

Communication Satellite

Eitan Altman

INRIA Sophia-Antipolis
2004 route des Lucioles, BP 93
06902 Sophia-Antipolis Cedex

URL:

<http://www-sop.inria.fr/mistral/personnel/Eitan.Altman/moi.html>

E-mail: `altman@sophia.inria.fr`

OUTLINE

I. Méthodes d'accès

AMRF: Accès Multiple à Répartition en Fréquence (FDMA)

On découpe toute la bande de fréquence en M sous-bandes.

Chaque station émet indépendamment des autres liaisons.

Chaque station terrestre contient

- Un modulateur, un émetteur,
- M répéteurs, M démodulateurs.

Problèmes d'intermodulation, qui croissent rapidement avec la puissance utile.

On peut perdre jusqu'à la moitié de la capacité de transmission par rapport à un accès unique.

On laisse des "trous" entre les bandes pour améliorer l'atténuation d'autres fréquences.

Pas de réutilisation de la bande passante: si un émetteur est silencieux, sa bande passante n'est pas utilisée par d'autres.

Pas de problèmes de synchronisation temporelle.

Évaluation de Performances

M sources,

bande passante R .

Bande passante par source R/M .

Taille de paquet P .

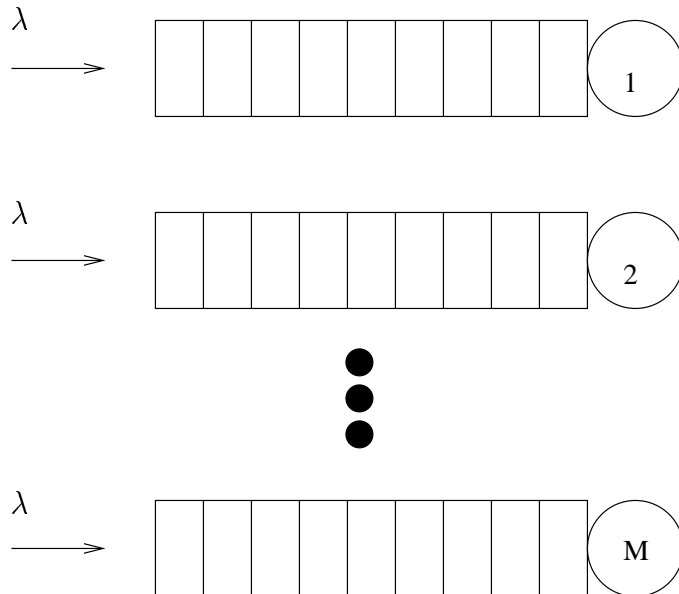
Taux d'arrivée de paquets: λ .

$D :=$ Délai moyen par paquet.

$T :=$ Temps moyen de transmission d'un paquet.

$\rho := \lambda T$ est l'utilisation.

Modèle M/G/1, arrivées Poissonniennes:



Le délai moyen d'un paquet est:

$$\begin{aligned}
 D &= T + \frac{\lambda \overline{T^2}}{2(1 - \lambda T)} = T \left[1 + \frac{\rho}{2(1 - \rho)} \right] \\
 &= \frac{MP}{R} \left[1 + \frac{\rho}{2(1 - \rho)} \right]
 \end{aligned}$$

AMRT: Accès Multiple à Répartition en Temps (TDMA)

On définit un cycle, découpé en slots.

Dans chaque cycle, chaque source transmet pendant un slot prédéterminé.

Utilisé par les satellites GEO de EUTELSAT.

Un slot = 2msec.

TDMA généralisé: une source peut transmettre pendant plus d'un slot par cycle.

Demande une synchronisation temporelle.

Demande des puissances instantanées plus grandes.

Évaluation de Performances

M sources,

Taux de transmission: R bit/sec.

Taille de paquet P .

$T :=$ Temps moyen de transmission d'un paquet = P/R (durée d'un slot).

$T_C :=$ Durée du cycle = MT .

Taux d'arrivée de paquets: λ .

D := Délai moyen par paquet.

$\rho := \lambda T$ est l'utilisation.

Modèle M/G/1, arrivées Poissonniennes.

Une source n'est pas influencée par les autres car les opportunités de transmission des différentes sources sont dans des slots différents.

Le délai moyen:

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{2}T_C + W_q + T = \frac{1}{2}MT + \frac{\rho}{2(1-\rho)}MT + T \\ &= T \left[1 + \frac{M}{2(1-\rho)} \right] \end{aligned}$$

Comparaison avec AMRF

$$D_{AMRF} = D_{AMRT} + \frac{P}{R} \left[\frac{M}{2} - 1 \right] \geq D_{AMRT}.$$

Cette différence devient négligeable pour des débits élevés, $\rho \sim 1$.

AMRC: Accès Multiple à Répartition de codes (CDMA)

- Tous les usagers peuvent utiliser toute la bande passante tout le temps.
- Le signal transmis a une bande passante très supérieure à sa bande passante initiale.
- La méthode la plus courante: DS (*direct sequence*)
Chaque source a une séquence quasi-aléatoire qui la caractérise, connue par le récepteur.
- La source multiplie chaque symbole binaire par cette séquence.
- Le récepteur a un filtre adapté à chaque source pour décoder les symboles initiaux.
- Les symboles d'autres sources se présentent comme un bruit aléatoire.

AMRC avec des séquences binaires

- Les zéros et uns sont représentés par des valeurs de 1 et de -1, respectivement.
- La durée de transmission d'un bit d'information (appelée un temps bit) est divisée en intervalles de temps appelés chips.
- Le nombre de chips par temps bit est typiquement $N = 64$ ou $N = 128$; les valeurs de chips sont binaires: 1 ou -1.

Considérons une séquence quasi-aléatoire $a = (a_1, \dots, a_N)$ de chips.

Si le bit d'information $b = 1$ alors on transmet a .

Si le bit d'information $b = 0$ alors on transmet $-a$.

On transmet donc $c := b \times a$.

Soit X_t le $t^{\text{ième}}$ chip reçu par la destination. Cette dernière calcule à l'instant t son estimation de $b(t)$:

$$\hat{b}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_{t-i} a_{N-i}.$$

Si à l'instant t le $N^{\text{ième}}$ (le dernier) chip de c arrive, on aura clairement $\hat{b} = b$, en supposant que l'information n'est pas bruitée.

Comparaisons de AMRC, l'AMRT et AMRF

L'AMRC a les avantages suivants par rapport à AMRT et AMRF:

- Plus de robustesse

- aux phénomènes d'atténuations par des multi-chemins,
- aux interférences.

- Gain de multiplexage statistique:

Dans l'AMRT, la quantité d'information que l'on peut transmettre est limitée par les contraintes temporelles fixées d'avance.

Dans l'AMRF, ce sont les contraintes de fréquences fixées d'avance.

Ici, la quantité d'information qu'on peut transmettre est limitée par l'énergie du bruit, proportionnelle au nombre d'autres sources actives.

- On peut transmettre plus d'information avec la même énergie car au cours d'une partie du temps, certaines sources restent silencieuses.

Donc, malgré le fait qu'une ressource (ensemble de codes) est partagée d'une manière fixe l'AMRC a des propriétés intéressantes de méthodes d'accès adaptées à la demande.

Exemples de méthodes d'accès

Iridium: Combinaison de AMRF et AMRT:

Chaque fréquence est réutilisée 180 fois:

[2150 faisceaux] : [12 faisceaux par configuration] = 180.

Dans chaque faisceau on utilise l'AMRF: il y a 80 canaux (sous-fréquences) par faisceau.

AMRT dans chaque canal. Trames de 90ms. Dans chaque trame, 4 usagers peuvent utiliser 50 kb/s.

Ecco, Globalstar: AMRC.

TELEDESIC

MF-TDMA (MF = multi-frequency) pour le lien ascendant,
ATDMA (= Asynchronous TDMA) pour le lien descendant.

TECHNIQUES D'ACCÈS ALÉATOIRES

- Un canal commun qui relie toutes les sources.
- Une collision est provoquée quand plus d'une source transmet en même temps, et cela cause la perte des paquets et la retransmission ultérieure.
- Le débit max que l'on peut espérer est 1 unité, c.à.d. une transmission continue.

Ex: Ethernet.

1. L'ancêtre: ALOHA

Mise en œuvre pour un réseau radio de diffusion de paquets reliant les îles de Hawaïi, 1970.

Utilisé dans ICAROS, projet de communication satellite large bandes;
développement par Swiss PTT, Telefonica, Telia Research AB, Eutelsat.

La transmission est complètement décentralisée. A la fin de la transmission de chaque paquet de chaque source, la source reçoit l'information si

- le paquet est bien reçu ou
- s'il y a eu une collision. Dans ce cas il y aura une retransmission à un instant ultérieur.

Problèmes:

- Plus il y a de transmissions, plus il y a de collisions.
- Régime instable: de temps en temps le débit baisse considérablement, tout le monde est en train de retransmettre.
- Le débit max = 0.18; très mauvaise utilisation du canal. Débit 0.18: transmission de toutes les sources pendant 18% du temps. S'il y a 60 sources, chaque source peut transmettre pendant 0.3% du temps.

Aloha en tranches ou Slotted Aloha

Principes:

le temps est discrétisé c.à.d. découpé en tranches de temps appelés slots.

un slot = temps de propagation aller-retour maximum

- Les stations sont synchronisées
- Une station transmet un paquet au début d'un slot

amélioration par rapport au Aloha non-slotté puisque 2 trames qui se superposent ne le font que sur un slot au maximum, au lieu de 2 slots (car ils commencent au début du même slot).

Débit max: 0.36; mauvaise utilisation du canal.

2. ALOHA avec résolution de collisions

Des algorithmes distribués permettent d'arrêter la transmission de nouvelles données tant que les paquets impliqués dans une collision ne sont pas transmis. Cela permet d'augmenter le débit. Ex: Algorithme de Capitanakis, 1977.

3. Acc. al. avec écoute de la porteuse: CSMA

(Carrier Sense Multiple Access). une station qui désire émettre se met à l'écoute du canal; si elle détecte un signal en ligne, elle diffère l'émission de sa trame.

Les variantes selon le type de décision pris lorsque le canal est détecté occupé:

- **CSMA non-persistent:** lorsque la station détecte un signal, elle attend un délai aléatoire avant de réitérer la procédure (écoute de la porteuse,...);
- **CSMA persistant** (variante retenue) la station "persiste" à écouter le canal jusqu'à ce que celui-ci devienne libre, puis émet;
- **CSMA p-persistent:** lorsque le canal devient libre, la station émet avec une probabilité p , et diffère son émission avec une probabilité $(1-p)$. Ceci permet de diminuer la probabilité de collision par rapport au CSMA persistant.

Période de vulnérabilité: le temps de propagation entre les deux stations les plus éloignées.

Si la durée des trames est considérablement supérieure à la période de vulnérabilité alors le débit peut s'approcher de un.

4. CSMA/CD: CSMA avec détection des collisions

(CD = Collision Detection) La technique la plus utilisée parmi les disciplines d'accès aléatoire dans les réseaux terrestres. C'est la méthode normalisée par l'ISO.

A l'écoute préalable du réseau s'ajoute l'écoute pendant la transmission: une station prête à émettre, ayant détecté le canal libre, transmet et continue à écouter le canal. S'il se produit une collision,

- elle interrompt immédiatement sa transmission
- elle envoie des signaux spéciaux appelés bits de bourrage afin que tous les coupleurs soient prévenus de la collision
- elle tentera la réémission ultérieurement

Ex: Ethernet

5. CSMA/CR avec résolution des collisions

(CSMA with Collision Avoidance, and CSMA with Collision Resolution) Variante de CSMA/CD qui permet d'augmenter l'efficacité du réseau en résolvant la contention avant que les données ne soient transmises. Opère par le biais d'accusés de réception et de temporisateurs. Simple et économique, remplace les circuits de détection de collision.

Évaluation de performances des modèles multi-accès

Système à temps discret à m nœuds.

Hypothèses:

- 1. Système à temps discret: Tous les paquets transmis ont la même longueur, la transmission de chaque paquet prend une tranche de temps d'une unité (instant). Synchronisation entre les nœuds.
- 2. Arrivées Poissonniennes à chacun des m nœuds.
Taux d'arrivées global = λ .
Taux d'arrivées par nœud: = λ/m .
- 3. Collision ou Réception parfaite: Si un seul paquet est transmis, il est reçu sans erreur.
Si plus d'un paquet est transmis, tout est perdu. Aucune information sur le contenu et la source des paquets n'est obtenue.
- 4. Feedback immédiat de 0,1,e: A la fin de chaque instant, toutes les sources savent si 0, 1 ou >1 paquets ont été transmis.
- 5. Retransmission de collisions: Chaque paquet impliqué dans une collision devra être retransmis ultérieurement.

- 6a. Pas de tampons: Si un paquet est en cours de transmission, ou s'il attend la retransmission ultérieure, des nouveaux paquets n'arrivent plus à la source. Une hypothèse alternative est:
- 6b. Nombre infini de nœuds: $m = \infty$, et chaque nouveau paquet arrive à un autre nœud.

L'hypothèse 6b nous donne une borne supérieure sur des systèmes à $m < \infty$.

Évaluation de Performances: Aloha Slotté

- Les nœuds sont synchronisés. Ils commencent à transmettre au début des tranches de temps.
- A la fin de chaque tranche de temps, tous les nœuds détectent les collisions qui se sont produites dans cette tranche de temps .
- Un paquet mal transmis est retransmis après un nombre aléatoire de tranches de temps.

Analyse approchée

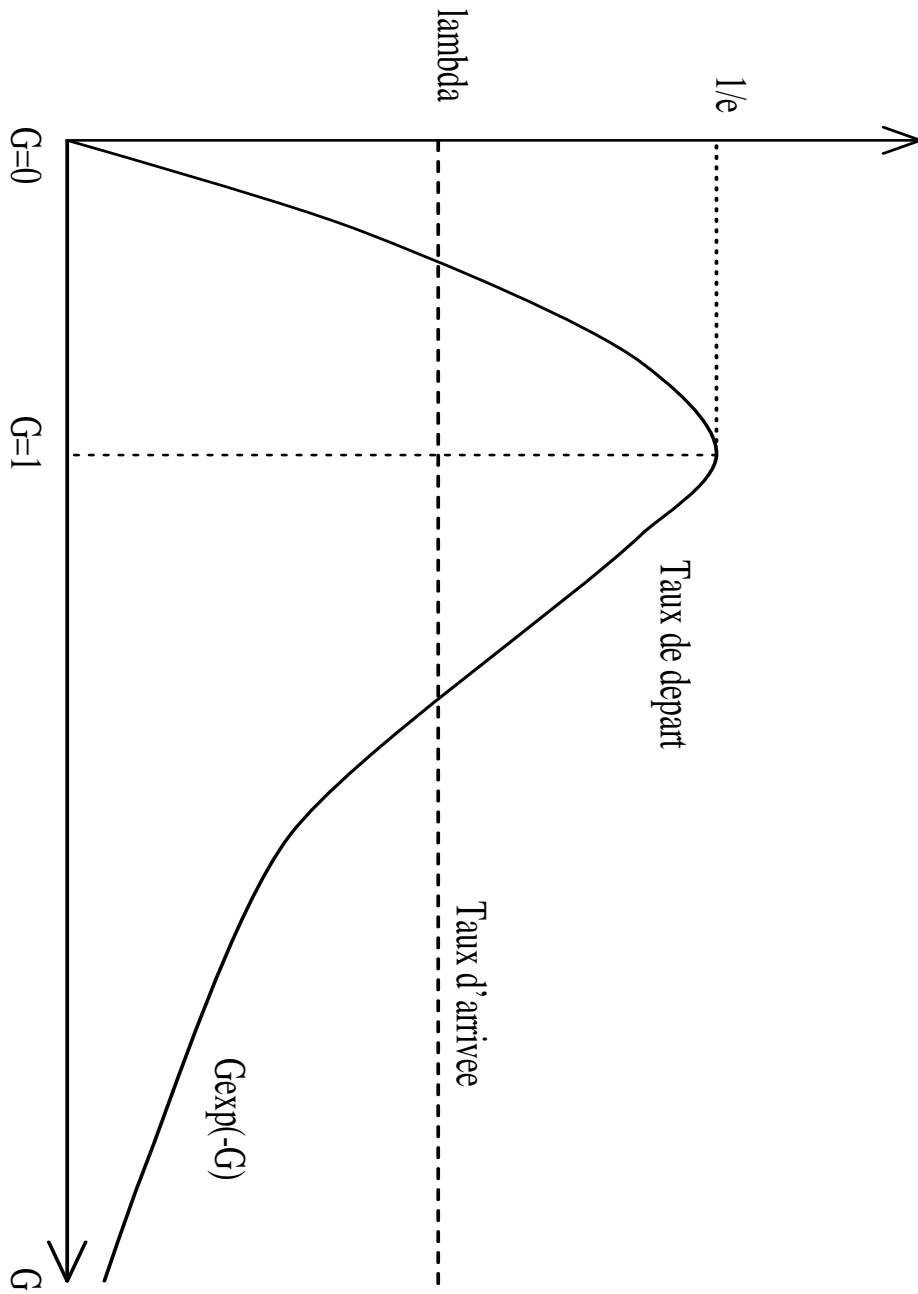
- On utilise Hypothèse 6b (infinité de nœuds).
- Nombre d'arrivées par unité de temps est Poissonnien de taux λ .
- On suppose que le choix des instants de retransmission est tel que le nombre de paquets (transmis et retransmis) par unité de temps est Poissonnien de taux $G > \lambda$.
- La proba. d'une transmission (réussie) par unité de temps est

$$Ge^{-G},$$

qui est donc le DÉBIT. ($P(X = n) = G^n e^{-G} / n!$.)

- Condition d'équilibre:
taux de départ = taux d'arrivée (= débit)
C'est à dire, $\lambda = G \exp(-G)$.
- Atteint le max à $G = 1$; le débit max est $1/e = 0.386$.

On observe deux point d'équilibre.



ALOHA NON SLOTTÉ

Système non discret à m nœuds.

Hypothèses:

- 1. Système non discret: Tous les paquets transmis ont la même longueur, la transmission de chaque paquet prend une unité de temps. La transmission des paquets n'est pas synchronisée.
- 2. Arrivées Poissonniennes à chacun des m nœuds.
Taux d'arrivées global = λ .
Taux d'arrivées par nœud: = λ/m .
- 3. Collision ou Réception parfaite: Si un paquet est transmis avant que la transmission d'un autre ne soit finie, il y a collision.
- 4. Feedback immédiat de 0,1,e: Chaque source reçoit l'information sur des collisions avec le paquet transmis.
- 5. Retransmission de collisions: Chaque paquet impliqué dans une collision devra être retransmis ultérieurement (après un temps aléatoire τ).
- 6a. Pas de tampons: Si un paquet est en cours de transmission, ou s'il attend la retransmission ultérieure, des nouveaux paquets n'arrivent plus à la source. Une hypothèse alternative est:
- 6b. Nombre infini de nœuds: $m = \infty$, et chaque nouveau paquet arrive à un autre nœud. On retiendra cette hypothèse dans la suite.

On suppose que τ est exponentiel de paramètre x , donc sa densité est $x \exp(-x\tau)$.

S'il y a n nœuds retransmettants, alors le processus de transmission et retransmission est Poissonnien avec un taux

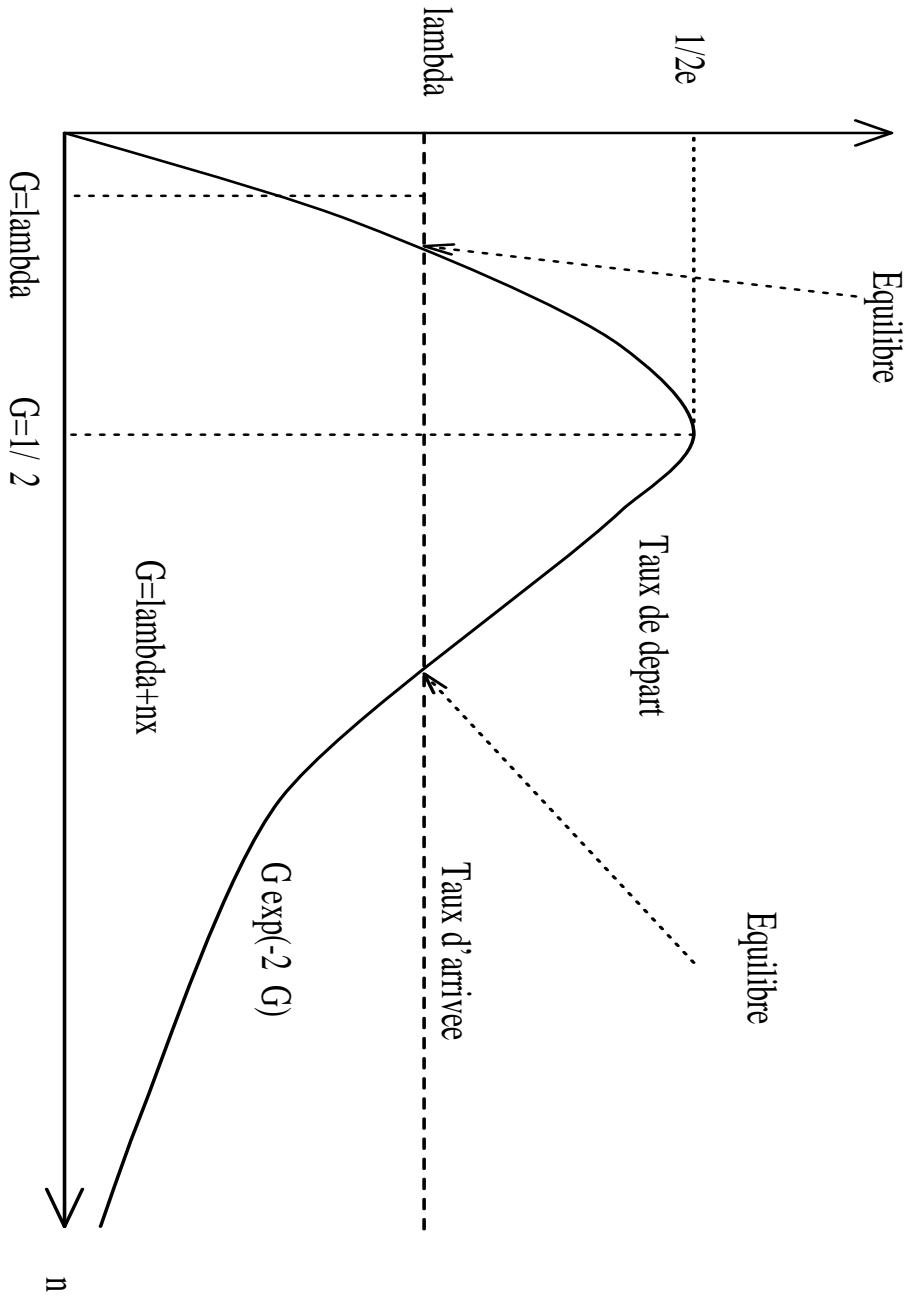
$$G(n) = \lambda + nx.$$

Supposons qu'un paquet est transmis à l'instant t . Période de vulnérabilité: $(t - 1, t + 1)$. Si un autre paquet est transmis pendant ce temps, il y aura collision. Par conséquent:

$$P_{succ} = e^{-2G(n)}.$$

Le débit = taux global de transmission et retransmission $G(n)$ fois P_{succ} :

$$\text{Débit}(n) = G(n)e^{-2G(n)}.$$



- L'Aloha non discret a aussi deux points d'équilibre, et il a le même type de problèmes de stabilité que l'Aloha discret.
- Son débit max est la moitié de celui du Aloha discret.

DAMA

(Demand-Assigned Multiple Access)

Ex. de modification de FDMA pour être flexible:
ajout de réservation.

SPADE:

Single-channel-per carrier, Pulse-code-modulation, multiple-Access, Demand-assignment, Equipment.

utilisé par Intelsat.

Ref:

Misha Schwartz, *Information, transmission, modulation and noise*, 3ème édition.

- 800 canaux indépendants couvrant les 36MHz de bande passante pour une unité de transmission/réception (transponder).
- Dans Intelsat IV un des 12 trans. qu'il y en a utilise SPADE.
Lien ascendant: 6.302-6.338 GHz.
Lien descendant: 4.077-4.113 GHz.
- Les canaux sont de 38 kHz chaque, et espacés de 45kHz sur les 36MHz.

- La transmission est numérique avec un débit de 64 kbit/s, en utilisant QPSK.
- Applications: voix (4kHz) ou données.

Signalisation et réservation

- Un canal de signalisation.

Des trames de 50msec, divisés en slots de 1msec, dont 49 sont utilisés par les stations (chaque station a un slot individuel).

Chaque slot contient 128 bits.

Le débit du canal de signalisation est donc 128kbit/s.

La transmission de ce canal se fait sur un canal de 160kHz de bande passante, en utilisant PSK.

- SPADE est utilisé pour les stations qui ont une charge faible (qui sont souvent silencieuses).

La communication mondiale par Intelsat se fait en combinant des méthodes d'accès fixes avec de partage de fréquence à base de demande (SPADE).

- Une station souhaitant commencer une communication choisit une fréquence aléatoire parmi celles disponibles dans son tableau.

Elle transmet cette fréquence et l'adresse de la station de destination.

- Toutes les stations écoutent ce canal.

Les tableaux de fréquences sont mis à jour en fonction des signaux de connexions et de déconnexions.

- Si une autre station a utilisé la même fréquence, la station qui appelle et la station de destination recevront un signal occupé. La station qui appelle choisit alors une autre fréquence.
- S'il n'y a pas de conflit, la destination lisant son propre adresse, transmet un ack à son tour, et se prépare pour établir une communication à la fréquence qui a été spécifiée.
- La session commence quand le ack revient, c.à.d. après 0.6 sec.