Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = 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 Telegrafenbetriebe

Band: 31 (1953)

Heft: 11

Artikel: Essais de transmission par faisceaux hertziens sur un long parcours en visibilité optique entre la France et la Suisse

Autor: Klein, W. / Libois, L.-J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-876366

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: 15.07.2025

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

Nº 11 - BERN, 1. XI. 1953 - JAHRGANG - ANNÉE - ANNO XXXI

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Essais de transmission par faisceaux hertziens sur un long parcours en visibilité optique entre la France et la Suisse

(d = 160 km, f ≃ 300/3000 MHz). Résultats d'essais de propagation

Par *W. Klein* et *L. J. Libois*, Berne/Paris

621.396.43.029.6 (44:494)

Résumé. *Les administrations des PTT française et suisse ont procédé pendant les années 1950 et 1952 à des mesures de champ dans la bande de 1 m et 10 cm sur le parcours Chasseral–Mont-Afrique long de 160 km. Les résultats ont montré qu'il est possible d'établir une liaison par faisceau hertzien pour de très longs trajets dans les limites de qualité du C. C. I. F., si le parcours présente certaines conditions topographiques. Les résultats de ces mesures de propagation sont discutés en fonction du trajet et des conditions météorologiques et comparés à d'autres parcours.*

Zusammenfassung. *Die französische und die schweizerische PTT-Verwaltung haben gemeinsam in den Jahren 1950 und 1952 langfristige Feldstärkeregistrierungen mit Wellenlängen von 1 m und 10 cm auf der 160 km langen Übertragungsstrecke Chasseral–Mont-Afrique durchgeführt. Das Ergebnis zeigt eindeutig, dass auch sehr lange optische Teilstrecken für Richtstrahlverbindungen innerhalb der Grenzen der CCIF-Qualität geeignet sind, sofern gewisse Voraussetzungen in der Streckenführung zutreffen. Die ausserordentlich günstigen Ausbreitungsergebnisse werden im Zusammenhang mit den Eigenschaften der Übertragungsstrecke und den meteorologischen Bedingungen besprochen und mit anderweitigen Ergebnissen verglichen.*

A. *Généralités, but des essais*

En 1949, les services de recherches des administrations française et suisse des P.T.T. se sont mis d'accord sur la réalisation des essais de propagation d'ondes dirigées entre le Chasseral (alt. 1610 m s. m.), montagne élevée du Jura suisse, et le Mont-Afrique (alt. 590 m s. m.) près de Dijon. La distance entre ces deux points est de 160 km. Le parcours n'est que peu dégagé si l'on se réfère aux conditions de réfraction normale; il est même obstrué si l'on s'en tient à l'optique géométrique (fig. 2).

Ces essais étaient d'un intérêt particulier, tant pour l'étude de la propagation des ondes sur de longs parcours quasi-optiques dans nos régions, cas peu connu jusqu'ici, que pour l'établissement éventuel d'une communication par faisceaux hertziens entre la France et la Suisse. L'importance des deux points en question ressort du fait qu'ils font déjà partie des réseaux nationaux par faisceaux hertziens, le Chasseral comme station-relais entre Zurich et Genève depuis 1947 [2], le Mont-Afrique comme terminal du faisceau Dijon-Strasbourg depuis 1952 [1] et comme relais du Paris–Lyon en cours de réalisation actuellement. Tous les deux sont susceptibles d'extensions ultérieures fort intéressantes comme le montre la figure 1.

A première vue, un parcours de 160 km de longueur ne semble pas être favorable à une bonne stabilité de l'affaiblissement de propagation des ondes décimétriques et centimétriques si l'on se réfère aux résultats publiés jusqu'ici pour des trajets plus courts. Cependant, des expériences antérieures faites en Suisse avaient déjà montré une stabilité tout à fait remarquable sur certains longs parcours en montagne, [3, 4] pour des raisons bien compréhensibles. Cela permit de faire des prévisions plus favorables aussi pour la liaison Chasseral–Mont-Afrique. Les résultats des essais ont entièrement justifié cet optimisme comme on le verra plus loin.

B. *Profil du parcours et conditions moyennes de transmission*

Comme le spectre de fréquences intéressant les communications par faisceaux hertziens s'étend entre quelques centaines et plusieurs milliers de MHz, on a choisi pour ces essais des fréquences de l'ordre de 300 MHz et 3000 MHz (soit 1 m et 10 cm de longueur d'onde). Le profil du terrain (fig. 2) a été dessiné pour un rayon terrestre apparent de 8500 km (égal aux 4/3 du rayon réel), qu'on reconnaît en général comme va-

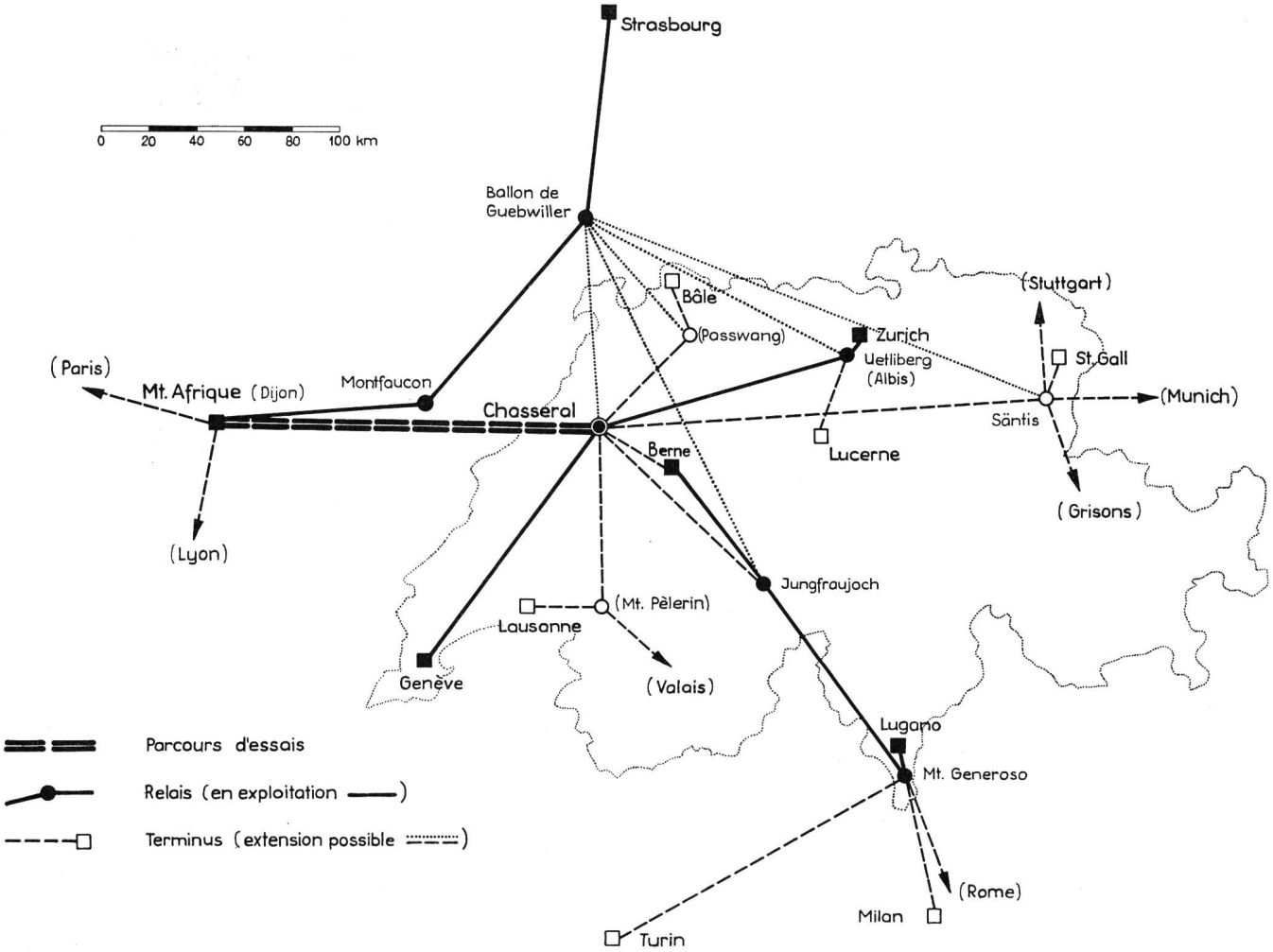


Fig. 1. Plan du parcours d'essais Chasseral–Mont-Afrique

leur représentant les conditions moyennes de réfraction dans la troposphère. Ce chiffre a été confirmé à très peu de chose près pour nos régions et pour une épaisseur de la couche d'air de 1100 m environ par l'évaluation statistique des données météorologiques sur un trajet semblable mais plus court en Suisse [5], donnant en moyenne un rayon terrestre apparent de 8470 km soit 8220 km pour l'hiver et 8800 km pour l'été. D'après ces mêmes résultats, on peut s'attendre avec une probabilité de l'ordre de $< 10^{-6}$ à un rayon apparent égal au rayon géométrique de la terre. Cela signifie que, pour des conditions orographiques semblables, cette valeur inférieure n'est pratiquement jamais atteinte (profil pointillé de la fig. 2). D'autre part, des valeurs supérieures sont sensiblement plus probables; par exemple, un rayon apparent de 13 000 km ($\simeq$ 2,1 R) serait atteint pendant 0,1 % du temps environ. Rappelons que ces chiffres se rapportent à la moyenne du gradient de l'indice de réfraction entre 500 m et 1600 m d'altitude, et qu'il conviendrait de prévoir des gradients sensiblement plus élevés pour des couches d'air moins épaisses. Ils peuvent donc être significatifs pour les variations temporaires du champ moyen à grande échelle, mais non pour la statistique détaillée des évanouissements qui est liée à une structure beaucoup plus fine de la troposphère mais malheureusement peu accessible.

Un coup d'œil sur le profil de la liaison montre le caractère montagneux de la région jurassienne entre Chasseral et Besançon, soit sur la moitié du trajet. Les crêtes qui touchent la première zone de Fresnel pour 300 MHz aux km 39, 62 et 79 forment des écrans de diffraction et l'on n'a pas ici à craindre des réflexions gênantes au sol sous n'importe quelle condition de réfraction. Par contre, sur le terrain assez plat et peu élevé s'étendant entre Besançon et le Mont-Afrique, il faut s'attendre en principe à des réflexions sensibles au sol ou bien dans les couches les plus basses de la troposphère qui se prêtent, comme on le sait, particulièrement bien à ce phénomène de propagation pour certaines conditions météorologiques. Cependant, un examen plus approfondi montre que, pour des conditions de réfraction normale ou d'infraréfraction, l'affaiblissement par diffraction d'un «rayon réfléchi» près du sol dans cette région est trop grand par rapport à l'affaiblissement du «rayon direct» pour qu'une interférence importante puisse se manifester. La plupart du temps, l'influence d'une réflexion éventuelle auprès du sol sera donc certainement négligeable. Nous attribuons une importance

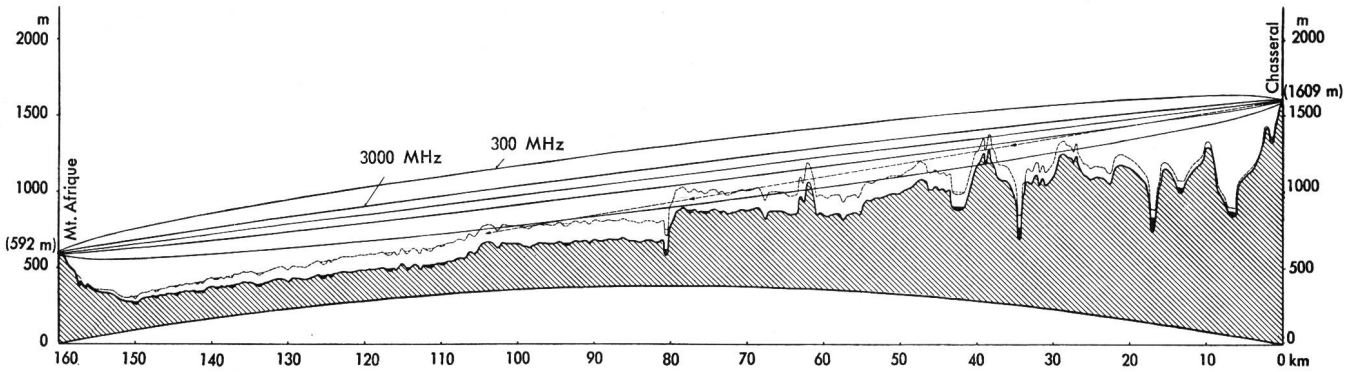


Fig. 2. Profil Chasseral–Mont-Afrique

—— pour un rayon apparent terrestre de 8500 km (k = 1,33) - - - - pour un rayon effectif de 6370 km (k = 1,0)
Les ellipsoïdes représentent la première zone de Fresnel pour les deux fréquences de mesure

particulière à ce fait qui explique sans doute en majeure partie la bonne stabilité de l'affaiblissement de propagation sur ce long parcours constatée au cours des essais. Notons encore que la propagation s'effectue exclusivement sur terre ferme et transversalement aux vallées.

Comme il n'existe pas de méthode appropriée pour calculer rigoureusement ou même approximativement la perte par diffraction en présence de plusieurs crêtes de diffraction «en lame de couteau», on ne peut que l'estimer grossièrement. Il faut aussi tenir compte de l'imprécision inévitable de la construction d'un long profil d'après les cartes topographiques, parmi les différentes sources d'erreurs possibles. En admettant une hauteur des arbres de 25 m sur les crêtes, on obtient donc pour le champ non perturbé idéalisé le tableau suivant:

L'affaiblissement pour R' = 8500 km doit correspondre à peu près à l'intensité moyenne du champ. Les valeurs mesurées se rapportent à une période de temps pluvieux avec très peu d'évanouissements et concordent assez bien avec les valeurs estimées. Il faut admettre une erreur possible de 1...2 dB pour ces mesures. Le niveau de référence, soit l'affaiblissement de propagation en espace libre $b_{ü_0}$ par rapport au champ moyen reçu (p = 0,5), a donc été fixé à +5 dB et +2 dB pour les fréquences en question.

Les chiffres indiqués dans le tableau pour R' = 7270 et 13000 km n'ont pas de sens pratique direct (parce que non mesurables). Cependant, ils peuvent donner une idée des variations minimums du champ auxquelles il faut s'attendre.

Les chiffres entre parenthèses pour R' = 7270 km sont extraits de la statistique des évanouissements et

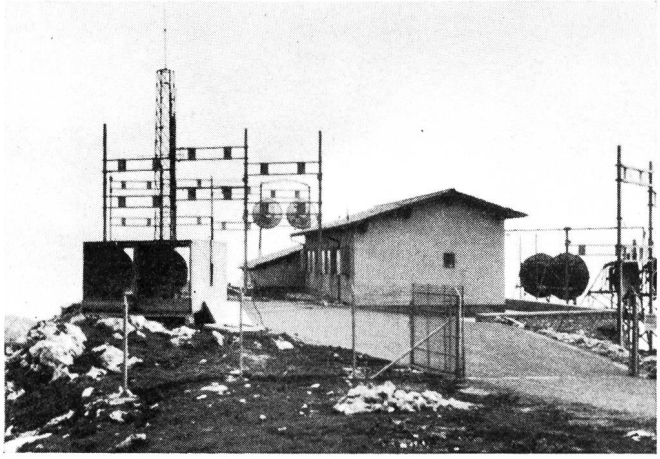
300 MHz
3000 MHz*

R'	$p(R')_{1000}$	b_{39}	b_{62}	b_{79}	$b_{est.}$	$b_{mes.}$
8 500 km (k = 4/3)	50 %	~2,5 dB ~0 dB*	~1 dB ~0 dB*	~0 dB ~0 dB*	~3–4 dB ~0 dB*	4–5 dB 1–2 dB*
7 270 km (k = 1,125)	0,1%	~6 dB ~6 dB*	~3 dB ~0 dB*	~1 dB ~0 dB*	~8–12 dB ~6– 8 dB*	(12,5 dB) (12 dB*)
13 000 km (k = 2,1)	0,1%	~0 dB —	— —	— —	~ dB ~0 dB*	— —

R' rayon apparent terrestre
$p(R')_{1000}$ probabilité de R' pour une épaisseur de 1000 m environ
b_{39} affaiblissement dû à la crête au km 39 seule (en l'absence des autres)
$b_{est.}$ affaiblissement estimé total
$b_{mes.}$ affaiblissement mesuré dans des conditions convenables.

La méthode de calcul, plus ou moins expérimentale, utilisée par Baumeister et Knoepfel [7] donne des affaiblissements plus élevés, mais comme elle conduit évidemment à des résultats faux dans les cas de hauteurs positives (où l'axe de l'ellipsoïde de Fresnel passe par-dessus les obstacles), elle n'est guère discutable ici.

se rapportent aux 4 semaines les plus stables de chaque période de mesure. Pour 300 MHz, cette valeur n'est pas loin de la valeur estimée qui suppose une réfraction uniforme. Evidemment, la probabilité des perturbations du champ augmente avec la fréquence de transmission et le chiffre correspondant pour 3000 MHz montre déjà un écart beaucoup plus considérable.



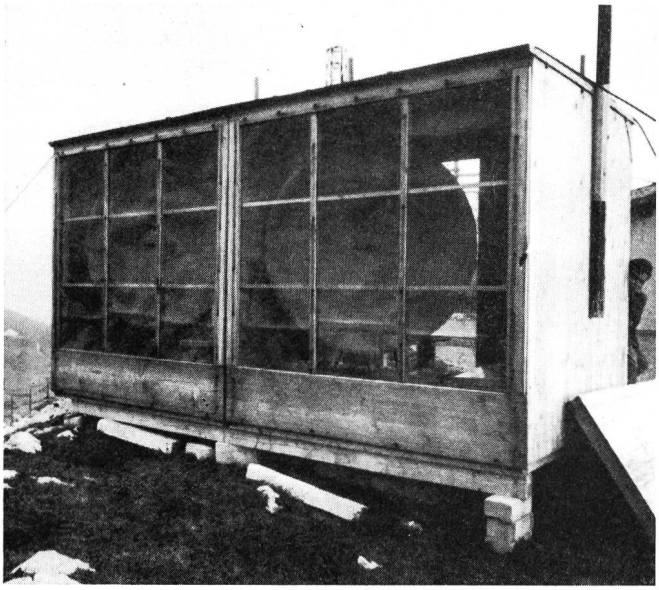
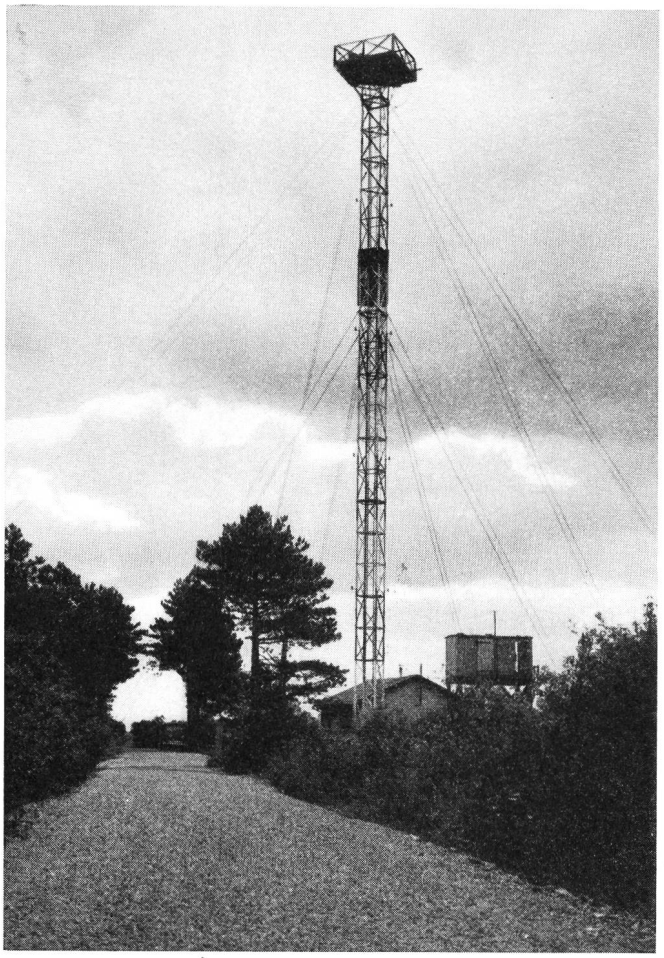


Fig. 3a und 3b
Station d'altitude Chasseral (1610 m s. m.)
avec la cabine contenant l'équipement d'enregistrement sur 3000 MHz. Les antennes pour l'onde métrique (type Chireix et groupe de dipôles avec réflecteur) étaient fixées plus haut aux poteaux derrière la cabine



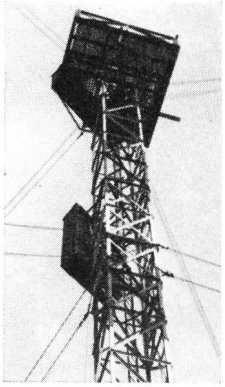


Fig. 4a und 4b
Station hertzienne Mont-Afrique (592 m s. m.)
La cabine de mesure pour 3000 MHz est ici montée sur une construction en bois, pour éviter les obstacles locaux. Fixées au pylône, on voit les antennes (emboîtées) du faisceau hertzien Dijon–Strasbourg, telles qu'elles étaient utilisées aussi pour les enregistrements sur 240 et 260 MHz

C. *Equipements et résultats de mesure sur la fréquence de 300 MHz*

La première campagne de mesure fut exécutée en 1950 sur des fréquences de l'ordre de 300 MHz, d'une part, avec un appareillage bilatéral, construit par le Service des Recherches et du Contrôle Technique de l'administration française, permettant l'enregistrement simultané dans les deux sens de transmission, d'autre part, avec un équipement unilatéral, mais plus sensible, développé spécialement pour cette application, et que l'administration suisse avait déjà utilisé sur un certain nombre de parcours dans son pays (construction Brown Boveri S.A.). Les enregistrements bilatéraux ont montré une concordance satisfaisante. Quelques caractéristiques de ces équipements sont indiquées sur le tableau suivant.

Pour la statistique globale de la probabilité d'évanouissement, on a combiné à la figure 5 les résultats des deux équipements pour un total de 5500 heures effectives; cependant, les résultats sur la fréquence de 315 MHz seule sont donnés séparément parce qu'ils se rapportent à la période défavorable à la propagation

	Equipement bilatéral	Equipement unilatéral
Fréquence de mesure f	260/240 MHz	315 MHz
Gain d'antennes par rapport au dipôle G_A	10+10 = 20 dB	17+9 = 26 dB
Affaiblissement de référence $b_{ü_0}$ (aux bornes des feeders pour 160 km en espace libre)	—102 dB	—96 dB
Puissance de l'émetteur N_t	~10 W	~13 W
Largeur de bande du récepteur $\triangle$ F	~1,6 MHz	~ 0,5 MHz*
Affaiblissement mesurable après installation		
$b_{ü}$ (absolu)	-125 dB	-126 dB
b_r (relatif)	—23 dB (—18 dB**)	—30 dB (—25 dB**)
Durée de l'enregistrement	janvier–août 1950	juillet–octobre 1950

* Avec réglage automatique de fréquence ** Valeur par rapport au champ moyen reçu

des ondes (environ 1500 heures effectives). Ainsi qu'il ressort de la statistique des 4 semaines extrêmes, la dispersion est beaucoup plus faible du mauvais côté. Cela signifie que les évanouissements profonds, de plus de 10 à 15 dB par rapport à la valeur moyenne de l'affaiblissement, sont concentrés sur une période relativement courte, qui se place ici le plus souvent aux mois de septembre et octobre, comme l'ont montré les essais.

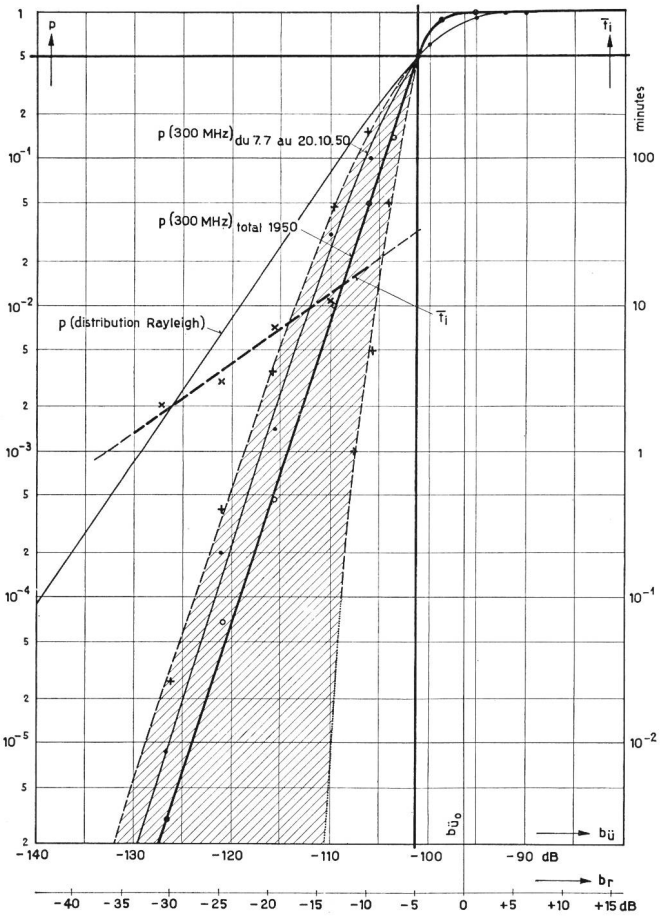


Fig. 5. Probabilité p et durée moyenne t_i des évanouissements sur la fréquence de 300 MHz (Chasseral–Mont-Afrique).
$b_{ü}$ affaiblissement absolu entre les bornes d'antennes, rapporté à un gain total des antennes de référence de 26 dB
b_r affaiblissement relatif à l'espace libre
La probabilité d'évanouissement pour les 4 semaines extrêmes de toute la période d'observation est indiquée par les courbes en traits interrompus faibles

A part quelques scintillations plus faibles, ces évanouissements profonds sont relativement lents. Souvent, on note peu d'oscillations par heure ou même par jour. Les échantillons représentés à la figure 6 présentent des allures extrêmes mais très caractéristiques; ils se rapportent à une période de beau temps clair marquée par des conditions météorologiques assez stables. En partant de la nuit du 11 octobre, par des conditions de propagation «normales» – l'affaiblissement s'était stabilisé aux environs de – 5 dB par rapport à l'affaiblissement en espace libre – on continue presque tout de suite par de fortes variations le jour suivant, et le champ ne se stabilise plus qu'au cours de la nuit du 15 octobre, où la situation météorologique aussi avait complètement changé (pluie). Il est remarquable que certains phénomènes d'évanouissement profond semblent se répéter presque régulièrement chaque jour.

Les courbes de la figure 7 représentent la périodicité journalière de la probabilité d'évanouissement pour les mois de juillet à octobre 1950, par tranches de 6 heures. Cette méthode n'était pas tout à fait heureuse, parce que trop grossière. Une analyse rudimentaire, mais par tranches de 3 heures, a montré que le maximum d'évanouissement est plutôt situé entre 9 h et 15 h, avec un «centre de gravité» entre 9 h et 12 h, et un deuxième maximum peu prononcé entre 21 h et 3 h.

Cette périodicité d'évanouissements forts doit être liée étroitement aux variations systématiques journalières de la troposphère par beau temps stable en cette saison (refroidissement nocturne du sol, etc.), mais aussi à la caractéristique du parcours en question. Pour les faibles évanouissements, la périodicité journalière est aussi faible; pour la valeur moyenne du champ, elle révèle même une allure en sens inverse (voir sous B).

Quel serait maintenant l'effet statistique des évanouissements observés entre Chasseral et le Mont-

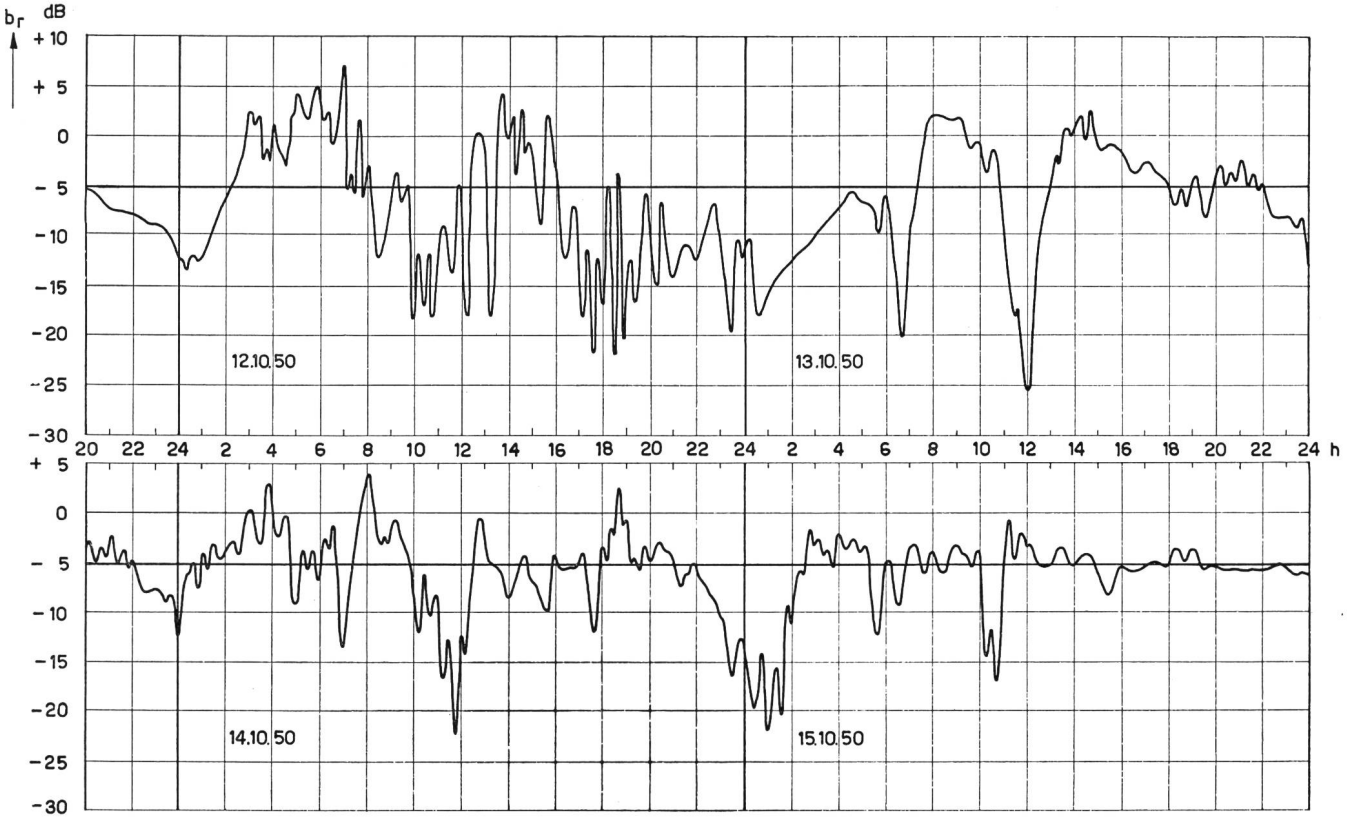


Fig. 6. Caractéristique des évanouissements profonds sur la fréquence de 300 MHz

Afrique sur le bruit de fond d'une communication par téléphonie multiplex à modulation de fréquence ?

Supposons un équipement ayant les caractéristiques suivantes:

Fréquence de transmission	$f \sim 300$ MHz
Nombre des canaux	$n = 60$
Puissance de l'émetteur	$N_t = +14$ dBW
Largeur de bande utile	$\triangle F \sim 5$ MHz
Déviation de fréquence utile	$D = \pm 1$ MHz
Facteur de bruit du récepteur	$NF = 10$ dB
Gain des antennes	$G_A = 19 + 19 = 38$ dB
Pertes de câbles HF, etc.	$P = 2 + 2 = 4$ dB

Le calcul du bruit à l'entrée du récepteur donne $N_b = -127$ dBW, ce qui laisse prévoir l'interruption totale de la liaison pour des affaiblissements relatifs $b_r > -50$ dB. La probabilité de cet événement est pratiquement nulle.

Pour une communication internationale, le C.C.I.F. (Londres 1951) recommande un écart d'au moins 50 dB entre niveau de référence et bruit psophométrique, pour l'ensemble d'un circuit de 2500 km et pendant 99% du temps. En réservant –56 dBm au niveau 0 pour les équipements terminaux, on peut donc admettre environ –55 dBm pour le bruit de fond du circuit radioélectrique total ou –67 dBm pour un parcours partiel de 160 km. En tenant compte du «gain» fictif du système pour le canal le plus défavorisé ($\sim$ 23 dB), du facteur psophométrique ($\sim$ 3 dB), et des valeurs énumérées ci-dessus, l'affaiblissement admissible b_r devient approximativement –18 dB.

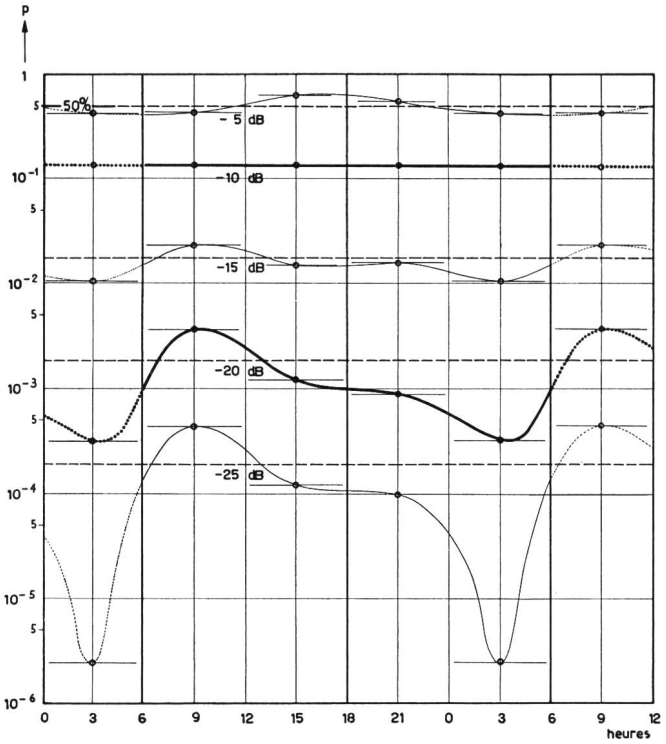


Fig. 7. Distribution journalière de la probabilité d'évanouissement sur la fréquence de 300 MHz, pour la période d'observation comprise entre le 7 juillet et le 20 octobre 1950. Les valeurs en dB se rapportent à l'affaiblissement en espace libre.
En traits interrompus: probabilité moyenne par jour

La qualité C.C.I.F., par suite de l'affaiblissement de propagation, n'aurait donc pas été atteinte en 1950 pendant 0,1% du temps, ou même en se référant aux 4 semaines les plus défavorables, pendant 0,8% du temps. Cela correspond à un total de 8,6 h par an, soit à 5,4 h pendant les 4 semaines extrêmes. Ainsi qu'il ressort de la courbe t_i de la figure 5, la durée moyenne d'un tel événement serait de 8 minutes, le nombre des cas où les conditions citées ne seraient pas remplies, de 65 par an.

On est donc largement dans les limites recommandées par le C.C.I.F. pour l'affaiblissement de propagation sur ce parcours. Même un équipement moins perfectionné, comme celui en exploitation sur le trajet Berne–Jungfraujoch–Monte Generoso–Lugano, par-dessus les Alpes, serait capable de répondre à cet égard aux conditions du C.C.I.F., avec une puissance de 50 W à l'émission et 24 canaux actifs, pendant 99% du temps. Cependant, un tel équipement a été conçu pour un service régional.

D. *Equipement et résultats sur 3000 MHz*

En 1952, on disposait d'un équipement bilatéral sur 3000 MHz, construit par la Société Française Radioélectrique, transformé et adapté aux exigences spéciales de l'enregistrement du champ par le service de recherches de l'administration suisse. La statistique des évanouissements dans les deux sens de transmission a montré une très bonne concordance (à 1 dB près), ce qui garantit la validité des résultats. Voici quelques caractéristiques de cet équipement:

Fréquence de mesure f = 3000/3075 MHz
Gain des antennes G_A = 28 + 28 = 56 dB
Affaiblissement de référence $b_{ü_0}$ (pour un parcours de 160 km en espace libre) = —66 dB
Puissance à l'émission N_t = —10 dBW
Largeur de bande du récepteur $\triangle$ F ≃ 2 MHz *)
Facteur de bruit du récepteur NF = 12 dB
Affaiblissement mesurable
$b_{ü}$ (absolu) = —96 dB
b_r (relatif) = —30 dB (—28 dB **)
Durée de l'enregistrement juillet–nov. 1952

*) Réglage automatique de la fréquence.
**) Par rapport au champ moyen.

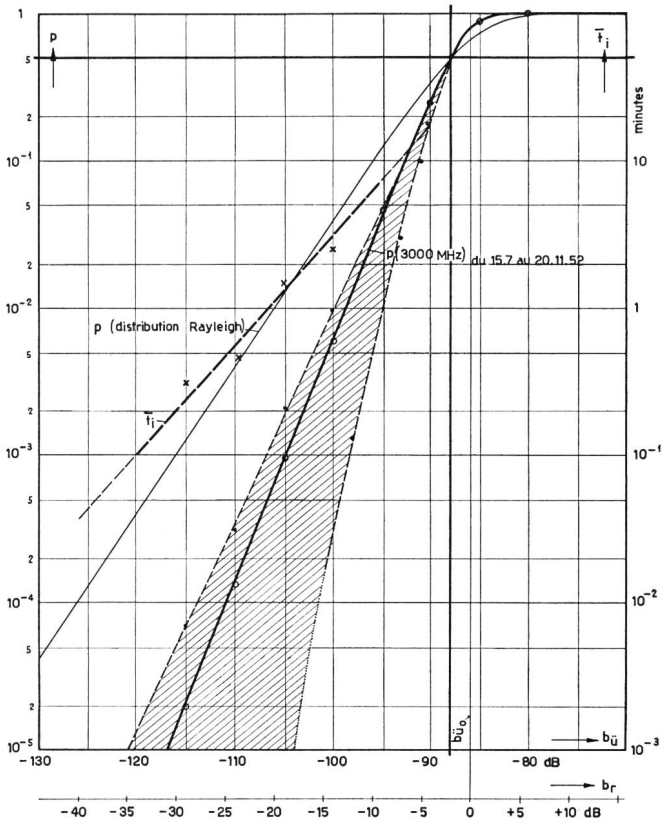


Fig. 8 Probabilité p et durée moyenne t_i des évanouissements sur la fréquence de 3000 MHz (Chasseral–Mont-Afrique). Légende voir fig. 5. Le gain total des antennes de référence est ici de 56 dB

Le total des heures évaluées est de 2000 dans chaque sens de transmission. La stabilité de l'affaiblissement de propagation sur ce long parcours est extraordinaire pour cette fréquence (voir figure 8); elle ne diffère que peu des résultats à 300 MHz pour la période correspondante de 1950. La dispersion est même plus faible, bien qu'on eût dû s'attendre au contraire. Ces faits doivent être attribués dans une certaine mesure aux conditions météorologiques assez différentes des années 1952 et 1950, mais aussi à la caractéristique spéciale du parcours. La probabilité d'un évanouissement de 15 dB et 25 dB par rapport au champ moyen pour les deux fréquences est indiquée au tableau suivant:

	Evanouissement > – 15 dB		Evanouissement > – 25 dB	
	3000 MHz	300 MHz	3000 MHz	300 MHz
Janvier–octobre	—	0,05%	—	0,0004 %
Juillet–novembre/octobre *	0,2 %	0,2 %	0,005%	0,0015 %
4 semaines défavorables	0,4 %	0,3 %	0,012%	0,004 %
4 semaines favorables	0,0025%	~0	~0	~0
*Durée moyenne de l'évanouissement	1,8 min.	6,5 min.	0,3 min.	2 min.

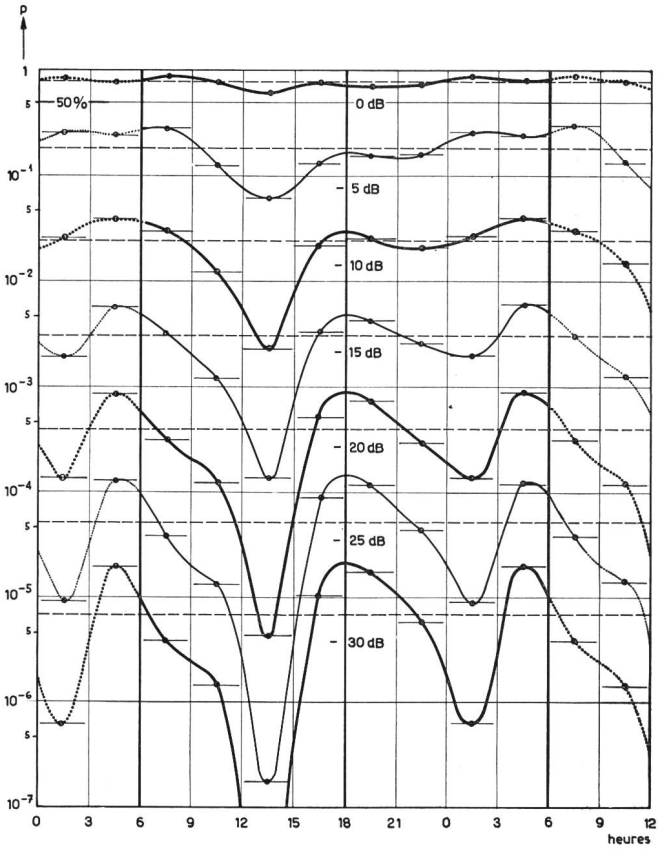


Fig. 9. Distribution journalière de la probabilité d'évanouissement sur la fréquence de 3000 MHz, pour la période d'observation comprise entre le 15 juillet et le 20 novembre 1952. Légende voir fig. 7

La périodicité journalière, évaluée en tranches de 3 heures, est marquée par un minimum prononcé de midi à 15 h, en accord avec la théorie qui laisse prévoir à cette heure et par beau temps un maximum de turbulence dans la basse atmosphère (convexion provoquée par l'échauffement de l'air en contact avec le sol). On trouve un deuxième minimum, plus faible, entre minuit et 3 h du matin, dans une période transitoire de distribution de chaleur entre sol et atmosphère: l'atmosphère n'a pas encore retrouvé son équilibre statique qui se manifeste souvent plus tard dans la matinée, et cela presque régulièrement par beau temps clair en automne, par une inversion de température. Les alternances de la probabilité d'affaiblissement par jour ont un sens opposé à celles qu'on a trouvées pour l'onde métrique, ce qui semble indiquer des causes différentes ou au moins un mécanisme différent des évanouissements profonds.

Comme il faut s'y attendre, le caractère des évanouissements est assez différent. Un exemple très caractéristique pour la rapidité des variations sur la fréquence de 3000 MHz, quoique déjà un peu extrême, est représenté à la figure 10. Cet exemple est une exception, quant à la périodicité journalière, car il contient le seul jour où l'on ait trouvé un maximum d'évanouissement entre midi et 15 h (le 14 septembre). Ce phénomène est probablement dû à une particularité météorologique qui consistait dans l'infiltration d'air relativement froid et sec du nord-est dans les basses altitudes (bise à basse altitude, vent d'ouest

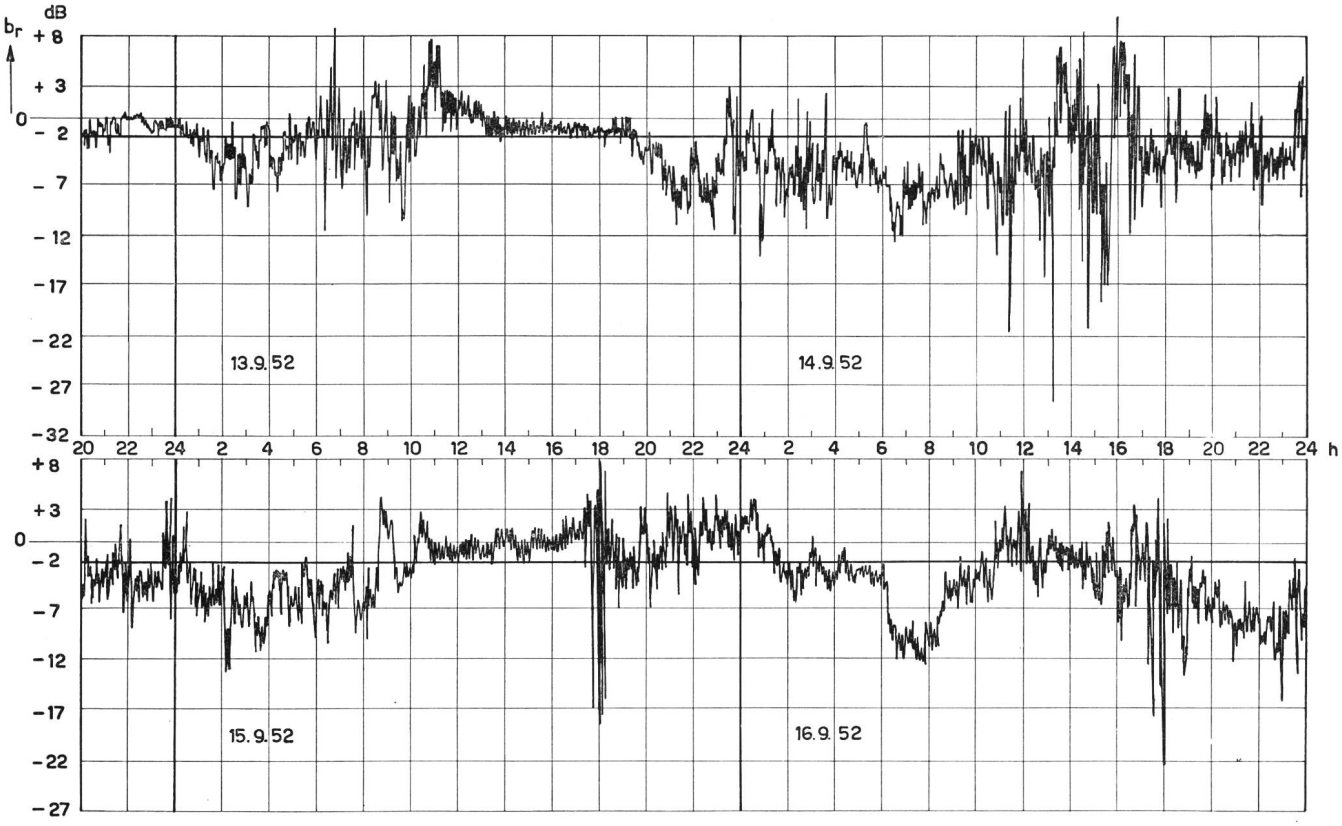


Fig. 10. Caractéristique des évanouissements profonds sur la fréquence de 3000 MHz

plus chaud et probablement plus humide au-dessus de 1000 m environ).

Pour estimer l'influence des variations statistiques de l'affaiblissement de propagation sur la qualité de transmission, supposons un équipement de téléphonie multiplex semblable à celui exploité entre Paris et Lille ou entre New-York et San Francisco, avec les données techniques suivantes:

Fréquence de transmission	$f \sim 4000$ MHz
Nombre des canaux	$n = 240$
Puissance de l'émetteur (à l'antenne)	$N_t = 0$ dBW
Largeur de bande utile	$\triangle F \simeq 20$ MHz
Déviation de fréquence utile	$D = \pm 4$ MHz
Facteur de bruit	$NF = 12$ dB
Gain des antennes	$G_A = 39 + 39 = 78$ dB

Comme dans le cas précédent, on fait un calcul approximatif, qui fait ressortir qu'un écart psophométrique minimum de 67 dB entre niveau de référence et bruit de fond dans le canal de conversation demande un affaiblissement $\simeq 79$ dB entre bornes d'antenne. Cela permet un évanouissement de ~ 10 dB relatif à l'affaiblissement moyen sur le parcours. En prenant la statistique des quatre semaines défavorables pour 3000 MHz comme moyenne annuelle pour 4000 MHz, cette condition sera remplie pendant 98,3 % au lieu des 99 %, pris comme base. Cependant cette valeur, que le C.C.I.F. recommande pour l'ensemble d'un circuit de 2500 km, comprend une réserve considérable, si on l'applique à un parcours singulier, en supposant que les évanouissements correspondant à la probabilité de 1 % arrivent tous en même temps sur tous les parcours partiels. Evidemment, le contraire serait plus près de la réalité. En renonçant à une partie de cette réserve, on se trouve tout à fait dans les limites du C.C.I.F. touchant le bruit de fond d'une telle liaison. Ainsi, la probabilité d'une interruption totale, due à la propagation, serait pratiquement nulle. Ce résultat se compare très favorablement à ceux obtenus sur d'autres trajets moins longs.

E. *Corrélations météorologiques*

On a extrait des données météorologiques disponibles celles qu'indiquent les figures 11 et 12 et qui ont montré la meilleure corrélation avec la profondeur et la durée de l'évanouissement *par jour*, soit

la chute de température entre jour et nuit et la quantité de pluie au milieu du parcours (Besançon);
le gradient moyen de température, à 7 h du matin, entre les extrémités du parcours (Dijon ~ 250 m s. m., Chasseron ~ 1600 m s. m.);
les radiosondages de Payerne, d'où on a tiré la présence d'inversion de température et de conditions de superréfraction entre 500 m et 2000 m d'altitude du côté est du Jura.

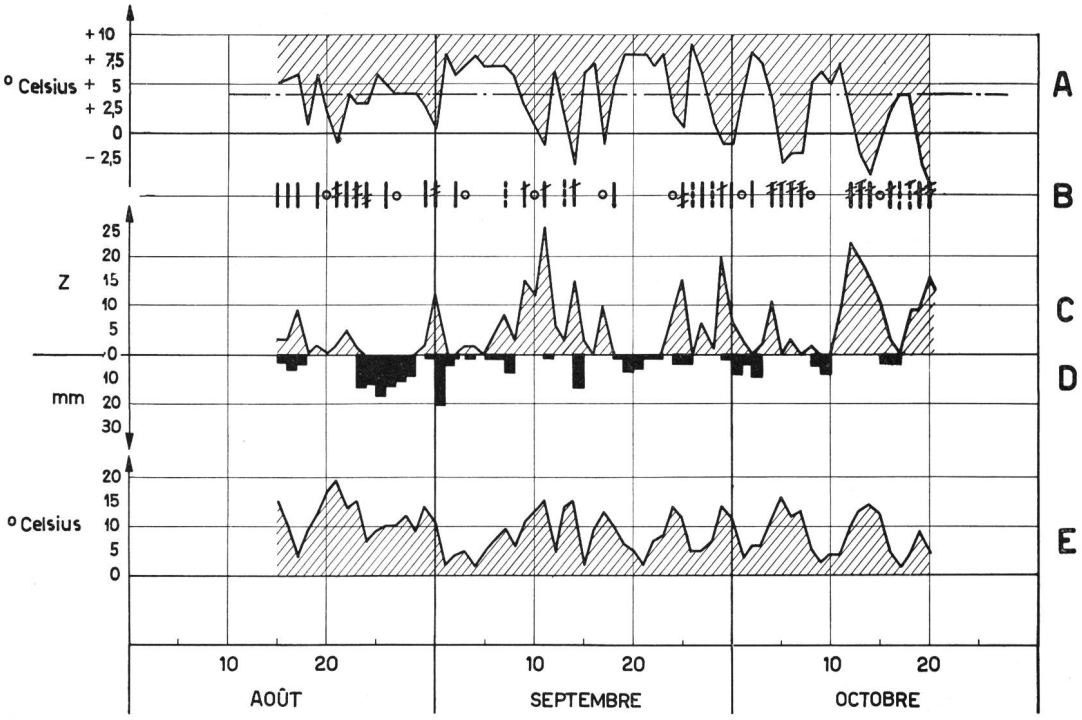


Fig. 11 Corrélations météorologiques pour la partie la plus intéressante des enregistrements sur la fréquence de 300 MHz (Chasseral–Mont-Afrique).

A différence de température entre Dijon (~ 250 m s. m.) et Chasseron (~ 1600 m s. m.) aux extrémités du parcours, mesurée à 7 h du matin

B radiosondages de Payerne, à 6 h du matin: un trait vertical indique la présence d'une inversion de température entre 500 et 2000 m d'altitude
les traits horizontaux indiquent la présence de zones de superréfraction plus ou moins élevées dans le même intervalle d'altitude
0 = pas de sondages

C importance de l'évanouissement par jour (profondeur et durée) à une échelle arbitraire z

D pluie par jour à Besançon, à peu près au milieu du parcours

E différence entre les extrêmes de température par jour à Besançon

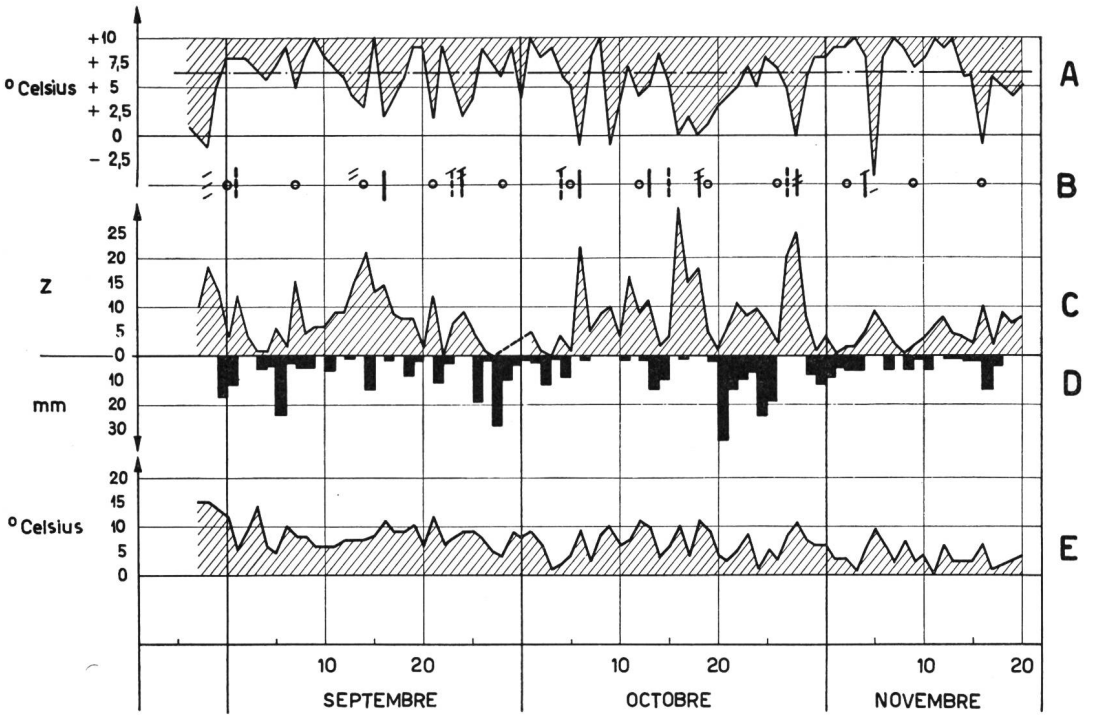


Fig. 12 Corrélations météorologiques pour la partie la plus intéressante des enregistrements sur la fréquence de 3000 MHz (Chasseral–Mont-Afrique). – Légende voir fig. 11. Cependant les radiosondages (B) ont été faits à 15 h

Malheureusement, dans les figures 11 et 12 les radiosondages ne sont pas directement comparables parce qu'ils ont été faits en 1950 à 6 h, et en 1952 à 15 h.

Tout d'abord, il faut constater une différence considérable des conditions météorologiques en général entre 1950 et 1952. Du 15 juillet au 31 octobre 1952, on a compté 452 mm de pluie à Besançon contre 254 mm dans la période correspondante de 1950 (301 mm contre 146 mm à Dijon et 582 mm contre 437 mm au Chasseron). Par conséquent, on avait très peu de jours entièrement ensoleillés, même par temps relativement beau, sur le parcours, pendant les mois intéressants de 1952. Cela se manifeste aussi clairement dans des valeurs plus faibles pour les températures extrêmes par jour et dans une tendance plus faible à des inversions de températures entre Dijon et Chasseron. Il faut certainement attribuer en grande partie à ce fait la faible différence existant entre les statistiques d'évanouissement pour 300 et 3000 MHz. Il est donc plus sûr de considérer la statistique pour 3000 MHz comme moyenne annuelle, bien qu'elle se rapporte aux quatre mois qui sont en général les plus défavorables.

La corrélation entre la différence des températures extrêmes et la pluie, d'une part, l'évanouissement, d'autre part, est évidente : des stratifications se forment dans la troposphère de préférence par beau temps clair, tandis que la pluie les détruit très vite. Cette corrélation est meilleure vers l'automne qu'en plein été, et les évanouissements sont aussi plus importants, ce qui peut s'expliquer par l'effet grandissant du refroidissement nocturne du sol conduisant à la formation des inversions de température dans la troposphère vers la fin de la nuit. Ces stratifications se dissolvent en général sous l'effet du soleil au cours de la matinée; mais elles peuvent durer plus longtemps lorsqu'elles sont accompagnées de brouillard au sol ou élevé et parfois se stabiliser pendant des jours (mer de brouillard). D'après l'expérience, c'est moins pendant un tel état d'équilibre de la troposphère que pendant la formation et la dissolution de ces couches d'inversion (quand elles se déplacent aussi en hauteur) que l'on trouve les plus grandes variations de l'affaiblissement.

D'autre part, il faut se rappeler que la présence d'une inversion de température ne signifie pas par elle-même l'existence d'une zone de superréfraction, parce que c'est l'influence de l'humidité qui prévaut; elle indique en revanche une forte tendance à la superréfraction. Les radiosondages l'ont confirmé.

Il est donc plus précis de constater que les évanouissements profonds sur le parcours sont presque toujours liés à la présence d'une zone de superréfraction entre 1000 et 2000 m environ (constatée dans la région de Payerne), au moins pour la fréquence de 300 MHz où l'on dispose des radiosondages à l'heure intéressante.

En examinant la situation météorologique en général, on trouve que les journées d'évanouissements profonds sont le plus souvent caractérisées par un centre de hautes pressions au nord des Alpes ou au moins partant de cette région. Dans ces conditions, il est aussi bien possible que des masses d'air sec et relativement chaud, provenant des Alpes, traversent le Jura et se superposent à une couche d'air plus froid et humide, créant ainsi ou renforçant une zone de superréfraction

élevée. Naturellement, il se pourrait aussi que cette corrélation ne soit qu'indirecte.

Les radiosondages de Payerne ont montré des gradients maximums de l'indice de réfraction équivalents à un rayon fictif de la terre de 55 000 km ($k \simeq 8{,}7$), se rapportant à une épaisseur de la couche de 350 m. Cela correspond à un gradient moyen de l'indice de réfraction modifié $\frac{dM}{dh} \simeq 0{,}018$ sur une épaisseur de 350 m.

En général, un très faible gradient de M est compensé par une variation du gradient de sens inverse dans la couche supérieure. Cela n'exclut pas la coexistence d'une forte infraréfraction près du sol, qui ne pourrait se manifester dans les résultats des sondages ordinaires.

On n'a jamais constaté de valeurs négatives du gradient de M. Cependant, ce n'est guère une preuve qu'elles n'existent pas dans cette région. Si ce n'est la méthode de mesure ou la présentation qui ne tient pas compte de détails intéressants pour la propagation des ondes (on ne donne en général que des mesures à des points distants de quelque cent mètres), ce seront l'inertie et l'imprécision de l'hygromètre enregistreur employé en général, qui ne permettent pas des mesures assez détaillées.

Comme l'expérience a montré que la présence d'une zone de superréfraction élevée sur le parcours est presque une condition «sine qua non» pour les évanouissements profonds, ceux-ci ne doivent pas être attribués au simple effet de la réfraction mais à l'interférence d'ondes d'amplitudes comparables, transmises par deux ou plusieurs chemins de longueur différente et variable. On peut expliquer de diverses manières le mécanisme de ces évanouissements; il est certainement beaucoup plus compliqué que ne le montre la figure 13, où l'on a essayé de représenter, pour un profil idéalisé du parcours, deux phénomènes principaux, que ne contredisent pas les observations et qui peuvent les faire comprendre. La confirmation ne pourrait en être fournie que par des radiosondages détaillés sur le parcours même.

A la figure 13a, on suppose la pénétration de masses d'air sec et chaud par-dessus la barrière du Jura, formant ainsi une zone de superréfraction élevée, dont nous avons déjà parlé. On constate que l'existence d'un véritable conduit élevé (courbure plus forte que celle de la terre) n'est pas indispensable pour le deuxième chemin. Une amplitude de 100% ne l'est pas non plus, parce que le «rayon direct» est déjà atténué par diffraction et peut être atténué encore plus par la présence de la zone de superréfraction, quand celle-ci touche la première zone de Fresnel. On s'imagine facilement toutes les variations de conditions troposphériques qui se traduisent en des variations d'amplitudes et de phases relatives des vecteurs composant le champ reçu.

La figure 13b correspond à une distribution plus régulière de l'indice de réfraction en altitude, et à une réflexion au sol ou par courbure graduelle près du sol dans la région comprise entre les km 120 et 140 du parcours. L'angle d'incidence est ici en tout cas $>89{,}5^0$ et une réflexion éventuelle le plus probable, comme on peut le déduire de la géométrie du parcours. En supposant une réflexion de 100% dans cette région, les pertes par diffraction de l'onde incidente limitent la hauteur de la couche réfléchissante capable de produire une intensité de l'onde indirecte comparable à celle de l'onde directe. Pour les ondes plus courtes, la hauteur nécessaire est naturellement plus

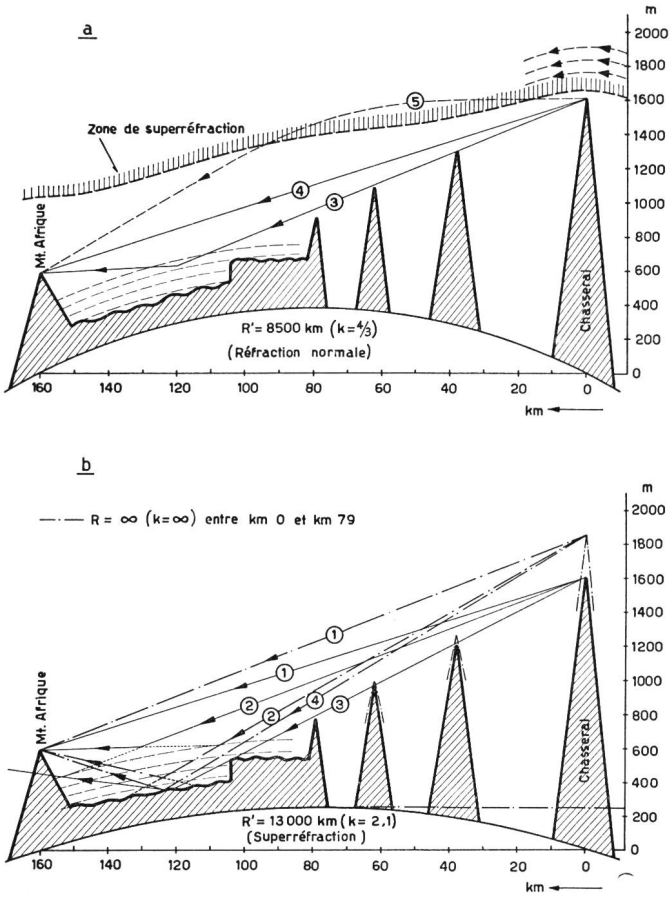


Fig. 13 Profil idéalisé du parcours pour des conditions spécifiques de superréfraction.
1 rayon direct
2/4 rayon indirect qui passe encore sans affaiblissement sensible par-dessus les obstacles de diffraction pour la fréquence de 300 MHz/3000 MHz
3 rayon indirect à la limite de la visibilité optique, affaibli par diffraction
5 rayon indirect par courbure dans une zone de superréfraction élevée

faible, la probabilité du phénomène donc plus grande. Une réflexion sensible au sol même demanderait déjà une très forte superréfraction; d'après le critère de Rayleigh, elle serait même improbable pour une fréquence de l'ordre de 3000 MHz.

F. *Comparaison de la stabilité de l'affaiblissement avec d'autres parcours*

Pour comparer la stabilité de l'affaiblissement de propagation sur différents parcours représentés à la

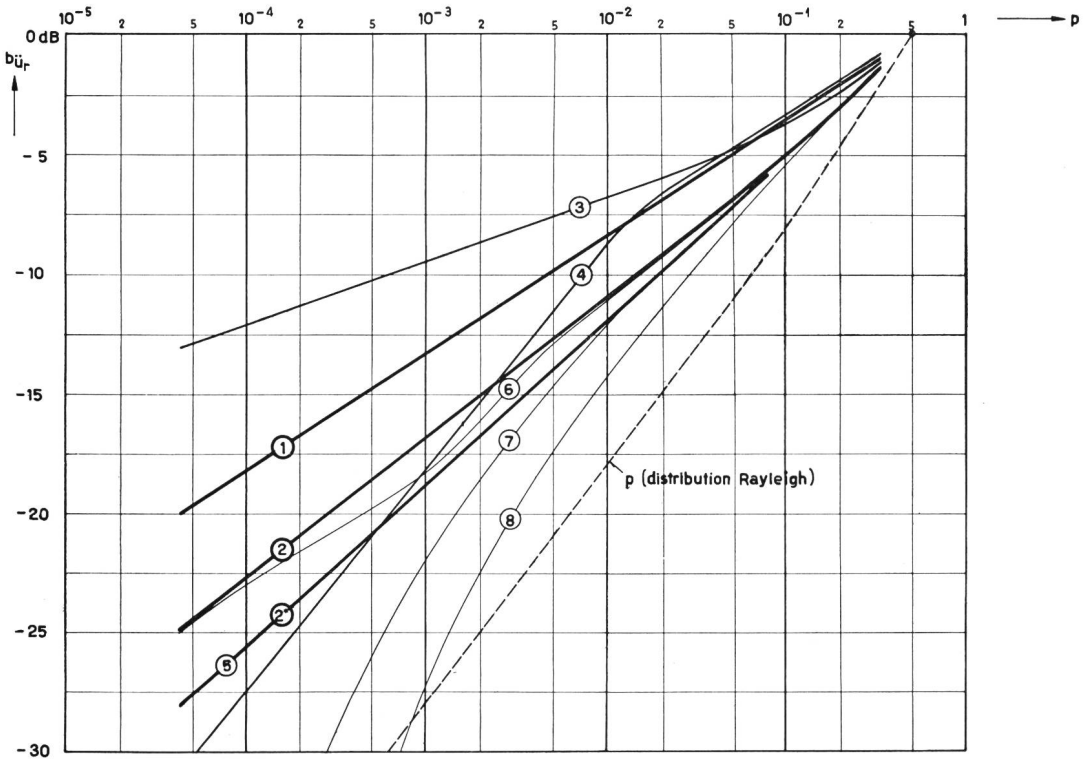


Fig. 14 Probabilité d'évanouissement p par rapport à la valeur p = 0,5 sur différents parcours:

1, 2 Chasseral–Mont-Afrique 160 km < 300 MHz/1950; 3000 MHz/15. 7. au 20. 11. 52

2* Les 4 semaines les plus défavorables de 2

3, 4 Chasseral–Genève 125 km < 300 MHz/1947–1949 (d'après J. Dufour); 2000 MHz/12. 7.–15. 11. 52

5 Fort du Kébir – Dj. Bou Kournine (en Tunisie) 80 km – 4000 MHz/ 2. 7.–19. 8. 52 (d'après L. J. Libois)

6 New-York–Neshanic 70 km–4000 MHz/1. 7.–31. 10. 47. (d'après J. Z. Millar)

7 New-York–Hauppauge 70 km – 2800 MHz/1. 8.–31. 8. 43 (d'après G. S. Wickizer et A. M. Braaten)

8 (New-York–San Francisco) 52 km – 4000 MHz courbe moyenne d'un grand nombre de parcours pour le mois le plus défavorable (d'après Gilman)

figure 14, on a choisi la valeur p = 0,5 comme point de référence. Les résultats du parcours Chasseral–Mont-Afrique se retrouvent dans les courbes 1, 2 et 2*, et il faut se rappeler que l'ensemble des enregistrements sur 3000 MHz se compare mieux à la moyenne annuelle qu'aux quatre mois défavorables d'une année normale.

Les courbes 3 et 4 se réfèrent au parcours Chasseral–Genève, qui a des caractéristiques de propagation un peu semblables (voir figure 15). Cependant, ce parcours diffère en ce sens que des conditions de superréfraction correspondant à la situation de la figure 13a sont peu probables et que la présence d'une réflexion au sol, à vrai dire à la surface du lac Léman, est hors de discussion et se fait déjà sentir plus ou moins par des conditions de réfraction moyennes. C'est à l'influence défavorable de cette réflexion que nous attribuons la forte déviation de la courbe de probabilité

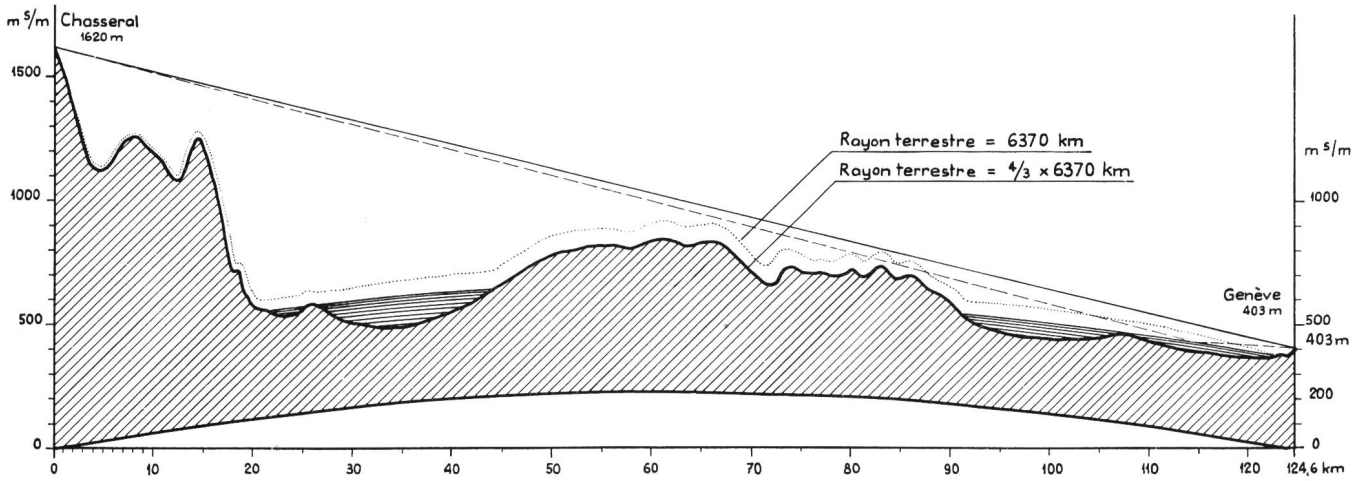


Fig. 15 Profil du parcours Chasseral–Genève

de l'affaiblissement pour les évanouissements profonds sur 2000 MHz (courbe 4); la pente de cette courbe est même beaucoup plus grande que celle de la courbe correspondante Chasseral–Mont-Afrique pour la fréquence de 3000 MHz. Ceci, de même que la stabilité extraordinaire de ce parcours sur 300 MHz, peut s'expliquer en principe par la relation des phases, d'une part, et par l'affaiblissement par diffraction des deux composantes du champ, d'autre part, sous l'influence d'un indice de réfraction variable.

Les courbes 5, 6, 7 montrent que les résultats des essais de propagation sur le parcours Chasseral–Mont-Afrique se comparent très favorablement à bien d'autres parcours n'ayant guère que la moitié de sa longueur. Ces résultats sont aussi sensiblement meilleurs que la moyenne statistique d'un grand nombre de trajets entre New-York et San Francisco sur la fréquence de 4000 MHz, où la distance moyenne entre les relais est de 52 km environ.

G. *Conclusions*

1. L'affaiblissement de propagation non perturbé du parcours Chasseral–Mont-Afrique est supérieur de 4 à 5 dB à la valeur en espace libre, mesuré à 300 MHz, et de 1 à 2 dB, mesuré à 3000 MHz. Cette perte est due à la diffraction.
2. La stabilité de l'affaiblissement de propagation sur ce long parcours est particulièrement bonne; elle est meilleure que sur de nombreux parcours qui n'ont que la moitié de sa longueur, surtout pour des fréquences de l'ordre des 3000 MHz.
3. Le parcours est bien utilisable, et ceci dans les limites de qualité des circuits internationaux recommandées par le C.C.I.F. pour la transmission de signaux de téléphonie multiplex à large bande ou de télévision, avec les équipements et les puissances d'émission aujourd'hui disponibles.
4. La bonne stabilité de l'affaiblissement de propagation est attribuée en majeure partie à la présence le long du parcours d'obstacles qui ne gênent pas sensiblement le «rayon direct», mais réduisent par l'affaiblissement de diffraction l'amplitude d'un «rayon indirect», réfléchi dans les couches d'air près du sol ou au sol même, à une valeur négligeable, du moins pour des conditions de réfraction normales. Cette explication semble confirmée aussi par l'expérience acquise sur d'autres parcours, surtout dans les Alpes, en Suisse, où l'on a même constaté des conditions plus stables (Jungfraujoch–Mte Generoso).
5. On a remarqué certaines corrélations, mais d'ordre général, entre la propagation des ondes sur ce parcours et les conditions météorologiques. Les évanouissements profonds en particulier semblent presque toujours liés à l'existence d'une couche de superréfraction élevée, du moins pour la fréquence de 300 MHz. On a cherché à expliquer ces phénomènes, il manque cependant des observations météorologiques détaillées sur le parcours. Des enregistrements actuellement en cours sur le trajet Chasseral–Säntis (d = 175 km) qui, contrairement à celui de Chasseral–Mont-Afrique, a un profil très dégagé, permettront peut-être de mieux comprendre les phénomènes.

Bibliographie

[1] *R. Sueur* et *L. J. Libois.* Les faisceaux hertziens dans les réseaux téléphoniques modernes. Onde électr. 32 (1952), 121.

[2] *W. Klein.* Systeme der Ultrakurzwellen-Mehrkanal-Telephonie. Bull. A.S.E. 1948, n° 17, p. 571.

[3] *J. Dufour.* Quelques observations sur la propagation des ondes décimétriques en Suisse. Bull. techn. PTT 1950, n° 11, p. 417.

[4] *W. Klein.* Essais de transmission par ondes dirigées exécutés dans les Alpes pour contribuer à l'établissement d'un réseau radiotéléphonique suisse. Bull. techn. PTT 1950, n° 8, p. 303.

[5] *J. Dufour.* Ondes ultra-courtes et météorologie. Bull. techn. Suisse rom. 1953, n° 9–10, p. 121.

[6] *Ch. R. Burrows* and *St. S. Attwood.* Radio Wave Propagation. Consolidated Summary Technical Report of the Committee on Propagation of the National Defense Research Committee. New York 1949.

[7] *E. Baumeister* und *W. Knoepfel.* UKW-Feldstärkevoraussage in gebirgigem Gelände. Tech. Hausmitt. NWDR 1952, Nr. 3/4, S. 67.

[8] XVIe Assemblée plénière du CCIF à Florence. Tome IIIbis. Transmission sur les lignes, maintenance.

[9] *H. Gutton, J. Fagot* et *J. Hugon.* Les équipements du faisceau hertzien Paris–Lille. Onde électr. 32 (1952), 174.

[10] *L. J. Libois.* Essais de propagation en Afrique du Nord. L'Echo des Recherches 1953, n° 11, p. 31.

[11] *G. S. Wickizer* and *A. M. Braaten.* Propagation Studies on 45, 474, and 2800 Megacycles Within and Beyond the Horizon. Proc. Inst. Radio Eng. 35 (1947), 670.

[12] *J. Z. Millar* and *L. A. Byam.* A Microwave Propagation Test. Proc. Inst. Radio Eng. 37 (1950), 619.

[13] *G. W. Gilman.* Systems Engineering in Bell Telephone Laboratories. Bell Lab. Rec. 31 (1953), 1.

[14] *A. A. Roetken, K. D. Smith* and *R. W. Friis.* The TD 2 Microwave Radio Relay System. Bell Syst. Techn. J. 30 (1951), 1041.

Die technische Erziehung beginnt mit der Erziehung zur Wahrheit; weder die präzise Handarbeit noch die mathematische Ueberlegung dulden das Ungefähre.

Prof. Dr. F. Tank

In: Technik und Kultur, Zürich 1946.