



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

**UIT-T**

SECTEUR DE LA NORMALISATION  
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS  
DE L'UIT

**G.911**

(03/93)

**SECTIONS NUMÉRIQUES ET SYSTÈMES  
DE LIGNE NUMÉRIQUE**

---

**PARAMÈTRES ET MÉTHODES DE CALCUL  
POUR LA FIABILITÉ ET LA DISPONIBILITÉ  
DES SYSTÈMES À FIBRES OPTIQUES**

**Recommandation UIT-T G.911**

(Antérieurement «Recommandation du CCITT»)

---

## AVANT-PROPOS

L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'Union internationale des télécommunications (UIT). Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

La Conférence mondiale de normalisation des télécommunications (CMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes que les Commissions d'études de l'UIT-T doivent examiner et à propos desquels elles doivent émettre des Recommandations.

La Recommandation UIT-T G.911, élaborée par la Commission d'études XV (1988-1993) de l'UIT-T, a été approuvée par la CMNT (Helsinki, 1-12 mars 1993).

---

## NOTES

1 Suite au processus de réforme entrepris au sein de l'Union internationale des télécommunications (UIT), le CCITT n'existe plus depuis le 28 février 1993. Il est remplacé par le Secteur de la normalisation des télécommunications de l'UIT (UIT-T) créé le 1<sup>er</sup> mars 1993. De même, le CCIR et l'IFRB ont été remplacés par le Secteur des radiocommunications.

Afin de ne pas retarder la publication de la présente Recommandation, aucun changement n'a été apporté aux mentions contenant les sigles CCITT, CCIR et IFRB ou aux entités qui leur sont associées, comme «Assemblée plénière», «Secrétariat», etc. Les futures éditions de la présente Recommandation adopteront la terminologie appropriée reflétant la nouvelle structure de l'UIT.

2 Dans la présente Recommandation, le terme «Administration» désigne indifféremment une administration de télécommunication ou une exploitation reconnue.

© UIT 1994

Droits de reproduction réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'UIT.

## TABLE DES MATIÈRES

*Page*

1	Introduction .....	1
2	Paramètres liés à la fiabilité et à la disponibilité des systèmes à fibres optiques .....	1
2.1	Disponibilité des systèmes à fibres optiques et paramètres liés à la fiabilité de la maintenance .....	1
2.2	Paramètres de fiabilité des dispositifs optiques actifs.....	2
2.3	Paramètres de fiabilité des dispositifs optiques passifs .....	2
2.4	Paramètres de fiabilité des fibres et des câbles optiques .....	2
3	Définitions.....	3
4	Méthode de prévision de la fiabilité en fonctionnement stabilisé pour les dispositifs, les unités et les systèmes à fibres optiques en configuration série .....	4
4.1	Objet et champ d'application.....	4
4.2	Applications de la méthode de prévision du taux de défaillance .....	5
4.3	Directives.....	5
4.4	Méthode de prévision du taux de défaillance en fonctionnement stabilisé.....	6
5	Méthodes de calcul des paramètres de fiabilité et de maintenance applicables aux dispositifs, unités et systèmes à fibres optiques en configuration série .....	7
5.1	MTBF d'une carte de circuits enfichable .....	7
5.2	MTBF d'un système (équipement terminal et répéteur).....	8
5.3	Fréquence des interventions de maintenance programmées .....	9
5.4	Taux de défaillance aléatoire .....	9
5.5	Facteur de pannes de jeunesse .....	9
6	Méthode de calcul des paramètres de disponibilité et de maintenance des systèmes à fibres optiques avec protection de ligne.....	9
6.1	Considérations générales – Protection de ligne et protection de réseau .....	9
6.2	Méthode de l'espace d'états pour déterminer les paramètres de disponibilité et de maintenance dans les systèmes à fibres optiques avec protection de lignes .....	10
6.3	Différentes options de systèmes à fibres optiques avec protection de ligne .....	14
7	Circuits de référence pour la disponibilité des canaux de bout en bout des systèmes de ligne à fibres optiques .....	15
8	Méthode de répartition des objectifs d'indisponibilité de bout en bout.....	17
8.1	Facteurs contribuant à l'indisponibilité – Considérations concernant les systèmes SDH et PDH à fibres optiques.....	17
8.2	Méthodes de répartition .....	17
Annexe A	– Détermination du taux de panne des équipements en fonctionnement stabilisé – Exemple .....	19
A.1	Description de l'équipement (exemple) .....	19
A.2	Paramètres de fiabilité des composants (exemple) .....	19
A.3	Taux de panne de l'équipement en fonctionnement stabilisé (FIT) .....	19
Annexe B	– Etude de cas – Disponibilité des canaux sur une liaison à fibres optiques à 4 × 140 Mbit/s avec répéteurs et protection de ligne en «3 + 1».....	20
B.1	Description.....	20
B.2	Résultats – Indisponibilité en minutes/an par canal de 140 Mbit/s.....	22
Annexe C	– Etude de cas – Disponibilité des canaux sur une liaison point à point en fibres optiques dans un réseau local avec protection de ligne «1 + 1» avec ou sans trajet de redondance pour le câble.....	22
C.1	Description.....	23
C.2	Résultats.....	25



## PARAMÈTRES ET MÉTHODES DE CALCUL POUR LA FIABILITÉ ET LA DISPONIBILITÉ DES SYSTÈMES À FIBRES OPTIQUES

(Helsinki, 1993)

### 1 Introduction

La présente Recommandation donne des précisions sur les paramètres nécessaires pour caractériser la fiabilité des systèmes à fibres optiques (y compris la fiabilité des dispositifs et la disponibilité des voies offertes par ces systèmes), ainsi que sur les procédures qui permettront de prévoir et de calculer cette fiabilité. Il s'agit essentiellement de systèmes à fibres monomodes (voir la Figure 1).

### 2 Paramètres liés à la fiabilité et à la disponibilité des systèmes à fibres optiques

#### 2.1 Disponibilité des systèmes à fibres optiques et paramètres liés à la fiabilité de la maintenance

Le présent paragraphe donne les paramètres de service et les paramètres de maintenance de système. Les valeurs pourront être fournies par des études de cas et nécessitent un complément d'étude. On peut cependant prévoir que des paramètres différents et des valeurs différentes pourront être nécessaires pour les diverses applications des systèmes et notamment: point à point, grande distance/distance moyenne; réseaux locaux, etc. (voir les Tableaux 1 et 2).

TABLEAU 1/G.911

Paramètres de service des systèmes	Unités
Disponibilité moyenne du système <sup>a)</sup>	Indisponibilité en minutes/année
Disponibilité moyenne d'un canal	Indisponibilité minutes/année par canal
Disponibilité à l'interface du système d'exploitation	Indisponibilité minutes/année
<sup>a)</sup> Pour permettre d'évaluer les quantités de pièces de rechange nécessaires.	

TABLEAU 2/G.911

Paramètres de maintenance des systèmes	Unités
MTBF du système (par exemple équipements terminaux, répéteurs et supports)	Années
MTBF de blocs de circuits enfichables <sup>a)</sup>	Années
Fréquence des interventions de maintenance programmées	Evénements par année
Taux de défaillance aléatoire	Evénements par année
Facteur de pannes de jeunesse	Sans dimension
MTBF Temps moyen entre deux pannes ( <i>mean time between failures</i> )	
<sup>a)</sup> Pour permettre d'évaluer les quantités de pièces de rechange nécessaires.	

## 2.2 Paramètres de fiabilité des dispositifs optiques actifs

Le présent paragraphe traite des paramètres de fiabilité permettant de caractériser des dispositifs à fibres optiques actifs tels que lasers, LED et détecteurs. Les valeurs pourront être fournies par des études de cas et nécessitent un complément d'étude (voir le Tableau 3).

TABLEAU 3/G.911

Paramètres de fiabilité des dispositifs optiques actifs	Unités
Durée de vie médiane	Années
Ecart type ( $\sigma$ )	
Taux de défaillance dû à l'usure au bout de 10 ans ( $\lambda_{10}$ ) Taux de défaillance dû à l'usure au bout de 20 ans ( $\lambda_{20}$ )	FIT FIT
Energie d'activation entraînant l'usure ( $E_n$ )	eV
Taux de défaillance aléatoire (régime permanent) ( $\lambda_r$ )	FIT
Energie d'activation entraînant des défaillances aléatoires ( $E_n$ )	eV

## 2.3 Paramètres de fiabilité des dispositifs optiques passifs

Le présent paragraphe comprend les paramètres de fiabilité nécessaires pour caractériser des dispositifs à fibres optiques passifs tels que connecteurs, épissures et diviseurs. L'identification des paramètres et de leurs valeurs nécessite un complément d'étude (voir le Tableau 4).

TABLEAU 4/G.911

Paramètres de fiabilité des dispositifs optiques passifs	Unités

## 2.4 Paramètres de fiabilité des fibres et des câbles optiques

Le présent paragraphe traite des paramètres de fiabilité nécessaires pour caractériser les fibres et les câbles optiques. Différents paramètres pourraient être nécessaires pour différentes applications de système; ce point nécessite un complément d'étude (voir le Tableau 5).

TABLEAU 5/G.911

Paramètres de fiabilité des fibres et des câbles optiques	Unités

### 3 Définitions

Le présent article comprend les définitions des paramètres de fiabilité qui permettent de caractériser la fiabilité des systèmes et des dispositifs à fibres optiques. On a indiqué entre parenthèses la source et le numéro de code CCITT (*Livre bleu* du CCITT, Supplément n° 6 du fascicule II.3).

- 1) **entité ou individu** (par exemple, un système ou une voie) – Tout élément, dispositif, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système que l'on peut considérer individuellement [DV 3001].
- 2) **période de taux de défaillance constant** – Période éventuelle dans la vie d'une entité non réparée pendant laquelle la densité instantanée de défaillance est approximativement constante.

NOTE – Dans chaque cas particulier, il est nécessaire de préciser ce que signifie «approximativement constante» [DV 7308].

- 3) **disponibilité** – Aptitude d'une entité à être en état de remplir une fonction requise à un instant donné, ou à un instant quelconque d'un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs éventuellement nécessaires est assurée.

#### NOTES

- 1 La disponibilité dépend de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance de l'entité.
  - 2 La définition de l'entité doit préciser quels sont les moyens considérés comme étant extérieurs à l'entité.
  - 3 En anglais, le terme «availability» (disponibilité) est aussi employé comme mesure de «availability performance» [DV 4002].
- 4) **disponibilité (instantanée)** – Probabilité selon laquelle une entité est disponible à un instant donné,  $t$  [DV 8101].
  - 5) **disponibilité moyenne** – Moyenne de la disponibilité instantanée sur un intervalle de temps donné ( $t_1, t_2$ ) [DV 8103].
  - 6) **temps moyen entre deux pannes (MTBF)** (*mean time between failures*) – Espérance mathématique du temps entre défaillances [DV 8208].
  - 7) **période initiale de défaillance (pannes de jeunesse)** – Période initiale éventuelle dans la vie d'une entité, commençant à un instant donné et pendant laquelle l'intensité instantanée de défaillance, pour une entité réparée, ou le taux de défaillance instantané, pour une entité non réparée, décroît rapidement.

NOTE – Dans chaque cas particulier, il est nécessaire de préciser ce que signifie «décroit rapidement» [DV 7306].

- 8) **facteur de pannes de «jeunesse» (IMF)** (*infant mortality factor*) – Rapport du nombre prévu de défaillances au cours d'une période initiale déterminée (par exemple la première année) au nombre prévu de défaillances au cours d'une période de même durée en fonctionnement stabilisé (avant usure définitive).
- 9) **durée de vie médiane (ML)** (*median life*) – Pour des dispositifs optoélectroniques, on représente la durée de vie médiane sur la courbe de probabilité lognormale des temps de fonctionnement avant défaillance par le point avant lequel 50% des dispositifs sont tombés en panne et 50% ne le sont pas encore. (Voir la Note 1 du point 21.)
- 10) **écart type ( $\sigma$ )** – Pour des dispositifs optoélectroniques, l'écart type est donné par l'expression mathématique classique de cette grandeur statistique, et qui se calcule à l'aide des logarithmes naturels des temps de fonctionnement avant défaillance de ces dispositifs. (Voir la Note 2 du point 21.)
- 11) **période de défaillance par vieillissement; période de défaillance par usure** – Période ultérieure éventuelle dans la vie d'une entité pendant laquelle l'intensité instantanée de défaillance, pour une entité réparée, ou le taux instantané de défaillance, pour une entité non réparée, croît rapidement.

NOTE – Dans chaque cas particulier, il est nécessaire de préciser ce que signifie «croît rapidement» [DV 7309].

- 12) **taux de défaillance par usure** – Le taux de défaillance par usure est une mesure du nombre d'entités tombant en panne par unité de temps en raison de mécanismes d'usure. Il n'est pas calculé directement pour les dispositifs optoélectroniques, mais obtenu à partir de l'espérance statistique d'une distribution lognormale pour laquelle la durée de vie médiane et l'écart type ont été estimés.
- 13) **défaillance par vieillissement; défaillance par usure** – Défaillance dont la probabilité d'occurrence augmente avec le temps, par suite de processus inhérents à l'entité [DV 5209].
- 14) **énergie d'activation ( $E_n$ )** – Energie cinétique minimale nécessaire du centre d'inertie avant qu'une réaction chimique puisse se produire. Elle est normalement exprimée en électrons-volts (eV) et utilisée comme une partie du facteur d'accélération d'Arrhenius au début de la durée d'utilisation.

- 15) **facteur d'accélération d'Arrhenius** – Expression précisant la relation entre les périodes de défaillances à deux températures différentes.

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{E_0}{\kappa} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

où

$t_{1,2}$  est le temps avant défaillances,

$E_0$  est l'énergie d'activation en électrons-volts (eV),

$\kappa$  est la constante de Boltzman,  $8,6 \times 10^{-5}$  eV/K,

$T_{1,2}$  température absolue, K.

- 16) **taux de défaillance aléatoire** – Le taux de défaillance aléatoire est une mesure du nombre d'unités qui tombent en panne par unité de temps en raison de divers défauts de fabrication ou (plus souvent) d'assemblage non associés aux mécanismes ordinaires d'usure. Pour les dispositifs optoélectroniques, on admet généralement que l'ensemble des mécanismes de défaillance aléatoire peut être modélisé en première approximation par une distribution exponentielle. Dans ce cas, le taux de défaillance n'est pas obtenu directement à partir des données mais de l'espérance statistique (unilatérale) d'une distribution exponentielle pour un taux de confiance donné (par exemple, un intervalle de confiance à 60%).
- 17) **temps de maintenance** – Intervalle de temps pendant lequel une opération de maintenance est effectuée sur une entité, manuellement ou automatiquement, y compris les délais techniques et les délais logistiques [DV 7101].
- 18) **durée moyenne de panne (MTTR) (mean time to repair)** – Temps total de maintenance corrective divisé par le nombre total d'opérations de maintenance pendant une période de temps donnée [DV 8310].
- 19) **fréquence des opérations de maintenance** – Inverse de l'intervalle de temps moyen s'écoulant entre les débuts des opérations de maintenance successives pendant une période de temps donnée (en événements par période de temps donnée).
- 20) **défaillances dans le temps (MT) (failure in time)** – Elles sont normalement exprimées en nombre de défaillances par milliard d'heures de fonctionnement.
- 21) **disponibilité en fonctionnement stabilisé** – La disponibilité en fonctionnement stabilisé est la limite de  $A(t)$  lorsque  $t$  tend vers l'infini.  $A(t)$  est la probabilité selon laquelle l'élément fonctionnera à un moment spécifié  $t$ , et a pour expression:

$$A(t) = \text{Probabilité } (X(t) = 1)$$

où

$X(t)$  caractérise l'état, au moment  $t$ , d'un système entretenu. Si le système fonctionne au moment  $t$ , on a:  $X(t) = 1$ , sinon  $X(t) = 0$ .

NOTES

1 Pour la définition de «valeur moyenne de la durée de vie utile», voir DV 7305.

2 Voir aussi DV 2010.

## 4 Méthode de prévision de la fiabilité en fonctionnement stabilisé pour les dispositifs, les unités et les systèmes à fibres optiques en configuration série

### 4.1 Objet et champ d'application

On considère ici que la fiabilité est une mesure de la fréquence des défaillances des équipements en fonction du temps. La fiabilité a une influence sur les coûts de maintenance et sur la continuité du service. Les prévisions de la fiabilité peuvent faciliter le choix d'un produit parmi une liste. Il est donc essentiel que ces prévisions, pour des produits concurrents, soient fondées sur des procédures communes (voir la Note 1).

L'objectif de cette méthode de prévision de la fiabilité est de recommander une procédure commune. La méthode est censée s'appliquer aux unités et systèmes électroniques en général et, en particulier, aux unités et systèmes à utiliser avec les câbles à fibres optiques.

Cette méthode de prévision de la fiabilité est basée sur l'approche dite des «fiabilités élémentaires des constituants» (voir la Note 2).

#### NOTES

1 Il est important de noter que les taux de défaillance des composants peuvent être conditionnés par des normes susceptibles de différer d'un constructeur à un autre (ces écarts peuvent être dus à des taux de défaillance génériques et à d'autres facteurs liés à l'environnement, aux contraintes mécaniques, à la qualité, etc.).

2 Il existe d'autres méthodes pour prévoir la fiabilité, à savoir:

- les estimations statistiques, qui consistent à combiner les résultats d'un essai de laboratoire avec des prévisions fournies par la méthode des «fiabilités élémentaires des constituants»;
- les estimations statistiques de la fiabilité en service, fondées sur des études de suivi sur le terrain.

Le champ d'application est limité aux défaillances liées au matériel dans les conditions du fonctionnement stabilisé. La méthode de prévision du facteur de pannes de jeunesse doit faire l'objet d'un complément d'étude. La présente Recommandation ne s'applique pas aux systèmes complexes qui ont des objectifs de fiabilité pour chacune des fonctions individuelles ou pour divers états de fonctionnement en service dégradé.

## 4.2 Applications de la méthode de prévision du taux de défaillance

Cette méthode peut être utilisée dans les situations suivantes.

### 4.2.1 Constructeurs/fournisseurs d'équipements

La méthode comporte des instructions devant être suivies par les fournisseurs pour donner des prévisions de la fiabilité de leurs produits.

Le fournisseur peut utiliser une autre méthode (voir plus haut) pour prévoir la fiabilité des dispositifs, unités et systèmes en configuration série; cependant, la méthode des fiabilités élémentaires des constituants est nécessaire en tant que référence.

### 4.2.2 Propriétaires d'équipements et exploitants de réseaux

La méthode peut être appliquée par les propriétaires d'équipements et/ou les exploitants de réseaux pour accomplir les tâches suivantes:

- a) spécifier et évaluer la fiabilité des produits à acheter. Les prévisions de fiabilité fournissent des données pour l'analyse du coût d'utilisation global des matériels;
- b) mesurer les paramètres liés à la fiabilité du produit qui influent sur le service.

En combinant les prévisions de fiabilité avec des paramètres de maintenance (tels que le temps moyen de réparation), il est possible de calculer les paramètres suivants qui influent sur le service:

- fréquence des interruptions en fonctionnement stabilisé;
  - fréquence des interventions de maintenance;
  - valeur attendue du temps d'indisponibilité par an;
- c) fournir une mesure de la fiabilité d'un système de ligne, car ce paramètre affecte l'activité de maintenance. Par exemple, on peut obtenir des prévisions de la fréquence des interventions de maintenance et/ou de réparation.

## 4.3 Directives

### 4.3.1 Définition d'une défaillance

Il convient d'adopter une définition spécifique pour les défaillances. Cette définition est un élément d'importance cruciale pour la prévision de la fiabilité d'un système. Pour un équipement simple, la définition d'une défaillance est généralement claire.

Dans le cas des équipements complexes (par exemple, un système de ligne avec câbles à fibres optiques), on peut faire la distinction entre les pannes qui influent sur la maintenance ou les réparations et celles qui influent sur le service (par exemple: «panne importante»  $BER > 10^{-4}$ ).

### 4.3.2 Conditions d'exploitation

Il convient de décrire l'environnement dans lequel les sous-ensembles et les systèmes seront utilisés:

- température et humidité, et leurs variations;
- équipements de ligne uniques ou avec redondance;
- pannes de l'alimentation secteur;
- perturbations électromagnétiques, décharges atmosphériques.

### 4.3.3 Description de l'environnement

Les taux de défaillance varient en fonction de l'environnement d'exploitation prévu. Il y a lieu de spécifier le ou les facteurs multiplicatifs du taux de défaillance associé à l'environnement. Si l'ensemble du système est destiné à fonctionner dans plusieurs environnements, chaque facteur doit être spécifié comme il convient.

### 4.3.4 Ajustement des estimations données par cette méthode

La méthode décrite ici est appelée à être la méthode de référence, mais cela n'exclut pas l'emploi d'autres sources de données et/ou d'autres procédures d'ingénierie valables sur le plan technique pour estimer le taux de défaillance des dispositifs, des unités ou des systèmes. Ces sources de données et procédures pourraient inclure (voir plus haut) des données fournies par le constructeur du dispositif ou par le fournisseur de l'unité, des considérations sur la physique de la fiabilité et des analyses d'ingénierie. Cet ajustement des estimations fournies par la méthode de référence peut être spécialement utile pour des dispositifs relevant d'une technologie nouvelle, pour lesquels on ne dispose pas encore de données d'utilisation pratique suffisantes.

## 4.4 Méthode de prévision du taux de défaillance en fonctionnement stabilisé

### 4.4.1 Applicabilité de la méthode

Cette méthode s'applique dans tous les cas où le fournisseur souhaite mettre à profit la période de rodage d'un dispositif ou d'une unité.

L'intensité des défaillances correspondant aux défaillances qui influent sur la maintenance représente le volume de réparations à apporter par unité de temps; elle est égale à la somme des taux de défaillance de tous les composants de l'entité considérée.

Pour les entités non redondantes, l'intensité des défaillances correspondant aux défaillances qui influent sur le service représente le volume de dégradations du service par unité de temps; elle est égale à la somme des taux de défaillance des composants dont les défaillances influent sur le service.

Pour les entités redondantes, la méthode permettant d'établir l'intensité des défaillances qui influent sur le service dépend du type de redondance ainsi que de la manière dont elle est mise en place.

### 4.4.2 Taux de défaillance d'un dispositif en fonctionnement stabilisé ( $\lambda_{si}$ )

Dans ce cas général, le taux de défaillance en fonctionnement stabilisé est donné par:

$$\lambda_{si} = N_i \mu_{gi} \pi_{qi} \pi_{si} \pi_{ti}$$

où

$N_i$  est le nombre de dispositifs de type  $i$ ;

$\mu_{gi}$  est le taux de défaillance générique du dispositif de type  $i$ ;

$\pi_{qi}$  est le facteur de qualité du dispositif de type  $i$  (voir la Note);

$\pi_{si}$  est le facteur de contrainte pour le dispositif de type  $i$  (voir la Note);

$\pi_{ti}$  est le facteur de température pour le dispositif de type  $i$ , dû à la température de fonctionnement normale en régime stabilisé. Une distinction doit être faite entre la température ambiante et la température intrinsèque du dispositif ou de l'unité.

NOTE – Ces facteurs peuvent différer selon la norme appliquée par l'exploitant du réseau ou par le constructeur.

#### 4.4.3 Taux de défaillance d'une unité en fonctionnement stabilisé ( $\lambda_s$ )

Le taux de défaillance d'une unité en fonctionnement stabilisé est égal à la somme des taux de défaillance des dispositifs en fonctionnement stabilisé:

$$\lambda_s = \pi_e \sum_{i=1}^{i=N} \lambda_{si}$$

où

$N$  est le nombre de dispositifs  $N_i$  différents dans le sous-ensemble;

$\pi_e$  est le coefficient multiplicatif du taux de défaillance du fait des conditions ambiantes.

NOTE – Voir l'exemple dans l'Annexe A.

#### 4.4.4 Taux de défaillance d'un système de ligne en fonctionnement stabilisé ( $\lambda_{sys}$ )

Si les caractéristiques spécifiées (critères de défaillance, paramètres de fiabilité, configuration de l'équipement et conditions d'exploitation) indiquent que l'on peut adopter un modèle de fiabilité du type série, le taux de défaillance total du système ( $\lambda_{sys}$ ) sera égal à la somme de tous les taux de défaillance stabilisés des sous-ensembles ( $\lambda_s$ ) (voir la Note 2):

$$\lambda_{sys} = \sum_{j=1}^{J=M} \lambda_s(j)$$

où

$\lambda_s(j)$  est le taux de défaillance en fonctionnement stabilisé pour l'unité  $j$ ;

$M$  est le nombre d'unités.

NOTES

1 On suppose que les taux de défaillance des unités en fonctionnement stabilisé représentent uniquement les défaillances qui influent sur le service.

2 Dans le cas de systèmes redondants, de configurations redondantes d'équipements et/ou d'unités/tableaux, la somme de tous les taux de défaillance ( $\lambda_s$ ) ne correspond pas à la fiabilité totale du système. La méthode de prévision à utiliser dans ce cas est à l'étude.

## 5 Méthodes de calcul des paramètres de fiabilité et de maintenance applicables aux dispositifs, unités et systèmes à fibres optiques en configuration série

### 5.1 MTBF d'une carte de circuits enfichable

Le temps moyen entre deux pannes (MTBF) (*mean time between failures*) est l'estimation, en fonctionnement stabilisé, du temps qui s'écoule entre deux défaillances. On a la relation mathématique suivante entre le MTBF (en années) et le taux de défaillance (en FIT ou en défaillances par tranche de  $10^9$  heures):

$$M = \frac{(1.14 \cdot 10^5)}{F}$$

où  $M$  désigne le MTBF (en années) et  $F$  le taux de défaillance (en FIT).

On calcule le MTBF d'une carte de circuits enfichable en faisant la somme des taux de défaillance de tous les éléments qui composent le banc de circuits. A titre d'exemple, le Tableau 6 donne le calcul pour une carte de circuits composée d'un laser encapsulé ayant un taux de défaillance de 1500 FIT, de 5 circuits intégrés ayant chacun un taux de défaillance de 300 FIT, de 4 résistances (taux de défaillance: 123 FIT chacune), de 7 condensateurs (57 FIT chacun), enfin d'un connecteur et d'une plaque de circuit imprimé (27 FIT chacun).

Il existe plusieurs manières de calculer les FIT unitaires pour les éléments constituant la carte de circuits. La méthode de calcul doit être décrite en détail quand on donne les valeurs du MTBF d'une carte de circuits enfichable.

TABLEAU 6/G.911

**Exemple de calcul du MTBF d'un banc de circuits enfichable**

Type de dispositif	Nombre	FIT unitaire	Total FIT
Laser encapsulé	1	1500	1500
Circuits intégrés	5	300	1500
Résistances	4	123	492
Condensateur	7	57	399
Connecteur	1	27	27
Plaque de circuit	1	27	27
Total			3945 FIT
$MTBF = \frac{1,14 \cdot 10^5}{3945} = 28,9 \text{ années}$			

**5.2 MTBF d'un système (équipement terminal et répéteur)**

Le temps moyen entre deux pannes (MTBF) est l'estimation, en fonctionnement stabilisé, du temps qui s'écoule entre deux pannes. On a la relation mathématique suivante entre le MTBF (en années) et le taux de défaillance (en FIT ou en défaillances par tranche de  $10^9$  heures):

$$M = \frac{(1,14 \cdot 10^5)}{F}$$

où  $M$  désigne le MTBF (en années) et  $F$  le taux de défaillance (en FIT).

On calcule le MTBF d'un système en faisant la somme des taux de défaillance de toutes les cartes de circuits enfichables qui composent le système (et des autres équipements qui ne sont pas montés sur les cartes de circuits). A titre d'exemple, le Tableau 7 donne le calcul pour un système composé de 5 cartes de voies ayant chacune un taux de défaillance de 8000 FIT, de 4 systèmes d'alimentation en énergie (6500 FIT chacun), de 4 régénérateurs (12 050 FIT chacun), d'une carte microprocesseur (12 300 FIT) et d'une carte moniteur (3400 FIT).

TABLEAU 7/G.911

**Exemple de calcul du MTBF d'un système**

Type de dispositif	Nombre	FIT unitaire	Total FIT
Carte de canal	5	8 000	40 000
Alimentation en énergie	4	6 500	26 000
Régénérateur	4	12 050	48 200
Carte microprocesseur	1	12 300	12 300
Carte moniteur	1	3 400	3 400
Total			129 900 FIT
$MTBF = \frac{1,14 \cdot 10^5}{1,299 \cdot 10^5} = 0,878 \text{ année}$			

### 5.3 Fréquence des interventions de maintenance programmées

Cette fréquence s'exprime par l'intervalle de temps moyen qui s'écoule entre les instants de début des interventions de maintenance (préventive) programmées. On le détermine en calculant l'intervalle entre des interventions successives. Par exemple, si le fournisseur d'un système à fibres optiques veut que les interventions programmées aient lieu tous les six mois, la fréquence serait de 2 interventions par an.

### 5.4 Taux de défaillance aléatoire

Le taux de défaillance aléatoire est une mesure du nombre d'unités qui tombent en panne, par unité de temps, du fait d'un certain nombre de défauts de fabrication ou (le plus souvent) de défauts de montage indépendants du ou des mécanismes habituels d'usure. On détermine le taux de défaillance aléatoire d'un système en faisant la somme des taux de défaillance aléatoires de tous les éléments qui composent le système, y compris les défaillances qui influent sur le service, celles qui n'influent pas sur le service et toutes les interventions de maintenance programmées et non programmées. Il existe plusieurs manières de calculer les taux de défaillance aléatoires pour les éléments qui composent le système. La méthode de calcul doit être décrite en détail quand on donne les valeurs du taux de défaillance aléatoire du système.

### 5.5 Facteur de pannes de jeunesse

Le facteur de pannes de jeunesse (IMF) (*infant mortality factor*) est le rapport du nombre prévu de pannes pendant la première période de service au nombre prévu de pannes pendant une période égale de fonctionnement stabilisé. On le calcule à partir de deux paramètres. Pour calculer le nombre prévu de pannes pendant la première période de service, on détermine l'aire de la surface comprise sous la courbe de pannes de jeunesse de Weibull sur la première période de service commençant à l'instant où le service est fourni pour la première fois à l'utilisateur. La courbe de Weibull est déterminée par la somme des courbes correspondant aux éléments du système. Pour calculer le nombre prévu de pannes pendant une année de fonctionnement stabilisé, on détermine le taux de pannes aléatoire et on convertit ce taux en nombre de pannes par année.

## 6 Méthode de calcul des paramètres de disponibilité et de maintenance des systèmes à fibres optiques avec protection de ligne

### 6.1 Considérations générales – Protection de ligne et protection de réseau

La protection en matière de télécommunication consiste essentiellement à assurer un niveau de redondance élevé afin d'améliorer la disponibilité globale de bout en bout des circuits usagers. Ceci est rendu nécessaire par la connexion en cascade d'un grand nombre de dispositifs et d'éléments de réseau qui entraîne une détérioration des caractéristiques de disponibilité incompatible avec les attentes de nombreux usagers.

Le but des réseaux redondants est d'offrir aux usagers un haut niveau de disponibilité, mais un tel but ne peut être atteint par l'exploitant du réseau qu'à un certain coût. Déjà et de manière évidente, ce coût supplémentaire est dû à l'accroissement du nombre d'équipements nécessaires pour constituer les circuits de réserve tout le long du réseau. Mais deux autres facteurs de coûts importants doivent également être pris en compte; il s'agit du coût des mécanismes de commande (c'est-à-dire des logiciels) utilisés pour rétablir les circuits défaillants et du coût du personnel de maintenance supplémentaire nécessaire pour le traitement des défaillances additionnelles résultant de la multiplication du matériel dans le réseau.

En matière de télécommunication, les méthodes de protection peuvent être catégorisées en termes de disponibilité de cheminements, de temps de réponse et de complexité. D'une manière générale, les méthodes simples et rapides, telles que la protection de liaison par redondance « $N + 1$ », sont préférées parce qu'elle réduisent l'indisponibilité d'environ un ordre de grandeur par rapport aux systèmes non protégés (voir les Annexes B et C) pour un coût supplémentaire minimal. De plus, les systèmes de protection de lignes peuvent être facilement automatisés et procurer ainsi une amélioration supplémentaire substantielle pour un minimum de matériel de commutation, de signalisation et de commande destiné à la protection du réseau. La protection en anneau est un cas spécial de protection par redondance « $1 + 1$ » dans lequel le trafic peut être acheminé dans un sens ou dans l'autre de l'anneau.

Les schémas de protection plus complexes impliquent un maillage, soit par simple triangulation (en utilisant un ensemble fixe de cheminements validés préprogrammés), soit par un réacheminement global qui nécessite une connaissance complète du réseau afin de contourner les équipements défaillants. Les protections de lignes et de réseaux sont toutes deux applicables aux réseaux maillés mais nécessitent un logiciel de signalisation et de commande complexe. Toutefois, l'amélioration apparente de la disponibilité des circuits par la méthode du maillage peut être obérée par l'accroissement de la complexité du logiciel et par sa vulnérabilité aux catastrophes (causées par la nature ou par l'homme).

## 6.2 Méthode de l'espace d'états pour déterminer les paramètres de disponibilité et de maintenance dans les systèmes à fibres optiques avec protection de lignes

La méthode est illustrée de manière détaillée dans les exemples des Annexes B et C. Elle se décompose en trois étapes:

### 6.2.1 Etape 1 – Entrées aléatoires (fonctionnement stabilisé)

Cette étape concerne les informations nécessaires aux calculs des étapes suivantes:

- a) taux de panne des différents dispositifs et éléments de réseau;
- b) taux de réparation des différents éléments et équipements basé sur le MTTR;
- c) configuration du schéma de protection de lignes.

### 6.2.2 Etape 2 – A partir des entrées ci-dessus, déterminer

- d) *L'ensemble des états* – Une chaîne de Markov homogène à temps continu constitue un modèle probabiliste apte au traitement mathématique et pouvant tenir compte des nombreux événements et processus simultanés d'un système complexe. Dans ce qui suit, on a adopté une telle approche markovienne.

Chaque état correspond à une condition spécifique du système, par exemple: «composant A défaillant», «panne détectée», «perte de redondance», «réparation en cours» et «système en panne».

- e) Création d'un diagramme de transition d'états.

On décrit d'abord fréquemment les systèmes par des diagrammes de fiabilité qui définissent les combinaisons d'éléments du système nécessaires à son fonctionnement. A titre d'exemple, la Figure 2 montre un système parallèle à deux composants ( $\lambda_A$  et  $\lambda_B$ ) qui sont les taux de défaillance des composants. Les transitions correspondant aux réparations ne sont pas représentées dans la Figure 2 dans un but de simplicité. Une barre au-dessus du nom du composant signifie que cet élément est en panne. Les états  $\bar{A}B$  et  $A\bar{B}$  signifient qu'un composant est en panne mais que le système fonctionne. L'état  $\bar{A}\bar{B}$  est celui du système en panne. Le modèle simplifié équivalent de Markov regroupe les deux états à un seul composant défaillant, mais la désignation de la cause de la panne y est perdue.

Dans la pratique, un système peut comporter  $K$  sous-systèmes, composés chacun de  $m$  composants remplaçables ou réparables sur place; typiquement,  $K$  prend les valeurs 1, 2 ou 3 tandis que  $m$  peut aller de quelques unités à une centaine. Dans ce cas, le modèle markovien complet comporterait  $2^{k \times m}$  états, sans compter les états intermédiaires ajoutés pour représenter les opérations de détection, de maintenance et de réparation. Cette multiplication exponentielle du nombre des états est généralement contenue en tronquant le modèle de Markov pour représenter au plus  $K$  pannes simultanées, et seulement les combinaisons de pannes qui entraînent la défaillance du système. Lorsque les taux de panne des composants sont de plusieurs ordres de grandeur plus petits que les taux de détection de pannes, de remise en ordre après panne et de réparation, cette approximation n'a qu'une incidence négligeable sur la précision du modèle pour la prédiction de la fiabilité du système.

Si un système peut subir deux pannes simultanées de composants ou plus, la réparation pourra intervenir simultanément (réparations simultanées). La Figure 3 illustre le modèle markovien du système précédent (Figure 2) lorsqu'on suppose que les réparations peuvent intervenir simultanément. De fait, cette stratégie est applicable aux systèmes de transmission à fibres optiques.

- f) Probabilités et fréquences des différents états.

Dans un modèle markovien, la probabilité limite de l'état « $j$ » (la proportion de temps à long terme pendant laquelle le système est dans l'état « $j$ ») est donnée par:

$$P_j = \lim_{t \rightarrow \infty} t^{-1} \text{ [Temps total passé dans l'état «}j\text{» durant l'intervalle (0, }t\text{)].}$$

Les valeurs des différents  $P_{js}$  du modèle de Markov sont calculées en utilisant le principe d'équilibre en régime permanent illustré dans la Figure 4. Lorsque le temps écoulé tend vers l'infini, un modèle de Markov à  $L$  états atteint un équilibre dans lequel un ensemble de  $L$  équations linéaires – une pour chacun des états comme le montre la Figure 4 – sont simultanément vérifiées. Si on ajoute la contrainte  $P_1 + P_2 + \dots + P_L = 1$ , alors les valeurs des  $P_{js}$  peuvent être calculées. Toutefois, il faut prendre garde aux problèmes d'arrondis lorsqu'il existe entre les taux de transition des différences de plusieurs ordres de grandeur.

Une fois les valeurs  $P_{js}$  calculées, on peut trouver la fréquence limite (à long terme) de chaque état «j» dans le modèle de Markov en utilisant la relation:

$$F_j = \lim_{t \rightarrow \infty} t^{-1} \text{ [Nombre de fois où l'état «j» est atteint sur l'intervalle (0, t)]}$$

$$= (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_m) P_j.$$

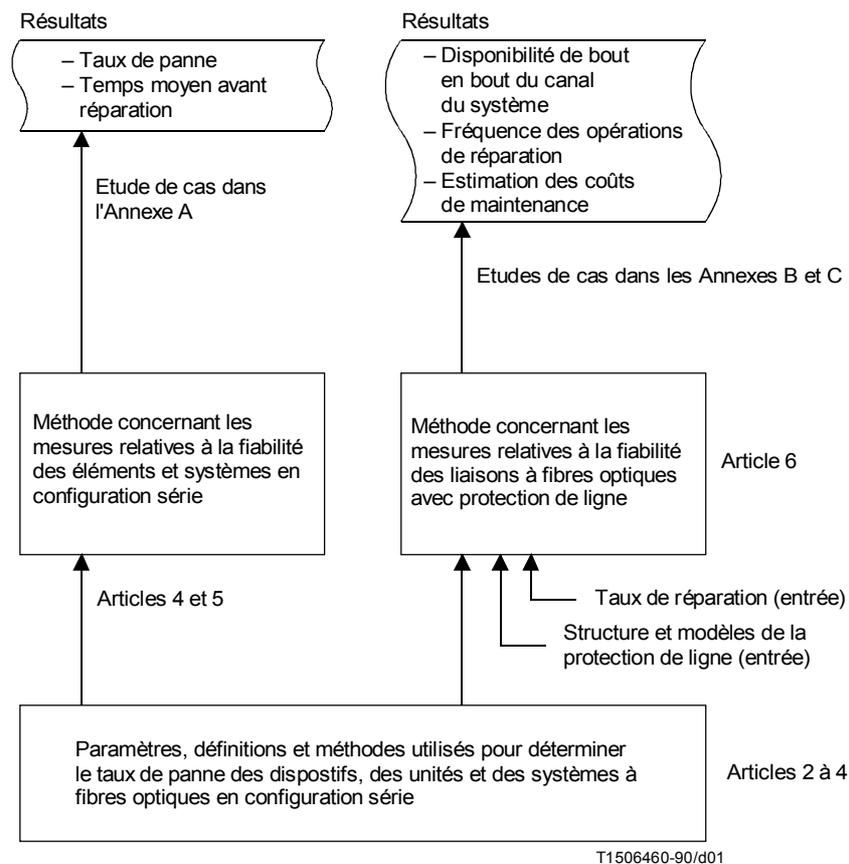


FIGURE 1/G.911  
Utilisation de la Recommandation G.911

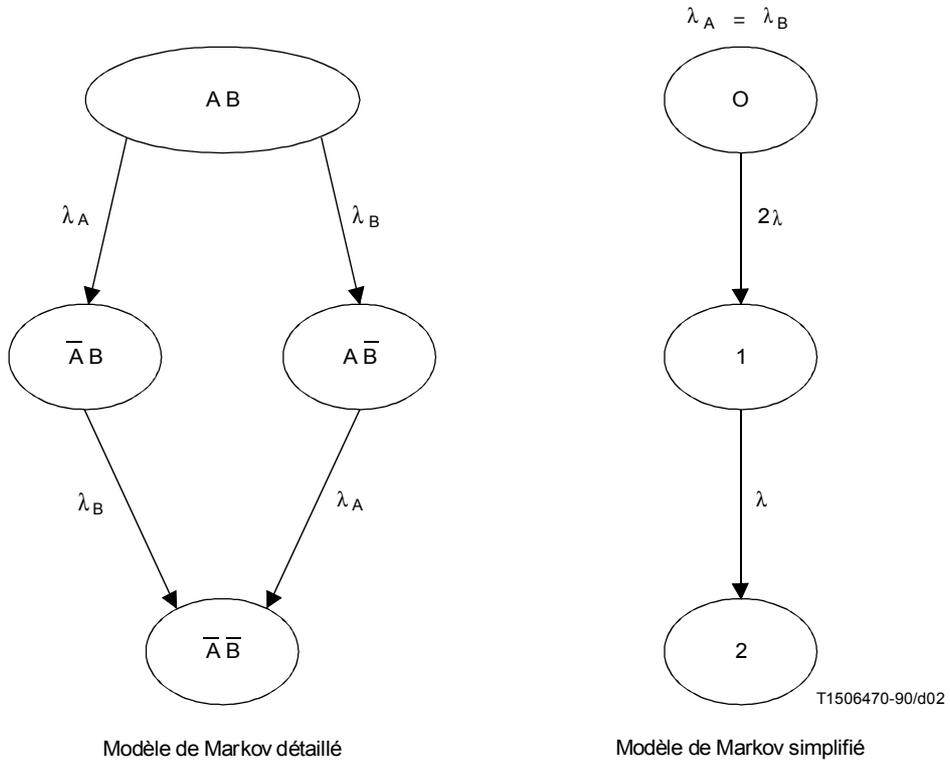
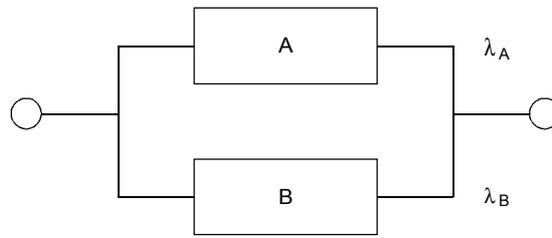
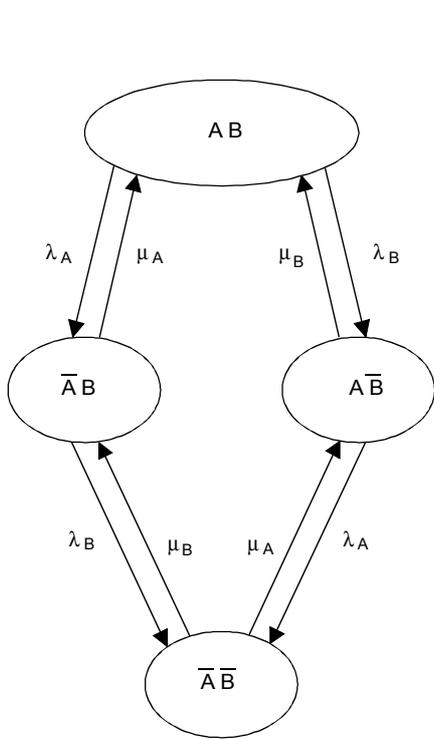
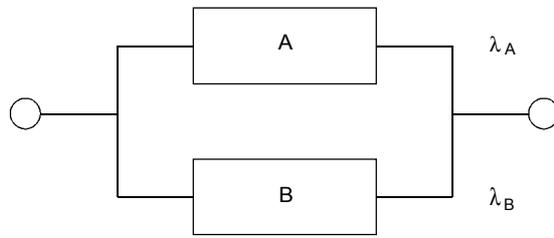
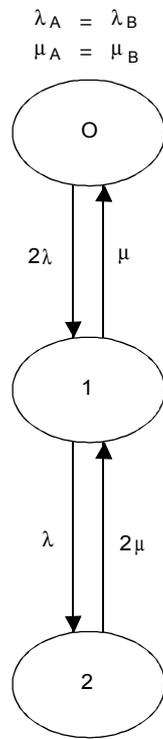


FIGURE 2/G.911  
Exemple des diagrammes de fiabilité



Modèle de Markov détaillé avec trajets de pannes et de réparations

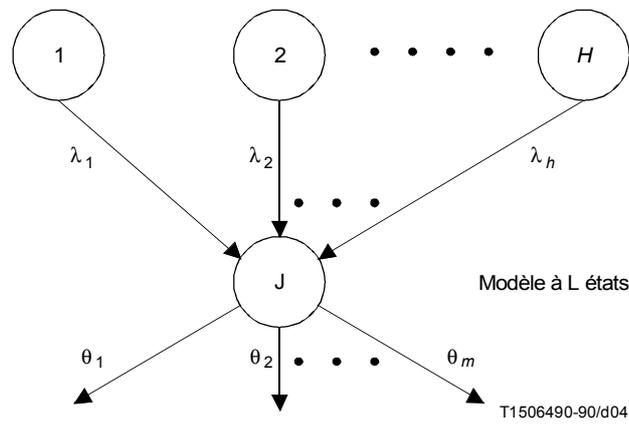


Modèle de Markov avec trajets de pannes et de réparations

T1506480-90/d03

NOTE –  $\lambda$  représente un taux de panne et  $\mu$  un taux de réparation.

FIGURE 3/G.911  
Description du modèle de Markov



$$\frac{\lambda_1 \cdot P_1 + \lambda_2 \cdot P_2 + \dots + \lambda_h \cdot P_h}{\text{Flux entrant}} = \frac{(\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_m) P_j}{\text{Flux sortant}}$$

FIGURE 4/G.911

### Principe d'équilibre en régime permanent des modèles de Markov

#### 6.2.3 Etape 3 – Calcul des paramètres de fiabilité du système

Une fois calculées les probabilités et les fréquences des états du système, il est possible de calculer de nombreuses caractéristiques de fiabilité utiles grâce à l'expression générale suivante:

$$\text{mesures liées à la fiabilité} = \sum_j (a_j \times F_j + b_j \times P_j)$$

- g) *Probabilité d'indisponibilité*:  $b_j = 1$  si l'état «j» correspond à un état de panne du système, 0 dans le cas contraire;  $a_j = 0$ .
- h) *Fréquence des pannes système*:  $a_j = 1$  si l'état «j» correspond à un état de panne du système, 0 dans le cas contraire;  $b_j = 0$ .
- i) *Taux d'interruption de service par unité de temps et par canal (usager)*:  $a_j = 0$ ;  $b_j = N_j/N$  où  $N_j$  est le nombre d'usagers (canaux) dont le service est interrompu dans l'état «j», et  $N$  le nombre total d'usagers (canaux).
- j) *Coût de maintenance par unité de temps*:  $a_j = \text{coût de mise en place de la maintenance dans l'état «j»}$ ;  $b_j = \text{coût de l'activité de maintenance par unité de temps dans l'état «j»}$ .

### 6.3 Différentes options de systèmes à fibres optiques avec protection de ligne

#### 6.3.1 Protection de ligne de type un pour un (1 + 1)

Cette méthode de protection des canaux est simple à assurer, à commander et à comprendre; elle est donc largement utilisée.

Sous sa forme la plus simple, le trafic de la source est transmis simultanément sur les deux supports, et la décision de basculer du support principal vers le support de réserve est prise au niveau de la réception; dans ce cas, une simple indication de «perte de signal» ou toute indication similaire suffit à provoquer le basculement, et il n'est pas nécessaire de transmettre entre les deux sites des informations de commande ou de contrôle. Après avoir réparé et remis en service le support principal, il est reconfiguré en nouveau support de réserve. De cette façon, une défaillance ne cause qu'une seule interruption dans le service, et le processus de rétablissement n'induit pas de nouvelle interruption.

La protection de type un pour un donne ses meilleurs résultats quand les parcours principaux et de réserve sont totalement séparés, minimisant ainsi le risque de pannes relevant d'une cause commune (voir l'Annexe C). Grâce à sa simplicité, cette technique de protection peut assurer le temps de rétablissement le plus rapide avec le moins d'équipements sophistiqués de contrôle et de commande.

En revanche, la protection de type un pour un utilise les équipements du réseau avec très peu d'efficacité puisque 50% de ces équipements sont en permanence en situation de réserve attendant d'être utilisés.

### 6.3.2 Protection de ligne de type un pour $N(N + 1)$

Cette technique de protection est une généralisation de la méthode précédente et répond au problème du manque d'efficacité dans l'utilisation des équipements de réserve. Si on se place dans l'hypothèse que le taux de défaillance d'un canal quelconque est suffisamment bas pour garantir la très faible probabilité d'une panne simultanée de deux ou plusieurs canaux parmi  $N$ , il est alors possible d'attribuer le parcours de réserve en partage aux  $N$  parcours actifs (voir l'Annexe B).

Par comparaison avec la protection de type un pour un, cette méthode utilise les équipements de manière plus économique, mais elle exige un système de commande et de contrôle légèrement plus sophistiqué et ne peut assurer le même degré de disponibilité. Il est également beaucoup plus difficile de garantir une diversité d'acheminement entre les parcours principaux et le parcours de réserve.

### 6.3.3 Anneaux

Les structures en anneau sont parfois considérées comme une classe en soi mais, théoriquement, il est possible d'analyser la protection fournie par un anneau du point de vue de la protection un pour un. Alors qu'une protection un pour un n'entraîne pas nécessairement une séparation physique complète entre les parcours principaux et les parcours de réserve, un anneau implique en général l'existence de deux sens de communication distincts.

Il existe toute une variété de structures en anneau ayant chacune un ensemble de stratégies de commande et de gestion et capables d'assurer un fonctionnement autocorrecteur autonome.

Le principal avantage des anneaux réside dans leur souplesse et leur faculté à procurer de la bande passante en tout nœud du réseau en réponse à une brusque demande, ce qui permet de surmonter une certaine rigidité des règles de gestion que l'on trouve dans les liaisons plus simples du type point à point.

## 7 Circuits de référence pour la disponibilité des canaux de bout en bout des systèmes de ligne à fibres optiques

Il faut faire une distinction entre les systèmes de ligne fondés sur des normes de hiérarchie numérique plésiochrone (PDH) (*plesiochronous digital hierarchy standards*) et de hiérarchie numérique synchrone (SDH) (*synchronous digital hierarchy standards*). Les équipements SDH offrent une souplesse nouvelle qui a une incidence sur les objectifs et les méthodes de modélisation, pour les raisons suivantes:

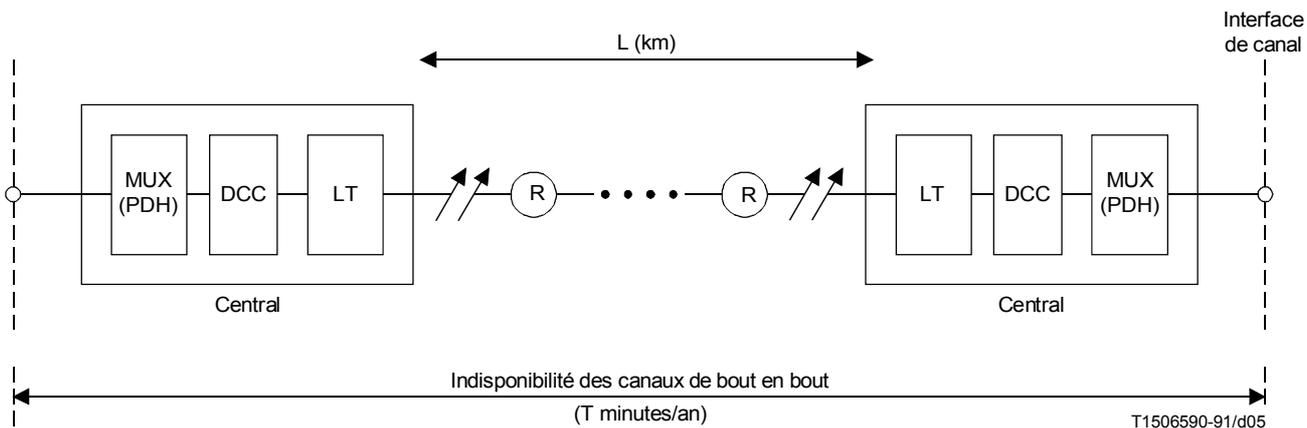
- les systèmes SDH peuvent comporter plusieurs interfaces de canal (par exemple 1,5 Mbit/s, 2 Mbit/s, ..., 155 Mbit/s) alors que les systèmes de ligne PDH ne comportent qu'une seule interface;
- les systèmes SDH peuvent assurer plusieurs fonctions, notamment la sous-répartition numérique, l'insertion/extraction, et le transport dans le même élément de réseau SDH. Par ailleurs, les systèmes de sous-répartition numériques et les systèmes d'adjonction/suppression sont distincts du terminal de ligne PDH.

Il n'est donc pas nécessaire, dans un circuit de référence SDH, de prévoir une indisponibilité dans les équipements de multiplexage.

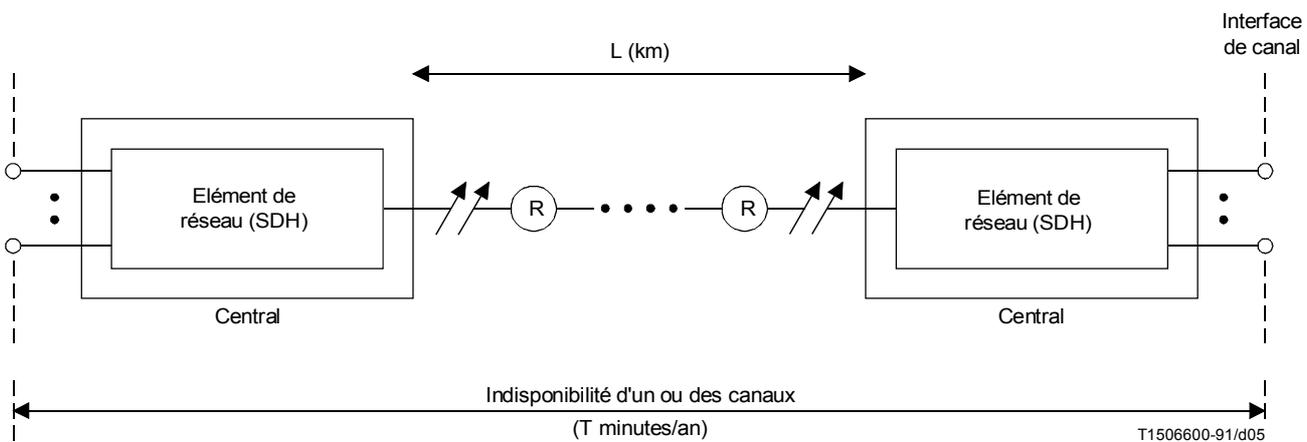
Les circuits de référence (CR) (*reference circuit*) proposés pour une répartition des objectifs de disponibilité de bout en bout des systèmes de ligne à fibres optiques sont présentés sur les diagrammes a) et b) de la Figure 5. Ils concernent les utilisations entre centraux. Pour la disponibilité de bout en bout, des nombres concrets peuvent être ajoutés dans les Annexes A, B et C.

Les circuits de référence ont un caractère assez générique pour permettre l'introduction d'un certain nombre de répéteurs et de centraux intermédiaires entre les centraux terminaux. Toutefois, pour une longueur de circuit de référence donnée, on recommande la même indisponibilité par canal (minutes/année) pour les circuits de référence SDH et PDH pour les raisons suivantes:

- 1) permettre une introduction progressive des équipements SDH dans un réseau PDH; et
- 2) garantir que les objectifs de disponibilité du réseau SDH soient compatibles avec les objectifs actuels de disponibilité de réseau PDH.



a) Circuit de référence de l'indisponibilité des canaux de bout en bout dans des systèmes PDH à fibres optiques



PDH Hiérarchie numérique plésiochrone (*plesiochronous digital hierarchy*)

SDH Hiérarchie numérique synchrone (*synchronous digital hierarchy*)

(R) Répéteur

↗↘ Fibres optiques

DCC Sous-répartition numérique (*digital cross-connect*)

b) Circuit de référence de l'indisponibilité d'un ou des canaux de bout en bout dans des systèmes SDH

FIGURE 5/G.911

Circuit de référence de l'indisponibilité d'un ou des canaux de bout en bout

## 8 Méthode de répartition des objectifs d'indisponibilité de bout en bout

### 8.1 Facteurs contribuant à l'indisponibilité – Considérations concernant les systèmes SDH et PDH à fibres optiques

Les facteurs contribuant à l'indisponibilité des canaux de bout en bout sont notamment:

- a) les multiplexeurs (pas dans le cas des équipements SDH);
- b) les supports optiques (câble, épissures, connecteurs, etc.);
- c) les terminaux de ligne et les répéteurs: une répartition doit être prévue pour:
  - les défaillances du matériel; et
  - les erreurs de logiciel et les erreurs humaines de procédure.

*Multiplexeurs* – Dans les systèmes SDH, il n'est pas nécessaire de prévoir une répartition distincte pour les équipements de multiplexage étant donné que les normes SDH prévoient un mécanisme de mise en correspondance des canaux dans la charge utile SDH.

*Câbles optiques, terminaux et répéteurs* – Jusqu'à présent, les données fournies par les sociétés d'exploitation téléphonique montrent que les supports optiques ont une incidence beaucoup plus grande sur l'indisponibilité que les terminaux et les répéteurs.

*Défaillance du matériel et erreurs de logiciel ou erreurs humaines de procédure* – Les systèmes SDH utilisent davantage le logiciel que les systèmes PDH, pour les raisons suivantes:

- diminution du matériel par canal;
- augmentation du volume de logiciel; et
- généralisation envisagée de la restructuration du trafic.

Il serait donc logique d'augmenter la proportion d'indisponibilité attribuée aux erreurs de logiciel et de procédure dans les systèmes SDH et non dans les systèmes PDH.

### 8.2 Méthodes de répartition

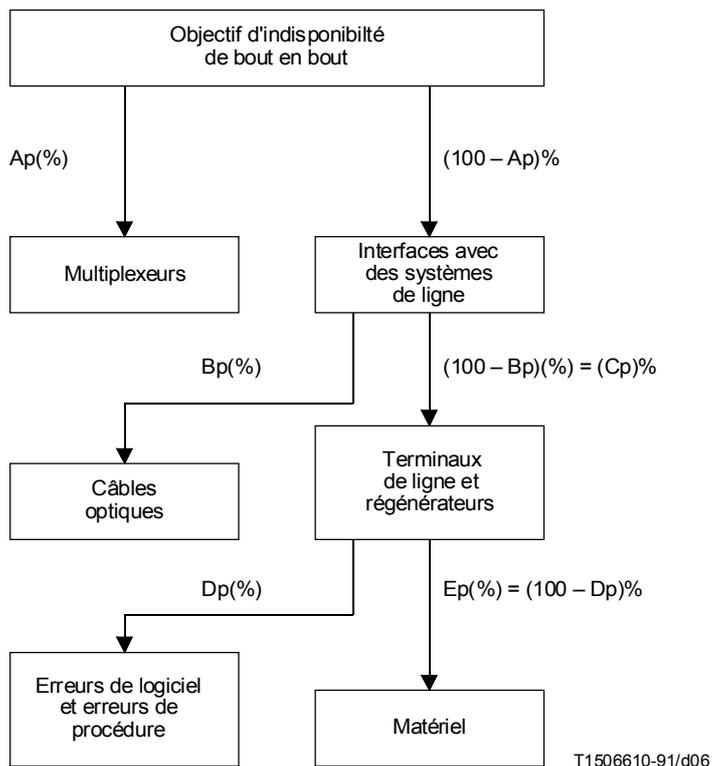
Compte tenu de ce qui précède, il est proposé de répartir entre les divers facteurs contributifs pertinents l'indisponibilité de bout en bout indiquée sur les diagrammes a) (systèmes PDH) et b) (systèmes SDH) de la Figure 6.

La proportion d'indisponibilité attribuée aux divers facteurs contributifs devrait être différente dans le cas des systèmes SDH et des systèmes PDH, comme l'indique le Tableau 8.

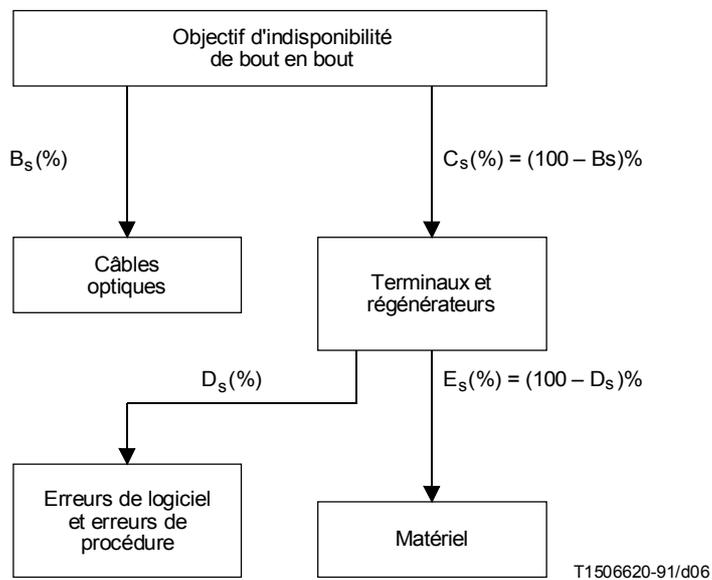
TABLEAU 8/G.911

**Répartition des objectifs d'indisponibilité entre les divers facteurs contributifs dans un circuit de référence en cas d'indisponibilité des canaux de bout en bout**

Facteur contributif	(PDH)	(SDH)	Observations
Multiplexeurs	Ap	Sans objet	
Câble	Bp	Bs	Valeurs analogues
Terminaux et répéteurs	Cp	Cs	Proportions analogues
Logiciel	Dp	Ds	Dp > Ds
Logiciel et procédure	Ep	Es	Ep < Es
T Indisponibilité des canaux de bout en bout (minutes/année). A Proportion d'indisponibilité (%) attribuée aux multiplexeurs. B Proportion d'indisponibilité (%) attribuée au câble. C Proportion d'indisponibilité (%) attribuée aux terminaux et aux répéteurs. D Proportion d'indisponibilité (%) attribuée aux défaillances du matériel. E Proportion d'indisponibilité (%) attribuée aux erreurs de logiciel et aux erreurs humaines de procédure. p Correspond à des systèmes à hiérarchie numérique plésiochrone (PDH). s Correspond à des systèmes à hiérarchie numérique synchrone (SDH).			



a) Méthode de répartition des objectifs d'indisponibilité de bout en bout – Systèmes à hiérarchie numérique plésiochrone (PDH)



b) Méthode de répartition des objectifs d'indisponibilité de bout en bout – Systèmes à hiérarchie numérique synchrone (SDH)

FIGURE 6/G.911  
Méthode de répartition des objectifs d'indisponibilité de bout en bout

## Annexe A

### Détermination du taux de panne des équipements en fonctionnement stabilisé – Exemple

(Cette annexe fait partie intégrante de la présente Recommandation)

On trouvera ci-après un exemple de la méthode décrite en 4.3. Dans cet exemple, on évalue le taux de panne d'un équipement en fonctionnement stabilisé, sans chercher à proposer un objectif particulier de fiabilité, ni pour les divers dispositifs, ni pour l'équipement lui-même. On utilisera dans cet exemple un facteur de multiplication du taux de panne dû aux conditions ambiantes ( $\pi_e$ ) égal à 2,0 (voir la Note 1 de A.3).

#### A.1 Description de l'équipement (exemple)

Type de composant	Nombre ( $N_i$ )
Laser, 1300 nm	1
Transistor, Si, PNP, $\leq 0,6$ W	10
Circuit intégré, numérique, bipolaire (hermétique, 30 portes)	8
Circuit intégré, numérique, NMOS (hermétique, 200 portes)	6
Condensateur, discret, céramique	6

#### A.2 Paramètres de fiabilité des composants (exemple)

Type de composant ( $\#i$ )	$X_{qi}$ (FIT)	$\pi_{qi}$	$\pi_{si}$	$\pi_j^{a)}$	$\#i$
Laser, 1300 nm	20 000	0,5	1,0	1,5	1
Transistor, Si, PNP, $\leq 0,6$ W	25	1,0	1,0	1,2	2
Circuit intégré, numérique, bipolaire (hermétique, 30 portes)	10	1,0	1,0	1,2	3
Circuit intégré, numérique, NMOS (hermétique, 200 portes)	130	1,0	1,0	1,2	4
Condensateur, discret, céramique	12	1,0	1,0	1,0	5

a) Voir la Note 2 de A.3

#### A.3 Taux de panne de l'équipement en fonctionnement stabilisé (FIT)

Compte tenu de la procédure décrite en 4.2 et 4.3, le taux de défaillance de l'unité en fonctionnement stabilisé est donné par:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= (\pi_e)\{(N_1)(15\ 000) + (N_2)(30) + (N_3)(12) + (N_4)(156) + (N_5)(12)\} \\ &= (2) \times (16\ 404) = 32\ 808 \text{ FIT.} \end{aligned}$$

NOTES

1 On a là une valeur typique pour une unité à installer dans un équipement terminal distant et/ou dans un local d'utilisateur soumis à des chocs et des vibrations, ou à des variations de température et d'humidité. Dans les environnements à atmosphère régulée (par exemple, les centraux), il est préférable de prendre  $\pi_e = 1,0$ .

2 Dans cet exemple, on a admis que la température de fonctionnement de l'unité ne dépassait pas 45 à 50°C.

## Annexe B

### Etude de cas – Disponibilité des canaux sur une liaison à fibres optiques à $4 \times 140$ Mbit/s avec répéteurs et protection de ligne en «3 + 1»

(Cette annexe fait partie intégrante de la présente Recommandation)

On trouvera ci-après un exemple de la méthode décrite en 6. Dans cet exemple, on ne cherche pas à proposer ou à recommander un objectif particulier de fiabilité.

#### B.1 Description

La Figure B.1 illustre un système dans la configuration de protection « $N + 1$ », constitué de  $N$  systèmes de lignes numériques sur fibres optiques avec un système supplémentaire identique de réserve. Pour les besoins de cette étude de cas, chaque système de ligne numérique est constitué de deux terminaux de multiplexage de ligne et d'un câble de fibres optiques muni de ses régénérateurs. Les systèmes de ligne fonctionnent à 565 Mbit/s et comprennent chacun quatre canaux à 140 Mbit/s.

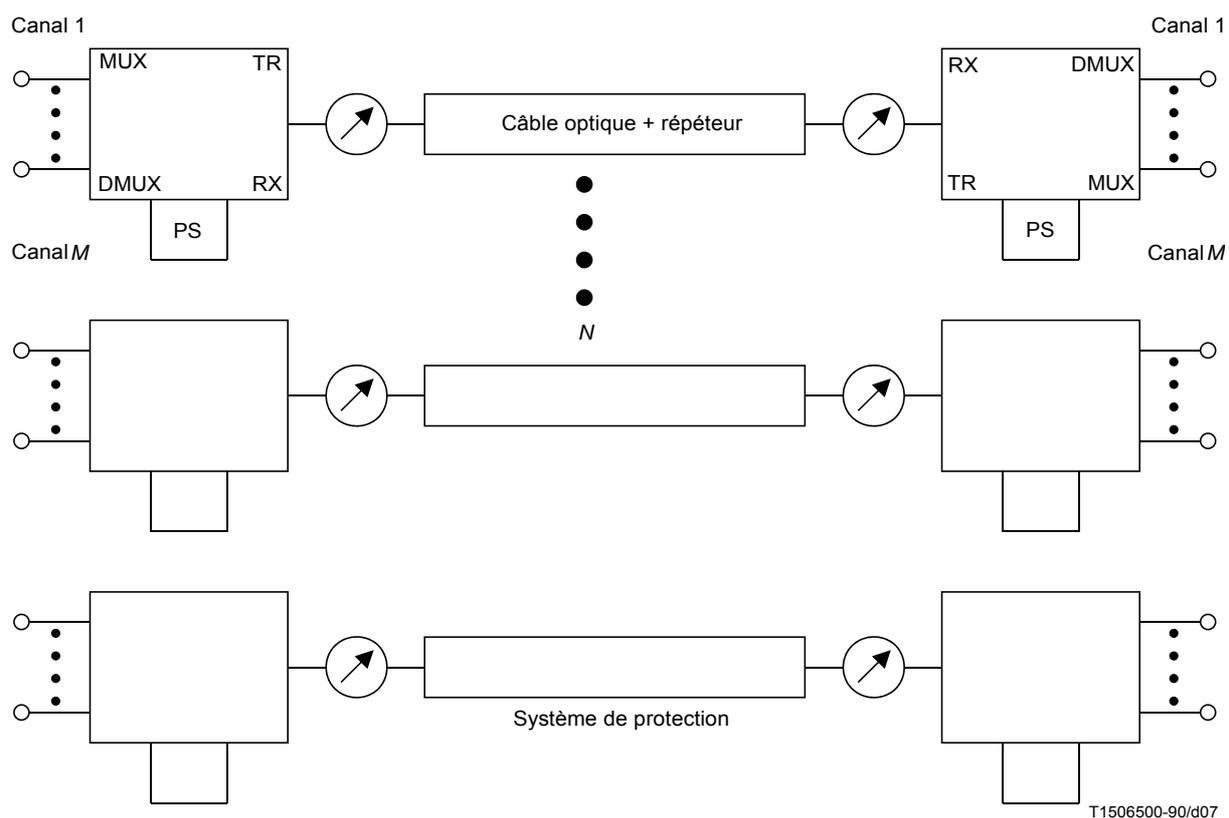


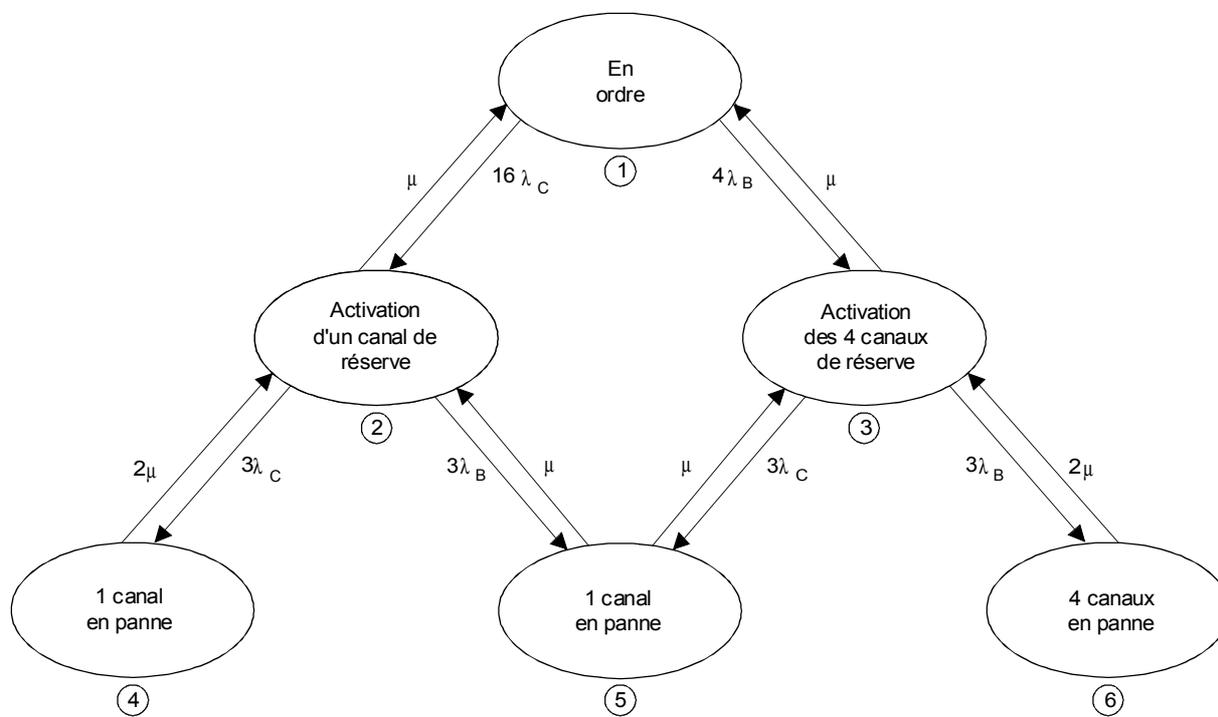
FIGURE B.1/G.911

**Configuration de protection «N + 1»  
(N actifs et 1 en réserve )**

La Figure B.2 représente le diagramme d'états correspondant au cas particulier où il existe trois systèmes actifs ( $N = 3$ ) plus un de réserve. Ce diagramme montre les situations possibles qui peuvent se présenter en cas de défaillance simple ou double survenant dans les terminaux de multiplexage des lignes ou dans les répéteurs.

Lorsqu'un système de ligne est défaillant, le système de réserve prend en charge tout ou partie de son trafic. Si la panne se situe au niveau d'un canal unitaire (à 140 Mbit/s), c'est un des quatre canaux du système de réserve qui est activé. Si elle se situe soit au niveau des répéteurs soit au niveau des terminaux de multiplexage d'une ligne, mettant ainsi hors service tout un système, alors c'est l'ensemble du trafic de la ligne (les quatre canaux à 140 Mbit/s) qui est transféré au système de réserve. Si, en cas de défaillance d'un canal ou d'une ligne, le trafic ne peut être transféré au système de réserve (parce qu'il a déjà pris en charge le trafic d'un autre système défaillant), alors le trafic sur ce canal ou sur ce système de ligne restera dans l'état d'indisponibilité.

La Figure B.2 montre également les transitions d'un état à l'autre en fonction des taux de défaillance (nombre de défaillances par unité de temps) et du taux de réparation (inverse du temps moyen nécessaire pour réparer une panne).



T1506510-90/d08

- $\mu$  Taux de réparations/heure
- $\lambda_C$  Taux de panne par canal
- $\lambda_B = 2(\lambda_{MUX} + \lambda_{DMUX} + \lambda_{TX} + \lambda_{RX} + \lambda_{PS}) + N^\circ \text{ de répéteur} \times (2\lambda_{TX} + 2\lambda_{RX} + \lambda_{PS})$

- TX Emetteur optique
- RX Récepteur optique
- RS Alimentation

Exemple:  $M \cdot 4 = 4 \text{ canaux de } 140 \text{ Mbit/s par terminal de ligne} = 16$   
 $N + 1 = 3 \text{ actifs (+ 1 réserve)} = 3 + 1$

FIGURE B.2/G.911  
**Configurations de protection «N + 1» – Diagramme de Markov**

## B.2 Résultats – Indisponibilité en minutes/an par canal de 140 Mbit/s

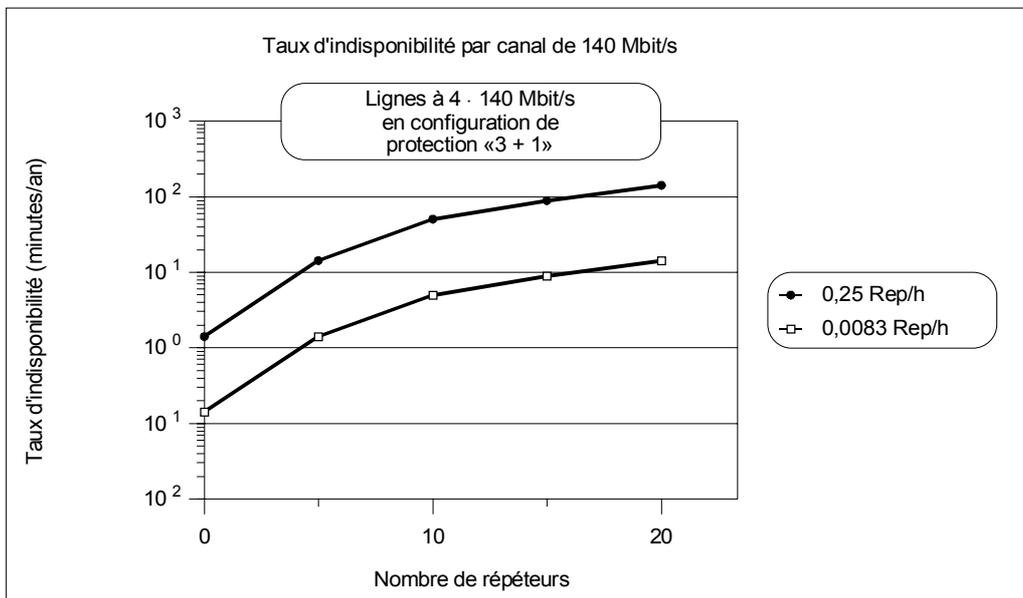
Les résultats suivants se basent sur l'hypothèse de systèmes de lignes numériques à fibres optiques en configuration «3 + 1» et fonctionnant à 565 Mbit/s. On a calculé statistiquement l'indisponibilité en évaluant la probabilité des états qui entraînent la perte d'un ou plusieurs canaux à 140 Mbit/s (en l'occurrence, les états 4, 5 et 6 de la Figure B.2).

La Figure B.3 donne l'indisponibilité par canal de 140 Mbit/s en fonction:

- du temps de réparation moyen par panne;
- du nombre de répéteurs dans le système.

On a supposé les taux de panne suivants pour les différents composants:

- Taux de panne par unité de canal à 140 Mbit/s = 6 000 FIT
- Taux de panne par terminal multiplexeur de ligne (sans compter les unités de canaux) = 42 000 FIT
- Taux de panne par régénérateur = 42 000 FIT.



T1506520-90/d09

FIGURE B.3/G.911

Taux d'indisponibilité par canal de 140 Mbit/s

## Annexe C

### Etude de cas – Disponibilité des canaux sur une liaison point à point en fibres optiques dans un réseau local avec protection de ligne «1 + 1» avec ou sans trajet de redondance pour le câble

(Cette annexe fait partie intégrante de la présente Recommandation)

On trouvera ci-après un exemple de la méthode décrite en 6. Dans cet exemple, on ne cherche pas à proposer ou à recommander un objectif particulier de fiabilité.

## C.1 Description

### C.1.1 Nature du problème

L'utilisation de plus en plus répandue des fibres optiques dans les réseaux de télécommunication et le débit de plus en plus grand pouvant être transporté sur chaque fibre ont attiré l'attention sur l'intérêt de la redondance des terminaux de lignes et des câbles. Une telle redondance est en effet nécessaire pour diminuer les interruptions de service dues aux coupures de câbles ou aux pannes des équipements de lignes. Ce problème se pose avec encore plus d'acuité dans les réseaux d'accès car les utilisateurs ne disposent pas de liaison de rechange à travers un autre central (alors que cela pourrait être le cas dans les liaisons entre centraux).

Ce sont des considérations pratiques qui justifient ces approches. Par exemple, les banques et les sociétés de courtage accordent une très grande priorité à la fiabilité des réseaux. Même dans le cadre actuel des communications en bande étroite, ces sociétés peuvent exiger une protection 1 : 1 pour leurs liaisons, et ce, par le doublement des lignes suivant le même trajet ou par un trajet différent. Elles obtiennent ainsi pour chaque liaison active une liaison de réserve avec un basculement automatique vers la liaison de réserve en cas de panne. A fortiori, ce problème se posera avec plus d'acuité dans le cadre de communications en bande large où une coupure de câble peut entraîner l'élimination de liaisons multiples à 155 Mbit/s.

La présente annexe décrit les cinq types suivants de liaisons et évalue leur fiabilité ainsi que leur disponibilité du point de vue de l'utilisateur (voir 1.2):

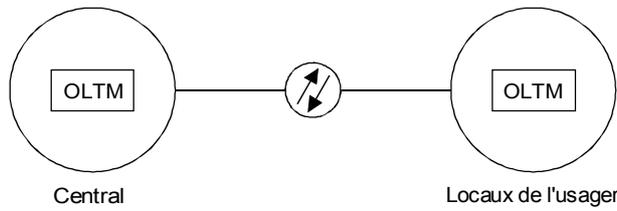
- liaisons sans redondance;
- liaisons avec équipements de ligne redondants et commutation manuelle;
- liaisons avec équipements de ligne redondants et commutation automatique;
- liaisons avec câbles redondants; et
- liaisons avec câbles et équipements de ligne redondants.

### C.1.2 Types de liaisons

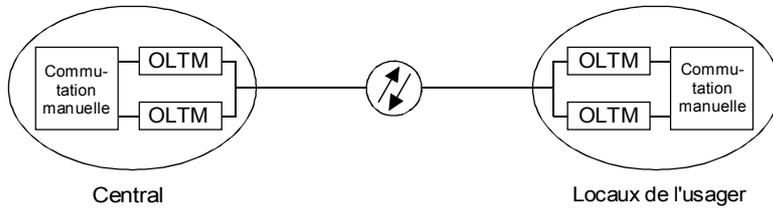
Les liaisons entre le central (CO) (*central office*) et les locaux de l'utilisateur (CP) (*customer premises*) sont assurées par des fibres monomodes. Chaque fibre est utilisée de manière unidirectionnelle, d'où l'utilisation de paires de fibres pour assurer la bidirectionnalité des liaisons. La redondance des équipements suppose une protection en 1 : 1 des multiplexeurs de bout de ligne des fibres optiques (OLTM) (*optical line terminating multiplexer*). La redondance de câble suppose un trajet différent par un cheminement physiquement distinct. La commutation manuelle suppose qu'un certain temps s'écoule, entre la défaillance et la commutation, pendant lequel la liaison est indisponible; avec la commutation automatique, cet intervalle est 0.

Les cinq formes de liaison étudiées sont:

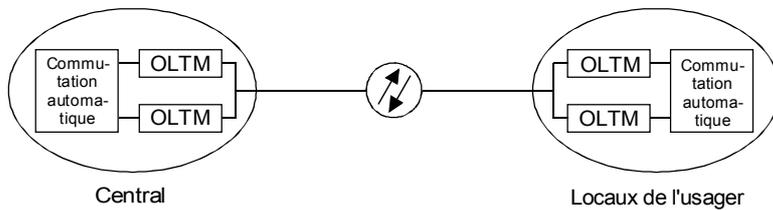
- liaisons sans redondance [Figure C.1a)];
- liaisons avec équipements de ligne redondants et commutation manuelle [Figure C.1b)]. Ce concept assure une protection contre les pannes d'équipements terminaux pouvant survenir dans les centraux ou les locaux de l'utilisateur, mais le système reste vulnérable aux ruptures de câbles. Le temps de commutation est pris en compte;
- liaisons avec équipements de ligne redondants et commutation automatique [Figure C.1c)]. Même cas que précédemment, mais le temps de commutation est de 0;
- liaisons avec câbles redondants [Figure C.1d)]. Cette solution suppose que les fibres actives et les fibres de protection suivent des trajets physiquement distincts à partir du même central. Ce concept assure une protection contre les ruptures de câbles. La commutation sur câbles à fibres optiques est automatique;
- liaisons avec câbles et équipements de ligne redondants [Figure C.1e)]. Ce concept assure une protection contre les pannes d'équipements terminaux et les ruptures de câbles. Cette solution offre deux possibilités: (e1) avec commutation automatique et (e2) sans commutation automatique.



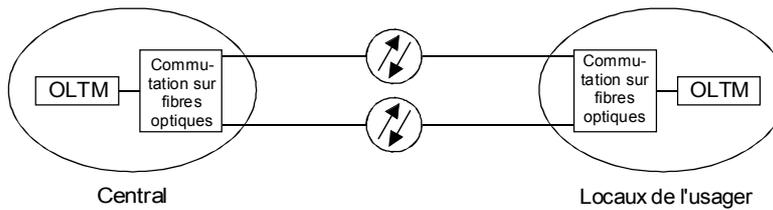
a) Pas de redondance



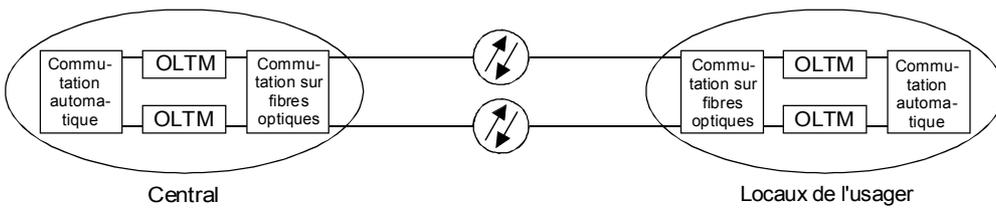
b) Liaison avec équipements terminaux redondants et commutation manuelle



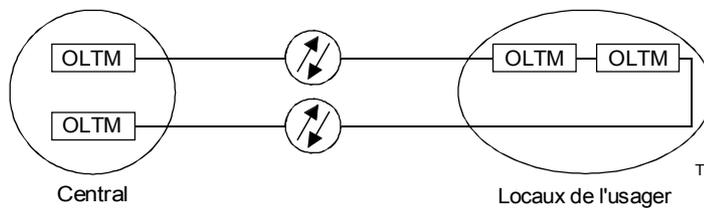
c) Liaison avec équipements terminaux redondants et commutation automatique



d) Connexion avec câble redondant



e1) Liaison avec équipements terminaux et câble redondants et commutation automatique



e2) Connexion avec équipements de ligne et câble redondants

T1506630-91/d10

FIGURE C.1/G.911  
Types de liaisons étudiées

## C.2 Résultats

Dans le but de quantifier et de comparer les caractéristiques de fiabilité des cinq concepts de liaison décrits ci-dessus, le présent article fournit les taux d'indisponibilité (en minutes par an et par canal de 2 Mbit/s) calculés sur la base du modèle de Markov.

La Figure C.2 considère le cas d'un système non protégé. Un tel système devient inopérant si l'un des deux éléments du réseau tombe en panne.

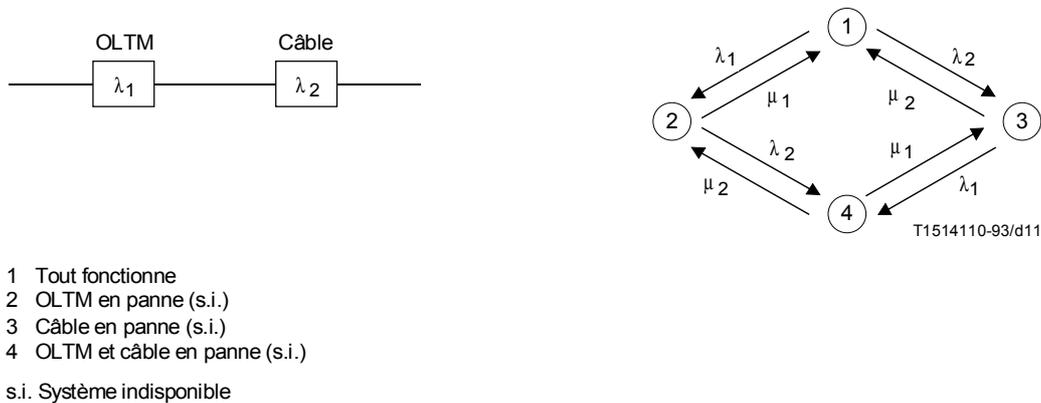


FIGURE C.2/G.911  
**Pas de redondance et modèle de Markov**

La Figure C.3 étudie le cas d'un OLTM redondant et d'une commutation manuelle. Dans l'état de fonctionnement normal (état 1), les équipements terminaux actifs et de réserve du central et de l'utilisateur sont opérationnels. Lorsqu'un des deux équipements terminaux tombe en panne (état 2), l'autre unité prend en charge la liaison suite à une opération manuelle, dans un intervalle de temps déterminé pendant lequel le système ne fonctionne pas. Le système peut être ramené à l'état 1 si la commutation est effectuée. Le système est également en panne (état 3) si les deux unités sont en panne ou en cas d'interruption de la liaison par câble entre le central et les locaux de l'utilisateur.

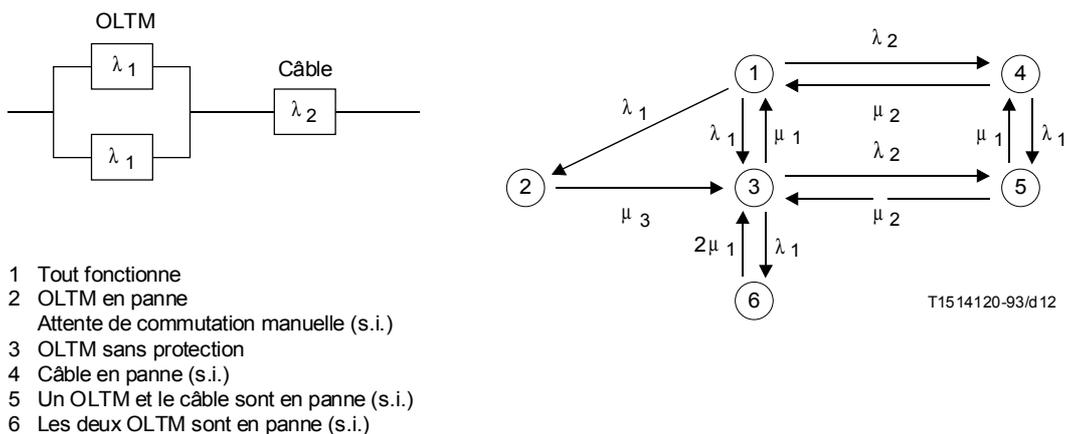


FIGURE C.3/G.911  
**Liaison avec équipements terminaux redondants, commutation manuelle et modèle de Markov**

La Figure C.4 étudie le cas d'un OLTM redondant et d'une commutation automatique. Dans l'état de fonctionnement normal (état 1), les équipements terminaux actifs et de réserve du central et de l'utilisateur sont tous opérationnels. Lorsque l'une des deux unités tombe en panne (état 2), l'autre unité prend automatiquement en charge la liaison, assurant ainsi la continuité du service. Le système peut être ramené à l'état 1 si l'unité défaillante est réparée. Le système est en panne (état 3) si les deux unités sont en panne ou en cas d'interruption de la liaison par câble entre le central et les locaux de l'utilisateur.

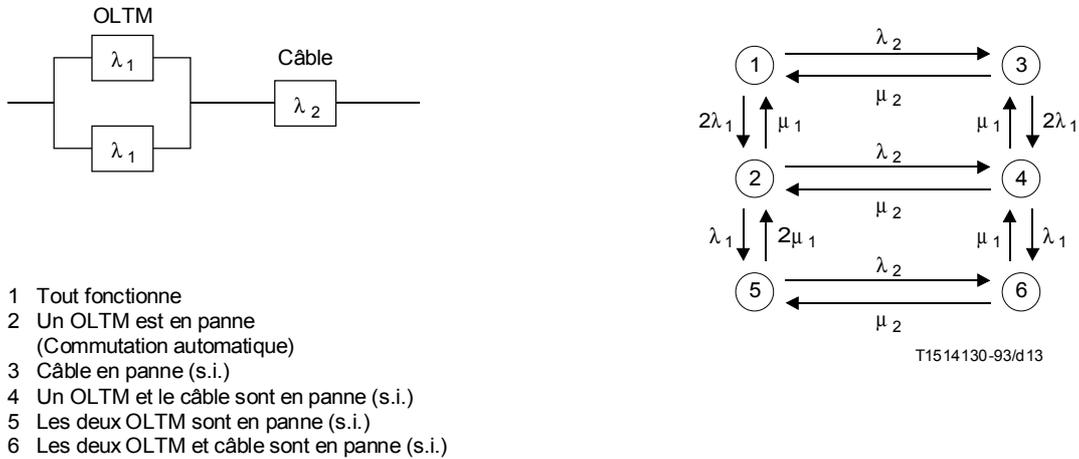


FIGURE C.4/G.911

**Liaison avec équipements terminaux redondants, commutation automatique et modèle de Markov**

La Figure C.5 étudie le cas d'un câble redondant. Dans l'état de fonctionnement normal (état 1), les deux câbles sont opérationnels. Lorsque l'un des deux câbles tombe en panne (état 2), l'autre câble prend automatiquement en charge la liaison assurant ainsi la continuité du service. Le système peut être ramené à l'état 1 si le câble est réparé. Le système est en panne (état 3) si les deux câbles sont en panne ou en cas d'interruption de la liaison par câble entre le central et les locaux de l'utilisateur.

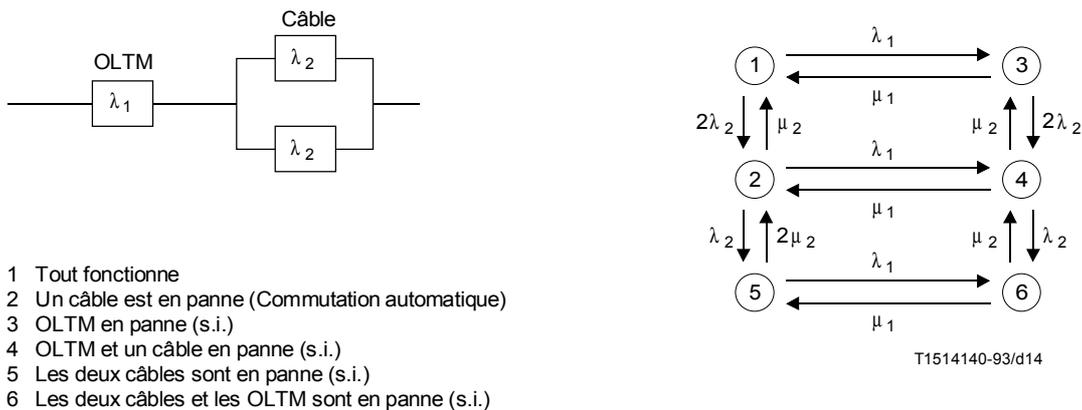
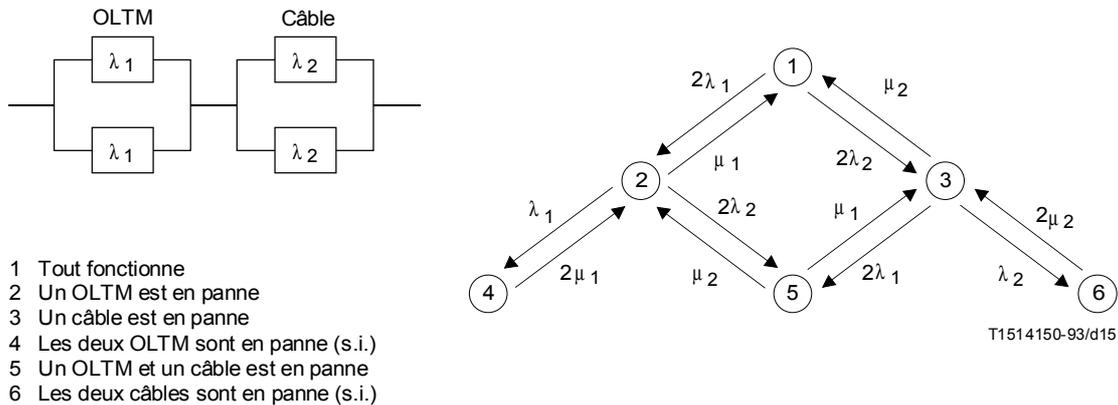


FIGURE C.5/G.911

**Liaison avec câble redondant et modèle de Markov**

La Figure C.6a) étudie le concept d'un équipement terminal et d'un câble redondant. Dans l'état de fonctionnement normal, l'équipement et le câble actif et de réserve sont tous opérationnels. L'état 2 correspond à des situations où l'un des OLTM ou l'une des liaisons par câble est défaillant. L'autre unité prend automatiquement en charge la liaison, assurant ainsi la continuité du service. Le système peut être ramené à l'état 1 si la défaillance est réparée. Le système est inopérant (état 3) si les deux câbles ou les deux OLTM sont en panne.

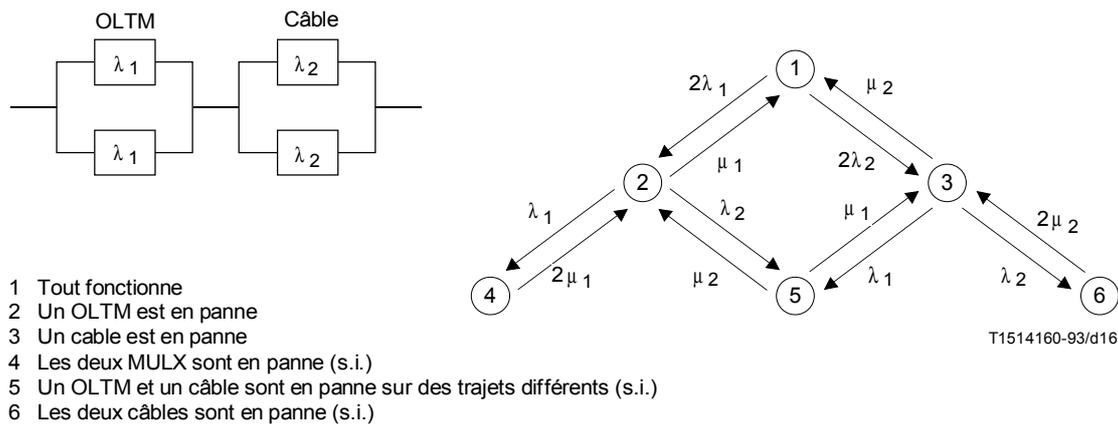
La Figure C.6b) étudie le concept de redondance du câble et des OLTM. En fonctionnement normal, les équipements actifs et de réserve sont tous opérationnels. Les états 2 et 3 correspondent respectivement à des situations où l'un des équipements terminaux ou l'un des câbles est défaillant. L'état 4 correspond à une situation où l'on a une défaillance à la fois sur un équipement terminal et sur un câble de l'autre trajet. L'état 5 correspond à un état de panne du système.



NOTE – Les graphiques ne représentent pas toutes les situations possibles.

FIGURE C.6a)/G.911

**Liaison avec équipements terminaux et câbles redondants, commutation automatique et modèle de Markov**



NOTE – Les graphiques ne représentent pas toutes les situations possibles.

FIGURE C.6b)/G.911

**Liaison avec câble et OLTM redondants et modèle de Markov**

Le Tableau C.1 contient la liste des taux de défaillance en fonctionnement stabilisé, les temps de réparation et les temps de commutation manuelle.

TABLEAU C.1/G.911

**Taux de défaillance en fonctionnement stabilisé,  
temps de réparation et temps de commutation manuelle**

Taux de défaillance en fonctionnement stabilisé de OLTM ( $\lambda_1$ )	(23 000-57 000 FIT; MTBF = 2 à 5 ans)
Taux de défaillance en fonctionnement stabilisé du câble ( $\lambda_2$ )	(11 500-23 000 FIT; MTBF = 5 à 10 ans)
Taux de réparation de OLTM ( $\mu_1$ )	(entre 1 et 2 par jour)
Taux de réparation du câble ( $\mu_2$ )	(entre 0,5 et 1 par jour)
Temps de commutation manuelle ( $1/\mu_3$ )	(entre 0,5 et 4 heures)

Les Tableaux C.2 à C.6 présentent les résultats des différents cas.

TABLEAU C.2/G.911

**Caractéristique d'une liaison locale en bande large sans protection**

( $1/\lambda_1$ ) ans	( $1/\lambda_2$ ) ans	( $1/\mu_1$ ) jours	( $1/\mu_2$ ) jours	Indisponibilité d'un canal à 2 Mbit/s (minutes/an)
2	5	0,5	1	647
2	10	0,5	1	504
5	5	0,5	1	432
5	10	0,5	1	289
2	5	1	2	1294
2	10	1	2	1006
5	5	1	2	863
5	10	1	2	576

TABLEAU C.3/G.911

**Caractéristique d'une liaison d'accès avec équipements  
terminaux redondants et commutation manuelle**

$(1/\lambda_1)$ ans	$(1/\lambda_2)$ ans	$(1/\mu_1)$ jours	$(1/\mu_2)$ jours	$(1/\mu_3)$ heures	Indisponibilité d'un canal à 2 Mbit/s (minutes/an)
2	5	0,5	1	0,5	303
2	10	0,5	1	0,5	159
5	5	0,5	1	0,5	294
5	10	0,5	1	0,5	150
2	5	1	2	0,5	591
2	10	1	2	0,5	304
5	5	1	2	0,5	582
5	10	1	2	0,5	294
2	5	0,5	1	1	318
2	10	0,5	1	1	174
5	5	0,5	1	1	300
5	10	0,5	1	1	156
2	5	1	2	1	606
2	10	1	2	1	319
5	5	1	2	1	587
5	10	1	2	1	300

TABLEAU C.4/G.911

**Caractéristique d'une liaison d'accès avec câble et équipements  
terminaux redondants et commutation automatique**

$(1/\lambda_1)$ ans	$(1/\lambda_2)$ ans	$(1/\mu_1)$ jours	$(1/\mu_2)$ jours	Indisponibilité d'un canal à 2 Mbit/s (minutes/an)
2	5	0,5	1	288
2	10	0,5	1	144
5	5	0,5	1	288
5	10	0,5	1	144
2	5	1	2	576
2	10	1	2	289
5	5	1	2	576
5	10	1	2	288

TABLEAU C.5/G.911

**Caractéristiques d'une liaison d'accès avec câble et équipements terminaux redondants et commutation automatique**

$(1/\lambda_1)$ ans	$(1/\lambda_2)$ ans	$(1/\mu_1)$ jours	$(1/\mu_2)$ jours	Indisponibilité d'un canal à 2 Mbit/s (minutes/an)
2	5	0,5	1	360
2	10	0,5	1	360
5	5	0,5	1	144
5	10	0,5	1	144
2	5	1	2	720
2	10	1	2	719
5	5	1	2	288
5	10	1	2	288

TABLEAU C.6/G.911

**Caractéristiques d'une liaison d'accès**

**a) Caractéristiques d'une liaison d'accès avec câble et équipements terminaux redondants et commutation automatique**

$(1/\lambda_1)$ ans	$(1/\lambda_2)$ ans	$(1/\mu_1)$ jours	$(1/\mu_2)$ jours	Indisponibilité d'un canal à 2 Mbit/s (minutes/an)
2	5	0,5	1	0,40
2	10	0,5	1	0,29
5	5	0,5	1	0,20
5	10	0,5	1	0,08
2	5	1	2	1,61
2	10	1	2	1,14
5	5	1	2	0,79
5	10	1	2	0,31

**b) Caractéristiques d'une liaison d'accès avec câble et équipements terminaux redondants**

$(1/\lambda_1)$ ans	$(1/\lambda_2)$ ans	$(1/\mu_1)$ jours	$(1/\mu_2)$ jours	Indisponibilité d'un canal à 2 Mbit/s (minutes/an)
2	5	0,5	1	0,80
2	10	0,5	1	0,48
5	5	0,5	1	0,35
5	10	0,5	1	0,16
2	5	1	2	3,18
2	10	1	2	1,92
5	5	1	2	1,42
5	10	1	2	0,63



Imprimé en Suisse

Genève, 1994