

Expériences de collecte de données hydrométriques et pluviométriques par satellite

M. MOLINIER
M. HOEPFFNER
Chargés de recherches de l'ORSTOM

P. TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY
Ingénieur en Chef à l'EDF

RÉSUMÉ

Dans le cadre du programme POST-EOLE organisé par le CNES, l'ORSTOM a effectué au Congo et en Guyane, des expériences préliminaires de collecte par satellite. Après un bref exposé du système EOLE, le présent article décrit les capteurs de hauteurs limnimétrique et pluviométrique réalisés par l'ORSTOM, les difficultés rencontrées et les résultats encourageants des transmissions de données par le satellite.

ABSTRACT

In the frame of the POST-EOLE Programme organized by the french « Centre National d'Etudes Spatiales » ORSTOM has carried out in Congo and Guiana, two preliminary experiences of data collection by satellite. After a brief outline of the EOLE system this paper reports the sensors of water-stage and rain-depth worked out by ORSTOM, the difficulties encountered and the encouraging results of the data transmissions by the satellite.

SOMMAIRE

1. *Introduction*
2. *Le système EOLE*
 - 2.1. Description générale
 - 2.2. Fonctionnement
 - 2.3. Précision
 - 2.4. Couverture
3. *Répondeur*
 - 3.1. Description générale
 - 3.2. Signaux introduits par les capteurs
 - 3.3. Fonctionnement
 - 3.4. Spécifications
 - 3.5. Tiroirs associés
4. *Expérience réalisée au Congo*
 - 4.1. Chronologie de l'expérience
 - 4.2. Equipement
 - 4.2.1. Détecteur pluviométrique
 - 4.2.2. Détecteur limnimétrique
 - 4.2.3. Les oscillateurs
 - 4.2.4. Alimentation
 - 4.3. Etalonnage des capteurs
 - 4.4. Résultats des transmissions par satellite
 - 4.4.1. Pluviométrie
 - 4.4.2. Limnimétrie
 - 4.5. Conclusion
5. *Expérience réalisée en Guyane*
 - 5.1. Chronologie de l'expérience
 - 5.2. Equipement

- 5.2.1. Ensemble répondeur
- 5.2.2. Détecteur limnimétrique
- 5.2.3. Oscillateur
- 5.3. Etalonnage du capteur
- 5.4. Résultats des transmission par satellite
- 5.5. Conclusions

6. Remerciements

1. INTRODUCTION

Lancé en août 1971, le satellite français « EOLE » était doté de deux fonctions, localisation et collecte de données, qui dans un premier temps ont été utilisées conjointement pour une expérience météorologique. Il s'agissait d'observer les mouvements de l'atmosphère dans l'hémisphère sud, au moyen d'une flottille d'environ 500 ballons dérivants.

Après disparition progressive des ballons et achèvement de l'expérience météorologique initiale, le CNES à partir de mai 1972 et jusqu'en mars 1974, a suscité le programme « POST-EOLE », en liaison avec divers organismes, afin de profiter de la disponibilité du satellite pour effectuer diverses expériences de localisation et de collecte de données.

Si la fonction de localisation ne présente pas d'intérêt en hydrologie, par contre, l'utilisation des satellites pour la collecte de données offre des perspectives prometteuses, tout particulièrement dans les deux cas suivants :

- Exploitation de réseaux de stations hydrométriques, pluviométriques, de contrôle de la qualité de l'eau, etc., dans les régions d'accès difficile où les méthodes classiques se révèlent inadaptées,
- Exploitation de réseaux d'alerte (crues, pollution) pour lesquels la transmission rapide et sûre des données est une condition première de l'efficacité des prévisions.

Pour préparer l'utilisation future de ce nouveau mode de collecte des données, l'ORSTOM a saisi l'occasion avantageuse qui lui était offerte par le CNES dans le cadre du programme POST-EOLE. Il a donc réalisé des expériences préliminaires au Congo et en Guyane, où ses hydrologues pouvaient bénéficier de l'appui technique des stations CNES de Brazzaville et Kourou.

Ces expériences, réalisées avec des moyens relativement modestes, ont été arrêtées en mars 1974, avec la fin du programme POST-EOLE. Elles demanderont à être poursuivie et une longue mise au point sera encore nécessaire pour obtenir un matériel parfaitement opérationnel dans les conditions de terrain les plus difficiles. A l'issue de cette première phase d'expériences, il a cependant été jugé intéressant d'exposer ici les résultats obtenus qui sont encourageants, et d'indiquer les points sur lesquels devront porter de nouveaux efforts.

2. LE SYSTÈME ÉOLE

2.1. DESCRIPTION GÉNÉRALE (fig. 1)

Brièvement schématisé, le système EOLE se compose des éléments suivants :

- a) le satellite qui présente les caractéristiques effectives suivantes :

Périgée	: 680 km
Apogée	: 904 km
Période nodale	: 103 min
Inclinaison	: 50°

- b) le réseau de stations de contrôle du CNES (Brétigny, Las Palmas, Ouagadougou, Brazzaville, Pretoria, Kourou) ;

- c) les balises de collecte dont les organes essentiels sont :

- les capteurs, eux-mêmes composés d'un détecteur sensible au paramètre physique à mesurer (niveau d'eau, pression, température, etc.) et d'un oscillateur chargé d'élaborer un signal dont la fréquence soit fonction de la valeur du paramètre,
- le répondeur, muni d'une antenne, qui assure les liaisons à double sens avec le satellite.

Les balises, suivant leur support, sont du type « nacelle de ballon » ou du type « répondeur à tiroir ». Ce dernier est utilisable sur des bateaux, des bouées fixes ou dérivantes, ou encore dans des stations terrestres fixes.

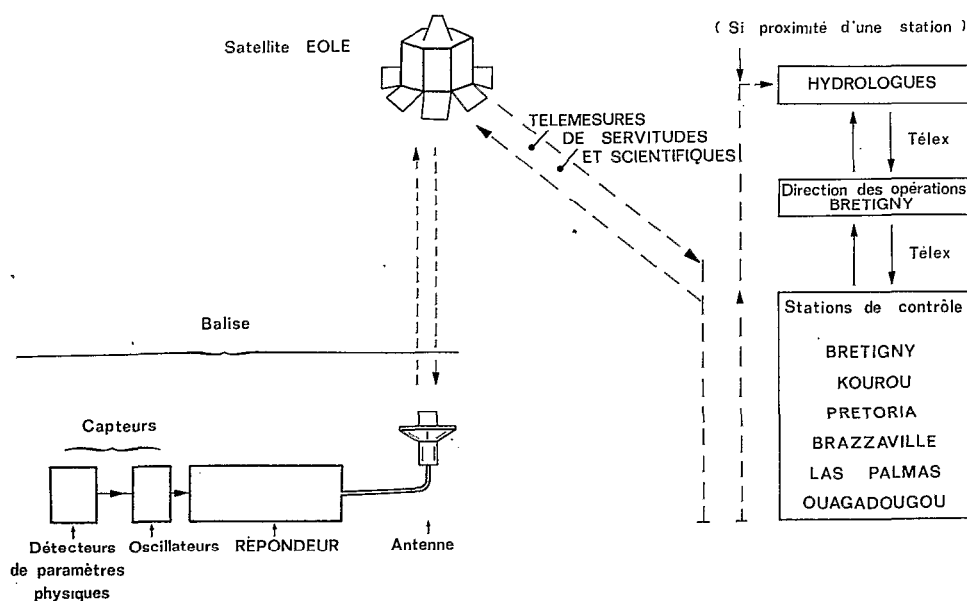


Fig. 1. — Schéma du système EOLE

2.2. FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement du système EOLE est basé sur l'interrogation des balises par le satellite, suivant un mode d'interrogation commandé depuis le centre d'opération de Brétigny, par l'intermédiaire des stations de contrôle. Le mode d'interrogation est soit séquentiel pur (il permet alors d'interroger 512 balises dans un ordre immuable durant un cycle de 320 secondes), soit séquentiel limité, soit programmé.

Les messages émis par les balises sont mis en mémoire par le satellite et retransmis à Brétigny, dans un délai compris dans 95% des cas, entre quelques minutes et trois heures. Après traitement sur ordinateur, les données peuvent parvenir au destinataire par telex dans un délai d'une heure.

Lorsque le destinataire est proche d'une station de contrôle, celle-ci peut, éventuellement, lui transmettre directement les informations qui l'intéressent. La station doit alors au passage, décommuter la mémoire du satellite et l'utilisateur se charge du traitement de l'information. Cette possibilité a été partiellement utilisée pour l'expérience du Congo.

2.3. PRÉCISION

La quantification effectuée par le satellite introduit une erreur de 1% de l'échelle de mesure en fréquence. Cette précision n'est garantie sur un paramètre physique que si la « fonction de transfert », c'est-à-dire la relation fréquence-paramètre physique, est suffisamment proche de la linéarité et si le capteur n'introduit pas lui-même une erreur supplémentaire non négligeable.

2.4. COUVERTURE

La couverture assurée par le système EOLE dépend de la latitude et du site minimal auquel la liaison est possible, comme le montre le tableau ci-après :

Latitude (degré)	Site minimal (degré)	Temps moyen de visibilité par passage (minute)	Nombre moyen de passage par jour	Intervalle maximal entre deux passages successifs (heure)
0	10	9,6	4,32	11
20	10	9,4	5,21	13
40	10	10,8	6,31	16,5
60	10	7,5	3,80	20
0	20	6,8	3,03	13
20	20	6,8	3,54	15
40	20	7,7	3,41	17
60	20	3,1	1,70	24

3. RÉPONDEUR

3.1. DESCRIPTION GÉNÉRALE

Les répondeurs mis gracieusement à la disposition de l'ORSTOM par le CNES étaient du type « répondeur à tiroir », avec adjonction dans l'expérience de Guyane, d'un appareillage électronique complémentaire (deux tiroirs) pour le contrôle du bon fonctionnement du satellite.

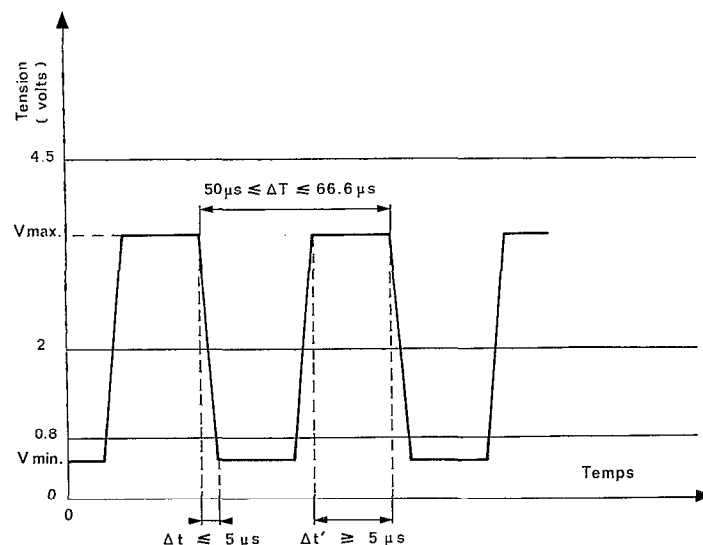


Fig. 2. — Signaux introduits par un capteur dans le répondeur

Le répondeur simple se présente sous la forme d'un tiroir de 483 mm de largeur, 222 mm de hauteur et de 500 mm de profondeur. Son poids avec container étanche, est de 25 kg. Lorsque deux tiroirs complémentaires lui sont associés, il a pour dimensions hors-tout 850 × 510 × 590 mm et pèse 90 kg.

Un câble coaxial relie le répondeur à une antenne qui est constituée d'un réflecteur et d'une spirale dessinée sur un plan ou un cône. L'antenne conique a des performances meilleures aux sites bas que l'antenne plane.

3.2. SIGNAUX INTRODITS PAR LES CAPTEURS

Le répondeur comporte quatre entrées susceptibles de recevoir chacun les signaux périodiques à tension électrique positive élaborés par un capteur. Ces signaux (voir fig. 2) doivent satisfaire aux conditions suivantes :

- fréquence fondamentale comprise entre 15 et 20 KHz,
- niveau bas de tension compris entre 0 et 0,8 volt,
- niveau haut de tension compris entre 2 et 4,5 volts,
- temps de montée et de descente inférieur ou égal à 5 microsecondes,
- durée des états « bas » et « haut » supérieure ou égale à 5 microsecondes,
- résistance interne du capteur inférieure ou égale à 1 K Ω .

3.3. FONCTIONNEMENT (fig. 3)

Lorsque le satellite, qui émet en permanence une onde porteuse de 464 MHz, n'est pas dans la zone de visibilité de la balise, le répondeur est en phase de « veille pulsée » et fonctionne suivant un cycle de 6,5 secondes (ou éventuellement, 26,5 secondes). Pendant 5 secondes (ou 25 secondes) il est en repos, et pendant 1,5 seconde il recherche l'émission du satellite par balayage de la gamme de fréquence possible (464 MHz + 200 KHz d'effet Doppler).

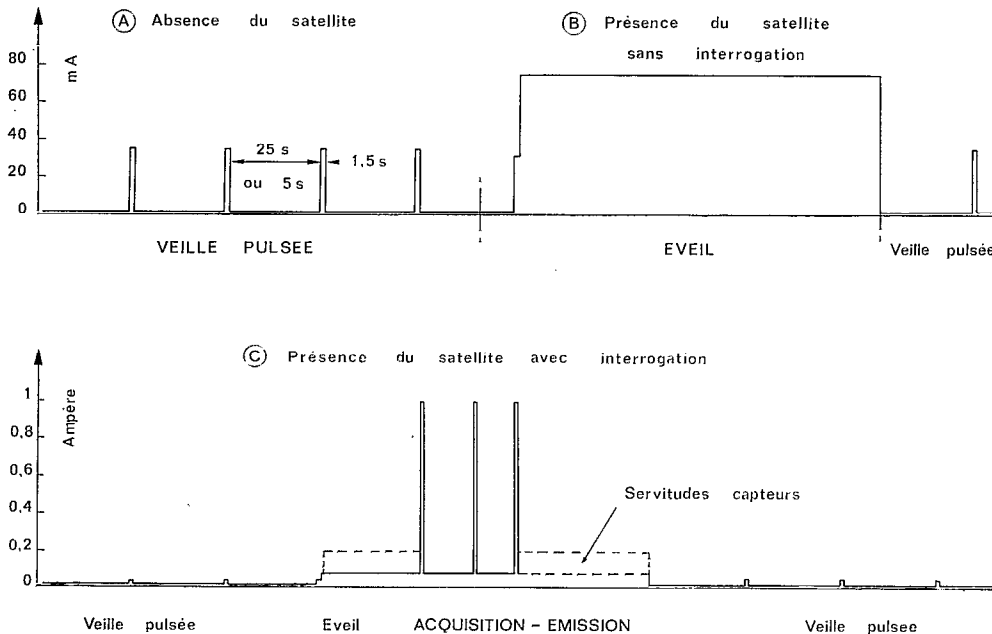


Fig. 3. — Phases de fonctionnement du répondeur

Lorsque le satellite entre dans la zone de visibilité de la balise, le répondeur reconnaît son onde porteuse de 464 MHz et entre en phase « éveil ». Deux cas peuvent alors se présenter :

a) la balise n'est pas interrogée par le satellite : le répondeur n'émet aucun message et retombe en veille pulsée jusqu'au prochain passage du satellite,

b) la balise est interrogée par le satellite : le répondeur reconnaît son adresse et entre en phase « acquisition-émission ». Après divers test de bon fonctionnement, il envoie au satellite sur 402 MHz un message contenant notamment les informations issues des capteurs. Ce message est de 131 bits, dont 28 pour les données des capteurs. La durée de cette phase est de 625 millisecondes dont 583 millisecondes pour l'émission. Des interrogations successives, espacées au minimum de 3,125 secondes, sont possibles pendant un même passage du satellite. Dans l'expérience du Congo, on a pu observer jusqu'à 33 réponses successives.

3.4. SPÉCIFICATIONS

Le répondeur peut être alimenté soit sur secteur (tension : 127 ou 220 V \pm 5% ; fréquence : 50 Hz \pm 5%), soit sur batterie (tension comprise entre 11,2 et 15 V ; résistance interne inférieure à 0,5 ohm). L'alimentation sur secteur nécessite un convertisseur.

Dans le cas de l'utilisation d'une batterie de 12 V et du cycle de 6,5 secondes en veille pulsée, la consommation moyenne est de 110 milliwatts et atteint 18 watts en pointe (émission pendant 583 millisecondes).

En fonctionnement la température ambiante du répondeur doit être comprise entre 0 et 30 °C, tandis que l'humidité relative doit être inférieure à 95%. Au-dessus de 30 °C, les performances du répondeur ne sont plus garanties.

3.5. TIROIRS ASSOCIÉS

Comme déjà indiqué, deux tiroirs, non indispensables, peuvent être associés au répondeur proprement dit :

- a) un « tiroir enregistreur » donne une représentation graphique du courant électrique alimentant le répondeur :
 - en « veille pulsée », le déroulement du papier-diagramme est arrêté et l'on observe seulement de petits battements du stylet,
 - en « éveil », le déroulement du papier se met en marche, le stylet occupe une position stable plus élevée que précédemment et un voyant « présence satellite » s'allume,
 - en « acquisition-émission », on note une impulsion du stylet correspondant à l'émission et un voyant « interrogation satellite » s'allume,
- b) un « tiroir périphérique » sert d'intermédiaire entre le répondeur, d'une part, l'enregistreur et des simulateurs de capteur, d'autre part.

4. EXPÉRIENCE RÉALISÉE AU CONGO

4.1. CHRONOLOGIE DE L'EXPÉRIENCE

L'expérience a débuté en octobre 1972 dans les locaux du CNES à Brazzaville, où une simulation pluviométrique a donné entière satisfaction. Le matériel a ensuite été transféré sur le bassin versant de la Comba, à 150 km de Brazzaville.

L'expérience a été suspendue en décembre 1972, un des circuits du répondeur étant défailant. Après appel du satellite, le répondeur restait en phase « éveil » au lieu de revenir en phase « veille pulsée ».

Le même répondeur a été remis en place en avril 1973, après réparation et modification. Le tiroir étanche a été fermé en laboratoire et placé dans un container dans le couvercle duquel les différentes connexions passaient par des « traversées étanches ». Les résultats ont montré que le détecteur pluviométrique ne donnait pas entière satisfaction. Celui-ci, ainsi que l'oscillateur, ont été remplacés en novembre 1973.

Malgré de nombreuses défaillances, dues à la nécessité d'adapter un matériel qui n'était pas prévu à cette fin, l'expérience de télépluviométrie s'est poursuivie jusqu'à la fin du mois de mars 1974, date à laquelle le CNES a cessé de nous faire parvenir les résultats. A la fin du mois d'avril le répondeur et l'antenne ont été démontés pour être restitués au CNES sur sa demande.

Il est regrettable que l'expérience se soit arrêtée à cette date, car après de nombreux tâtonnements, nous avions réussi à mettre au point, en avril, un ensemble qui semblait donner des valeurs beaucoup plus précises. Malheureusement, faute de résultats, il nous est impossible d'en tirer des conclusions.

En janvier 1974, l'expérience a été complétée par la mise en place d'un télélimnimètre installé à proximité du télépluviomètre en utilisant le même répondeur.

4.2. EQUIPEMENT

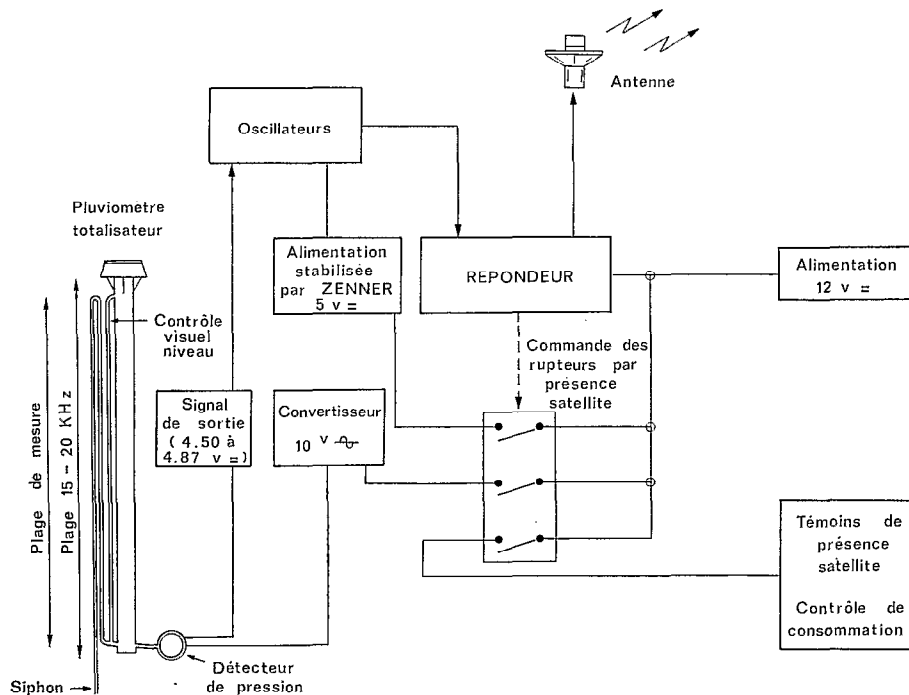
L'équipement fourni par le CNES comportait un répondeur en tiroir à quatre entrées de capteurs et son antenne.

Il restait à réaliser un ensemble capable de transformer des hauteurs de pluie ou les hauteurs d'eau d'une rivière, en signaux compatibles avec le répondeur (cf. paragraphe 3.2.).

4.2.1. Détecteur pluviométrique

Celui-ci doit transformer les hauteurs de précipitations en un signal électrique capable de faire varier, dans la gamme de mesure, la fréquence de l'oscillateur entre 15 et 20 KHz.

Le pluviomètre réalisé est un totalisateur de 2,50 m de haut avec amplification par dix (1 mm de pluie correspond à 10 mm dans le totalisateur). Un niveau visible permet de contrôler les mesures. Un siphon auto-amorçable vidange en 3 minutes, l'appareil lorsqu'il est plein (cf. fig. 4).



Expérience du Congo

Fig. 4. — Schéma de l'équipement pluviométrique

Dans ce cas particulier, le détecteur pouvait être un appareil mesurant la pression hydrostatique correspondant à la hauteur d'eau dans le pluviomètre. Deux types de capteurs ont été utilisés :

— dans un premier temps, il s'agissait d'un appareil fabriqué par CMR dont le principe est le suivant : un soufflet se déforme sous l'action de la pression à mesurer ; il agit alors sur un petit noyau magnétique qui fait varier le coefficient d'induction mutuelle de deux bobines. Un deuxième soufflet, relié à la pression ambiante, compense la pression atmosphérique agissant sur la colonne d'eau. Ce détecteur fournissait une tension alternative variable. La gamme de mesure était de 0 à 0,25 bar, soit une hauteur de 2,50 m pour la colonne d'eau ;

— un deuxième détecteur de pression a remplacé le précédent en novembre 1973. Le principe de fonctionnement est analogue. Cependant, les soufflets agissent sur un potentiomètre, au lieu d'un noyau. La gamme de mesure s'étend de 0 à 2,40 m pour une valeur de la résistance de sortie variant de 27 Ohms à 940 Ohms.

4.2.2. Détecteur limnimétrique

Le détecteur limnimétrique utilise une des trois entrées de capteurs restées libres. Il est constitué par un potentiomètre monté en bout de l'axe de la poulie de réduction d'un limnigraphe OTT X à flotteur. Un système de démultiplication permet d'enregistrer des hauteurs variant de 0 à 7,20 m. Cependant un choix judicieux de roues dentées permettrait d'adapter l'amplitude d'enregistrement aux caractéristiques d'autres cours d'eau.

En raison du choix très restreint de matériel offert par le marché local, des imperfections mécaniques furent à l'origine de nombreuses difficultés et de la dispersion des résultats, comme on le verra par la suite.

Notre but étant de ne pas trop compliquer les manipulations et la réalisation de l'oscillateur, nous avons

essayé d'adapter les montages déjà existants aux nouveaux problèmes, et donc d'utiliser un potentiomètre. Ce système avait, de plus, l'avantage d'être monté sur un limnigraphe, ce qui permettrait de suivre, lors de la phase expérimentale, les variations de la fonction hauteur d'eau/temps et ainsi de bien situer dans le temps chaque valeur transmise.

4.2.3. Les oscillateurs

Dans les deux montages utilisés, l'élément « variateur de fréquence » est composé de deux diodes Varicap, dont la particularité est de se comporter comme un condensateur variable. L'oscillateur est d'un type classique avec circuit oscillant dans le collecteur. Les diodes Varicap se trouvent en parallèle sur le circuit oscillant. Il est donc très facile de faire varier la fréquence, sachant que :

$$F = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L (C_1 + C_2)}}$$

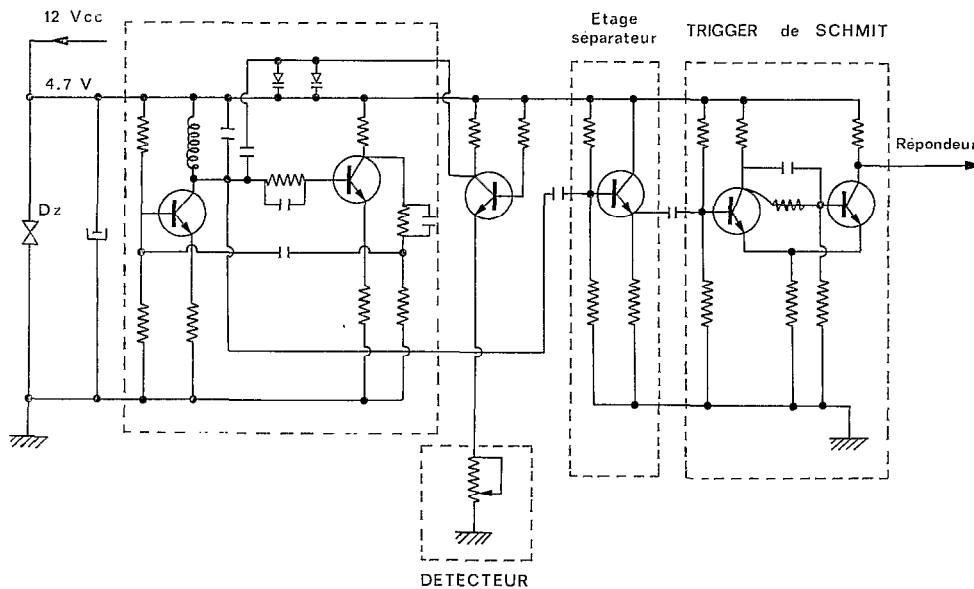
où C_1 a une valeur constante (condensateur du circuit oscillant) et C_2 a une valeur variable (capacités des Varicaps : $C_2 = k/\sqrt{|V|}$).

Il suffit donc d'appliquer sur les Varicaps une tension variable pour avoir une excursion en fréquence. Cette tension est fournie par le détecteur dont le potentiomètre est inséré dans un montage à transistors classique.

L'ensemble oscillateur du capteur pluviométrique comprend :

- 1) Un oscillateur classique délivrant une tension sinusoïdale d'amplitude suffisante et de fréquence initiale stable (50 Hz de variation). Le manque de temps nous a empêchés de tester notre matériel (risques d'une dérive en fréquence due aux conditions du milieu) et d'en trouver les défauts ;
- 2) Une partie commande de fréquence, constituée d'un montage classique à transistors, avec dans le circuit le potentiomètre du détecteur de pression ;
- 3) Un étage séparateur évitant une interaction entre l'oscillateur proprement dit et les étages suivants ;
- 4) Un trigger de Schmitt transformant les signaux sinusoïdaux en signaux rectangulaires appliqués à une entrée du répondeur.

L'oscillateur du capteur limnimétrique diffère du précédent, car pour des raisons matérielles, il n'a pas été possible de construire le même montage. La fréquence obtenue était double de celle du premier montage. Il a donc fallu ajouter, en sortie du trigger, un diviseur de fréquence et mettre à l'étage final un adaptateur d'impédance, afin que le signal reçu par le répondeur ne soit pas déformé.



Expérience du Congo
Fig. 5. — Schéma de l'oscillateur du capteur pluviométrique

Cet oscillateur a l'avantage de présenter une meilleure stabilité en fréquence que celui du capteur pluviométrique, par suite de l'adjonction d'un diviseur de fréquence.

4.2.4. Alimentation

Le répondeur et les oscillateurs sont alimentés à partir d'une batterie de 12 volts. L'alimentation de chaque oscillateur est stabilisée par une diode Zener. Dans les conditions extrêmes (batteries déchargées ou à pleine charge), les variations de tension aux bornes de la diode Zener ne dépasse pas 7%.

Contrairement à la consommation du répondeur qui est minime, celle du détecteur et de l'oscillateur est importante. Cet équipement étant destiné à rester sur le terrain pendant une période assez prolongée, il était nécessaire de limiter cette consommation. Dans ce but, les capteurs ont été connectés à partir d'un circuit du répondeur qui ne fonctionne que lors de la présence du satellite.

4.3. ETALONNAGE DES CAPTEURS

L'étalonnage des capteurs pluviométriques et limnimétriques a tout d'abord été réalisé à Brazzaville, afin de tester les montages et de connaître l'allure des fonctions de transfert. Cet étalonnage s'effectuait directement dans un local climatisé à l'aide d'un fréquencesmètre sans passer par les transmissions du satellite.

La figure 6 donne les courbes d'étalonnage obtenues pour les deux capteurs. Pour celui du télépluviomètre, il y a eu deux étalonnages, l'un effectué en novembre 1973 et l'autre en janvier 1974, après modification de l'oscillateur. Seul l'étalonnage de novembre 1973 est satisfaisant parce que proche de la linéarité. Cependant, il s'est avéré que ce capteur était trop sensible aux conditions d'ambiance, comme on le verra par la suite. Pour le deuxième étalonnage la fonction de transfert pluviométrie/fréquence est très éloignée de la linéarité. Ceci peut expliquer, tout au moins en partie, la dispersion des points que nous avons obtenus par la suite. L'étalonnage du capteur du télélimnimètre semble plus satisfaisant.

Après étalonnage, les capteurs ont été transférés sur le terrain et connectés au répondeur, afin de passer au stade expérimental proprement dit, c'est-à-dire à la transmission des données par satellite. Sur place, les hauteurs d'eau étaient simulées dans le pluviomètre et les fréquences correspondantes transmises par EOLE.

Au début de l'expérience, la station spatiale de Brazzaville décommutait directement les mémoires du satellite et nous donnait aussitôt, par liaison radio, les valeurs brutes, non traitées par l'ordinateur de Brétigny. Par telex, nous recevions, 24 heures plus tard, les résultats restitués en fréquence. C'est ce mode de communication qui fut adopté ensuite.

4.4. RÉSULTATS DES TRANSMISSIONS PAR SATELLITE

4.4.1. Pluviométrie

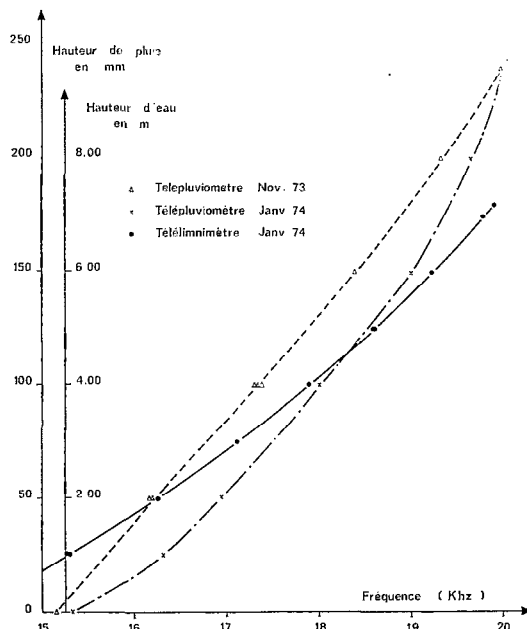
Les données transmises par le satellite parvenaient à Brazzaville sous forme de listings. Pour chaque passage du satellite, il y avait en général un certain nombre de réponses successives identiques à 40 Hz près. Le nombre de passages par jour variait entre 1 et 6. Des données exploitables ont été obtenues en mai 1973, puis en novembre après remplacement du capteur et enfin de janvier à mars 1974.

La figure 7 montre, en fonction des hauteurs pluviométriques, les fréquences transmises pendant tout le mois de mai 1973. La fonction de transfert apparaît pratiquement linéaire, mais la dispersion des points autour de la droite moyenne est très importante. Le premier capteur utilisé a donc été jugé insuffisamment précis et a été abandonné.

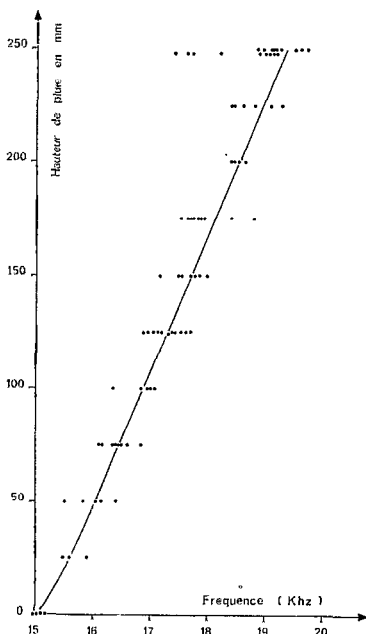
Le second capteur a été essayé sur le terrain en novembre 1973 et a donné des résultats, représentés sur la figure 8, qui offrent une dispersion moindre mais encore excessive.

A partir de janvier 1974 une deuxième diode Varicap a été ajoutée à l'oscillateur, afin de minimiser l'importance de la dérive de fréquence constatée dans les données transmises par le satellite. Les résultats obtenus (fig. 8) ne sont pas encore très satisfaisants, surtout pour les hauteurs de pluie supérieures à 150 mm. Pour une fréquence donnée F , on constate parfois des écarts excédant ± 25 mm sur les hauteurs de pluie H . Cette augmentation des écarts avec les valeurs de H est en partie liée à l'accroissement de la pente de la courbe $H(F)$, qui est assez loin de la linéarité.

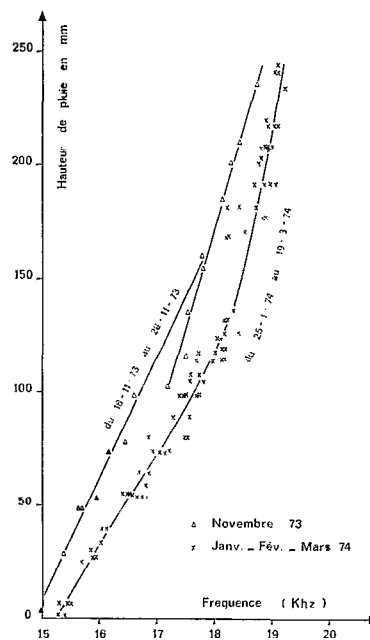
Cependant l'imprécision des données transmises est principalement due aux variations de la température ambiante qui influencent de façon très sensible le fonctionnement de l'oscillateur. Pour réduire cette cause d'erreur, on a essayé dans le courant de mars 1974 de placer l'oscillateur dans une enceinte isolée thermiquement et de l'alimenter non plus par intermittence (pendant les phases acquisition-émission), mais de façon continue. Les résultats n'ont pas été concluants. On a observé à partir du 19 mars, un échauffement progressif de l'oscillateur dont la température est montée d'une dizaine de degrés en quinze jours. Pour une même valeur du paramètre H , la fréquence transmise a augmenté de 2 à 3 KHz. L'arrêt du programme POST-EOLE n'a pas permis d'effectuer de nouveaux essais. La solution de ce problème devrait être confiée à un spécialiste averti disposant de moyens techniques qui faisaient défaut sur place.



Expérience du Congo
Fig. 6. — Etalonnage des capteurs



Expérience du Congo
Fig. 7. — Relation hauteur de pluie/ fréquence (1^{er} capteur) mai 1973



Expérience du Congo
Fig. 8. — Relation hauteur de pluie/ fréquence (2^e capteur)

4.4.2. Limnimétrie

La réalisation du détecteur et surtout de l'oscillateur a été assez longue, de sorte que l'appareil n'a pas commencé à fonctionner sur le terrain avant le 21 février 1974. Il a été mis hors-service à partir du 5 mars par suite de la défaillance d'un composant de l'oscillateur qu'il n'a pas été possible de remplacer rapidement.

Les résultats obtenus sur cette courte période de fonctionnement font encore apparaître une forte dispersion, mais les causes n'en sont pas les mêmes que dans le cas précédent. L'oscillateur était moins sensible aux variations de la température ambiante. Par contre, le détecteur présentait des imperfections mécaniques. Faute d'avoir pu se procurer en temps utile du matériel bien approprié, le dispositif mécanique reliant la poulie du limnigraphe au potentiomètre était assez rudimentaire et donnait une liaison trop lâche entre la hauteur d'eau limnimétrique et la résistance du potentiomètre. Cette cause d'erreur pourrait facilement être en grande partie éliminée en utilisant un meilleur dispositif mécanique.

4.5. CONCLUSION

Malgré leurs imperfections, les résultats obtenus montrent déjà qu'il serait possible de transmettre simultanément par satellite des données pluviométriques et limnimétriques à partir de sites d'accès difficile, voire même impossible à certaines époques de l'année. L'utilisation pratique de ce mode de transmission doit cependant surmonter encore plusieurs difficultés.

La première est constituée par le coût de l'équipement. Nous avons bénéficié d'un répondeur mis gracieusement par le CNES, à notre disposition. Cette circonstance avantageuse ne se renouvellera pas. Le coût de cet appareil est d'environ 30 000 francs. Il est vrai qu'il comporte une électronique très élaborée qui pourrait être largement simplifiée pour les besoins propres de l'hydrologie, ce qui abaisserait sensiblement son prix de revient surtout s'il peut un jour être construit en assez grande série. Les capteurs sont actuellement d'un prix de revient plus modeste, mais ils demanderont encore une sérieuse mise au point avant d'être suffisamment précis et fiables.

Le pluviomètre et le détecteur de pression utilisés dans l'expérience du Congo semblent assez satisfaisants. Il y aurait lieu cependant de prévoir un système de vidange qui soit déclenché à intervalles réguliers ou après chaque pluie, de façon à éviter une perte d'information lorsque la vidange, qui dure 3 minutes, se produit au cours d'une averse. Le programme de travail du satellite pourrait comporter l'envoi périodique d'une instruction commandant l'ouverture d'une électro-vanne de vidange, suivant un procédé analogue à celui utilisé dans le programme EOLE initial pour commander la destruction des ballons.

En ce qui concerne la mesure des hauteurs d'eau d'une rivière, on pourrait envisager d'utiliser un détecteur de pression analogue à celui de l'équipement pluviométrique, au lieu d'avoir recours à un limnigraphe et à un potentiomètre. Il en résulterait une économie certaine, mais il subsisterait un problème de protection de l'appareillage en cas de crues violentes et l'on perdrait la possibilité de contrôler a posteriori, grâce aux enregistrements du limnigraphe, les données transmises par le satellite.

Ce sont les oscillateurs qui ont été à l'origine des plus grosses difficultés rencontrées dans notre expérience, tout au moins en ce qui concerne la pluviométrie. Il faudra impérativement confier à un spécialiste, la réalisation d'un oscillateur dont le fonctionnement soit pratiquement insensible aux conditions d'ambiance. Il n'y a d'ailleurs aucun doute que ce problème puisse être résolu sans grosses difficultés, en ayant recours à diverses possibilités techniques (utilisation de transistors au silicium et de thermistances, tropicalisation des éléments, régulation thermique de l'enceinte de l'oscillateur, etc.).

5. EXPÉRIENCE RÉALISÉE EN GUYANE

5.1. CHRONOLOGIE DE L'EXPÉRIENCE

Des essais préliminaires ont été entrepris à la fin de mars 1973 à la station spatiale de Kourou. L'équipement a été transféré en juillet 1973 dans les locaux climatisés du centre ORSTOM de Cayenne.

L'expérience proprement dite a débuté le 17 juillet 1973 et, après légère modification du détecteur en août, s'est poursuivie jusqu'en mars 1974.

L'expérience de Guyane a porté sur la transmission de données limnimétriques simulées dans un local climatisé. L'accent a été mis sur l'analyse de la précision des données transmises, dans des conditions d'ambiance conformes aux spécifications de l'équipement disponible. Ces spécifications étaient trop restrictives pour permettre d'étendre l'expérience aux conditions naturelles d'une station du réseau hydrométrique guyanais.

5.2. EQUIPEMENT

5.2.1. Ensemble répondeur

Mis à part le capteur, l'équipement fourni par le CNES était celui décrit au chapitre 3, y compris deux tiroirs associés. L'installation de l'antenne (du type spirale plane) sur le toit des locaux ORSTOM a soulevé quelques petites difficultés. Pour obtenir un bilan de liaison satisfaisant, cette antenne a finalement été disposée de telle façon que la distance entre le réflecteur et le toit métallique (jouant un rôle d'écran) soit de 1,5 m, c'est-à-dire égale au double de la longueur d'onde utilisée à l'émission. Le câble coaxial reliant l'antenne au répondeur avait une longueur d'environ 15 m et provoquait une atténuation de 2,2 dB seulement.

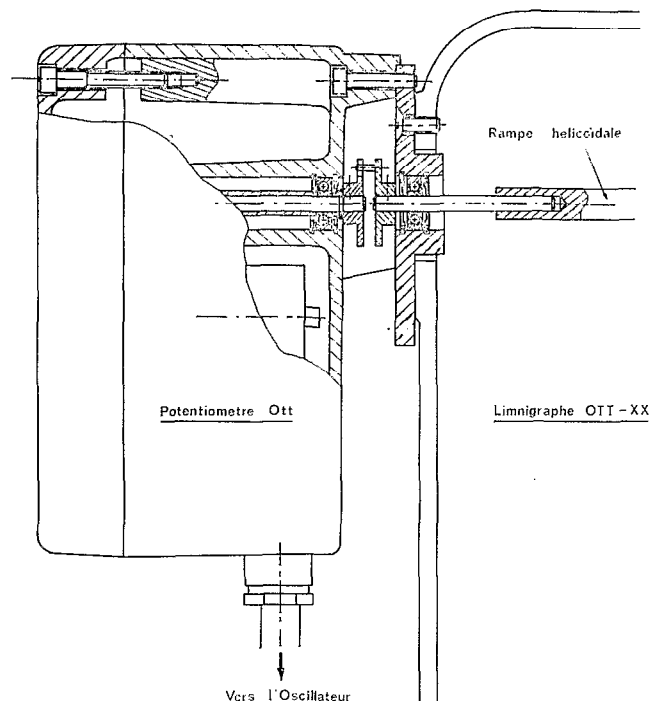
5.2.2. Détecteur limnimétrique

Le détecteur réalisé par l'ORSTOM était constitué par un limnigraphe classique de marque OTT (type XX), qui était équipé d'un potentiomètre à 10 tours, de 1 000 ohms, conçu par OTT pour s'adapter au limnigraphe et être entraîné par sa rampe hélicoïdale. A une hauteur limnimétrique donnée correspondait donc une résistance électrique déterminée du potentiomètre.

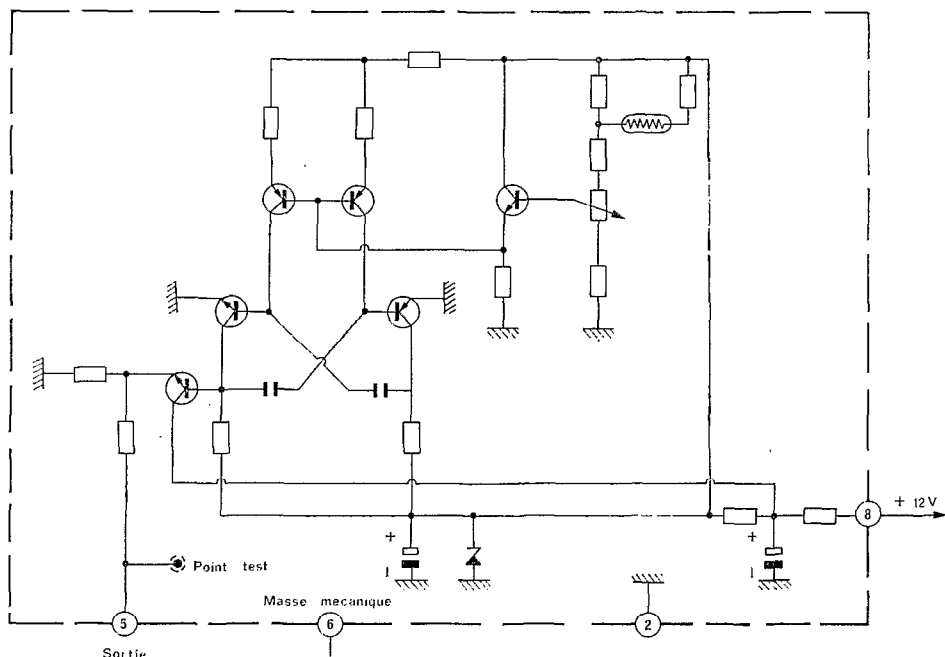
Ce détecteur présentait l'avantage de ne pas nécessiter d'adaptation particulière pour les besoins de l'expérience. Outre la simplicité, la robustesse et l'insensibilité à l'ambiance d'un potentiomètre, son utilisation avait également, comme on le verra plus loin, l'avantage d'une bonne précision et d'une bonne linéarité de la relation « résistance électrique - angle de rotation ».

Le potentiomètre nécessite de prévoir convenablement l'amplitude maximale des hauteurs limnimétriques à transmettre, car il se bloque lorsqu'il arrive en fin de course. Il est donc indispensable de faire fonctionner le limnigraphe avec un rapport de réduction bien approprié, en adoptant un jeu de roues dentées convenable. Durant les premiers jours de l'expérience, le jeu de roues utilisé correspondait à une amplitude maximale de 3,40 m. Ce jeu a été modifié en août et l'amplitude maximale portée à 10,64 m.

Le principal inconvénient du potentiomètre réside sans doute dans le couple de frottement supplémentaire qu'il introduit dans le fonctionnement du limnigraphe. Cet inconvénient n'a pas joué dans les conditions de



Expérience de Guyane
Fig. 9. — Détecteur limnimétrique



Expérience de Guyane

Fig. 10. — Schéma de l'oscillateur du capteur limnimétrique

l'expérience, mais pour éviter une perte de précisions dans la mesure des hauteurs d'eau d'une station hydrométrique il serait nécessaire de compenser l'augmentation des frottements par un accroissement de la section du flotteur. Ce point demanderait à être étudié de plus près.

L'inertie introduite par le potentiomètre n'a, par contre, aucun inconvénient pratique : le temps de réponse du répondeur à une variation brusque de 10 cm de la hauteur limnimétrique reste inférieur à une seconde.

5.2.3. Oscillateur

Il restait à compléter le capteur par un oscillateur dont la fréquence puisse être commandée, entre 15 et 20 KHz, par une variation de tension aux bornes du potentiomètre. La station spatiale de Kourou nous a fourni cet oscillateur qu'elle a réalisé suivant le schéma de la figure 10.

5.3. ETALONNAGE DU CAPTEUR

L'étalonnage, c'est-à-dire la détermination de la fonction de transfert, a été effectué en mesurant la fréquence F fournie par l'oscillateur pour différentes valeurs de la hauteur limnimétrique H affichée au limnigraphe.

Pour chacun des jeux de roues dentées, on a trouvé une fonction de transfert pratiquement linéaire qui obéit aux relations suivantes :

$$\text{— 1}^{\text{er}} \text{ jeu : } (0 < H < 3,3 \text{ m}) \\ F = 1\,452 H + 15\,212$$

$$\text{— 2}^{\text{e}} \text{ jeu : } (0 < H < 10,4 \text{ m}) \\ F = 457 H + 15\,212$$

(F étant exprimé en hertzs et H en mètres).

La fonction $H(F)$, inverse de la fonction de transfert, permet de décoder la fréquence de l'oscillateur en hauteur limnimétrique. On a trouvé que l'écart absolu Δh entre la hauteur décodée h et la hauteur H affichée au limnigraphe avait pour valeur maximale respectivement 0,3 et 1 cm pour le 1^{er} et le 2^e jeu de roues dentées.

Cette imprécision Δh est liée à un écart maximal ΔF de la fréquence mesurée par rapport à celle donnée par la

fonction de transfert. Dans le cas du 2^e jeu et dans les conditions d'ambiance du capteur pendant l'étalonnage, on a :

$$\Delta F = 457 \Delta h = 4,57 \text{ Hz.}$$

Cette imprécision ΔF peut être attribuée en partie au potentiomètre ($\Delta_1 F$) et en partie à l'oscillateur ($\Delta_2 F$). En ce qui concerne le potentiomètre, les caractéristiques fournies par le constructeur sont les suivantes :

- Résistance : de 0 à 1 000 ohms
- Erreur sur la résistance : $\pm 5\%$
- Résistance d'extrémité : $0,2\%$
- Linéarité : $0,003\%$.

L'erreur sur la résistance étant constante n'a pas d'inconvénient et peut d'ailleurs être compensée par un réglage de l'oscillateur. L'erreur d'extrémité n'intervient pas non plus si le jeu de roues dentées est choisi convenablement. Il reste l'erreur de linéarité dont l'incidence sur la fréquence F dépend de la relation $F(R)$, laquelle est approximativement :

$$F = 5 R + 15\,000$$

puisque F doit varier entre 15 000 et 20 000 Hz lorsque R croît de 0 à 1 000 ohms.

On a donc :

$$\Delta_1 F = 5 \Delta R.$$

Or : $\frac{\Delta R}{R} \leq 3 \times 10^{-5}$ d'après le constructeur, soit : $\Delta R \leq 3 \times 10^{-2}$ ohms, pour $R = 1\,000$ ohms.

D'où :

$$\Delta_1 F \leq 0,15 \text{ Hz.}$$

Il apparaît donc que l'imprécision ΔF n'est due que pour une très faible part à l'erreur de linéarité du potentiomètre et doit être principalement imputée à l'oscillateur.

De fait, on a observé que la fréquence fournie par l'oscillateur n'était pas indépendante de la température ambiante. Lors de l'étalonnage, la variation de température a été suffisamment faible pour que ΔF atteigne à peine 5 Hz. Pour la suite de l'expérience, la variation de température du local climatisé a approché de $\pm 2,5$ °C. Pour cet écart de température, on a mesuré une variation de fréquence $\Delta_2 F$ d'environ ± 10 Hz, à laquelle correspond une imprécision Δh de l'ordre de 0,7 et 2,2 cm respectivement pour le 1^{er} et le 2^e jeu de roues dentées.

5.4. RÉSULTATS DES TRANSMISSIONS PAR SATELLITE

Les hauteurs limnimétriques H' transmises par le satellite, au cours de l'expérience, c'est-à-dire les hauteurs décodées à partir des fréquences F' reçues à Brétigny, ont été comparées aux hauteurs H affichées au limnigraphe.

Il est à noter que le répondeur divise par deux la fréquence F fournie par l'oscillateur et donc que la relation à utiliser pour le décodage de la fréquence F' n'est pas exactement l'inverse de la fonction de transfert, mais :

$$H' = (2 F' - 15\,212)/457 \quad (2^{\text{e}} \text{ jeu})$$

On constate (voir fig. 12) qu'il existe entre hauteurs transmises et hauteurs affichées, la relation suivante :

$$H' = 0,98 H$$

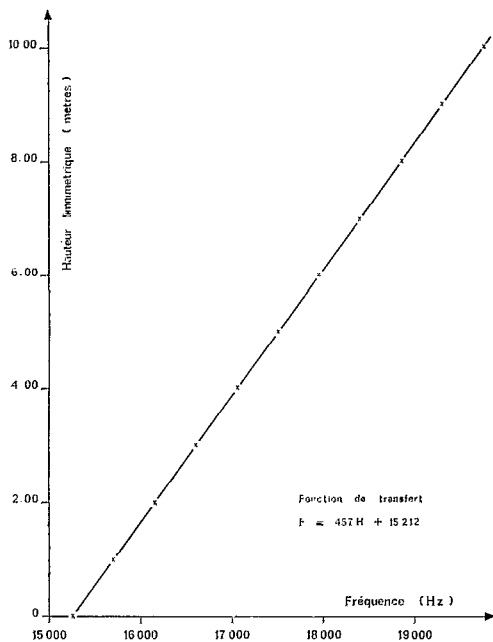
avec une erreur absolue :

$$|\Delta H'| \leq 5 \text{ cm.}$$

Cette relation montre qu'il y a entre H' et H un écart systématique de 2% dont la cause est mal élucidée. On a vérifié qu'il n'était pas dû à l'imprécision du fréquencemètre utilisé pour l'étalonnage du capteur, ni à un changement de tension continue d'alimentation de l'oscillateur (alimentation en 12 volts stabilisée par diode et résistance de 12 000 ohms). Peut-être cet écart est-il imputable au système de numération du satellite, ou à une dérive de son horloge, ou encore au mode de traitement des données reçues à Brétigny. Quoiqu'il en soit, cet écart n'a pas d'inconvénient pratique dans la mesure où il est véritablement systématique et ne varie pas avec le temps, ce qui aurait demandé à être vérifié sur une période plus longue que la durée de l'expérience.

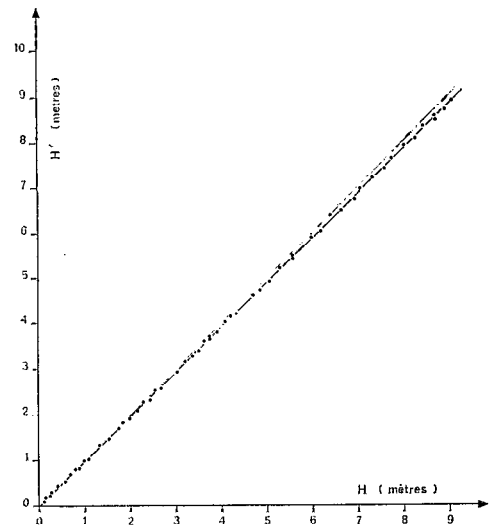
En ce qui concerne l'erreur aléatoire $\Delta H'$, dont la valeur absolue a été trouvée inférieure ou égale à 5 cm, il est intéressant d'en rechercher les causes :

a) l'erreur de linéarité du potentiomètre est, comme on l'a vu, pratiquement négligeable (cf. paragr. 5.3.),



Expérience de Guyane

Fig. 11. — Etalonnage du capteur (2^e jeu de roues dentées)



Expérience de Guyane

Fig. 12. — Relation entre hauteurs limnimétriques affichées au limnigraphe (H) et transmises par satellite (H')

b) la fréquence fournie par l'oscillateur varie légèrement avec la température ambiante (cf. fin du paragr. 5.3.), d'où :

$$|\Delta H'_1| \leq 2,2 \text{ cm.}$$

c) le répondeur n'introduit pas d'erreur appréciable à condition que son alimentation soit assurée à une tension constante à $\pm 5\%$ près, ce qui a été le cas,

d) la fréquence F' , comprise entre 7,5 et 10 KHz, est transformée dans le satellite en un nombre compris entre 0 et 128. Le pas de numération ($2\,500 \text{ Kz}/129 = 19,4 \text{ Hz}$) conduit à une incertitude d'environ $\pm 10 \text{ Hz}$ sur F' , qui se traduit par une erreur sur H' :

$$\Delta H'_2 = \frac{2 |\Delta F'|}{457} \times 100 \leq 4,4 \text{ cm.}$$

On en déduit finalement :

$$|\Delta H'| = |\Delta H'_1| + |\Delta H'_2| \leq 6,6 \text{ cm.}$$

Cette valeur recoupe assez bien celle obtenue expérimentalement. Rappelons qu'elle s'applique aux conditions suivantes :

- amplitude des hauteurs limnimétriques mesurées : de 0 à 10,4 m (2^e jeu de roues dentées),
- variations de température ambiante : $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dans le cas où les hauteurs d'eau transmises ne seraient pas simulées en laboratoire comme dans l'expérience de Guyane, mais réellement mesurées par un limnigraphe du réseau hydrométrique, il y aurait lieu de tenir compte également de l'écart ΔH entre la hauteur affichée au limnigraphe et la hauteur limnimétrique vraie du cours d'eau.

En supposant le batillage bien amorti, cet écart ΔH peut s'exprimer (en cm) comme suit :

$$|\Delta H| = \frac{C}{\omega \text{ Sr}}$$

avec les notations suivantes :

C couple de frottement de la poulie d'entraînement du limnigraphe (en $\text{cm} \times \text{g}$),

- r rayon de la poulie (en cm),
- S section du flotteur (en cm²),
- σ poids spécifique de l'eau (1 g/cm³).

D'après le constructeur, ΔH a, par exemple, une valeur de 3 mm pour un limnigraphe OTT, de type XX, avec échelle de réduction de 1/10 et flotteur de 110 mm de diamètre, sans équipement de télétransmission (soit $C/r = 30$ g). L'adjonction d'un potentiomètre augmente le couple de frottement. Il en résulte un accroissement de l'imprécision ΔH à moins que la section du flotteur soit augmentée dans le même rapport que le couple de frottement.

5.5. CONCLUSIONS

L'expérience s'est révélée probante. D'une part, les hauteurs limnimétriques ont été transmises avec une précision de 5 cm qui, sans être excellente, pourrait convenir dans la plupart des cas.

D'autre part, la périodicité et la régularité des transmissions répondent assez bien aux objectifs envisagés pour la collecte de données par satellite.

En fait, le satellite EOLE effectuait quatre passages en 24 heures au-dessus de la station, à des sites variables. Seuls les sites supérieurs à 20° permettaient une bonne transmission. On a ainsi obtenu, en général, une à deux transmissions correctes par jour, ce qui serait suffisant pour les stations hydrométriques du réseau guyanais. Il est arrivé cependant que les transmissions soient interrompues pendant des périodes relativement courtes et assez rares : périodes de vérification du bon fonctionnement du système EOLE et périodes de « plein soleil » pendant lesquelles le satellite est surchauffé.

Dans les années à venir, le CNES envisage l'utilisation de satellites (Tiros, Meteosat) dont la périodicité et le délai de transmission des données seraient mieux adaptés qu'EOLE aux stations à débits rapidement variables et à la prévision des crues.

L'expérience de Guyane a été réalisée dans les conditions artificielles d'un local climatisé. Pour qu'elle puisse être transposée aux conditions naturelles des stations hydrométriques en climat équatorial, il faudrait disposer d'un oscillateur et d'un répondeur supportant des températures de 15 à 45 °C et des humidités de 40 à 100%. Ce problème qui a déjà été évoqué précédemment (paragr. 4.5.), ne poserait pas de difficultés techniquement insurmontables.

Ce problème résolu, de nouveaux capteurs pourraient être étudiés pour d'autres paramètres physiques intéressant l'hydrologie : hauteurs de précipitation, température de l'eau, turbidité, salinité, teneur en oxygène dissous, etc.

6. REMERCIEMENTS

Nous ne pouvons terminer cet article sans mentionner le soutien technique très efficace qui nous a été apporté par le personnel CNES et SODETEG des stations spatiales de Brazzaville et de Kourou, et tout particulièrement par MM. LAMARQUE et GUERNEC. Qu'ils en soient vivement remerciés.

L'expérience réalisée au Congo n'aurait pu également avoir lieu sans la participation très active de M. R. CHARTIER qui en a été l'initiateur et sans la collaboration de M. R. GATHELIER, tous deux techniciens hydrologues de l'ORSTOM.