La réception d'images météorologiques issues de satellites : principes de base

Jean-Michel Friedt¹, Simon Guinot^{1,2} ¹ Association Projet Aurore, UFR-ST La Bouloie, 16, route de Gray 25030 Besançon Cedex ² Alcôve, 15 avenue de l'Agent Sarre 92700 Colombe friedtj@free.fr, simon.guinot@alcove.com 21 janvier 2006 Nous proposons une introduction à la réception d'images issues de satellites en

orbite polaire basse de la série NOAA. Nous abordons l'ensemble des étapes, de l'identification et la prédiction de la date de passage des satellites à la réalisation de l'antenne et du récepteur radio puis à la démodulation du signal acquis pour enfin arriver à afficher une image de la Terre obtenue du satellite.

1 Introduction

Des satellites météorologiques nous survolent chaque jour à basse altitude en transmettant continûment un signal radiofréquence contenant les images de la Terre vue de l'espace. Nous proposons ici de présenter les différentes étapes pour réceptionner ces images, en présentant les différents types de satellites présents, les caractéristiques de leurs orbites dont nous déduirons les durées de passage au-dessus d'un point donné (*i.e.* le temps que nous aurons pour capter une image) et les dates de passage (*i.e. quand* écouter). Nous décrirons les montages expérimentaux (récepteurs radiofréquence) nécessaires à l'écoute des satellites, puis les modes de modulation pour comprendre comment transformer un fichier son (le signal reçu du satellite) en une image. Toutes ces étapes seront l'occasion de mettre en pratique et d'approfondir des notions enseignées en premier cycle universitaire.

Les satellites en orbite basse polaire transmettent des images qui peuvent être reçues avec un équipement simple et peu coûteux, accessibles aux écoles et associations d'étudiants [1].

2 Les satellites météorologiques

Une vaste gamme de satellites sont en orbite autour de la Terre, pour des applications commerciales (communications, transmissions de données ou d'images), militaires [2, p.242] [3, p.466] (Ikonos¹), scientifiques (Jason, Modis), de communications radioamateurs réalisés sous l'égide de l'AMSAT², ou des observations à des fins météorologiques. Nous nous intéresserons ici en particulier à ce dernier ensemble.

Nous distinguons deux grandes classes de satellites météorologiques : ceux en orbite géostationnaire [4] (Meteosats européens encryptés, GOES américains transmettant en clair) et ceux en orbite basse polaire. Les premiers sont à une distance $h_{geo} = \sqrt[3]{\frac{M_T GT_{geo}^2}{4\pi^2}} - R_{Terre}$ de l'ordre de $h_{geo} \simeq 36000$ km de la surface de la Terre, connaissant la période de révolution terrestre ($T_{geo}=23h56$ min), la masse de la Terre ($M_T = 5.98 \times 10^{24}$ kg), la constante gravitationnelle $G = 6.67259 \times 10^{-11}$ m³.kg⁻¹.s⁻² et le rayon terrestre $R_{Terre} = 6378$ km³. Cette orbite a été définie en 1945 par A.C. Clarke [5] pour toujours maintenir le satellite à la verticale d'un même point (dans une ellipse de l'ordre de 75 \times 75 \times 10 km³ [6, p.79]) de la surface de la Terre.

Au contraire les satellites en orbite basse polaire sont en orbite à une altitude beaucoup plus modeste de l'ordre de $h_{polaire} = 800$ km selon une trajectoire passant par les pôles. Ils défilent donc rapidement, d'un côté à l'autre de l'horizon – selon un axe nord-sud. Nous pouvons estimer le temps maximum de visibilité d'un tel satellite depuis le sol en utilisant la troisième loi de Kepler, à savoir $T^2/R^3 = \text{constante}$ avec T la période de révolution du satellite et R le rayon de son orbite par rapport au centre d'inertie (*i.e.* centre de la Terre). Sachant qu'un satellite géostationnaire orbite la Terre à une altitude de l'ordre de 36000 km et que le rayon terrestre est de l'ordre de 6400 km, nous savons que

¹http://www.spaceimaging.com/

²http://www.amsat.org/amsat/AmsatHome.html

³http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html

la période d'un satellite polaire en orbite basse est de l'ordre de $\sqrt{R_{polaire}^3 \times \frac{T_{geo}^2}{R_{geo}^3}} = \sqrt{(6400 + 800)^3 \frac{(24*60)^2}{(36000 + 6400)^3}} \simeq 101$ minutes. De plus, le satellite n'est visible que lors de son passage au-dessus de l'horizon. En se reportant à la figure 1, nous constatons que seule la fraction de l'orbite définie par $\frac{2\theta}{2\pi} = 2 \times \arccos\left(\frac{R_{Terre}}{R_{polaire}}\right)/(2\pi) \simeq 0.151$ est visible du sol, d'où un temps de passage maximum en cas de passage du satellite au zénith de $101 \times 0.151 \simeq 15.3$ minutes, qui est bien la valeur observée. Le même raisonnement montre qu'un passage de la station spatiale internationale, en orbite à 400 km environ au-dessus du sol⁴, est encore bien plus court : 9.7 minutes au maximum pour un passage au zénith.

Ces différences d'altitude et de comportement (position fixe dans l'espace par rapport au sol, ou défilant) vont conditionner la chaîne de réception, de l'antenne au récepteur et démodulateur radio, ainsi que le mode d'observation (prédiction des horaires de passage des satellites défilant).

3 Orbites et altitudes : les données orbitales ("keplers")

3.1 Effet Doppler lié au mouvement du satellite

Nous avons auparavant calculé la durée de visibilité des satellites en orbite basse, d'où nous déduisons la vitesse de défilement et donc par exemple le décalage de la fréquence radio de transmission par effet Doppler tel que perçu par l'observateur au sol [7]. Prenons l'exemple des satellites de la constellation GPS en orbite à environ 20000 km de la surface terrestre. Le même calcul que précédemment montre que la période orbitale est 707 minutes (qui est proche de la demi journée recherchée par cette orbite) et le temps maximum de visibilité est 299 minutes ou environ 5 heures. Ces 701 minutes servent à parcourir les $2\pi R_{GPS} = 2\pi (6400 + 20000) = 166000$ km de l'orbite, soit une vitesse tangentielle de 3.9 km/s. En considérant maintenant que lors du passage du satellite au-dessus de l'horizon (cas où l'effet Doppler est maximum, pour ensuite s'annuler lors du passage au zénith) son orbite est inclinée de $\theta = \arccos\left(\frac{R_{Terre}}{R_{GPS}}\right) \simeq 76^o$ de l'horizon, nous constatons que la vitesse du satellite en direction de l'observateur au sol est $v_{GPS} \times \cos(76^o) \simeq 0.95$ km/s. Nous en déduisons l'écart par effet Doppler de fréquence radio reçue $f_{observée}$ à la fréquence émise $f_{GPS} = 1.5$ GHz : $f_{observée} = f_{GPS} \times \frac{c}{c+v_{GPS}}$ ou de façon plus utile $f_{GPS} - f_{observée} = \frac{v_{GPS}}{c} \times f_{GPS}$. En conclusion de ce calcul, $(f_{GPS} - f_{observée})_{max} = \frac{v_{GPS}}{c} \times f_{GPS} = \frac{0.95}{3 \times 10^5} \times 1.5 \times 10^9 \simeq 4500$ Hz. Cette valeur est suprenamment proche, compte tenu des nombreuses approximations numériques au cours du calcul, de la valeur observée au moyen d'un récepteur Motorola GPS-Oncore VP (Figure 1, droite) [8].

Un calcul similaire dans le cas des orbites polaires basses des satellites météorologiques NOAA [9, 10] montre que leur vitesse tangentielle est 7.5 km/s, l'angle par rapport à l'horizon au lever est $\theta \simeq 20^{\circ}$ et le décalage Doppler maximum est 3050 Hz pour une fréquence de transmission de 137.5 MHz. Cependant, dans le cas particulier des modes de communication qui vont nous intéresser ici (section 3.3), l'utilisation d'une modulation en fréquence de la porteuse pour la transmission des données du satellite vers la station au sol nous affranchit des effets du décalage Doppler. En effet, la boucle à verrouillage de phase (PLL – phase locked loop) utilisée pour démoduler le signal saura, sous réserve de posséder une largeur de bande suffisante (ce qui sera le cas ici), se caler sur la fréquence de la porteuse reçue et la sortie de la PLL possédera un offset au signal désiré du fait du décalage Doppler. Or cet offset varie très lentement (lié à la vitesse de défilement du satellite dans le ciel par rapport à l'observateur au sol) et sera donc éliminé par les filtres passe-haut présents dans la chaîne de restitution audio (au niveau du récepteur radio qui élimine toute composante DC du signal de sortie et au niveau de la carte son). Cet effet est observé en particulier lors des transmissions radioamateurs autour de 430 MHz avec des satellites défilant avec des modes de modulation où la largeur de bande est beaucoup plus réduite.

3.2 Prédiction des horaires de passage

La prédiction efficace des horaires de passage des satellites nécessitent d'utiliser des modèles considérablement plus complexes que l'approximation classique du point se déplaçant sous l'effet de la gravité dans le vide, tenant compte notamment des frottements de la haute atmosphère qui ralentissent les satellites en orbite basse. Les paramètres orbitaux des satellites sont distribués selon un format utilisé par le NORAD américain ⁵, l'organisme chargé de suivre l'ensemble des objets circulant en orbite terrestre (qu'il s'agisse de fusées, de satellites ou de débris).

⁴http://www.hq.nasa.gov/osf/station/viewing/issvis.html

⁵http://www.norad.mil



FIG. 1 – Gauche : définition des notations utilisées dans le texte lors des calculs de paramètres orbitaux de satellites tournant autour de la Terre. Droite : décalage de fréquence de transmission par effet Doppler observé sur des satellites GPS (depuis Orléans, le 26 Mai 2003). Les traces de plusieurs satellites visibles à chaque instant sont affichées simultanément. Le passage au maximum d'élévation correspond à l'annulation du décalage Doppler de la fréquence (composante radiale de la vitesse nulle) tandis que ce décalage est maximal à l'horizon (élévation nulle).

Les paramètres (*Two Line Elements* : TLE) sont distribués sur le site web de Celestraki (www.celestrak.com) ⁶. Plus récemment, le site de Space Track (http://www.space-track.org/perl/login.pl) a été mis en place pour répondre aux nouvelles exigences du gouvernement américain d'identifier les utilisateurs de données orbitales permettant de suivre la position d'un satellite (en pratique il suffit de donner une adresse mail valide). Ces données sont remises à jour quotidiennement et doivent être réactualisées périodiquement afin de garantir une prédiction précise. En effet, même si les orbites de satellites tels que ceux en orbite géostationnaire ou en orbite polaire basse varient très peu avec le temps (et donc ne nécessitent une réactualisation des paramètres orbitaux que peu fréquente – moins d'une fois par mois) ce n'est pas le cas de la station spatiale internationale (ISS) dont l'orbite est souvent modifiée pour compenser sa chute liée aux frottements de l'atmosphère. Outre les corrections voulues de trajectoire, une cause de modification d'orbite peut être par exemple les fluctuations du vent solaire [6, p.73] et en particulier les tempêtes qui peuvent considérablement perturber les satellites. Les modèles ne tiennent pas non plus compte des perturbations gravitationnelles des autres corps célestes agissant sur le satellite (et ne sont donc par exemple pas appropriés pour prédire la position de la Lune dans le ciel).

Le format des paramètres orbitaux inclut en particulier ⁷, pour les parties les plus simples à interpréter intuitivement, la période de rotation (Fig. 2), l'angle de l'orbite par rapport au plan de l'équateur et l'excentricité de l'ellipse dont la Terre est un des foyers.

Ainsi par exemple

NOAA 17 1 27453U 02032A 04141.47085506 .00000028 00000-0 31630-4 0 9103 2 27453 98.7010 214.0435 0012905 114.4615 245.7918 14.23528214 98966

indique que NOAA 17 suit une orbite inclinée de 98.7010° par rapport à l'équateur (*i.e.* orbite polaire), d'excentricité 0.0013 (*i.e.* orbite circulaire) et effectue 14.24 révolutions autour de la Terre par jour (en accord avec la période de l'ordre de 100 min vue précédemment). Les perturbations liées aux frottements atmosphériques sont inclues sous la forme des dérivées première (.00000028) et seconde (0.0) du nombre de révolutions par jour utilisé par les modèles les plus simples de prédiction de passage, tandis que le coefficient de frottement est contenu dans le terme suivant

⁶http://celestrak.com/NORAD/documentation/tle-fmt.shtml

⁷http://artemmis.univ-mrs.fr/cybermeca/Formcont/mecaspa/CODE_TLE/CODE_TLE.HTM

(mais doit encore être corrigé en tenant compte de la densité de l'atmosphère à la distance où se trouve le satellite [11, p.188]). Noter que le choix de l'inclinaison de l'orbite à 98.7° au lieu de 90° comme on s'y attendrait pour une "vraie" orbite polaire n'est pas fortuite : il s'agit d'une inclinaison qui permet au satellite d'être héliosynchrone ⁸ et donc de profiter d'un ensoleillement à peu près constant à chaque passage au dessus d'un point donné de la Terre. Nous constatons en effet avec un peu d'habitude que NOAA 17 passe toujours au-dessus de Besançon vers 12h30 (heure d'été, soit heure UTC+2), tandis que NOAA 12 et 15 passent au-dessus de cette même latitude vers 17h40 et 19h20 respectivement (heures d'été) pour ne citer que les horaires d'écoute les plus pratiques.

Pour prendre un exemple de satellite géostationnaire (*i.e.* orbitant beaucoup plus loin de l'atmosphère et suivant le plan équatorial) :

GOES 12

```
1 26871U 01031A 04141.10366189 -.00000239 00000-0 10000-3 0 4830
2 26871 0.0473 268.8515 0003028 189.7673 102.0547 1.00273744 10412
```

L'angle par rapport au plan équatorial est ici nul (0.0473), le satellite effectue bien 1.00 tours de la Terre par jour, et l'excentricité encore plus faible (0.0003) : l'approximation d'orbite circulaire est ici parfaitement valide. Le terme de frottement n'a ici aucun sens puisque l'atmosphère est inexistante à la distance où évolue le satellite.



FIG. 2 – Évolution des paramètres orbitaux. À gauche : nombre de rotations autour de la Terre par jour – qui détermine l'altitude du satellite – et sa dérivée première, pour NOAA 17 depuis son lancement. À droite : oscillations de l'excentricité de l'orbite, et angle par rapport au plan de l'équateur.

Ces paramètres orbitaux sont injectés dans les modèles d'orbites pour prédire les dates de passage et élévation au-dessus de l'horizon du satellite considéré. On peut en général considérer qu'un satellite ne s'élevant pas au-dessus de 45 degrés au-dessus de l'horizon ne donnera pas de résultats satisfaisants en terme de réception radio. Le site http: //www.heavens-above.com fournit en plus une prédiction de la visibilité optique du satellite [12], de sa magnitude et de sa trajectoire parmi les constellations.

Nous utilisons le logiciel Sattrack sous linux ⁹ pour prédire les horaires de passage. Les paramètres nécessaires au bon fonctionnement de ce logiciel sont les coordonnées GPS du lieu d'observation (noter que les villes à l'est du méridien de Greenwich ont une longitude négative) et une horloge à l'heure. Le protocole NTP (ntpdate sous linux, Dimension4¹⁰ sous Windows) permet de maintenir l'horloge de l'ordinateur à l'heure avec une précision meilleure que la seconde.

⁸http://artemmis.univ-mrs.fr/cybermeca/Formcont/mecaspa/COURS_SA/PARAMORB/Paramorb.htm

⁹par exemple disponible à http://packages.debian.org/stable/hamradio/sattrack – les nouveaux TLE sont remis à jour dans le fichier /var/lib/Sattrack/tle/tlex.dat. Récemment, http://bugs.debian.org/325363, Debian a décidé de remplacer Sattrack par d'autres outils tels que Predict, http://www.qsl.net/kd2bd/predict.html, qui n'ont pas été testés par les auteurs.

¹⁰http://www.thinkman.com/dimension4/

3.3 Transmission des données

La transmission d'images en mode APT se fait à la fréquence de 2 lignes par seconde. Chaque ligne contient deux images côte à côte, l'une obtenue dans les longueurs d'onde visibles et l'autre dans les longueurs d'onde de l'infrarouge thermique (autour de 1.6 μ m, longueur d'onde où la différenciation entre nuages et neige est la plus marquée [11, p.104)). Les images sont obtenues par rotation continue d'un miroir devant un unique capteur optique à bord du satellite selon un axe parallèle à la trajectoire : il y a donc transmission continue de lignes d'images au cours de leur acquisition par le capteur et pas de définition de début et de fin d'image comme on pourrait s'y attendre si le capteur était une matrice de pixel (comme dans un appareil photo numérique) [11, p.97]. L'abscisse d'un pixel sur l'image reçue est donc définie par l'angle de rotation du miroir tandis que l'ordonnée est due au défilement du satellite. Ainsi, la capture d'image commence lorsque le signal radio devient détectable -i.e. lorsque le satellite devient visible au-dessus de l'horizon – et s'interrompt lorsque le signal radio disparaît. La résolution des images en mode APT est de 4 km/pixel [9], déterminée par la vitesse de défilement du satellite – donc son altitude – et la vitesse de transmission des données. En effet, deux lignes adjacentes doivent viser des régions adjacentes à la surface du sol. Nous avons vu que la période de rotation d'un satellite en orbite basse est de 94 min, pendant lesquels le satellite observe les 40000 km de la circonférence terrestre. De plus, le satellite transmet deux lignes par seconde donc la largeur d'un pixel (selon l'axe des ordonnées) doit couvrir la longueur correspondant au déplacement du satellite pendant cet intervalle de temps, $40000/(94 \times 60) * 0.5 = 3.5 \text{ km} \simeq 4 \text{ km}$. Le grossissement de l'optique embarquée dans le satellite est réglé de façon à couvrir une telle surface vue de l'altitude de l'orbite [11, p.98].

Ainsi, sachant que la durée maximale de visibilité d'un satellite est 15 minutes, que nous obtenons 2 lignes par seconde et que chaque pixel couvre une surface de 4×4 km², l'extension en latitude maximale d'une image est (puisque la circonférence terrestre selon un méridien est 40000 km) : $\frac{15 \times 60 \times 2 \text{ pixels} \times 4 \text{ km/pixel}}{40000 \text{ km}} \times 360 = 65^{\circ}$. Une telle plage, passant par la longitude de la France, s'étend par exemple du Spitzberg au nord à la Mauritanie au sud. Une telle estimation se compare avantageusement avec la figure 9, droite.

3.4 Les modes de modulation

Les satellites en orbite polaire qui nous intéressent transmettent sur une porteuse à 137.500 MHz (NOAA 12 et NOAA 15) et 137.620 MHz (NOAA 17) pour les signaux analogiques que nous allons capter (un autre type de transmission, numérique cette fois, nécessitant un matériel plus perfectionné s'effectue à 1.7 GHz). L'état de fonctionnement des satellites en orbite polaire (dits POES ¹¹ – Polar Operational Environmental Satellites) est constamment remis à jour sur un site web du NOAA ¹².

L'encodage des signaux transmettant les images météorologiques est un peu complexe mais très intéressant car il permet d'aborder divers modes de modulation (figure 3). Nous allons décrire ici le mode de communication APT (*Automatic Picture Transfer*), mode de communication analogique qui ne nécessite aucun matériel spécialisé complexe de décodage autre qu'un ordinateur équipé d'une carte son.

Nous partons d'un signal constitué d'une trame de pixels (image obtenue par la caméra embarquée à bord du satellite) d'intensités lumineuses variables. Ces variations d'intensité lumineuse modulent en amplitude une sinusoïde à 2400 Hz (i.e. l'amplitude de la sinusoïde est proportionnelle à l'intensité du pixel). Cette sinusoïde modulée est ensuite elle même utilisée pour moduler en fréquence une porteuse autour de 137.5 MHz ou 137.62 MHz selon le satellite.

Au sol, le récepteur radio est donc utilisé dans son mode de démodulateur de fréquence qui convertit le signal radiofréquence en un signal audio autour de 2400 Hz. Ce signal est enregistré par la carte son d'un ordinateur (fréquence d'échantillonage de 11025 Hz, 16 bits/donnée dans notre cas), et son amplitude restitue l'intensité lumineuse de chaque pixel. La façon la plus simple de retrouver l'amplitude de cette sinusoïde est d'y appliquer un filtre passebas de fréquence de coupure inférieure à la fréquence de la porteuse (noter que moyenner plusieurs échantillons successifs correspond au filtre passe-bas le plus simple possible). Le son caractéristique issu du récepteur radio lorsque la transmission d'un satellite est démodulée est un sifflement continu à cette fréquence de 2400 Hz.

¹¹http://poes.gsfc.nasa.gov

¹²http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/status.html



FIG. 3 – Chaîne de transmission des valeurs des pixels du satellite vers la station au sol et résultat de la simulation de la démodulation des signaux AM par un filtre passe-bas (en bas à gauche). La modulation FM sur porteuse à 137.xx MHz ne peut être représentée sur la même échelle temporelle : la sinusoïde à 2400 Hz apparaît comme une droite sur les 100 ns sur lesquelles la porteuse à 137 MHz est représentée.

4 Les antennes

Nous avons vu que les deux ensembles de satellites météorologiques sont les satellites en orbite géostationnaire et ceux en orbite basse.

Dans le premier cas, le satellite étant fixe au-dessus d'un point sur la Terre, l'utilisation d'une antenne de gain élevé et pointée dans une direction fixe dans le ciel fournit une méthode optimale pour obtenir un bon rapport signal sur bruit. Ce résultat est en général obtenu au moyen d'un parabole convenablement pointée dans la direction dans le ciel où se situe le satellite (vers le sud dans l'hémisphère nord puisqu'un satellite géostationnaire se situe au-dessus de l'équateur). Cette solution est d'autant plus efficace que la plage de fréquences de transmission de situe dans le GHz, soit une longueur d'onde inférieure à 30 cm. Plus la parabole est grande, plus son gain est élevé et plus son diagramme de rayonnement est directionnel [13]. Rappelons avant toute discussion la formule fondamentale en radio reliant la fréquence f (en MHz) et la longueur d'onde λ (en m) via la célérité de la lumière ajustée des bons coefficients numériques pour tenir compte des unités : $\lambda = \frac{300}{f}$. Ainsi, $\lambda(137.5 \text{ MHz}) \simeq 2.2 \text{ m}$.

Dans le cas qui nous intéresse, les satellites en orbite basse transmettent dans une plage de fréquence beaucoup plus accessible – 137.500 ou 137.620 MHz – mais défilent rapidement dans le ciel. Les contraintes sur la sélection de l'antenne sont donc toutes différentes : au lieu d'une antenne directionnelle nous voulons une antenne avec un diagramme de rayonnement aussi isotrope que possible, sans nul (direction dans l'espace selon laquelle l'antenne ne reçoit aucun signal), et de plus capable de recevoir efficacement un signal en polarisation circulaire.

En effet, lors de la transmission de données par faisceau hertzien, la polarisation de l'antenne réceptrice (définie comme l'orientation du champ électrique à laquelle l'antenne est sensible) doit être la même que la polarisation de l'antenne émettrice. Par exemple la transmission d'images de télévision ou de contacts radioamateurs au moyen d'antennes Yagi habituellement visibles sur les toits des pavillons, se fait en polarisation horizontale (orientation parallèle au sol du dipôle de l'antenne Yagi). Or un satellite est en rotation sur lui-même et une polarisation rectiligne apparaîtrait au sol comme tournant lentement. Il en résulterait une perte périodique du signal si le récepteur était en polarisation rectiligne. L'utilisation d'une polarisation circulaire résout ce problème : en utilisant une antenne hélicoïdale ou deux dipôles déphasés de 90°, la réception devient non seulement insensible à l'orientation relative de l'émetteur au récepteur, mais en plus devient aussi insensible aux réflexions potentielles (sol, montagne) qui pourraient induire une perte de signal par interférence destructive (l'insensibilité aux réflexions vient de ce que le sens de polarisation circulaire est inversé lors de la réflexion d'une onde électromagnétique sur un conducteur, et l'antenne n'est par fabrication sensible qu'à un sens de polarisation).

Nous mettons en application ces notions quelque peu abstraites par l'utilisation d'un code de simulation du comportement électromagnétique de structures métalliques, NEC [14, p.2-12]. Nous utilisons en particulier une version du code réactualisée et disponible sous GNU/Linux, NEC2¹³. Ces simulations vont nous permettre de prédire le comportement de diverses géométries simples d'antennes et de sélectionner celle qui correspond le mieux à nos contraintes.

Nous sommes partis d'un montage de dipôles croisés tel que décrit dans les références [15]. L'idée de base d'un tel montage est de combiner, au moyen d'une ligne à retard (un bout de câble de la bonne longueur, $\lambda/4$ pour un déphasage de 90°), les signaux de deux dipôles orthogonaux. Les simulations au moyen de NEC de ce circuit montrent que

- 1. les deux dipôles ne jouent pas le même rôle et par conséquent l'antenne n'est pas isotrope dans le plan parallèle au sol. Ceci est probablement lié à une différence d'impédance vue par les deux dipôles, la ligne quart-d'onde en câble coaxial 75 Ω n'étant probablement pas idéale
- 2. les 4 réflecteurs placés en bas de l'antenne sont totalement inefficaces et peuvent être retirés sans modifier fondamentalement le diagramme de rayonnement. Quatre tiges rayonnant du mât de support sont largement insuffisantes pour former un plan de masse efficace, et il faut soit les remplacer par un grillage, soit augmenter le nombre de tiges, soit placer le dipôle croisé sur un toit conducteur (tôle) qui joue le rôle de plan de masse
- 3. la conséquence du point précédent est que le diagramme de rayonnement est fortement dépendant de la hauteur des dipôles par rapport au sol [16, p.206]. Ce dernier point est illustré sur la figure 4. Il est fondamental de tenir compte de l'influence du sol sur le diagramme de rayonnement et le résultat obtenu pour une antenne dans le vide (figure 4, en haut à droite) n'a aucune utilité pratique.

NEC étant issu d'anciens codes de simulation écrits à l'origine en Fortran, il requiert des entrées sont formes de cartes commençant par le type de données suivi des arguments. La liste de paramètres définit dans un premier temps la géométrie de l'antenne comme un assemblage de tubes droits (segments dans le cas qui nous intéresse ici) de diamètres donnés (le diamètre des tubes va influencer l'impédance de l'antenne) :

GW 1,31,0,-525,1100,0,0,1100,1.5 GW 2,31,0,0,1100,0,525,1100,1.5 GW 3,31,-525,0,1100,0,0,1100,1.5 GW 4,31,0,0,1100,525,0,1100,1.5 GM 0 0 0 0 0 0 0 0 0100 GS 0,0,0.001

signifie que nous définissons les coordonnées (x, y, z) des points de départ et d'arrivée de chaque segment (carte GW) après en avoir donné un indice de compteur (premier argument) et le nombre de sous segments (second argument : plus cette valeur est grande, meilleure sera la résolution de la simulation, dans la limite de l'espace mémoire disponible et d'un temps de calcul raisonnable). L'antenne est ensuite translatée (carte GM) selon l'axe z pour traduire sa variation de hauteur par rapport au sol. Toutes ces coordonnées étant données en mm, nous passons au mètre requis par NEC en effectuant une homothétie de toute la structure par un facteur de 10^{-3} par rapport à l'origine : GS 0,0,0.001.

Vient ensuite la définition des paramètres de simulation : la plage de fréquence et le pas de simulation (carte FR), la plage et le pas d'angles dans lesquels le diagramme de rayonnement sera présenté (carte RP), l'ajout de lignes de transmission (que nous utilisons pour déphaser un dipôle par rapport à l'autre : carte TL) et le point d'excitation de l'antenne (carte EX avec pour argument le numéro de segment et de sous-segment auquel est connecté le câble coaxial amenant le signal excitant l'antenne, l'âme et la gaîne étant supposées symétriques). En effet, NEC calcule un diagramme de rayonnement pour une antenne émettrice, qui est aussi valable pour une antenne réceptrice tel que le démontre le théorème de réciprocité [17, p.127]. Nous devons nous attarder sur la carte GN qui définit les propriétés du sol : un argument de -1 signifie que l'antenne flotte dans l'espace vide et qu'il n'y a pas de plan de sol, un cas rarement valide en pratique (même une simulation d'antenne embarquée sur un avion ou un satellite doit tenir compte de l'influence de la coque conductrice sur le diagramme de rayonnement). Un argument de 1 signifie que le sol est parfaitement conducteur, cas réalisé par exemple pour une antenne située sur un grillage ou un toit de tôle. Un argument de 0, que nous utiliserons par la suite dans ce document, permet d'attribuer des valeurs réalistes de conductivité et de perméabilité au sol ¹⁴ qui sont l'équivalent des coefficients de réflectivité et d'absorbtion en optique.

Nous avons donc finalement le code suivant :

CM Crossed dipole (137.500-137.620 APT polar sats)

¹³http://www.nec2.org

¹⁴http://www.cebik.com/vdgp.html

```
CM GN 1
CM GN 0,0,0,0,13,0.005
CF.
GW 1,31,0,-525,1100,0,0,1100,1.5
GW 2,31,0,0,1100,0,525,1100,1.5
GW 3,31,-525,0,1100,0,0,1100,1.5
GW 4,31,0,0,1100,525,0,1100,1.5
GM 0 0 0 0 0 0 0 0 0100
GS 0,0,0.001
GE O
GN 1
FR 0,1,0,0,137.5,0.5
EX 0,1,31,0,1,0
TL 1,31,3,31,75,0.545
RP 0,121,121,1000,0,0,3,3
EN
```

qui donne pour résultat les diagrammes présentés à la figure 4. Nous avons pour cela exécuté la commande nec2 sous linux, fourni les noms de fichiers en entrée et en sortie, puis xnecview fichier_sortie pour tracer la courbe résultante (représentation ARRL [14, p.2-10], plan Y, représentation filaire – *frame*). xnecview est aussi capable de tracer la géométrie de l'antenne dans l'espace si on lui donne en entrée le fichier de définition de l'antenne tel que nous venons de le présenter.

Nous remarquons sur la figure 4 la croissance du nombre de nuls avec la hauteur de l'antenne par rapport au sol. De façon générale on peut dire qu'il y a N nuls lorsque l'antenne se trouve à N demi-longueurs d'onde du sol [17, p.169]. La solution intuitive consistant à placer l'antenne en altitude n'est donc pas forcément optimale. Nous avons pour notre part choisi de monter les dipôle à 235 cm du sol pour les images présentées ici, sauf mention explicite du contraire.

Noter que bien que le choix d'un dipôle croisé vise à permettre la réception de signaux polarisés circulairement avec un diagramme de rayonnement isotrope, nous avons par ailleurs eu de bons résultats avec une antenne discône commerciale (Diamond D190) malgré son inadéquation à cette application (impédance très différente des 50 Ω recherchés à 137 MHz d'après NEC, polarisation rectligine au lieu de circulaire). La localisation de l'antenne (terrain dégagé dans l'axe nord-sud, fig. 6 à gauche) semble donc plus importante que le type d'antenne utilisé, le signal émis par les satellites NOAA en orbite basse étant relativement puissant.

5 Les récepteurs radio – démodulation des signaux obtenus

La solution la plus simple en terme de mise en œuvre pour démoduler un signal à 137.500 ou 137.620 MHz modulé en fréquence (Frequency Modulation : FM) est l'utilisation d'un scanner radio large bande tel que le AOR3000A. Bien que relativement coûteux, ce type d'équipement est parfois disponible à moindre coût sur le marché de l'occasion et offre de nombreuses autres possibilités au-delà de la réception d'images satellites (citons par exemple la réception des signaux radioamateurs issus de l'ISS ou la réception des signaux numériques d'identification des avions civils suivant le protocole ACARS). L'inconvénient majeur de ce type d'équipement est l'inadéquation de la largeur de bande des modes FM disponibles : soit trop large pour la bande FM commerciale (Wide FM : WFM – 180 kHz), soit trop fine pour le mode FM fin (Narrow FM : NFM – 12 kHz). Les images ainsi obtenues offrent malgré tout une qualité acceptable pour une solution très simple à mettre en œuvre si ce type de matériel est disponible (figure 5).

Une autre solution, moins coûteuse et plus performante, est l'acquisition d'un récepteur spécialisé. Nous avons expérimenté avec le récepteur RX2 commercialisé par le RIG anglais (Remote Imaging Group ¹⁵) sous forme de kit (figure 6). Le prix est avantageux (moins de 120 euros, inscription au club et frais de ports inclus), le circuit imprimé d'excellente qualité et la notice de montage et de calibration claire et bien illustrée. Tout amateur soigneux et un peu expérimenté pourra monter ce kit sans problème et sans recours à du matériel radiofréquence spécialisé. Notons que la disponibilité d'un scanner radio tel que cité en début de ce paragraphe permet de faciliter une des étapes de

¹⁵http://www.rig.org.uk



FIG. 4 – Haut : schéma de l'antenne à gauche (la paire de dipôles croisés se situe ici à 1.10 m du sol), et diagramme de rayonnement de l'antenne placée dans le vide. Chaque rayon des dipôles mesure 52,5 cm de long, et les deux dipôles sont reliés entre eux par une ligne de 36 cm de cable 75 Ω (tel que utilisé pour les connections d'antenne de télévision par exemple). Bas : diagramme de rayonnement en fonction de la hauteur des dipôles au sol. Noter la différence avec le diagramme obtenu dans le vide qui laissait a priori penser que la condition d'isotropie du rayonnement avait été atteinte avec cette géométrie. La conductivité du sol a été prise $\varepsilon_{sol} = 13$ et sa conductivité $\sigma = 0.005$ S/m. De gauche à droite : les dipôles se trouvent à 2.1 m du sol, 3.1 m du sol, et 23.1 m du sol.

calibration (réglage d'une capacité variable pour ajuster un oscillateur à une fréquence de référence) en l'utilisant comme un compteur de fréquence.

Une fois le signal radio démodulé, le signal audio résultant est numérisé au moyen de la carte son d'un ordinateur pour un traitement ultérieur, soit au moyen du logiciel gratuit mais disponible uniquement sous forme de binaire wxtoimg ¹⁶, soit par traitement sous Matlab/octave. En effet, nous avons vu que le signal audio à 2400 Hz est modulé en amplitude correspondant à l'intensité lumineuse de chaque pixel de l'image finale. Le démodulateur d'amplitude le plus simple est le filtre passe-bas : en moyennant les valeurs successives du signal audio, on obtient une image

¹⁶http://www.wxtoimg.com/ pour linux, Windows et MacOS



FIG. 5 – Deux des meilleures images obtenues après deux ans de réception d'images satellites au moyen d'un scanner large bande AOR3000A et une antenne discône Diamond D190 placée au coin d'un balcon orienté vers le sud-ouest au second étage d'un bâtiment de quatre étages à Orléans (NOAA 17, les 05/10/2002 et 26/01/2003). Même si la qualité de ces images est suffisante pour se familiariser avec la technique et reconnaître les contours maritimes de l'Europe de l'ouest, les blancs sont saturés et l'image infrarouge de très mauvaise qualité du fait de la bande passante trop réduite du filtre IF en mode NFM du scanner. Noter sur l'image de droite la visibilité des traînées des bateaux traversant l'atlantique, aussi visibles sur les images Meteosat. Comparer avec les figures 7 et 9. L'image à gauche présente exceptionnellement la composante infrarouge à gauche et visible à droite.

acceptable en réorganisant les données dans une matrice. En pratique si nous supposons enregistrer le signal audio à une fréquence d'échantillonnage de 11025 échantillons par seconde, nous savons qu'une période de la porteuse tient entre 4 et 5 ($11025/2400 \simeq 4.6$) points échantillonnés, et nous pouvons donc soit prendre la valeur la plus élevée de la valeur absolue de 4 points successifs pour avoir une estimation de l'amplitude de la porteuse à cette période, soit en prendre la somme puisque la valeur maximale dominera cette opération. La liste des données résultantes est réorganisée en lignes successives contenant un nombre de points égal à la fréquence d'échantillonnage divisée par le nombre de points sur lesquels nous moyennons divisé par 2 (puisque 2 lignes sont transmises par seconde).

En pratique l'algorithme qui vient d'être présenté s'implémente (testé avec Matlab 5.3 sous Windows 98 et Octave 2.1.35 sous linux) de la façon suivante :

Le logiciel wxtoimg est plus performant parce qu'il asservit la démodulation du signal audio sur la porteuse de la modulation AM (supposée être à 2400 Hz) et identifie les débuts de ligne pour compenser une différence éventuelle entre les références de fréquence embarquées dans le satellite et les oscillateurs présents sur la carte son. De plus, ce logiciel est lui aussi capable de prédire le passage des satellites (et donc de vérifier les dates issues de sattrack) ainsi que, dans sa version la plus récente (2.5.7 à la rédaction de ce document), de superposer à l'image brute acquise une carte des frontières des pays observés. Une comparaison des résultats du logiciel professionnel et de notre algorithme beaucoup plus simple est présentée à la figure 7.

Nous pouvons cependant tirer une information intéressante de la forme de l'image (Fig. 7, gauche) déduite du processus simple de démodulation que nous avons mis en œuvre. Nous constatons que l'image résultante, de 1379×1784 pixels, présente une dérive entre le haut et le bas de l'image de 263 pixels (tel que mesuré sur la bande de calibration centrale). Nous savons que les 1379 pixels en abscisse correspondent à 0.5 s, et que les 1784 lignes en ordonnée correspondent à 892 seconde d'écoute. La dérive au cours de cette acquisition est donc de $263 \times 0.5/1379 = 0.095$ s, ou 0.095/892=106 ppm. Nous attribuons cette erreur à une dérive de l'oscillateur de référence de la carte son, 100 ppm étant typiquement l'ordre de grandeur de la stabilité en fréquence des oscillateurs TTL commercialisés pour les applications informatiques bon-marché ¹⁷. De biens meilleurs résultats pourraient être obtenus en remplaçant l'oscillateur

¹⁷voir par exemple les spécifications des oscillateurs C-MAC, référence fabriquant IQXO-36, http://www.cmac.com/mt/databook/oscillators/leaded/spxo/siqxo_35.html



FIG. 6 – Montage expérimental utilisé lors de la réception de signaux issus des satellites polaires NOAA en mode APT. La photo de gauche a été prise du bâtiment hébergeant l'association, d'où le courant alimentant les divers instruments est disponible. La vue selon l'axe nord-sud est dégagée d'horizon à horizon, tandis que le bâtiment situé à l'est de l'antenne n'interfère pas avec la réception pour des satellites passant à une élévation suffisante (> 60°). Le câble liant la sortie audio du récepteur à l'ordinateur portable est enroulé autour d'un noyau de ferrite pour tenter de limiter les interférences de l'ordinateur sur le récepteur radio (le noyau de ferrite augmente l'inductance du câble ainsi bobiné et atténue les signaux radiofréquences). Droite : montage du récepteur RX2 dans une boite métallique (récupération d'une alimentation de PC).

de la carte son par un oscillateur contrôlé en température ou en asservissant l'oscillateur présent sur le signal 1 PPS du GPS.

6 Un peu de traitement d'images

Une fonction de traitement d'images proposée par wxtoimg dont nous avons souvent fait usage pour améliorer le contraste des images présentées dans ce document est *histogram equalize*. Nous allons présenter ici cet algorithme, en insistant sur le fait qu'il s'agit simplement d'une méthode de traitement d'images qui n'a aucun sens physique si un traitement ultérieur quantitatif des images satellite est à effectuer (par exemple extraction de températures à partir des données infrarouges), et que son intérêt réside uniquement dans le rendu esthétique des données [11, p.196].

Une image en tons de gris est caractérisée par un histogramme des couleurs, défini comme le nombre de pixels d'une certaine teinte normalisé par le nombre total de pixels. Cette distribution peut être vue en terme de probabilité de trouver dans l'image un pixel d'une certaine couleur. Le contraste d'une image est d'autant meilleur que l'histogramme est étalé dans toute la plage de couleurs disponibles. Ainsi, un histogramme caractérisé par un pic fin, localisé, correspond à une image terne dont presque tous les pixels ont la même couleur. Au contraire un histogramme uniforme (constant sur la plage des couleurs) caractérise une image très contrastée où toutes les couleurs sont présentes en proportions égales. C'est ce dernier résultat que nous cherchons à obtenir, tel que illustré sur la figure 8.

Plutôt que de parler uniquement en terme d'histogramme h(c) des tons de gris c, qui peut avoir une distribution quelconque, nous allons considérer les histogrammes cumulés H(c). L'histogramme cumulé H(c) est déduit de l'histogramme des couleurs h(c) par $H(c) = \sum_{n=0}^{c} h(n)$: pour avoir la valeur de l'histogramme cumulé au point c nous sommons donc les valeurs de l'histogramme jusqu'à ce point. Étant donné que l'histogramme contient des probabilités donc des valeurs positives, H(c) est une fonction croissante de c. De plus, nous constatons facilement que l'histogramme cumulé d'un histogramme constant est une droite de pente 1, passant par l'origine, si nous définissons la plage des couleurs c dans l'intervalle $c \in [0; 1]$. Le problème se ramène donc à trouver une transformation des couleurs c de



FIG. 7 – Image de gauche : résultat de la démodulation d'un signal de NOAA 17 acquis le 23 Mars 2004 (12h24 heure locale, élévation maximale : 84.7°) par octave sous linux en moyennant le fichier son (11025 Hz, 16 bits/échantillon) sur 4 points successifs. Bien que l'algorithme fonctionne sous Matlab, ce dernier n'a pu effectuer le calcul complet sur le même ordinateur (Intel 400 MHz, 128 MB RAM) tournant sous Windows98, probablement à cause de la mauvaise gestion de mémoire par ce système d'exploitation. Image de droite : résultat de la démodulation par wxtoimg. Noter que le logiciel permet d'ajouter les frontières des pays observés. La moitié gauche de chaque image est obtenue dans le visible et la partie droite dans l'infrarouge. La bande noire au niveau de la frontière franco-espagnole est due à une erreur de manipulation sur le niveau de son lors de l'enregistrement.

l'intervalle [0; 1] vers [0; 1] qui convertit l'histogramme cumulé expérimental H(x) en un nouvel histogramme cumulé décrit par la première bissectrice.

La solution à ce problème est simplement de convertir l'axe des abscisses original c en un axe H(c) puisque le graphique original $c \to H(c)$ est ainsi transformé en $H(c) \to H(c)$ qui est bien la première bissectrice recherchée. Nous retrouvons là le théorème ¹⁸ annonçant que si H est l'histogramme cumulé des valeurs des pixels de l'image d'entrée, alors l'application de H à l'image d'entrée donne en sortie un image avec un histogramme des couleurs constant. En pratique, cette transformée est disponible sous Matlab (Image Processing Toolbox) et octave sous la forme de la fonction histeq(). Une extension de cette technique est la spécification d'histogramme $c \to G^{-1}(H(c))$ avec G l'histogramme cumulé à obtenir après traitement (le cas particulier démontré précédemment correspondant à G = Id).

7 Résultats

La première satisfaction est de pouvoir obtenir une image issue d'un satellite alors que celui-ci survole la station de réception. Nous fournissons deux exemples d'images (Fig. 9) obtenues depuis Besançon (coordonnées GPS : 47.230N, 6.030E) au moyen d'une antenne crossed-dipole et d'un récepteur RX2.

Au delà de l'aspect esthétique, un certain nombre d'analyses peuvent être réalisées sur ces images :

- utilisation du comportement du satellite comme source radio défilante dont l'élévation est parfaitement connue. Nous utilisons cette source pour analyser l'adéquation des modèles d'antennes réalisées, et éventuellement déduire les modifications à apporter pour améliorer les images obtenues (le paramètre le plus simple dans notre cas est la hauteur des dipôles du sol – 235 cm pour les images présentées dans ce document). Comparer pour celà les figures 9 et 10.
- prédiction météorologique et corrélation des données visuelles et thermiques (obtenue dans l'infrarouge), étude de

¹⁸http://www.dai.ed.ac.uk/HIPR2/histeq.htm



FIG. 8 – Haut : simulation de l'évolution des histogrammes de couleurs et des histogrammes cumulés de couleurs des images initiale (à gauche) et finale (à droite), l'objectif étant de passer d'une distribution de pixel quelconque vers un histogramme plat. Nous voyons là que le passage de l'histogramme cumulé quelconque initial vers l'histogramme cumulé défini comme la première bissectrice se fait en appliquant la fonction H(c) aux couleurs initiales c, H() étant l'histogramme cumulé de l'image initiale. Milieu : même graphiques, mais pour les images présentées plus bas. Bas : image brute à gauche (issue de NOAA 12 le 8 Juin 2004 à 6h56 heure locale depuis Besançon, élévation maximale : 82.5^{o}) obtenue avec le script Matlab présenté auparavant, et après traitement d'égalisation d'histogramme à droite. Noter l'apparition des contours des côtes encore dans la pénombre après traitement.

la complémentarité des informations extraites (les deux méthodes observent des nuages à des altitudes différentes et se formant selon des mécanismes différents, tel que par exemple les contrails ¹⁹ visibles en IR et pas dans le visible : figure 10 au sud-ouest de l'Espagne. Contrairement aux traces correspondant à un brouillard de basse altitude condensé par les particules issues des moteurs des bateaux visibles au dessus de l'atlantique sur la figure 5 (image de droite), les contrails (*condensation trails*) sont des nuages froids cristallisés en haute altitude). L'augmentation de la couverture nuageuse par ces contrails issues de l'activité humaine a été proposée comme

¹⁹http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/aviation/contrails.pdf



FIG. 9 – Image de gauche : image issue de NOAA 17 obtenue le 14 Avril 2004 à 12h24 heure locale (élévation maximale : 85.2°). Image de droite : image issue de NOAA 12 obtenue le 14 Avril 2004 à 17h29 heure locale (élévation maximale : 81.9°), particulièrement esthétique avec le reflet du soleil dans l'océan atlantique. Noter l'espacement identique des bandes sombres dans les deux images, que nous interprétons comme la position des nuls de l'antenne utilisée.

source possible de modification climatique [18]. Ce même principe est utilisé dans l'exploration planétaire spatiale où l'observation à différentes longueurs d'ondes permettent d'observer différentes couches nuageuses formées de la condensation de divers gaz [19, p.89] [21, pp.251,255,264].

- application des méthodes de traitement d'images pour améliorer le contraste (définition de l'histogramme des tons de gris désirés pour faire ressortir différentes propriétés de l'image), identification des contours des côtes ou de structures nuageuses caractéristiques (tourbillons).
- d'un point de vue géographique, identification des points les plus marquants visibles de l'espace (lacs de Neuchâtel, Léman et de Constance, région parisienne et Seine, Alpes enneigées en hiver par exemple : figure 10). Dans les meilleures conditions, pour des images obtenues quelques heures avant le coucher du soleil, le reflet de ce dernier dans l'océan atlantique combiné avec l'ombre projetée des nuages illuminés en incidence rasante fournit des images exceptionnelles (fig. 9, droite). La meilleure saison pour identifier les structures géologiques au sol est en automne, quand la couverture végétale est minimale sans que la couverture neigeuse ne réduise le contraste [20].

8 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté la réception d'images satellites comme un thème offrant l'occasion d'aborder de nombreux domaines d'études, tant technologiques dans la réalisation pratique du récepteur radio et de l'antenne, que théorique avec l'analyse des orbites ou les modes de transmission de données ²⁰. Les sujets impliqués vont de la physique avec la mécanique céleste et l'électromagnétisme requis dans la modélisation des antennes, à la programmation pour la démodulation et le traitement des images en passant par l'électronique et la géographie avec l'identification de régions remarquables au sol.

La suite logique de cette étude serait l'installation d'une petite parabole et la réalisation de l'électronique nécessaire à la réception des images issues des satellites géostationnaires GOES. Un autre aspect de l'étude des satellites est de compléter la réception des signaux radio par une observation visuelle, puisqu'un certain nombre de corps en orbite terrestre deviennent visibles quelques heures après le coucher du soleil ou avant le lever du soleil par réflexion sur leurs panneaux solaires ou leurs antennes de transmissions [23, 12].

Finalement, il est bon de noter que ces mêmes satellites contiennent d'autres capteurs que ceux fournissant des images optiques, et en particulier des détecteurs de flux de particules cosmiques et des magnétomètres. Ces données

²⁰home.fnal.gov/~prebys/talks/satellite_seminar.pdf et http://www.hep.princeton.edu/~marlow/satlab/



FIG. 10 – Haut : image obtenue le 28 Mai 2004 à 12h24 (heure locale) depuis Besançon lors d'un passage à une élévation maximale de 84.4°. Noter les traces de condensation (*contrails*) laissées par les avions au sud-ouest de l'Espagne, visibles dans l'infrarouge mais pas dans le visible. Les dipôles de l'antenne étaient exceptionnellement placés ici à une hauteur de 135 cm du sol : noter l'absence de bandes horizontales de perte du signal au niveau de la France par rapport aux autres images (fig. 9). Bas : image obtenue le 05 Aout 2005 depuis le plateau de Gergovie, près de Clermont Ferrand, avec une antenne transportable telle que présenté dans le prochain article, présentant une bonne isotropie de son diagramme de réception. Cet emplacement est idéal pour une bonne réception couvrant pratiquement toute la gamme des latitudes théoriquement observable car situé au sommet d'une colline élevée d'environ 350 m au dessus de la plaine environnante, sans obstacle dans l'axe nord-sud.

sont disponibles presque en temps réel sur le web à http://sec.noaa.gov/Data/.

Le lancement d'un satellite en orbite basse polaire le plus récent a été celui de NOAA-N, lancé le 20 Mai 2005, et depuis renommé NOAA-18 émettant un signal APT sur 137.9125 MHz. Ce lancement garantit l'émission d'images météorologiques en mode APT pour les années à venir. Le dernier satellite de cette série, nommé NOAA-N', est prévu pour décembre 2007.

9 Remerciements

L'association Projet Aurore remercie F. Vernotte, directeur de l'Observatoire de Besançon, pour l'accès gracieux au bâtiment Méridienne qui nous héberge actuellement. F. Tronel (F1SDZ) a proposé l'utilisation de NEC pour la simulation des diagrammes de rayonnement des antennes.

Références

- J. Summers, Educator's Guide for Building and Operating Environmental Satellite Receiving Stations NOAA Technical Report NESDIS 44, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration (1989), disponible à http://npoesslib.ipo.noaa.gov/techlib/doc41/doc41.pdf
- [2] J. Bamford, The puzzle palace, Penguin Books (1983)
- [3] J. Bamford, *Body of secrets*, Anchor Books (2002)
- [4] P. Le Fur, Référentiels et mouvements de satellites, Bulletin de l'Union des Physiciens 869 (2004), pp.1705-1728
- [5] T.S. Kelso, Basics of the Geostationary Orbit Satellite Times (1998), disponible à http://www.celestrak.com/ columns/v04n07/

- [6] F. Meyer, Comparaison d'horloges atomiques distantes par les satellites de télévision directe TDF2 et TC2A, thèse en sciences pour l'ingénieur, Université de Franche-Comté n.470 (1995)
- [7] M. Soutif, Vibrations, propagation, diffusion, Dunod Université (1982)
- [8] Oncore User's guide, Rev. 3.2, Motorola (1998), disponible à http://www.synergy-gps.com/TR_Manual.html. Le récepteur GPS-Oncore VP a été obtenu chez Synergy pour 35\$/pièce (prix Juillet 2003).
- [9] NOAA-L, NASA & NOAA, disponible à poes.gsfc.nasa.gov/history/noaal/noaal.pdf
- [10] NOAA-L Press kit, NASA & NOAA (2000), disponible à www.gsfc.nasa.gov/gsfc/earth/noaal/noaa-l_ presskit.pdf
- [11] W.G. Rees, *Physical principles of remote sensing*, Cambridge University Press (1990)
- [12] P. Le Fur, Et pourtant ils tournent ou les satellites artificiels, Bulletin de l'Union des Physiciens 860 (2004), pp.79-91
- [13] D.J. Mudgway, Uplink-Downlink. A History of the Deep Space Network 1957-1997, NASA (2001) disponible à history.nasa.gov/SP-4227/Uplink-Downlink.pdf
- [14] ARRL Antenna Handbook (1997)
- [15] Nous avons basé notre montage sur le circuit proposé à l'origine à http://www.applet.cz/~ulcak/crossed_ dipoles_ant.htm, site qui ne semble plus actif aujourd'hui. Une description moins claire est disponible à http: //www.chez.com/shackradio/schemas.htm. Il s'agit dans tous les cas de deux dipôles (chaque bras de longueur 52,5 cm) reliés par une ligne de déphasage de 90° obtenu par un cable de 36 cm d'impédence 75 Ω, et placés à une hauteur de l'ordre du mètre au dessus du sol. Le lecteur est encouragé à tester divers emplacement et hauteurs au-dessus du sol afin d'obtenir les meilleurs résultats.
- [16] Y. Blanchard, Le radar 1904-2004 Histoire d'un siècle d'innovations techniques et opérationnelles, Ellipses (2004)
- [17] C.A. Balanis, Antenna Theory, Analysis and Design, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc. (1997)
- [18] D.J. Travis, A.M. Carleton & R.G. Lauritsen, Contrails reduce daily temperature range 418 Nature (2002) p.601
- [19] E.D. Miner & R.R. Wessen, Neptune. The planet, rings and satellites Springer-Praxis (2001)
- [20] D.M. Harland, The story of space station MIR Springer-Praxis (2005)
- [21] D.M. Harland, Jupiter Odyssey. The story of NASA's Galileo mission Springer-Praxis (2000)
- [22] J.-M Friedt, S. Guinot, Introduction au Coldfire 5282, GNU/Linux Magazine France, 75 (Septembre 2005)
- [23] T.S. Kelso, Visually Observing Earth Satellites, Satellite Times (1996), disponible à http://www.celestrak. com/columns/v03n01/