

Article

## **Evaluation de la capacité d'un système de messagerie par microsatellite en orbite basse**

**Adnane ADDAIM, Centre de Recherches et d'Etudes Spatiales Ecole Mohammadia d'Ingénieurs Avenue Ibn Sina B.P 765 Agdal Rabat Maroc, addaim@emi.ac.ma.**

**Abdelhaq KHERRAS, Responsable du Centre de Recherches et d'Etudes Spatiales, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs Avenue Ibn Sina B.P 765 Agdal Rabat Maroc, kherras@emi.ac.ma.**

**El Bachir ZANTOU, Centre de Recherches et d'Etudes Spatiales Ecole Mohammadia d'Ingénieurs Avenue Ibn Sina B.P 765 Agdal Rabat Maroc, zantou@emi.ac.ma.**

Date de publication : 29 décembre 2006

### **Résumé**

---

Nous allons discuter de l'utilisation d'un microsatellite en orbite basse pour un serveur de messagerie. Pour maintenir le coût global du système très bas, la charge utile de microsatellite est maintenue simple tandis que toute la complexité est apportée aux terminaux au sol. Dans cet article, nous allons nous intéresser à l'évaluation de la capacité de Aloha en tranche dans les systèmes de messagerie par microsatellite en orbite basse. Nous entendons par capacité, le nombre maximum d'utilisateurs qui peuvent transmettre leurs paquets avec succès.

### **Abstract**

---

The use of low earth orbit microsatellite to provide messaging service is discussed. To keep the system overall cost very low, the satellite payload is kept simple whereas all the complexity is brought to the ground terminals. In this article, we will be interested in the evaluation of the capacity of Slotted Aloha in the messaging system by microsatellite in low earth orbit. In such a system, an appropriate measure of the performance is the capacity which is the maximum number of terminals that the system supports.

### **Table des matières**

---

- 1. INTRODUCTION**
- 2. LA DESCRIPTION DU SYSTÈME**
- 3. LE BILAN DE LA LIAISON**
- 4. LE DÉBIT ÉCOULÉ**
- 5. TEMPS DE RÉPONSE**
- 6. CONCLUSION**

### **Texte intégral**

---

## **1. INTRODUCTION**

En raison de sa simplicité, pendant plus de deux décennies, la méthode d'accès multiple Aloha en tranche a reçu l'attention non seulement des ingénieurs de réseau informatique, mais également les chercheurs du réseau de communication (Abramson, 1977) (Bertsekas et Gallager, 1987). Le principe de ce protocole est que tous les terminaux émettent en même temps, reçoivent en même temps, donc communiquent en même temps sur la même bande de fréquence. Il s'agit donc d'une conversation à plusieurs, principe opposé à celui de la commutation qui procède en allouant à chaque conversation des ressources cloisonnées les unes par rapport aux autres.

La transmission est complètement décentralisée. A la fin de la transmission de chaque paquet de chaque

terminal, la source reçoit l'information si le paquet est bien reçu ou s'il y a eu une collision. Dans ce dernier cas, il y aura une retransmission à un instant ultérieur. Nous utilisons ALOHA en tranche dans notre système satellitaire de messagerie en raison de sa simplicité et pour maintenir le coût global du système très bas. Nous établissons un modèle mathématique pour évaluer la performance du système avec un nombre fini d'utilisateurs. En conclusion, nous examinons la performance du système par des exemples numériques. Dans un tel système, deux mesures appropriées de la performance sont utilisées : le débit utile et le temps de réponse. Elles seront discutées en détail dans cet article.

## 2. LA DESCRIPTION DU SYSTÈME

Le système consiste en la transmission de messages alphanumériques courts entre un certain nombre de terminaux portables mobiles (véhicules, bateaux de pêche, etc.) via un microsatellite en orbite basse. La suite de cette étude permettra de déterminer le nombre de ces terminaux.

La charge utile de la messagerie est de type *store-and-forward*, considérée comme un serveur de messagerie. La topologie utilisée du réseau est la topologie en étoile qui permet la connectivité point à multipoints. Les messages envoyés par les terminaux source passent à travers la charge utile messagerie où ils sont contrôlés et stockés en vue de les délivrer aux terminaux destinataires. L'Aloha en tranche est le moyen d'accès utilisé pour le lien du terminal source au microsatellite. Le terminal destinataire utilise aussi le protocole Aloha en tranche pour recevoir son message en émettant une requête. Cette topologie du réseau permet l'utilisation d'une charge utile plus petite en laissant beaucoup plus d'intelligence aux terminaux.

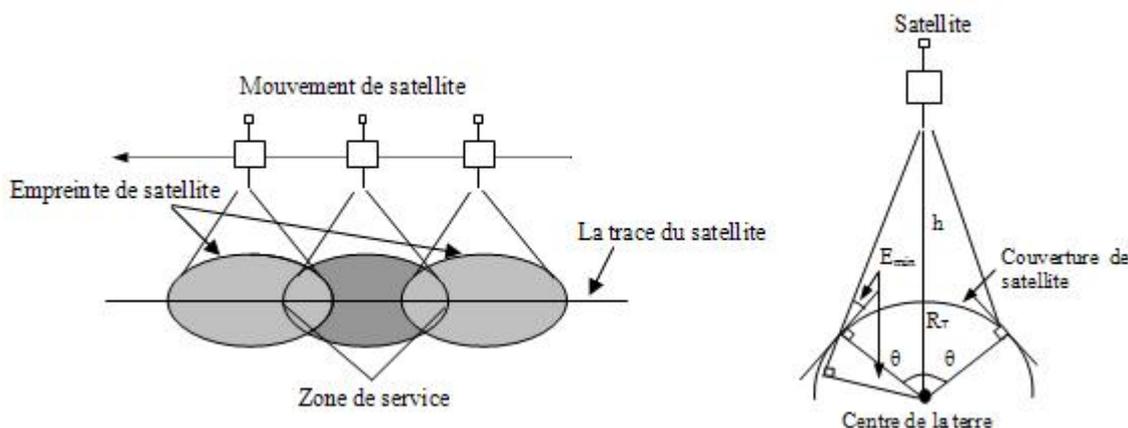
La couverture instantanée du microsatellite dépend de l'angle d'élévation minimum  $E_{min}$  sous lequel on désire acquérir le microsatellite. Cet angle est imposé par la qualité de la liaison affectée par les conditions de propagation des signaux. La couverture est déterminée par le demi angle  $\theta$  de l'empreinte du satellite mesuré au centre de la terre.

D'après un développement mathématique simple (voir figure 1), on trouve :

$$\theta = \left[ \text{Arcos} \left[ \frac{R_T}{R_T + h} \cos(E_{min}) \right] - E_{min} \right] \quad (1)$$

où

- $R_T$  : rayon de la terre (6378 Km)
- $h$  : altitude de l'orbite



**Figure 1. Couverture de satellite en orbite basse**

La période du satellite est liée au demi grand axe  $a$  de l'orbite par la troisième loi de Kepler (Pritchard, 1977) :

$$T_{sat} = 2 \Pi \left[ \frac{a^3}{\mu} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Avec

- $\mu = 3,986.10^{14} \text{ m}^3\text{s}^{-2}$ , constante d'attraction terrestre.
- $a = h + R_T$ , demi grand axe de l'orbite

Un terminal situé sur la trace du satellite dispose d'un temps de visibilité maximum  $T_u$  :

$$T_u = \frac{T_{sat} \times \theta}{\Pi} \quad (3)$$

La distance maximale entre deux terminaux dans la zone de couverture est :

$$D_{max} = 2 \times R_T \times \theta \quad (4)$$

Le temps maximum de décalage entre les deux extrémités de la zone de couverture est donné par :

$$T_{sh} = D_{max} / V_{sat} \quad (5)$$

La vitesse du satellite, pour une orbite circulaire, est constante et est donnée par la relation :

$$V_{sat} = \frac{2\Pi a}{T_{sat}} \quad (6)$$

De (3), (4), (5) et (6), on obtient :

$$T_{sh} = \frac{R_T}{a} T_u \quad (7)$$

Les terminaux (Zantou et Kherras, 2004) sont équipés d'une petite unité de traitement qui, grâce à un logiciel d'orbitographie, reconnaît les instants de passage du satellite et réalise la compensation Doppler des fréquences d'émission et de réception. Pour que le logiciel d'orbitographie fasse ses calculs, il a besoin de trois paramètres à savoir, la position géographique, le temps UTC et les éphémérides. Les deux premiers paramètres sont donnés par le récepteur GPS interne. Le troisième paramètre est donné par la station de contrôle qui communique régulièrement (1 à 2 fois par quinzaine de jours) les éphémérides mis à jour du satellite à tous les terminaux. Les architectures fonctionnelles des terminaux et de la charge utile de messagerie sont données respectivement par la figure 2 et la figure 3.

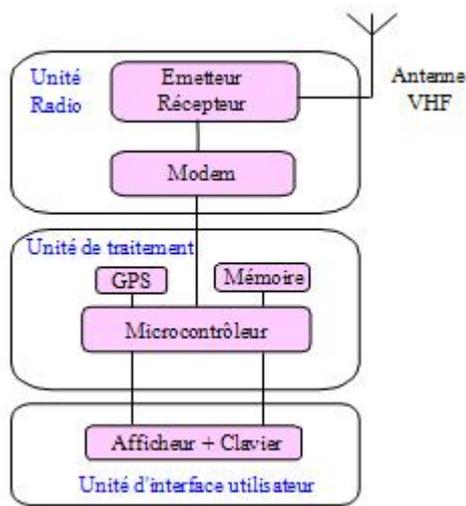


Figure 2. L'architecture fonctionnelle d'un terminal

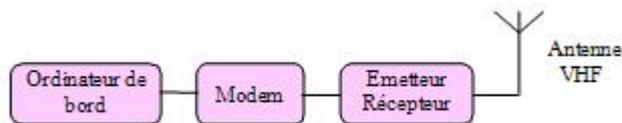


Figure 3. L'architecture fonctionnelle de la charge utile

### 3. LE BILAN DE LA LIAISON

La commission FCC (*Federal Communications Commission*) a alloué aux systèmes radio mobile par satellite en orbite basse la bande 140-150 MHz. Cette bande est lourdement utilisée par les satellites commerciaux et expérimentaux (Paffet, Jeans *et al*, 1998). En effet, les équipements de télécommunication, aussi bien pour le segment spatial que pour le segment terrestre, sont disponibles et moins chers comparés à ceux opérant à hautes fréquences. Les conditions de propagation sont aussi favorables à ces fréquences (Paffet, Jeans *et al*, 1998).

Le bilan de liaison, que nous allons voir par la suite dans la table 1, montre comment un service acceptable peut être obtenu théoriquement entre un microsattellite avec antenne omnidirectionnelle simple opérant à la fréquence 145 MHz à l'altitude 650 km et un terminal utilisant une antenne quart d'onde.

Table 1 : Bilan de liaison

Parametres du Terminal	
Gain d'antenne	0 dBi
Puissance émission	5 W
Perte d'antenne	0.5 dB
$T_{sys}$	2000 k
PARAMETRES DU CANAL	
Atténuation d'espace libre	- 141 dB <sup>*1</sup>
Pertes de polarisation	3 dB
Pertes additionnelles	0.5 dB
Parametres du satellite	
Gain d'antenne	0 dBi
Puissance émission	1 W
Perte d'antenne	0.5 dB
$T_{sys}$	5000 k
Parametres operationnels	
Débit	1200 baud
$E_b/N_0$ requis	13.6 dB <sup>-2</sup>
Marge pour la voie montante	
$E_b/N_0$ estimé	21.42 dB <sup>-3</sup>
Marge	7.82 dB
Marge pour la voie descendante	
$E_b/N_0$ estimé	18.42 dB <sup>-3</sup>
Marge	4.82 dB

\*1 L'atténuation d'espace libre est calculée par Maral et Bousquet (2002) :

$$FSL_{db} = 32.45 + 20\log(D_{km}) + 20\log(F_{MHz}) \quad (8)$$

avec  $F_{MHz}$  est la fréquence de transmission, et  $D_{km}$  est la distance entre le terminal et le satellite, calculée par :

$$D_{km} = \sqrt{(R_T + h)^2 - (R_T \cdot \cos(E))^2} - R_T \cdot \sin(E) \quad (9)$$

\*2 Nous utilisons la démodulation non-cohérente FSK. Le rapport  $E_b/N_0$  requis fixe un taux d'erreur de  $2 \times 10^{-5}$  (Proakis, 1989),

\*3 Une estimation de  $E_b/N_0$  s'écrit comme suit :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P L_i G_t L_s L_a G_r}{k T_s R} \quad (10)$$

Avec :

- P = Puissance émission
- $L_i$  = Perte d'antenne
- $G_t$  = Gain d'antenne
- $L_s$  = Atténuation d'espace libre
- $L_a$  = Pertes diverses
- $G_r$  = Gain d'antenne réception
- K = Constante de Boltzman
- $T_s$  = Température Système
- R = Débit binaire

La modulation FSK a été choisie en raison de sa simplicité et de sa robustesse prouvée dans les systèmes

satellites. Son utilisation avec le protocole ARQ (*Automatic Repeat Request*) fournit des transmissions sans erreurs entre les terminaux et le microsatellite.

#### 4. LE DÉBIT ÉCOULÉ

L'ALOHA en tranches ou *Slotted ALOHA* (Abramson, 1992) permet d'améliorer l'utilisation du canal, au prix d'une synchronisation temporelle entre tous les émetteurs, par rapport à l'Aloha pure ou *Unslotted ALOHA*. Le temps est discrétisé, c'est-à-dire découpé en tranches appelées slots. La durée d'un slot représente le temps de transmission d'un paquet. Les stations sont synchronisées et savent quand un slot commence. Dans notre système, la synchronisation de tous les terminaux se ferait par le biais du récepteur GPS intégré dans chaque terminal. Une station peut transmettre un paquet seulement au début d'un slot. Les terminaux commencent leurs transmissions, sous forme de paquets de longueur constante, aux instants communs d'horloge, chaque fois qu'ils ont une information à envoyer. On suppose que tous les paquets sont de même longueur. Un paquet transmis peut être reçu incorrectement ou perdu complètement en raison de deux types d'erreurs:

- erreurs dues aux bruits aléatoires
- erreurs provoquées par des collisions.

Dans cet article, nous supposons que le premier type d'erreur est ignoré. Nous tiendrons compte seulement des erreurs provoquées par collision de paquets. Cependant, dans ce système, le terminal peut toujours découvrir si un paquet a été détruit en surveillant le temporisateur du protocole AX.25, qui sera utilisé dans la section V dans le calcul du temps de réponse. Si le paquet était impliqué dans une collision, le terminal attend un délai aléatoire avant de retransmettre le même paquet.

Soient  $S_{ui}$  la probabilité d'une transmission réussie par l'utilisateur  $i$  pendant l'intervalle de temps  $\tau$  (durée d'un paquet) et  $G_{ui}$  la probabilité totale de transmission de l'utilisateur  $i$  pendant le même temps  $\tau$ , cette dernière comprend les nouveaux paquets ainsi que ceux retransmis. De toute évidence,  $S_{ui}$  est inférieure ou égale à  $G_{ui}$ .

Dans le cas où les  $N_u$  utilisateurs sont identiques, c'est à dire  $G_{ui} = G_u$ , quel que soit  $i \in \{1, \dots, N_u\}$ , alors la probabilité pour que le nombre de paquets émis par les utilisateurs, pendant  $\tau$ , soit égal à  $k$ , suit la loi binomiale de paramètres  $G_u$  et  $k$  ( $G_u < 1$  car l'utilisateur ne peut pas transmettre plus qu'un paquet par slot) (Kleinrock, 1975) :

$$P(k; G_u) = \begin{cases} C_k^{N_u} G_u^k (1 - G_u)^{N_u - k} & k \leq N_u \\ 0 & k > N_u \end{cases} \quad (11)$$

La probabilité de succès  $P_{suc}$  pour que l'utilisateur  $i$  transmette avec succès un paquet pendant n'importe quel slot, est égale à la probabilité pour que les  $N_u - 1$  autres utilisateurs n'émettent aucun paquet pendant ce même slot (pour éviter la collision), ce qui correspond à la probabilité  $P(0; G_u)$  :

$$P_{suc} = P(0; G_u) = (1 - G_u)^{N_u - 1} \quad (12)$$

La probabilité d'une transmission réussie  $S_u$  par l'utilisateur, est égale à la probabilité  $G_u$  pour que l'utilisateur émette un paquet, multipliée par la probabilité de succès  $P_{suc}$ .

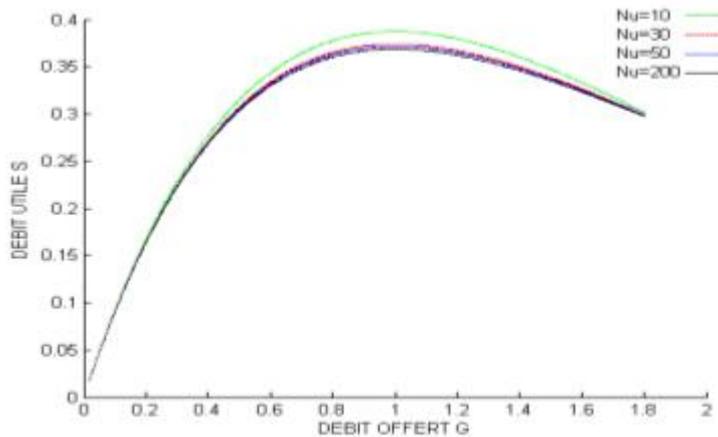
$$S_u = G_u (1 - G_u)^{N_u - 1} \quad (13)$$

Nous définissons le débit écoulé  $S$  et le débit offert  $G$  comme suit:

$$S = \sum_{i=1}^{N_u} S_{ui} \text{ et } G = \sum_{i=1}^{N_u} G_{ui} \quad (14)$$

Puisque les utilisateurs sont identiques, alors on aura  $G = N_u G_u$  et  $S = N_u S_u$ . Il résulte des expressions (14) que :

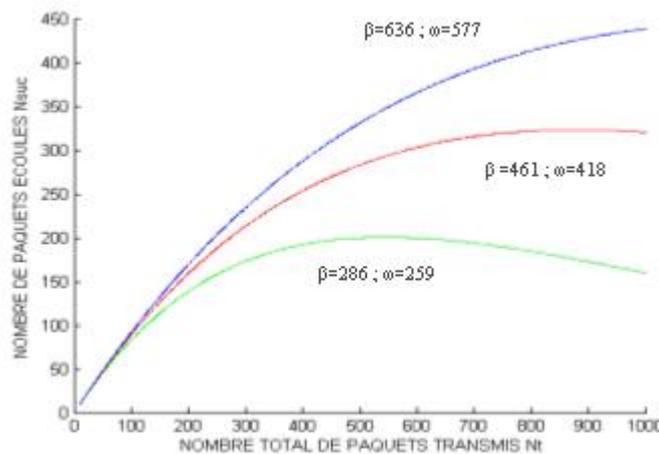
$$S = G(1 - G_u)^{N_u - 1} \quad (15)$$



**Figure 4. Débit écoulé S en fonction du nombre d'utilisateurs Nu**  
 $dS/dG=0$  pour  $G=1$ . Le débit maximum écoulé pour les  $N_u$  utilisateurs est alors :

$$S_{\max} = \left(1 - \frac{1}{N_u}\right)^{N_u - 1} \quad (16)$$

La figure 4 montre que le débit maximum écoulé  $S_{\max}$  dépend peu du nombre d'utilisateurs  $N_u$ , et  $S$  dépend presque uniquement de  $G$ , ce qui est intuitivement raisonnable car, c'est le débit écoulé maximum par utilisateur qui dépend du nombre d'utilisateurs.



**Figure 5. Nombre de paquets écoulés en fonction de nombre total de paquets transmis**  
 Nous définissons  $G$  comme :

$$G = N_t / (\beta + \omega) \quad (17)$$

où,

- $N_t$  est l'ensemble des paquets transmis (nouveaux et retransmis) pendant la période de la visibilité du satellite,
- $\beta$  est le nombre de slots disponibles pendant  $T_u$ ,  $\beta = T_u / \tau$ ,
- $\omega$  est le nombre de slots disponibles en tenant compte du décalage de temps entre les deux extrémités de la zone de service,  $\omega = T_{sh} / \tau$ .

Nous définissons le débit écoulé comme :

$$S = N_{suc} / (\beta + \omega) \quad (18)$$

où  $N_{suc}$  est le nombre de paquets transmis avec succès pendant la période de la visibilité du satellite.

De (15), (17) et (18), nous tirons :

$$N_{suc} = N_t \left( 1 - \frac{N_t}{(\beta + \omega) N_u} \right)^{N_u - 1} \quad (19)$$

Soit  $\lambda$  le débit des nouveaux paquets générés pendant n'importe quel slot, dans le modèle proposé. Dans cet article, on suppose que les terminaux ont les mêmes conditions de trafic.

Chaque terminal transmet au maximum un paquet pendant la période de visibilité du satellite. Nous exprimons  $\lambda$  par :

$$\lambda = N_u / (\beta + \omega) \quad (20)$$

La condition d'équilibre de Massey (1992) stipule que le taux de départ  $\lambda$  (débit des nouveaux paquets), est égal au taux d'arrivée  $S$  (débit écoulé). Avec  $\lambda < S_{max}$  nous avons :

$$\lambda = G \left( 1 - \frac{G}{N_u} \right)^{N_u - 1} \quad (21)$$

Dans le cas stable où  $\lambda < S_{max}$  et d'une retransmission aléatoire, la probabilité moyenne de succès  $P_{suc}$  est donnée par :

$$P_{suc} = \frac{\lambda}{G_1} \quad (22)$$

Avec  $(G_1, \lambda)$  point d'équilibre stable.

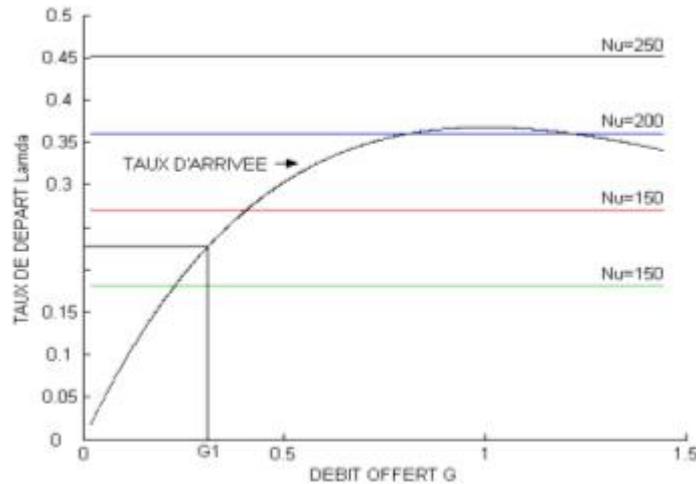


Figure 6. Stabilité en fonction du nombre d'utilisateurs Nu

Dans le cas instable où  $\lambda > S_{\max}$ , le débit G offert s'accroît rapidement. Tous les terminaux réémettent. La probabilité moyenne de succès  $P_{\text{suc}}$  tend rapidement vers zéro. D'après l'équation (24), le temps de réponse moyen D tend rapidement vers l'infini.

## 5. TEMPS DE RÉPONSE

Dans le présent paragraphe, nous évaluons le temps de réponse de Aloha en tranche. Le paquet peut être produit à un instant quelconque pendant un slot, pourtant le terminal doit attendre jusqu'au commencement du prochain slot avant d'essayer une transmission. Le temps entre la génération du paquet et le début du prochain slot peut avoir une valeur aléatoire comprise entre 0 et  $\tau$ , avec la même probabilité. Par conséquent, le temps de réponse moyen requis pour la génération d'un paquet est égale à  $3.\tau / 2$ . La durée d'un paquet est donnée par  $\tau = L/R$ , avec L la longueur du paquet et R le débit binaire. Dans la suite, nous emploierons le protocole AX.25 (TAPR, 1997) avec  $R=1200$  bps.

Pour simplifier le calcul, le temps de garde est supposé nul. Lorsqu'il n'y a pas de collision, le temps de réponse est égal à  $T_1 = 3.\tau / 2 + T_d$ , avec  $T_d$  est le temps de propagation.

$$T_d = \frac{d}{c} \quad (23)$$

où

- d est la distance entre le terminal et le microsatellite (la station centrale).
- C est la vitesse de la lumière.

Dans le cas d'une réception réussie du paquet, le microsatellite envoie un paquet d'acquittement de durée  $T_{\text{ack}}$ , que l'utilisateur reçoit après  $T_d + T_{\text{ack}} + T_{\text{proc}}$  seconds ; où  $T_{\text{proc}}$  est le temps de traitement à bord du microsatellite. A partir du moment de l'envoi du paquet, le temporisateur  $T_t$  se déclenche et est égal au temps maximal pour recevoir l'acquittement. Dans ce cas  $T_t = 2T_d + \tau + T_{\text{proc}} + T_{\text{ack}}$ . Dans le système satellitaire, avec l'altitude  $h = 650$  Km,  $T_d$  est environ égale à 4 ms, et par conséquent, il est négligeable en comparaison avec la durée du paquet.

Nous supposons ici que  $T_{\text{ack}}$  et  $T_{\text{proc}}$  sont négligeables en comparaison avec la durée du paquet. Si la tentative est réussie, l'utilisateur détruit le paquet. Si l'accusé de réception n'est pas reçu, l'utilisateur considère que le paquet est détruit et qu'un autre processus de retransmission commence après l'expiration de son temporisateur  $T_t$ . Il est raisonnable de supposer que la probabilité de perte du paquet d'acquittement est très faible. Pour optimiser la politique de retransmission, le paquet qui est perdu, est retransmis au bout d'un temps

aléatoire tiré uniformément dans l'intervalle  $[0, \alpha_{\max} \tau]$  avec la moyenne  $\alpha_{\text{moy}} = \alpha_{\max} / 2$  ( $\alpha_{\max}$  un nombre entier) (Tobagi, Gerla *et al.*, 1978).

Nous supposons que  $\alpha_{\max}$  est égal au numéro des utilisateurs  $N_u$  pour randomiser la politique de retransmission. Le temps écoulé entre deux retransmissions successives est donné par  $T_w = T_t + \alpha_{\text{moy}} \tau$ .

Selon le scénario décrit ici, le temps de réponse moyen peut être exprimé comme suit (Jamalipour, 1998) (Taub et Schilling, 1987) :

$$D = T_1 P_{\text{succ}} + \sum_{k=1}^{\alpha_{\max}} (T_1 + k T_w) (1 - P_{\text{succ}})^k P_{\text{succ}} \quad (24)$$

Avec  $(1 - P_{\text{succ}})^k P_{\text{succ}}$ , la probabilité pour qu'un paquet soit reçu dans la  $(k+1)^{\text{ème}}$  tentative de retransmission après  $k$  fois échecs.

Puisque  $T_t$  est plus petit que  $2 \cdot \tau$  et sachant que le terminal doit commencer au début du prochain slot, alors  $T_w$  devient égale à  $(2 + \alpha_{\text{moy}}) \tau$ .

Le nombre maximum de tentatives de retransmission  $\alpha_{\max}$  et le délai maximum d'attente  $\alpha_{\max} \tau$  sont limités par le temps de la visibilité du satellite  $T_u$  disponible pour chaque terminal. On a :  $T_1 + \alpha_{\max} (2 + \alpha_{\text{moy}}) \tau < T_u$ .

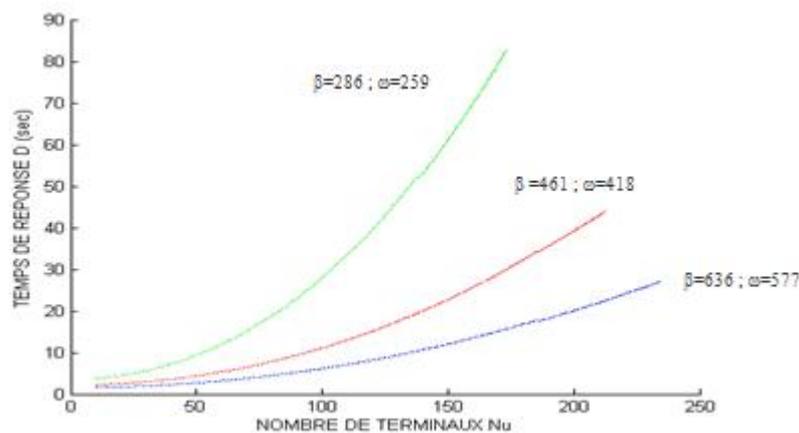


Figure 7. Temps de réponse en fonction de nombre de terminaux pour différentes valeurs de  $\beta$  et  $\omega$

## 6. CONCLUSION

En utilisant Aloha en tranche avec une longueur de paquet de 283 octets et un débit binaire de 1200 bps, il est possible que le système supporte 100 terminaux durant la visibilité du satellite, tout en assurant la stabilité de système. Dans cet article, nous avons trouvé que le débit utile atteint son maximum mais le seul inconvénient est un temps de réponse long, acceptable pour ce genre d'applications qui utilisent un seul satellite en orbite basse. Le débit utile et le temps de réponse sont difficiles à déterminer par des méthodes analytiques. Cependant, pour les travaux futurs, les résultats trouvés dans cet article pourront être validés par simulation en utilisant un outil de simulation à événement discret.

## Bibliographie

Abramson, N. (1977). The Throughput of Packets Broadcasting Channels. *IEEE Trans. Comm.* Vol. COM-25, No. 1, pp. 233-244.

Abramson, N. (1992). Fundamentals of Packet Multiple Access for Satellite Networks. *IEEE J. Select. Area Commun.* Vol. 10, No. 2, pp.309-316.

- Bertsekas, D., Gallager, R. (1987). *Data Network. Englewood Cliffs*. NJ: Prentice-Hall.
- Jamalipour, A. (1998). *Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Networks*. Norwood, MA: Arthech House.
- Kleinrock, L. (1975). *Queuing Systems Vols.1 and 2*, New York. Wiley.
- Maral, G., Bousquet, M. (2002). *Satellite Communication Systems*. John Wiley & Sons; 4 edition , May.
- Massey, J. (1992). Some new approaches to random access communications. *Multiple Access Communications IEEE press*, pp.354-368.
- Paffet, J., Jeans, T. G., Ward, J. (1998). VHF-Band Interference Avoidance for Next-Generation Small Satellites 12 th AIAA/USU Conference on Small Satellites. SSC98-II-5.
- Pritchard, L. (1977). *Satellite Communication – An Overview of the Problems and Programs*. IEEE, Vol. 65, No. 3, pp. 294-307.
- Proakis, J. (1989). *Digital Communications*. McGraw-Hill, Second Edition.
- TAPR (1997) *AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio* TAPR, 2.2 edn.
- Taub, H., Schilling, D. (1987). *Principles of communication systems*. McGraw-Hill, 2<sup>ème</sup> Edition.
- Tobagi, F., Gerla, M., Peebles, R. and Manning, E. (1978). Modeling and Measurement Techniques in Packet Communication Networks. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 66, No. 11.
- Zantou, B., Kherras, A. (2004). Design d'une balise automatique de localisation par microsatellite. *ISIVC'04*. France.

#### **Pour citer cet article**

---

Adnane ADDAIM, Abdelhaq KHERRAS et El Bachir ZANTOU. «Evaluation de la capacité d'un système de messagerie par microsatellite en orbite basse». e-TI - la revue électronique des technologies d'information, Numéro 3, 29 décembre 2006, <http://www.revue-eti.netdocument.php?id=1185>.