

COURS DE RÉFÉRENCE - POUR TOUT ADULTE

Ce qu'est l'ADS-B et comment il fonctionne

Douze chapitres. Aucune connaissance préalable de l'aviation ou de la radio n'est supposée ; les mathématiques du secondaire suffisent pour les exemples résolus, et on peut les sauter sans perdre le fil. Temps de lecture : environ 50 minutes.

Apprendre - <https://radar.dataero.eu/fr/learning/course> 2026-10-22

SOMMAIRE

CHAPITRE 1 Le problème : un ciel plein d'avions que personne ne voit

CHAPITRE 2 Avant l'ADS-B : trouver les avions au radar

CHAPITRE 3 L'idée : laisser l'avion nous le dire

CHAPITRE 4 Comment l'avion sait où il est

CHAPITRE 5 Anatomie d'un message

CHAPITRE 6 - PHYSIQUE L'onde : la radio comme lumière invisible

CHAPITRE 7 - PHYSIQUE La portée : la courbure de la Terre et l'affaiblissement du signal

CHAPITRE 8 - PHYSIQUE Les antennes : attraper une onde de 27 centimètres

CHAPITRE 9 Recevoir et décoder

CHAPITRE 10 D'un récepteur à la carte d'un continent

CHAPITRE 11 À quoi cela sert, et où cela ne suffit pas

CHAPITRE 12 Une brève histoire

Glossaire

ET ENSUITE De la théorie à la pratique : construire le récepteur

CHAPITRE 1

Le problème : un ciel plein d'avions que personne ne voit

Un jour de semaine ordinaire, environ 30 000 vols traversent l'espace aérien européen. Un avion de ligne en croisière avance à quelque 250 mètres par seconde, soit 900 km/h ; deux avions qui se dirigent l'un vers l'autre se rapprochent d'un demi-kilomètre à chaque seconde. Un pilote qui regarde par le hublot ne voit presque rien de tout cela : à 10 000 mètres, les autres avions sont des points, et les nuages en cachent de toute façon la plupart. Le ciel est un réseau routier en trois dimensions sans aucune route peinte dessus, et le trafic qui l'emprunte est à la fois rapide et invisible.

Le contrôle aérien existe pour tenir ce trafic à distance. Les règles sont simples dans leur principe : dans l'espace aérien contrôlé, les avions sont maintenus à au moins 1 000 pieds (environ 300 mètres) l'un de l'autre verticalement, ou à une distance horizontale fixée, typiquement 5 milles nautiques (9,3 km) sous couverture radar et bien davantage au-dessus des océans. Pour appliquer ces règles, un contrôleur doit connaître, en continu et de façon fiable, la position de chaque avion de son secteur : non pas où il était il y a une minute, mais où il est maintenant, à quelle altitude, et dans quelle direction il va. Tout le sujet de ce cours est la façon dont cette connaissance s'obtient. Le mot technique pour la désigner est la **surveillance**.

Un chiffre à garder en tête

À 900 km/h, un avion parcourt 15 km en une minute et 250 m en une seconde. Toute méthode de surveillance qui se met à jour lentement, ou avec une grande erreur, laisse le contrôleur deviner précisément sur les distances qui comptent.

CHAPITRE 2**Avant l'ADS-B : trouver les avions au radar**

La première réponse, mise au point à la fin des années 1930 et mûrie pendant la Seconde Guerre mondiale, fut le **radar primaire**. Une grande antenne tournante envoie une impulsion radio brève et très puissante. Lorsque l'impulsion frappe un avion, une infime fraction en est renvoyée. Le radar mesure le temps écoulé entre le départ de l'impulsion et le retour de l'écho ; comme la radio voyage à la vitesse de la lumière, 300 000 km/s, ce temps donne la distance. La direction vers laquelle pointait l'antenne donne le relèvement. Le radar primaire a une indépendance merveilleuse : l'avion n'a besoin d'aucun équipement, et c'est pourquoi les militaires l'utilisent encore. Mais il a de vraies faiblesses. L'écho d'un avion lointain est extraordinairement faible, si bien que l'émetteur doit être énorme. L'écho ne dit rien de l'identité de l'avion ni de son altitude. Et l'antenne met plusieurs secondes à faire un tour, de sorte que chaque avion n'est vu qu'une fois toutes les 4 à 12 secondes, pendant lesquelles il a parcouru jusqu'à 3 km.

La deuxième réponse, le **radar secondaire de surveillance** (SSR), a fait de l'avion un participant. Une station au sol émet une question, une *interrogation*, sur 1030 MHz. Une petite radio à bord, le **transpondeur**, entend la question et y répond sur 1090 MHz avec un signal puissant qui lui est propre. Comme la réponse est émise et non réfléchi, elle est des millions de fois plus forte qu'un écho radar, et comme elle est produite par un ordinateur, elle peut transporter de l'information. Dans la forme la plus ancienne (Mode A), la réponse contient un code d'identité à quatre chiffres attribué par le contrôleur ; en Mode C, elle contient aussi l'altitude de l'avion. Dans les années 1980 est venu le **Mode S** (« S » pour sélectif), dans lequel chaque transpondeur possède une adresse unique de 24 bits, peut être interrogé individuellement, et peut répondre par des messages de données de 56 ou 112 bits. Gardez en tête ce nombre, 1090 MHz, et ce mot, Mode S : l'ADS-B est bâti directement sur les deux.

Le radar secondaire fut un grand progrès, mais il partage encore deux limites avec son prédécesseur. L'avion ne parle que lorsqu'on l'interroge, donc le sol a toujours besoin d'une station d'interrogation à portée, ce qui exclut les océans, les déserts et les chaînes de montagnes. Et la station a toujours besoin d'une antenne tournante pour savoir de quelle direction vient la réponse, si bien que chaque avion n'est toujours vu qu'une fois par rotation, et que l'écran du contrôleur montre toujours un point qui saute toutes les quelques secondes plutôt qu'un avion qui se déplace régulièrement. Pour faire mieux, il fallait quelque chose de fondamentalement différent : un moyen pour l'avion d'annoncer sa position sans qu'on la lui demande, et sans que le sol ait à mesurer quoi que ce soit.

CHAPITRE 3

L'idée : laisser l'avion nous le dire

Dans les années 1990, deux technologies avaient mûri qui rendaient possible une approche différente. La navigation par satellite donnait à tout avion convenablement équipé une connaissance précise de sa propre position, bien meilleure que ce qu'un radar pouvait mesurer depuis le sol. Et le transpondeur Mode S fournissait déjà une radio capable d'envoyer des messages de données sur 1090 MHz. Réunissez les deux, et la logique devient irrésistible : au lieu que le sol s'épuise à mesurer où est l'avion, laissons l'avion, qui le sait déjà, le dire tout simplement, à intervalles réguliers, à tout le monde. C'est cela, l'ADS-B, et les quatre mots de son nom en sont une description précise.

Il est **automatique** : rien ne déclenche l'émission. Le transpondeur émet selon son propre rythme, environ deux fois par seconde, qu'une station au sol soit ou non à portée et que le pilote fasse ou non quoi que ce soit ; le pilote ne peut d'ailleurs pas l'arrêter en vol, sinon en coupant le transpondeur, ce qui est interdit. Il est **dépendant** : chaque élément du message provient des propres équipements de l'avion, la position de son récepteur satellite et l'altitude de son altimètre barométrique, et le sol ne mesure rien ; il fait confiance à ce qu'on lui dit. C'est de la **surveillance** : son but est de faire savoir aux autres où est l'avion, pour le contrôle aérien et pour les avions voisins, par opposition à la navigation, qui est le fait pour l'avion de savoir lui-même où il est, et à la communication, qui consiste à parler au pilote. Et c'est une **diffusion** (broadcast) : le message n'a ni destinataire, ni accusé de réception, ni chiffrement, et quiconque possède un récepteur à portée entend exactement la même chose, qu'il s'agisse d'un centre de contrôle, d'un autre avion de ligne ou d'une école.

« Dépendant » est le mot qui inquiète les ingénieurs, et celui qui mérite le plus d'explication. Le radar fait une mesure indépendante : si les instruments de l'avion se trompent, le radar s'en moque. L'ADS-B hérite de chaque erreur du système de navigation de l'avion, et si ce système est trompé ou tombe en panne, la position diffusée est fautive avec la même assurance. C'est pourquoi chaque message ADS-B porte, à côté de la position, une indication du degré de confiance que l'avion accorde à sa propre position (les catégories d'intégrité et de précision que nous rencontrerons au chapitre 5), et c'est pourquoi le radar n'a pas été débranché.

« Diffusion » est le mot qui rend ce cours possible. Comme les messages sont envoyés en clair à tout le monde, ils ne sont pas entendus seulement par le contrôle aérien, mais par n'importe quel récepteur réglé sur 1090 MHz, y compris celui que vous pourriez installer sur le toit d'une école. La même propriété est à l'origine de la principale limite du système, abordée au chapitre 11 : un message que tout le monde peut lire est aussi un message que tout le monde peut falsifier.

CHAPITRE 4

Comment l'avion sait où il est

Tout, dans l'ADS-B, repose sur le fait que l'avion connaît sa propre position ; ce chapitre traite donc de la navigation par satellite. Le terme générique est **GNSS**, système mondial de navigation par satellite ; le GPS américain est le plus connu, et Galileo en Europe, GLONASS en Russie et BeiDou en Chine fonctionnent sur le même principe. Chaque système est une constellation d'environ 24 à 30 satellites en orbite à quelque 20 000 km d'altitude, bien au-dessus de l'avion, chacun emportant une horloge

atomique précise à quelques milliardièmes de seconde. Chaque satellite émet en continu un signal radio qui dit, en substance : « je suis le satellite numéro N, ma position est celle-ci, et l'instant où j'envoie ceci est exactement T ».

Le récepteur de l'avion entend ce signal un peu plus tard, parce que la radio met du temps à voyager : à 300 000 km/s, les 20 000 km depuis le satellite prennent environ 67 millièmes de seconde. Le récepteur compare l'heure inscrite dans le message avec l'heure d'arrivée. La différence, multipliée par la vitesse de la lumière, est la distance à ce satellite. Une distance place le récepteur quelque part sur une sphère autour de ce satellite. Deux sphères se coupent selon un cercle ; trois sphères, en deux points, dont l'un est en général absurde (sous terre ou loin dans l'espace) et se rejette. Trois satellites suffiraient donc, si le récepteur avait une horloge parfaite.

Il n'en a pas. Une horloge atomique coûte des dizaines de milliers d'euros et ne tiendrait pas dans l'appareil ; le récepteur a une horloge à quartz bon marché, qui peut se tromper de bien plus que la précision temporelle requise. Voici la partie élégante. Le récepteur traite sa propre erreur d'horloge comme une quatrième inconnue, à côté de ses trois coordonnées de position, et écoute un quatrième satellite. Quatre équations, quatre inconnues : le récepteur résout sa position et, par-dessus le marché, corrige sa propre horloge à quelques dizaines de nanosecondes près. C'est pourquoi un récepteur satellite a besoin d'au moins quatre satellites en vue, et pourquoi tout récepteur GNSS est aussi, incidemment, l'une des horloges les plus précises du bâtiment.

Il vaut la peine de s'attarder sur les ordres de grandeur, parce qu'ils expliquent pourquoi la navigation par satellite est en réalité un exercice de chronométrie, la géométrie venant presque après coup. La lumière parcourt 30 centimètres en une nanoseconde et 300 mètres en une microseconde ; une erreur de temps d'un millionième de seconde devient donc une erreur de position de 300 mètres, et la précision de quelques mètres d'un récepteur moderne correspond à une mesure du temps à environ dix nanosecondes près. Prenons un cas concret. Un satellite marque un signal de l'heure 12:00:00,000 000 000 ; le récepteur de l'avion l'entend à 12:00:00,070 000 000. Le temps de trajet est de 0,070 s, donc la distance vaut $0,070 \times 300\,000 \text{ km/s} = 21\,000 \text{ km}$. Si l'horloge du récepteur avait avancé d'une seule microseconde, il aurait calculé 21 000,3 km, 300 mètres de trop, et la même erreur se serait glissée dans la distance à chacun des autres satellites. C'est précisément cette erreur commune que le quatrième satellite révèle et élimine.

Deux altitudes, et non une

Les satellites donnent une hauteur au-dessus de la surface mathématique de la Terre, une altitude *géométrique*. Pourtant, l'altitude qu'un avion diffuse à des fins de contrôle aérien n'est pas celle-là. C'est l'**altitude barométrique**, déduite de la pression de l'air à l'extérieur de l'avion, mesurée par une petite ouverture dans le fuselage appelée prise statique. La pression de l'air diminue avec la hauteur selon une loi connue (environ 1 hPa par 8 mètres près du sol, plus lentement en altitude), et tous les altimètres du monde convertissent la pression en hauteur avec la même atmosphère standard, référencée à 1013,25 hPa au niveau de la mer. Un jour de pression inhabituelle, l'altitude barométrique de tous les avions est faussée de la même quantité, et c'est exactement le but : ce qui compte pour la séparation n'est pas la vraie hauteur au-dessus de la mer, mais que deux avions qui lisent tous deux « niveau de vol 350 » soient

vraiment à 300 mètres de celui qui lit « niveau de vol 340 ». L'ADS-B diffuse l'altitude barométrique dans ses messages de position, par pas de 25 pieds (7,6 m), et diffuse séparément la différence entre celle-ci et la hauteur satellite, de sorte qu'un récepteur peut retrouver les deux.

CHAPITRE 5

Anatomie d'un message

Le message ADS-B utilisé par les avions de ligne du monde entier est une émission Mode S appelée **squitter étendu** (extended squitter) ; « squitter » est un vieux mot d'argot radariste pour une émission envoyée spontanément plutôt qu'en réponse, et « étendu » parce qu'avec ses 112 bits il est deux fois plus long que la réponse Mode S d'origine. Les ingénieurs écrivent « 1090ES » pour « squitter étendu à 1090 MHz ». Chaque émission dure 120 microsecondes en tout : un *préambule* de 8 microsecondes, motif fixe de quatre impulsions qui permet à un récepteur de reconnaître le début d'un message et de synchroniser son horloge, suivi de 112 bits de données à raison d'un bit par microseconde.

Comment un bit est envoyé : la modulation par position d'impulsion

Chaque intervalle de bit, d'une microseconde, est divisé en deux moitiés. Une impulsion radio dans la première moitié et le silence dans la seconde signifient 1 ; le silence puis une impulsion signifient 0. Il y a donc exactement une impulsion par bit, quelles que soient les données, et le récepteur n'a qu'à décider quelle moitié de chaque intervalle a été la plus forte. Ce procédé, la modulation par position d'impulsion (PPM), résiste bien aux bruits et aux évanouissements que subit un signal sur son trajet entre un transpondeur et une antenne lointaine, et il se décode à peu de frais.

Quatre bits en modulation par position d'impulsion : 1, 0, 1, 1



Les 112 bits

DF	CA	adresse ICAO	ME - la charge utile	PI
5 bits	3 bits	24 bits	56 bits	24 bits
format de liaison descendante	capacité	identité unique de l'avion	position, altitude, vitesse, indicatif ou statut, selon le code de type contenu dans ses 5 premiers bits	contrôle d'erreur (CRC)

Les cinq premiers bits, le format de liaison descendante, disent de quel type de message Mode S il s'agit ; la valeur 17 signifie « ADS-B émis par un transpondeur Mode S ». L'**adresse ICAO** de 24 bits est l'identité permanente de l'avion, attribuée lors de son immatriculation : il existe 2 puissance 24, soit 16 777 216 adresses possibles, allouées par blocs aux États par l'ICAO (l'OACI, l'organisation de l'aviation civile des Nations unies). Les avions belges, par exemple, portent des adresses comprises entre 448000

et 44FFFF en hexadécimal. Contrairement au code à quatre chiffres de l'ancien Mode A, cette adresse ne change jamais et n'est jamais partagée, si bien qu'un récepteur sait avec certitude quel avion il entend dès le tout premier message.

Le champ **ME** de 56 bits est le contenu proprement dit, et ses cinq premiers bits, le *code de type*, disent ce que signifie le reste. Les codes de type 1 à 4 portent l'indicatif d'appel de l'avion, tel que BEL1234 ou RYR7KL, sous la forme de huit caractères de six bits. Les codes 9 à 18 portent une position en vol avec l'altitude barométrique ; 20 à 22, la même avec l'altitude satellite. Le code 19 porte la vitesse : la vitesse sol décomposée en composantes est-ouest et nord-sud, la vitesse verticale, et la différence entre altitude barométrique et altitude satellite. Les codes 28, 29 et 31 portent le statut : codes d'urgence, altitude sélectionnée, et les catégories d'intégrité et de précision qui disent jusqu'où la position diffusée peut être crue (un « NIC » de 8, par exemple, promet que la vraie position est à moins de 185 m de la position annoncée, avec une forte probabilité).

Les 24 derniers bits sont un **contrôle de redondance cyclique**, un nombre calculé à partir des 88 bits précédents par une division polynomiale fixe. Le récepteur refait le calcul sur les bits qu'il a décodés ; si le résultat ne concorde pas, au moins un bit a été corrompu en route et le message est rejeté. Comme une impulsion d'une microseconde se perd facilement dans le bruit ou dans un message d'un autre avion qui la recouvre, c'est ce contrôle qui tient les positions brouillées à l'écart de l'écran du contrôleur. Un vrai message, tel qu'un récepteur l'enregistrerait, ressemble à ceci :

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D : format de liaison descendante 17, capacité 5. 4840D6 : adresse ICAO, un avion néerlandais. 20... : code de type 4, un message d'identification, qui se décode en l'indicatif KLM1023. 576098 : le contrôle d'erreur.

Faire tenir la Terre dans 34 bits

Un message de position ne dispose que de 17 bits pour la latitude et 17 pour la longitude. Cela fait 131 072 pas autour du globe entier, environ 300 m chacun à l'équateur : très loin d'être suffisant. L'ADS-B résout cela par le **codage compact de la position** (compact position reporting, CPR). La Terre est découpée en zones ; les 17 bits donnent une position très précise (à environ 5 m près) à l'intérieur d'une zone, mais pas de quelle zone il s'agit. L'avion alterne entre deux grilles de zones légèrement différentes, les messages « pairs » et « impairs », et un récepteur qui a entendu un message de chaque sorte peut déterminer la zone sans ambiguïté. Une fois cela fait, un seul message suffit pour suivre l'avion, puisqu'il ne peut guère avoir sauté dans une autre zone en une demi-seconde. C'est une astuce élégante qui double la précision utile sans coûter un seul bit.

À quelle fréquence

Un transpondeur en vol envoie un message de position deux fois par seconde, un message de vitesse deux fois par seconde, et son indicatif toutes les cinq secondes, plus des messages de statut à intervalles plus longs, soit environ quatre à cinq squitters étendus par seconde en tout. Chacun dure 120 microsecondes ; le transpondeur n'émet en réalité de l'ADS-B que bien moins d'un millième du temps. Le reste de la seconde, il écoute les interrogations radar sur 1030 MHz et les requêtes anticollision des autres avions, et y répond.

CHAPITRE 6 - PHYSIQUE

L'onde : la radio comme lumière invisible

Le message quitte l'avion sous la forme d'une **onde radio**, et l'idée la plus utile de tout ce cours est qu'une onde radio et un rayon de lumière sont une seule et même chose. Tous deux sont des ondes électromagnétiques : une configuration de champs électrique et magnétique qui oscillent ensemble et se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière, c , soit 299 792 458 mètres par seconde, ou à très peu près 300 000 km/s. Ce qui distingue une onde radio de la lumière verte, des rayons X d'un hôpital ou des micro-ondes d'un four de cuisine, c'est uniquement la rapidité avec laquelle les champs oscillent : la **fréquence**, f , mesurée en hertz (oscillations par seconde).

Comme l'onde se déplace à vitesse fixe, la fréquence fixe la distance entre une crête et la suivante, la **longueur d'onde**, λ . En une seconde, l'onde parcourt c mètres et accomplit f oscillations, donc chaque oscillation occupe c / f mètres :

$$c = f \times \lambda$$

Pour l'ADS-B : $\lambda = 300\,000\,000 / 1\,090\,000\,000 = 0,275$ m. L'onde entre l'avion et votre antenne a des crêtes espacées de 27,5 cm, à peu près la longueur d'une règle d'écolier.

Onde	Fréquence	Longueur d'onde	Remarque
Radio FM	100 MHz	3 m	Les antennes de voiture en sont une fraction
ADS-B / Mode S	1 090 MHz	27,5 cm	Aussi utilisée par les réponses des transpondeurs radar
Téléphone mobile (bande 4G)	1 800 MHz	17 cm	Un proche voisin dans le spectre
Wi-Fi, four à micro-ondes	2 450 MHz	12 cm	Même fréquence, puissances très différentes
Lumière verte visible	560 000 000 MHz	0,000 54 mm	Une fréquence un demi-million de fois plus élevée

Deux conséquences comptent pour tout ce qui suit. D'abord, puisque l'onde est de la lumière, elle se propage en ligne droite à moins que quelque chose ne la dévie ou ne la bloque, et elle ne traverse pas la Terre. Cela fixe la portée du système, sujet du chapitre 7. Ensuite, puisque sa longueur d'onde est de 27,5 cm, les structures métalliques qui interagissent le plus fortement avec elle, les antennes, sont de cet ordre de taille, sujet du chapitre 8.

Pourquoi la radio n'est pas du son

La confusion la plus courante, chez les adultes autant que chez les enfants, est celle entre la radio et le son, sans doute parce qu'une « radio » est une boîte qui produit du son. Ce sont des phénomènes sans rapport. Le son est une onde de pression dans l'air, une chaîne de molécules qui poussent leurs voisines ; il a besoin d'un milieu matériel pour se propager, il avance à 340 m/s et il ne peut pas traverser le vide. La radio n'a besoin de rien : elle traverse le vide entre un satellite et l'avion, et elle avance près d'un

million de fois plus vite. Le bruit des réacteurs de l'avion et son message ADS-B le quittent au même instant ; le message parvient à un récepteur situé à 20 km en 67 microsecondes, le son une bonne minute plus tard.

Pourquoi 1090 MHz

La fréquence est un héritage. Des accords internationaux des années 1950 ont réservé la bande de 960 à 1215 MHz à la radionavigation aéronautique, et 1090 MHz est devenue la fréquence de réponse des transpondeurs du radar secondaire. Lorsque l'ADS-B a été conçu, réutiliser le transpondeur déjà installé sur chaque avion de ligne revenait bien moins cher que d'installer une nouvelle radio ; l'ADS-B est donc simplement devenu une chose de plus que le transpondeur Mode S dit sur 1090 MHz. Aux États-Unis, les petits avions volant en dessous d'environ 5 500 m peuvent utiliser à la place un second système, l'UAT sur 978 MHz, ce qui explique que les récepteurs y écoutent souvent les deux.

CHAPITRE 7 - PHYSIQUE

La portée : la courbure de la Terre et l'affaiblissement du signal

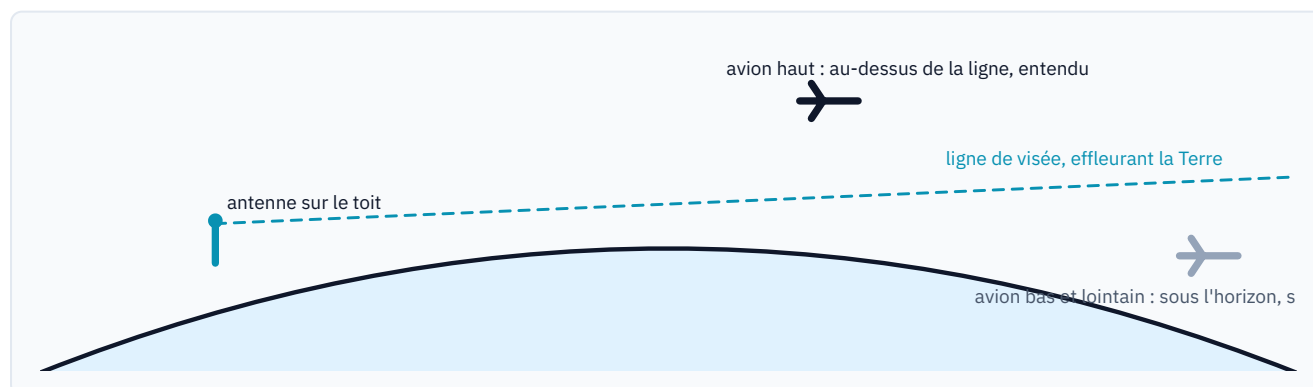
Un transpondeur émet avec une puissance de crête de quelques centaines de watts. À quelle distance un tel signal peut-il être entendu ? Deux choses bien différentes le limitent, et il vaut la peine de les distinguer : la géométrie, qui fixe une limite nette, et la puissance, qui en fixe une plus floue.

L'horizon radio

À 1090 MHz, la radio se comporte comme la lumière : elle se propage en ligne droite et ne contourne pas la Terre. Une antenne au sol ne peut donc entendre un avion que tant qu'il existe entre eux une ligne droite qui ne traverse pas le sol. Pour un observateur à la surface, l'horizon est l'endroit où cette ligne effleure tout juste la Terre. Plus l'avion est haut, plus ce point d'effleurement est loin ; plus l'antenne est haute, plus loin encore. La géométrie d'une tangente à une sphère donne un résultat simple : la distance à l'horizon en kilomètres vaut environ 3,57 fois la racine carrée de la hauteur en mètres. L'atmosphère incurve légèrement la radio vers le bas, ce qui allonge l'horizon d'environ 15 pour cent, si bien que les ingénieurs utilisent 4,12 à la place :

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h \text{ avion}} + \sqrt{h \text{ antenne}}) \quad \text{hauteurs en mètres}$$

Avion à 11 000 m, antenne sur un toit de 20 m : $4,12 \times (104,9 + 4,5) = 451 \text{ km}$. Avion à 1 000 m, même toit : $4,12 \times (31,6 + 4,5) = 149 \text{ km}$. Avion au sol à 15 m : pas entendu du tout, sauf si le terrain entre les deux est plat et dégagé.



Cela explique la forme caractéristique de la couverture d'un récepteur : un cercle de 400 km ou plus pour le trafic à haute altitude, qui se réduit à quelques dizaines de kilomètres pour les avions en approche, et à presque rien pour les avions au sol, sauf à l'aéroport voisin. Cela explique aussi pourquoi la hauteur du récepteur compte bien plus que sa qualité, et pourquoi une colline, un immeuble ou même l'aile de l'avion, lorsqu'il s'incline en s'éloignant de vous, peuvent couper un signal net.

La loi de l'inverse du carré

En deçà de l'horizon, le signal faiblit avec la distance. L'antenne d'un transpondeur rayonne dans toutes les directions horizontales, si bien que sa puissance se répartit sur une sphère toujours plus grande. L'aire d'une sphère croît comme le carré de son rayon, donc la puissance qui tombe sur une antenne de taille fixe décroît comme le carré de la distance : deux fois plus loin, un quart de la puissance ; dix fois plus loin, un centième. Les ingénieurs expriment cela par un *affaiblissement de propagation* en décibels, et pour 1090 MHz sur 400 km il atteint environ 145 dB, ce qui signifie que la puissance reçue est environ 10 puissance 14,5 fois plus petite que la puissance émise. Une impulsion de 250 watts arrive sous la forme d'à peu près un dixième de milliardième de milliwatt. Un bon récepteur parvient à détecter cela, tout juste, et c'est pourquoi l'horizon géométrique et la limite de puissance coïncident à quelques centaines de kilomètres : le système a été conçu ainsi.

Les deux limites interagissent d'une façon qui vaut la peine d'être comprise. En deçà de l'horizon, un signal fort venant d'un avion proche et un signal faible venant d'un avion lointain se décodent tous deux parfaitement, parce que le procédé de position d'impulsion du chapitre 5 ne demande que quelle moitié de chaque intervalle de bit a été la plus forte, et non à quel point. Le signal ne s'efface pas progressivement à mesure que l'avion s'éloigne ; il reste décodable jusqu'à ce que, quelque part près de l'horizon, soit la géométrie le coupe, soit le bruit du récepteur finisse par le noyer, et la trace s'arrête. C'est pourquoi les cartes de couverture ont des bords nets, et pourquoi les avions les plus lointains qu'un récepteur entend sont presque toujours les plus hauts.

CHAPITRE 8 - PHYSIQUE

Les antennes : attraper une onde de 27 centimètres

Une antenne est un morceau de conducteur façonné de telle sorte qu'une onde électromagnétique qui passe mette les électrons qu'il contient en mouvement cadencé, produisant un minuscule courant alternatif qu'un récepteur peut amplifier. L'inverse se produit à l'émission : un courant alternatif dans l'antenne de l'avion lance l'onde. L'efficacité de cet échange dépend de la taille du conducteur par rapport à la longueur d'onde. Un fil rectiligne réagit le plus fortement, il *résonne*, lorsqu'il mesure une demi-longueur d'onde, de sorte que le courant qui va et vient le long du fil épouse exactement l'oscillation de l'onde, comme une balançoire poussée à son rythme naturel. Pour 1090 MHz, une demi-longueur d'onde vaut 13,75 cm.

La forme pratique la plus courante est le **monopôle quart d'onde** : une tige verticale d'un quart de longueur d'onde, 6,9 cm, dressée sur une surface conductrice, le *plan de masse*. Le plan de masse agit comme un miroir, si bien que la tige et son reflet se comportent ensemble comme une antenne demi-onde. C'est pourquoi l'antenne ADS-B d'un avion est une petite lame trapue de quelques centimètres sur

le fuselage, le fuselage faisant office de plan de masse, et pourquoi l'antenne d'un amateur est un fil court sur un couvercle de boîte de conserve. Un fil de mauvaise longueur fonctionne encore, mais bien moins bien : l'« oreille de métal » est accordée.

Trois autres propriétés de l'antenne découlent de la physique, et chacune a une conséquence visible. La première est la **polarisation**. Le champ électrique d'une onde électromagnétique oscille dans une direction définie, perpendiculaire à sa propagation, et une antenne ne réagit qu'à la composante du champ le long de sa propre longueur. Les antennes des avions sont montées verticalement, donc l'onde ADS-B arrive polarisée verticalement, et une antenne de réception doit être verticale elle aussi ; couchée sur le côté, elle n'entend presque rien, comme une onde sur une corde secouée de haut en bas est arrêtée par une fente horizontale. La deuxième est le **diagramme de rayonnement**. Une antenne verticale est la plus sensible vers l'horizon et pas du tout le long de son propre axe, de sorte que sa sensibilité en trois dimensions a la forme d'un donut, l'antenne passant par le trou. Les récepteurs entendent donc couramment sans difficulté des avions à 300 km et en perdent un qui passe exactement à la verticale pendant quelques secondes, chose à guetter sur n'importe quelle carte en direct. Empiler plusieurs éléments résonants l'un au-dessus de l'autre aplatit le donut, concentrant la sensibilité vers l'horizon, là où sont les avions lointains, aux dépens de la verticale ; c'est ce qu'on appelle le **gain** d'antenne, et c'est toujours une redistribution de la sensibilité, jamais une création.

La troisième concerne ce qui se trouve entre l'antenne et le récepteur. L'antenne capte non seulement 1090 MHz mais tous les signaux du voisinage, y compris les émissions de téléphonie mobile, à quelques centaines de mégahertz de là, qui sont immensément plus fortes ; on place donc en premier un filtre qui ne laisse passer que la bande aéronautique. Le signal doit ensuite descendre un câble, et à 1090 MHz un câble coaxial perd environ la moitié du signal tous les dix mètres ; le remède est un amplificateur à faible bruit placé à l'antenne, avant le câble, pour que le signal soit assez fort pour survivre au trajet, plutôt qu'au récepteur, où l'amplification amplifierait le bruit du câble en même temps que ce qui reste du signal. Ce sont des détails, mais ce sont les détails qui décident si un récepteur sur le toit d'une école entend les avions à l'horizon ou seulement ceux d'à côté.

CHAPITRE 9

Recevoir et décoder

Entre l'antenne et un point sur une carte, il y a une chaîne de cinq étapes. L'antenne transforme l'onde qui passe en un courant alternatif de quelques microvolts. Un filtre et un amplificateur à faible bruit conservent la bande des 1090 MHz, rejettent tout le reste et multiplient le signal par mille. Une radio logicielle se règle sur la fréquence et échantillonne le signal deux millions de fois par seconde, le transformant en un flux de nombres. Un décodeur cherche dans ce flux le motif du préambule, lit les 112 bits, vérifie la parité et décode les champs. Et un module de suivi rassemble les messages de chaque avion en un seul enregistrement mis à jour en permanence : une position, une trajectoire, une étiquette.

L'étape remarquable est la troisième. Jusque vers 2010, décoder 1090 MHz exigeait du matériel spécialisé coûtant des milliers d'euros. Puis des amateurs ont découvert qu'un tuner de télévision USB à 20 euros contenait une puce à laquelle on pouvait demander de se régler sur n'importe quelle fréquence et de transmettre le signal brut à un ordinateur. Cette **radio logicielle** (SDR) transforme le problème de radio en problème de programmation : un ordinateur portable ou un Raspberry Pi reçoit un flux de deux millions de nombres par seconde décrivant l'intensité du signal, et un logiciel libre y cherche le motif du

préambule, mesure quelle moitié de chaque intervalle d'une microseconde est la plus forte, assemble 112 bits, calcule le CRC et affiche les champs. Le projet de récepteur du kit secondaire est exactement cette chaîne, et une école peut la construire pour moins de 100 euros.

L'étape du suivi est celle où le flux de messages devient connaissance. Un message de position isolé, rappelons-le, est ambigu tant qu'un message pair et un message impair n'ont pas été appariés. La vitesse arrive séparément de la position, l'indicatif séparément encore, et le module de suivi assemble le tout par adresse ICAO, rejette tout ce qui échoue au contrôle d'erreur, et conserve le dernier état connu de chaque avion. Si aucun message n'arrive pendant une minute, en général parce que l'avion est passé sous l'horizon, la trace expire.

CHAPITRE 10

D'un récepteur à la carte d'un continent

Un récepteur entend un cercle de ciel de quelques centaines de kilomètres de diamètre. Une carte de l'Europe en demande des centaines, et les plus utiles ne sont pas dans les villes mais dispersés : sur les côtes, dans les vallées, sur les îles, partout où le cercle d'un autre récepteur n'atteint pas. Chaque récepteur envoie ses messages décodés, chacun horodaté de son heure d'arrivée, par internet à un service central. Ce service *agrège* : le même message d'un avion haut arrive typiquement de dix ou vingt récepteurs à la fois, et les doublons doivent être reconnus et fusionnés. Il vérifie aussi : une position qui contredit la vue qu'ont tous les récepteurs voisins du même avion est probablement une erreur de décodage ou un transpondeur défectueux, et elle est signalée ou écartée.

La multilatération : trouver les avions qui ne disent pas où ils sont

Tous les avions ne diffusent pas de position. Les transpondeurs anciens répondent au radar par une identité et une altitude mais n'ont aucune entrée satellite ; certains avions n'en envoient délibérément aucune. Pourtant, leurs émissions sur 1090 MHz atteignent toujours le sol, et un réseau peut les localiser en retournant la navigation par satellite comme un gant. Si quatre récepteurs aux horloges précisément synchronisées enregistrent chacun l'instant où la même émission leur parvient, les différences entre ces instants révèlent les différences de distance : un message qui a atteint le récepteur A une microseconde avant le récepteur B a été émis d'un point 300 m plus proche de A que de B. Tous les points ayant cette propriété forment une surface courbe, un hyperboloïde, entre A et B. Trois surfaces de ce genre, obtenues de quatre récepteurs, se coupent à l'avion. C'est la **multilatération**, et elle exige une synchronisation à environ un dixième de microseconde, 30 m, entre des récepteurs distants de centaines de kilomètres, que ceux-ci obtiennent des mêmes satellites que l'avion utilise.

La même idée, deux fois

Navigation par satellite : un récepteur, quatre émetteurs dont les positions sont connues, on résout la position du récepteur. Multilatération : un émetteur, quatre récepteurs dont les positions sont connues, on résout la position de l'émetteur. Dans les deux cas, ce qu'on mesure vraiment, c'est le temps, et 1 microseconde vaut 300 mètres.

CHAPITRE 11

À quoi cela sert, et où cela ne suffit pas

Le contrôle aérien est le premier client. Dans toute l'Europe, les contrôleurs voient désormais une image fusionnée dans laquelle l'ADS-B, avec ses mises à jour deux fois par seconde et sa précision satellitaire, est combiné au radar et à la multilatération ; là où le radar n'a jamais porté, au-dessus de l'Atlantique Nord, de l'Arctique, du Sahara et de la plupart des océans, les messages ADS-B sont captés par des récepteurs embarqués sur des satellites de communication en orbite basse, ce qui a permis de rapprocher bien davantage qu'auparavant les avions qui traversent l'Atlantique. Les avions sont le deuxième client : un avion de ligne équipé de l'« ADS-B In » affiche le trafic voisin à son équipage et l'injecte dans son système anticollision. Les aéroports s'en servent pour suivre les avions et les véhicules au sol dans le brouillard. Les chercheurs utilisent les données ouvertes pour étudier le bruit, la consommation de carburant, les traînées de condensation et les retards. Et un récepteur sur le toit d'une école participe, modestement, à tout cela.

Les faiblesses du système découlent directement de sa conception, et chacune mérite d'être comprise plutôt que simplement énumérée. Comme les messages sont diffusés en clair, ni chiffrés ni signés, rien dans un message lui-même ne prouve qu'il vient d'un avion. Un émetteur au sol pourrait, illégalement, diffuser un message parfaitement formé décrivant un avion qui n'existe pas, et un récepteur le décoderait sans broncher. Ce qui protège le système, ce n'est pas le message mais le contexte qui l'entoure : un fantôme n'apparaîtra pas au radar, ne sera pas trouvé par multilatération, ne se comportera pas comme du trafic réel, et les centres de contrôle recourent en permanence. Une version du protocole avec signatures cryptographiques est discutée depuis de nombreuses années ; l'obstacle est moins technique que pratique, puisque tous les transpondeurs du monde devraient changer.

Comme la position dépend du récepteur satellite de l'avion, tout ce qui perturbe la navigation par satellite perturbe l'ADS-B. Le brouillage et le leurrage des signaux satellite sont devenus courants près des zones de conflit, et un avion qui traverse une telle zone peut se trouver incapable de calculer une position, ou en calculer une fausse. Ses messages portent alors une catégorie d'intégrité dégradée, le système du contrôleur les signale, et le radar, la mesure indépendante que l'ADS-B n'a jamais été censé remplacer entièrement, prend le relais. La relation entre les deux n'est donc pas celle d'un successeur et d'un prédécesseur, mais celle de partenaires aux faiblesses complémentaires.

Comme l'obligation couvre les avions de ligne et la plupart des gros appareils mais pas tout ce qui vole, la carte est incomplète par conception. Les avions légers hors espace contrôlé, les planeurs, les ballons et beaucoup d'avions militaires peuvent n'avoir aucun ADS-B, et certains avions légers utilisent d'autres systèmes qu'un récepteur 1090 MHz n'entend pas. Et comme la diffusion identifie l'avion, elle peut identifier son propriétaire : suivre un jet privé particulier revient, en pratique, à suivre une personne particulière, ce qui a conduit à des programmes qui masquent l'immatriculation des avions dont le propriétaire le demande, et à un débat toujours ouvert sur la question de savoir si une information qu'un avion diffuse au monde entier peut aussi être privée. C'est une bonne question à poser aux élèves plus âgés, parce que la physique n'y apporte aucune réponse.

CHAPITRE 12

Une brève histoire

1935 à 1945

Le radar primaire est mis au point en Grande-Bretagne, en Allemagne et aux États-Unis ; à la fin de la guerre, des transpondeurs d'« identification ami ou ennemi » répondent aux impulsions radar par une réponse codée, ancêtre du radar secondaire.

Années 1950 à 1960

Le radar secondaire civil est normalisé : interrogations sur 1030 MHz, réponses sur 1090 MHz, codes d'identité Mode A et altitude Mode C.

Années 1980

Le Mode S, avec ses adresses uniques de 24 bits et ses messages de données, est développé au Lincoln Laboratory du MIT et adopté par l'ICAO. Le GPS devient opérationnel pour les usagers civils.

Années 1990 à 2000

L'ADS-B est défini et expérimenté, notamment en Alaska, où la couverture radar était impossible et les accidents fréquents. Le squitter étendu à 1090 MHz est normalisé au niveau international.

Années 2010

Des radios logicielles bon marché font de la réception un loisir ; des réseaux bénévoles de milliers de récepteurs apparaissent. Des récepteurs sont lancés sur des satellites pour la couverture océanique.

2020

L'ADS-B devient obligatoire pour la plupart des avions en espace aérien contrôlé aux États-Unis (janvier) et dans l'Union européenne (juin, avec une transition jusqu'à la fin de l'année). Le ciel se met à parler, partout, tout le temps.

Glossaire

ADS-B

Automatic Dependent Surveillance - Broadcast, surveillance dépendante automatique en mode diffusion. Les avions diffusent leur propre position.

Altitude barométrique

Hauteur déduite de la pression de l'air au moyen d'une atmosphère standard ; celle que les avions annoncent.

CPR

Compact position reporting, codage compact de la position : le procédé pair/impair qui fait tenir une position précise dans 34 bits.

CRC

Contrôle de redondance cyclique, le contrôle d'erreur de 24 bits qui termine chaque message.

Squitter étendu

L'émission Mode S spontanée de 112 bits qui transporte l'ADS-B.

GNSS

Système mondial de navigation par satellite : GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou.

Adresse ICAO

L'identité permanente de 24 bits du transpondeur d'un avion.

Mode S

La norme de radar secondaire sélectif sur laquelle l'ADS-B est bâti.

Multilatération

Localisation d'un émetteur à partir des différences de temps d'arrivée du signal à plusieurs récepteurs.

Affaiblissement de propagation

L'affaiblissement d'un signal avec la distance, selon la loi de l'inverse du carré.

Horizon radio

La distance maximale à laquelle une ligne droite entre l'antenne et l'avion passe au-dessus de la Terre.

SDR

Radio logicielle (software-defined radio) : un tuner qui transmet les échantillons bruts du signal à un ordinateur pour décodage.

SSR

Radar secondaire de surveillance : le sol interroge, le transpondeur répond.

Transpondeur

La radio de l'avion qui répond au radar et émet l'ADS-B sur 1090 MHz.

Longueur d'onde

Distance entre deux crêtes successives d'une onde : c / f , soit 27,5 cm à 1090 MHz.

ET ENSUITE**De la théorie à la pratique : construire le récepteur**

Douze chapitres ont expliqué un système que vous pouvez maintenant tenir dans la main. L'atelier pratique en fait un après-midi de travail : quoi acheter pour 100 à 150 euros, comment construire et placer l'antenne, comment préparer un Raspberry Pi et installer le feeder Dataero, et comment regarder les avions que vous entendez apparaître sur la carte en direct, au crédit de votre station. Chaque chapitre ci-dessus y a une mesure qui l'attend : l'horizon radio sur de vrais avions, la loi de l'inverse du carré dans la colonne du signal, le rythme quotidien du ciel.

Ouvrir l'atelier pratique <https://radar.dataero.eu/fr/learning/workshop>