



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES



Sciences Techniques Jeunesse

ASSOCIATION NATIONALE SCIENCES TECHNIQUES JEUNESSE

S e c t e u r E S P A C E

16 Place Jacques Brel - 91130 RIS ORANGIS

Téléphone : 01-69-02-76-10 / Télécopie : 01-69-43-21-43

E-Mail : espace@anstj.mime.univ-paris8.fr

Web: <http://anstj.mime.univ-paris8.fr>

Edition Octobre 1999

Radio-navigation et GPS

Note technique ANSTJ

RADIO- NAVIGATION ET GPS

La description des systèmes de

navigation n'entre pas dans le cadre

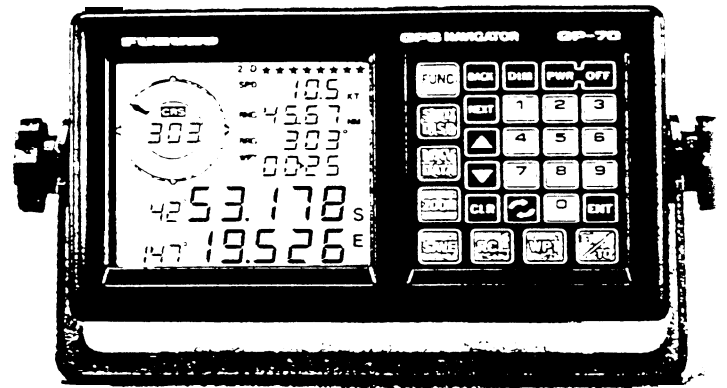
habituel des sujets d'ERP; c'est en

raison de l'originalité du système de

transmission des informations GPS que

nous vous proposons les lignes qui

suivent.



De tout temps, le navigateur (sur mer et dans les airs) a cherché à connaître sa

position. De nombreuses méthodes ont été utilisées, certaines remontent à

l'antiquité et sont encore employées, mais aujourd'hui, le rêve du navigateur:

– connaître sa position sur l'ensemble du globe – est exaucé. Il s'appelle GPS

(Global Positioning System) et nous vient du Nouveau Monde.

Historique

Le relevé d'amers (la nuit : les phares) constitue avec le **repérage visuel** la plus ancienne **des méthodes**, les étoiles, le soleil et la lune ont été et **sont** encore utilisés. Des **méthodes** de calculs simples permettent une seule évaluation de la position par jour en effectuant le relevé de la hauteur d'un astre. Avec d'autres méthodes, nécessitant l'utilisation de tables, remplacées maintenant par les calculatrices programmables, le point peut être fait à n'importe quelle heure, la précision cependant de la virtuosité du navigateur au maniement du sextant. En connaissant son cap et sa vitesse, une estime est toujours possible. Toutefois, ces deux paramètres sont entachés de nombreux erreurs, la méthode porte donc bien son nom.

En haute mer, l'erreur sur la position ne constitue pas un risque pour le bâtiment ; proche des côtes, il en est tout autrement. Le relevé de plusieurs amers offre une bonne précision, toujours actualisé mais pas dans le

brouillard... Il reste l'estime entre les bouées... La radio est venue au secours du navigateur, la radiogoniométrie (les radio-phares) puis les **systèmes** plus sophistiqués (DECCA, LORAN...) donner une position même dans le brouillard. La précision diminue avec la distance qui sépare l'émetteur du mobile. L'OMEGA, système américain, a une couverture mondiale, la précision dépend du site et du temps... Les aéronefs utilisent des systèmes très sophistiqués (ILS...) destinés à l'approche. La radiogoniométrie en onde moyenne disparaît, elle subsiste en VHF à l'envers !, les ports et les tours peuvent «tirer» un navire perdu en lui demandant d'émettre sur sa «VHF», il devient le phare, le relevé lui donne la route à suivre. Pour obtenir une bonne précision avec ces systèmes, il faut mailler le territoire, cela nécessite un nombre d'émetteurs important, le coût de maintenance l'est aussi. Avec seulement 24 satellites nous allons pouvoir bénéficier d'une très bonne précision sur toute la planète, voici comment...

LE GPS

Le NAVSTAR, GPS a été développé en 1973, à destination de la marine et de l'aviation américaines au; souhaitent détenir un système global de navigation. Il existe deux GPS, un civil et l'autre militaire. Les produits civils de taille très réduite profitent de la maîtrise acquise avec les systèmes militaires. Les prix varient seulement en fonction des options, la taille est toujours réduite : de l'ordre d'un gros paquet de cigarettes. Bientôt, pour 5000 F, vous pouvez connaître exactement votre position. Faire **apposer** sa longitude et sa latitude sur sa carte de visite constituera bientôt la meilleure méthode pour que vos nouveaux amis vous retrouvent ! Pour bien comprendre le fonctionnement du GPS, il nous faut commencer avec un peu de géométrie, puis nous verrons le principe de codage, qui est très surprenant.

Problème de géométrie

Le système GPS est passif, il n'émet aucune information, il reçoit **seulement des** signaux émis par les satellites. Le récepteur reçoit les éphémérides des satellites, il connaît parfaitement leur position. Ceux-ci tournent sur une orbite quasi circulaire, à une altitude de 20183 km environ (figure 1). Les

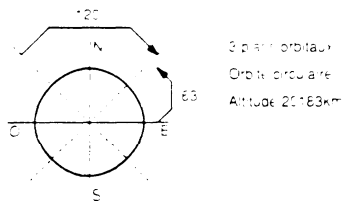


Figure 1: position de 5 plans orbitaux de 5 satellites.

vingt-quatre satellites sont répartis sur trois plans, dans le même plan ils ont un écart de 45 degrés, les trois plans sont distants de 120 degrés, et sont inclinés de 63 degrés par rapport au plan de l'équateur. Tous les satellites sont synchronisés par une horloge atomique. Ces satellites pèsent 500 kg et consomment 400 W environ. Au sol, la station maîtresse située en Californie reçoit et transmet aux stations de poursuite situées à Hawaï, Guam (une île) et en Alaska, les mesures et les nouvelles éphémérides (figure 2). Pour définir une position dans l'espace il

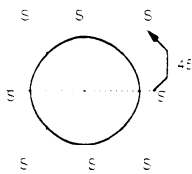


Figure 2: répartition des 8 satellites sur un plan orbital.

nous faut trois équations indépendantes. Tous les satellites envoient en même temps une impulsion, le récepteur les reçoit et les écarts de temps entre les impulsions donnent les écarts de distance qui séparent les satellites les uns des autres par rapport au récepteur (figure 3). Connaissant ces

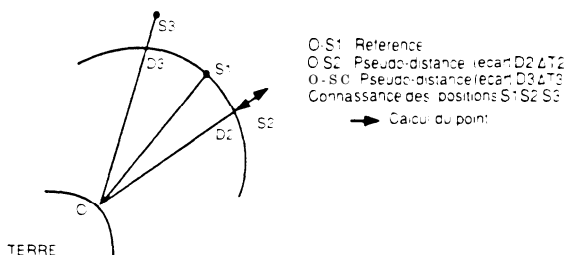
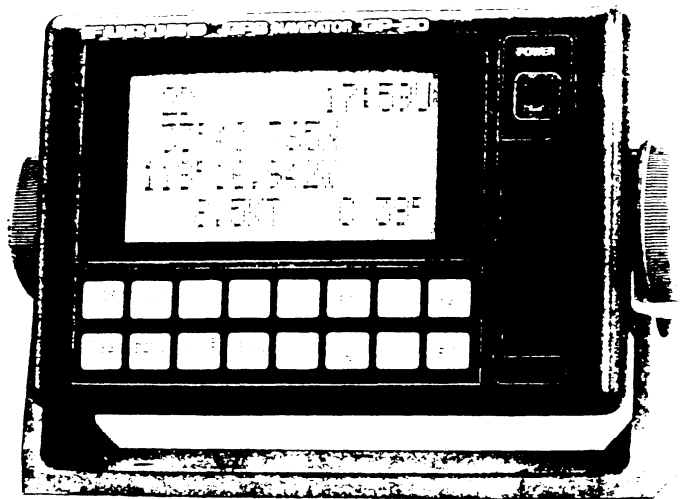


Figure 3: le point par la mesure des pseudo-distances.

pseudo-distances et la position des satellites, le système d'équations permet de trouver la position du récepteur. Pour avoir une bonne précision, il faut

que l'erreur sur la mesure des pseudo-distances soit la plus faible possible, hors un récepteur de poche ne peut pas être équipé d'une horloge atomique, cette erreur est considérée comme une autre inconnue; bien que le point soit possible avec seulement trois satellites, quatre satellites sont utilisés. Les calculs trigonométriques peuvent donner plusieurs solutions (à plusieurs centaines de kilomètres de distance); le lever de doute est réalisé en prenant la solution la plus proche du dernier point (fait toutes les secondes). A la fin de ce chapitre nous savons que le récepteur doit recevoir des tops ainsi que les éphémérides, voyons le codage du système.

Le signal reçu est mélangé avec le signal généré par le récepteur. Si le signal du satellite est présent, il sera sorti du bruit par ce mélange, dans l'autre cas, il ne restera que du bruit... Les satellites possèdent des générateurs pseudo-aléatoires (du bruit), ce sont des registres à décalage rebouclés sur eux-mêmes selon une équation qui caractérise le générateur, ainsi chaque satellite a sa signature. Sur le système civil, le registre a une taille de 1024 bits, le débit est de 1,023 Mb/s, c'est un code court d'acquisition grossier - coarse - C/A : 25 m). Le militaire est émis avec un débit de 10,23 Mb/s; à une période bien plus longue, il est ré-initialisé chaque semaine, ce débit et la



Un des récepteurs GPS Furuno.

Le décodage du GPS

Tous les satellites émettent sur deux fréquences, L1 : 1575 MHz et L2 : 1227 MHz. Ces deux fréquences ont été choisies pour que les spectres des signaux ne se recouvrent pas et afin d'effectuer les corrections relatives à la propagation. Les appareils civils utilisent seulement L1 (figure 4). Bien entendu tous les satellites émettent en même temps... En général, ce préambule crée un certain froid car comment se retrouver dans cette cacophonie? Sur ces deux fréquences, un récepteur « normal » ne verra que du bruit... La réception est basée sur l'uti-

taille du registre permettent une protection du code, la précision espérée du positionnement passe à 30 cm !

Le code C/A

Restons sur le civil. Lorsque le récepteur souhaite recevoir le code d'un satellite, il génère la même séquence aléatoire, malheureusement il y a de forte chance que le code ne soit pas détecté par le corrélateur car les deux

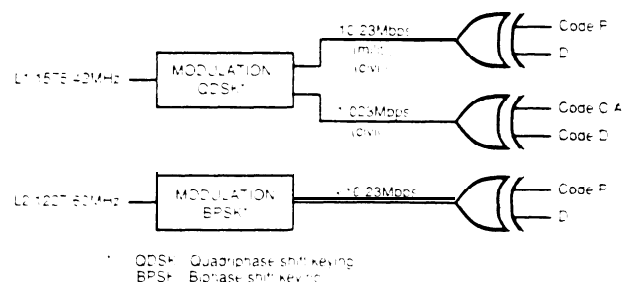


Figure 4: structure des signaux émis.

lisation de corrélateurs, ils déterminent la qualité d'identité de deux signaux. Le récepteur génère une répétition du signal du satellite à recevoir.

sequences ne sont pas synchronisées. Au bout d'une milliseconde, le récepteur décale la séquence d'un bit (figure 5), et recommence, il y a 1024 pos-

sibilités, donc après un maximum de 1024 ms (1 seconde environ), il doit avoir trouvé la synchronisation avec le satellite. S'il ne trouve pas ce satellite, il part à la recherche d'un autre satellite, il lui faut donc 24 secondes pour faire tout le tour des satellites ! S'il a déjà reçu les éphémérides, il peut prévoir l'emplacement des satellites, et optimiser son choix. Notre récepteur est synchronisé, il génère le code à l'identique du satellite, en même temps, toutes les 1024 ms, le passage du mot X donne le top qui va permettre la mesure des pseudo-distances. Les récepteurs modernes possèdent plusieurs chaînes de traitement, 4, 5 ou 6 satellites sont reçus en même temps, les mesures simultanées améliorent la précision. Le code pseudo-aléatoire C/A de chaque satellite est, en réalité, constitué de deux générateurs pseudo-aléatoires, ils sont initialisés à 1 et les polynômes générateurs sont connus (code civil), les signaux issus des deux générateurs sont mélangés, mais le second est décalé de N bits, ce N définit la signature du satellite, le tout forme toujours un code pseudo-aléatoire.

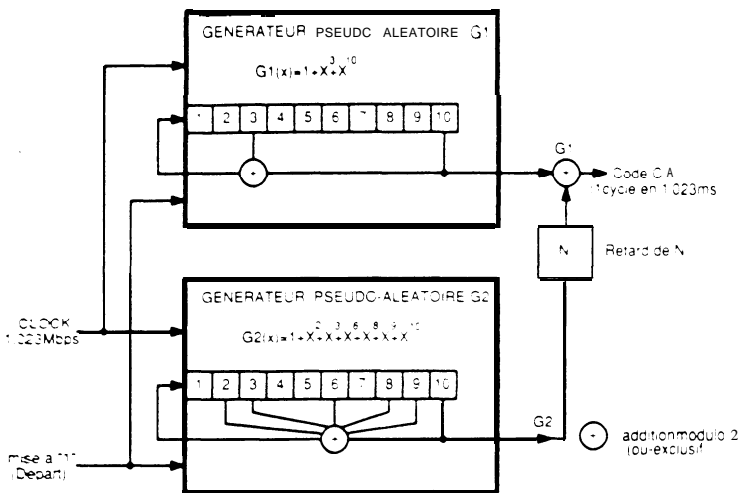


Figure 5 : fabrication du code C/A-
N : signature du satellite.

Les éphémérides

A propos, les éphémérides, où sont-elles ? Le satellite envoie les informations avec un débit de 50 bits/s, elles sont découpées en cinq sous-trames de 30 bits. Chaque sous-trame contient le mot de télémesures, le mot de passage du code C/A au code P(HOW) (figure 6). Les trois premières sous-trames contiennent les informations de corrections relatives au satellite, les deux autres les éphémérides moins précises des autres satellites. Il faut six secondes pour transmettre toutes ces informations, deux minutes et demies pour l'ensemble des 25 pages. Les données sont valides pendant quatre heures. Le faible débit est nécessaire pour obtenir une synchronisation du récepteur ; en effet, chaque transition des données inverse le code pseudo-aléatoire émis. Comme cette cadence est faible par rapport au débit du code C/A, le bon fonctionnement du corrélateur est assuré dans la phase de synchronisation. Le récepteur analyse la corrélation avec le code C/A et le code C/A inversé, les basculements des corrélateurs régénèrent le message. Le code C/A d'acquisition court est réservé au civil, le P au militaire, ils sont émis simultanément en modulation de phase sur L1. L2 émet soit C/A soit P. La vitesse (qui peut être mesurée) influe sur la précision. Le traitement du signal dans les récepteurs est assuré par des circuits spécialisés, leur fonctionnement reste encore secret, concurrence oblige. La synchronisation et la poursuite de la séquence nécessite l'utilisation de boucles d'asservissement sophistiquées. Au niveau analogique, par exemple, les têtes HF doivent être protégées contre des surcharges provoquées par les impulsions radar qui émettent dans des bandes de fréquences proches de celles du GPS. Les fréquences L1, L2 et les débits sont dans des rapports entiers de 154 et de 120 f (f = 10,23 MHz).

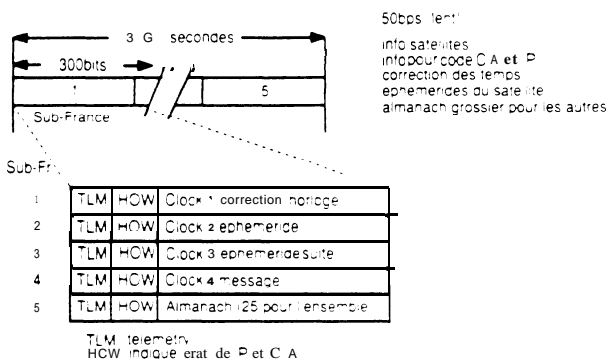


Figure 6 : contenu du message D
(éphémérides, synchronisation...).

Le code P

Le débit est plus important, il est réservé aux militaires ; là encore deux générateurs pseudo-aléatoires sont utilisés, toutefois les polynômes générateurs ne sont pas connus ! La synchronisation se fait aussi par glissement d'une réplique, pour que cela ne prenne pas trop de temps, le code HOW envoyé dans les messages donne une indication sur l'état du générateur P. L1 et L2 sont utilisées, un recouplement est possible, les récepteurs sont conçus pour fonctionner sur des avions se déplaçant rapidement. La précision de ces systèmes est inconnue.

L'originalité du GPS

Transmettre un signal qui ressemble à du bruit, mais dont il est possible de distinguer l'émetteur et d'isoler son message, constitue la caractéristique fondamentale du système. Ce dispositif assure une très bonne protection de l'information contre les parasites, mais le débit est faible. Le spectre de transmission étant large, on peut considérer que l'information est dupliquée dans tout le spectre du signal.

Aspect physique

Transmettre des informations avec du bruit semble un peu étrange, voici une manière d'appréhender le phénomène.

ne. Avec ce système, nous possédons le même message que le satellite ; à chaque transition du signal émis, nous nous attendons à la recevoir. Une fois, deux fois un parasite pourra la cacher, mais comme la prochaine transition arrivera après un temps «aléatoire», certaines passeront forcément au travers, d'où la synchronisation. Dans un second temps, si les transitions sont reçues à l'envers, c'est que le code a été inversé : le message apparait ! Le secteur (électrique de la maison terrienne) est le siège de nombreux parasites, la transmission d'informations (à faible débit) utilisant ce principe de transmission est à l'étude.

Position du GPS

Le GPS représente un monopole, les Russes possèdent aussi un système similaire. Prochainement, les récepteurs pourront décoder les deux systèmes. La précision est assurée par les stations américaines, qui peuvent à tout moment dégrader le système en faussant les données correctives ou les horloges ; le récepteur reçoit un indicateur de «qualité» afin que le navigateur soit tenu au courant. Une petite question subsiste : qui va payer l'entretien ? Les pays sont à peu près d'accord sur le principe. ... Des systèmes complémentaires de positionnement couplés au GPS permettront d'assurer dans une zone restreinte (entrée de port) la précision nécessaire à l'amarrage tout temps (sans avoir recours au code P!).

P. Achernard



GPS et nouvel émetteur : les premiers résultats

INTRODUCTION

Lors d'un stage technique qui s'est déroulé à Bourges fin mai 1993, nous avons voulu valider le fonctionnement sous ballon du nouvel émetteur FM conçu par Gonzague, et l'utilisation d'un récepteur GPS à bord des ballons.

Pour ne pas perdre la transmission lorsque le ballon passe sous l'horizon de la station, nous avons équipé une voiture avec une station de réception mobile capable de décoder les signaux GPS, afin de suivre en temps réel la nacelle.

Le vent fort au décollage a dégradé la nacelle, ce qui a compromis la fin de l'expérience. Le nouvel émetteur a toutefois parfaitement fonctionné pendant la plus grande partie du vol. Les résultats fournis par le récepteur GPS ont été parfaitement cohérents et auraient sans doute permis de s'approcher du ballon au sol si la télémesure avait fonctionné jusqu'au bout.

Ont notamment participé à l'expérience :

Gonzague Bosch : fabrication de l'émetteur, de la nacelle, du décodeur FSK et du récepteur embarqué.

Arnaud Colmon : préparation de l'expérience GPS, suivi de trajectoire et exploitation des résultats.

Frédéric Estellon : câblage de la nacelle, préparation de la voiture et navigation.

Yves Le Henaff : logiciel de décodage des données GPS et suivi de trajectoire

Jean Lamoure : préparation de la voiture et pilotage.

Michel Maignan : préparation de la chaîne de vol, gonflage et sprint.

club Aéro-Efrei : poursuite du ballon et aide à la récupération.

DESCRIPTION DE LA NACELLE

Description mécanique :

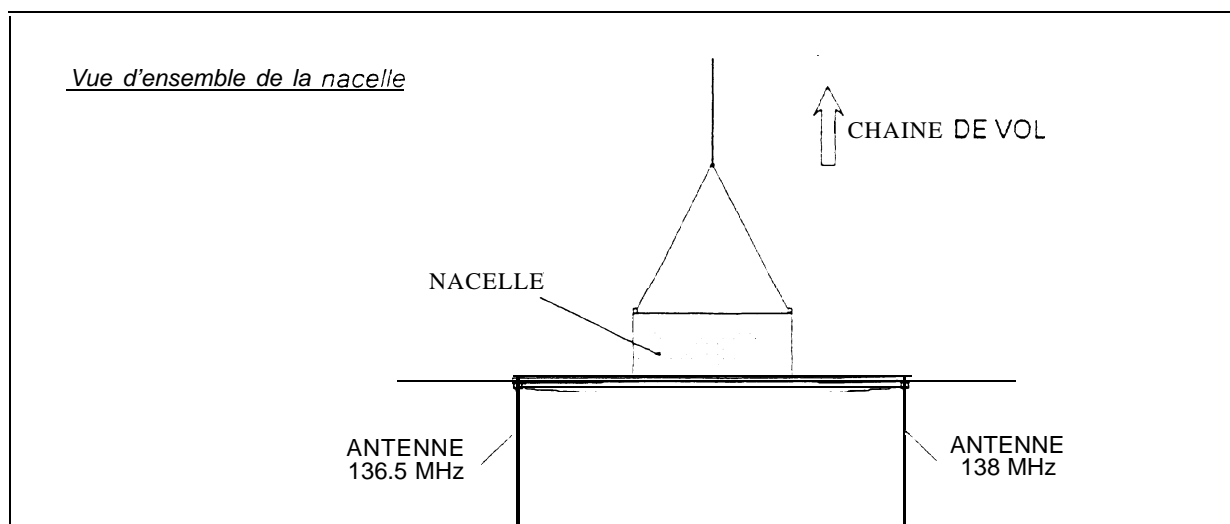
Le caisson de la nacelle renferme :

- Un émetteur IBIS - A.M. / 136.5 Mhz / 300 mW,
- un émetteur "nouvelle génération" - F.M. / 138.0 Mhz / 500 mW,
- un GPS,
- un capteur de pression,
- le codeur des signaux GPS & pression des 2 émetteurs.

Sous le caisson est fixé un bras de 1m20 de longueur sur lequel sont fixées les antennes des deux émetteurs, accordées à 136.5 Mhz et 138.0 Mhz. L'antenne du GPS est collée sur le couvercle du caisson.

GPS, vous avez dit GPS ?

Un récepteur GPS (Global Positioning System) détermine précisément sa position et sa vitesse en exploitant les signaux radios transmis par la constellation de satellites américain NAVSTAR. Un récepteur GPS embarqué sur un ballon permet donc de le localiser. En transmettant ses résultats par radio, on peut le suivre depuis le sol.



Le caisson est fabriqué en "roof-mat" (mousse de couleur bleue utilisée généralement dans la construction des ballons).

Construction des antennes :

Les antennes sont du type "Ground Plane" à $\lambda/4$, elles sont constituées chacune d'un plan de masse composé de trois radians de 50 cm de longueur disposés à 120° et du brin rayonnant calibré avec un TOSmètre. Le gain de ce type d'antenne est de l'ordre de 0 dB.

Aspect électronique :

Nous ne rentrerons pas dans le détail du fonctionnement d'élément comme les émetteurs ou le GPS, par contre on trouvera ci-après un bref résumé de l'interfaçage de ces équipements.

L'IBIS :

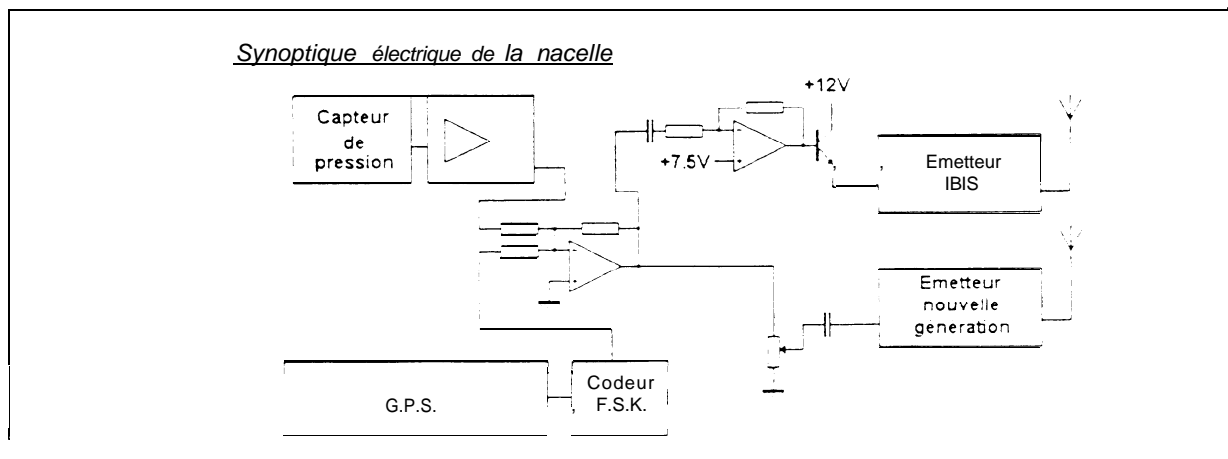
Pour moduler un IBIS, il faut lui appliquer une modulation Fm à 75 %. C'est à dire : un signal variable d'amplitude crête à crête de 9V superposé à un signal continu de 7.5V

Emetteur "Nouvelle génération" :

Cet émetteur nécessite un signal variable de 100mV efficace avec ou sans signal continu - l'entrée de l'émetteur est découplée.

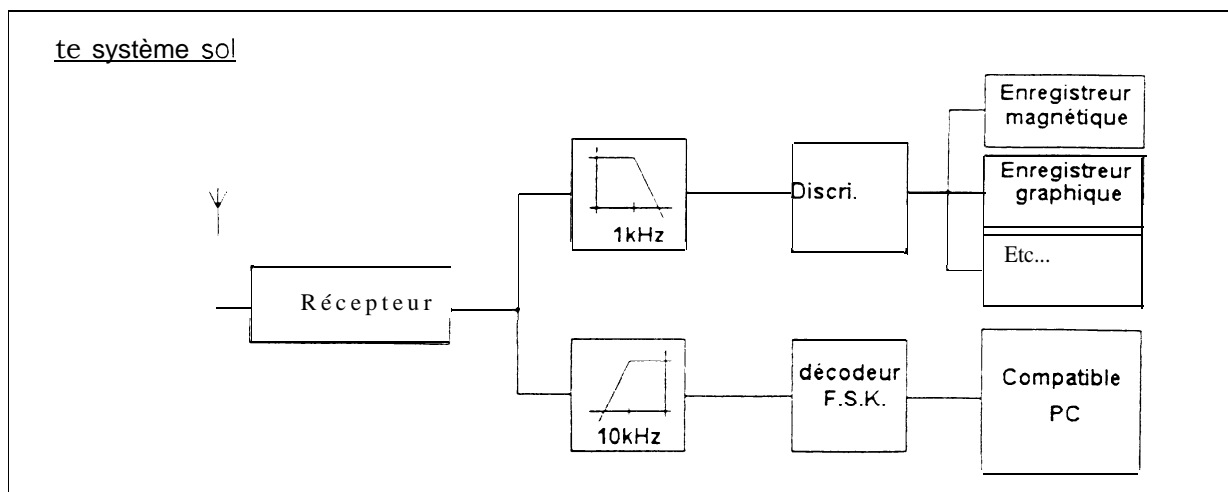
Le GPS :

Lt: signal de sortie du GPS est numérique, il convient donc de coder celui-ci en FSK.



Le synoptique nous montre le codage utilisé pour cette expérimentation. Le codage de la mesure de pression est fait selon le standart IRIG (fréquence centrale de 1 KHz) et le GPS est codé en FSK avec les fréquences 15 kHz / 25 kHz.

Le tout est additionné par un ampli. op. et mis au standart de chaque émetteur.



On notera que les deux voies (IRIG et GPS) seront dissociées au sol avec un filtre passe-haut pour la voie FSK et un filtre passe-bas pour la voie IRIG.

Pour cette expérience, étant donné l'écart entre les fréquences utilisées, des filtres passifs du premier ordre étaient suffisants. Pour des applications avec des voies IRIG d'environ 5 KHz, il sera nécessaire de mettre des filtres actifs du second ou troisième ordre.

EQUIPEMENT DE LA VOITURE

Sur le toit de la voiture nous avons fixé, via une galerie, une antenne "ground plane" à $\lambda/4$. Le coaxial entrant par une vitre arrière entre-ouverte. Entre les deux passagers arrière, nous avons empilé un récepteur, un filtre passe-haut, un démodulateur FSK et un PC portable. L'ensemble avait été modifié pour s'alimenter en 12 V. Nous avons utilisé la prise allume-cigare de la Golf de Jean pour alimenter l'ensemble. Ne pas oublier de faire le plein avant de partir.

Nous avons emporté toutes les cartes IGN au 1:110 000ème couvrant un rayon de 200 km autour de Bourges. Ce sont les cartes à plus grande échelle sur lesquelles les latitudes et longitudes

sont reportées. Un atlas des routes de France permettait la navigation routière.

Remarque : sur les cartes françaises, les coordonnées géographiques sont données en grades pour la latitude et en grades par rapport au méridien de Paris pour la longitude. Un récepteur GPS donne des degrés pour la latitude et des degrés par rapport au méridien international pour les longitudes. Quelques calculs sont nécessaires en temps réel pour exploiter les résultats.

Nous disposions d'un récepteur GPS portable pour approcher du ballon après l'atterrissage.

DEROULEMENT DU VOL

Après avoir réglé les derniers problèmes techniques, le ballon a été lâché depuis Les Moreaux (à 10 km au nord-nord-ouest de Bourges) à 16 H 18 TU (ou 18 H 18 locale). Le vent au sol était trop élevé pour que l'opération se déroule correctement, et malgré les talents de "sprinter tout terrain" de Michel, la chaîne de vol ne s'est pas suffisamment redressée pour éviter à la nacelle de heurter le sol. Une partie des antennes a été perdue lors de ce choc, et la configuration générale de la nacelle a été assez dégradée. Vue de loin pendant quelques instants, la nacelle semblait s'être séparée du bras portant les antennes, celui-ci n'étant plus retenu que par les câbles d'antenne.

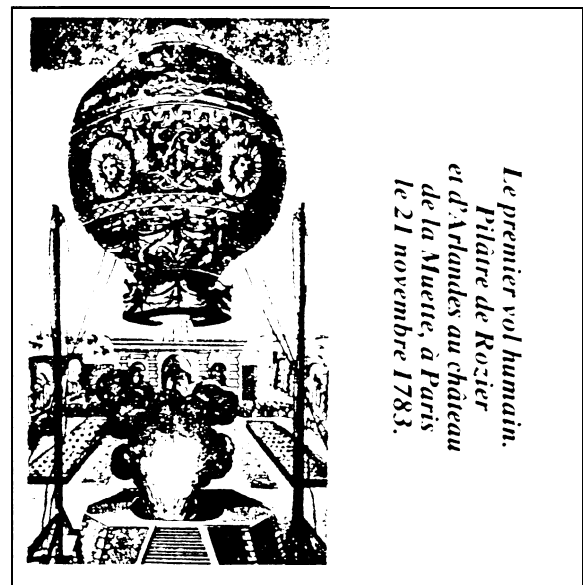
Cependant, la station indiquait une réception correcte et il fallait commencer immédiatement la poursuite en voiture.

Le cap suivi par le ballon, mesuré par le GPS et affiché dans la voiture était conforme au cap prévu par le sondage météo. Nous avons donc suivi la route préparée à l'avance, vers l'est. La route étant peu fréquentée et suivant à peu près le cap du ballon, nous avons pu le suivre pendant 45 minutes avec en moyenne 3 à 5 km de retard.

A bord de la voiture la quantité de travail ne manquait pas. A l'arrière, Yves et Arnaud calculaient la position du ballon et la reportaient sur une carte topographique. Yves préparait également des messages écrits pour informer la seconde voiture. A l'avant, disposant de la position actuelle du ballon et de son cap, Frédéric choisissait la meilleure route et guidait Jean, notre chauffeur. Dès que la route le permettait, nous ralentissions pour transmettre un message à la seconde voiture, qui le retransmettait par CB à la troisième. En cas d'évé-

nements, la troisième voiture devait s'arrêter pour prévenir par téléphone la station fixe, puis nous rejoindre guidée par la CB de la seconde voiture.

Remarque : pour une future expérience, penser à emporter dans la voiture une règle de 30 cm et non pas de 40 cm, qu'il est impossible de manipuler à l'arrière d'une voiture.



Au bout d'une demi-heure, un phénomène imprévu s'est produit : il est impossible en roulant vite sur une petite route de campagne qui zigzague dans les deux dimensions de se concentrer sur un écran de PC, un écran de calculatrice, une carte, une règle... en oubliant complètement le paysage pendant aussi longtemps, le mal de mer semble inévitable. Surtout que pendant ce temps le ballon rencontra des vents plus forts, obligeant notre chauffeur à accélérer pour ne pas se faire distancer. Les

secousses augmentaient et nous avons surpris nos stylos en apesanteur en passant certaines bosses. Nous avons été obligé de ralentir la cadence de réactualisation de la position du ballon sur la carte. Cela n'a pas posé de problème car le cap était bien stabilisé et la trajectoire était sans surprises.

Nous n'avons pas pu éviter Sancerres et nous avons été ralenti pendant plusieurs minutes lors de la traversée de la ville (Apparemment il y avait une fête de la vigne, et les mauvaises langues nous ont soupçonnées d'avoir pris le temps d'y participer). Pendant ce temps le ballon accélérail, poussé par des vents de 100 km/h vers l'est. Il nous a distancé de plus de 30 km.

Nous avons maintenu quelques temps cet écart constant, puis atteignant 25000 mètres d'altitude, le ballon a rencontré des vent moins rapides. Il s'est progressivement stabilisé à la verticale de Menou. Il y a passé environ 20 minutes en mon

tant presque verticalement.

Nous avons rattrapé le ballon, puis avons décidé de le dépasser d'un dizaine de kilomètres. Nous pensions en effet que l'éclatement était proche et qu'il rencontrerait à nouveau pendant sa descente des vents le poussant vers l'est. Nous l'avons attendu au lieu dit "Les Mez". Le ballon a alors commencé à s'éloigner très lentement vers l'ouest, mais nous n'avons pas bougé étant certains d'être sur son chemin pendant la descente. A 20 H 11 nous avons remarqué sa descente et avons commencé à évaluer son point de chute, quand nous avons perdu la transmission. Le lieu où nous attendions étant légèrement encaissé, nous sommes retourné vers la Chapelle-St-André en espérant pouvoir retrouver la transmission, mais sans succès. Un appel téléphonique à la station fixe nous a appris qu'ils avaient également perdu le lien et il ne nous restait plus qu'à rentrer.

EXPLOITATION DES RESULTATS

Pendant le vol nous ne disposions que d'un moyen d'enregistrement des résultats : le démodulateur FSK associé au PC portable, embarqués dans la voiture. La station fixe n'avait pas de démodulateur FSK, ni de magnétophone. Il n'y a donc pas d'exploitation possible de la voie IRIG de pression. Ce paragraphe ne concerne donc que les mesures GPS transmises en numérique. Nous utilisons la transmission FM, avec l'émetteur de Gonzague.

Qualité de la réception

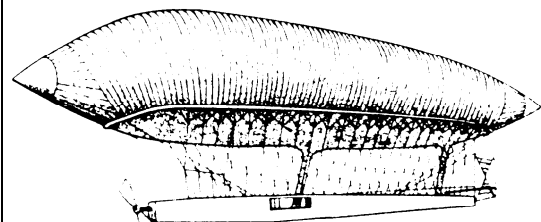
La réception était de bonne qualité en général, surtout en tenant compte de cette première expérience de station de réception mobile. C'était également notre premier essai de transmission numérique à 9600 bauds. Chaque octet était protégé par un bit de parité. Chaque trame était protégée par une checksum. Toute trame comportant au moins une erreur de parité ou une erreur de checksum était rejetée. Dans ces conditions, en environnement dégagé, presque toutes les trames étaient acceptées. Lors de traversées de zones urbaines ou de zones boisées, on récupérait encore généralement au moins une trame sur 5.

La trame affichée ayant alors une très forte probabilité d'exactitude, et les trames arrivant normalement au rythme de 1 Hz, nous avons le plus souvent une mesure de position au moins toutes les 5 secondes. Compte tenu de la faible vitesse de déplacement d'un ballon (au moins pendant la phase ascensionnelle), cette finesse de mesure est très satisfaisante.

102 secondes après l'éclatement, nous avons perdu la transmission du ballon. La station sol ayant perdu le contact à la même heure, le problème semble venir de la nacelle. La réception de l'ibis (le second émetteur embarqué) a cessé au même instant.

Le fonctionnement technique de la station de réception embarquée est donc très satisfaisant. Pour de futures expériences similaires, il faut concevoir une station ANSTJ sur ce modèle.

*Le dirigeable de Renard et Krebs,
La France, est le premier à avoir réalisé
un circuit fermé.*



Utilisation des données

Manquant de temps pour mettre au point des solutions plus élaborées, nous avons utilisé un logiciel de réception fourni par Rockwell pour faciliter la mise au point des applications utilisant leurs cartes. Ce logiciel affiche en temps réel toutes les informations du message le plus récent. Cela a permis pendant le vol de vérifier la bonne santé de l'expérience et de localiser le ballon pour le suivre.

Ce logiciel enregistre de plus sur disque les trames complètes transmises par la carte Rockwell selon un format binaire, brut de tout traitement. Cette solution a l'avantage de ne perdre aucune donnée, ce qui pour faciliter l'expertise d'un premier vol peut s'avérer intéressant. Les inconvénients sont le volume d'informations généré: 340 ko, et la difficulté du traitement de fichiers créés avec ce format. Pour des raisons de facilité d'utilisation, nous avons interrompu la liaison 4 fois pendant quelques instants, pour faire des sauvegardes intermédiaires.

Yves Le Henaff a pu mettre au point un utilitaire de transcodage, exploitant les informations d'une trame GPS lue dans le fichier Rockwell, et créant un fichier ASCII avec les informations utiles: heure, position, vitesse et status de la carte. Ce fichier ASCII a ensuite pu être lu par le tableur "EXCEL", sur lequel tous les traitements sont possibles.

En 114 minutes de transmission, nous avons reçu en moyenne une trame toutes les 2,5 secondes, soit

un total de 2650 trames environ. Cela représente un volume d'informations trop important pour être traité aisément. Le premier traitement a donc consisté à calculer la valeur moyenne de chaque paramètre pendant une tranche de 1 minute. Par exemple, tout point daté entre 16:43:00 t - t 16:43:59, participe à la moyenne du point 16:43. Les points ainsi obtenus ne sont pas tous issus du même nombre de mesures (à cause de la qualité de réception variable en fonction de l'environnement). Ils correspondent tous à une même durée: 1 minute. Un point manquait à cause d'une sauvegarde intermédiaire. Il a été reconstitué par continuité entre les deux points voisins.

Pour le calcul de la carte des vents en fonction de l'altitude, ces données traitées ne sont pas satisfaisantes. L'échantillonnage est trop grossier. La carte moyenne obtenue est sans doute proche de la réalité, mais sa précision en fonction de l'altitude laisse à désirer. Pour ce traitement, on a réexploité les fichiers bruts et calculé la position et la vitesse moyenne pour une tranche d'altitude de 1000 mètres. Tous les autres traitements ont été effectués à partir des données moyennées sur une minute.

Tous ces traitements ont été séparés en deux parties: la montée et la descente. Pour la descente, le faible nombre de points disponibles (23) et la précision nécessaire ne permettaient pas de moyenniser les mesures.

Résultats

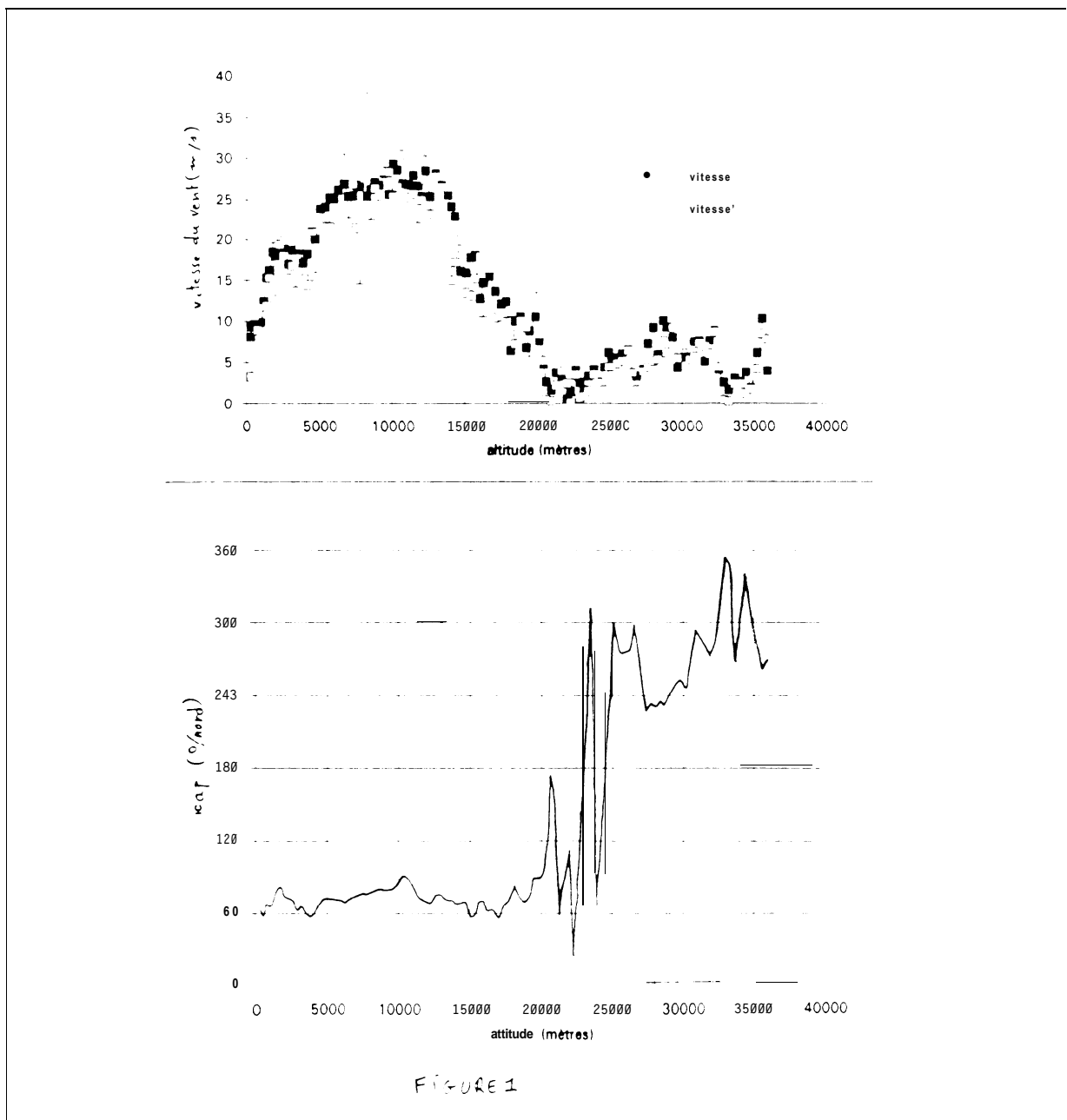
La figure 1 donne la vitesse et le cap du vent en fonction de l'altitude. Ces traitements ont été effectués sur les données moyennées par minute. La courbe "vitesse" est issue des données de vitesse fournies par le GPS, mesurées par effet Doppler. La courbe "vitesse" est obtenue par différence de deux positions successives. Les deux courbes donnent des résultats très voisins. On remarque que la moyenne des deux points successifs "aberrants" vers 7000 mètres tombe sur la courbe. Le cap moyen suivi par le ballon était de 70°, soit une direction "EST-NORD-EST", tout à fait conforme avec les prévisions météorologiques. La route préparée sur la carte pour le suivi du ballon a pu être suivie sans aucune modification.

Entre 20000 et 23000 mètres, limite des sondages météorologiques, le cap devient erratique. Mais au même moment, la vitesse est presque nulle: le cap n'a alors plus de sens. Le ballon est alors monté presque verticalement pendant 15 minutes à

2 kilomètres au nord de Menou. Au dessus de 25000 mètres, le ballon a rencontré des vents faibles le ramenant vers l'ouest (cap 270).

On remarque sur cette première exploitation la cohérence des mesures:

- * Tous les phénomènes observés sont continus (à l'inverse d'une panne qui aurait probablement fait diverger rapidement la solution).
- * Le cap et la force du vent mesurés à basse altitude sont identiques aux prévisions météorologiques
- * Si le ballon avait commencé à redescendre, il aurait rencontré des vents le poussant vers l'est. Il a donc continué à monter.



La figure 2 représente les mêmes traitements en utilisant les données moyennées par tranche de 1000 mètres. Les résultats sont assez voisins.

La figure 3 donne la vitesse ascensionnelle en fonction de l'heure TU (toutes les données sont datées par le GPS en heure TU : ajouter 2 heures pour obtenir l'heure légale française). La courbe "vup" est obtenue à partir des données de vitesse du GPS, alors que la courbe "vup'" est dérivée des mesures d'altitudes successives. Les résultats se ressemblent beaucoup et les deux courbes fournissent la même vitesse ascensionnelle moyenne : 5.3 m/s (à 10^{-3} près !).

Si on multiplie cette vitesse moyenne par le temps de mont (1 13 minutes ou 6780 secondes) on

trouve une altitude de culmination de 35934 mètres.

Cette vitesse ascensionnelle correspond au réglage recherché lors du gonflage des ballons. On remarque qu'elle augmente légèrement avec le temps. La figure 4 donne la vitesse moyenne en fonction de l'altitude, qui a évidemment la même tendance que la courbe précédente. Quand le ballon monte, son volume augmente, ce qui augmente son maître couple, mais seulement en fonction des $2/3$ de la densité de l'air. La résistance aérodynamique diminue donc avec l'altitude, ce qui explique une augmentation de la vitesse ascensionnelle.

Figure 2

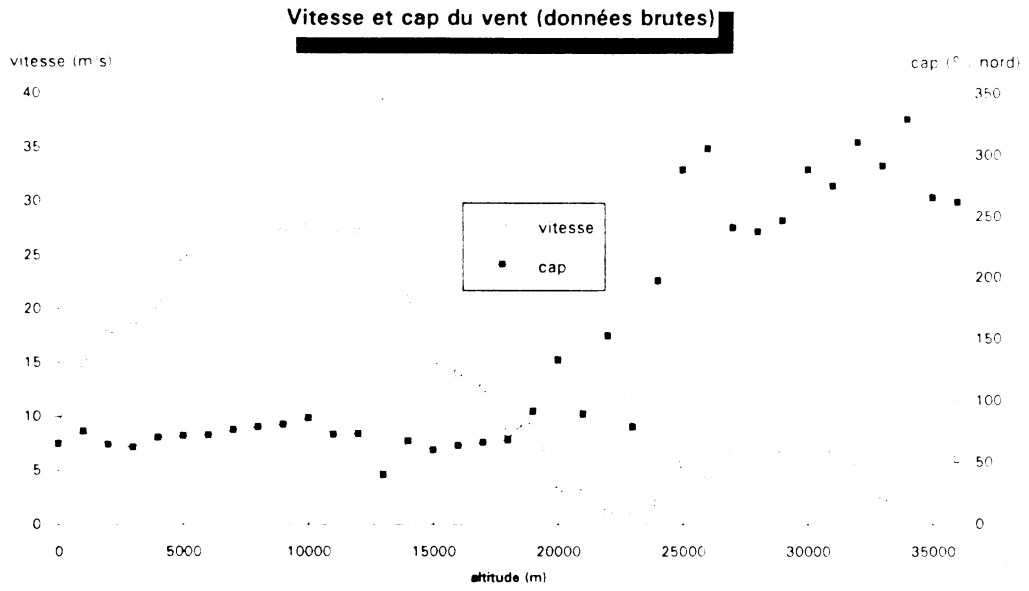


Figure 3

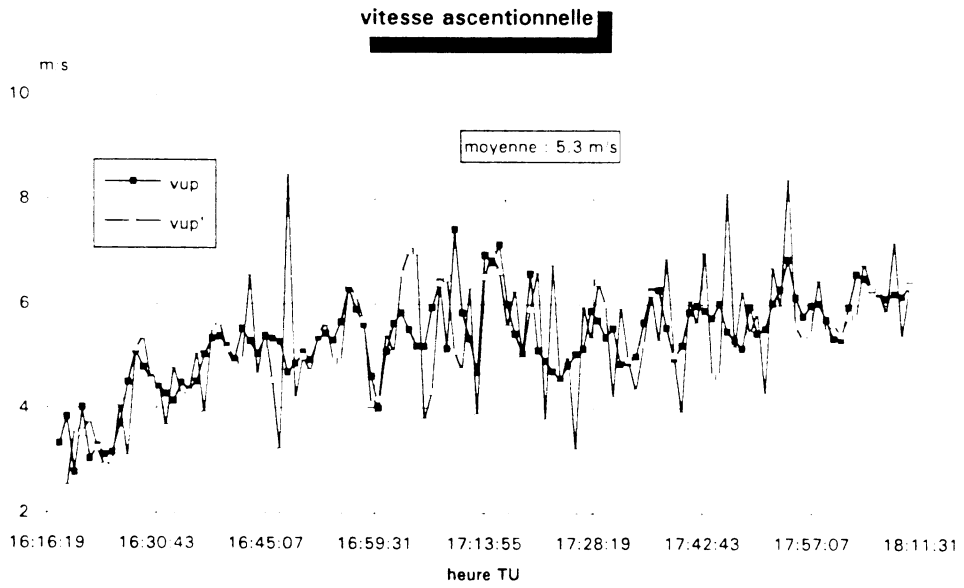
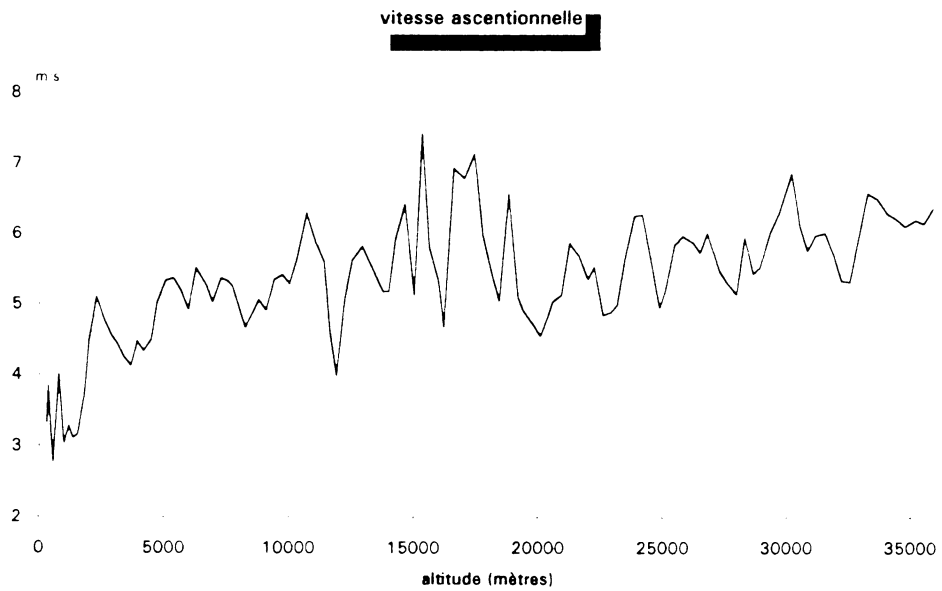
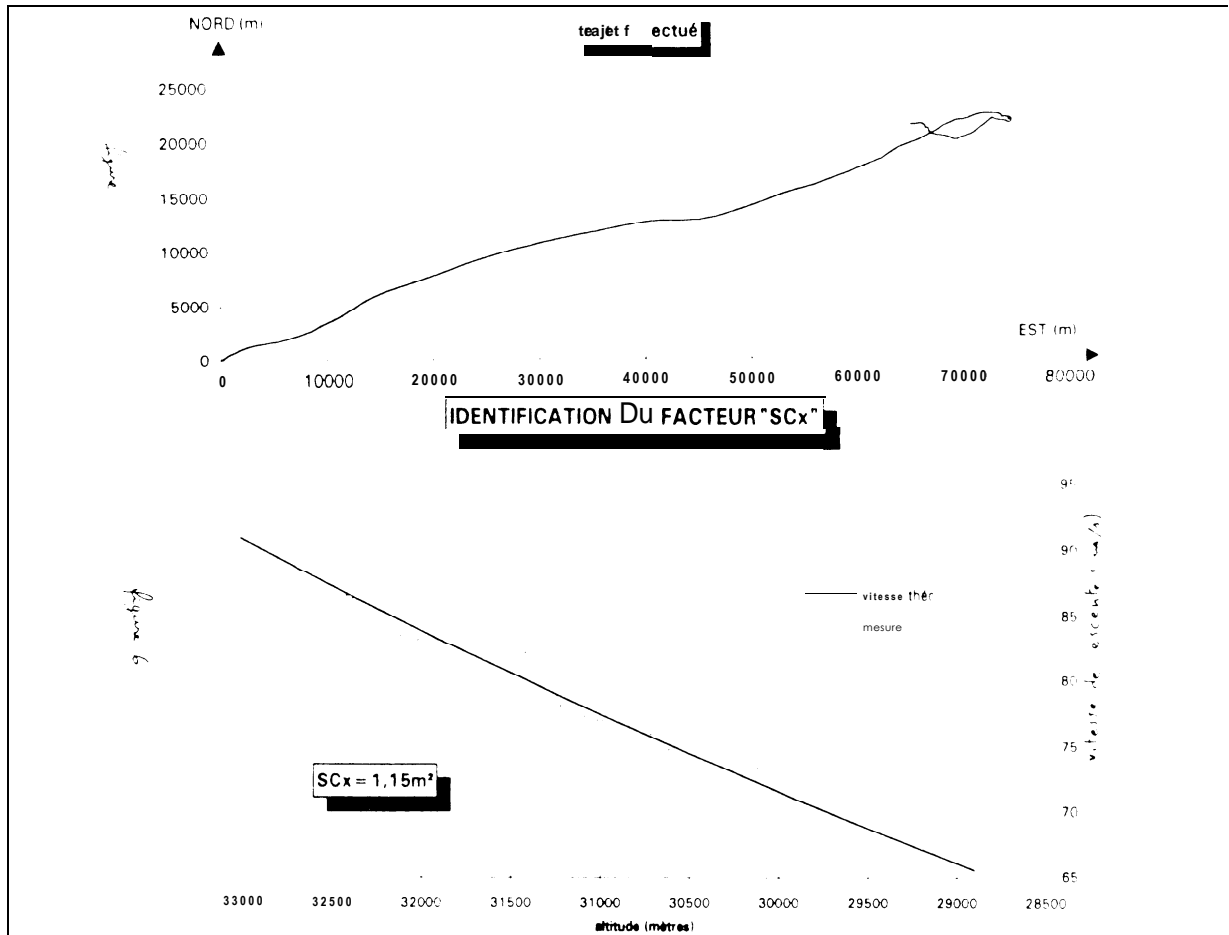


Figure 4





Descente

L'éclatement s'est produit entre 18:11:47 TU et 18:11:51 TU. A 18:11:54 TU le status GPS indique qu'il a perdu tous les satellites et qu'il cesse de produire une solution fiable. A 18:12:16 TU le status indique qu'il a recommencé à naviguer avec 4 satellites, puis à 18:12:17 TU qu'il a retrouvé 5 satellites. L'éclatement a donc perturbé le GPS pendant quelques secondes. L'hypothèse la plus vraisemblable me semble être que la nacelle s'est retournée au moment de la secousse de la chaîne de vol, orientant son antenne de réception vers la terre. Lorsque la chaîne a retrouvé une nouvelle stabilité sous parachute, le GPS a recommencé un cycle d'acquisition, qui ne dure que quelques secondes lorsque l'interruption a été brève.

Le ballon a en premier accéléré vers le bas, ce qui correspond à une phase de chute libre. Le parachute s'est progressivement déployé et le ballon a atteint une vitesse limite. Il a ensuite rencontré des couches progressivement plus denses, qui ont

ralenti sa descente. Le ballon a éclaté à 36450 mètres ; il a atteint la vitesse maximale de 92 m/s à l'altitude de 33800 mètres ; nous avons perdu la transmission à l'altitude de 28800 mètres, alors que sa vitesse était de 70 m/s.

En utilisant les quelques points de mesure et une table de l'atmosphère, on peut identifier le facteur aérodynamique "S*Cx" du ballon. C'est le but de la figure 6. On trouve $SCx = 1,15m^2$. Cette valeur est cohérente avec un Cx de l'ordre de 1, une nacelle dégradée au décollage, un écho radar, un parachute et des restes de ballon. La figure 6 montre que les points de mesure sont très proches de la courbe théorique issue d'une table atmosphérique standard. La figure 7 montre l'évolution de la vitesse de descente et de l'altitude après l'éclatement. La courbe "altitude théorique" est issue des données de vitesses du GPS. Les données "collent" parfaitement, sauf au moment de l'éclatement, quand le GPS annonce avoir perdu les satellites.

Figure 7

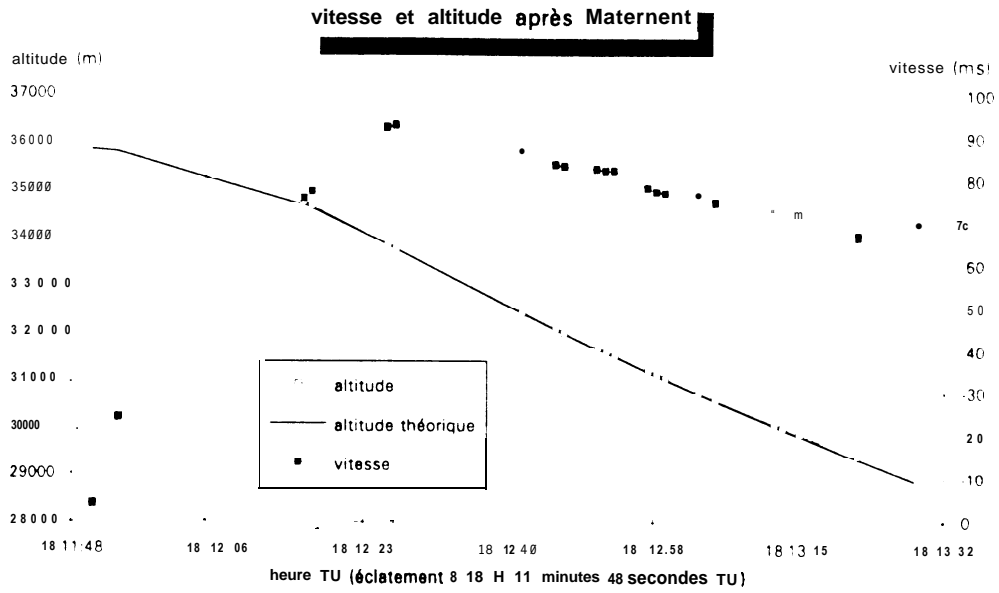


Figure 8

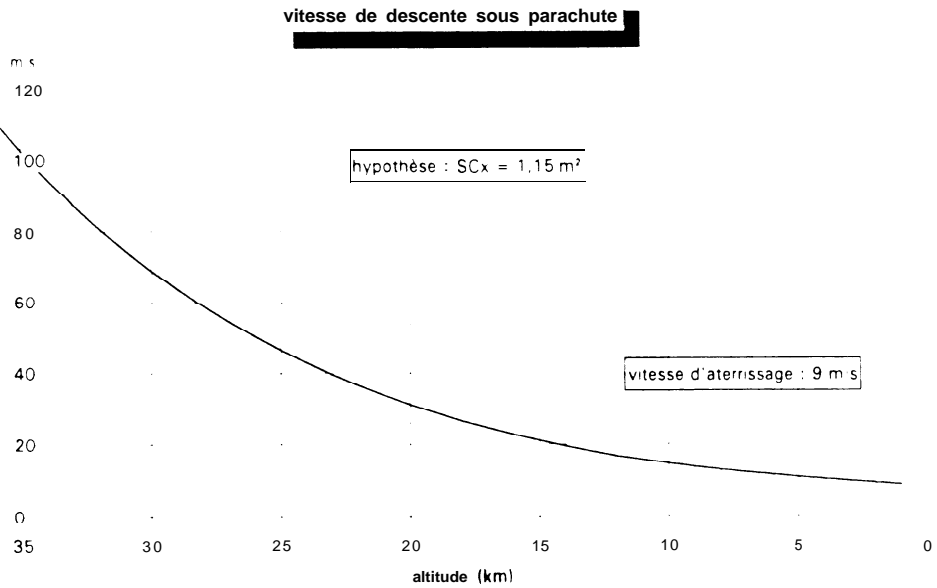
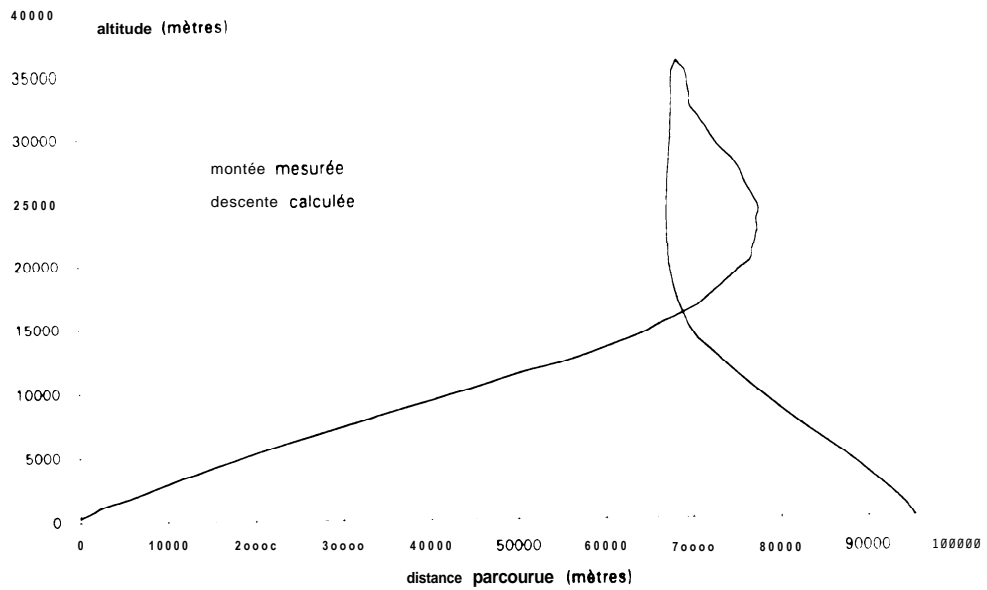


Figure 9



En extrapolant pour le reste de la descente, on peut tracer la vitesse de descente en fonction de l'altitude : voir figure 8. Avec les hypothèses précédentes, le ballon se pose à 9 m/s. Les vitesses qui semblent donc élevées à haute altitude sont donc parfaitement normales et permettent au ballon de se poser, conformément aux normes de sécurité, à moins de 15 m/s.

La figure 10 montre l'altitude du ballon en fonction de la distance à son point de départ. La trajectoire a été extrapolée des données GPS pendant la montée et en supposant que les vents n'avaient pas changé. Cette hypothèse est assez raisonnable à haute altitude. Les deux ou trois mille derniers mètres on du connaître un vent plus faible lors de la descente, l'heure tardive ayant calmé les phénomènes thermiques. On en déduit un point de chute prévisionnel. Avec ces hypothèses, le ballon a du survoler le centre de la commune de Corvol-l'Orgueilleux et se poser 6 km après.

En réalité, le ballon a été retrouvé par un agriculteur domicilié sur la commune de Corvol, mais nous ne savons pas précisément à quel endroit. Le point de chute confirme donc les mesures GPS.

La station sol a noté un changement du son provenant du capteur de pression environ 2 minutes avant la fin de la transmission. Ce changement de son juste à l'éclatement correspondrait à la descente rapide en chute libre du ballon (8000 mètres en 1 minute 30 secondes). La pression remontant rapidement, le son modulé du canal IRIG change suffisamment pour être perceptible à l'oreille. Le réglage du canal IRIG dépassait d'ailleurs largement les $\pm 7,5\%$ pleine échelle, rendant les variations plus audibles, à défaut d'être décodables.

Les données obtenues pendant le vol sont donc parfaitement cohérentes entre elles et avec les paramètres physiques accessibles. Il semble donc très probable que le ballon ait atteint 36000 mètres, ce qui surprend beaucoup. On suppose habituellement que nos ballons ne dépassent guère les 25000 mètres. Jusqu'à présent une seule mesure d'altitude précise avait été effectuée par le CAO, donnant un plafond voisin de 20000 mètres.

Plusieurs explications sont possibles :

Une erreur s'étant glissée dans la note technique concernant le gonflage des ballons, nous avions l'habitude de les gonfler de trop. Cela les fait monter plus vite, et éclater plus bas. Cette fois-ci, nous avons manqué d'hélium, et avons du lâcher le ballon peu gonflé. La correction de l'erreur faite habituellement peut augmenter le plafond d'environ 5000 mètres.

Nous n'avons aucune idée sur la dispersion de fabrication des enveloppes de ballons. La technique utilisée laisse penser que cette dispersion peut être importante, et que le volume minimum d'éclatement de 130 m³ garanti par le fabricant est très en dessous de la valeur typique.

Le matériau des enveloppes que nous utilisons a récemment changé. Il se peut que le nouveau matériau autorise un volume d'éclatement plus élevé.

Le capteur de pression n'a pas été finement exploité, car nous n'avons pas eu le temps de l'étalonner avant le vol.

Etat de la nacelle

L'expertise de la nacelle récupérée permet d'expliquer la perte de transmission. Elle a été retrouvée complète en parfait état, avec le parachute et l'écho radar, à l'exception des antennes et du bras supportant celles-ci. Les deux coaxiaux reliant les antennes avaient été arrachés, et il ne restait que le contact central des BNC, soudé à l'âme du câble. L'intérieur de la nacelle semblait intact, et après essais, l'électronique semble bien fonctionner.

On peut supposer que le support d'antennes a été arraché lors du décollage, et est resté suspendu au ballon par les deux coaxiaux. Peu après l'éclatement du ballon, l'ouverture du parachute a secoué fortement la nacelle, arrachant l'un des connecteurs puis l'autre. Cela expliquerait parfaitement le phénomène observé, et l'absence des antennes au sol près de la nacelle.

A. COLMON
G. BOSCH