

**Zeitschrift:** Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

**Herausgeber:** Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

**Band:** 56 (1978)

**Heft:** 4

**Artikel:** Réutilisation de la fréquence par diversité de polarisation dans le cas de liaison par satellite

**Autor:** Zufferey, Charles

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-875199>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Réutilisation de la fréquence par diversité de polarisation dans le cas des liaisons par satellite

Charles ZUFFEREY, Cully

621.371.351.095, 1:621.396.934:629.783

## Wiederverwendung der Frequenz durch Mehrfachpolarisation im Falle der Satellitenverbindungen

Zusammenfassung. *Es ist vorgeschlagen worden, im Falle einer durch die geringe Zahl der verfügbaren Frequenzen verringerten Leistungsfähigkeit einer Satellitenverbindung diese durch die Verwendung derselben Frequenz auf zwei Kreuzpolarisationen zu erhöhen. Es ist der aus der Polarisationsentkopplung zwischen gleichen Kanälen hervorgehende Wert, der schliesslich über die Verwirklichung eines solchen Vorhabens entscheidet. Die Güte der erzielten Entkopplung ist in hohem Masse vom benützten Antennensystem abhängig, aber auch die Auswirkungen des Ausbreitungsmediums auf die Polarisation der ausgesandten Welle sind in dieser Beziehung von Belang. Dieser Artikel handelt einmal von den verschiedenen Faktoren, die den Betrieb der gemäss dem Prinzip der Wiederverwendung der Frequenzen konstruierten Systeme beeinflussen können, dann auch von den Vor- und Nachteilen der zirkularen Polarisation in bezug auf die lineare Polarisation. Er weist darauf hin, dass die Inbetriebsetzung solcher Systeme heute allein eine Geldfrage ist, die für deren Verwirklichung zu möglichst geringen Kosten notwendigen Ausbreitungswerte jedoch noch keineswegs genügend sind. Den Messungen, die in den folgenden Jahren durchgeführt werden — im Rahmen vor allem der Satelliten OTS und Intelsat-V — kommt in dieser Hinsicht entscheidende Bedeutung zu.*

Résumé. *Lorsqu'une liaison par satellite est limitée par le nombre des fréquences disponibles, on a proposé d'augmenter sa capacité en utilisant la même fréquence sur deux polarisations croisées. C'est la valeur résultante du découplage de polarisation entre mêmes canaux qui, en dernier ressort, détermine si une telle solution est réalisable ou non. La qualité du découplage obtenu dépend fortement du système d'antennes utilisées, mais également de l'importance des effets du milieu de propagation sur la polarisation de l'onde transmise. Cet article passe en revue les différents phénomènes susceptibles de perturber le fonctionnement des systèmes conçus selon le principe de la réutilisation de fréquence, et présente les avantages et les inconvénients de la polarisation circulaire par rapport à la linéaire. Il montre que, si la mise en œuvre de tels systèmes n'est pratiquement plus qu'une question de coût des équipements, les données de propagation, nécessaires pour une réalisation à un coût minimal, sont encore loin d'être suffisantes à ce jour. Les mesures qui seront effectuées ces prochaines années, notamment à partir des satellites OTS et Intelsat-V, seront, de ce point de vue, capitales.*

## Riutilizzazione della frequenza mediante diversità di polarizzazione nel caso di collegamenti via satelliti

Riassunto. *Quando un collegamento via satelliti è limitato a causa del numero di frequenze disponibili, si propone di aumentare la sua capacità con l'utilizzazione della stessa frequenza su due polarizzazioni incrociate. È il valore risultante dalla tensione di polarizzazione di disaccoppiamento entro stessi circuiti, che, in ultima analisi, determina se una tale soluzione è realizzabile o no. La qualità della tensione di disaccoppiamento ottenuta dipende in gran parte dal sistema di antenne utilizzate, ma anche dall'importanza degli effetti dell'ambiente di propagazione sulla polarizzazione dell'onda trasmessa. Nel presente articolo sono passati in rivista i diversi fenomeni suscettibili di perturbare il funzionamento dei sistemi concepiti secondo il principio della riutilizzazione di frequenza ed elencati i vantaggi e gli inconvenienti della polarizzazione circolare rispetto a quella lineare. Viene inoltre mostrato che se la messa in opera di tali sistemi è ora unicamente una questione di costo degli equipaggiamenti, i dati di propagazione, necessari per una realizzazione a un costo minimo, sono ancora ben lungi dall'essere sufficienti. Le misure che verranno effettuate nei prossimi anni, soprattutto a partire dai satelliti OTS e Intelsat-V, saranno, da questo punto di vista, di capitale importanza.*

## 1 Introduction

Les télécommunications par satellite sont entrées au cours de ces dernières années dans une phase de croissance rapide. On étudie même actuellement des projets de satellites de radiodiffusion. Or, il existe deux contraintes bien définies dont il faut obligatoirement tenir compte lorsque l'on se propose d'accroître la capacité totale des liaisons par satellites: d'une part, le spectre électromagnétique attribué à ces liaisons est une ressource naturelle qui n'est pas disponible en quantité illimitée et, d'autre part, les positions intéressantes sur l'orbite géostationnaire sont elles aussi comptées. La *figure 1* donne une idée de l'évolution du degré d'occupation de cette orbite entre 1970 et 1976. Il importe donc, dans ce domaine, non seulement de planifier avec beaucoup de soin les systèmes à venir, mais aussi de réexaminer de façon critique la conception des systèmes existants, en vue de s'assurer que l'usage fait de ressources naturelles aussi précieuses soit le plus efficace possible et profite au plus grand nombre d'utilisateurs.

On ne s'étonnera donc pas d'apprendre que, depuis plusieurs années déjà [1], on se soit préoccupé d'étudier des techniques ou des configurations qui conduisent à

une meilleure utilisation des bandes de fréquences allouées. Le problème du partage de ces bandes, avec les services terrestres en particulier, est spécialement ardu du fait de l'étendue de la zone de visibilité directe du satellite. Le but de cet article n'est toutefois pas d'étudier la question des interférences entre systèmes, mais de se consacrer aux techniques permettant d'accroître la capacité d'une liaison par satellite en réutilisant plusieurs fois la même fréquence.

## 2 Réutilisation des fréquences

Il existe plusieurs configurations possibles permettant de réutiliser la même bande de fréquences dans le cas des liaisons par satellite. On se bornera à en citer trois, parmi les plus connues:

A par la mise en œuvre d'antennes à faisceau très étroit («antenne pinceau») à bord du satellite, on peut envisager d'utiliser la même fréquence sur deux faisceaux adjacents, lorsque ceux-ci sont pointés vers des zones suffisamment écartées l'une de l'autre géographiquement pour permettre une séparation des signaux

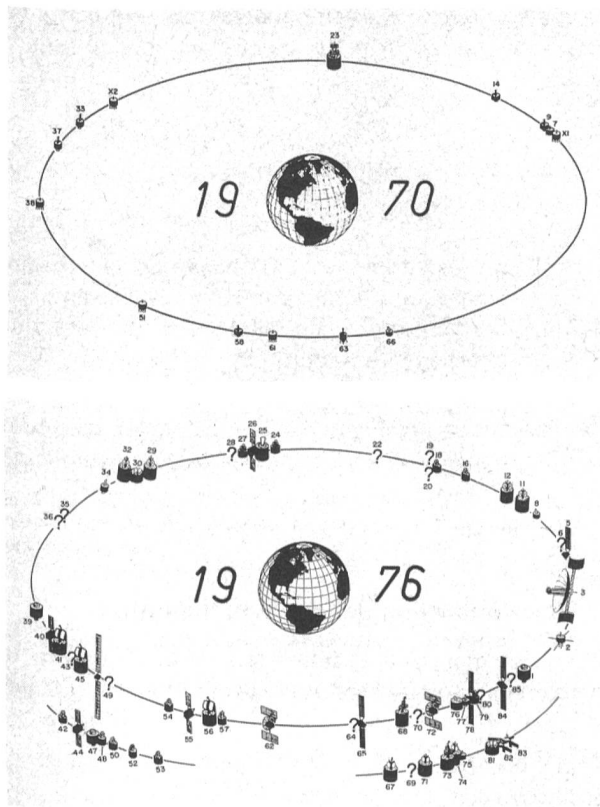


Fig. 1  
Degré d'occupation de l'orbite géostationnaire (d'après Comsat Techn. Review, Spring 1976)

- B dans le cas de deux satellites adjacents sur l'orbite géostationnaire, on peut réduire leur espacement par l'emploi de polarisations croisées, augmentant du même coup le coefficient d'occupation d'orbite
- C une dernière technique, enfin, consiste à utiliser deux fois la même bande de fréquences à l'intérieur d'un même faisceau d'antenne, deux ondes croisées en polarisation pouvant transmettre des signaux différents grâce à la discrimination de polarisation

La variante A est déjà en usage dans les systèmes existants; elle présente malheureusement l'inconvénient d'être inapplicable dans le cas d'un satellite régional, la zone de couverture étant par trop exiguë. Quant à la configuration B, elle est envisagée en vue de la réduction du niveau d'interférence entre systèmes voisins, mais son efficacité est limitée par la relativement mauvaise discrimination de polarisation des antennes en dehors de leur axe principal de rayonnement. On se bornera donc à ne considérer ici que la variante C qui semble contenir de grandes promesses d'une réalisation prochaine, tant du point de vue technique que du point de vue économique. On peut en effet envisager, à la limite, de doubler la capacité de transmission d'un faisceau de satellite.

La possibilité de mettre en œuvre une telle solution dépend cependant de façon très critique de la qualité du découplage réalisable entre les deux canaux en polarisation croisée. Une mauvaise isolation peut résulter de causes multiples:

- mauvais alignement des antennes du satellite et de la station au sol

- discrimination de polarisation insuffisante de la part des antennes ou des circuits de séparation des modes (OMT, polariseur)
- difficultés dans le système de stabilisation du satellite
- anisotropie du milieu de propagation, que ce soit les effets de l'ionosphère pour les fréquences inférieures à 8 GHz, ou les effets dus à la présence d'hydrométéores dans les basses couches de l'atmosphère au delà de 10 GHz

Chacun des effets qui viennent d'être énoncés dépend plus ou moins fortement du type de polarisation utilisé. Pour ce qui est des trois premiers, ils se laissent assez facilement corriger, pour peu que l'on soit décidé à investir suffisamment de temps et d'argent dans ces questions. Il n'en va pas de même des effets de propagation, car on n'a pas encore réussi jusqu'à ce jour à contrôler les phénomènes météorologiques. La mise au point de dispositifs fiables de poursuite de polarisation ou de systèmes à compensation dynamique des distorsions de propagation est longue et coûteuse. Cela explique pourquoi cette technique n'a encore été que très peu utilisée jusqu'à présent. Aussi les concepts associés à la description des propriétés de polarisation d'une onde électromagnétique ne sont-ils peut-être pas familiers à tous les lecteurs. C'est pourquoi on en donne un bref résumé au chapitre suivant, avant d'aborder l'étude proprement dite du découplage de polarisation.

### 3 Rappel de quelques notions concernant la polarisation

#### 31 Etat de polarisation

On peut décrire l'état de polarisation d'une onde électromagnétique à l'aide d'une grandeur complexe que l'on appellera *facteur de polarisation*  $\hat{p}$  [2]. Ce dernier est défini comme étant le quotient complexe de deux intensités du champ électrique, mesurées selon deux directions orthogonales arbitraires dans l'espace (fig. 2)

$$\hat{p} = \frac{|\hat{E}_1|}{|\hat{E}_2|} \exp j (\arg \hat{E}_1 - \arg \hat{E}_2) \quad (1)$$

Comme cas particulier, on retiendra que lorsque  $\hat{p}$  est réel, on a affaire à de la polarisation rectiligne, alors que si  $\hat{p} = \pm j$  la polarisation sera circulaire. Dans le cas tout à fait général  $\hat{p} = u + jv$ , la polarisation sera elliptique. On définira dans ce cas le *taux d'ellipticité*  $e$  comme étant le rapport entre l'intensité de champ maximale et celle minimale obtenue en faisant tourner un récepteur linéaire de  $360^\circ$  dans l'espace (fig. 2)

$$e = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \geq 1 \quad (2)$$

Un principe important découlant de ce qui vient d'être exposé affirme qu'il est toujours possible de décomposer un état de polarisation en une somme de deux états particuliers. Par exemple, toute polarisation elliptique

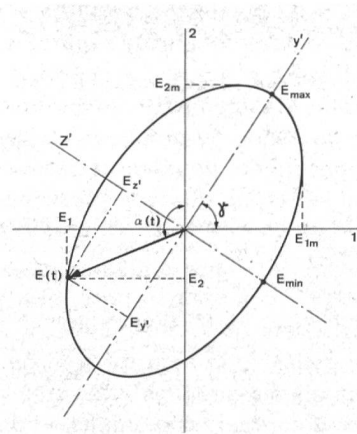


Fig. 2  
Grandeurs associées à la description mathématique de la polarisation elliptique

peut se décomposer en deux polarisations circulaires de sens contraire. Autre conséquence: il faut un nombre complexe, donc l'équivalent de deux nombres réels, pour décrire complètement l'état de polarisation d'une onde. Le taux d'ellipticité à lui seul n'est donc pas suffisant: on pourra lui adjoindre l'angle d'inclinaison de l'ellipse par rapport à l'une des directions de référence. Cet angle  $\gamma$  est défini par la relation

$$\tan 2\gamma = \frac{2|\hat{p}|}{1-|\hat{p}|^2} \cos(\arg \hat{p}) \quad (3)$$

Toutefois, le couple  $(e, \gamma)$  ne détermine l'état de polarisation qu'au sens de rotation près. Cela n'est cependant pas très gênant, puisque seuls les états de sens contraire nous intéressent du point de vue du découplage.

### 32 Passage à travers un milieu

Lors du passage de l'onde à travers un milieu de transmission, un état de polarisation sera le plus souvent changé en un autre état. On peut exprimer un tel changement par une relation de la forme:

$$\hat{p}_2 = q \cdot \hat{p}_1 \quad (4)$$

où  $q$  sera le plus souvent une fonction de  $\hat{p}_1$  lui-même. Il est possible de démontrer qu'un milieu de transmission quelconque ne peut influencer l'état de polarisation que de trois façons: (1) ou bien il laissera passer un état de polarisation privilégié de façon inchangée, transformant tous les autres états (cas du milieu à un seul invariant), (2) ou bien il en laissera passer deux inchangés (cas du milieu à deux invariants), (3) ou bien il laissera passer tous les états de polarisation sans les changer (cas du milieu isotrope). Il n'existe pas d'autre possibilité en dehors de ces trois cas.

D'une manière tout à fait générale, on peut écrire l'équation de transmission à travers un milieu sous la forme:

$$[R_i] = [T_{ij}] [E_j] \quad (5)$$

où  $R$  et  $E$  représentent les composantes du champ électrique à la réception et à l'émission et  $i, j = 1, 2$  se rapportent aux directions de référence choisies plus haut (fig.2)

Les directions privilégiées selon lesquelles on pourra écrire  $T_{ij} = 0$  avec  $i \neq j$  sont appelées *directions principales*.

### 33 Discrimination, découplage, isolation

On peut maintenant définir un certain nombre de grandeurs qui nous seront utiles par la suite. Il s'agit de:

L'affaiblissement de transmission  $A_i$  [dB] =  $-20 \log T_{ii}$  (6)

La discrimination de polarisation  $d_i$  [dB] =  $20 \log (T_{ij}/T_{ji})$  (7)

L'isolation ou découplage  $D_j$  [dB] =  $20 \log (T_{ji}/T_{ij})$  (8)

On remarquera la distinction établie entre la discrimination et le découplage de polarisation (isolation). La discrimination se rapporte à la différence de niveau des signaux reçus sur deux canaux en polarisation croisée, lorsqu'une seule polarisation est transmise. C'est ce que mesurent la plupart des expérimentateurs. L'isolation est la mesure du niveau d'interférence entre canaux lorsque les deux canaux en polarisation croisée sont utilisés. Par la suite, on parlera avant tout de discrimination lorsqu'on traitera des problèmes d'antennes, la notion de découplage, qui intéresse surtout l'ingénieur de système, servant au calcul des perturbations par interférence. Il faut noter qu'il existe des milieux pour lesquels  $T_{ij} = T_{ji}$ , auquel cas les deux notions se trouvent être identiques; c'est le cas pratiquement pour la pluie [3].

Il faut encore établir une relation entre la discrimination de polarisation et le taux d'ellipticité défini plus haut. La décomposition de l'état de polarisation  $(e, \gamma)$  en deux polarisations circulaires de sens contraire permet d'écrire:

$$d \text{ [dB]} = -20 \log \left( \frac{e-1}{e+1} \right) \quad (9)$$

Cette relation est représentée à la figure 3. Une antenne bien construite devrait présenter une ellipticité inférieure à 0,5 dB ( $e = 1,06$ ) en polarisation circulaire, ce qui représente une discrimination de polarisation meilleure que 30 dB.

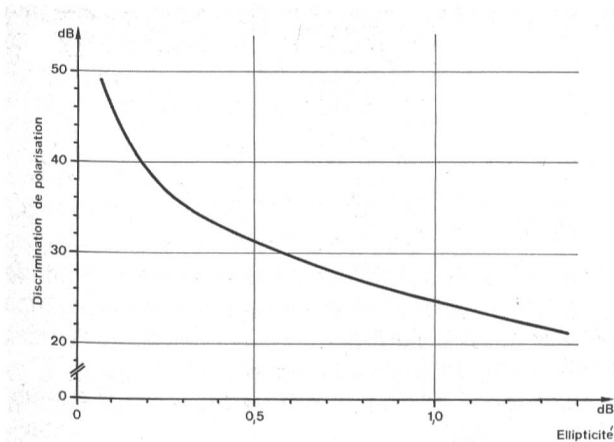


Fig. 3  
Relation entre la discrimination de polarisation d'une antenne et son taux d'ellipticité

#### 4 Découplage d'un trajet dans l'espace libre

##### 41 Occurrence de la dépolarisation par temps clair

Lorsque le milieu de transmission ne joue aucun rôle, comme c'est le cas pour l'espace libre, les seules limitations apportées à l'isolation d'un trajet terre-satellite proviennent des imperfections inhérentes aux antennes, ou de l'alignement incorrect de la liaison. L'équation de transmission entre deux antennes de gain respectif  $G_e$  et  $G_r$ , s'écrit dans ce cas:

$$P_r = P_e G_e G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 K_p \quad (10)$$

où  $P$ ,  $L$ ,  $\lambda$  sont des grandeurs bien connues (e: émission, r: réception)

et  $K_p$  représente les pertes dues au désaccord de polarisation entre les deux antennes (en anglais DTL: Depolarisation Transmission Loss)

La quantité  $K_c = 1 - K_p$  est ainsi proportionnelle à la puissance reçue sur le canal croisé (signal non désiré) et l'on peut définir le découplage de polarisation pour un trajet par la relation (fig. 4):

$$D_t \text{ [dB]} = 10 \log \frac{K_p}{1 - K_p} \quad (11)$$

##### 42 Cas de la polarisation rectiligne

Puisque le couplage de polarisation correspond à un transfert d'énergie d'un état de polarisation vers un autre état, on obtiendra le couplage résultant de plusieurs causes, en effectuant le cumul des pertes par dépolarisation (fig. 4). Ainsi donc, pour  $N$  sources de couplage, caractérisées chacune par une discrimination  $d_i$ , on obtient le total des pertes par dépolarisation en effectuant les produits:

$$K_p = \prod_{i=1}^N \left( \frac{d_i^2}{1 + d_i^2} \right) \quad (12)$$

et la valeur du découplage résultant pour un trajet s'obtient en introduisant  $K_p$  dans l'équation (11).

En polarisation linéaire, lorsque les plans de polarisation des deux antennes ne sont pas parfaitement alignés, il se produit une dégradation supplémentaire de l'isolation qui se traduit par:

$$d_{\theta} \text{ [dB]} = -20 \log \tan \theta \quad (13)$$

où  $\theta$  représente l'angle d'écart entre les deux plans de polarisation (fig. 4). La dégradation du découplage en fonction du désalignement est donc très rapide, atteignant une valeur de 35 dB pour un écart de  $1^\circ$  déjà et 21 dB seulement pour un écart de  $5^\circ$ .

Comme *application numérique*, on retiendra que, si la discrimination de l'antenne du satellite est de 33 dB et celle de la station terrienne de 35 dB, avec une erreur d'alignement inférieure à  $1^\circ$  seulement, le découplage de polarisation sur un trajet ne sera que de 26 dB environ.

##### 43 Cas de la polarisation circulaire

Si la polarisation de chacune des deux antennes était parfaitement circulaire, le découplage de la liaison serait infini. En réalité, la polarisation de chaque antenne présentera une faible ellipticité, conduisant à une limitation de la valeur du découplage réalisable. Prenons le cas de deux antennes présentant chacune une discrimination  $d_e$  et  $d_r$ . Des considérations analogues à celles effectuées pour la polarisation linéaire permettent d'évaluer le découplage résultant pour un trajet. Celui-ci est fonction de l'angle  $X$  formé par les axes des deux ellipses:

$$D(X) = 10 \log \frac{1 + d_r^2 d_e^2 + 2 d_r d_e \cos(2X)}{d_r^2 + d_e^2 - 2 d_r d_e \cos(2X)} \text{ [dB]} \quad (14)$$

En fonction de l'orientation relative des deux ellipses, le découplage de polarisation résultant passe donc par un maximum et un minimum. On obtient:

$$D_{\max}(X=0) = 20 \log \frac{1 + d_e d_r}{|d_e - d_r|} \quad (15)$$

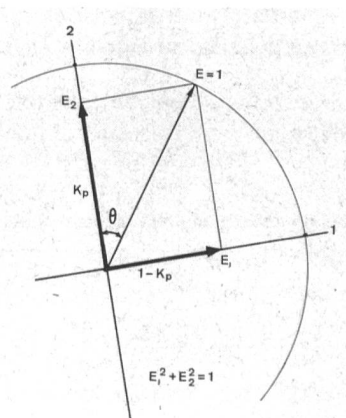


Fig. 4  
Dégradation du découplage dans le cas de la polarisation rectiligne



Fig. 5  
Découplage de polarisation d'une liaison en polarisation circulaire

$$D_{\min}(X=90^\circ) = 20 \log \frac{1 - d_e d_r}{d_e + d_r} \quad (16)$$

La figure 5 représente les valeurs de découplage réalisables pratiquement sur un trajet en polarisation circulaire, en fonction de la discrimination de polarisation de l'antenne réceptrice (dans le cas où la discrimination de l'antenne d'émission est de 33 dB). On constate que, si l'une des antennes possède une circularité notablement supérieure à celle de l'autre antenne, le découplage de la liaison est pratiquement égal à la valeur de la discrimination de polarisation de l'antenne la moins parfaite. Lorsque les deux antennes possèdent des imperfections à peu près identiques, il est toujours possible moyennant un désaccordage judicieux de chacune d'entre elles d'obtenir une valeur de découplage élevée. Cependant une telle valeur, obtenue par une technique de compensation de deux composantes quasi égales, n'est pas très stable, d'autant moins que la discrimination de chaque antenne sera faible. Enfin, les résultats de cette analyse laissent entrevoir la possibilité d'améliorer le découplage d'une liaison par simple rotation de la source primaire (feed) du système d'antenne. Les possibilités et les limites de cette méthode très simple ont fait l'objet d'une étude récente [4] basée sur des résultats expérimentaux obtenus à partir du satellite ATS-6.

Comme application numérique dans le cas de la polarisation circulaire, on retiendra que, si l'antenne d'émission

présente une ellipticité de 1,046 (0,4 dB), il faut que l'antenne réceptrice présente une discrimination de 40 dB au moins (ellipticité < 0,2 dB) afin de garantir un découplage de 30 dB sur un trajet de la liaison.

#### 44 Valeurs du découplage réalisables pratiquement

La mise en œuvre d'un système avec réutilisation de la fréquence dépend donc en partie de la réalisation d'un découplage suffisant pendant 95 % du temps, c'est-à-dire lorsque les conditions de propagation n'interviennent pas. Il s'agit donc d'un problème de technologie d'antennes. Les techniques permettant d'obtenir de bonnes performances en ce qui concerne la polarisation de la part des antennes sont maintenant bien connues [5]. Parmi celles-ci, mentionnons simplement les bons résultats obtenus en utilisant un cornet cannelé comme source primaire.

Le problème de la pureté de polarisation est cependant différent suivant que l'on se place du point de vue de l'antenne du satellite ou de celui de la station terrienne. Pour l'antenne du satellite, il s'agit de garantir un bon découplage de polarisation sur un angle d'ouverture suffisamment grand pour desservir convenablement toutes les stations. Tandis que, pour l'antenne de la station terrienne, il suffit de réaliser une bonne discrimination à la pointe de l'étroit pinceau dirigé vers le satellite. En pratique, on cherchera également à limiter les interférences avec les satellites adjacents en gardant le découplage aussi faible que possible sur les lobes latéraux. Le problème des pertes d'insertion causées par le polariseur et le dispositif d'extraction de modes est également surtout critique pour l'antenne de la station au sol.

Le tableau I contient quelques valeurs permettant de fixer les ordres de grandeur des découplages réalisables pratiquement. En polarisation linéaire, on a tenu compte des difficultés à garantir un bon découplage sur un faisceau de forme asymétrique de la part de l'antenne du satellite. L'ellipticité de l'antenne de la station terrienne est supérieure à celle du satellite en polarisation circulaire, pour tenir compte des difficultés à réaliser un polariseur avec faibles pertes d'insertion et capable de supporter une puissance élevée à l'émission.

On retiendra donc que, dans le cas des hypothèses les moins favorables, il est possible de réaliser un découplage total pour une liaison (deux trajets) qui se situe aux environs de 23...25 dB. Il semble que ces valeurs doivent être considérées comme des limites inférieures et que les découplages réalisés pratiquement seront en tout cas supérieurs.

Tableau I. Valeurs du découplage de polarisation réalisables pratiquement, sans une augmentation prohibitive du coût des antennes

	Polarisation linéaire		Polarisation circulaire	
	Découplage [dB]	(Contour -3 dB)	Ellipticité [dB]	Découplage [dB] (Contour -3 dB)
Satellite	37	(33)	0,3	35 (30)
Station terrienne	40*	(35)	0,5	31 (31)
Résultante (un seul trajet)	33	(28)	—	27 (26)
Liaison totale (deux trajets)	30	(25)	—	24 (23)

\* avec dispositif de poursuite mécanique (35); sans poursuite

## 5 Effets perturbateurs dus au milieu de propagation

En plus des effets propres aux antennes, le découplage de polarisation sur un trajet peut être affecté par le milieu que traverse l'onde électromagnétique. Contrairement aux problèmes d'antennes, les effets du milieu de propagation ne peuvent être éliminés par une technique adéquate de construction des équipements, mais font intervenir des dispositifs plus ou moins complexes, soit de poursuite (*polarisation tracking*), soit de compensation (*polarisation restoring*) des distorsions de polarisation. Les effets les plus gênants proviennent de l'ionosphère et des basses couches de l'atmosphère.

### 51 Effet Faraday

Du fait de la présence du champ électromagnétique terrestre, l'ionosphère se présente comme un milieu anisotrope pour les fréquences inférieures à 10 GHz. Le déphasage subi par une onde la traversant sera différent suivant que son vecteur champ tournera dans le sens dextrogyre ou dans le sens opposé. Il en résulte que seule la polarisation circulaire est un invariant pour ce milieu. Toute polarisation rectiligne subira une rotation de son plan de polarisation d'une valeur  $\Omega$  donnée par la formule [6]:

$$\Omega = \frac{Q}{f^2} \int_s \mathbf{N} \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{s} \quad (17)$$

avec  $Q = 2,97 \cdot 10^{-2}$  (MKS). La rotation  $\Omega$  est donc proportionnelle à la densité d'ions  $N$ , ainsi qu'à la valeur de la composante du champ magnétique  $M$ , parallèle au trajet terre-satellite. L'effet Faraday décroît rapidement avec la fréquence  $f$  et ne joue pratiquement plus de rôle dans la bande 11/14 GHz.

La différence de rotation qui peut exister entre le jour et la nuit atteint  $5^\circ$  à 4 GHz et encore  $2^\circ$  à 6 GHz, sans parler des valeurs extrêmes qui peuvent se rencontrer en cas d'éruption solaire. Si ces effets n'étaient pas compensés, la dégradation du découplage qui en résulterait en polarisation linéaire ne serait pas tolérable (équation 13). Comme ces variations sont cependant relativement lentes, il est possible de corriger leur effet par un dispositif de poursuite de polarisation qui peut être électronique ou mécanique. Il faudra cependant prendre garde au fait que la correction à l'émission devra être de sens contraire à celle effectuée à la réception.

### 52 Dépolarisation par la pluie

Pour des longueurs d'onde de quelques centimètres et en dessous, la présence d'hydrométéores dans les basses couches de l'atmosphère perturbe considérablement les conditions de propagation par rapport à celles qui existent par temps clair [7]. Les précipitations atmosphériques sous forme de pluie orageuse sont de loin les plus gênantes, car, en plus de l'affaiblissement causé au signal par absorption et diffusion de l'énergie

électromagnétique, celles-ci sont susceptibles de dégrader de façon considérable le découplage de polarisation existant sur la liaison. Ce phénomène résulte du fait que les grosses gouttes de pluie, de diamètre supérieur à 1 mm, ont une tendance prononcée à s'aplatir selon les dimensions perpendiculaires à leur direction de chute. En première approximation, si l'on admet comme forme théorique des gouttes de pluie un ellipsoïde aplati, le milieu pluie se présente comme un milieu anisotrope à deux invariants en ce qui concerne la polarisation.

### 521 Directions principales, coefficients de propagation à travers la pluie

On pourrait donc raisonnablement admettre que les directions privilégiées en ce qui concerne la conservation de la polarisation sont la verticale et l'horizontale. Ce n'est pas tout à fait le cas pour la raison suivante: lors du déplacement des masses d'air en cas d'orage, un gradient vertical de vitesse se crée automatiquement à cause de la présence du sol.

Il s'ensuit donc une inclinaison du grand axe de la goutte par rapport à l'horizontale. Cet angle d'inclinaison  $\tau$  (fig. 6) varie de façon aléatoire pour chaque gouttelette en fonction de l'altitude considérée. Macroscopiquement, on tient compte de cet effet dans le modèle de propagation en introduisant un angle d'inclinaison *effectif* qui est de l'ordre de  $2^\circ \dots 4^\circ$  par rapport à la verticale. Une telle valeur peut sembler négligeable, mais il faut se souvenir que le découplage varie très rapidement en fonction de l'angle d'écart de polarisation (relation 13).

La dégradation du découplage de polarisation qui se produit en cas de pluie provient en fait de l'existence d'un affaiblissement et d'un déphasage différents selon les deux directions principales du milieu de propagation. La figure 6 représente le cas où l'affaiblissement selon l'axe 1 est plus important que celui selon l'axe 2; il en résulte une rotation du plan de polarisation d'une valeur égale à  $\theta$  et donc une dégradation du découplage.

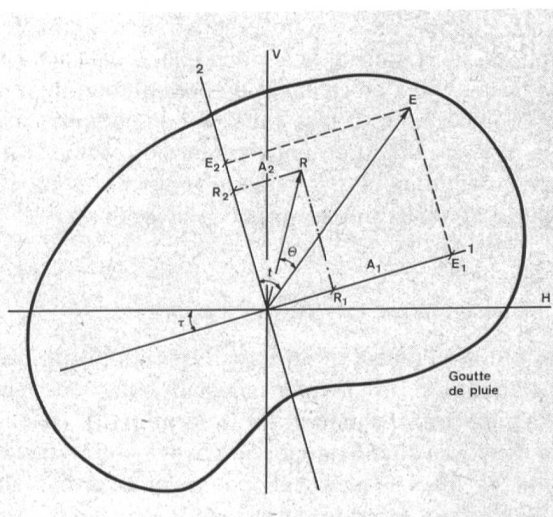


Fig. 6  
Dépolarisation causée par un affaiblissement anisotrope ( $A_1 > A_2$ ) lors du passage à travers une goutte de pluie

L'existence d'un déphasage différentiel entre les deux composantes aurait pour effet de transformer une polarisation rectiligne en polarisation elliptique.

Les coefficients d'affaiblissement et de déphasage différentiels sont fonction du type et de l'intensité des précipitations. Ils ont été abondamment calculés et discutés dans la littérature [8, 9, 10], si bien qu'on ne s'y attardera pas ici. Les divergences qui peuvent apparaître lors du calcul de  $\Delta A$  et de  $\Delta\Phi$ , selon que l'on utilise une méthode ou une autre, ne jouent qu'un rôle tout à fait secondaire devant le genre d'incertitude qui subsiste quant à la structure spatiale des zones orageuses. La figure 7 représente la variation de ces coefficients en fonction de l'intensité des précipitations pour deux fréquences bien particulières. On constate que, si à 11 GHz le déphasage et l'affaiblissement jouent un rôle à peu près comparable dans la dégradation du découplage, il n'en est pas de même à 4 GHz, où les effets de dépolarisation résultent surtout du déphasage différentiel introduit par la pluie. Cette remarque prend toute son importance lors de la conception d'un dispositif de compensation de polarisation. Les effets de la pluie seront plus ou moins prononcés selon le type de polarisation utilisée.

### 522 Cas de la polarisation rectiligne

La transmission en polarisation linéaire à travers une cellule de pluie de longueur unité peut s'écrire:

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + G \tan^2 t & (1 - G) \tan t \\ (1 - G) \tan t & G + \tan^2 t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

où  $G = \exp(-\Delta A + j\Delta\Phi)$

$t$  représente l'écart d'orientation par rapport aux directions principales (fig. 6)

et les indices 1, 2 se réfèrent aux composantes du champ selon les deux directions principales

Le découplage de polarisation s'obtient immédiatement à partir des relations (8) et (18). On remarque immédiatement que, le coefficient  $G$  étant complexe, la polarisation du champ reçu  $R$  sera elliptique, alors même que le champ émis était polarisé linéairement. De même, on peut noter que le découplage de polarisation de la liaison varie en fonction de l'orientation du champ électrique transmis. Il sera supérieur en polarisation verticale à celui obtenu en polarisation horizontale. Le découplage est minimum lorsque le vecteur champ fait un angle de  $45^\circ$  environ par rapport à la verticale.

### 523 Cas de la polarisation circulaire

On obtient l'équation de transmission dans le cas de la polarisation circulaire en faisant subir au vecteur  $(E_1, E_2)$  une transformation de la forme  $(1, j)$ , ce qui revient d'ailleurs au même que de poser  $t = 45^\circ$  dans la relation (18). Ainsi, la polarisation circulaire correspond au cas le plus défavorable de la polarisation linéaire et la valeur du découplage de polarisation réalisable ne dépend pas de la valeur moyenne de l'angle d'orientation des gouttes de pluie dans l'espace.

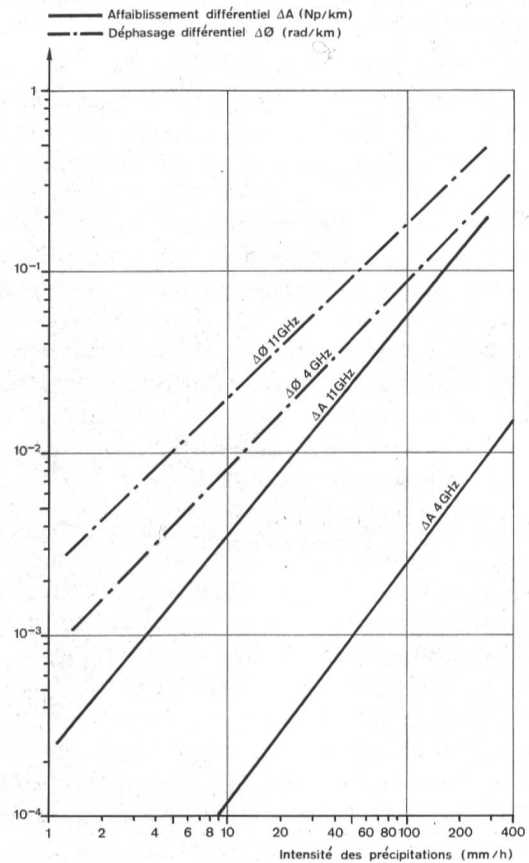


Fig. 7 Coefficients d'affaiblissement et de déphasage différentiels en fonction de l'intensité des précipitations

Le découplage d'une liaison en polarisation circulaire à travers la pluie s'obtient aisément et peut se mettre sous la forme:

$$D_c = 10 \log \frac{\cosh \Delta A + \cos \Delta \Phi}{\cosh \Delta A - \cos \Delta \Phi} \quad [\text{dB}] \quad (19)$$

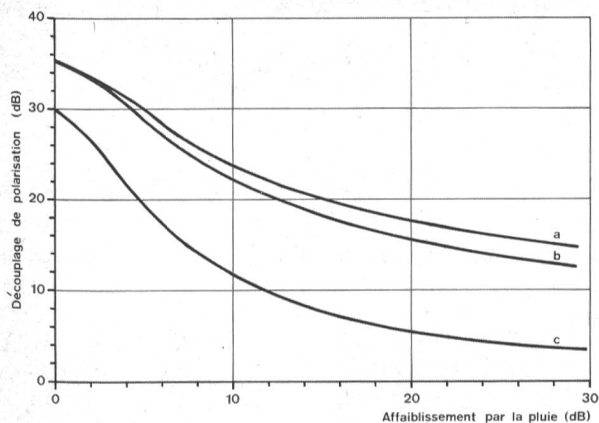
Ce modèle théorique a été vérifié expérimentalement à 13 GHz [11]; on a trouvé une bonne concordance avec les mesures.

### 524 Relation entre l'affaiblissement par la pluie et le découplage de polarisation

Le modèle théorique de propagation à travers la pluie laisse entrevoir l'existence d'une dépendance entre l'affaiblissement et la valeur du découplage de polarisation [12]. Très tôt, on s'est intéressé à une telle relation, car elle présente un plus grand intérêt que celle qui pourrait exister entre la dépolarisation et l'intensité des précipitations mesurées au sol. En 1974, l'auteur proposait au CCIR (Doc. 5/194 1970-1974) une loi empirique de la forme:

$$D_c = D_o - k \cdot \ln A_p \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

pour décrire cette relation dans le cas de la polarisation circulaire. Il semble que cette loi, déduite de mesures



**Fig. 8**  
**Relation entre le découplage de polarisation et l'affaiblissement par la pluie**  
 Fréquence 11,6 GHz  
 a Polarisation linéaire verticale  
 b Polarisation linéaire horizontale  
 c Polarisation circulaire,  $t = 45^\circ$

expérimentales à 13 GHz, ait été vérifiée depuis par d'autres expérimentateurs, pour des fréquences allant de 6 à 18 GHz (Doc. CCIR 5/184 1974–1978) [13]. La relation (20) s'applique particulièrement bien pour les grands affaiblissements ( $> 3$  dB) en polarisation circulaire, la corrélation étant beaucoup plus floue en polarisation linéaire [12]. Cela provient du fait que la polarisation circulaire est insensible à l'angle d'orientation moyen des gouttes de pluie et ne réagit qu'à la variance de leur distribution, contrairement à ce qui se passe pour la polarisation linéaire.

A titre d'exemple, on a représenté à la *figure 8* la dépendance entre l'affaiblissement et le découplage de polarisation pour divers types de polarisation à la fréquence de 11,6 GHz. On remarquera l'avantage du point de vue de la propagation uniquement de la polarisation rectiligne par rapport à la circulaire. Ainsi, pour un affaiblissement de 5 dB, le découplage moyen obtenu en polarisation verticale est supérieur d'environ 9 dB à celui réalisable en polarisation circulaire.

### 525 Variation de la dépolarisation par la pluie en fonction de la fréquence

L'affaiblissement de diffusion par la pluie dépend du rapport qui existe entre le diamètre des gouttes et la longueur d'onde considérée. Lorsqu'on parcourt le spectre des fréquences en allant des ondes décimétriques en direction des ondes millimétriques, ce sont des gouttes de diamètre de plus en plus petit qui tour à tour entrent en résonance et causent la plus grande part de l'atténuation. Or, il se trouve que ces gouttelettes ont une configuration beaucoup plus symétrique (quasi sphérique) que les grosses gouttes de pluie et qu'elles dépolarisent donc beaucoup moins fortement l'onde électromagnétique les traversant.

Cette constatation trouve son application à la *figure 9* où l'on a représenté la valeur du découplage obtenu en polarisation circulaire en fonction de la fréquence, avec, comme paramètre, la valeur de l'affaiblissement du signal en polarisation nominale. Pour le calcul de ces courbes, on a utilisé des valeurs d'affaiblissement et de déphasage différentielles disponibles dans la littérature

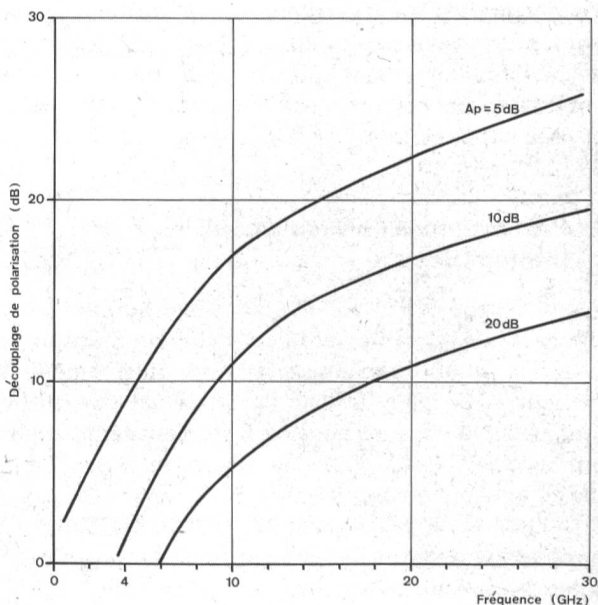
[9]. Les résultats de ce calcul indiquent très clairement que c'est l'affaiblissement par la pluie et non la dépolarisation qui sera la contrainte dominante de dimensionnement des futurs systèmes à 20/30 GHz. La situation inverse se retrouve pour les bandes 4/6 GHz, pour lesquelles le découplage peut descendre en dessous de 20 dB pour des valeurs très faibles de l'atténuation. Le passage d'une situation à l'autre s'effectue progressivement dans la région 11/14 GHz, où les deux phénomènes peuvent contribuer pour une part à peu près égale à l'indisponibilité de la liaison.

Tout ce qui vient d'être dit s'applique à la polarisation circulaire dans le cas de la pluie. Les effets de la neige et de la glace sont de nature tout à fait différente.

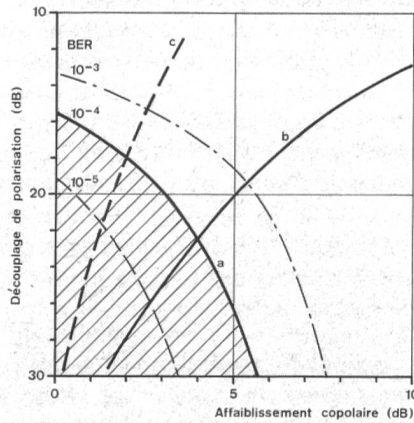
### 53 Dépolarisation par la neige et les nuages de glace

La constante diélectrique de la glace étant beaucoup plus faible que celle de l'eau, la neige dépolarise beaucoup plus qu'elle n'affaiblit une onde électromagnétique la traversant. Ce fait fut clairement mis en évidence sur la liaison expérimentale de la Jungfrau [11]. Dans le cas des chutes de neige mouillée ou fondante, l'affaiblissement reprend toute son importance vis-à-vis de la dépolarisation et les effets sont alors analogues à ceux causés par une pluie continue de grande étendue ( $R < 10$  mm/h). Une forte dépolarisation, non associée à un affaiblissement du signal copolaire, a également été mise en évidence lors d'une expérience avec le satellite COMSTAR [14]; on pense que cet effet est dû à la présence de cristaux de glace sur le trajet, situés à une altitude supérieure à celle de l'isotherme zéro degré.

La forte dépolarisation, exercée par la neige ou les nuages de glace sans grand affaiblissement du signal copolaire, amenuise considérablement les espoirs de pouvoir prédire la dépolarisation à partir de l'affaiblisse-



**Fig. 9**  
**Variation du découplage de polarisation en fonction de la fréquence**  
 Cas de la polarisation circulaire  
 $A_p$  Affaiblissement causé par la pluie



**Fig. 10**  
**Performances d'un système de type digital**  
 a Courbe à BER constant ( $10^{-4}$ ) mesurée pour un modem 4 CPSK à 180 Mbit/s  
 b Relation découplage/affaiblissement dans le cas des orages  
 c Comme b, mais dans le cas de la neige ou de la glace  
 Bande 11/14 GHz

ment. Si les statistiques d'atténuation peuvent être déduites de façon plus ou moins précise à partir de l'intensité des précipitations mesurées au sol, c'est parce que l'affaiblissement est surtout causé par la partie liquide d'un orage. Il n'en va pas de même de la dépolarisation, dont la majeure contribution, en polarisation linéaire, provient des formations de glace qui existent au-dessus de la zone fondante dans les orages.

Cependant, les effets d'une forte dépolarisation en l'absence d'atténuation sont peut-être moins catastrophiques qu'il ne paraît de prime abord. La *figure 10* représente la relation entre le découplage et l'affaiblissement qui résulte en un taux d'erreur constant dans le cas d'un système digital. On constate que la même dégradation de qualité est obtenue en présence d'un affaiblissement de 2 dB et d'un découplage de 18 dB, qu'avec un affaiblissement de 4 dB et un découplage de 22,5 dB. Il semble donc que, dans le cas d'un système de transmission de type digital, on puisse tolérer une dégradation bien supérieure du découplage en l'absence d'affaiblissement, que lorsque ces deux effets sont conjugués, comme c'est le cas pour les distorsions causées par la pluie.

#### 54 Protection de l'antenne contre les intempéries

La présence d'eau sur l'antenne est susceptible de perturber considérablement la distribution du champ et donc d'introduire une dégradation supplémentaire du découplage de polarisation. Cet effet est particulièrement sensible dans les zones à forte densité de champ, comme c'est le cas pour l'ouverture de la source primaire de rayonnement. Il est donc indispensable de recouvrir l'antenne de la station terrienne d'un radôme, ou de recourir à d'autres techniques de protection. Comme le radôme présente l'inconvénient d'introduire un affaiblissement d'insertion non négligeable, spécialement lorsqu'il est mouillé, on s'oriente plutôt actuellement vers des techniques de ventilation et de chauffage, qui semblent donner de bons résultats.

## 6 Considérations de système

Les principaux degrés de liberté qui subsistent lors de la conception d'un système fonctionnant selon le principe de la réutilisation des fréquences concernent le choix du type de polarisation et celui de la modulation, ainsi que du système d'accès multiple au satellite.

### 61 Comparaison entre la polarisation rectiligne et circulaire

Le choix du type de polarisation à utiliser dans un système à réutilisation des fréquences est un problème à la fois délicat et complexe. En effet, le choix optimum doit faire intervenir non seulement les problèmes associés à la propagation, mais également ceux relatifs au partage des fréquences avec les services terrestres, les notions de complexité, de fiabilité et de coût des systèmes d'antennes, ainsi que les paramètres de stabilité du satellite, pour ne citer que les plus évidents. Le *tableau II* présente de façon synoptique les principaux avantages et inconvénients de deux types de polarisation. De cette comparaison il ressort que ni la polarisation linéaire, ni la polarisation circulaire ne présente un avantage absolument déterminant par rapport à l'autre.

On peut dire que le principal avantage de la polarisation circulaire résulte du fait qu'elle est insensible à l'effet Faraday et donc qu'elle ne nécessite pas de dispositif de poursuite de polarisation à 4 et 6 GHz. On obtient également un meilleur découplage entre deux faisceaux provenant de satellites adjacents avec ce type de polarisation, à moins qu'il ne soit possible, en polarisation li-

**Tableau II. Résumé synoptique des avantages et des inconvénients des deux types de polarisation les plus utilisés**

	Polarisation rectiligne	Polarisation circulaire
Discrimination de polarisation des antennes	Bonne	Moins bonne (polariseur)
Discrimination de polarisation hors de l'axe de rayonnement	Favorable	Défavorable
Effets de l'ionosphère	Importants pour $f < 8$ GHz	Inexistants
Effets des hydrométéores	Faibles selon deux directions privilégiées	Très marqués
Dispositif de poursuite de polarisation	Eventuellement nécessaire	Pas nécessaire
Exigences de stabilité de pointage du satellite	Elevées	Moins sévères
Découplage de polarisation entre deux faisceaux adjacents	En général défavorable	Favorable
Partage de la bande de fréquences avec les services terrestres	Favorable	Défavorable
Dispositif de compensation dynamique de la dépolarisation	Plus simple	Complicé
Complexité de réalisation; coûts	Comparable	Comparable

néaire, d'aligner le vecteur de polarisation autrement que selon l'un des axes de symétrie de l'antenne du satellite. D'autre part, la présence nécessaire d'un polariseur limite quelque peu la qualité du découplage réalisable par temps clair avec ce type de polarisation.

Quant à la polarisation rectiligne, son principal avantage réside dans la faible valeur de la dépolarisation exercée par la pluie et aussi partiellement dans fait que la qualité du découplage de polarisation en dehors de l'axe de rayonnement de l'antenne est meilleure qu'en circulaire. Toutefois, les avantages de propagation à travers les précipitations ne sont accordés que pour les directions de polarisation voisines de la verticale ou de l'horizontale du lieu de la station terrienne.

Il convient de rappeler cependant que, dans le cas des liaisons par satellite, il faut utiliser avec prudence les notions de verticale et d'horizontale. En effet, dans une telle liaison les verticales ne sont généralement pas parallèles aux deux extrémités de la liaison. Pour des raisons pratiques, on appellera *angle de polarisation*  $\zeta$  (en anglais: *Tilt Angle*) l'angle formé par la direction du vecteur champ reçu du satellite avec une direction de référence, la verticale locale par exemple. Dans le cas d'une couverture globale, cet angle varie fortement à l'intérieur de la zone de couverture, réduisant à néant les avantages de propagation pour bien des stations éloignées de l'axe de rayonnement de l'antenne du satellite. Si l'on suppose que la trace du diagramme de rayonnement du satellite sur la terre se situe dans le même plan que sa longitude, on peut calculer l'angle de polarisation  $\zeta$  en un lieu donné par la formule:

$$\zeta = \arctan \frac{\sin l}{\tan L} \quad (21)$$

où  $l$  représente la longitude de la station terrienne par rapport à celle du satellite  
et  $L$  la latitude de la station terrienne

En résumé, la polarisation linéaire qui paraît si avantageuse du point de vue de la propagation est cependant très sensible à un défaut d'alignement des plans de polarisation. Quant à la polarisation circulaire, si elle est un peu plus sensible à la dépolarisation par les précipitations, elle est certainement plus avantageuse du point de vue des brouillages intersystèmes, d'un facteur comparable à l'incertitude résultant des problèmes d'alignement en polarisation linéaire. Il faut mentionner pour terminer que le choix s'est porté sur la polarisation linéaire, aussi bien pour le satellite Comstar qui est déjà opérationnel dans les bandes 4/6 GHz, que pour le futur satellite européen ECS qui travaillera dans les bandes 11/14 GHz. Lorsque le contrôle en attitude du satellite et le pointage de la station terrienne peuvent être contrôlés de telle façon qu'un dispositif de poursuite de polarisation devienne inutile, il semble donc que la polarisation linéaire possède un potentiel supérieur à celui qui existe pour la polarisation circulaire.

## 62 Choix du type de modulation

L'accroissement de capacité qui résulte de la réutilisation de la fréquence dépend du type de modulation utilisé, ainsi que de la méthode d'accès multiple au satellite. Examinons maintenant deux cas parmi les plus courants.

### 621 Systèmes analogiques

Dans le cas d'un système FM/FDM, avec une seule ou plusieurs porteuses par répéteur, l'effet de l'utilisation du même canal sur la polarisation croisée se traduit par une charge de bruit supplémentaire due à l'interférence introduite par le découplage imparfait. On peut admettre en effet que les informations contenues sur les deux canaux sont totalement décorréliées: donc les niveaux perturbateurs s'additionnent en puissance et non en tension. On a pu calculer, dans le cas où la capacité de la liaison est limitée par la largeur de bande et non par la puissance disponible, qu'une charge de bruit supplémentaire de 1000 pWOp due à la réutilisation du même canal permettrait une augmentation de la capacité de transmission de l'ordre de 50 à 60 % [15]. Un entrelacement des canaux permettant d'éviter une interférence directe entre porteuses n'apporte guère d'amélioration à ce résultat.

### 622 Systèmes digitaux

La modulation digitale de type PSK est beaucoup plus résistante aux interférences que ne l'est la modulation de type FM. La *figure 11* permet de se déterminer quelle est la charge de bruit thermique équivalente due à la présence d'un signal interférent. On remarquera la différence entre la courbe théorique [16] et celle mesurée sur un équipement expérimental à 180 Mbit/s. On retiendra de cette figure que la marge supplémentaire du rapport porteuse/bruit pour garantir un taux d'erreur de  $10^{-4}$  n'est que de 1 dB pour un rapport porteuse/interférence de l'ordre de 20 dB, qui n'apparaît que durant un faible pourcentage de temps sur une liaison donnée. On peut donc en conclure que, dans le cas d'un système PCM/4PSK/TDMA, l'accroissement de capacité résultant de la réutilisation de la fréquence sera pratiquement de 100 %.

La technique de réutilisation de la fréquence qui présente certes un intérêt dans le cas des systèmes analogiques existants, ne pourra cependant développer toutes ses possibilités qu'associée à des systèmes digitaux. Ce type de modulation s'imposera certainement dans le futur, même au prix d'un coût plus élevé, car il permet

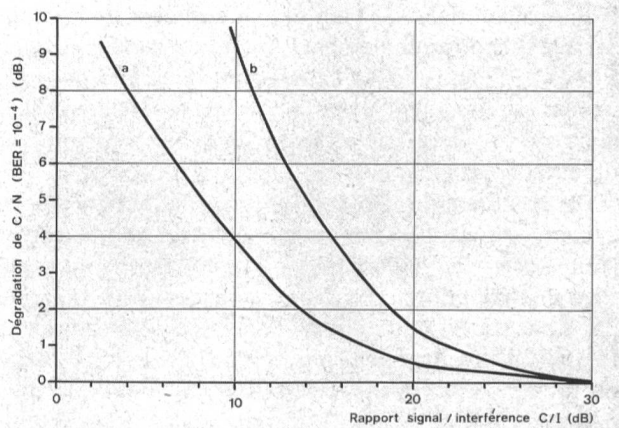


Fig. 11  
Interférence dans le même canal (modulation 4 CPSK avec encodage différentiel)  
a Courbe théorique [16]  
b Courbe mesurée (modem 180 Mbit/s)  
BER Taux d'erreur de bits

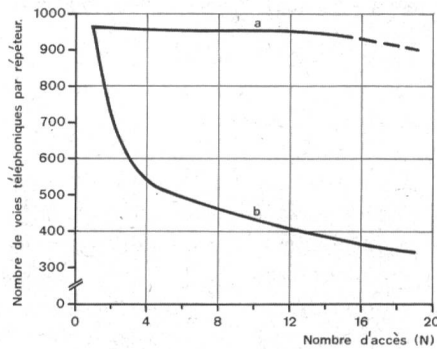


Fig. 12  
Utilisation d'une largeur de bande de 36 MHz par deux techniques différentes de modulation et d'accès multiple  
a 4 CPSK/TDMA  
b FM/FDMA

de réaliser une meilleure utilisation de la capacité du satellite dans le cas d'un réseau à accès multiple (fig. 12). Il faut noter que cette figure ne tient pas compte des techniques d'interpolation de la parole ni de la réutilisation de fréquence qui permettent d'augmenter considérablement le nombre de voies téléphoniques pour une largeur de bande donnée.

## 7 Conclusions

Il semble que, du point de vue technique, la réalisation de systèmes selon le principe de la réutilisation de la fréquence ne pose pas de problèmes insolubles. Le fait qu'aucun type de polarisation ne puisse vraiment s'imposer avec des avantages absolument décisifs explique peut-être pourquoi l'on a hésité si longtemps avant de se décider, bien qu'il semble qu'une option ait été prise en faveur de la polarisation rectiligne. On dispose déjà, à l'heure actuelle, de quelques données de propagation, notamment en ce qui concerne les effets dépolarisants des précipitations atmosphériques en polarisation circulaire qui peuvent être considérés comme les valeurs extrêmes pouvant exister. Toutefois, les données nécessaires à un dimensionnement optimum d'un système à réutilisation de fréquence sont encore largement insuffisantes. Faudra-t-il un dispositif de poursuite de polarisation à 4 GHz? Faut-il introduire un dispositif de compensation active de la dépolarisation sur le trajet montant d'une liaison déjà, ou bien est-ce suffisant de compenser à la réception seulement? Autant de questions qui ne trouveront une réponse satisfaisante que lorsqu'on disposera de données expérimentales suffisantes, obtenues à partir de satellites expérimentaux ou semi-expérimentaux.

Du point de vue économique, l'introduction d'un tel système se justifie lorsque la capacité d'une liaison est limitée par la largeur de bande disponible, même au prix d'un équipement plus coûteux pour la station terrienne, car il permet au même ensemble antenne-satellite d'effectuer le travail de deux ensembles. L'excédent de coût de la station terrienne provient essentiellement de la plus grande complexité du système d'antenne, de la pénalité imposée au facteur de mérite G/T par l'affaiblissement d'insertion des circuits de séparation de polarisation, ainsi que des exigences de fiabilité élevée imposées au système. En effet, le dérèglement d'une seule station peut perturber considérablement le travail des

autres. Pour des stations à faible volume de trafic, l'équipement en double polarisation représente un accroissement de coût qui ne se justifie peut-être pas à court terme. Cependant, le moment viendra certainement où il faudra de toute façon recourir à cette technique, en vue d'une utilisation plus efficace du spectre et de l'orbite géostationnaire. Il est donc sage de prévoir, dès à présent, des stations facilement convertibles en double polarisation.

On se demandera pour terminer s'il n'est pas possible d'appliquer cette technique dans le cas des trajets terrestres d'une liaison par faisceaux hertziens. Il semble que, dans ce cas, les limitations proviennent beaucoup plus des phénomènes de propagation par trajets multiples que des phénomènes météorologiques proprement dits. L'amélioration du découplage de polarisation qui peut être obtenue par diversité d'antenne à la réception mérite cependant d'être étudiée.

## Bibliographie

- [1] – Radio Spectrum Utilisation in Space. Report of the Joint Technical Advisory Council of the IEEE and the EIA. New York, September 1970.
- [2] Beckmann P. The Depolarization of Electromagnetic Waves. Boulder Colorado, The Golem Press, 1968.
- [3] Watson P. A. and Arbabi M. Crosspolarisation Isolation and Discrimination. London, Electronics Letters 9 (November 1973) No 22, pp. 516.
- [4] Dintelmann F. and Rücker F. Analysis of an XPD Event at 30 GHz Measured with ATS-6. New York, Proc. IEEE 65 (March 1977) No 3, pp. 477.
- [5] Kreutel R. W. and al. Antenna Technology for Frequency Reuse Satellite Communications. New York, Proc. IEEE 65 (March 1977) No 3, pp. 370.
- [6] Davies K. Ionospheric Radio Propagation. Washington, NBS Monograph 80 (April 1965) pp. 210...214.
- [7] Hogg D. C. and Chu T. S. The Role of Rain in Satellite Communications. New York, Proc. IEEE 63 (September 1975) No 9, pp. 1308.
- [8] Oguchi T. Scattering Properties of Pruppacher-and-Pitter Form Raindrops and Crosspolarisation due to Rain: Calculations at 11, 13, 19,3, 34,8 GHz. Washington, Radio Science 12 (January 1977) No 1, pp. 41...51.
- [9] Watson P. A. and Arbabi M. Rainfall Crosspolarisation at Microwave Frequencies. London, Proc. IEE 20 (April 1973) No 4, pp. 413.
- [10] Morrison J. A. and Chu T. S. Perturbation Calculations of Rain-Induced Differential Attenuation and Differential Phase Shift at Microwave Frequencies. New York, Bell System Technical Journal 52 (December 1973) No 10, pp. 1907.
- [11] Zufferey Ch. Expérience de propagation de la Jungfrau. Berne, Rapport final des PTT, Contrat ESTEC 1672/72 SW (Avril 1976), PTT VD 21.038A.
- [12] Zufferey Ch. Crosspolarisation Measurements at 13 GHz on a Slant Terrestrial Path: Comparison between Circular and Linear Horizontal Polarisation. Bern, Techn. Mitt. PTT 54 (1976) Nr. 9, S. 367...369.
- [13] – Formule permettant d'estimer la dépolarisation par pluie en polarisation circulaire. Doc. CCIR 5/184 (1974...1978). Présenté par le Japon le 16 mai 1977.
- [14] Cox D. C. and al. Differential Attenuation and Depolarization Measurements from a 19 GHz Comstar Satellite Beacon Propagation Experiment. La Baule France, URSI Colloquium, April 18-May 6, 1977.
- [15] South C. R. and Evans B. G. Comparison of Modulation Techniques for Frequency Re-Use in Satellite Communication Systems, in Satellite Communication System Technology. London, IEE Conf. Publ. 126 (1975) pp. 188.
- [16] Prabhu V. K. Error Rate Considerations for Coherent Phase-Shift-Keyed Systems with Co-channel Interference. New York, Bell System Technical Journal 48 (March 1969) No 3, pp. 743...767.