

RECOMMANDATION UIT-R F.1192

**CAPACITÉ D'ÉCOULEMENT DU TRAFIC DES SYSTÈMES ET RÉSEAUX
RADIOÉLECTRIQUES À COMMANDE AUTOMATIQUE DANS
LE SERVICE FIXE EN ONDES DÉCAMÉTRIQUES**

(Question UIT-R 147/9)

(1995)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) les améliorations apportées par l'utilisation des systèmes radioélectriques à commande automatique;
- b) le peu de spectre disponible pour le service fixe en ondes décimétriques;
- c) la demande en matière de haute fiabilité pour le service fixe en ondes décimétriques;
- d) la demande en matière de débits de trafic élevés;
- e) la demande en matière d'exploitation de réseaux dans le service fixe en ondes décimétriques;
- f) que les systèmes automatiques permettront de faire face à une gamme étendue de conditions de trafic et de tailles de réseau,

recommande

1 que, pour les réseaux radioélectriques à commande automatique en ondes décimétriques, la préférence soit accordée aux méthodes décrites dans l'Annexe 1 pour:

- la détermination de la capacité de débit de trafic;
- l'estimation des besoins en fréquences compte tenu du débit de trafic souhaité;
- la planification générale des systèmes en question;
- la comparaison des différents types de système en ce qui concerne le débit de trafic et les besoins en fréquences.

ANNEXE 1

**Capacité d'écoulement du trafic des systèmes et réseaux
radioélectriques à commande automatique dans le
service fixe en ondes décimétriques****1 Introduction**

Il existe fondamentalement trois systèmes radioélectriques à commande automatique, désignés par les abréviations suivantes:

ACC: canaux communs asynchrones

SCC: canaux communs synchrones

SSCT: voies d'appel et voies de trafic distinctes synchrones

Le système ACC explore en mode asynchrone un ensemble de canaux préassignés afin de trouver un canal utilisable. Lorsqu'un canal approprié est trouvé, le trafic y est envoyé; les voies d'appel et les voies de trafic sont donc communes.

Le système SCC explore en mode synchrone un ensemble de canaux préassignés afin de trouver un canal utilisable. Lorsqu'un canal utilisable est trouvé, le trafic y est envoyé; les voies d'appel et les voies de trafic sont donc communes.

Le système SSCT explore en mode synchrone un ensemble de voies «d'appel» préassignées afin d'établir le contact initial. L'appel offre un certain nombre de voies «de trafic» possibles. Après avoir établi le contact, les deux stations concernées se positionnent sur les voies de trafic possibles et sélectionnent la meilleure de ces voies.

Il existe deux types fondamentaux de réseau susceptibles d'utiliser les systèmes décrits ci-dessus: les réseaux multipoint et les réseaux en étoile.

2 Réseaux multipoint

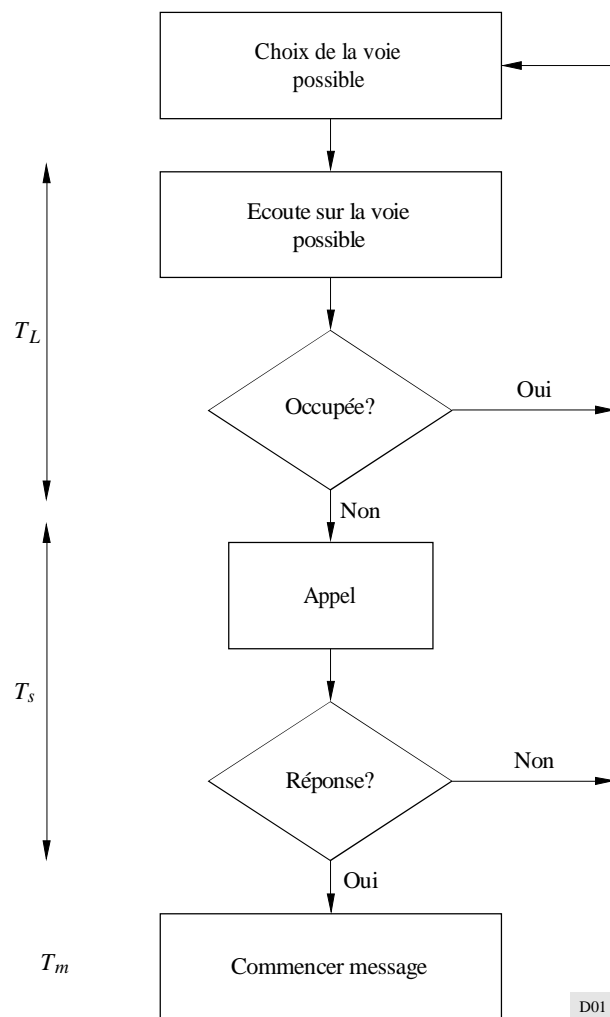
L'analyse développée dans ce paragraphe concerne un réseau multipoint dans lequel toutes les stations supportent la même charge.

2.1 Système ACC

2.1.1 Séquence d'appel

La séquence d'appel est représentée dans la Fig. 1.

FIGURE 1
Séquence d'appel ACC



D01

Dans la séquence d'écoute initiale, la station choisit une voie possible et vérifie qu'elle n'est pas occupée. Il existe une probabilité, P_1 , pour que la voie soit libre. Si elle est occupée, la station choisit une deuxième voie possible et effectue une nouvelle tentative. En moyenne, le nombre de tentatives est égal à $1/P_1$.

Lorsque la station émet l'appel sur la voie (libre) choisie, il existe trois probabilités d'aboutissement de l'appel:

- P_2 , probabilité pour qu'une autre station n'émette pas sur cette même voie,
- P_3 , probabilité pour que la station de destination ne soit pas déjà occupée,
- P_4 , probabilité pour que les conditions de propagation soient suffisamment favorables.

L'Appendice 1 indique comment sont établies les expressions respectives de P_1 , P_2 et P_3 .

En moyenne, le nombre de tentatives d'appel, c'est-à-dire de transmissions, est égal à:

$$\frac{1}{(P_2 P_3 P_4)}$$

2.1.2 Capacité d'écoulement du trafic

Posons: C : nombre de voies explorées

N : nombre de voies de propagation

S : nombre de stations

E : capacité d'écoulement du trafic (E) dans un réseau comportant N voies et S stations

T_m : durée d'un message (s)

T_s : durée d'exploration (ou d'appel) (s).

Le nombre M de messages/heure/station s'exprime par:

$$M = \frac{3\,600 \times E}{S (T_s / (P_2 P_3 P_4) + 2 T_m)} \quad (1)$$

Chaque station émet M messages et reçoit M messages en 1 h.

Il existe une limite au nombre des messages pouvant être traités par une station donnée. Prenant en compte le temps qu'une station consacre à l'écoute, pour vérifier que la voie choisie est libre et en admettant que la capacité maximum d'une station individuelle est E_{max} (E), le nombre maximum de messages/heure/station est:

$$M_{max} = \frac{3\,600 \times E_{max}}{(T_L / (P_1 P_2 P_3 P_4) + T_s / (P_2 P_3 P_4) + 2T_m)} \quad (2)$$

où T_L est le temps d'écoute (s)

NOTE 1 – Le terme $2T_m$ permet de tenir compte des messages reçus et des messages émis.

NOTE 2 – La valeur appropriée d' E_{max} est l'objet d'études ultérieures.

2.2 Système SCC

2.2.1 Séquence d'appel

La séquence d'appel SCC est représentée dans la Fig. 2.

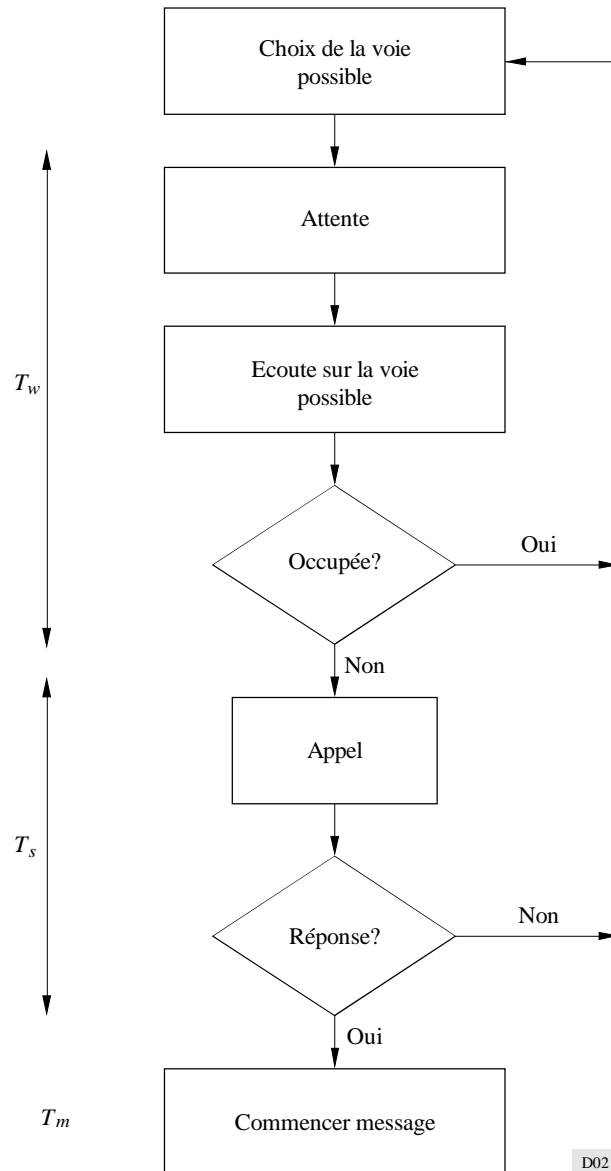
On admet par hypothèse que le système SCC est un système qui modifie l'ordre des fréquences d'écoute d'une station à une autre (en utilisant un algorithme basé sur l'adresse des stations).

La station choisit la voie possible, après quoi elle doit respecter un temps d'attente (T_w) jusqu'à ce que la station de destination choisisse la même voie. Peu de temps avant le terme de ce délai, la station appelante doit se mettre en position d'écoute pour s'assurer que la voie est libre. Ainsi, la station doit attendre, en moyenne, pendant une durée de T_w/P_1 (s).

La séquence d'appel est semblable à celle d'une station ACC, à ceci près que le temps d'exploration T_s est ici beaucoup plus court, parce que l'exploration est appliquée à une seule voie.

Si le système est synchronisé simplement, comme c'est le cas du système ACC, les voies explorées synchronisées se groupent pour former en fait une voie unique et les stations sont concurrentes pour essayer d'obtenir cette voie toutes à la fois. Il en résulte un verrouillage du système à un certain point, raison pour laquelle on accorde la préférence au système SCC.

FIGURE 2
Séquence d'appel SCC



2.2.2 Capacité d'écoulement du trafic

On a la même expression que dans le cas du système ACC pour le nombre M de messages/heure/station (formule (1)).

Pour un système SCC:

$$M_{max} = \frac{3\,600 \times E_{max}}{(T_w / (P_1 P_2 P_3 P_4) + T_s / (P_2 P_3 P_4) + 2 T_m)} \quad (3)$$

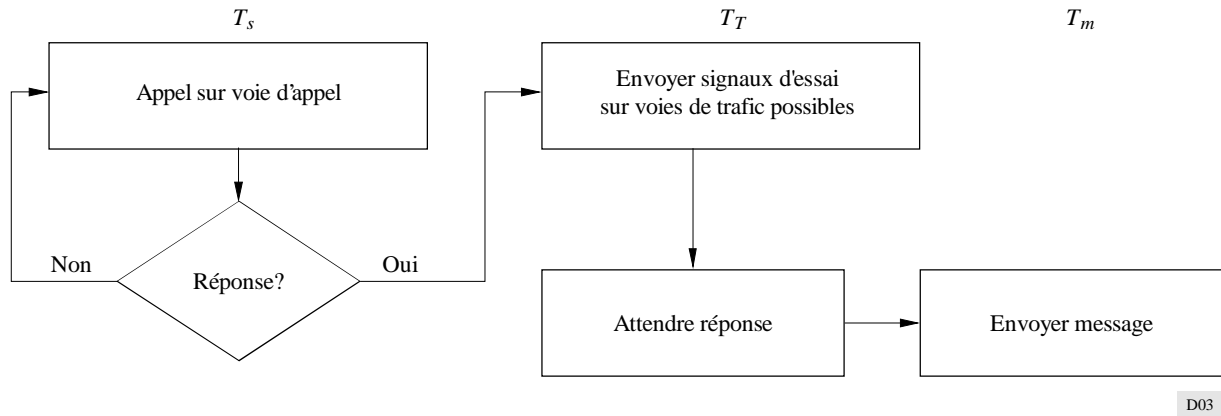
2.3 Système SSCT

2.3.1 Séquence d'appel

La séquence d'appel SSCT est représentée dans la Fig. 3. L'ensemble de voies d'appel exploré de façon synchrone équivaut à une voie «Aloha crénelé» dont la capacité est de 0,37 E. Cela tient compte des probabilités P_1 et P_2 . Il reste à spécifier la probabilité P_3 .

Au moment où la station de destination répond sur la voie d'appel, les deux stations passent sur les voies de trafic. La station appelante envoie un signal d'essai sur chacune des voies de trafic offertes, puis attend une réponse sur la voie préférée. Cette séquence dure T_T secondes.

FIGURE 3
Séquence d'appel SSCT



2.3.2 Capacité d'écoulement du trafic

Le nombre M de messages/heure/station est donné par:

$$M = \frac{3\,600 \times 0,37}{S T_s / P_3} \tag{4}$$

et

$$M_{max} = \frac{3\,600 \times E_{max}}{T_s / P_3 + 2 (T_T + T_m)} \tag{5}$$

3 Réseaux en étoile

Un réseau en étoile se compose d'une station centrale et de plusieurs stations périphériques.

3.1 Stations périphériques

Dans le cas d'une station périphérique, le raisonnement et les valeurs de M et M_{max} sont les mêmes que pour un réseau du type multipoint (S désignant le nombre de stations périphériques).

3.2 Station centrale

Si le réseau comporte S stations périphériques, la station centrale devra traiter un total de $2 M S$ messages. Pour obtenir ce résultat, la station centrale doit desservir simultanément un certain nombre de canaux radioélectriques. Si les stations périphériques fonctionnent à pleine capacité, M_{max} , il faudra disposer de S canaux radioélectriques simultanément dans la station centrale pour obtenir le débit maximum dans le réseau.

Si les stations périphériques ne fonctionnent pas à pleine capacité, mais à une capacité M plus petite, on pourra se contenter d'un nombre inférieur, R , de canaux radioélectriques simultanés. Le nombre R de canaux nécessaires dans la station centrale est donné par:

$$R = \frac{M S}{M_{max}} \tag{6}$$

Pour les systèmes ACC et SCC:

$$M = \frac{3\,600 \times E}{S T'_m} \quad (7)$$

où:

T'_m : temps nécessaire à l'émission d'un message

$$T'_m = T_s / (P_2 P_3 P_4) + T_m$$

Pour une station fonctionnant à pleine capacité:

$$M_{max} = \frac{3\,600 \times E_{max}}{T_{tot}} \quad (8)$$

où T_{tot} est le temps total pendant lequel une station est occupée.

Pour les systèmes ACC:

$$T_{tot} = T_L / (P_1 P_2 P_3 P_4) + T_s / (P_2 P_3 P_4) + 2 T_m \quad (9)$$

Pour les systèmes SCC:

$$T_{tot} = T_w / (P_1 P_2 P_3 P_4) + T_s / (P_2 P_3 P_4) + 2 T_m \quad (10)$$

Il vient:

$$R = \frac{E}{E_{max}} \times \frac{T_{tot}}{T'_m} \quad (11)$$

A noter que ce raisonnement n'est pas rigoureusement exact: en effet, les valeurs de P_1 , P_2 et P_3 sont plus petites pour une station périphérique car celle-ci communique avec une station centrale qui fonctionne à pleine capacité. Cependant, le résultat indiqué ci-dessus est commode dans la pratique.

Pour un système SSCT:

$$R = \frac{0,37}{E_{max}} \times \frac{(T_s / P_3 + 2 (T_t + T_m))}{T_s / P_3} \quad (12)$$

4 Hypothèses de base

Il y a lieu de faire les hypothèses indiquées ci-après pour évaluer la capacité d'écoulement du trafic et la qualité de fonctionnement des systèmes.

4.1 Message

On peut admettre l'utilisation d'une page standard de 20 lignes, à raison de 69 caractères par ligne (1 380 caractères).

Pour calculer le temps de transmission d'un message, T_m , on peut adopter les valeurs suivantes: 7 bits/caractère, CED de 50% et 10% de répétitions (soit $1\,380 \times 7 \times \frac{1}{0,5} \times 1,1 = 21\,252$ bits/message).

On peut aussi faire l'hypothèse suivante: chaque station du réseau émet et reçoit le même nombre de messages par heure, M .

4.2 Probabilité de propagation, P_4

Ce paramètre mesure le degré de réussite du système, s'agissant du choix de la voie possible dans les systèmes ACC et SCC. On a mesuré une probabilité de 63% dans des systèmes tests; cette valeur a été utilisée pour P_4 .

4.3 Temps d'exploration, T_S ; système ACC

On peut postuler un temps d'exploration T_S :

$$T_S = t(2C + 9) \quad (13)$$

où:

$$t = 0,392 \text{ s}$$

C : nombre de voies explorées.

4.4 Temps d'écoute, T_L ; système ACC

On peut admettre par hypothèse qu'une station ACC écoute pendant un temps égal au temps d'exploration des voies, pour vérifier qu'une voie est libre.

4.5 Temps d'attente, T_w ; système SCC

Si C voies ont été attribuées au réseau, le temps d'attente sera, en moyenne:

$$T_w = C/2 \times T_S \quad \text{s} \quad (14)$$

T_S étant le temps d'exploration en mode synchrone.

4.6 Temps d'établissement de la voie de trafic, T_T ; système SSCT

Dans le cas d'un système SSCT offrant cinq voies de trafic dans son appel initial, on peut admettre l'application de la procédure suivante. Les appels sont émis, séquentiellement, par la station appelante, qui se met ensuite en position d'écoute successivement sur les diverses voies pour capter une réponse. La station appelée répond sur la meilleure voie, mais son algorithme est conditionné pour choisir la première voie offerte qui est la plus favorable aux dires de la station appelante. En moyenne, la station appelante attendrait pendant $2,5 \times T_S$ (s) pour obtenir la réponse, mais en raison du conditionnement cette durée est de $1,5 \times T_S$ (s) dans la pratique.

On a donc:

$$T_T = (2,5 \times 2 + 1,5) T_S = 6,5 \times T_S \quad \text{s}$$

5 Résultats des calculs de trafic

On peut formuler les conclusions suivantes sur le vu des résultats des calculs, dans lesquels on a pris en compte pour les conditions de propagation la gamme complète des variations journalières et saisonnières et des variations du cycle d'activité solaire, ainsi qu'un large éventail de débits de données et de tailles de réseau.

5.1 ACC

La qualité de fonctionnement du réseau ne s'améliore pas forcément lorsqu'on augmente le nombre des voies de propagation. Par exemple, pour un débit de données de 1 200 bit/s, on a une meilleure qualité avec 6 voies qu'avec 14 si le réseau comporte moins de 30 stations. Avec 10 voies, on obtient une meilleure qualité de fonctionnement qu'avec 14 voies pour un nombre de stations allant jusqu'à 100. Cet effet tend à être plus prononcé lorsque le débit de données augmente.

Dans le cas des petits réseaux (10 stations ou moins), le choix du nombre de voies à attribuer est fort compliqué mais il n'y a aucun avantage à en attribuer un trop grand nombre.

Si on augmente la longueur du message en la portant à deux pages, on ne modifie pas la qualité de fonctionnement relative du réseau pour ce qui est des voies. Le système est un peu plus efficace avec les messages plus longs: chaque station émet et reçoit en moyenne un peu plus de la moitié du nombre des messages, par comparaison avec les messages d'une page.

5.2 SCC

Comme pour le système ACC, la qualité de fonctionnement du système SCC est généralement meilleure avec 10 voies qu'avec 14 voies; avec 6 voies, elle est souvent meilleure qu'avec 14. Ici encore, pour les réseaux comportant 10 stations ou moins, il n'est pas rentable d'attribuer un trop grand nombre de voies car la qualité a tendance à être aussi bonne avec moins de voies.

Si on augmente la longueur du message en la portant à deux pages, on ne modifie pas la qualité de fonctionnement relative du réseau pour ce qui est des voies. Le système est un peu plus efficace avec les messages plus longs: chaque station émet et reçoit en moyenne un peu plus de la moitié du nombre des messages, par comparaison avec les messages d'une page.

5.3 SSCT

La qualité de fonctionnement du système SSCT s'améliore quand on augmente les paramètres suivants: le débit des données, la longueur du message et le nombre des ensembles de voies explorées.

L'effet produit par les messages plus longs est particulièrement intéressant: comme le système est capable d'établir un certain nombre d'appels, déterminé uniquement par la vitesse d'exploration, le nombre M de messages/heure/station est presque le même pour les messages d'une page et les messages de deux pages.

L'utilisation de deux ensembles de voies d'appel a pour effet de doubler la capacité du système.

5.4 Discussion

Pour des réseaux comportant un petit nombre de stations, par exemple 15 ou moins, aucun des systèmes ne présente des avantages particuliers par rapport aux autres. A mesure que la taille des réseaux augmente, les systèmes SCC et SSCT se révèlent nettement supérieurs au système ACC.

Aux faibles débits de données, le système SSCT a une qualité de fonctionnement meilleure que celle du SCC, mais les deux systèmes sont équivalents aux débits élevés (SCC avec dix voies de propagation). Le SSCT est nettement supérieur lorsque la longueur du message augmente ou si on utilise deux ensembles de voies d'appel.

Les systèmes ACC et SCC exigent une planification rigoureuse car le nombre des voies explorées est une caractéristique d'importance capitale. Il est indispensable de mettre en œuvre une gestion des fréquences, car la qualité de fonctionnement peut être compromise si l'exploration porte sur un nombre excessif de voies. Lorsqu'on planifie des systèmes basés sur SCC et ACC, il faut tenir dûment compte des possibilités d'expansion future. Une augmentation du nombre des stations pourrait entraîner une modification du nombre des voies nécessaires pour obtenir la qualité de fonctionnement optimale.

6 Conclusion

Les formules et les résultats établis dans la présente Annexe peuvent être utilisés comme outil de planification. Il est possible de prévoir la qualité de fonctionnement attendue d'un système radioélectrique à commande automatique et aussi de prendre en compte les limites imposées au fonctionnement d'un tel système.

APPENDICE 1

DE L'ANNEXE 1

Calcul des probabilités relatives aux collisions et aux voies occupées

1 Probabilité P_1 pour que la voie choisie soit libre – ACC et SCC

Nombre total de messages/voie/s en 1 h:

$$m = \frac{M S}{3\,600 N} \quad (15)$$

où:

M : messages/heure/station

S : nombre de stations

N : nombre de voies.

Soit T'_m (s) la durée d'occupation d'une voie par un message.

La probabilité d'occurrence de K nouveaux messages pendant un intervalle de temps t est donnée par la distribution de Poisson:

$$P(K) = (mt)^K e^{-mt} / K! \quad K \geq 0 \quad (16)$$

où m désigne le débit moyen des messages.

Une voie est libre aussi longtemps qu'aucune autre station n'a commencé à émettre un message T'_m (s) plus tôt, ou ne commence à émettre un message au cours des T'_m (s) qui suivent. En d'autres termes, la probabilité d'absence de messages ($K = 0$) dans l'intervalle de temps $2 T'_m$ est la probabilité pour que la voie soit libre.

D'après l'équation (16):

$$\begin{aligned} P(0) &= \exp\left(-2 m T'_m\right) \\ &= \exp\left(-\frac{2 M S T'_m}{3600 N}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

D'autre part:

$$M = \frac{3600 \times E}{S \times T'_m} \quad (18)$$

où E (E) désigne la capacité totale d'écoulement de trafic du réseau.

On a donc:

$$P_1(0) = \exp(-2 E/N) \quad (19)$$

1.1 Cas de la station ACC

Lorsqu'une station ACC fonctionne à pleine capacité:

$$M_{max} = \frac{3600 \times E_{max}}{t_1 + t_s + 2 T_m} \quad (20)$$

où:

t_1 : temps d'écoute total: ($T_s / (P_1 P_2 P_3 P_4)$)

t_s : temps d'exploration total:

$$t_s = \frac{T_s (2 C + 9)}{(P_2 P_3 P_4)} \quad (21)$$

C : nombre de voies

T_m : durée du message.

Comme:

$$T'_m = t_s + T_m$$

on a:

$$P_1 = \exp\left(-\frac{2 \times E_{max} (t_s + T_m) S}{N (t_w + t_s + 2 T_m)}\right) \quad (22)$$

1.2 Cas de la station SCC

Lorsqu'une station SCC fonctionne à pleine capacité:

$$M_{max} = \frac{3600 \times E_{max}}{t_w + T_s + 2 T_m} \quad (23)$$

où:

t_w : temps d'attente total: $(T_s / (P_1 P_2 P_3 P_4))$

et:

$$P_1 = \exp \left(- \frac{2 \times E_{max} (T_s + T_m) S}{N (t_w + T_s + 2 T_m)} \right) \quad (24)$$

2 Probabilité P_2 pour qu'aucune collision n'ait lieu sur une voie choisie – ACC/SCC

La station se met en position d'écoute avant d'essayer d'émettre sur la voie choisie. Une voie est donc libre aussi longtemps qu'une autre station ne génère pas un message dans le temps T_m .

On a donc, comme pour l'équation (19):

$$P_2(0) = \exp(-E/N) \quad (25)$$

et de même, lorsque la station fonctionne à pleine capacité:

Pour une station ACC:

$$P_2 = \exp \left(- \frac{2 \times E_{max} (t_s + T_m) S}{N (t_1 + t_s + 2 T_m)} \right) \quad (26)$$

Pour une station SCC:

$$P_2 = \exp \left(- \frac{2 \times E_{max} (t_s + T_m) S}{N (t_w + t_s + 2 T_m)} \right) \quad (27)$$

3 Probabilité P_3 pour que la station de destination soit libre

Chaque station traite $2M$ messages par heure (M messages émis et M messages reçus).

Chaque station traite donc $2M/3600$ messages/s.

Une station est libre à un instant donné si aucun message n'est émis ou reçu T'_m plus tôt ni au cours des T'_m secondes qui suivent, T'_m étant la durée totale d'occupation d'une station par un message.

La probabilité $P_3(0)$ pour que la station soit libre est donc:

$$P_3 = \exp \left(- \frac{2 M 2 T'_m}{3600} \right) \quad (28)$$

3.1 Pour une station ACC

Un message émis occupe le temps $t_1 + t_s + T_m$.

D'où temps total d'occupation:

$$2 T'_m = t_1 + t_s + 2 T_m \quad (29)$$

On a:

$$M = \frac{3\,600 \times E}{s (t_s + T_m)} \quad (30)$$

et:

$$P_3 = \exp \left(- \frac{2 \times E (t_1 + t_s + 2 T_m)}{N (t_s + T_m)} \right) \quad (31)$$

A pleine capacité:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3\,600 \times E_{max}}{(t_1 + t_s + 2 T_m)} \\ &= \frac{3\,600 \times E_{max}}{2 T'_m} \end{aligned} \quad (32)$$

et:

$$P_3 = \exp (- 2 \times E_{max}) \quad (33)$$

3.2 Pour une station SCC

Un message émis occupe le temps $t_w + t_s + T_m$ et un message reçu occupe le temps T_m .

D'où temps total d'occupation:

$$2 T'_m = t_w + t_s + 2 T_m \quad (34)$$

On a:

$$M = \frac{3\,600 \times E}{s (t_s + T_m)} \quad (35)$$

et:

$$P_3 = \exp \left(- \frac{2 \times E (t_w + t_s + 2 T_m)}{N (t_s + T_m)} \right) \quad (36)$$

A pleine capacité:

$$\begin{aligned} M &= \frac{3\,600 \times E_{max}}{(t_w + t_s + 2 T_m)} \\ &= \frac{3\,600 \times E_{max}}{2 T'_m} \end{aligned} \quad (37)$$

et:

$$P_3 = \exp (- 2 \times E_{max}) \quad (38)$$

3.3 Pour une station SSCT

$$M = \frac{3600 \times 0,37 \times C_s}{S T_s / P_3} \quad (39)$$

où C_s désigne le nombre d'ensembles de voies d'appel

et:

$$P_3 = \exp\left(-\frac{4 T'_m \times 0,37 \times C_s \times P_3}{S T_s}\right) \quad (40)$$

où $T'_m = (6,5T_s + T_m)$

soit:

$$P = e^{-KP}$$

d'où, en première approximation: $P' = 1 - KP'$

On a donc:

$$P' = 1 / (1 + K) \quad (41)$$

avec:

$$K = \frac{4 T'_m \times 0,37}{S T_s}$$

avec:

$$P_3 = \exp\left(-\frac{4 T'_m \times 0,37 \times P_3}{S T_s}\right) \quad (42)$$

et:

$$P_3 = \exp\left(-\frac{4 T'_m \times 0,37 \times C_s}{S T_s + 4 T'_m \times 0,37}\right) \quad (43)$$

Lorsque la station fonctionne à pleine capacité:

$$M_{max} = \frac{3600 \times E_{max}}{2 T'_m} \quad (44)$$

et:

$$P_3 = \exp(-2 \times E_{max}) \quad (45)$$

4 Calculs pratiques

Les expressions établies ci-dessus pour P_1 , P_2 et P_3 contiennent des termes tels que t_1 , t_w et t_s , qui contiennent eux-mêmes P_1 , P_2 et P_3 . Pour calculer les valeurs de t_1 , t_w et t_s , on admet par hypothèse que P_1 , P_2 et P_3 ont leur valeur nominale. Les valeurs calculées de P_1 , P_2 et P_3 sont relativement peu influencées par les variations des valeurs admises par hypothèse pour calculer t_1 , t_w et t_s . En conséquence, on fait varier les valeurs de P_1 , P_2 et P_3 jusqu'à l'obtention d'un certain degré de compatibilité.