN+1)P(1-P)^I + \dots = 1 + \frac{N(1-P)}{P}$$
(2.5)

Par conséquent, le throughput du système go-back-N ARQ est:

$$\eta_{GBN} = \frac{1}{T_{GBN}} \times \left(\frac{k}{n}\right) = \frac{P}{P + (1-P)N} \times \left(\frac{k}{n}\right)$$
(2.6)

L'expression (2.6) montre que le throughput du go-back-N ARQ dépend du taux d'erreurs de canal ainsi que du délai aller-retour (RTD = N). À partir de ces remarques nous concluons que le go-back-N ARQ fournit un bon throughput lorsque  $P$  est très élevé ou dans les cas où le RTD est petit et le taux de transmission de données n'est pas très grand.

### 2.3.3 Throughput du stop-and-wait ARQ

Si on dénote le temps mort par  $D$  et le taux de signalisation en bits/sec par  $\tau$ , on peut constater que l'émetteur du stop-and-wait ARQ pourrait transmettre les  $n+D\tau$  bits au cours d'un RTD. Le nombre moyen de bits que l'émetteur pourrait transmettre depuis l'émission d'une trame jusqu'à la réception de son ACK est:

$$T_{SW} = (n + D\tau)P + 2(n + D\tau)P(1-P) + 3(n + D\tau)P(1-P)^2 + \dots$$

$$= \frac{n + D\tau}{P}$$
(2.7)

Par conséquent, le throughput du go-back-N ARQ est:

$$\eta_{SW} = \frac{k}{T_{SW}} = \frac{P}{1 + D\frac{\tau}{n}} \times \left(\frac{k}{n}\right)$$
(2.8)

L'expression (2.8) illustre que le throughput du stop-and-wait ARQ ne peut jamais atteindre la valeur maximale  $k/n$  même si le canal est idéal ( $P=1$ ). Pour les systèmes où le taux de transmission de données est faible et le RTD est petit, le stop-and-wait ARQ peut cependant fournir des performances acceptables.

## 2.4. Problématique des protocoles ARQ

Les avantages et les inconvénients des protocoles ARQ déterminent les applications pour lesquelles ils peuvent être utilisés. Le protocole stop-and-wait ARQ n'est pas efficace, mais il est simple et donc peu coûteux à mettre en oeuvre. Le protocole go-back-N offre une transmission continue et garantit à l'usager la livraison des trames dans leur ordre exact. Cependant, il est surtout limité aux applications terrestres dans lesquelles le débit n'est pas trop élevé. Le protocole SR ARQ, considéré comme le plus complexe et le plus sophistiqué de tous les protocoles de base ARQ, fournit la meilleure efficacité. Comme le throughput est insensible au délai, il trouve des applications dans les systèmes où le délai de propagation est élevé, ce qui le cas des liaisons par satellites.

Cependant, la retransmission sélective n'a pas suffi pour minimiser la dégradation du throughput provoquée par le bruit dans le canal de transmission. Ce problème, toujours considéré comme un des grands désavantages des protocoles ARQ, a été partiellement résolu avec l'introduction du mécanisme de délai de garde (en anglais, "time-out")\*. Le seul but de ce mécanisme est de compenser les accusés de réception perdus sur le canal de retour affecté par du bruit. Ce mécanisme permet la retransmission de la trame dont l'accusé de réception n'a pas été reçu au cours d'intervalle de temps fixé. Cet intervalle de temps s'appelle le délai de garde qui est nécessairement plus long qu'un RTD. En ajoutant le mécanisme de time-out aux protocoles ARQ la complexité de ces systèmes n'augmente pas considérablement, tandis que les performances des systèmes sont améliorées de façon sensible.

\* En conformité avec l'appellation courante, on utilisera la terminologie time-out.

Bien que les effets du bruit sur le canal de retour soient quelque peu diminués avec le mécanisme de time-out, des problèmes ne sont pas encore résolus. Les points de recherche susceptibles d'amélioration sont les suivants:

- diminuer les effets du bruit sur le canal direct
- diminuer les effets du bruit sur le canal de retour
- résoudre les problèmes de tamponnage
- diminuer le coût d'implémentation.

## CHAPITRE 3

# PROTOCOLE SR-ARQ MODIFIÉ

L'importance des protocoles ARQ dans les systèmes de communications et les hautes attentes espérées des systèmes de radio mobiles de troisième génération ont suscité des recherches visant à améliorer les performances des protocoles existants. Les projets prévus dans ce domaine exigent une probabilité d'erreur résiduelle par bit de l'ordre de  $10^{-9}$  et un délai de livraison peu sensible aux caractéristiques de transmission, en particulier pour les services de voix et de vidéo de basse résolution. Les objectifs de performance de ces projets constituent un défi de taille en considérant que la probabilité d'erreur par symbole transmis de la transmission numérique cellulaire de la voix est typiquement de l'ordre de  $10^{-3}$ . Afin de répondre à ce défi, les protocoles ARQ doivent être améliorés par de nouveaux concepts.

Ces nouveaux concepts devront mettre en relief les deux points suivants:

- (1) un équilibre judicieux entre la probabilité d'erreur résiduelle par bit et le débit ou throughput
- (2) un certain degré de compatibilité avec les systèmes de deuxième génération.

Le premier point reflète le fait que la capacité d'un réseau d'accès intégré sans fil (multiservices) ainsi que sa capacité d'ajuster les services aux demandes du trafic, dépendent du throughput. Le deuxième point suggère que les méthodes basées sur l'architecture du système AMRT devraient être compatibles avec les systèmes cellulaires de deuxième génération qui sont en voie d'évolution tels que: ETSI, GSM, TIA et TR45 [17].

Les nouveaux concepts d'amélioration des systèmes ARQ visent à corriger le plus grand inconvénient des systèmes ARQ: la dégradation rapide du throughput lorsque le canal

de transmission devient bruité. En général, ces concepts d'amélioration des systèmes ARQ prennent une des deux approches suivantes: l'approche qui suppose le canal de retour sans erreur et celle qui considère le canal de retour bruité.

Un bon exemple de recherche avec l'approche supposant un canal de retour idéal est l'amélioration du protocole SR ARQ dans les communications Point-à-Multipoint [2]. L'idée principale du nouveau protocole SR ARQ [2] est de combiner physiquement plusieurs trames erronées en utilisant l'addition modulo 2, créant ainsi une trame X. L'émetteur envoie la trame X, et chaque récepteur doit récupérer à partir de la trame X, la trame qu'il a précédemment reçue en erreur. Le protocole proposé [2] minimise le nombre de retransmissions et augmente le throughput en particulier pour les réseaux où le nombre d'usagers est important. Une variante de l'approche supposant un canal de retour idéal est la retransmission de plusieurs copies d'une trame au lieu d'une seule [29].

D'autre part, il existe de nombreux travaux qui portent sur les améliorations des systèmes ARQ en considérant le canal de retour bruité [9] [7]. Dans ce mémoire on présente la description et l'évaluation d'un protocole SR ARQ modifié qui fournit virtuellement un canal de retour sans erreur pour les NAKs, tout en augmentant le throughput [13] [14].

### 3.1 Description du protocole SR ARQ modifié

Le nouveau protocole SR ARQ est basé sur une observation simple [13]. En supposant un canal de retour sans erreur, les retransmissions sont déclenchées par les NAKs et une absence de NAK est considérée comme un ACK. En effet, considérant que le récepteur ne transmet que les NAKs, si la transmission des NAKs pouvait être effectuée sans erreur même sur un canal réel, le mécanisme du time-out qui déclenche une retransmission dès qu'un ACK ou un NAK n'est pas reçu à l'intérieur d'une période déterminée, peut être éliminé.

Afin de réaliser une transmission de NAKs sans erreur sur un canal normalement affecté par du bruit, nous avons remplacé le seul NAK sur la trame de données dans le proto-

cole SR ARQ standard par une trame entière de NAKs. Chaque NAK à l'intérieur d'une trame de NAKs, porte son propre code détecteur d'erreur. Ainsi la probabilité qu'aucun NAK à l'intérieur d'une trame entière de NAKs ne soit reçu correctement à l'émetteur peut être exprimée par:

$$P_{NAK\text{-}perdu} = \left[ 1 - (1 - P_b)^\beta \right]^{(\alpha/\beta)} \quad (3.1)$$

où  $\alpha$  représente la longueur de la trame en bits;  $\beta$  représente le nombre de bits qui composent un NAK, son adresse et son CRC;  $P_b$  est la probabilité d'erreur par bit sur le canal de retour. On a aussi supposé que les détections de  $(\alpha/\beta)$  NAKs à l'intérieur d'une trame de NAKs sont des événements indépendants et que le bruit est blanc.

Avec des trames de longueur  $\alpha=500$  bits, des NAKs de longueur  $\beta=20$  bits et  $P_b=0.05$ , on peut facilement obtenir, à partir de l'équation (3.1),  $P_{NAK\text{-}perdu}=1.514101e-05$ . Il est évident que cette probabilité de ne pas perdre un NAK sur le canal de retour, ne suffit pas pour conclure que la transmission de NAK est sans erreur sur le canal de retour.

Toutefois, la probabilité  $P_{NAK\text{-}perdu}$  peut être aussi petite que désirée en transmettant plusieurs trames de NAKs. Si  $\Lambda$  est le nombre de trames de NAKs, qui sont émises par une trame de données incorrectement reçue, la probabilité  $P_{NAK\text{-}perdu}$  devient :

$$P_{NAK\text{-}perdu} = \left[ 1 - (1 - P_b)^\beta \right]^{(\alpha/\beta)\Lambda} \quad (3.2)$$

Ceci ouvre la possibilité d'ajuster le nombre de trames de NAKs en fonction de l'état instantané du canal. Autrement dit, ce nombre de trames de NAKs peut varier avec l'état du canal. Par conséquent, la probabilité  $P_{NAK\text{-}perdu}$  peut être toujours suffisamment petite, au moins aussi petite qu'une valeur précédemment fixée. Dans ce mémoire nous voulons que la probabilité  $P_{NAK\text{-}perdu}$  soit égale à  $10^{-11}$ . Nous appellerons cette probabilité  $P_{NAK\text{-}perdu}$  désirée.

En gardant les mêmes valeurs pour  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $P_b$ , comme dans l'exemple ci-dessus, et en mettant la nouvelle valeur  $\Lambda=2$ , l'équation (3.2) donne  $P_{NAK-perdu}=2.292501e-10$  qui est substantiellement plus petite que  $P_{NAK-perdu}$  obtenue pour  $\Lambda=1$ . En augmentant davantage la valeur de  $\Lambda$ , la probabilité  $P_{NAK-perdu}$  diminue encore plus. Aussi, si  $\Lambda=3$  et les autres paramètres ne changent pas, on obtient  $P_{NAK-perdu}=3.471078e-15$ . D'autre part, cette augmentation de  $\Lambda$  est suivie par une accumulation des trames de NAKs (en anglais, overhead) reçues à l'émetteur. Dans la suite de ce mémoire, nous utiliserons le terme anglais overhead.

De cette façon, en acceptant l'overhead supplémentaire des trames de NAKs, la probabilité  $P_{NAK-perdu}$  peut virtuellement prendre la valeur zéro. Étant donné qu'une trame de NAKs ne contient pas de données, cet overhead supplémentaire de trames de NAKs provoque certaine réduction de throughput du nouveau protocole. Malgré cela, l'évaluation du nouveau protocole présentée dans les chapitres 4 et 5, montrera que l'overhead des trames de NAKs, dans certains cas où nous suggérons l'application du nouveau protocole, est complètement compensé par l'élimination des retransmissions non nécessaires présentes dans le protocole SR ARQ standard.

De plus, le nouveau protocole SR ARQ est attrayant pour la réalisation pratique pour les raisons suivantes:

- La trame de NAKs constitue un 'mot unique' du point de vue du récepteur par rapport à la trame de données; sa structure répétitive est très facile à reconnaître.
- Il permet d'éliminer le mécanisme de time-out.
- Il permet aussi d'éliminer l'implémentation des ACKs lorsqu'il présume que chaque trame est reçue correctement si on ne reçoit pas son NAK correspondant.

Comme le protocole SR ARQ standard et le nouveau protocole SR ARQ sont deux versions du même protocole, nous allons les nommer respectivement pour des raisons de simplicité, les protocoles SR1 et SR2.

### 3.1.1 Illustrations

Afin d'illustrer plus clairement la différence entre les protocoles SR1 et SR2, on fournit quelques exemples numériques sur un canal binaire symétrique, BSC. Le canal BSC sera présenté avec plus de détails dans la section 4.1.

Pour la notation,  $\alpha$  représente la longueur de trame en bits et  $\beta$  reste la longueur d'un NAK avec son adresse et son CRC en bits. On considère les deux canaux BSC direct et de retour indépendants avec les probabilités d'erreur par bit  $P_{b1}$  pour le canal direct et  $P_{b2}$  pour le canal de retour. La transmission des trames sur le canal direct est identique pour les protocoles SR1 et SR2. Par conséquent, la probabilité qu'une trame soit correctement reçue sur le canal direct est pour les deux protocoles:

$$P_{c1} = (1 - P_{b1})^\alpha \quad (3.3)$$

Sur le canal de retour, pour le protocole SR1, la probabilité qu'un ACK ou qu'un NAK dans une trame de données soit correctement reçu est:

$$P_{c2} = (1 - P_{b2})^\beta \quad (3.4)$$

Pour SR2, où l'on transmet une ou plusieurs trames de NAKs, la probabilité de transmission de NAK sans erreur est:

$$P_{c2} = 1 - P_{NAK-perdu} \quad (3.5)$$

où  $P_{NAK-perdu}$  est donnée par l'expression (3.2). On peut aussi parler de la probabilité  $P_{NAK-perdu}$  pour le protocole SR1, qui est en fait, la probabilité qu'un accusé de réception

positif ou négatif ne soit pas reçu correctement. Cette probabilité peut être exprimée comme:

$$P_{NAK\text{-perdu(SR1)}} = 1 - (1 - P_b)^\beta \quad (3.6)$$

Le Tableau 3.1 démontre que la probabilité de perdre un NAK sur le canal de retour pour les deux protocoles SR1 et SR2 augmente, lorsque la probabilité d'erreur par bit croît. On remarque que pour toutes les valeurs de  $P_b$  du Tableau 3.1, il est considérablement moins probable de perdre un NAK avec le protocole SR2 qu'avec le protocole SR1. Toutefois, dans le Tableau 3.1 la  $P_{NAK\text{-perdu(SR2)}}$  (déjà notée par  $P_{NAK\text{-perdu}}$ ) n'est pas plus petite que  $P_{NAK\text{-perdu}}$  désirée= $10^{-11}$  pour toutes les valeurs de  $P_b$  considérées. L'analyse et les suggestions appropriées pour ces cas, que nous allons appeler les cas critiques, seront présentées dans la section 3.2.

Tableau 3.1 Probabilités de perdre un NAK pour SR1 et SR2 en fonction de différentes probabilité d'erreur par bit sur le canal de retour,  $\alpha=500$  bits et  $\beta=20$  bits.

$P_b$	$P_{NAK\text{-perdu(SR1)}}$	$P_{NAK\text{-perdu(SR2), } \Lambda=1}$
0.01	1.8209e-01	3.2161e-19
0.02	3.3239e-01	1.0996e-12
0.025	3.9731e-01	9.5126e-11
0.03	4.5620e-01	3.0131e-09
0.04	5.5798e-01	4.6324e-07
0.05	6.4151e-01	1.514e-05

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont établis pour chaque système de communications de données et ils ne changent pas au cours d'une transmission. Le choix de ces paramètres dépend du type de système qui peut être soit pratique soit théorique. Dans le standard radio cellulaire de

deuxième génération 'dual-mode North American' IS-54,  $\alpha=1944$  bits. D'autre part, dans certains ouvrages les simulations de protocole SR1 sont faites pour  $\alpha=161$  bits [9] [3].

Les valeurs des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  peuvent aussi affecter les probabilités  $P_{NAK-perdu}(SR1)$  et  $P_{NAK-perdu}(SR2)$ . Le Tableau 3.2 montre les probabilités  $P_{NAK-perdu}(SR1)$  et  $P_{NAK-perdu}(SR2)$  en fonction de  $P_b$  pour une autre valeur de  $\beta$  ( $\beta=25$  bits). On voit que pour  $\alpha=500$  bits,  $\beta=25$  bits et les valeurs de  $P_b$  présentées dans ce tableau, le protocole SR2 permet une transmission de NAK considérablement plus fiable que le protocole SR1. En comparant ce tableau avec le Tableau 3.1 pour les valeurs identiques de  $P_b$ , on remarque que les valeurs de  $P_{NAK-perdu}(SR1)$  et en particulier de  $P_{NAK-perdu}(SR2)$ , sont quelque peu plus élevées par rapport au Tableau 3.1. On conclut que pour  $\alpha$  fixé, la réduction de  $\beta$  ne change pas la qualité de transmission des NAKs dans le protocole SR1 mais elle améliore la transmission des NAKs dans le protocole SR2. De la même façon que dans l'exemple précédent, les cas où  $P_{NAK-perdu}(SR2)$  n'atteint pas  $P_{NAK-perdu}$  désirée, seront considérés dans la section 3.2.

Tableau 3.2 Probabilités de perdre un NAK pour SR1 et SR2 en fonction de différentes probabilité d'erreur par bit sur le canal de retour,  $\alpha=500$  bits et  $\beta=25$  bits.

$P_b$	$P_{NAK-perdu}(SR1)$	$P_{NAK-perdu}(SR2), \Lambda=1$
0.01	2.2217e-01	8.5910e-14
0.015	3.9653e-01	9.0540e-11
0.02	3.1466e-01	9.2392e-09
0.03	5.3302e-01	3.4273e-06
0.04	6.3960e-01	1.3128e-04
0.05	7.2261e-01	1.5069e-03

### 3.2. Influence du nombre de trames de NAKs sur les performances du protocole SR ARQ modifié

Dans la section 3.1 on a mentionné que pour rendre une  $P_{NAK-perdu}$  inférieure ou égale à  $P_{NAK-perdu}$  désirée, la valeur de  $\Lambda$  peut être ajustée d'après l'état du canal et plus généralement, d'après les valeurs des autres paramètres de l'expression (3.2). Un tel exemple est donné dans le Tableau 3.3. Ce tableau illustre que pour  $\alpha=500$  bits et  $\beta=20$  bits, la valeur de  $\Lambda$  requise pour atteindre la probabilité  $P_{NAK-perdu}$  désirée, augmente très rapidement lorsque le canal devient plus bruité. Le Tableau 3.3 n'illustre pas les probabilités  $P_{NAK-perdu(SR2)}$  en fonction de différents nombres de trames de NAKs pour les valeurs  $P_b$  inférieures à 0.005. La raison est la suivante: Ces valeurs sont tellement petites qu'on peut toujours atteindre la probabilité  $P_{NAK-perdu}$  désirée en transmettant une seule trame de NAKs.

Tableau 3.3. Probabilités de perdre un NAK pour SR2 en fonction de différentes probabilités d'erreur par bit sur le canal de retour et différents nombres de trames de NAKs;  $\alpha=500$  bits et  $\beta=20$  bits

$\Lambda$	$P_{NAK-perdu}$ pour $P_b=5.0e-03$	$P_{NAK-perdu}$ pour $P_b=1.0e-02$	$P_{NAK-perdu}$ pour $P_b=2.0e-02$	$P_{NAK-perdu}$ pour $P_b=5.0e-02$
1	3.0726e-26	3.2161e-19	1.0996e-12	1.5141e-05
2	9.4413e-52	1.0343e-37	1.2092e-24	2.2925e-10
3	2.901e-77	3.3266e-56	1.3298e-36	3.4710e-20
4	8.913e-103	1.0698e-74	1.4623e-48	5.2555e-20
5	2.738e-128	3.4409e-93	1.6081e-60	7.9574e-25

Pour analyser les relations entre  $P_b$ ,  $P_{NAK\text{-perdu(SR1)}}$ ,  $P_{NAK\text{-perdu(SR2)}}$  et  $\Lambda$ , nous fixerons les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  ( $\alpha=500$  bits et  $\beta=25$  bits). Le Tableau 3.4 expose  $P_{NAK\text{-perdu(SR1)}}$  et  $P_{NAK\text{-perdu(SR2)}}$  pour  $P_b$  variant entre 0.07 et 0.5. Pour ces valeurs de  $P_b$  toutes les valeurs  $P_{NAK\text{-perdu(SR2)}}$  sont beaucoup plus grandes que  $P_{NAK\text{-perdu}}$  désirée= $10^{-11}$ . En plus,  $P_{NAK\text{-perdu(SR2)}}$  est à peine inférieure à  $P_{NAK\text{-perdu(SR1)}}$ . On peut alors se demander s'il est raisonnable d'utiliser le protocole SR2 ARQ dans ces cas. Il introduit un overhead significatif des trames de NAKs alors que la qualité de transmission des NAKs sur le canal de retour est à peine améliorée par rapport au protocole SR1 ARQ dans les mêmes conditions. Pour répondre à cette question nous évaluerons l'overhead de trames de NAKs dans les cas où  $P_{NAK\text{-perdu(SR2)}}$  est inférieure ou égale à  $P_{NAK\text{-perdu}}$  désirée.

Tableau 3.4 Probabilités de perdre un NAK pour SR1 et SR2 en fonction de différentes probabilités d'erreur par bit sur le canal de retour,  $\alpha=500$  bits et  $\beta=20$  bits

$P_b$	$P_{NAK\text{-perdu(SR1)}}$	$P_{NAK\text{-perdu(SR2), } \Lambda=1}$
0.07	7.6576e-01	1.2657e-03
0.1	8.7842e-01	3.9137e-02
0.2	9.8847e-01	7.4833e-01
0.3	9.9920e-01	9.8024e-01
0.4	9.9996e-01	9.9908e-01
0.5	9.9999e-01	9.9997e-01

Le Tableau 3.5 fournit la valeur de  $\Lambda$ , pour laquelle on peut atteindre  $P_{NAK\text{-perdu}}$  désirée dans les cas critiques du Tableau 3.1 ( $P_b=0.03$ ,  $P_b=0.04$  et  $P_b=0.05$ ) et le cas critique représentatif de Tableau 3.4 ( $P_b=0.1$ ). Il est facile à voir que  $\Lambda=2$  garantit la probabilité  $P_{NAK\text{-perdu}}$  désirée pour les probabilités  $P_b=0.03$  et  $P_b=0.04$ . On peut aussi remarquer que  $\Lambda=3$

implique une transmission des NAKs de qualité acceptable si le canal de retour est tel que  $P_b=0.05$ . En même temps, le Tableau 3.5 montre bien que la valeur de  $\Lambda$  pour laquelle on atteint la probabilité  $P_{NAK-perdu}$  désirée est très élevé pour  $P_b$  de l'ordre de  $10^{-2}$ .

Sur le canal variable dans le temps, la valeur de  $\Lambda$  requise pour atteindre  $P_{NAK-perdu}$  désirée peut être ajustée de façon continue. Si une borne supérieure est imposée sur  $\Lambda$  ( $\Lambda_{lim}$ ) pour des raisons de complexité et de délai, le mécanisme de time-out peut être introduit, chaque fois qu'on ne peut obtenir  $P_{NAK-perdu}$  désirée avec  $\Lambda_{lim}$ . Dans ce cas, les résultats [14] montrent qu'il est préférable de retourner au protocole SR1 au lieu de continuer la multiple transmission des trames de NAKs conjointement avec le mécanisme de time-out.

Tableau 3.5.  $P_{NAK-perdu}$  pour le protocole SR2 en fonction de  $P_b$  et différentes valeurs de nombre des trames  $\Lambda$ , pour  $\alpha=500$  bits et  $\beta=20$ .bits

$P_b$	$P_{NAK-perdu}$ pour $\Lambda=2$	$P_{NAK-perdu}$ pour $\Lambda=3$	$P_{NAK-perdu}$ pour $\Lambda=4$	$P_{NAK-perdu}$ pour $\Lambda=7$	$P_{NAK-perdu}$ pour $\Lambda=8$	$P_{NAK-perdu}$ pour $\Lambda=10$
0.03	9.0789e-18					
0.04	2.1459e-13					
0.05	2.2925e-10	3.4710e-15				
0.1	1.5317e-03	5.9950e-05	2.3463e-06	1.4066e-10	5.5052e-10	8.4327e-15

Par conséquent, dans la suite de notre recherche, nous évaluerons quelle valeur de  $\Lambda$  peut garantir la transmission correcte de NAK dans différents types de canaux. La conclusion de ce chapitre suggère que avec  $\Lambda=1$ , le nouveau protocole fournit les résultats les plus avantageux.

# CHAPITRE 4

## ÉVALUATION DES DEUX PROTOCOLES SR ARQ

### DANS UN CANAL BINAIRESYMÉTRIQUE

Dans ce mémoire, l'évaluation du nouveau protocole SR2 ARQ est basée sur la comparaison de ses performances avec celles du protocole standard SR1 ARQ. De cette façon, bien que la modélisation des deux protocoles ne soit pas parfaitement réaliste, l'évaluation du nouveau protocole reste valable dans la mesure du possible. Ainsi, l'évaluation effectuée du protocole SR2 ARQ se rapporte au protocole SR1 ARQ, l'objectif n'étant pas d'explorer les meilleures ou les pires performances existantes de ces protocoles. L'approche usuelle est de comparer les valeurs obtenues par les simulations numériques des deux protocoles avec une précision qui dépend des propriétés statistiques des échantillons simulés.

Les modèles mathématiques utilisés pour simuler les deux protocoles SR ARQ sont d'autant plus complexes que l'approximation des systèmes réels est serrée, imposant l'introduction d'hypothèses simplificatrices; en retour, ceci entraîne la nécessité d'analyser l'influence de ces hypothèses sur le degré de confiance des résultats obtenus par les simulations.

Le modèle complet d'un protocole SR ARQ est donné dans la figure 2.1 en ajoutant la stratégie précise de retransmission pour les protocoles SR1 ARQ et SR2 ARQ respectivement. Nous allons discuter de ces modèles plus en détail dans la section 4.1 où on introduit également les paramètres d'expérimentation pour les communications terrestres. L'évaluation

des deux protocoles SR ARQ est influencée par le grand nombre de paramètres, en particulier, la méthode de codage utilisée. Une évaluation basée directement sur les simulations numériques à partir du modèle illustré dans la figure 2.1, risque d'être trop complexe, dû aux calculs requis pour simuler le codage. Cependant, la comparaison des deux protocoles SR ARQ est valide quelle que soit la méthode de codage utilisée [9]. A partir de ces remarques, dans notre recherche on a choisi une approche sans simuler le processus précis de codage/décodage.

Dans la section 4.2 nous allons définir les paramètres qui nous permettront l'évaluation précise des deux protocoles SR ARQ. Cette évaluation est exposée dans la section 4.3. Dans la suite de ce chapitre, le cadre de la recherche est élargi aux applications par satellites. Par conséquent, les paramètres d'expérimentation pour les communications par satellites sont introduits dans la section 4.4. Les paramètres utilisés pour cette évaluation sont présentés dans la section 4.5 et l'évaluation suit dans la section 4.6. Finalement, la comparaison des performances des deux protocoles est exposée à la dernière section de ce chapitre.

## 4.1 Paramètres d'expérimentation pour les communications terrestres

Le choix des paramètres de simulations numériques a été fait en s'appuyant sur les systèmes terrestres réels, espérant obtenir les meilleures performances possibles. De plus, l'utilisation des mêmes paramètres pour les deux protocoles SR ARQ, a permis de situer le nouveau protocole SR2 ARQ par rapport au protocole standard SR1 ARQ.

### 4.1.1 Choix du canal

Afin de discuter les avantages et inconvénients du nouveau protocole SR2 ARQ par rapport au protocole standard SR1 ARQ dans les conditions réelles, il est absolument nécessaire de simuler les deux protocoles dans un canal à évanouissements. Le temps requis par les

simulations des deux protocoles SR ARQ rend difficile une étude de l'influence des différents paramètres sur le comportement des deux protocoles, lorsque cette étude est directement basée sur les résultats des simulations dans un tel canal. Par conséquent, on a choisi de commencer l'évaluation des performances du protocole SR2 ARQ par rapport au protocole SR1 ARQ dans un canal binaire symétrique et dans le cas d'une supériorité remarquable des performances du protocole SR2 ARQ, répéter les simulations dans un canal à évanouissements.

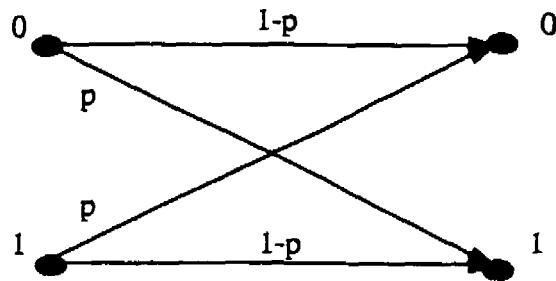


Figure 4.1 Canal binaire symétrique

#### 4.1.1.1. Canal binaire symétrique

Supposons que l'entrée du canal soit une séquence binaire et que la sortie soit aussi une séquence binaire, tel qu'illustre dans la figure 4.1. Dans ce cas, l'entrée est donnée par une sélection dans l'alphabet  $X=\{0,1\}$ . Par conséquent, la sortie est représentée par une sélection dans l'alphabet  $Y=\{0,1\}$ . En plus, supposons que le bruit du canal et les autres interférences provoquent dans une séquence binaire transmise, des erreurs statistiquement indépendantes

avec une probabilité moyenne exprimée par:

$$P(Y = 0/X = 1) = P(Y = 1/X = 0) = p \quad (4.1)$$

$$P(Y = 0/X = 0) = P(Y = 1/X = 1) = 1 - p \quad (4.2)$$

De cette façon la cascade, contenant un modulateur binaire, un canal et un démodulateur binaire dans la figure 2.1, est équivalente au canal discret [25] illustré à la figure 4.2.

Ayant une entrée et une sortie binaires, ce canal s'appelle canal binaire symétrique (en anglais, binary symmetric channel, BSC). Etant donné que tous les bits de sortie ne dépendent que des bits d'entrée correspondants, on dit que le canal est 'sans mémoire' [25].

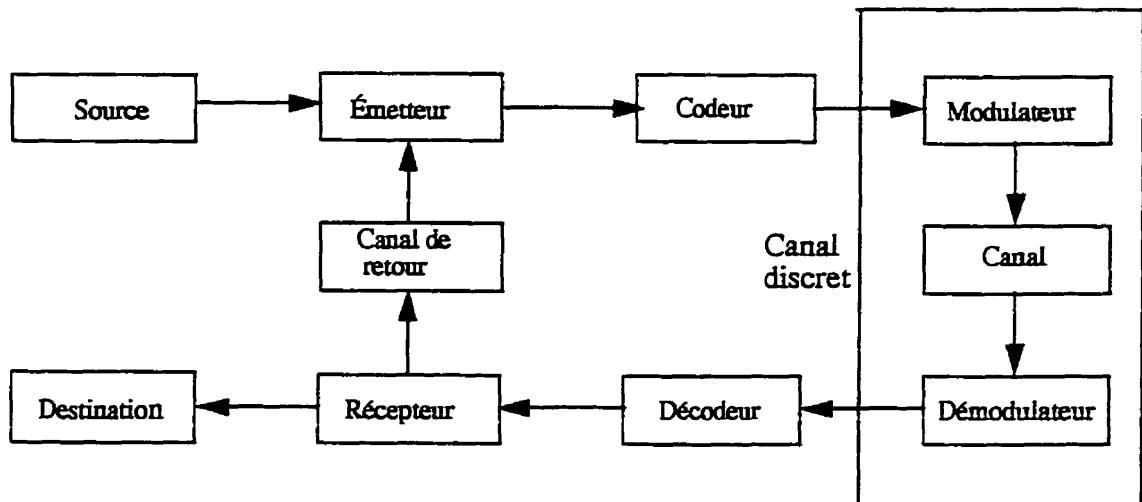


Figure 4.2 Système de communication ARQ utilisant une technique de codage et décodage. Le canal de transmission est un canal discret.

#### 4.1.2 Simulation du système

La supposition principale dans les simulations des deux protocoles SR ARQ est que les processus de codage et de décodage ne sont pas exécutés explicitement dans les simulations. Ceci rend une simplification souhaitable et notre modèle devient le modèle illustré à la

figure 4.3. La détection d'erreur au récepteur est définie comme parfaite.

Pour générer les erreurs à l'intérieur d'une trame transmise sur le canal direct, on compare un nombre aléatoire associé à chaque trame, avec la probabilité de réception correcte de cette trame calculée par l'expression 3.3. L'indicateur d'erreur est déclenché si le nombre aléatoire est supérieur à la probabilité de réception correcte de cette trame. De cette manière, on suppose que toutes les erreurs sont détectées sans l'utilisation directe de codage. L'indicateur d'erreur dans le protocole SR1 ARQ sert à déclencher la transmission d'un NAK à l'intérieur d'une trame de données. Le même indicateur déclenche la transmission d'une trame de NAKs dans le protocole SR2 ARQ.

Pour générer les erreurs sur le canal de retour, on compare un nouveau nombre aléa-

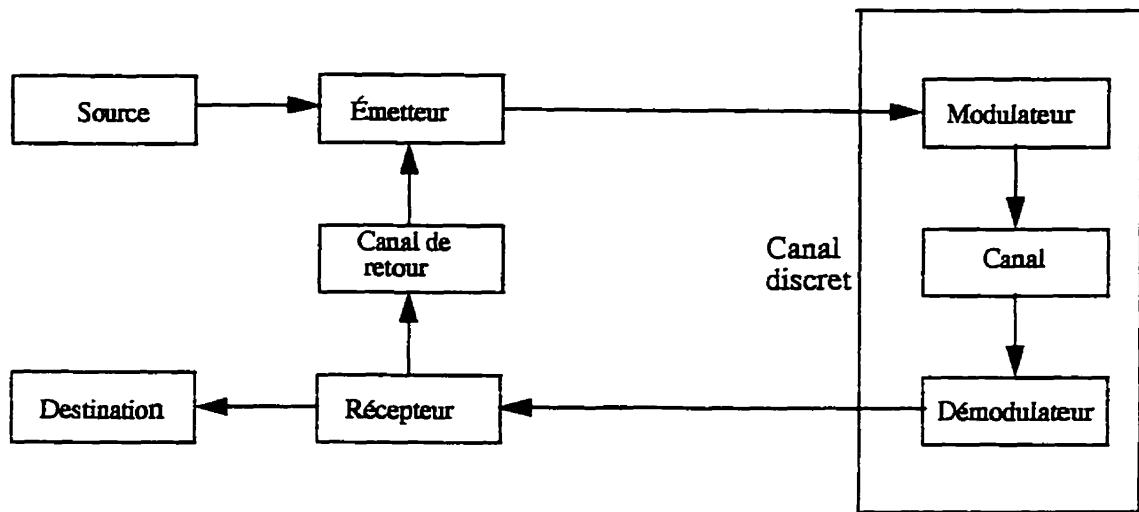


Figure 4.3 Système de communication ARQ sans utiliser une technique de codage et décodage. Le canal de transmission est un canal discret.

toire associé à chaque trame, avec la probabilité de réception correcte de cette trame calculée par l'expression 3.4 et 3.5 pour le protocole SR1 ARQ et SR2 ARQ respectivement. L'indicateur d'erreur est déclenché si le nombre aléatoire est supérieur à la probabilité de réception correcte de cette trame. Toutes les erreurs sont ainsi détectées sans l'utilisation directe de

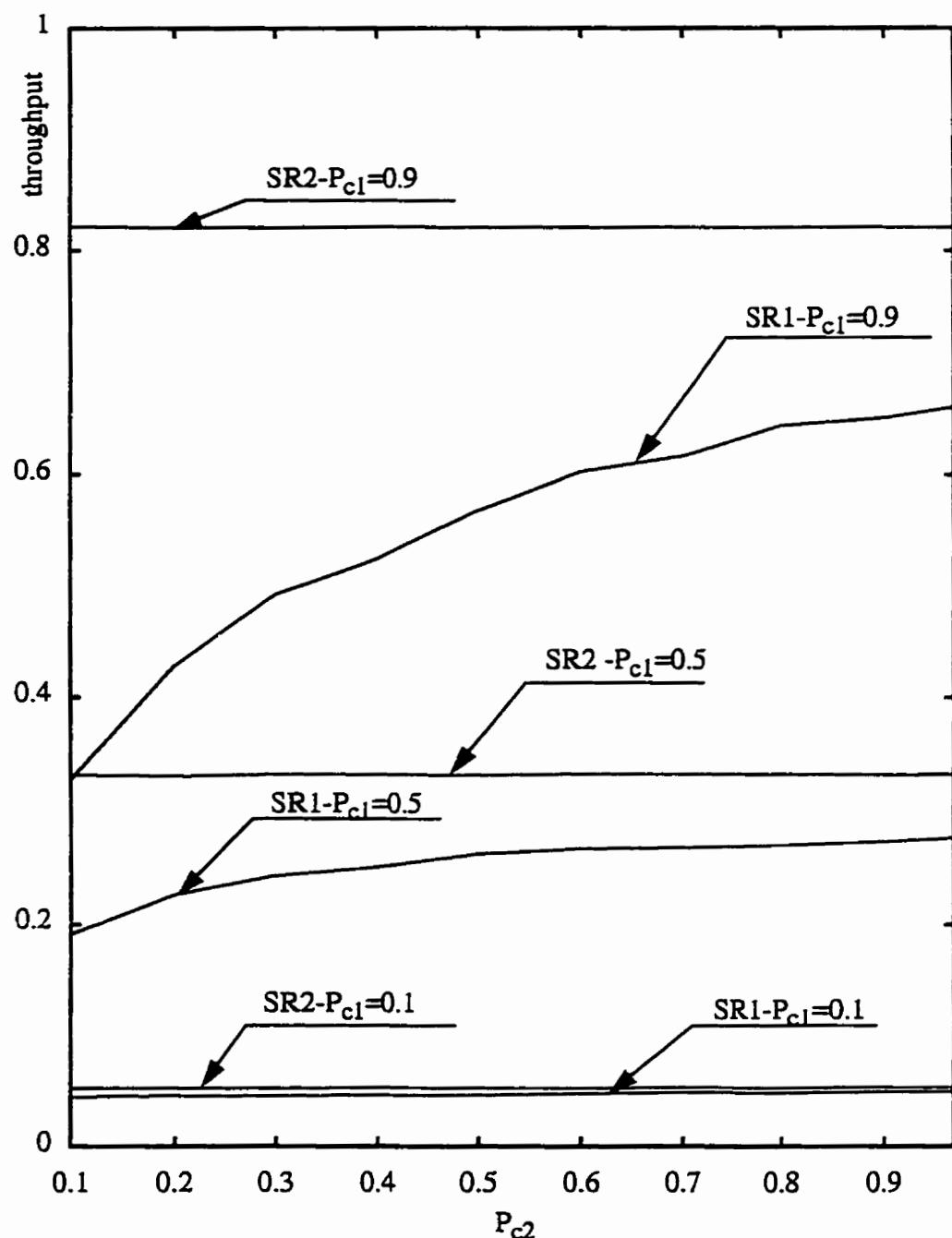


Figure 4.4 Throughput en fonction de  $P_{c2}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=25$ ,  $\Lambda=1$  pour atteindre  $P_{NAK-perdu}$  désirée  $=10^{-11}$ , "BSC". Le tampon du récepteur est supposé de taille infinie.

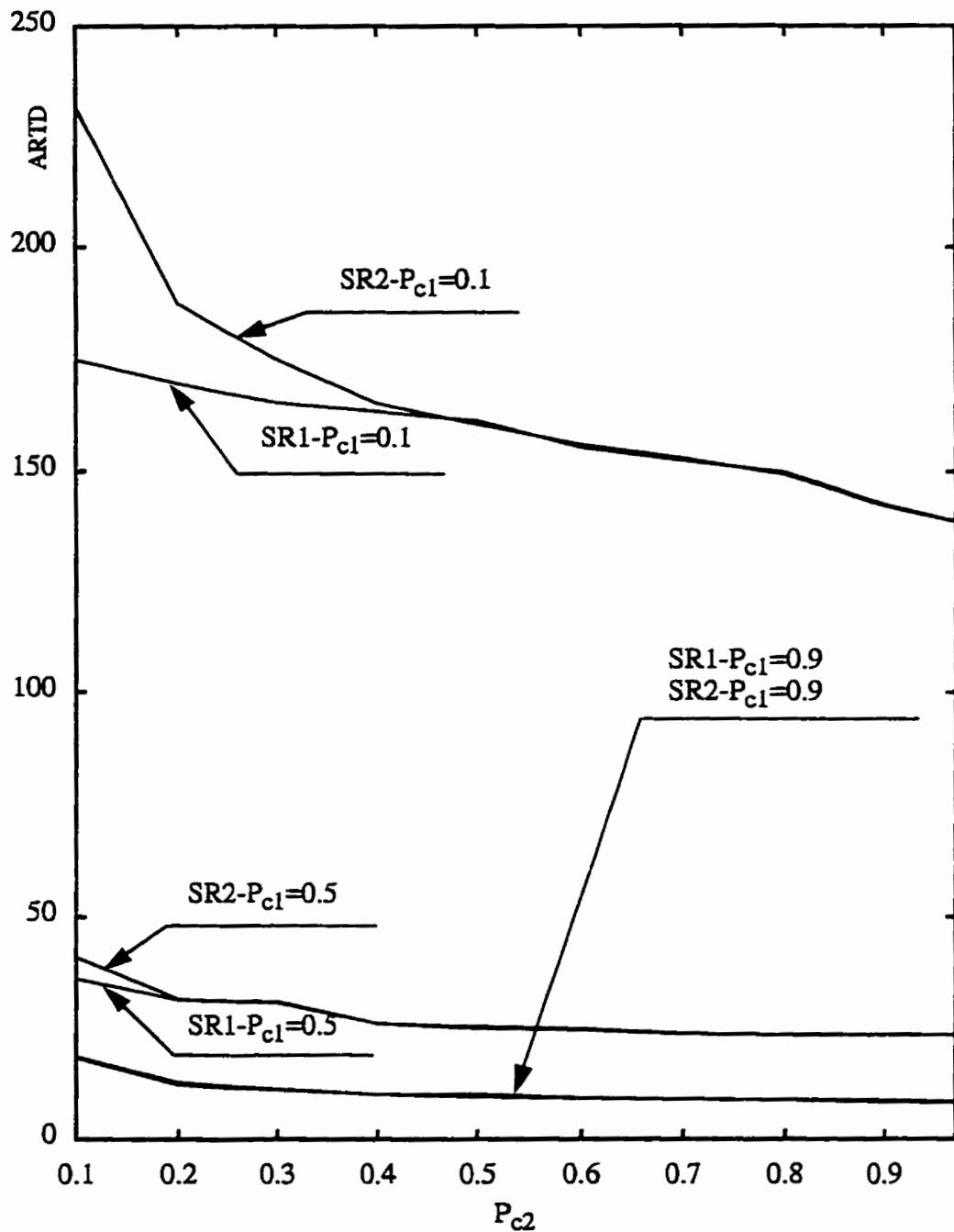


Figure 4.5 ARTD en fonction de  $P_{c2}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=25$ ,  $\Lambda=1$  pour atteindre  $P_{NAK-perdu}$  désirée  $=10^{-11}$ , "BSC". Le tampon du récepteur est de taille infinie.

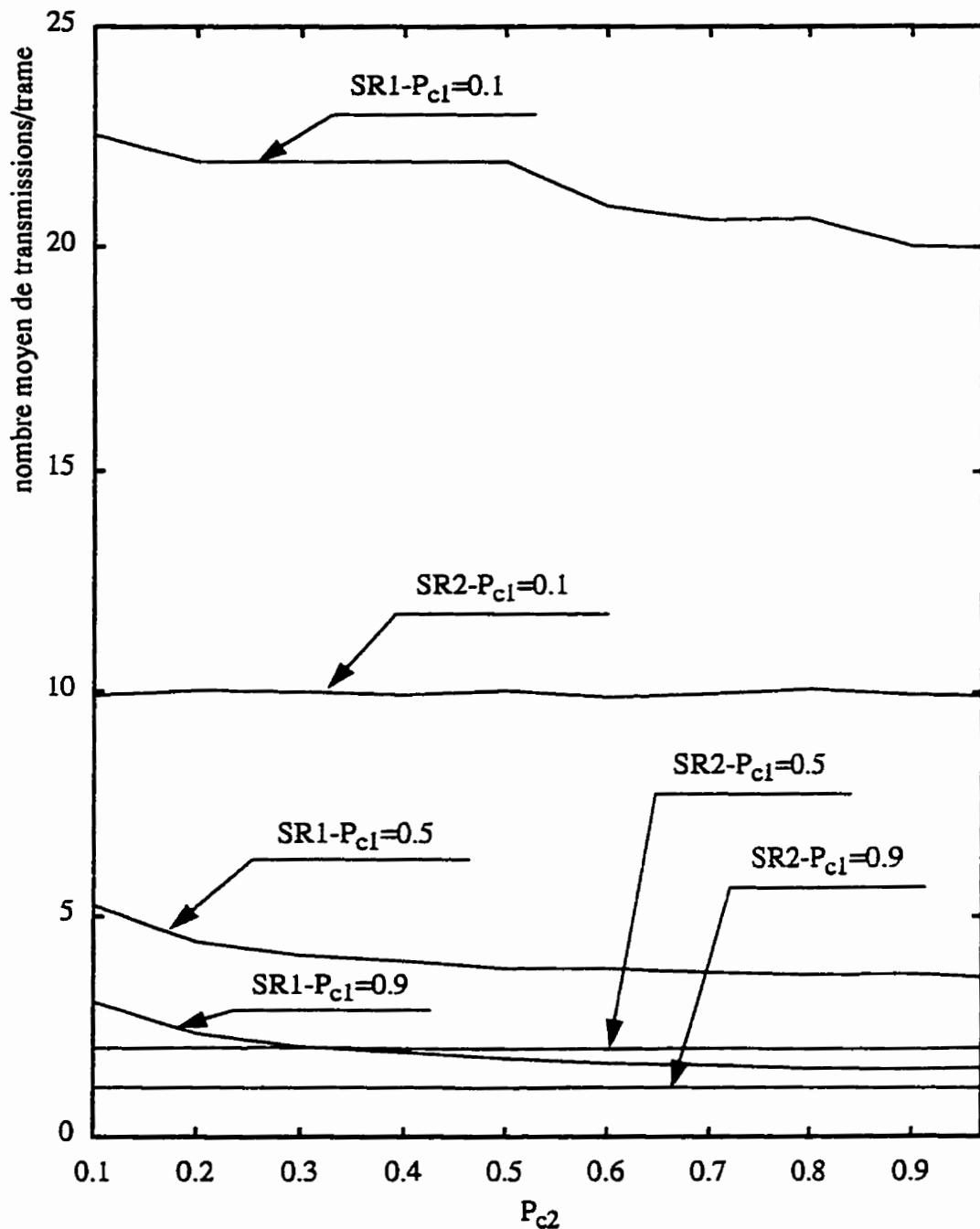


Figure 4.6 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de  $P_{c2}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=25$ ,  $\Lambda=1$  pour atteindre  $P_{NAK-perdu}$  désirée  $=10^{-11}$ , "BSC". Le tampon du récepteur est de taille infinie.

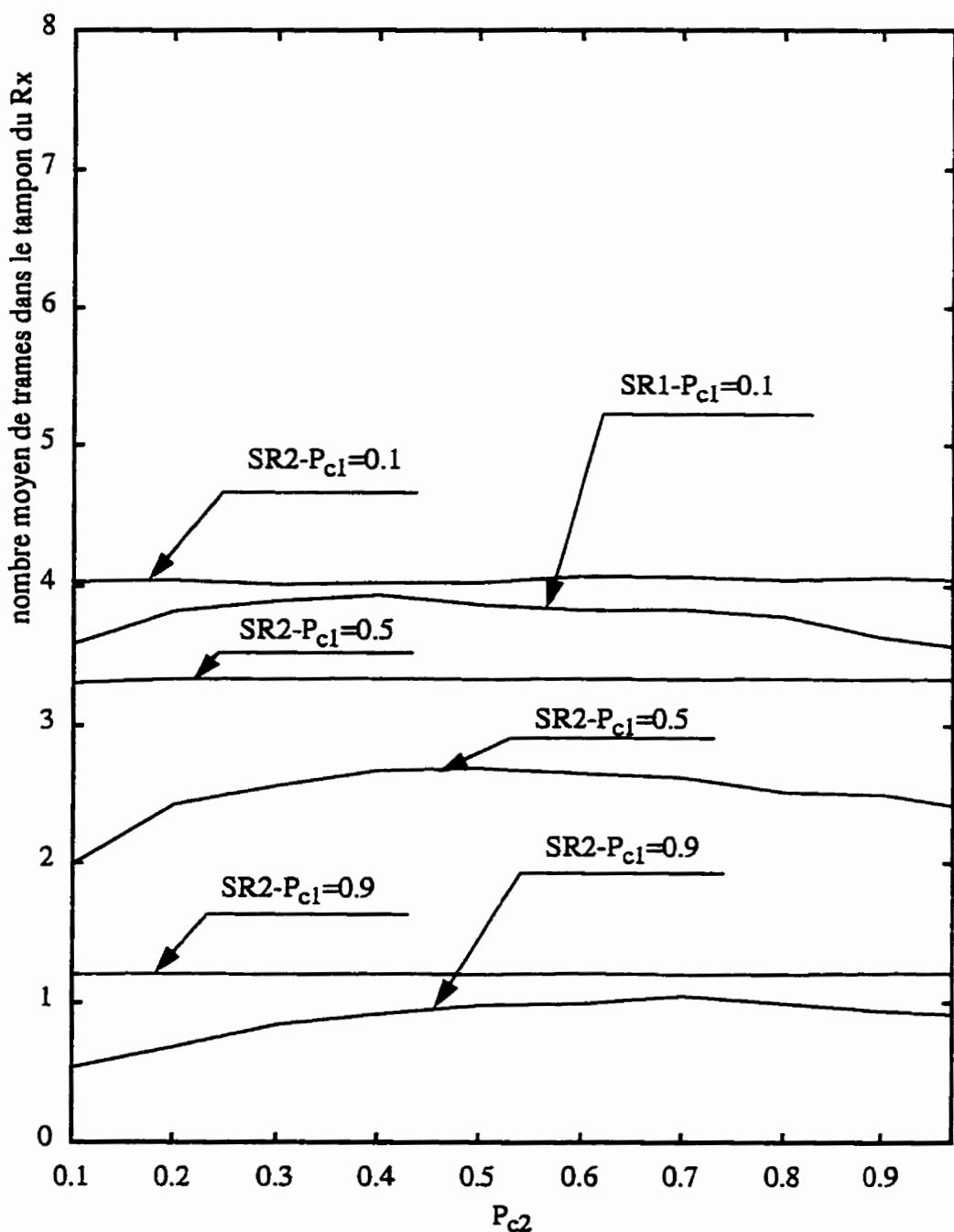


Figure 4.7 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de  $P_{c2}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=25$ ,  $\Lambda=1$  pour atteindre  $P_{NAK-perdu}$  désirée  $=10^{-11}$ , "BSC". Le tampon du récepteur est de taille infinie.

décodage.

#### 4.1.3. Valeurs représentatives

Les simulations pour le protocole SR1 ARQ ont été exécutées pour 10000 réalisations de canaux BSC sur les 10000 trames dont les accusés de réception positifs ont été reçus sans erreur sur le canal de retour. Ceci a été répété pour le protocole SR2 ARQ où le critère a été 10000 trames pour lesquelles une trame de NAKs n'a pas été reçue. De cette façon, les simulations ont été assez longues pour fournir les résultats valides. La longueur de trame est 500 bits ( $\alpha=500$  bits), et la longueur d'un NAK est égale à 25 bits ( $\beta=25$  bits) incluant son adresse et son CRC. La période aller-retour RTD est égale à la durée de 6 trames et le délai de garde pour le protocole SR1 ARQ est égal à la durée de 8 trames. La communication réalisée est du type 'full duplex'.

### 4.2 Définition des paramètres d'évaluation des deux protocoles SR ARQ

Une bonne évaluation d'un système nécessite la considération de l'efficacité de ce système, des limitations de ses applications ainsi que du coût de son implantation. Afin de fournir une telle évaluation des deux protocoles SR ARQ nous allons définir les quatre paramètres suivants:

- throughput
- valeur moyenne de délai aller-retour (en anglais, average round trip delay, ARTD)
- nombre moyen de transmissions par trame
- nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur

Les définitions précises dans la suite de cette section, vont justifier le choix de ces paramètres.

#### 4.2.1 Throughput

Tel que mentionné dans la section 2.3, le throughput est parmi les plus importantes mesure de performance d'un protocole ARQ. La définition du throughput au niveau des bits transmis a été présentée dans la section 2.3. Comme le fonctionnement des deux protocoles SR ARQ dans cette recherche a été réalisé au niveau des trames, il est préférable d'introduire la définition du throughput au niveau des trames. Cette définition du throughput va être utilisée tout au long de ce mémoire.

Le throughput est défini comme la fraction effective des trames délivrées à l'utilisateur par rapport au nombre total des trames transmises. Par conséquent, les simulations ont calculé le throughput comme le rapport des trames pour lesquelles un ACK a été reçu sur le nombre total des trames transmises. La valeur de throughput a été calculée pour chaque réalisation de canal direct et de canal de retour. L'hypothèse de 'full duplex' a imposé que le nombre total des trames transmises pour le protocole SR2 ARQ inclut les trames de NAKs sur le canal de retour.

#### 4.2.2 Valeur moyenne de délai aller-retour, ARTD

Le délai aller-retour RTD représente l'intervalle de temps, exprimé en durée des trames, entre la première émission d'une trame et la réception de son accusé de réception positif (ACK). La mesure de qualité d'une transmission pour chaque réalisation de canal direct et de canal de retour, est donnée par la valeur moyenne de RTD (en anglais, average round trip delay, ARTD) de toutes les trames acceptées au cours de cette transmission. L'hypothèse de 'full duplex' impose que le délai supplémentaire créé par les trames de NAKs soit inclus dans le calcul de la valeur de ARTD pour le protocole SR2 ARQ.

#### 4.2.3 Nombre moyen de transmissions par trame

Cette valeur représente le nombre moyen de transmissions nécessaires par trame,

incluant la transmission initiale, pour chaque réalisation de canal direct et de canal de retour. Le paramètre illustre la taille requise pour le tampon de l'émetteur, sans considérer le nombre maximal de transmissions par trame.

#### 4.2.4 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur

Ce paramètre représente le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur pour chaque réalisation de canal direct et de canal de retour. La valeur de ce paramètre est directement liée à la taille requise du tampon du récepteur.

### 4.3. Évaluation des deux protocoles SR ARQ

Cette section porte sur les performances des deux protocoles SR ARQ sur un canal binaire symétrique. On y présente l'analyse de résultats des simulations pour tous les paramètres d'entrée et de sortie définis dans les sections 4.1 et 4.2 respectivement. Finalement, nous tirerons quelques conclusions concernant la synthèse de tous les résultats.

#### 4.3.1 Analyse de throughput

La figure 4.4 montre la variation du throughput en fonction de  $P_{c2}$ , probabilité qui est définie par les expressions (3.4) et (3.5) pour les protocoles SR1 ARQ et SR2 ARQ respectivement. Dans la même figure la probabilité  $P_{c1}$ , donnée pour les deux protocoles SR ARQ par l'expression (3.3), est constante et prend les valeurs  $P_{c1}=0.1$ ,  $P_{c1}=0.5$  et  $P_{c1}=0.9$ . Les valeurs correspondantes de  $P_{b1}$  d'après l'expression (3.3) sont données dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Probabilités que la trame soit correctement reçue sur le canal direct dont la probabilité d'erreur par bit est  $P_{b1}$ . La trame contient 500 bits.

$P_{c1}$	$P_{b1}$
0.1	4.6e-03
0.5	1.39e-03
0.9	2.11e-04

La figure 4.4 montre que le protocole SR2 ARQ donne un meilleur throughput pour n'importe quel état des canaux BSC avec une amélioration maximale dans le cas où le canal direct est dans un bon état et le canal de retour est très bruité, i.e. pour  $P_{c1}=0.9$  et  $P_{c2}=0.1$ , le protocole SR2 ARQ donne un throughput de 82%, améliorant alors d'une manière remarquable, la valeur de 33% du protocole SR1 ARQ. Cette amélioration maximale est tout à fait justifiée d'un point de vue théorique. Le concept du protocole SR2 ARQ a permis de combattre complètement le bruit sur le canal de retour au prix d'un overhead supplémentaire des trames de NAKs, mais cependant, il n'a pas réussi à diminuer le bruit sur le canal direct. Les résultats montrent que l'élimination des retransmissions inutiles dans le protocole SR2 ARQ l'emporte sur un overhead supplémentaire des trames de NAKs qui est inclus en calculant le throughput pour le protocole SR2 ARQ.

Il est évident que le throughput pour le protocole SR1 ARQ est une fonction croissante avec l'amélioration du canal de retour. Cependant, le throughput pour le protocole SR2 ARQ est constant. Les résultats montrent que le nombre de trames de NAKs ( $\Lambda$ ) est aussi constant dans l'intervalle de valeurs  $P_{c2}$  considéré. Pour toutes les valeurs de  $P_{c2}$  dans la figure 4.4, il suffit de transmettre  $\Lambda=1$  trame de NAKs pour garantir la probabilité  $P_{NAKperdu}$  désirée= $10^{-11}$ . Par conséquent, en considérant que  $\Lambda$  prend la même valeur pour tous les états de canal de retour dans la figure 4.4, le throughput du protocole SR2 ARQ ne dépend que de l'état de canal direct.

Un cas intéressant pour une analyse théorique est lorsque la transmission sur le canal direct est sans erreur ( $P_{c1}=1.0$ ). Aucune transmission de NAK n'est déclenchée dans le protocole SR2 ARQ et comme le mécanisme de time-out n'est pas mis en oeuvre, le protocole fournit un throughput de 100%. Cette valeur de throughput pour le protocole SR1 ARQ n'est atteinte que pour  $P_{c1}=1.0$  et  $P_{c2}=1.0$ . L'imperfection du canal de retour active le mécanisme de time-out et les retransmissions inutiles diminuent alors le throughput.

#### 4.3.2 Analyse de ARTD

La figure 4.5 illustre le ARTD des deux protocoles en fonction de  $P_{c2}$  pour  $P_{c1}$  fixe, où  $P_{c2}$  et  $P_{c1}$  sont données par les expressions 3.3 et 3.4 respectivement. Pour respecter la transmission 'full duplex', le ARTD pour le protocole SR2 ARQ a été calculé en tenant compte du délai supplémentaire provoqué par les trames de NAKs sur le canal de retour.

La figure 4.5 montre qu'en général, les deux protocoles SR ARQ rendent approximativement le même ARTD sauf quand les deux canaux, le canal direct et le canal de retour, sont très bruités. Dans ce cas, l'overhead de trames de NAKs devient très grand, il en résulte un ARTD plus élevé pour le protocole SR2 ARQ que pour le protocole SR1 ARQ.

Pour les deux protocoles SR ARQ le ARTD est une fonction décroissante lorsque  $P_{c2}$  augmente et les valeurs les plus élevées sont atteintes quand le canal direct est très bruité. Il est clair qu'à propos du délai de transmission, le nouveau protocole SR2 ARQ n'introduit aucune amélioration, mais non plus aucune dégradation.

#### 4.3.3. Analyse du nombre moyen de transmissions par trame

La figure 4.6 démontre que pour tous les états des canaux BSC, le nouveau protocole SR2 ARQ demande en moyenne moins de transmissions par trame que le protocole SR1 ARQ. Ceci entraîne une réduction de la taille requise du tampon de l'émetteur.

#### 4.3.4 Analyse du nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur

La figure 4.7 montre le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de  $P_{c2}$  pour  $P_{c1}$  fixe, où ces deux probabilités sont définies dans la section 4.3.1. La figure 4.7 montre que le tamponnage du récepteur, ainsi exprimé, est une constante pour le protocole SR2 ARQ mais croît légèrement avant de se stabiliser et de décroître légèrement pour le protocole SR1 ARQ.

Dans le protocole SR1 ARQ les trames sont stockées dans le tampon du récepteur en attendant la réception correcte d'une trame précédemment reçue en erreur. Par conséquent, le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur ne dépend que du succès et du délai des demandes de retransmission. Tant que  $\Lambda$  est constant, ce nombre de trames pour le protocole SR2 ARQ sera indépendant de  $P_{c2}$  puisque les demandes de retransmission sont virtuellement toujours reçues sans erreur dans le protocole SR2 ARQ.

Dans le protocole SR1 ARQ, le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur dépend du succès et du délai de demande de retransmission [13]. Ainsi, l'exigence de tamponnage au récepteur varie pour  $P_{c1}$  fixe, d'après  $P_{c2}$  et le processus de time-out. Comme  $P_{c2}$  décroît d'une valeur élevée, proche de 0.99, le délai de demande de retransmission augmente, augmentant aussi le nombre de trames dans le tampon. À mesure que  $P_{c2}$  continue de décroître, le mécanisme de time-out devient de plus en plus dominant et le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur diminue légèrement. La valeur de le délai de garde peut ainsi déterminer la forme de cette diminution.

La figure 4.7 illustre clairement la supériorité du protocole SR1 ARQ au niveau de la mémoire nécessaire au récepteur pour tous les états des canaux BSC. Ceci représente le seul inconvénient du protocole SR2 ARQ. Toutefois, l'inconvénient est très petit et indépendant de  $P_{c2}$  lorsque  $\Lambda$  est constant. Etant donné que la mémoire n'est pas coûteuse, cet inconvénient peut être considéré comme étant négligeable.

#### 4.4 Paramètres d'expérimentation pour les communications par satellites

La troisième génération des systèmes mobiles devra supporter des communications dans tous les domaines. Ces systèmes de la troisième génération intégreront les services présentement disponibles tels que les services cellulaires, sans fil, les services par satellites pour les régions rurales et les réseaux de données mobiles. Un problème important est de déterminer le rôle des réseaux de satellites dans une telle intégration [12]. Les satellites couvrent de grands territoires géographiques, atteignent les usagers largement dispersés et procurent des services de radiodiffusion. Ces capacités attrayantes des satellites peuvent compléter et agrandir les capacités des réseaux terrestres.

L'importance énorme des systèmes de satellites actuels, leur développement et leur intégration avec les systèmes terrestres ont influencé le cadre de notre recherche. Dans la suite de ce chapitre nous allons évaluer les performances des deux protocoles SR ARQ dans les communications par satellites. Afin de définir les paramètres de cette expérimentation, nous allons présenter les notions de base des différents types de satellites.

Les satellites sur orbites à basse altitude (en anglais, low earth orbit ou LEO) exploitent une orbite à une altitude inférieure à 1500 km. Ils ont l'avantage d'avoir une faible intensité de radiation et un petit délai de propagation du signal [19]. Cependant, ils possèdent les cycles d'éclipse fréquents et ils sont groupés dans de nombreuses constellations. En plus, leur couverture de faisceau change rapidement.

Les satellites sur orbites d'altitude moyenne (en anglais, medium earth orbit ou MEO) peuvent couvrir une grande partie de la Terre au cours de 6-8 h [19]. Par conséquent, un petit nombre de satellites est requis pour une couverture globale. L'altitude d'un satellite MEO est d'environ 10000 km et par conséquent l'atténuation de propagation est supérieure à celle

du LEO.

Les satellites sur orbites géostationnaires (en anglais, geostationary orbit ou GEO) sont stationnaires par rapport à la Terre. Seulement trois satellites à une altitude de 36000 km peuvent couvrir l'entièvre surface de la Terre. Cependant, une très grande atténuation de propagation est présente et la complexité des satellites est élevée [19].

La grande variété et la complexité des communications par satellites rend difficile à établir un modèle acceptable pour les simulations. Par conséquent, dans la suite de la section 4.4 nous allons introduire quelques hypothèses simplificatrices. Puis, tous les paramètres du modèle final sont définis.

#### 4.4. 1 Choix du type de communication

Comme le sujet de notre recherche est lié au contrôle des erreurs, on considère deux types de communication:

- type 1: l'usager communique avec un autre usager via satellite où le contrôle d'erreurs est effectué à bord du satellite
- type 2: l'usager communique avec un autre usager via satellite où le contrôle des erreurs est effectué au niveau des usagers le satellite ne servant que d'intermédiaire.

Il faut ajouter à ceci que les usagers peuvent être mobiles ou immobiles. En plus, la couverture des satellites LEO et MEO change au cours du temps. Pour ces raisons, on a décidé d'accepter le modèle illustré à la figure 4.8. Ce modèle correspond au premier type de communication dans lequel un usager est mobile et l'autre est fixe et la communication entre eux est du type duplex. Supposant que le satellite effectue le contrôle des erreurs, on peut alors considérer la communication entre le satellite et un des usagers. En supposant que la durée de transmission est de quelques minutes et que la vitesse du mobile est d'environ 100 km/h, on constate dans une première approximation, que la position de l'usager mobile ainsi que la position du satellite ne changent pas au cours d'une transmission. Il est évident que cette hypo-

thèse est très judicieuse pour un satellite du type GEO, mais l'est moins pour un satellite de type MEO et moins valable pour un satellite de type LEO.

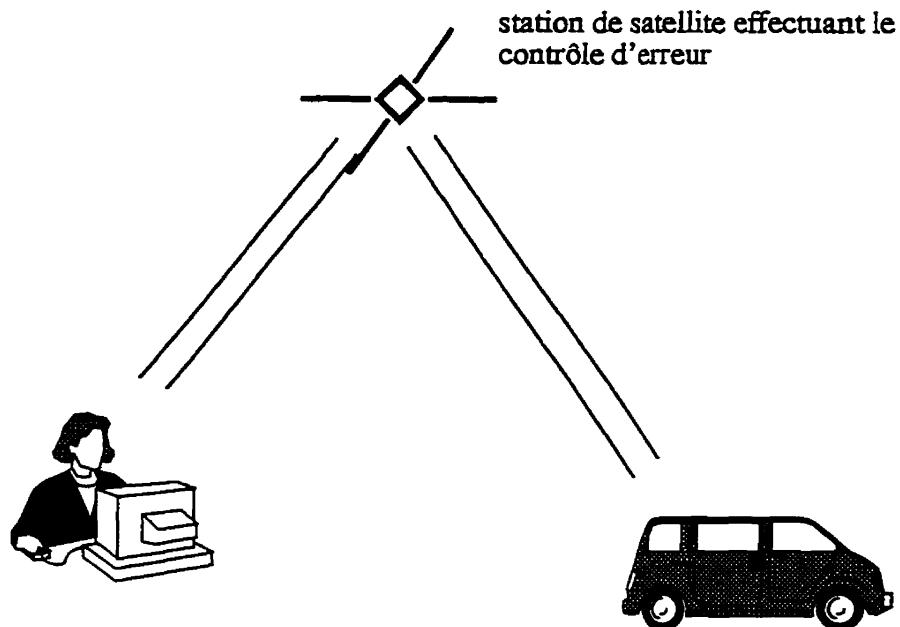


Figure 4.8 Communication usager - satellite - usager du type duplex.

#### 4.4.2 Choix du canal

Un lien de transmission par satellite est différent d'un lien terrestre en ce qui concerne le délai de transmission et la distribution du bruit [10]. Le délai de transmission dépend de l'altitude du satellite mais la distribution du bruit est plus complexe. En considérant l'hypothèse introduite dans la section 4.1, un canal satellite utilisé pour la transmission de données peut être modélisé comme un canal discret Gaussien sans mémoire à la condition qu'on a une propagation en espace libre. En d'autres termes, la trajectoire fixe du signal de la figure 4.8 n'est pas cachée par des obstacles (arbres, de végétation, immeubles). Si le canal satellite est modélisé comme un canal binaire symétrique, alors la probabilité d'erreur par bit  $P_b$  est typi-

quement inférieure à  $10^{-2}$  [10].

D'autre part, un canal satellite peut aussi être modélisé comme un canal à évanouissements pour des raisons qui sont présentées au chapitre 5. Tel que déjà mentionné dans la section 4.1.1, les simulations sont plus longues et plus complexes. Toutefois, ces simulations procurent des résultats plus précis, surtout pour les satellites de types LEO et MEO.

#### 4.4.3 Choix du code

Les processus de codage et de décodage ne sont pas exécutés explicitement dans les simulations des deux protocoles SR ARQ où l'émetteur et le récepteur correspondent au satellite et à un des usagers dans la figure 4.8. Le modèle simulé présente donc une synthèse du modèle dans la figure 4.3 et du modèle dans la figure 4.8.

La génération d'erreurs est simulée de façon décrite dans la section 4.1.2 et on suppose une détection d'erreur parfaite.

#### 4.4.4 Valeurs représentatives

En modélisant le canal de transmission comme un canal binaire symétrique, la différence entre les simulations des deux protocoles SR ARQ dans les communications terrestres et par satellites, est le délai de transmission. Dans toutes nos simulations, le délai de transmission est exprimé en durée de trames. Par conséquent, la valeur numérique du délai dépend de l'altitude du satellite et du débit de transmission. En supposant une altitude de satellite égale à 1200km et un débit de transmission égal à 1.54 Mbit/sec, on peut dire qu'au cours de 4 msec de propagation du signal, l'émetteur transmet 12.32 trames chacune de 500 bits. La période aller-retour RTD est alors égale à la durée de 24 trames. De plus, il faut ajouter le RTD pour les communications terrestres lequel est provoqué par le traitement du signal. Sa valeur, égale à la durée de 6 trames, a été définie dans la section 4.1.3. Par conséquent, la période totale de

RTD est égale à la durée de 30 trames et de là, le délai de garde pour le protocole SR1 ARQ a été ajusté à la durée de 40 trames.

Dans la suite de ce chapitre, on ne présente que les résultats de simulations dans lesquelles la période de RTD est égale à une durée de 30 trames. Ces résultats peuvent aussi correspondre à un satellite du type GEO si le débit de transmission est de 64 Kbit/sec.

#### **4.4.5 Méthode de simulation**

Les simulations pour les deux protocoles SR ARQ ont été exécutées pour 10000 réalisations des canaux BSC sur les 10000 trames dont les accusés de réception positifs ont été reçus sans erreur. La longueur de trame est 500 bits ( $\alpha=500$  bits), et la longueur d'un NAK incluant son adresse et son CRC est égale à 25 bits ( $\beta=25$  bits). Un résultat est alors considéré fiable si toutes les hypothèses dans la section 4.4 sont vérifiées.

### **4.5. Définition des paramètres d'évaluation des deux protocoles SR ARQ**

L'analogie entre les modèles des protocoles SR ARQ dans les communications terrestres et par satellites, nous a permis de prendre les mêmes paramètres d'évaluation pour les deux types de communications. La liste de ces paramètres et leurs définitions se trouvent dans la section 4.2.

### **4.6 Évaluation des deux protocoles SR ARQ**

Les performances des deux protocoles SR ARQ dans les communications par satellites sont ici évaluées. Une forte ressemblance entre les résultats de simulations avec les paramètres d'applications terrestres et par satellites a influencé notre analyse.

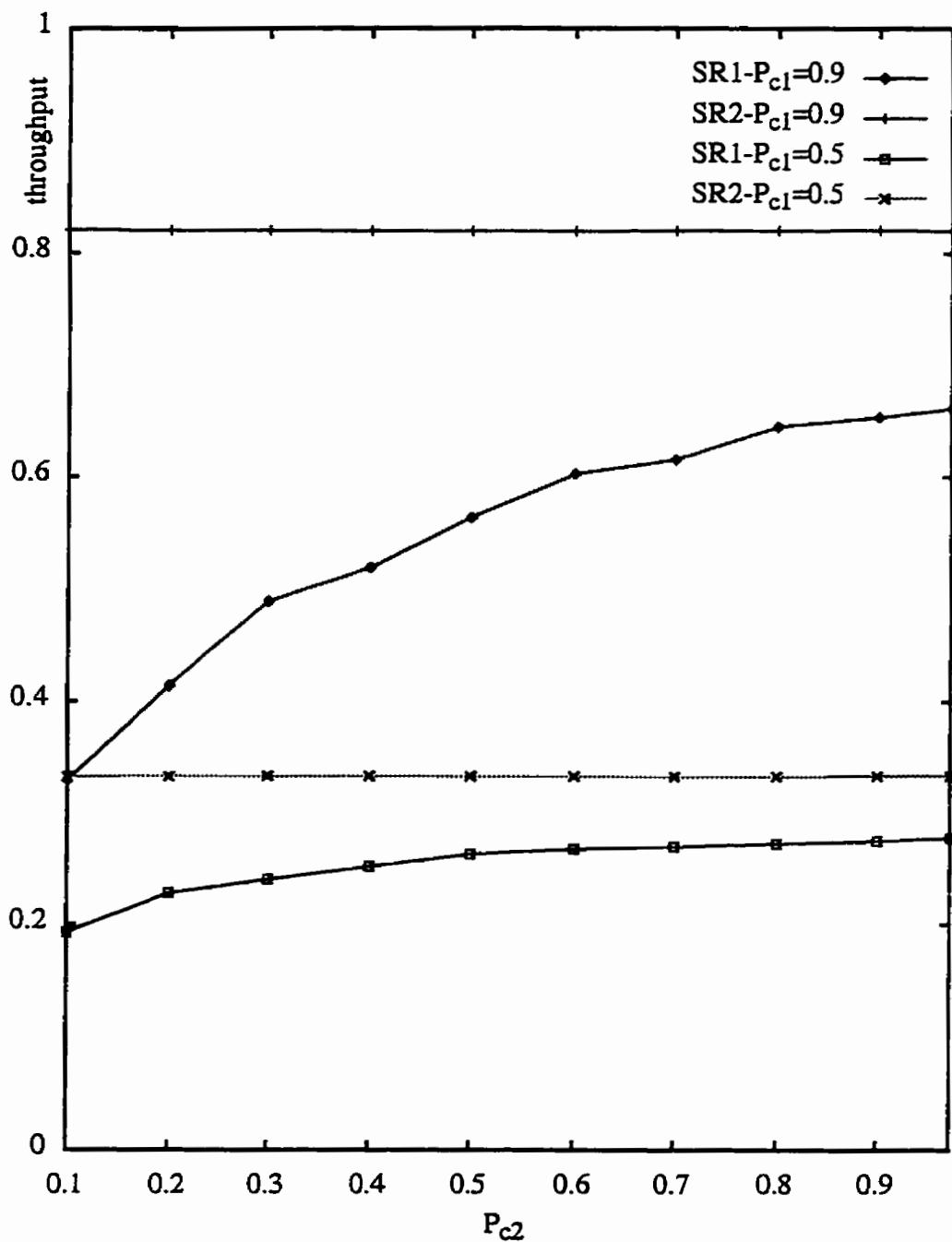


Figure 4.9 Throughput en fonction de  $P_{c2}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=25$ ,  $\Lambda=1$  pour atteindre  $P_{NAK\text{-perdu}}$  désirée  $=10^{-11}$ , "BSC", RTD=durée de 30 trames. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

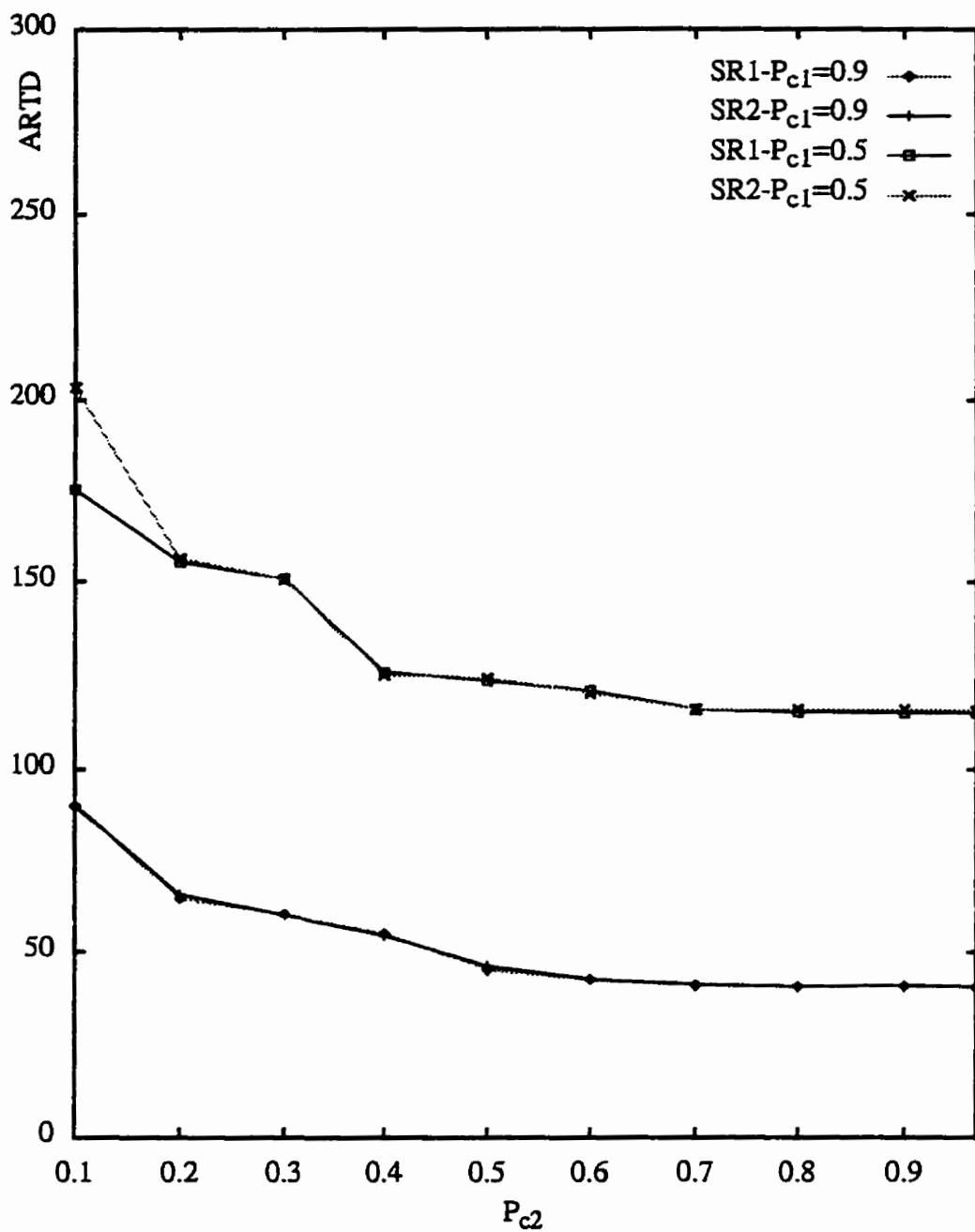


Figure 4.10 ARTD en fonction de  $P_{c2}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=25$ ,  $\Lambda=1$  pour atteindre  $P_{NAK-perdu}$  désirée  $=10^{-11}$ , "BSC", RTD=durée de 30 trames. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

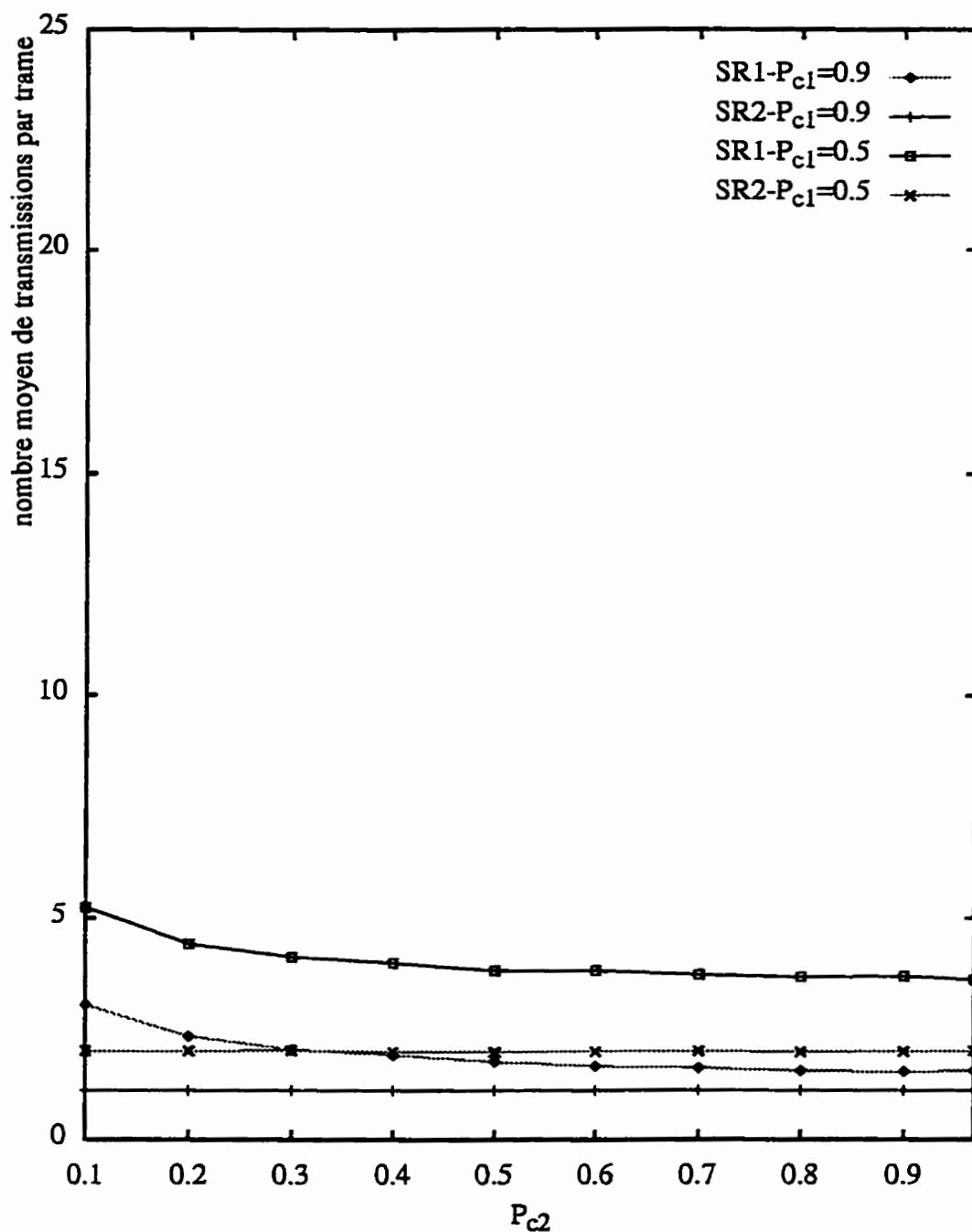


Figure 4.11 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de  $P_{c2}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=25$ ,  $\Lambda=1$  pour atteindre  $P_{NAK\text{-perdu}}$  désirée  $=10^{-11}$ , "BSC", RTD=durée de 30 trames. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

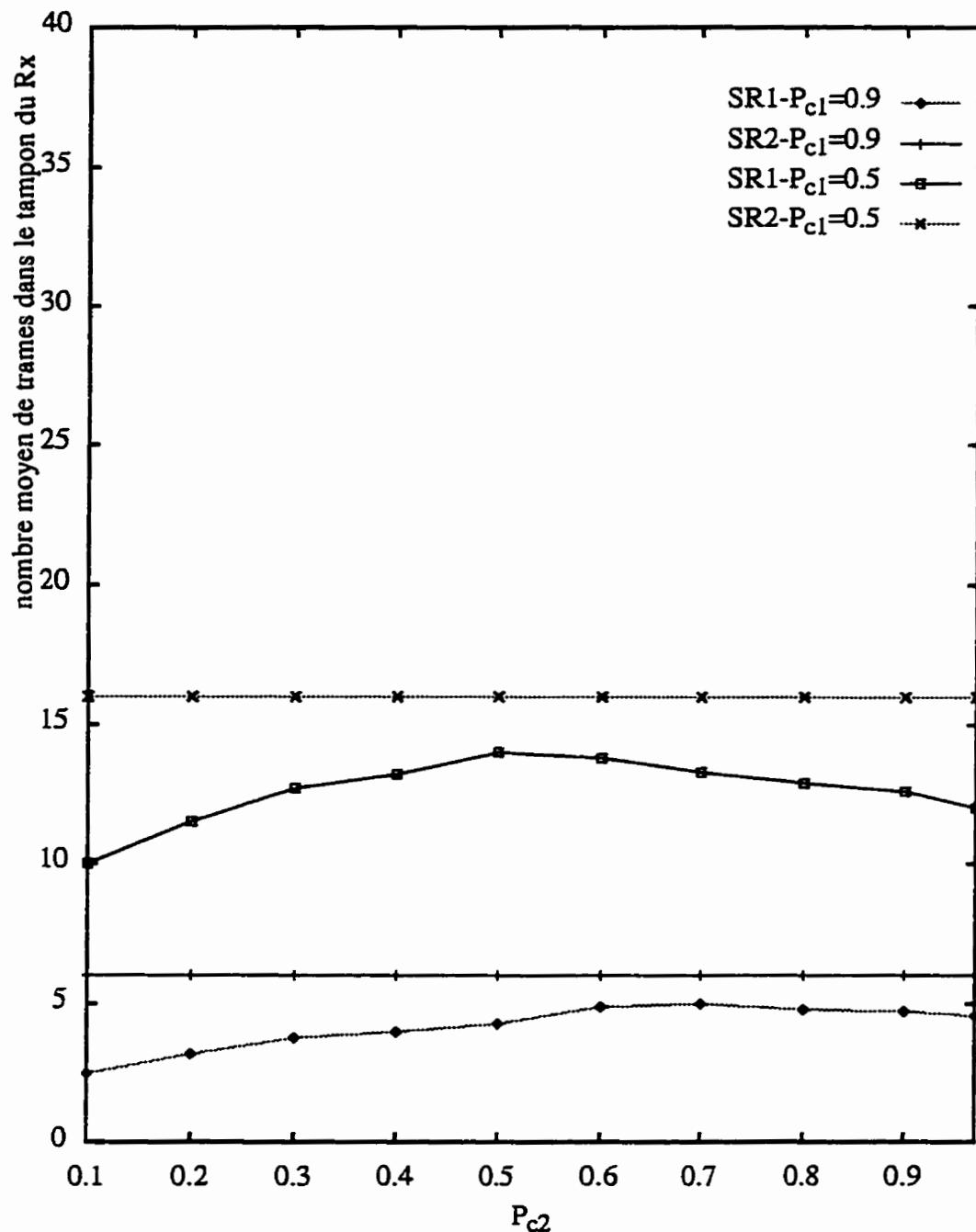


Figure 4.12 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de  $P_{c2}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=25$ ,  $\Lambda=1$  pour atteindre  $P_{NAK-perdu}$  désirée  $=10^{-11}$ , "BSC", RTD=durée de 30 trames. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

#### 4.6.1 Analyse de throughput

La figure 4.9 schématise le throughput pour les communications par satellites où le RTD est égal à une durée de 30 trames. La figure illustre que ces résultats sont presque identiques aux résultats des communications terrestres de la figure 4.4. On conclut alors que le throughput ne change pas avec la variation de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Cette notion est conforme à l'analyse du throughput de protocole standard SR ARQ qui a été formulée dans la section 2.2. Bien que cette analyse soit basée sur l'hypothèse que le canal de retour est sans erreur, le throughput ainsi évalué ne dépend pas du RTD. En introduisant un canal de retour bruité, on change l'état du canal, mais ceci ne peut pas provoquer une dépendance du throughput sur le RTD.

Comme les résultats du throughput sont indépendants de la distance entre l'émetteur et le récepteur, toutes les remarques de la section 4.2.1 sont valides pour une analyse de throughput d'un système de satellite quelconque. Ainsi, le nouveau protocole SR2 ARQ a donné lieu à une amélioration significative du throughput dans toutes les communications par satellites, surtout dans le cas où le canal de retour est bruité.

#### 4.6.2 Analyse de ARTD

La figure 4.10 montre que le ARTD est approximativement le même pour les deux protocoles SR ARQ quelle que soit la distance entre l'émetteur et le récepteur et quels que soient les états des canaux de transmission. Une petite différence existe dans le cas où le canal direct est relativement bruité et le canal de retour est très bruité. Comme l'overhead de trames de NAKs devient élevé pour ce cas, le ARTD du protocole SR2 ARQ est un peu plus élevé que le ARTD du protocole SR1 ARQ.

En comparant les figures 4.10 et 4.5, on conclut que le délai ARTD pour les deux protocoles SR ARQ augmente rapidement avec l'augmentation de la distance entre l'émetteur et

le récepteur. Par contre, le délai ARTD décroît légèrement avec l'amélioration d'état du canal de retour. En général, le protocole SR2 ARQ ne diminue pas et n'augmente pas le délai de transmission par rapport au protocole SR1 ARQ.

#### 4.6.3 Analyse du nombre moyen de transmissions par trame

En examinant les figures 4.11 et 4.6 on remarque que le nombre moyen de transmissions par trame ne varie pas avec la distance entre l'émetteur et le récepteur, et cela pour le protocole SR1 ARQ et le protocole SR2 ARQ. Ce résultat est conforme avec le fait que le throughput est indépendant de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Par conséquent, les notions de la section 4.2.3 sont correctes pour l'analyse du nombre moyen de transmissions par trame pour tous les systèmes de satellites.

Le protocole SR2 ARQ tend alors à réduire la mémoire requise à l'émetteur dans toutes les communications par satellites.

#### 4.6.4 Analyse du nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur

En examinant attentivement les figures 4.7 et 4.12, trois constats s'imposent. Premièrement, le protocole SR2 ARQ nécessite en moyenne plus de mémoire pour le récepteur que le protocole SR1 ARQ. Deuxièmement, les courbes correspondant au nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur du protocole SR2 ARQ sont toujours constantes. Troisièmement, les courbes qui illustrent le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur du protocole SR1 ARQ sont toujours des fonctions croissantes quand le canal de retour est très bruité, puis elles deviennent constantes avec l'amélioration de l'état du canal direct et finalement elles décroissent légèrement lorsque le canal direct devient presque parfait. Ces trois remarques sont aussi valides pour les résultats des systèmes terrestres, présentées dans la section 4.3.4.

En regardant les figures 4.7 et 4.12, on s'aperçoit que la forme des courbes pour les deux protocoles SR ARQ reste la même lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur augmente. Cependant, les valeurs présentées par les courbes sont plus élevées pour les résul-

tats du système de satellite que pour le système terrestre. En plus, on remarque que pour le protocole SR1 ARQ, les états de canaux de transmission déterminent la variation relative du nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur. Toutefois, la distance entre l'émetteur et le récepteur détermine principalement la taille du tampon du récepteur pour les deux protocoles SR ARQ.

Les résultats obtenus pour satellites dans la figure 4.12 indiquent que le nouveau protocole SR2 ARQ exige que le tampon du récepteur soit au maximum deux fois plus grand que celui exigé par le protocole SR1 ARQ. Etant donné que la mémoire au récepteur n'est pas coûteuse, cet inconvénient est très acceptable.

#### **4.7 Comparaison des deux protocoles et conclusions**

Le gain procuré par le nouveau protocole SR2 ARQ est illustré par une augmentation du throughput. Cette augmentation est maximale si le canal direct est dans un bon état et le canal de retour est très bruité. En plus, le protocole SR2 ARQ permet une réduction du nombre moyen de transmissions par trame, ce qui conduit à un plus petit tampon de l'émetteur. Les résultats des simulations sur les canaux BSC révèlent un seul inconvénient du nouveau protocole: une augmentation de la taille du tampon du récepteur.

Les résultats sur les canaux BSC pour des satellites en orbites basses, moyennes et géostationnaires, maintiennent le gain du nouveau protocole aux niveaux du throughput et du nombre moyen de transmissions par trame. Toutefois, une mémoire plus élevée est exigée au récepteur et le délai aller-retour est très grand. Cependant on peut accepter une telle situation pour deux raisons. Premièrement, la mémoire supplémentaire du récepteur est facile à mettre en oeuvre. Deuxièmement, un délai aller retour également élevé pour le protocole SR1 ARQ, est la conséquence inévitable des grandes distances.

# CHAPITRE 5

## ÉVALUATION DES DEUX PROTOCOLES SR ARQ

### DANS UN CANAL À ÉVANOUISSEMENTS

Ce chapitre porte sur les performances des deux protocoles SR ARQ dans un canal à évanouissements. En même temps, ce chapitre détermine la sensibilité des performances des deux protocoles sur les différents paramètres du canal à évanouissements présentés dans la section 5.1. L'introduction de certaines hypothèses focalise notre recherche sur la comparaison des performances du nouveau protocole SR2 ARQ par rapport au protocole SR1 ARQ standard.

De plus, ce chapitre tend à étendre la documentation sur tous les protocoles ARQ. Nous avons déjà mentionné que les méthodes d'évaluation des performances d'un protocole ARQ deviennent plus complexes en supposant un canal de retour bruité. Cette difficulté devient encore plus importante lorsque le taux d'erreur dans le canal de transmission varie dans le temps comme c'est le cas dans un canal à évanouissements. Par conséquent, la comparaison des performances pour les protocoles de base ARQ n'est pas disponible [9]. Il en résulte que l'approche typique pour offrir le service de données dans un tel canal est d'améliorer la qualité du canal par d'autres moyens avant qu'un protocole ARQ soit appliqué [9]. Quelques auteurs ont considéré une combinaison de FEC (en anglais, *forward error correction*), d'entrelacement et du ARQ afin de réaliser des communications de données fiables dans un canal à évanouissements, au prix d'un taux de codage plus faible et d'une complexité plus importante [11], [24].

Certains auteurs ont envisagé un canal de retour bruité [11] [26] sans considérer l'ef-

fet d'évanouissements, correlés dans le temps, (en anglais, *time correlated fading*) dans les deux directions d'une communication bidirectionnelle. Par conséquent, ces résultats de throughput ne peuvent pas être appliqués sur un canal numérique radio portatif où les deux directions dans une communication bidirectionnelle sont atténuées par les évanouissements.

Toutefois, il existe des travaux évaluant les performances des protocoles go-back-N ARQ et SR ARQ standards dans un canal à évanouissements [9], [7]. L'objectif de notre travail, dans ce chapitre, est de d'évaluer les performances du nouveau protocole SR2 ARQ dans un tel environnement. Lorsque cette évaluation est directement présentée par rapport au protocole SR ARQ standard, nous allons utiliser certains résultats antérieurs.

La première section de ce chapitre porte sur les notions de base d'un canal à évanouissements. Tous les paramètres d'expérimentation pour les communications terrestres sont présentés à la section 5.2. Tous les simulateurs utilisés pour l'évaluation des deux protocoles SR ARQ pour les différents canaux à évanouissements sont vérifiés dans la section 5.3. La section 5.4 porte sur cette évaluation, en mettant l'accent sur la sensibilité des performances par rapport aux paramètres d'évanouissements. Les deux protocoles ont été ensuite simulés dans les conditions des applications par satellites. Les paramètres de cette expérimentation sont établis dans la section 5.5. La section 5.6 présente l'évaluation des performances des deux protocoles basée sur les résultats obtenus pour les communications par satellites, lorsque le canal de transmission est un canal à évanouissements. Finalement, la section 5.7 porte sur les conclusions de ce chapitre.

## 5.1 Canal à évanouissements

Une caractéristique typique des canaux à évanouissements est une réponse impulsionnelle aléatoire et variable dans le temps. Si la transmission entre des usagers est effectuée par une onde électromagnétique dont les chemins de propagation varient de façon aléatoire, le canal est un canal dispersif [15]. Le canal radio mobile est un bon exemple d'un canal disper-

sif lorsque les chemins suivis par l'onde sont composés de multiples réflexions et réfractions avant d'atteindre le mobile ou une station fixe. La variation de ces chemins dans le temps est presque imprévisible, considérant qu'au moins l'un des usagers est mobile [18].

Dans la classe des canaux dispersifs, il existe un ensemble de sousclasses. En supposant qu'il n'y ait qu'un chemin de ligne en vue directe et que le reste des composantes reçues forme une somme de processus aléatoires indépendants et identiquement distribués, alors le signal reçu suit une loi gaussienne complexe ou une loi de Rice [18]. Ainsi, les canaux à évanouissements de Rice représentent la sousclasse la plus importante de canaux dispersifs. Un cas particulier du canal de Rice est le canal d'évanouissements de Rayleigh. Dans ce canal, la ligne en vue directe n'est pas présente et l'amplitude du signal reçu suit une loi de Rayleigh.

L'analyse du signal reçu dans un canal d'évanouissements est très complexe. Les principaux facteurs déterminant cette analyse sont [15]:

- le type de terrain (urbain, rural, forestier...)
- l'état des usagers (distance, vitesse et orientation)
- les antennes utilisées
- la fréquence d'opération.

Le chemin de propagation du signal dépend du type de terrain. La ligne en vue directe entre les usagers est très possible en banlieue. Par contre, en milieu urbain, pour les communications radio mobiles, le signal direct n'atteint presque jamais le récepteur. De plus, la propagation du signal est influencée par la hauteur d'antenne, par le vallonnement du terrain, par la présence d'une montagne ou des arêtes et des autres éléments du milieu urbain, suburbain et rural [4].

Typiquement, une fois que le système de communication est spécifié (type d'antennes, milieu de propagation, largeur de bande de propagation,...) les trois paramètres variables utiles se ramènent à [15]:

- fréquence Doppler du canal

- rapport entre l'énergie de la composante en ligne de vue du signal et l'énergie de sa composante diffusée

- rapport signal à bruit.

Dans la suite de cette section, nous allons définir la fréquence Doppler du canal, le type d'évanouissements avec lequel on peut déterminer le rapport entre l'énergie de la composante en ligne de vue du signal et l'énergie de sa composante diffusé et la plage pertinente des rapports signal à bruit. Ces paramètres sont ensuite utilisés pour modéliser les deux protocoles SR ARQ dans les canaux à évanouissements.

### 5.1.1 Fréquence Doppler $f_D$ du canal

Dans un canal à évanouissements la fréquence reçue n'est pas égale à la fréquence d'opération. Le mouvement des usagers ajoute un déplacement Doppler à la fréquence reçue. Le déplacement Doppler  $f_{Dn}$  existe pour chaque  $n^{\text{ième}}$  onde reçue et il s'exprime par

$$f_{Dn} = \frac{V_m}{\lambda} \cdot \cos(\beta_n) \quad (5.1)$$

$V_m$  correspond à la vitesse du véhicule, la longueur d'onde est représentée par  $\lambda$ , et l'orientation du véhicule par rapport à l'onde incidente est donnée par  $\beta_n$ . Ce déplacement est aléatoire dû au fait qu'une multitude d'ondes incidentes varient instantanément. Par contre, la variation maximale de la fréquence reçue est égale à la fréquence Doppler  $f_D$ . Cette fréquence est déterminée par la vitesse du véhicule  $V_m$  et par la longueur d'onde  $\lambda$ , de la façon suivante:

$$f_D = \frac{V_m}{\lambda} \quad (5.2)$$

L'introduction de la fréquence Doppler facilite la caractérisation mathématique du

signal reçu. Le même genre de raisonnement spécifie la fréquence Doppler d'un canal satellite mobile qui va être considéré dans la section 5.6. Toutefois, la nature d'un canal à évanouissements s'exprime mieux par le *taux d'évanouissements*  $f_D T$ . Le taux d'évanouissements est défini comme le produit de la fréquence Doppler  $f_D$  et de la durée de transmission d'un bit  $T$ .

### 5.1.2 Canal à évanouissements de Rayleigh

Dans le cas de notre étude, l'onde directe n'atteint pas le récepteur, ce qui est le cas de la téléphonie cellulaire en milieu urbain. Par conséquent, le canal de transmission utilisé dans notre évaluation des deux protocoles SR ARQ est le canal à évanouissements de Rayleigh. Etant donné la complexité physique des évanouissements, ces phénomènes sont caractérisés par leurs propriétés statistiques: l'enveloppe et la phase du signal reçu.

L'enveloppe du signal en évanouissements de Rayleigh suit une loi dite de Rayleigh:

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{\frac{-r^2}{2\sigma^2}}, r \geq 0 \quad (5.3)$$

où  $A=r^2$  et  $B=\sigma^2$ , l'écart type.

La phase des évanouissements de Rayleigh est uniformément répartie de  $-\pi$  à  $+\pi$ :

$$f_\phi(\phi) = \frac{1}{2\pi}, (-\pi) \leq \phi \leq \pi \quad (5.4)$$

### 5.1.3 Rapport signal à bruit

Pour les simulations des deux protocoles SR ARQ dans les différents canaux à évanouissements, la valeur initiale du rapport signal à bruit est fixée à 20 dB. Approximati-

vement, cette valeur est au début du domaine des rapports signal à bruit pour lesquels la probabilité d'erreur par bit  $P_b$  est inférieure à  $10^{-3}$ , transmettant dans un canal à évanouissements lents du type de Rayleigh [25]. Ainsi, toutes les simulations dans ce chapitre, ont été effectuées dans le domaine 20 dB-30 dB, avec les valeurs intermédiaires égales à 23 dB, 25 dB et 27 dB.

## 5.2 Paramètres d'expérimentation pour les communications terrestres

Afin d'évaluer les performances des protocoles SR ARQ dans un canal à évanouissements, nous avons utilisé l'amalgame des deux simulateurs: le simulateur d'un canal à évanouissements et le simulateur des protocoles. Les paramètres dans ces simulateurs sont choisis en considérant les systèmes terrestres réels. Ces paramètres ne sont pas nécessairement les paramètres caractérisant les meilleures performances possibles des deux protocoles dans les canaux à évanouissements. Toutefois, la grande variété de canaux à évanouissements, simulés dans ce chapitre, a permis quelques conclusions concernant les applications optimales des deux protocoles.

Finalement, l'utilisation des mêmes paramètres pour les deux protocoles SR ARQ, a conduit à une comparaison valable des performances des deux protocoles SR ARQ dans les conditions réelles.

### 5.2.1 Choix du modèle de simulateur du canal

Dans la plupart des communications radio mobiles, le formalisme d'évaluation s'avère le plus simple pour le canal de Rayleigh avec bruit blanc gaussien. Ce canal peut être présenté comme une multiplication du signal par une atténuation aléatoire complexe suivie de l'addition d'un bruit blanc gaussien. L'atténuation complexe est une atténuation d'amplitude

de densité de probabilité de Rayleigh.

Le signal à la sortie d'un tel canal peut être exprimé par:

$$S'(t) = S(t)A(t) + n(t) \quad (5.5)$$

où  $S(t)$  est le signal transmis,  $S'(t)$  est le signal reçu, et les signaux  $A(t)$  et  $n(t)$  sont l'atténuation d'amplitude de densité de probabilité de Rayleigh et le bruit blanc gaussien, respectivement.

Afin de simuler des évanouissements du type de Rayleigh, nous avons utilisé une approche tirée du livre de Jakes [18] illustré dans la figure 5.1. Cette approche utilise la modulation d'amplitude en quadrature de deux sources indépendantes de bruit blanc Gaussien. Le signal à la sortie possède alors une enveloppe suivant la loi de Rayleigh et une phase uniforme.

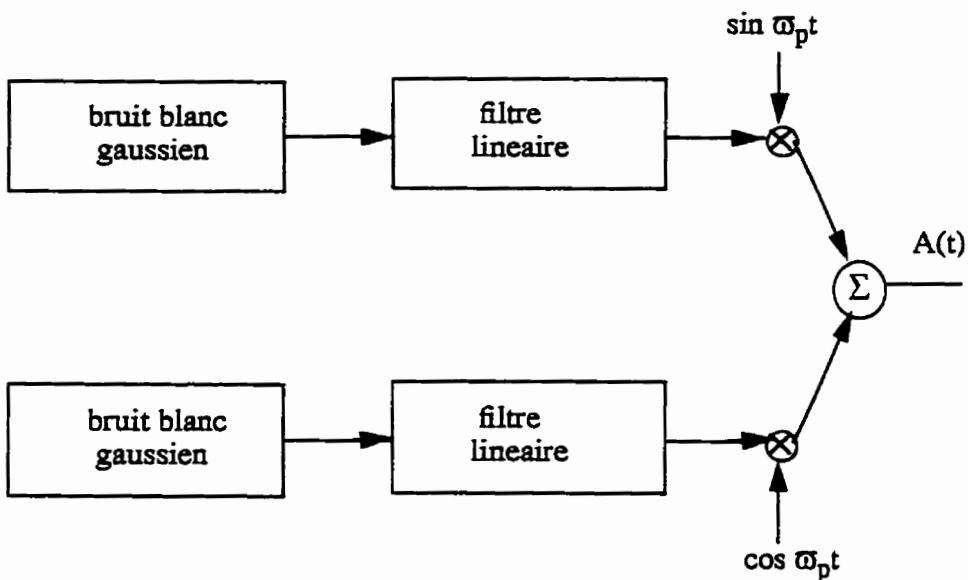


Figure 5.1 Modèle utilisé pour la simulation des évanouissements du type Rayleigh.

### 5.2.2 Choix du code

Le processus du codage/décodage n'est pas exécuté explicitement dans nos simulations pour les deux raisons suivantes. Premièrement, les simulations des deux protocoles SR ARQ dans un canal à évanouissements incluant le processus codage/décodage sont trop longues et trop complexes. Deuxièmement, la comparaison des performances des deux protocoles dans un tel canal est valable quelle que soit la méthode de codage utilisée [9].

La génération d'erreurs a été réalisée de la façon suivante. La trame transmise à partir de l'émetteur a été comparée avec la trame reçue au récepteur. Si tous les bits d'une trame ne sont pas identiques à la transmission et à la réception, la trame est considérée en erreur. Par conséquent, l'indicateur d'erreur est déclenché pour cette trame. La détection d'erreurs obtenue est donc supposée parfaite.

### 5.2.3 Choix du nombre de NAKs à l'intérieur d'une trame de NAKs

Le concept du nouveau protocole SR2 ARQ est basé sur l'idée de réaliser une transmission de NAK sans erreur quel que soit l'état du canal de transmission. La première question qui se pose est alors: peut-on garantir une telle transmission de NAK dans un canal à évanouissements? Afin de répondre à cette question nous avons simulé puis analysé la transmission des trames de NAKs dans le canal à évanouissements rapides ( $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-2}$ ), dans le canal à évanouissements moyens ( $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-3}$ ) et dans le canal à évanouissements lents ( $f_D T = 3.8 \cdot 10^{-4}$ ). Chacune de ces simulations a porté sur 10000 trames de NAKs. La valeur du rapport signal à bruit a été fixée à  $E_b/N_0 = 20$  dB. Cette valeur est choisie pour la valeur initiale du domaine des rapports signal à bruit dans lequel les simulations du protocole SR2 ARQ sont effectuées. Une autre valeur du rapport signal à bruit  $E_b/N_0 = 10$  dB a été utile pour conclure notre analyse.

La longueur d'une trame de NAKs est égale à 500 bits ( $\alpha = 500$  bits). Par contre, nous allons montrer que le bon choix de la longueur d'un NAK égal à  $\beta$  est essentiel pour la trans-

mission correcte d'une trame de NAKs. Les résultats de simulations présentés dans cette section sont obtenus pour la longueur de NAK  $\beta=20$  bits ce qui revient à 25 trames de NAKs dans une trame. Ce choix va être justifié au long de cette section. La trame de NAKs est reçue sans erreur si elle contient au moins un NAK correct. Par conséquent, afin de fournir la transmission correcte de NAKs dans un canal à évanouissements, on permet au maximum 24 NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs.

Tableau 5.1 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements rapides  $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ ; rapport signal à bruit  $E_b/N_0=20$  dB; La longueur de trame est  $\alpha=500$  bits et la longueur d'un NAK est égale à  $\beta=20$  bits.

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	0	1	2	3	4
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	43	34	16	5.5	1.5

Le Tableau 5.1 montre que dans un canal à évanouissements rapides ( $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ ) où le rapport signal à bruit est égal à  $E_b/N_0=20$  dB, un grand nombre de trames de NAKs est reçu sans aucune erreur. D'autre part, 57% de trames de NAKs reçues contiennent une ou plusieurs erreurs. Toutefois, on remarque que le nombre maximal de NAKs erronés à l'intérieur d'une trame de NAKs est de quatre. On conclut alors, que pour les conditions données, le nouveau protocole SR2 ARQ fournit la réception correcte de NAK, en transmettant une trame de NAKs ( $\Lambda=1$ ).

Le tableau 5.2 illustre la transmission des trames de NAKs dans les mêmes condi-

tions lorsque le rapport signal à bruit est abaissé à  $E_b/N_0 = 10$  dB. Un nombre négligeable de trames de NAKs (0.5%) est reçu sans erreur. Le reste contient au maximum 14 NAKs erronés, ce qui peut garantir la transmission correcte de NAK. Ainsi, en diminuant le rapport signal à bruit à  $E_b/N_0 = 10$  dB dans le canal à évanouissements rapides, le nombre de trames de NAKs reçu sans aucune erreur décroît, le nombre maximal de NAKs erronés à l'intérieur d'une trame de NAKs augmente, mais la transmission correcte de NAKs demeure.

Tableau 5.2 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements rapides  $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-2}$ ; rapport signal à bruit  $E_b/N_0 = 10$  dB; La longueur de trame  $\alpha = 500$  bits et la longueur d'un NAK est égale à  $\beta = 20$  bits.

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	0	1	2	3	4	5	6	7
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	0.5	2	6	7.5	12	16	17.5	11.5

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	8	9	10	11	12	13	14
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	9.5	9	4	3	0	1	0.5

La figure 5.3 illustre la transmission de trames de NAKs pour  $E_b/N_0 = 20$  dB dans le canal à évanouissements moyens ( $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-3}$ ). Il est évident que la plupart des trames de

NAKs (77.5%) ne contiennent aucune erreur à la réception. Le reste contient au maximum quatre erreurs, ce qui permet facilement la transmission correcte de NAKs.

Tableau 5.3 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements moyens  $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-3}$ ; rapport signal à bruit  $E_b/N_0 = 20$  dB; La longueur de trame  $\alpha = 500$  bits et la longueur d'un NAK est égale à  $\beta = 20$  bits.

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	0	1	2	3	4
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	77.5	9	9	2.5	2

Le problème de la transmission de NAKs sans erreur commence à apparaître dans un environnement exposé aux évanouissements lents de l'ordre de  $10^{-4}$ . Le Tableau 5.4 illustre les deux résultats extrêmes obtenus en transmettant des trames de NAKs sur un canal à évanouissements lents  $f_D T = 3.8 \cdot 10^{-4}$  dans lequel le rapport signal à bruit est de 20 dB. Premièrement, 91% des trames de NAKs arrivent au récepteur sans aucune erreur, ce qui est beaucoup plus important que les 77.5% dans le cas des évanouissements moyens, et à 43% dans le cas des évanouissements rapides. D'autre part, 0.5% des trames NAKs contiennent 23 NAKs en erreur. Ce nombre d'erreurs à l'intérieur d'une trame n'est pas possible pour les évanouissements moyens et rapides. Evidemment, les évanouissements lents provoquent les séries des erreurs, qui ne sont pas uniformément distribuées en temps. Ceci conduit à un nombre énorme de trames de NAKs qui sont transmises sans aucune erreur et à un petit nombre de trames de NAKs qui sont très erronées.

On conclut alors, que dans les conditions spécifiées, le nombre de NAKs à l'intérieur d'une trame de NAKs ( $\beta$ ) doit être supérieur à 23, si on veut réaliser une transmission correcte de NAK en transmettant une seule trame de NAKs. La transmission de plusieurs trames de NAKs qui est déclenchée par la réception d'une trame de données en erreur n'est pas nécessairement avantageuse, tel que mentionné dans le chapitre 3. Par conséquent, on a choisi d'avoir 25 NAKs à l'intérieur d'une trame de NAKs pour toutes les simulations de SR2 ARQ dans l'environnement d'évanouissements. À ce point, il est clair qu'un choix de  $\beta=20$  bits fournit une trame de NAKs contenant 25 NAKs.

Tableau 5.4 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements lents  $f_D T=3.8 \cdot 10^{-4}$ ; rapport signal à bruit  $E_b/N_0=20$  dB; La longueur de trame  $\alpha=500$  bits et la longueur d'un NAK est égale à  $\beta=20$  bits.

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	0	1	2	3	4
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	91	0.5	3	1.5	1

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	5	6	7	11	23
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	0.5	1	0.5	0.5	0.5

Tableau 5.5 Transmission de trames de NAKs dans un canal à évanouissements lents  
 $f_D T = 3.8 \cdot 10^{-4}$ ; rapport signal à bruit  $E_b/N_0 = 10$  dB; La longueur de trame  $\alpha = 500$  bits et la longueur d'un NAK est égale à  $\beta = 20$  bits.

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	0	1	2	3	4	5	6	7	8
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	55	10.5	5.5	1.5	2.5	2.5	2	2	2.5

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	9	10	11	12	13	14	15	16	17
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	1	1.5	1	1	1	1.5	1.5	1	0

# de NAKs en erreur à l'intérieur d'une trame de NAKs	18	19	20	21	22	23	24	25
pourcentage de trames de NAKs reçues contenant un certain nombre de NAKs en erreur	0.5	0.5	0.5	0.5	1.5	0.5	1	1.5

Le Tableau 5.5 présente la transmission des trames de NAKs dans le canal à évanouissements lents  $f_D T = 3.8 \cdot 10^{-4}$  lorsque le rapport signal à bruit diminue à  $E_b/N_0 = 10$  dB. On remarque que 45% de trames de NAKs contiennent des erreurs à la réception. Parmi eux, 1.5% contiennent 25 NAKs en erreur. Dans ces conditions, on ne peut pas garantir la transmission correcte de NAK, en transmettant une trame de NAKs qui est déterminée par  $\alpha=500$  bits et  $\beta=20$  bits.

Toutefois, le rapport signal à bruit  $E_b/N_0 = 10$  dB est en dehors de notre domaine pour l'évaluation des deux protocoles SR ARQ. En tenant compte que nous avons analysé la transmission de NAK pour la valeur initiale de  $E_b/N_0 = 20$  dB et toutes les valeurs de taux d'évanouissements utilisées dans nos simulations, on peut tirer la conclusion suivante: Le nouveau protocole SR2 ARQ procure la transmission correcte de NAK, en transmettant une seule trame de NAKs, pour un taux d'évanouissements supérieur ou égal à  $f_D T = 3.8 \cdot 10^{-4}$  et un rapport signal à bruit supérieur ou égal à  $E_b/N_0 = 20$  dB si la trame de NAKs est caractérisée par  $\alpha=500$  bits et  $\beta=20$ .

#### 5.2.4 Valeurs représentatives

Les deux protocoles SR ARQ sont simulés dans différents canaux à évanouissements avec une corrélation intersymboles de type Bessel et une fréquence Doppler maximale  $f_D$ . Le taux d'évanouissements prend la valeur  $f_D T = 10^{-2}$  et  $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-2}$  pour les évanouissements rapides,  $f_D T = 10^{-3}$  et  $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-3}$  pour les évanouissements moyens et  $f_D T = 3.8 \cdot 10^{-4}$  pour les évanouissements lents. La longueur d'une trame est égale à 500 bits et un NAK contient 20 bits incluant son adresse et son CRC. La période de RTD est égale à la durée de 6 trames tel que dans les simulations des deux protocoles dans un canal binaire symétrique. Le délai de garde pour le protocole SR1 ARQ est ainsi égal à la durée de 8 trames. Le domaine des rapports signal à bruit est limité entre 20 dB et 30 dB pour les raisons données dans la section 5.1.3. En effet, les simulations des deux protocoles SR ARQ sont effectuées pour les valeurs

de  $E_b/N_0$  suivantes: 20dB, 23 dB, 25 dB, 27 dB et 30 dB.

### 5.2.5 Méthode de simulation

Chaque simulation déterminée par un taux d'évanouissements particulier et un rapport signal à bruit  $E_b/N_0$ , a comporté la transmission d'un minimum de 500 000 bits. Plus précisément, chaque simulation du protocole SR1 ARQ est réalisée sur 10000 trames dont les accusés de réception positifs ont été reçus sans erreur sur le canal de retour. Cependant, chaque simulation du protocole SR2 ARQ est réalisée sur 10000 trames pour lesquelles une trame de NAKs n'a pas été reçue.

La modulation utilisée est de type BPSK et la détection est cohérente. Le rapport signal à bruit est le même dans les deux directions.

## 5.3. Vérification des simulateurs

Tel que mentionné dans la section 5.2, nos simulations sont conçues comme l'amalgame des deux simulateurs: le simulateur d'un canal à évanouissements et le simulateur d'un protocole SR ARQ. Dans la section 5.3.1 nous allons vérifier le simulateur d'un canal à évanouissements, utilisant les résultats de Proakis [25]. La section 5.3.2 présente la vérification du fonctionnement du protocole SR1 ARQ dans plusieurs canaux à évanouissements. Cette vérification est effectuée en utilisant les résultats de recherche de Chuang [9] dans ce domaine.

### 5.3.1 Vérification du simulateur du canal à évanouissements lents

Le simulateur du canal à évanouissements lents est testé sur 10000 trames contenant 500 bits. La détection d'erreur est parfaite et la modulation utilisée est de type BPSK. La probabilité d'erreur par bit  $P_b$  est calculée pour les différents rapports signal à bruit. Les valeurs de  $P_b$  obtenues par nos simulations se trouvent au Tableau 5.6. Ces valeurs sont comparées

avec les valeurs approximatives tracées par les courbes de Proakis [25] pour le canal à évanouissements lents du type de Rayleigh.

Il est évident que notre simulateur donne les valeurs de  $P_b$  qui sont conformes aux courbes de Proakis [25]. Les petites variations sont acceptables dû au fait que pour les courbes de Proakis, la valeur du taux d'évanouissement lents n'est pas indiquée de façon précise.

Tableau 5.6 Les probabilités d'erreur par bit  $P_b$  en fonction de différents rapports signal à bruit. Le canal de transmission est le canal à évanouissements lents du type de Rayleigh.

$E_b/N_0$ (dB)	$P_b$ donné par les courbes de Proakis	$P_b$ calculée par notre simulateur
10	$\sim 2.43 \cdot 10^{-2}$	$2.31 \cdot 10^{-2}$
15	$\sim 7.94 \cdot 10^{-3}$	$7.88 \cdot 10^{-3}$
20	$\sim 2.43 \cdot 10^{-3}$	$2.23 \cdot 10^{-3}$
25	$\sim 7.94 \cdot 10^{-4}$	$7.75 \cdot 10^{-4}$
30	$\sim 2.43 \cdot 10^{-4}$	$2.17 \cdot 10^{-4}$
35	$\sim 7.94 \cdot 10^{-5}$	$7.79 \cdot 10^{-5}$

### 5.3.2 Vérification du simulateur du protocole SR1 ARQ dans plusieurs canaux à évanouissements

Notre simulateur du protocole SR1 ARQ en présence d'évanouissements a été testé en comparant avec les résultats de Chuang [9]. Chuang a simulé ce protocole dans les conditions suivantes:

- détection cohérente
- modulation utilisée: DQPSK

- délai de garde égal à la durée de 7 trames
- période de RTD égale à la durée de 4 trames
- longueur de trame fixée à 161 bits
- processus de codage/décodage non-implémenté
- rapport signal à bruit:  $E_b/N_0=10$  dB.

Nous avons simulé le protocole SR1 ARQ dans les mêmes conditions à l'exception de la modulation utilisée. Notre simulateur a été conçu pour la modulation BPSK. Etant donné que la modulation BPSK est approximativement 2 dB meilleure que la modulation DQPSK [9], le rapport signal à bruit dans nos simulations a été ajusté à 8 dB.

Tableau 5.7 Throughput du protocole SR ARQ standard obtenu par notre simulateur et comparé avec les résultats de Chuang; Le canal de transmission est le canal à évanouissements moyens ( $f_D T=1.5 10^{-3}$ ) et le canal à évanouissements lents ( $f_D T= 3.8 10^{-4}$ )

$f_D T$	throughput donné par les courbes de Chuang	throughput obtenu par notre simulateur
$3.8 10^{-4}$	~0.54	0.527
$1.5 10^{-3}$	~0.5	0.498

Les résultats dans le Tableau 5.7 montrent que le throughput du protocole SR ARQ standard obtenu par notre simulateur est presque identique au throughput tracé de Chuang. Par conséquent, le bon fonctionnement de notre simulateur est vérifié.

## 5.4 Évaluation des performances des deux protocoles dans des canaux à évanouissements

Cette section porte sur l'évaluation des performances des deux protocoles SR ARQ dans différents canaux à évanouissements. Les paramètres utilisés pour cette évaluation ne dépendent pas du type du canal de transmission. Ceci nous permet d'utiliser les définitions de throughput, de ARTD, de nombre moyen de transmissions par trame et de nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur, qui sont établies dans la section 4.2.

### 5.4.1 Analyse du throughput

La figure 5.2 illustre le throughput en fonction du rapport signal à bruit  $E_b/N_0$  pour les deux protocoles SR ARQ dans le canal à évanouissements rapides avec  $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-2}$ . Dans les deux cas le throughput augmente de façon monotone lorsque l'état du canal s'améliore. Le throughput obtenu par le protocole SR2 ARQ est plus important pour toutes les valeurs de  $E_b/N_0$ . Un gain de plus de 3 dB existe pour un throughput égal à 60%, et il continue d'augmenter avec l'augmentation de  $E_b/N_0$ .

Plus précisément, on peut dire que la différence entre les deux protocoles devient évidente à partir de  $E_b/N_0 = 23$  dB. Pour cette valeur, le nouveau protocole améliore de 9% le throughput du protocole standard qui est égal à 39%. Ainsi, on conclut que pour les évanouissements rapides, le protocole SR2 ARQ permet une certaine amélioration du throughput dont la valeur maximale atteint 17% pour  $E_b/N_0 = 30$  dB. En plus, les résultats dans la figure 5.2 montrent que l'élimination des retransmissions inutiles dans le protocole SR2 ARQ résulte en un avantage par rapport au protocole SR1 ARQ. Cet avantage n'est que partiellement diminué par l'overhead supplémentaire des trames de NAKs dû au fait qu'en transmettant une seule trame de NAKs, on peut garantir la transmission correcte de NAK. Par conséquent, pour les évanouissements rapides le nouveau protocole permet de combattre le bruit sur le canal de

retour au prix d'un petit overhead supplémentaire des trames de NAKs.

La figure 5.3 illustre le throughput pour les deux protocoles dans le canal à évanouissements moyens  $f_{DT}=1.5 \cdot 10^{-3}$ . Il est évident que le throughput du nouveau protocole est supérieur d'environ 20% dans le domaine entier allant de 20 dB à 30 dB. Dans les conditions de ces évanouissements, on remarque un gain de plus de 5 dB pour un throughput égal à 60%.

En comparant cette figure avec la figure 5.2, on peut constater que les deux protocoles sont moins sensibles au bruit pour les évanouissements moyens que pour les évanouissements rapides. Cette observation est même plus évidente pour le throughput des deux protocoles dans le canal à évanouissements lents ( $f_{DT}=3.8 \cdot 10^{-4}$ ), qui est illustré à la figure 5.4. Les évanouissements rapides introduisent des erreurs dont la distribution en temps est plus aléatoire que dans le cas des évanouissements lents. Par conséquent, la variation du throughput ainsi que les valeurs du throughput, sont plus élevées pour les évanouissements moyens et surtout pour les évanouissements lents.

Les valeurs du throughput de la figure 5.4 sont très élevées pour les deux protocoles, notamment pour le protocole SR2 ARQ. Pour un throughput égal à 80%, le nouveau protocole réalise un gain de plus de 5 dB. Ceci confirme que dans le protocole standard, la transmission de l'accusé de réception est sérieusement dégradée au cours de certains intervalles du temps. Par contre, cette situation n'est jamais arrivée dans nos simulations du protocole SR2 ARQ, ce qui conduit à une très grande efficacité du nouveau protocole.

La figure 5.5 illustre le throughput pour les deux protocoles en fonction du taux d'évanouissements quand le rapport signal à bruit prend la valeur de 30 dB. Dans les deux cas, le throughput est relativement insensible au taux d'évanouissements pour la raison suivante. Le rapport signal à bruit est très élevé, ce qui provoque un petit nombre de trames en erreur, surtout pour les évanouissements très lents. Par conséquent, le protocole standard effectue un petit nombre de retransmissions puisqu'un NAK est reçu ou puisque le mécanisme de time-out est activé. Le protocole SR2 ARQ ne déclenche une retransmission que par la réception d'une

trame de NAKs. Grâce à la présence de trames de NAKs, ce nombre de retransmissions est plus petit par rapport au protocole standard. Cet avantage du nouveau protocole devient plus grand avec l'augmentation du taux d'évanouissements.

La figure 5.6 donne un autre exemple de la dépendance du throughput pour les deux protocoles par rapport au taux d'évanouissements. Dans cet exemple, le rapport signal à bruit est égal à 20dB, ce qui est significativement plus petit par rapport à l'exemple précédent. Les résultats de cette figure montrent que le nouveau protocole fournit une amélioration du throughput entre 4% et 17%. La valeur maximale de cette amélioration est obtenue pour les évanouissements lents. De plus, on s'aperçoit que le throughput des deux protocoles est très sensible au taux d'évanouissements. Ceci n'est pas surprenant car le bruit dans un tel canal provoque un grand nombre de trames en erreur pour les évanouissements rapides. Dans ce cas, un grand nombre de retransmissions est demandé même pour le protocole SR2 ARQ, conduisant à un overhead de trames de NAKs très élevée, ce qui diminue considérablement le throughput. Toutefois, l'amélioration du throughput obtenue par le nouveau protocole est très utile dans l'environnement radio portable où la fréquence  $f_D$  est très souvent inférieure à 5 Hz.

#### 5.4.2 Analyse du ARTD

La figure 5.7 montre le ARTD pour les deux protocoles en fonction du rapport signal à bruit dans le canal à évanouissements rapides  $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-2}$ . En général, les valeurs du ARTD pour les deux protocoles sont presque identiques dans le domaine entier entre 20 dB et 30 dB. Une légère différence d'environ 10% existe pour un rapport signal à bruit égal à 20 dB. Dans ce cas, l'overhead de trames de NAKs devient très grand ce qui conduit à un ARTD plus élevé pour le protocole SR2 ARQ par rapport au protocole SR1 ARQ.

Pour les deux protocoles le ARTD diminue avec un rapport de trois lorsque le rapport signal à bruit augmente. Ceci est conforme avec l'analyse du throughput dans la figure 5.2, car le throughput des deux protocoles augmente considérablement dans le même domaine.

La figure 5.8 démontre que les deux protocoles rendent le ARTD presque identique pour toutes les valeurs de  $E_b/N_0$  dans le canal à évanouissements moyens. En comparant cette figure avec la figure 5.7, on remarque que les valeurs de ARTD dans la figure 5.8 sont inférieures à celles dans la figure 5.7. Cette remarque confirme les conclusions d'analyse du throughput dans le canal à évanouissements moyens, tel qu'illustre à la figure 5.3.

Les valeurs de ARTD restent les mêmes pour les deux protocoles dans le canal à évanouissements lents, présentés dans la figure 5.9. De plus, ces valeurs sont à peine supérieures à RTD donné, dont la valeur est égale à la durée de 6 trames.

La figure 5.10 illustre le ARTD pour les deux protocoles en fonction du taux d'évanouissements lorsque le rapport signal à bruit prend la valeur constante  $E_b/N_0=30$  dB. De même que le throughput présenté dans la figure 5.5, le ARTD pour les deux protocoles, est relativement insensible au taux d'évanouissements pour un rapport signal à bruit aussi élevé. La fonction de dépendance de ARTD du taux d'évanouissements prend les valeurs approximativement égales pour les deux protocoles.

#### 5.4.3 Analyse du nombre moyen de transmissions par trame

Le nombre moyen de transmissions par trame en fonction de  $E_b/N_0$  dans le canal à évanouissements rapides, est illustré à la figure 5.11. Le nouveau protocole demande en moyenne moins de transmissions par trame que le protocole standard, surtout dans le cas où le canal de transmission devient plus bruité. Pour  $E_b/N_0=20$  dB, le protocole SR2 ARQ réalise 40% moins de transmissions par trame que le protocole standard. Cet avantage se traduit par une réduction de la taille requise du tampon à l'émetteur.

Le nombre moyen de transmissions par trame pour le protocole SR1 ARQ et SR2 ARQ est indépendant du taux d'évanouissements, lorsque le canal se trouve dans un bon état avec  $E_b/N_0=30$  dB. Ceci est illustré par la figure 5.12.

#### 5.4.4 Analyse du nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur

La figure 5.13 montre le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur pour les deux protocoles en fonction de  $E_b/N_0$ , dans le canal à évanouissements rapides. Ce nombre est très faible pour le protocole SR1 ARQ et aussi pour le protocole SR2 ARQ. En plus, le protocole SR2 ARQ demande un tampon au récepteur de taille légèrement plus faible que le protocole SR1 ARQ.

### 5.5. Paramètres d'expérimentation pour les communications par satellites

Cette section établit les paramètres pour les simulations des deux protocoles SR ARQ dans les applications de satellites. Ces paramètres sont choisis en considérant les systèmes de satellites existants. La grande variété des communications par satellites a imposé l'introduction de certaines hypothèses simplificatrices. Toutefois, l'utilisation des mêmes paramètres pour les deux protocoles, permet une comparaison correcte des performances de ces protocoles dans les communications par satellites présentes. Nous pouvons dire que cette expérimentation où le canal satellite est modélisé comme un canal à évanouissements est très conforme aux conditions réelles. Plusieurs auteurs ont pris la même approche en considérant les différents scénarios des communications par satellites [28] [27].

#### 5.5.1 Choix du type de communication

Pour simuler un système de communication par satellites nous avons choisi le modèle illustré à la figure 5.15. Ce modèle correspond à la communication 'full duplex' des deux usagers où le contrôle d'erreurs est effectué à bord du satellite. Par conséquent, on peut regarder la communication 'full duplex' entre le satellite et un des usagers. Afin de simplifier le modèle de simulation de la figure 5.15 on suppose que la distance entre le satellite et l'usager ne

change pas au cours d'une transmission. Cette hypothèse est très raisonnable dans le cas d'un satellite du type GEO et un usager fixe ou presque immobile. Par contre pour un satellite du type LEO et un usager mobile dont la vitesse est égale à 100 km/h, cette hypothèse impose une durée de transmission de quelques minutes.

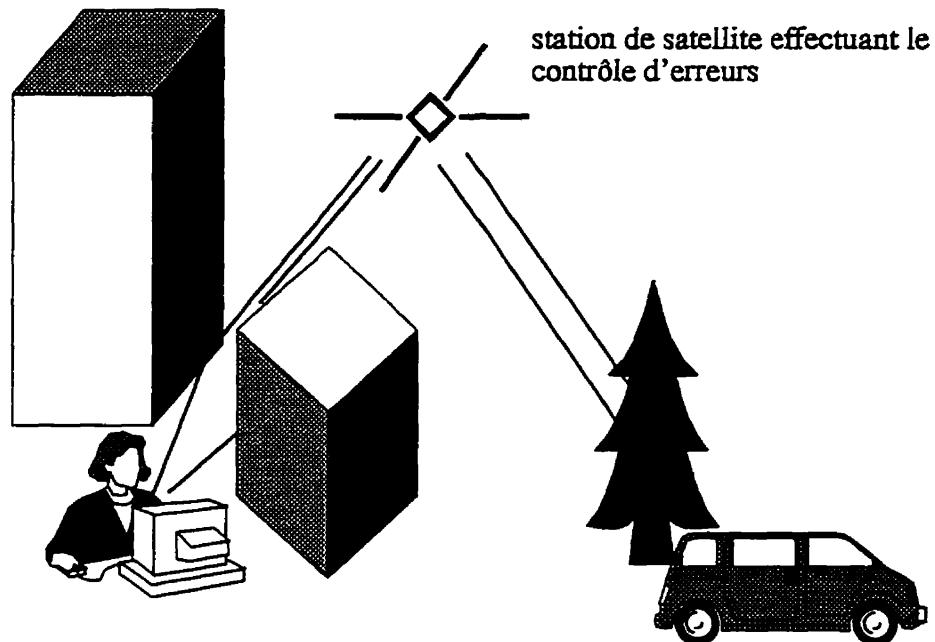


Figure 5.15 Communication usager - satellite - usager du type duplex en présence des arrêts.

### 5.5.2 Choix du canal

Dans des conditions réelles, un canal satellite peut être modélisé comme un canal à évanouissements. La définition de ce canal inclut le milieu de propagation, la mobilité ou l'immobilité des usagers, la mobilité du satellite et les autres éléments présentés dans la section 5.1. Finalement, tel que déjà mentionné dans la même section, un système de communication par satellites peut être déterminé avec les trois paramètres variables: la fréquence Doppler du canal, le rapport entre l'énergie de la composante en ligne de vue du signal et l'énergie de

sa composante diffuse et le rapport signal à bruit. Pour le modèle de simulation dans la figure 5.15, le premier et le troisième paramètre peuvent facilement être déterminés. La question qui se pose est alors, doit-on supposer l'évanouissements de Rayleigh ou de Rice? Une étude complète devrait analyser les deux types d'évanouissements. Toutefois, les performances des protocoles obtenues dans un canal de Rayleigh sont souvent inférieures par rapport aux celles obtenues dans un canal de Rice. Par conséquent, dans le cadre de cette étude nous n'avons inclus que les évanouissements de Rayleigh. Le simulateur de canal est donc le même simulateur de canal de Rayleigh avec bruit blanc gaussien présenté dans la section 5.2.1.

### 5.5.3 Choix du code

Comme pour les communications terrestres, le processus du codage/décodage n'est pas exécuté explicitement dans les simulations des deux protocoles SR ARQ dans les communications par satellites. Ce choix, la génération d'erreurs et leur détection sont indiqués dans la section 5.2.2.

### 5.5.4 Valeurs représentatives

Afin d'évaluer les performances des deux protocoles dans un canal satellite en présence d'évanouissements, nous avons simulé plusieurs canaux de Rayleigh avec une corrélation intersymboles de type Bessel et une fréquence Doppler maximale  $f_D$ . Le taux d'évanouissements prend la valeur  $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-2}$  pour les évanouissements rapides,  $f_D T = 1.5 \cdot 10^{-3}$  pour les évanouissements moyens et  $f_D T = 3.8 \cdot 10^{-4}$  pour les évanouissements lents. Chaque trame contient 500 bits. La longueur d'un NAK est de 20 bits (son adresse et CRC sont inclus) car cette longueur est conforme aux conclusions de la section 5.2.3. Dans l'exemple qui va être analysé dans la suite de ce chapitre, la période de RTD est égale à la durée de 30 trames. Le délai de garde pour le protocole SR1 ARQ est égale à la durée de 40 trames. Les simulations sont effectuées pour le rapport signal à bruit égal à 20 dB, 23 dB, 25 dB, 27 dB et

30 dB.

### 5.5.5 Méthode de simulation

La simulation des protocoles SR ARQ en présence d'évanouissements de Rayleigh est effectuée par la synthèse des deux simulateurs: le simulateur de canal et le simulateur des protocoles. Chaque simulation a comporté sur 10000 trames dont les accusés de réception positifs ont été reçus sans erreur sur le canal de retour.

De plus, nous avons simulé la modulation du type BPSK, la détection cohérente et le même rapport signal à bruit pour la transmission dans les deux directions.

## 5.6 Évaluation des performances des deux protocoles dans des canaux à évanouissements pour les communications par satellites

Cette section est consacrée à l'évaluation des deux protocoles SR ARQ dans les communications par satellites. Les principaux paramètres de cette évaluation sont: le throughput, le ARTD, le nombre moyen de transmissions par trame et le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur. Leurs définitions sont présentées à la section 4.2.

### 5.6.1 Analyse du throughput

La figure 5.16 illustre le throughput pour les deux protocoles en fonction du taux d'évanouissements quand le rapport signal à bruit prend la valeur de 20 dB et la période du RTD est égale à la durée de 30 trames. On observe que le nouveau protocole procure une amélioration du throughput entre 11% pour les évanouissements rapides et 30% pour les évanouissements lents. Les valeurs des deux throughput sont très sensibles au taux d'évanouissements pour ce rapport signal à bruit. De plus, si on compare cette figure avec la figure 5.6, on peut constater que le throughput du protocole SR1 ARQ diminue d'environ 10% lorsque le RTD augmente pour la durée de 24 trames. Par contre, le throughput du protocole SR2 ARQ ne

dépend presque pas de cette augmentation du RTD.

Toutes ces remarques nous conduisent aux conclusions suivantes. Premièrement, le throughput d'un protocole SR ARQ dans un canal à évanouissements dépend du RTD. La probabilité que la trame soit correctement reçue dépend de l'enveloppe d'évanouissements de Rayleigh qui est variable en temps. Par conséquent, le throughput d'un protocole SR ARQ dépend du RTD. Les résultats montrent que le throughput pour le protocole SR1 ARQ diminue avec l'augmentation significative de RTD en présence d'évanouissements. Dans ce cas, le protocole SR2 ARQ peut mieux résoudre le problème d'un plus grande nombre de trames sans erreur dans le tampon du récepteur, en évitant les retransmissions inutiles. Deuxièmement, les deux protocoles donnent le throughput maximal pour les évanouissements lents. Ceci est déterminé par le type d'erreurs qui sont provoquées par ces évanouissements. Troisièmement, on peut dire que l'amélioration du throughput rendue par le nouveau protocole augmente avec une augmentation significative du RTD. Par conséquent le nouveau protocole peut être extrêmement avantageux pour les communication par satellites.

### 5.6.2 Analyse du ARTD

La figure 5.17 illustre le ARTD pour les deux protocoles en fonction du taux d'évanouissements quand le rapport signal à bruit est égal à 20 dB et le RTD est égal à la durée de 30 trames. En général, les valeurs de RTD des deux protocoles sont semblables à part du cas d'évanouissements rapides. Dans ce cas, la distribution d'erreurs en temps est plus aléatoire par rapport aux évanouissements lents. Par conséquent, un grand nombre de trames en erreur arrivent au récepteur qui impose la transmission de NAKs. Ainsi, l'overhead de trames de NAKs pour le protocole SR2 ARQ devient très significatif.

Toutefois, le protocole SR2 ARQ donne un ARTD qui est au maximum 10% plus long que le ARTD obtenu pour le protocole SR1 ARQ. Cette différence ne peut pas dégrader le délais rendu du protocole standard. Par contre, la diminution des valeurs élevées pour le

ARTD des deux protocoles reste un défi pour les recherches futures.

### 5.6.3 Analyse du nombre moyen de transmissions par trame

La figure 5.18 illustre le nombre moyen de transmissions par trames en fonction du taux d'évanouissements pour un rapport signal à bruit égal à 20 dB et un RTD égal à la durée de 30 trames. Il est évident que le nouveau protocole demande en moyenne moins de transmissions par trame que le protocole standard quel que soit le taux d'évanouissements. Ceci est directement lié à la supériorité de throughput du protocole SR2 ARQ dans les conditions décrites.

Grâce à cette réduction en nombre moyen de transmissions par trame, le nouveau protocole permet une réduction de la taille du tampon à l'émetteur. La réduction est maximale pour les évanouissements rapides.

### 5.6.4 Analyse du nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur

La figure 5.19 illustre le nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction du taux d'évanouissements pour un rapport signal à bruit constant égal à 20 dB et un RTD égal à la durée de 30 trames. Le nombre moyen de trames au tampon du récepteur pour le protocole SR1 ARQ est légèrement plus grand que pour le protocole SR2 ARQ dans le cas d'évanouissements lents. Par contre, pour les évanouissements moyens et rapides, le protocole SR2 ARQ exige une taille du tampon au récepteur, deux fois plus grande que le protocole SR1 ARQ. De plus, les deux protocoles ont presque le même nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur dans le cas d'évanouissements moyens et dans le cas d'évanouissements rapides. L'overhead de trames de NAKs est très fort dans le cas d'évanouissements rapides. Cet overhead ne peut diminuer significativement que pour les évanouissements lents.

D'autre part, l'exigence de tamponnage au récepteur pour le protocole SR1 ARQ, dépend du délai de demande de retransmission et du mécanisme de time-out. Le délai de

demande de retransmission augmente avec l'augmentation du taux d'évanouissements, et le nombre de trames dans le tampon augmente. Comme le taux d'évanouissements continue à décroître, le mécanisme du time-out devient de plus en plus dominant. Par conséquent, le nombre de trames dans le tampon diminue légèrement. La valeur choisie pour la période de time-out peut influencer la forme de cette diminution.

Si on compare la figure 5.19 avec la figure 5.14 on remarque que le RTD est un paramètre extrêmement important dans l'évaluation de tamponnage du récepteur des deux protocoles en présence d'évanouissements. Il détermine directement le délai de demande de retransmission. Par conséquent, dans les applications réelles de satellites, le nouveau protocole exige un tamponnage double au récepteur. Étant donné la disponibilité et le coût de cette mémoire, cet inconvénient du nouveau protocole n'est pas très significatif.

## 5.7 Comparaison des deux protocoles et conclusions

Ce chapitre a considéré les performances des deux protocoles SR ARQ dans différents canaux à évanouissements sans mise en oeuvre du processus de codage/décodage. Les résultats de simulations montrent que pour les paramètres des communications terrestres, le nouveau protocole présente une meilleure solution que le protocole standard. Plus précisément, le protocole SR2 ARQ rend une amélioration du throughput et une réduction de la taille exigée du tampon de l'émetteur, surtout dans le cas d'évanouissements lents. En plus, il ne dégrade pas le délai moyen de transmission (ARTD) et il permet une réduction légère de la taille exigée du tampon au récepteur.

Dans les communications par satellites, le nouveau protocole garde sa supériorité au niveau du throughput et de la réduction de la mémoire exigée à l'émetteur. Par contre, les résultats de ces simulations révèlent une augmentation légère de ARTD en présence d'évanouissements rapides et une augmentation raisonnable de taille du tampon au récepteur en présence d'évanouissements moyens et rapides.

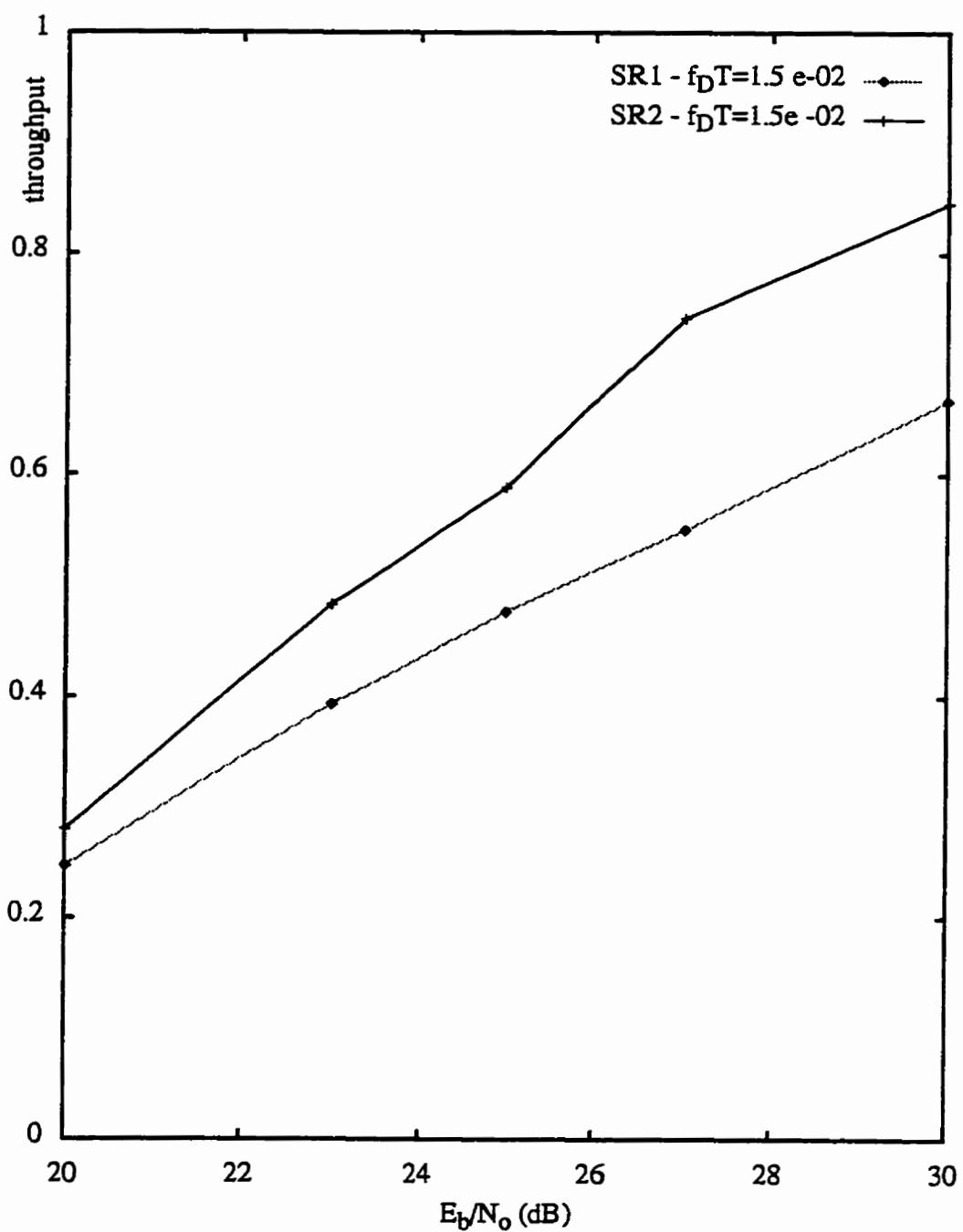


Figure 5.2 Throughput en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements rapides  $f_D T=1.5 \times 10^{-2}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

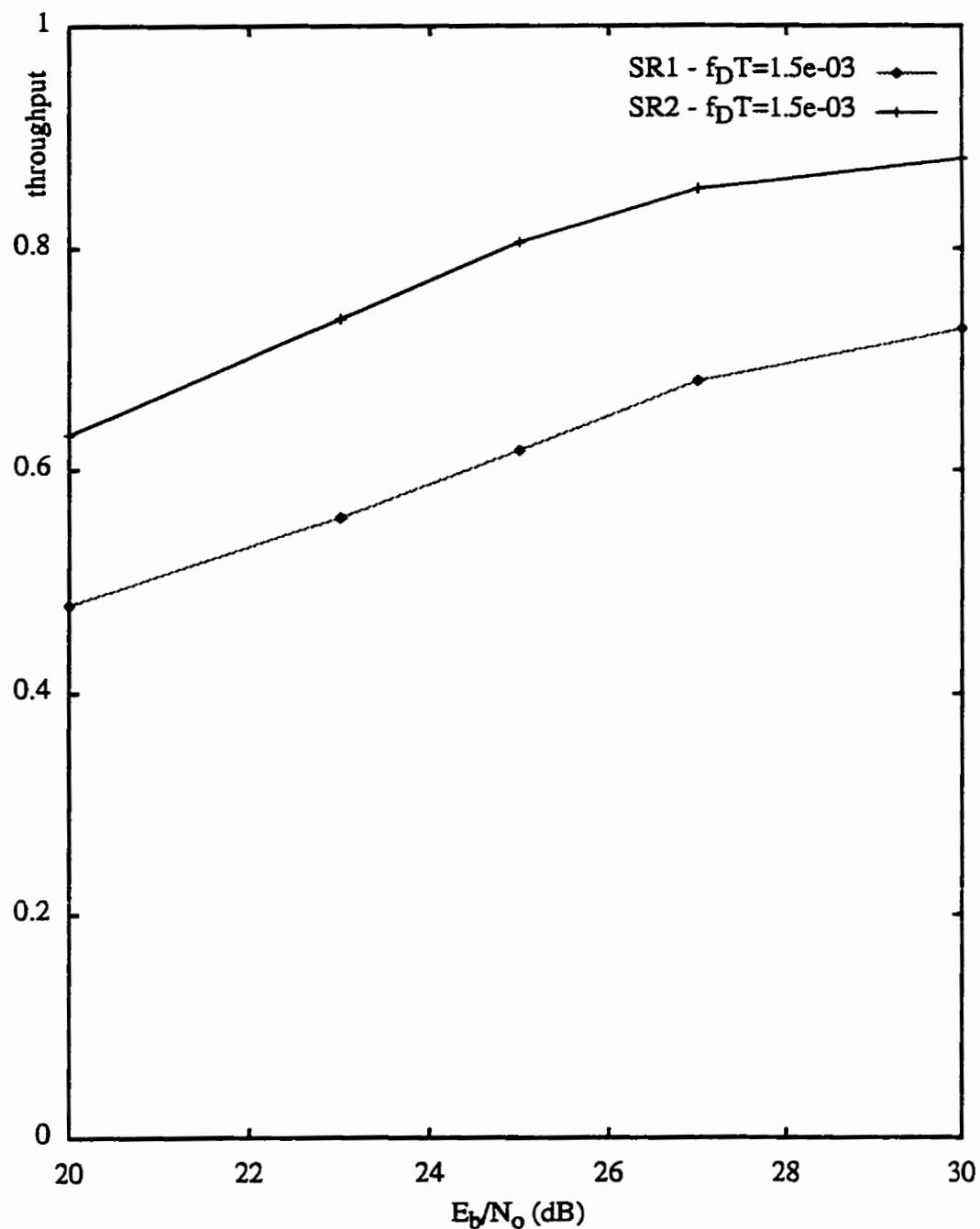


Figure 5.3 Throughput en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements moyens  $f_D T=1.5 \times 10^{-3}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

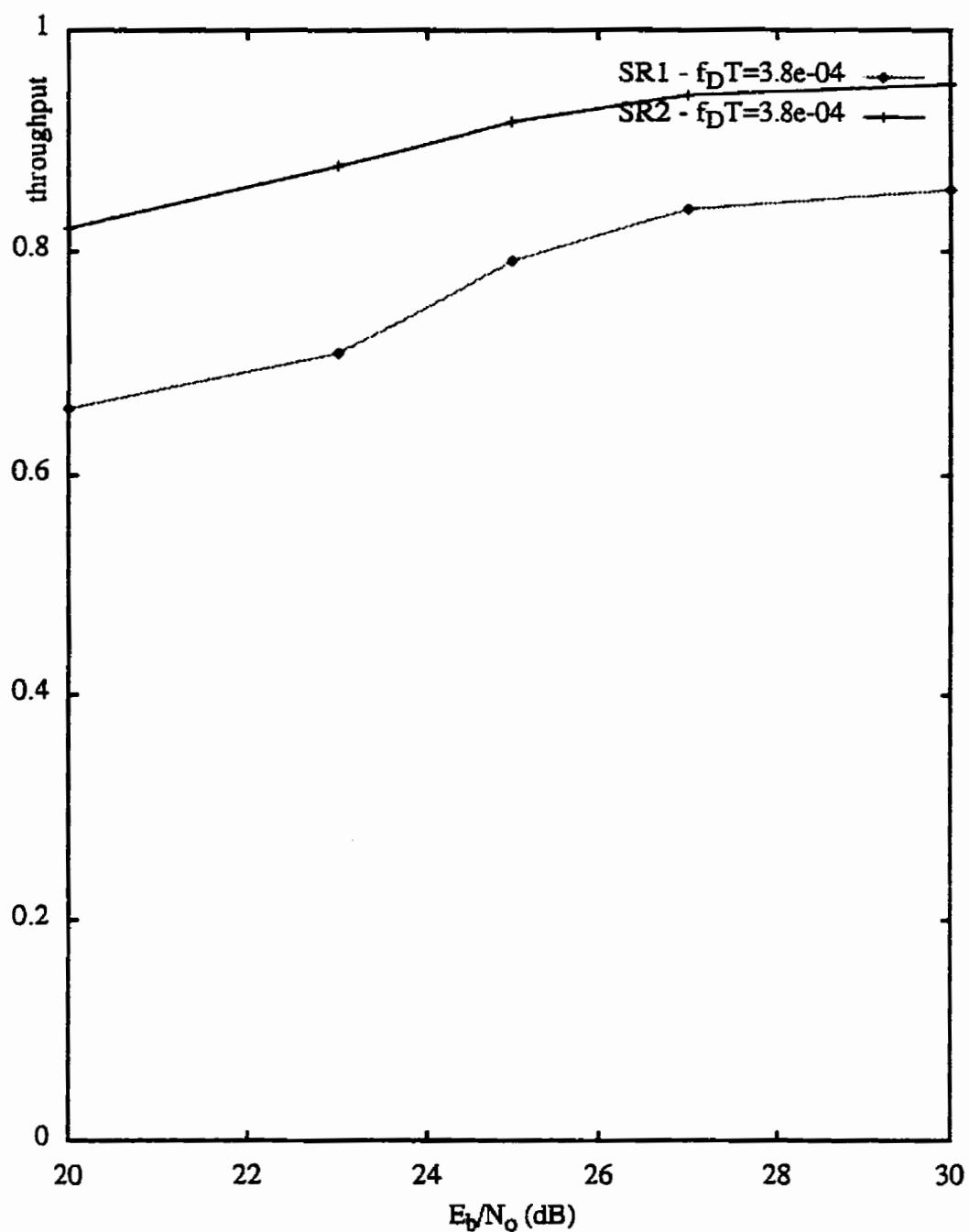


Figure 5.4 Throughput en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements lents  $fDT=3.8 \cdot 10^{-4}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

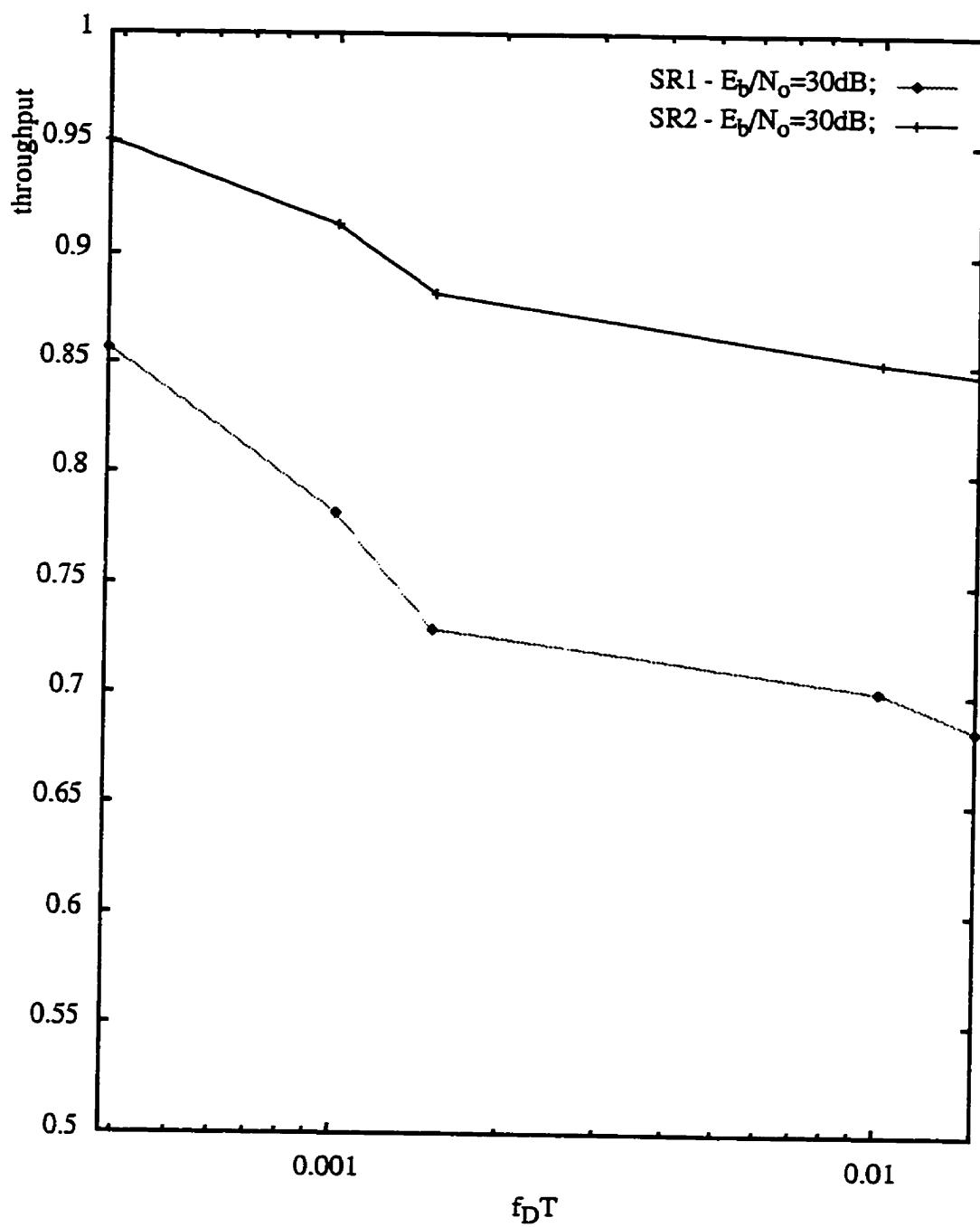


Figure 5.5 Throughput en fonction de  $f_D T$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=30$  dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

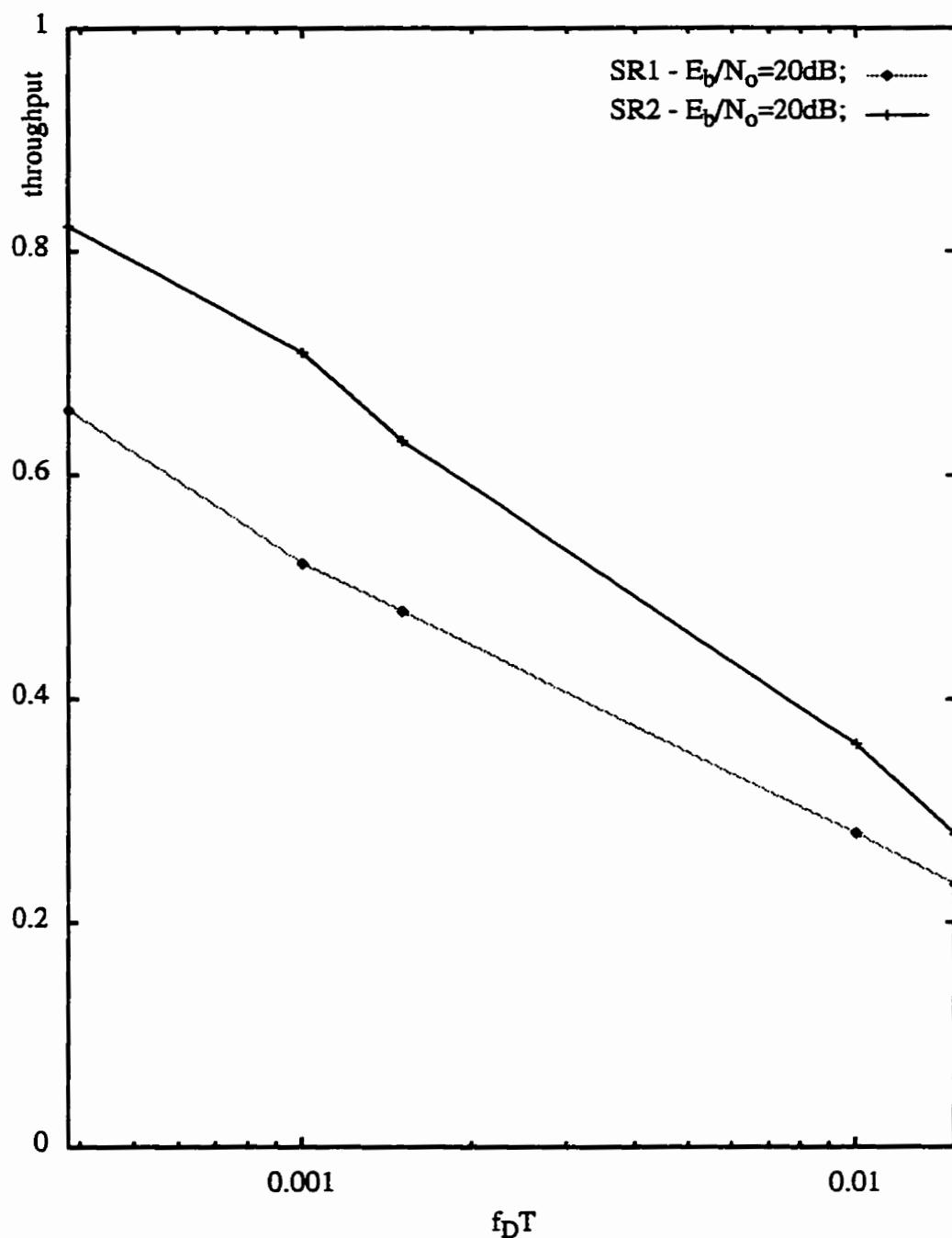


Figure 5.6 Throughput en fonction de  $f_{DT}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=20 \text{ dB}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie

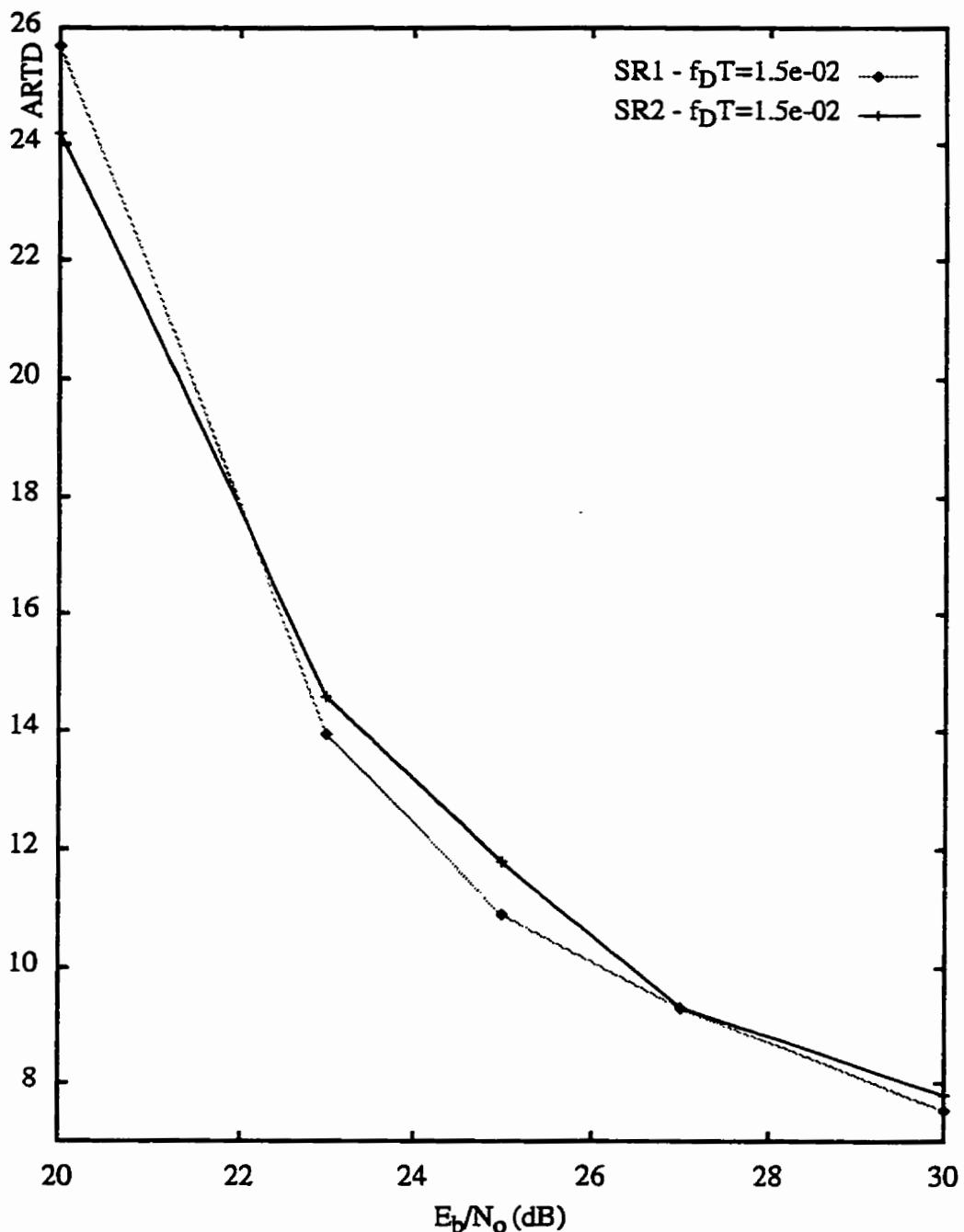


Figure 5.7 La valeur moyenne de RTD en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements rapides  $f_D T=1.5 \times 10^{-2}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

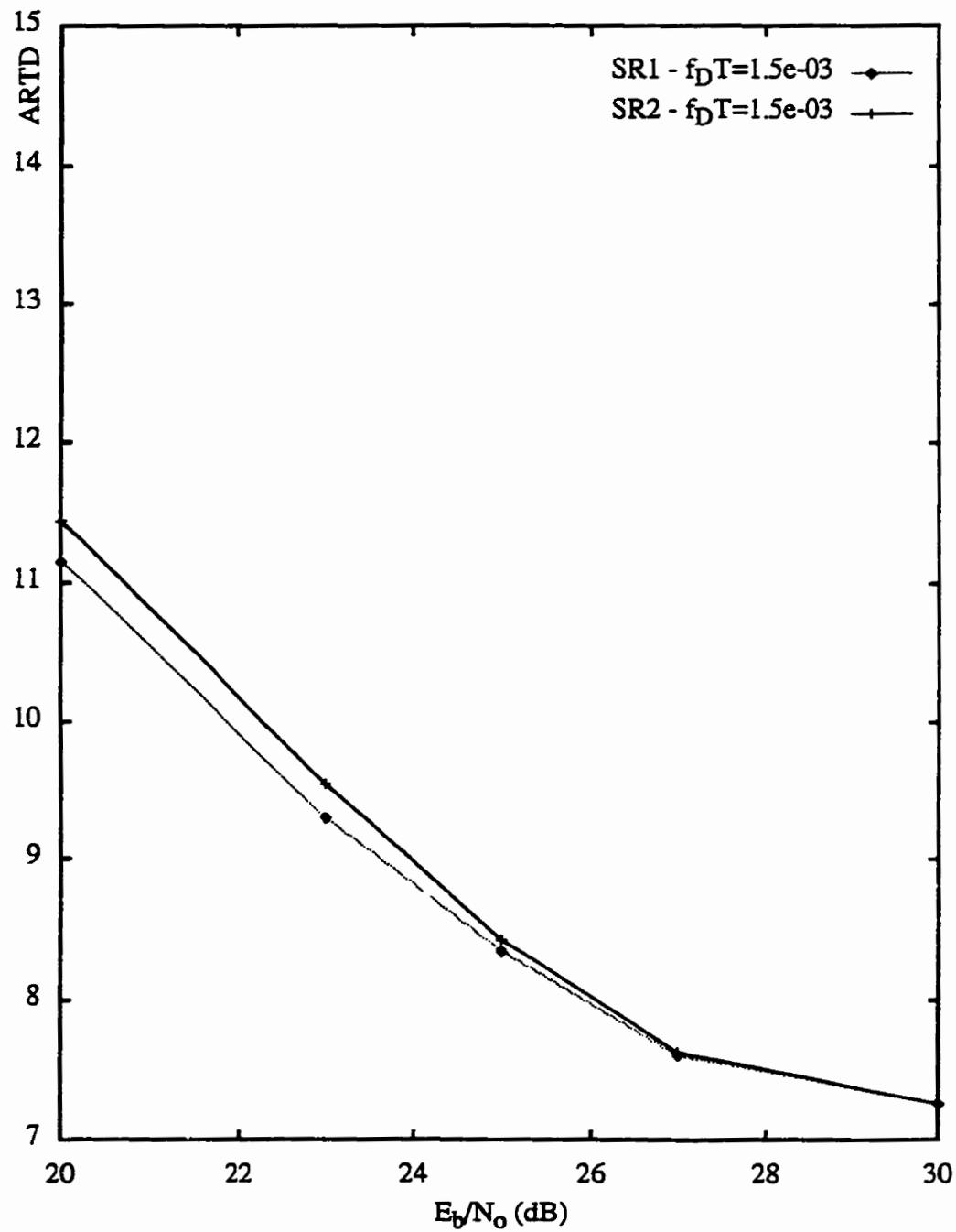


Figure 5.8 La valeur moyenne de RTD en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements moyens  $f_D T=1.5 \times 10^{-3}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

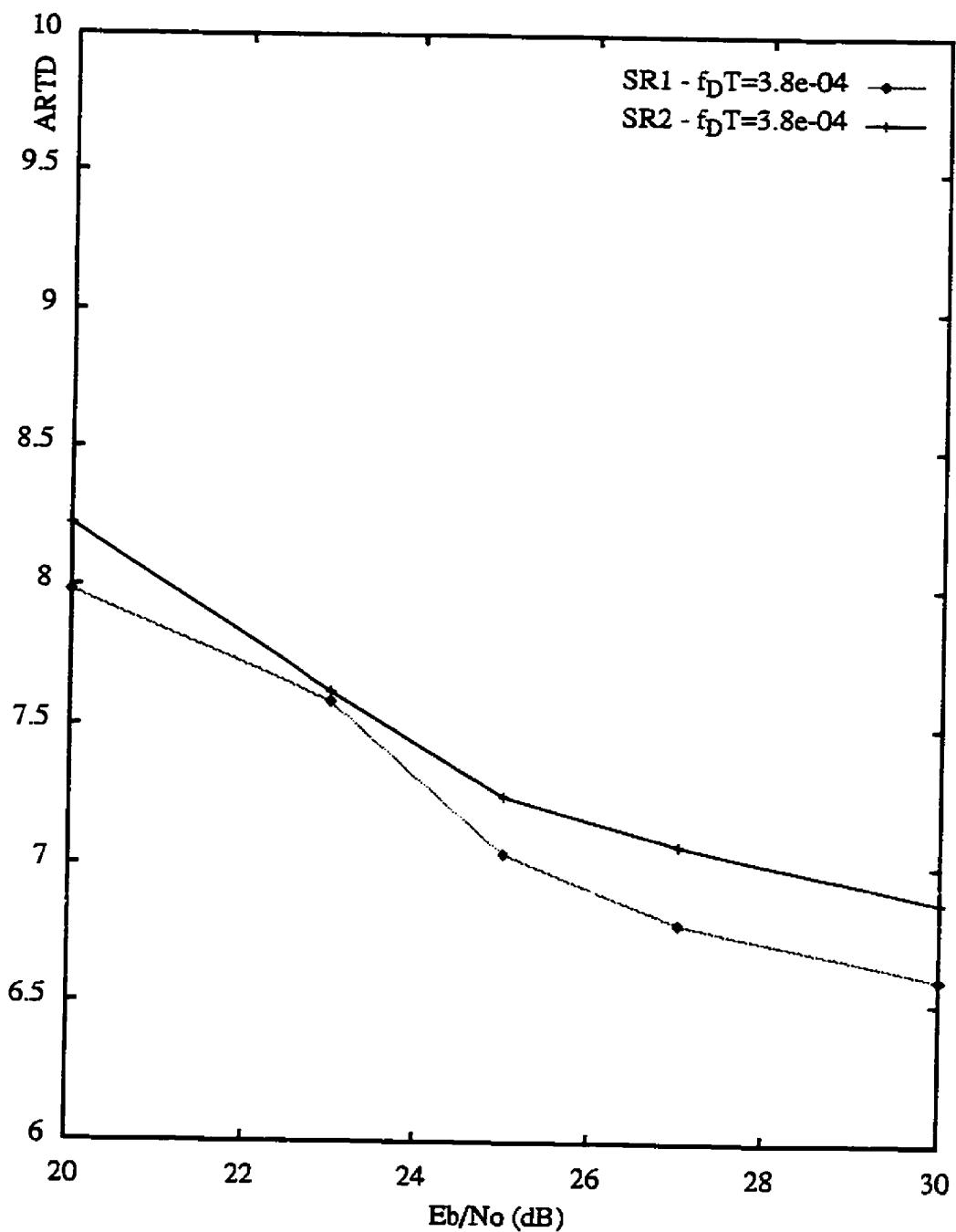


Figure 5.9 La valeur moyenne de RTD en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements lents  $f_D T=3.8 \times 10^{-4}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

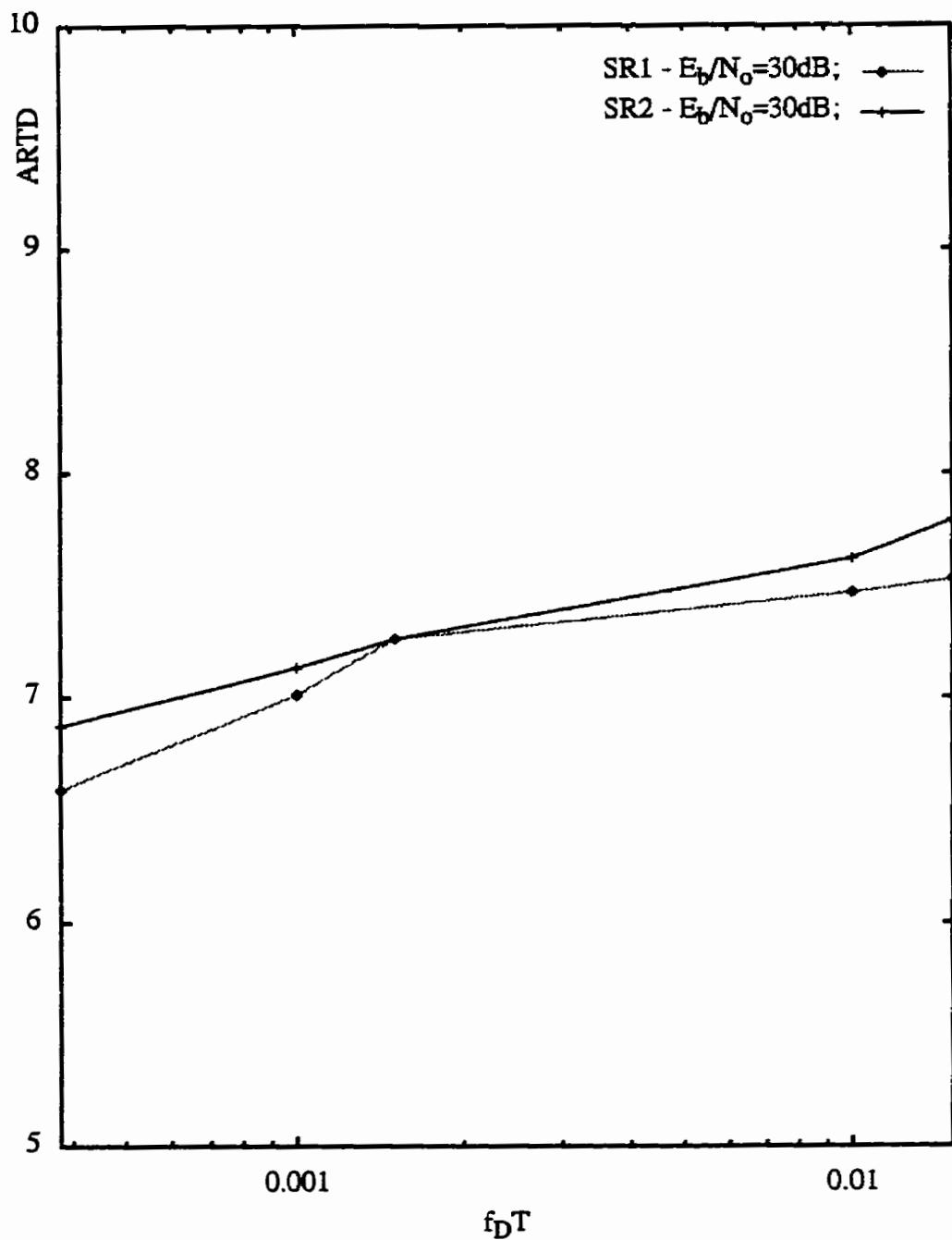


Figure 5.10 La valeur moyenne de RTD en fonction de  $f_D T$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=30 \text{ dB}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

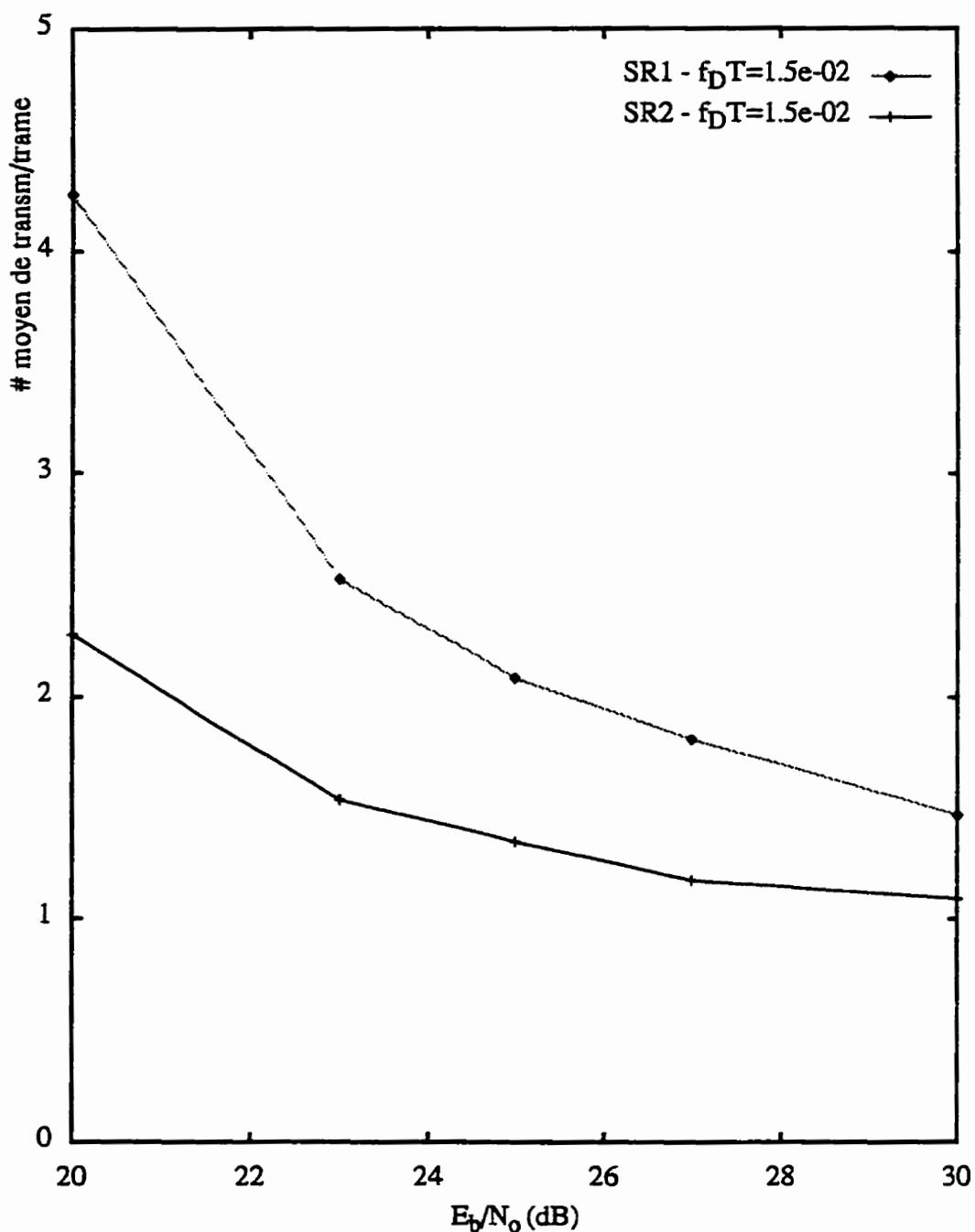


Figure 5.11 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements rapides  $f_D T=1.5 \cdot 10^{-2}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

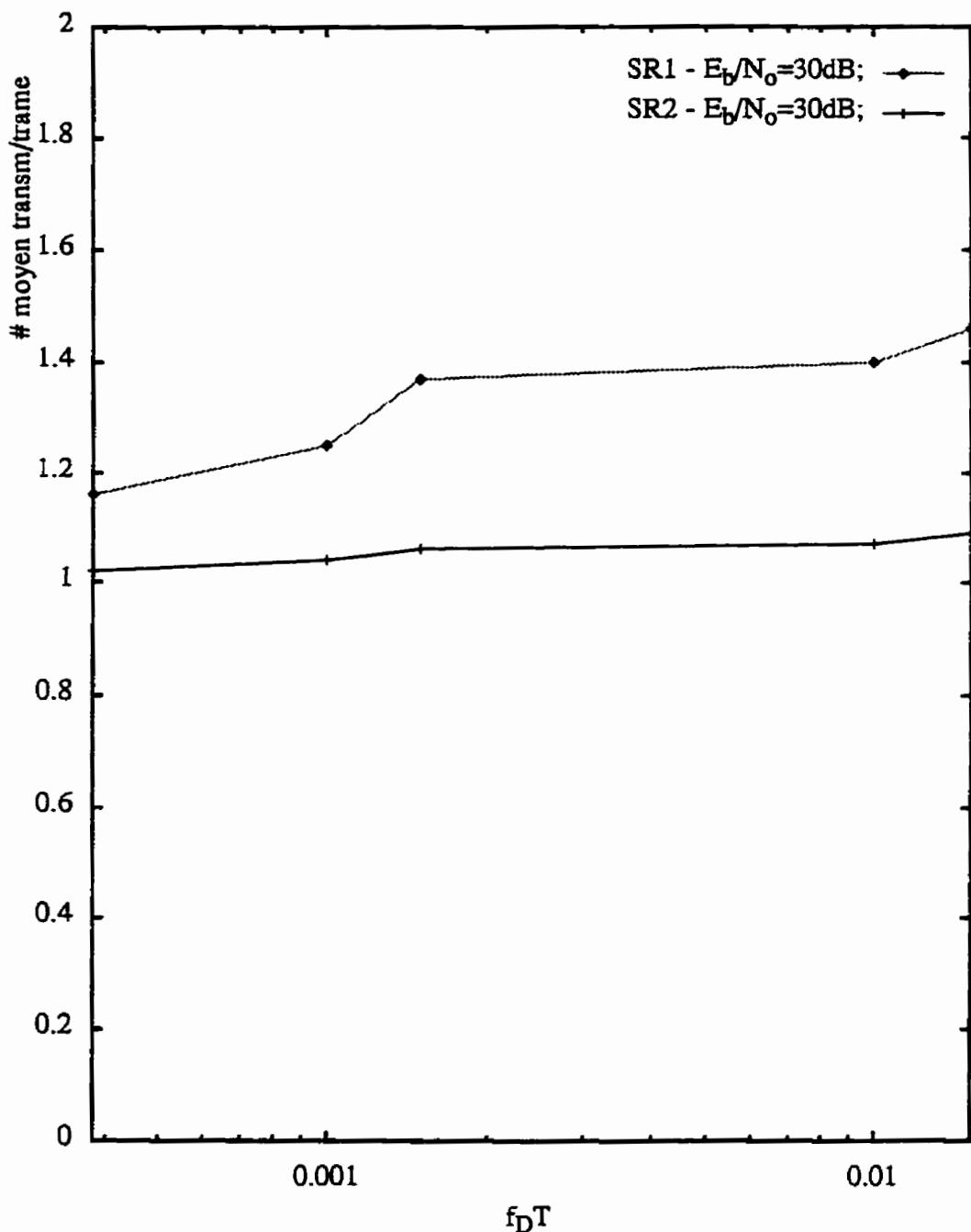


Figure 5.12 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de  $f_{DT}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=30 \text{ dB}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

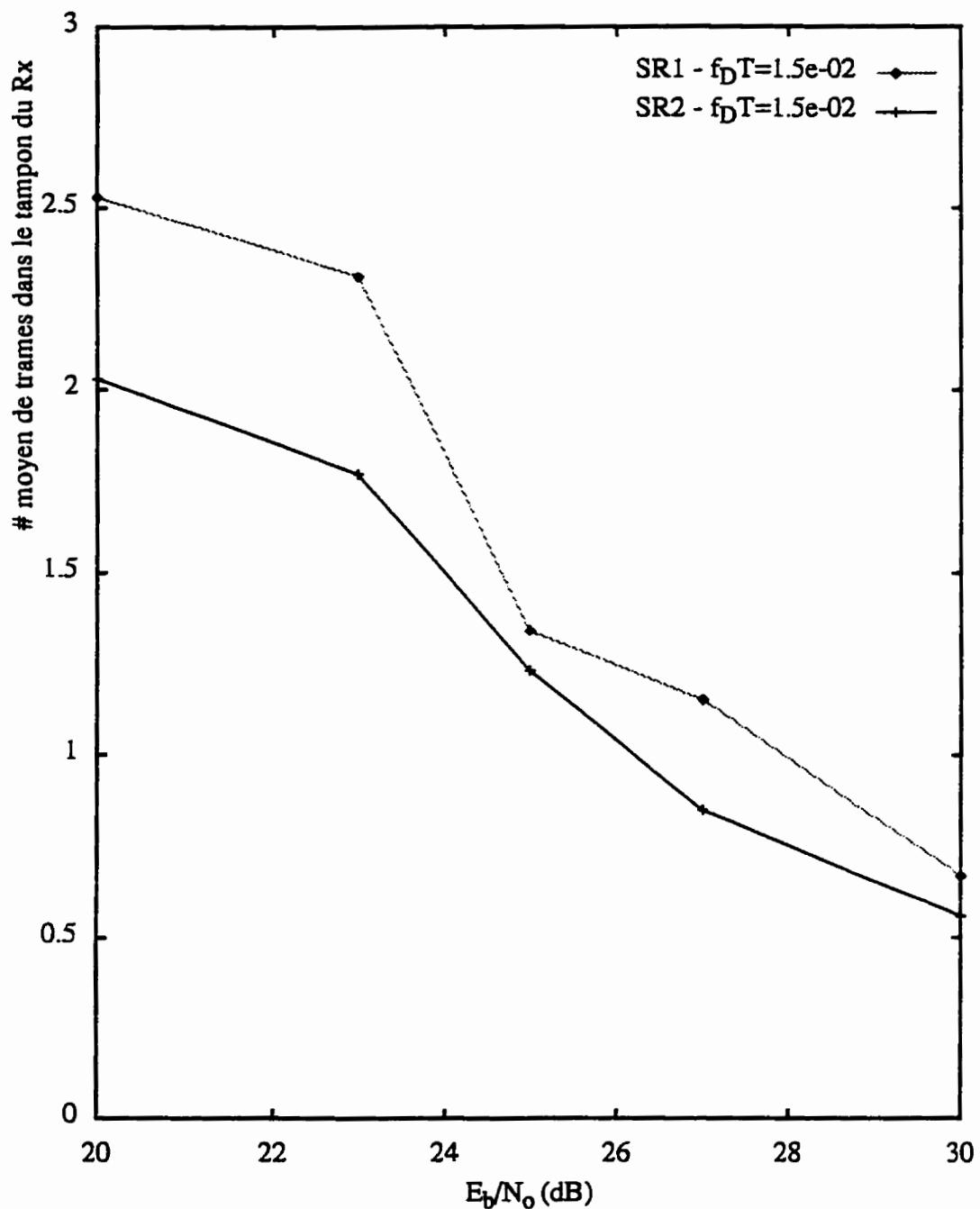


Figure 5.13 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de  $E_b/N_0$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Canal à évanouissements rapides  $f_D T=1.5 \times 10^{-2}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

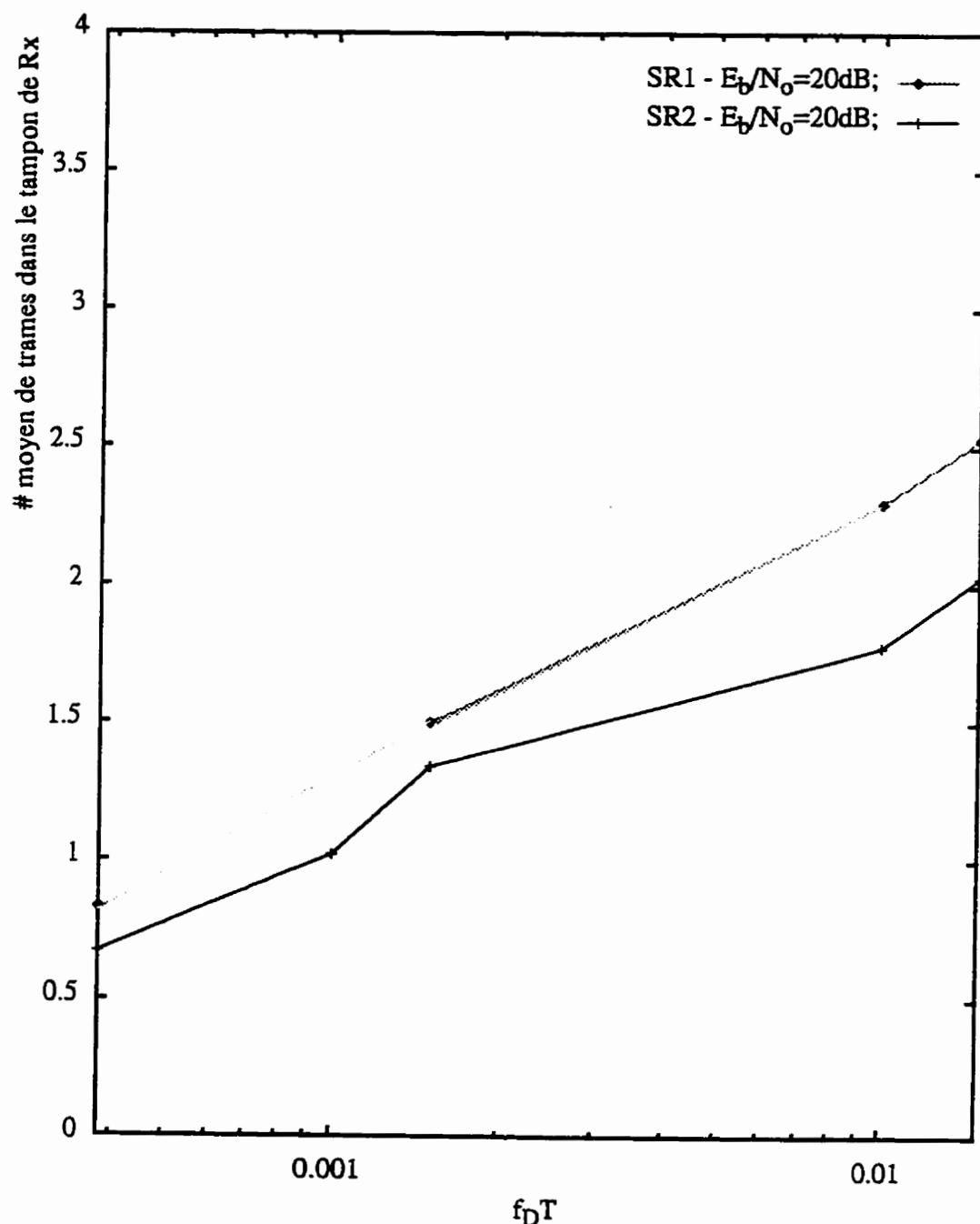


Figure 5.14 Nombre moyen de trames dans le tampon du récepteur en fonction de  $f_{DT}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ . Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_o=20$  dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

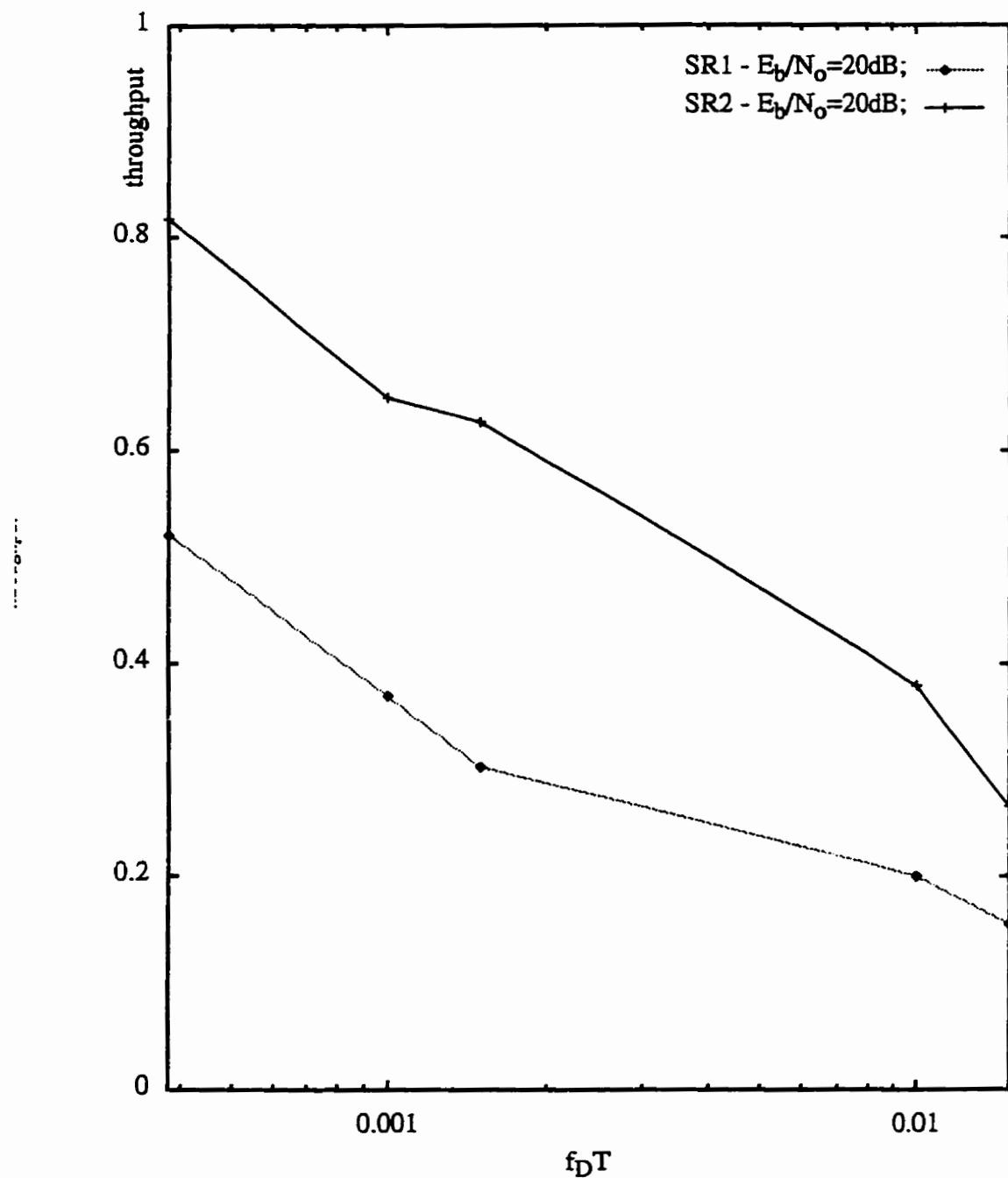


Figure 5.16 Throughput en fonction de  $f_D T$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ , RTD=durée de 30 trames, la période de time-out pour SR1 ARQ=durée de 40 trames. Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_o=20$  dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

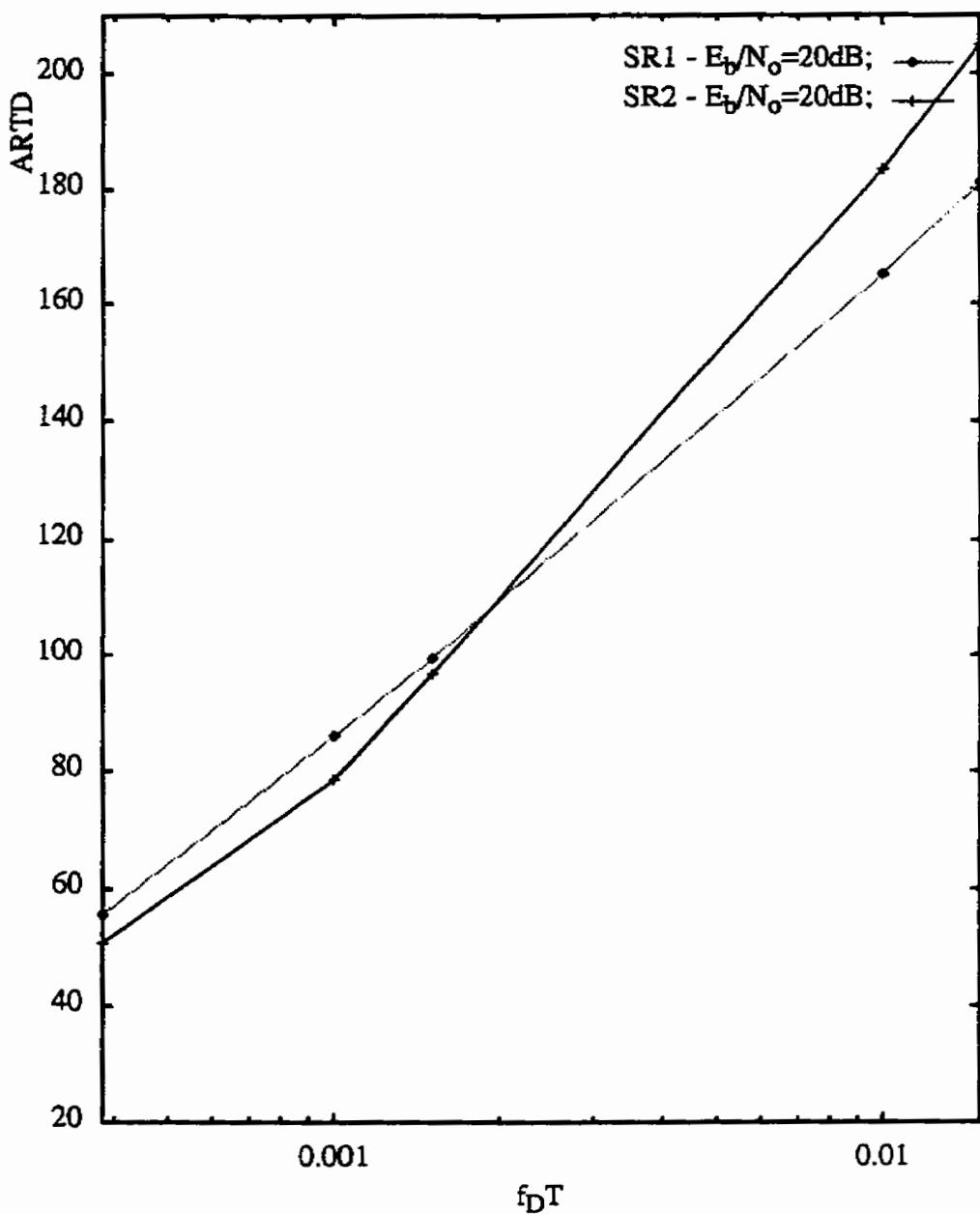


Figure 5.17 La valeur moyenne de RTD en fonction de  $f_{DT}$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ , RTD=durée de 30 trames, la période de time-out pour SR1 ARQ=durée de 40 trames. Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=20\text{ dB}$ . Le tampon du récepteur est de taille infinie.

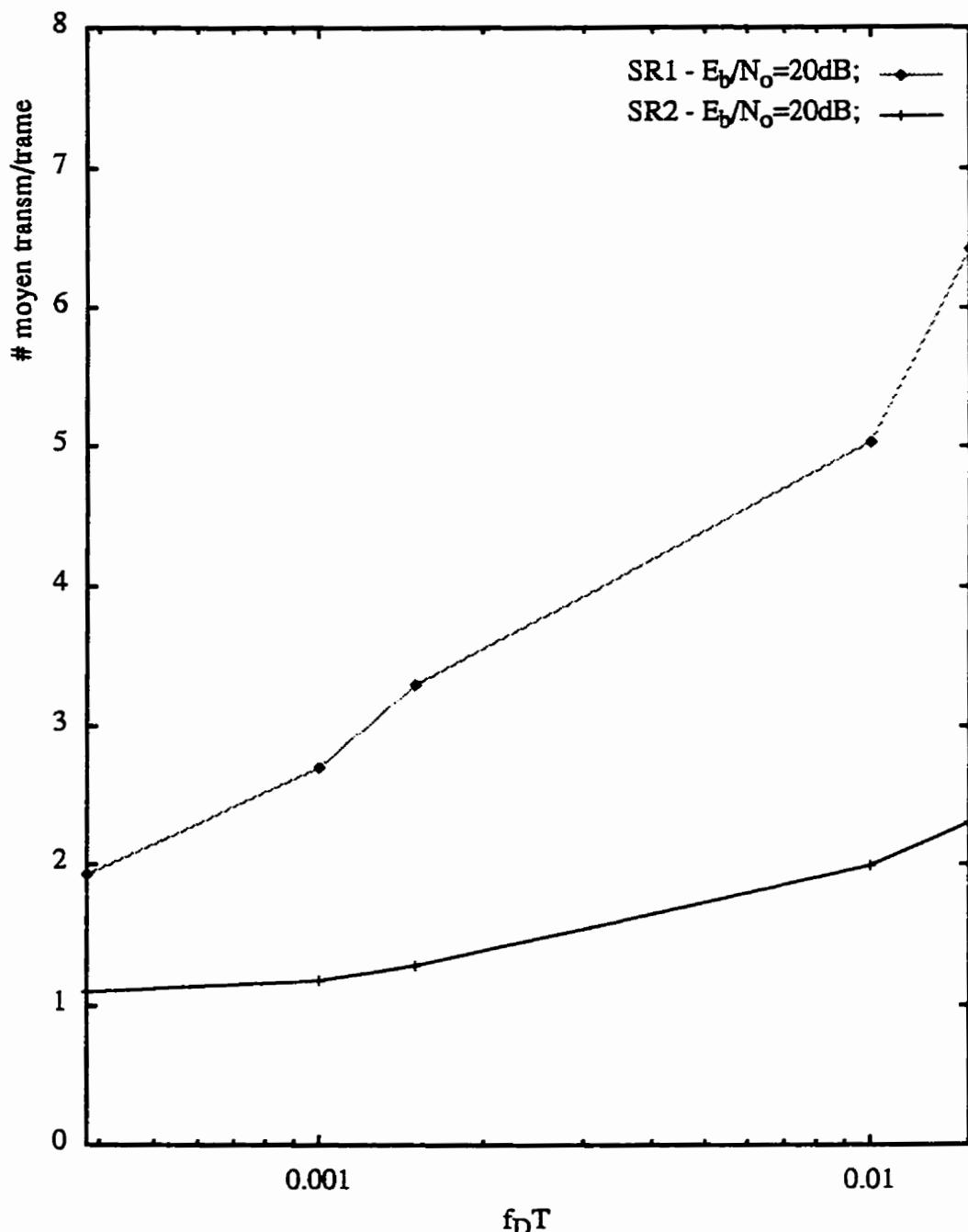


Figure 5.18 Nombre moyen de transmissions par trame en fonction de  $f_D T$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ , RTD=durée de 30 trames, la période de time-out pour SR1 ARQ=durée de 40 trames. Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=20$  dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

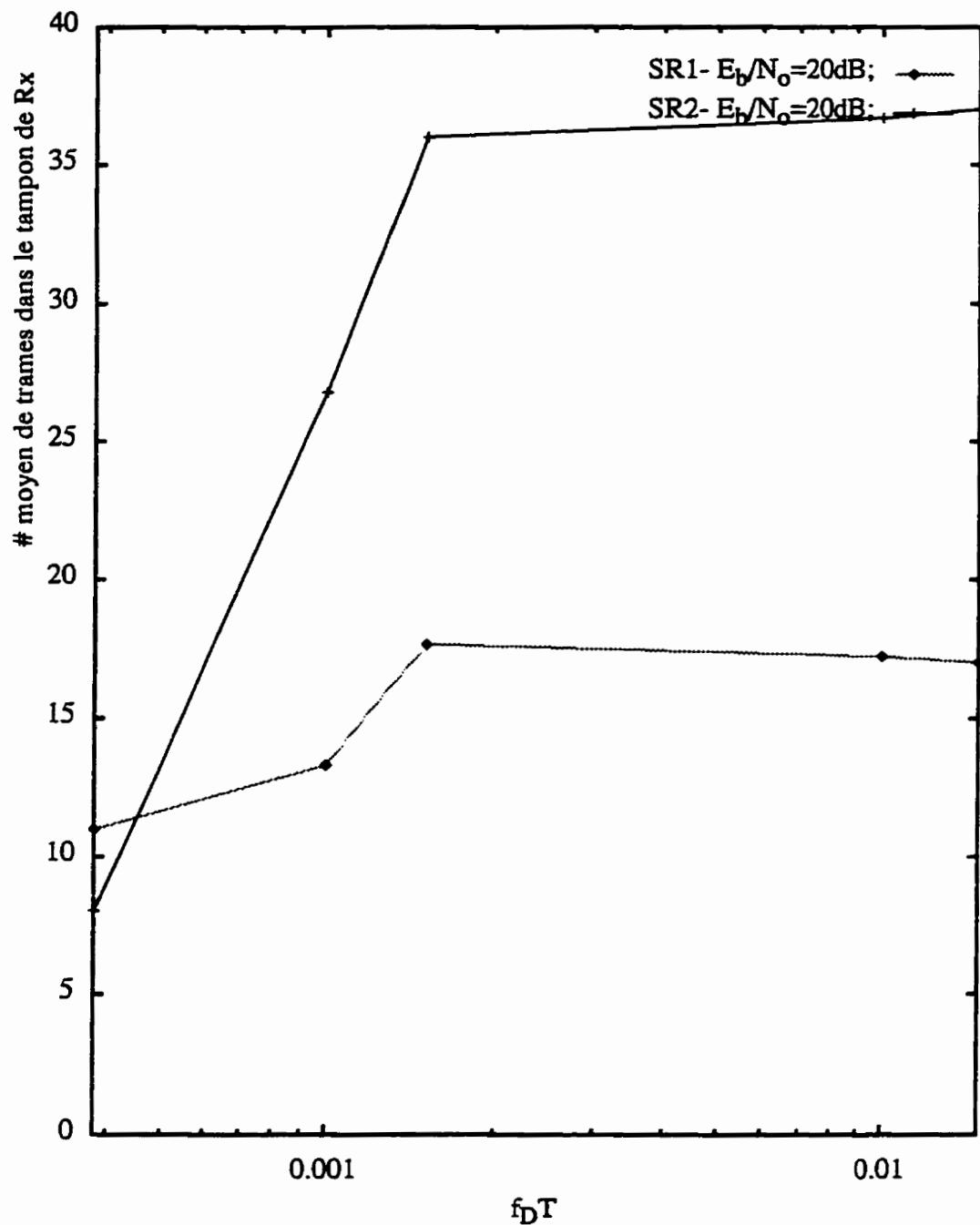


Figure 5.19 Nombre moyen de trames dans le tampon du Rx en fonction de  $fDT$ .  $\alpha=500$ ,  $\beta=20$ ,  $\Lambda=1$ , RTD=durée de 30 trames, la période de time-out pour SR1 ARQ=durée de 40 trames. Le rapport signal à bruit est constant  $E_b/N_0=20$  dB. Le tampon du récepteur est de taille infinie.

## CHAPITRE 6

### CONCLUSION

L'objectif de ce travail a été d'améliorer le protocole SR ARQ standard afin qu'il soit capable de satisfaire les exigences des systèmes de troisième génération. Le travail a été également orienté en fonction d'un grand degré de compatibilité avec les systèmes existants.

Ce mémoire nous a permis de proposer et d'évaluer une modification simple du protocole SR ARQ standard. La modification introduit une ou plusieurs trames de NAKs qui remplacent un seul NAK sur la trame de données dans le protocole SR ARQ standard.

Les résultats de simulations ont montré que le nouveau protocole peut garantir la transmission correcte de NAK, en transmettant une seule trame de NAKs dans les cas suivants:

- tous les cas des canaux binaires symétriques où la probabilité d'erreur par bit n'est pas inférieure à 0.1. Ceci a été vérifié pour la longueur d'une trame égale à 500 bits et un NAK contenant 25 bits.
- les canaux à évanouissements de Rayleigh avec un taux d'évanouissements supérieur ou égal à  $f_D T = 3.8 \cdot 10^{-4}$  et un rapport signal à bruit supérieur ou égal à  $E_b/N_0 = 20$  dB si la trame de la longueur de 500 bits contient au moins 25 NAKs.

Pour les cas de canaux binaires symétriques, le nouveau protocole améliore significativement le throughput avec une augmentation maximale lorsque le canal direct est dans un bon état et le canal de retour est très bruité. En plus, le nouveau protocole demande un plus petit tampon à l'émetteur. Ces avantages sont aussi observés dans les communications par satellites. Toutefois, le très léger inconvénient du nouveau protocole est plus accentué en présence de grandes distances entre l'émetteur et le récepteur. Dans les communications terres-

tres, le protocole SR2 ARQ augmente quelque peu la taille du tampon du récepteur. Cette augmentation est plus forte mais toujours facilement acceptable dans les communications par satellites.

Les résultats de simulations pour les canaux d'évanouissements mentionnés, montrent que le nouveau protocole est supérieur au protocole standard au niveau du throughput et la mémoire exigée à l'émetteur, surtout dans le cas d'évanouissements lents. De plus, pour les paramètres de communications terrestres, il permet une réduction légère de la taille exigée du tampon au récepteur. Cette amélioration légère n'est pas observée dans les communications par satellites où au contraire, le nouveau protocole demande une raisonnable augmentation de taille du tampon au récepteur pour les évanouissements moyens et rapides.

Les résultats de toutes les simulations montrent que, en général, les deux protocoles SR ARQ engendrent le même délai moyen de transmission (ARTD). Ce délai est très significatif pour les applications par satellites.

Enfin, nous pouvons dire que le nouveau protocole représente une solution très attrayante pour les communications terrestres et par satellites. Il peut diminuer les effets du bruit sur le canal de retour et il ne provoque pas de problèmes de tamponnage. La supériorité du throughput et la réduction de la mémoire de l'émetteur entraînent une augmentation légère du tampon de récepteur. Cette mémoire est très facile à réaliser et elle n'est pas coûteuse. En plus, le coût principal d'implémentation du protocole SR2 ARQ est très petit. Il serait maintenant désirable de diminuer les effets du bruit sur le canal direct et tenter de diminuer le délais de transmission dans les communications par satellites.

Comme recherches futures, on pourrait suggérer:

- Un simulateur peut être développé pour évaluer l'influence du nombre de trames de NAKs sur les performances du nouveau protocole dans différents types de canaux à évanouissements.
- Les modèles utilisés dans ce mémoire pourraient encore être raffinés, en utilisant le

processus de codage/décodage. La supposition principale dans nos simulations des deux protocoles SR ARQ est que les processus de codage et de décodage ne sont pas exécutés explicitement dans les simulations.

- Les modèles utilisés dans ce mémoire pourraient être complétés, en étudiant un canal à évanouissements de Rice.
- Un modèle diminuant les effets du bruit sur le canal direct pourrait être combiné avec le modèle du nouveau protocole.

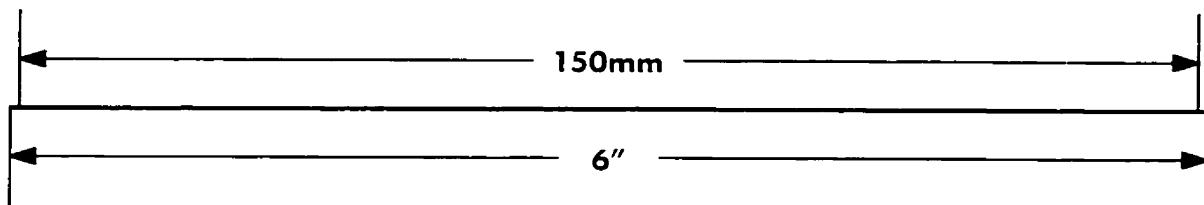
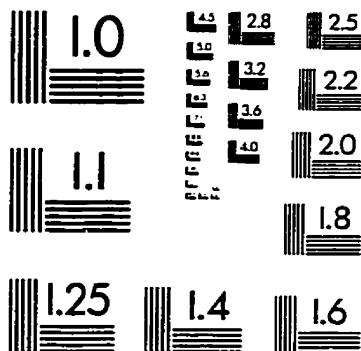
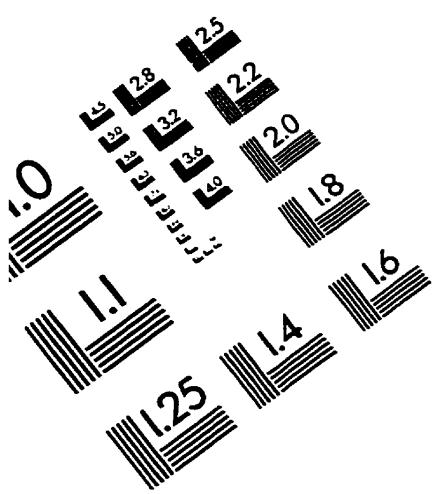
## Références

- [1] Advanced data Communication Control Procedures (ADCCP), American National Standard Institute, Washington, D.C., 1977.
- [2] M. Aghadavoodi Jolfaei, S.C.Martin, J.Mattfeldt, "A New Selective-Repeat Protocol for Point-to-Multipoint Communication", IEEE Int Conf Commun 1993, pp. 1113-1117.
- [3] R. J. Benice, A. H. frey, Jr., "An Analysis of Retransmission Systems", IEEE Trans. Commun. Technol., COM-12, pp. 135-145, Dec 1964.
- [4] K. Bullington, "Radio Propagation Fundamentals", BSTJ, vol. 36, pp. 593-626, Mai 1957.
- [5] H. O. Burton, D. D. Sullivan, "Errors and Error Control", Proc. IEEE, 60(11), pp. 1293-1310, Nov 1972.
- [6] W. Bux, K. Kummerle, H.L. Truong, "Balanced HDLC procedures: A performance analysis", IEEE Trans. Commun., vol. COM-28, pp. 1889-1980, Nov 1980.
- [7] L. Chang, "Throughput estimation of ARQ protocols for a Rayleigh fading channel using fade- and interfade-duration statistics", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 40, no. 1, pp. 223-229, Feb 1991.
- [8] Y. J. Cho, C. K. Un, "Performance analysis of ARQ error controls under Markovian block error patterns", IEEE Trans. Commun., vol. COM-42, pp. 2051-2061, Apr 1994.
- [9] J. Chuang "Comparaison of two ARQ protocols in a Rayleigh fading channel", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 39, no. 4, pp. 367-373, Nov 1990.
- [10] J. Conan, D. Haccoun, H-H Hoang, "Error control techniques for data transmission over satellite channels", Rapport Technique EP-75-R-32 (Ecole Polytechnique de Montréal), Nov 1975.
- [11] R. A. Conroe, D. J. Costello, Jr., "ARQ schemes for data transmission in mobile radio systems," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. SAC-pp. 472-481, July 1984.
- [12] G. E. Corazza, M. Ruggieri, F. Santucci, F. Vatalaro, "Handover procedures in integrated satellite and terrestrial mobile systems", International Mobile Satellite Conference, June 16-18, 1993, Pasadena, California, pp. 143-148.

- [13] C. Despins, D. Haccoun, "A New Selective-Repeat ARQ Protocol and Its Applications to High Rate Indoor Wireless Cellular Data Links", Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Com., Yokohama, Japan, Sept 1993, pp. 317-321.
- [14] C. Despins, D. Haccoun, S. Cervetti, "A New Selective-Repeat ARQ Protocol with Multiple NAK", soumis à IEEE Transactions on Communications.
- [2] F. Gagnon, "Communications numériques fiables dans les canaux à évanouissements", Thèse de Philosophiae Doctor, Ecole Polytechnique de Montréal, Quebec, Canada, juin 1991.
- [16] General Information: Binary Synchronous Communication, IBM Publication GA27-3004, IBM Corp., White Plains, N.Y., 1969.
- [17] N. Guo, S. D. Morgera, "Frequency Hopped ARQ for Wireless Network Data Services", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, no. 8, pp. 1324-1337, Oct 1994.
- [18] W. C. Jakes, "Microwave Mobile Communications", Wiley, New York, 1974.
- [19] K. G. Johannsen, M. W. Bowles, S. Milliken, A. R. Cherrette, G. C. Busche, "Trends in Mobile Satellite Communication", International Mobile Satellite Conference, June 16-18, 1993, Pasadena, California, pp. 157-162.
- [20] J. R. Kersey, "Synchronous Data Link Control", Data Commun., May/June 1974
- [21] S. Lin, D.J. Costello, Jr., M.J. Miller, "Automatic-Repeat Request Error Control Schemes", IEEE Commun. Mag., pp. 5-17, Dec 1984.
- [22] S. Lin, D.J. Costello, Jr., "Error Control Coding: Fundamentals and Applications", Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice-Hall, 1983.
- [23] D-L Lu, J-F Chang, "Analysis of ARQ Protocols via signal flow graphs", IEEE Trans. Commun., vol 37, pp. 245-251, Mar 1989.
- [24] E. Lutz, "Simulation of FEC/ARQ data transmission using stored land mobile satellite channels", Proc. 1986 IEEE Veh. Technology. Soc. Conf., May 1986, pp. 109-115.
- [25] J.G. Proakis, "Digital Communications", McGraw-Hill, 1989.
- [26] D. Towsley and J. K. Wolf, "On the statistical analysis of queue lengths and waiting times for statistical multiplexers with ARQ retransmission schemes", IEEE Trans. Commun., vol. COM-27, pp. 693-702, Apr. 1979.

- [27] W. J. Vogel and J. Goldhirsh, "Multipath Fading at L Band for Low Elevation Angle, Land Mobile Satellite Scenarios", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 13, No. 2, Feb. 1995.
- [28] B. R. Vojcic, R. L. Pickholtz and L. B. Milstein, "Performance of DS-CDMA with Imperfect Power Control Operating Over a Low Earth Orbiting Satellite Link", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 12, No. 4, Mai 1994.
- [29] E. J. Weldon Jr., "An improved selective-repeat ARQ strategy", IEEE Trans. Commun.,- vol. COM-30, no. 3, pp. 480-486, Mar 1982.

IMAGE EVALUATION  
TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc  
1653 East Main Street  
Rochester, NY 14609 USA  
Phone: 716/482-0300  
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved

