

DE 12 À 18 ANS - POUR L'ENSEIGNANT

Décoder le ciel : physique et informatique à travers un seul système réel

Cinq leçons et un projet. Chaque leçon prend une partie de l'ADS-B et développe pleinement la physique ou l'informatique qui la sous-tend : des démonstrations là où la classe peut les suivre, des exemples résolus avec de vrais chiffres, les expériences qui rendent l'idée observable, et les endroits où l'intuition des élèves se trompe. Le bas de la tranche d'âge (12 à 14 ans) suit les idées et l'arithmétique ; le haut (15 à 18 ans) suit les démonstrations et mène le projet.

Apprendre - <https://radar.dataero.eu/fr/learning/ages-12-18> 2026-10-22

SOMMAIRE

Avant de commencer : pourquoi un seul système réel vaut cinq leçons

LEÇON 1 - PHYSIQUE Les ondes et le spectre électromagnétique : ce sur quoi le message voyage

LEÇON 2 - PHYSIQUE ET MATHÉMATIQUES Temps et position : comment l'avion sait où il est, et comment un réseau en trouve un qui ne le dit pas

LEÇON 3 - INFORMATIQUE Le message numérique : 112 bits, comment ils sont envoyés, et comment les erreurs sont détectées

LEÇON 4 - PHYSIQUE Propagation et portée : la courbure de la Terre et la loi de l'inverse du carré

LEÇON 5 - PHYSIQUE ET INGÉNIERIE Antennes et récepteurs : d'une onde de 27 centimètres à un point sur une carte

PROJET - DEUX À QUATRE SEMAINES Construire un récepteur et confronter la physique au ciel

Réponses aux défis de l'élève

ET ENSUITE Le projet, pas à pas

Avant de commencer : pourquoi un seul système réel vaut cinq leçons

La plus grande partie de la physique enseignée entre 12 et 18 ans l'est par morceaux : un chapitre sur les ondes ici, un sur le spectre électromagnétique là, un thème sur les données numériques en informatique, une mention des satellites en géographie. L'ADS-B est un unique système en fonctionnement dans lequel tous ces morceaux sont porteurs en même temps, et dont la classe peut observer le résultat avec un récepteur qui coûte moins cher qu'un manuel. Un avion fixe sa position en chronométrant des signaux radio venus de satellites, ce qui est la trilatération et la vitesse de la lumière. Il code le résultat en 112 bits avec un contrôle de redondance cyclique, ce qui est le codage binaire et la détection d'erreurs. Il les émet sous forme d'onde radio à 1090 MHz modulée par position d'impulsion, ce qui est le spectre, la fréquence et la longueur d'onde. L'onde n'atteint un récepteur que le long d'une ligne droite qui passe au-dessus de la courbure de la Terre, et arrive affaiblie selon l'inverse du carré de la distance, ce qui est la géométrie et l'énergie. Une antenne accordée d'un quart de longueur d'onde la convertit en courant, ce qui est la résonance. Et un réseau de récepteurs peut localiser même un

émetteur silencieux à partir de différences de temps d'arrivée, ce qui est le problème des satellites retourné. Chaque leçon ci-dessous prend l'un de ces éléments et le développe pour lui-même, avec l'ADS-B comme exemple conducteur et non comme décoration.

Le cours de référence de la page d'accueil donne tout le système sous forme narrative, et la classe devrait en lire les chapitres 3 et 5 avant la leçon 3 et les chapitres 6 à 8 avant les leçons 4 et 5 ; son glossaire fait un document utile à distribuer. Cette page suppose que vous l'avez lu et se concentre sur la physique et l'enseignement. Les conventions numériques sont cohérentes tout du long : $c = 3,00 \times 10^8$ m/s, $f = 1090$ MHz, les hauteurs en mètres, les distances en kilomètres, et l'avion en croisière pris à 11 000 m (niveau de vol 360) et 250 m/s sauf indication contraire dans l'exemple.

Deux avertissements sur l'intuition. Les élèves arrivent en croyant que les ondes radio sont une sorte de son et que « le radar » ou « les satellites » voient les avions. Les deux sont faux, les deux sont traités explicitement aux leçons 1 et 2, et les deux reviendront ; le cours est conçu pour que chaque leçon ultérieure vous donne une nouvelle raison de les corriger. Et les élèves à l'aise avec les formules ne le sont souvent pas avec les ordres de grandeur : le cours s'appuie fortement sur la question « c'est grand comment ? » à chaque étape, parce que 300 m par microseconde, 145 dB d'affaiblissement et 2^{24} adresses sont le genre de nombres qui rendent la physique tangible.

LEÇON 1 - PHYSIQUE

Les ondes et le spectre électromagnétique : ce sur quoi le message voyage

Partez de l'observation sur laquelle repose tout le cours : le message radio d'un avion et un faisceau de lumière sont le même phénomène physique. Tous deux sont des ondes électromagnétiques, des champs électrique et magnétique oscillants qui se propagent dans l'espace sans aucun milieu, à une vitesse c qui est la même pour toutes les fréquences dans le vide et à très peu près dans l'air : 299 792 458 m/s, que la classe peut prendre pour $3,00 \times 10^8$ m/s. La grandeur qui distingue la radio de la lumière visible, et la lumière visible des rayons X, est uniquement la fréquence f de l'oscillation. Nos rétines réagissent aux fréquences comprises entre environ 4×10^{14} et 8×10^{14} Hz, que nous percevons du rouge au violet ; l'ADS-B est émis à $1,09 \times 10^9$ Hz, à peu près un demi-million de fois plus bas. Rien dans l'onde n'est différent par nature ; seuls nos yeux sont sélectifs.

Établissez l'équation des ondes pour la classe plutôt que de l'énoncer. Si une onde se déplace à la vitesse c et oscille f fois par seconde, alors en une seconde elle a avancé d'une distance c et a produit f cycles complets ; chaque cycle occupe donc une longueur c / f . Cette longueur est la longueur d'onde, λ , et donc $c = f \times \lambda$. Appliqué à l'ADS-B : $\lambda = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Le message entre l'avion et le récepteur a des crêtes espacées de 27,5 cm. Faites placer cela par la classe sur un spectre qu'elle dessine elle-même, sur un axe logarithmique : la radio FM à 100 MHz et 3 m, l'ADS-B à 1 090 MHz et 27,5 cm, les téléphones mobiles à 1 800 MHz et 17 cm, le Wi-Fi et les fours à micro-ondes à 2 450 MHz et 12 cm, l'infrarouge, la lumière visible à $5,6 \times 10^{14}$ Hz et 540 nm, et ainsi de suite jusqu'aux rayons X. L'exercice qui consiste à placer l'onde de l'avion entre un téléphone et un four vaut plus que n'importe quel tableau, parce qu'il fait comprendre que ce sont des voisins.

Affrontez maintenant directement la confusion avec le son, parce qu'elle est universelle et parce que le contraste enseigne les deux phénomènes. Le son est une onde de pression longitudinale dans un milieu ; sa vitesse est une propriété du milieu, 343 m/s dans l'air à 20 degrés, environ 1 500 m/s dans l'eau, et zéro dans le vide. La radio est une onde électromagnétique transversale qui n'a besoin d'aucun milieu, se propageant à c dans le vide et imperceptiblement plus lentement dans l'air. Chiffrez l'écart : $3,00 \times 10^8$ divisé par 343 fait environ 875 000. Un avion à 30 km qui émet un son et un message au même instant livre le message en 100 microsecondes et le son en 87 secondes ; le temps que le son arrive, l'avion a parcouru 22 km. La démonstration est une corde dans la classe et une lampe de poche à travers le terrain de sport : une onde sur une corde a visiblement besoin de la corde et avance à une vitesse que la corde fixe, et un éclair de lampe atteint l'autre bout sans aucun retard que quiconque puisse mesurer. Énumérez explicitement ce que la corde partage avec la lumière (une onde, une longueur d'onde, une fréquence, une vitesse fixe et donc une relation inverse entre f et λ) et ce qu'elle ne partage pas (un milieu, une vitesse de quelques mètres par seconde).

Terminez par la polarisation, qui coûte peu à montrer et paie à la leçon 5. Le champ électrique d'une onde électromagnétique oscille dans une direction définie, perpendiculaire à sa propagation. Les antennes des transpondeurs d'avion sont verticales, donc l'onde ADS-B est polarisée verticalement ; une antenne de réception doit aussi être verticale, et tournée à l'horizontale, elle n'entend presque rien. Une onde sur une corde secouée verticalement passe à travers une fente verticale dans une boîte en carton et est arrêtée par une fente horizontale ; deux morceaux de film polarisant (tirés de lunettes 3D bon marché) croisés contre une fenêtre montrent la même chose pour la lumière. Demandez à la classe de prédire ce qui arrive à la réception si une antenne de réception est couchée à plat. Ils testeront la prédiction dans le projet.

Exemple à donner

Le second système ADS-B, utilisé par les avions légers aux États-Unis, émet à 978 MHz. Quelle est sa longueur d'onde, et quelle serait la longueur d'une antenne quart d'onde pour lui ? (0,307 m ; 7,7 cm.) Un élève qui sait faire cela a acquis la leçon 1.

LEÇON 2 - PHYSIQUE ET MATHÉMATIQUES

Temps et position : comment l'avion sait où il est, et comment un réseau en trouve un qui ne le dit pas

Tout ce que l'avion diffuse sur sa position vient de la navigation par satellite, et la navigation par satellite est, au fond, une mesure de temps. Chaque satellite GNSS, en orbite à environ 20 200 km, emporte une horloge atomique et émet un signal indiquant sa propre position et l'instant exact de l'émission. Un récepteur note l'instant d'arrivée. La différence, multipliée par c , est la distance à ce satellite, et une telle distance place le récepteur sur une sphère de ce rayon centrée sur le satellite. Laissez la classe établir le décompte : deux sphères se coupent selon un cercle, trois en deux points, dont l'un est loin de la surface terrestre et peut être écarté. Trois satellites suffisent donc, à condition d'une horloge parfaite dans le récepteur. Il n'a rien de tel ; un oscillateur à quartz dérive de bien plus que les nanosecondes requises. La solution, qui est le cœur élégant du sujet, consiste à traiter l'erreur d'horloge du récepteur comme une quatrième inconnue et à utiliser un quatrième satellite : quatre équations à quatre inconnues (x , y , z et le

décalage d'horloge), résolues en continu. Un récepteur GNSS a donc besoin de quatre satellites en vue, et par-dessus le marché il garde l'heure à quelques dizaines de nanosecondes près, ce qui explique que les récepteurs du réseau de la leçon 5 utilisent pour leurs horloges les mêmes satellites que l'avion.

Mettez les ordres de grandeur au tableau et revenez-y sans cesse. La lumière parcourt 0,300 m en une nanoseconde et 300 m en une microseconde. Une erreur de temps de 1 microseconde est une erreur de distance de 300 m ; la précision de quelques mètres d'un récepteur moderne correspond à une mesure du temps au niveau de dix nanosecondes. Le temps de trajet depuis un satellite à la verticale vaut $20\,000\text{ km} / 3,00 \times 10^8\text{ km/s} = 0,0673\text{ s}$, et depuis un satellite près de l'horizon environ 0,086 s, si bien que le récepteur mesure des différences de quelques millisecondes avec une précision d'un cent-millionième de cela. Demandez à la classe ce qui se passerait si l'horloge d'un satellite avançait d'une microseconde ; ils devraient voir que chaque récepteur qui l'utilise serait poussé d'environ 300 m le long de la ligne vers ce satellite, et c'est pourquoi les horloges des satellites sont corrigées depuis le sol plusieurs fois par jour.

Séparez les deux altitudes, parce que le message porte les deux et que les élèves posent toujours la question. La solution satellite donne une hauteur géométrique au-dessus de l'ellipsoïde de référence de la Terre. Les avions annoncent néanmoins une altitude barométrique : la pression statique à l'extérieur du fuselage, convertie en hauteur par l'atmosphère standard internationale, qui suppose 1013,25 hPa et 15 degrés au niveau de la mer et une baisse de 6,5 degrés par kilomètre. Un jour où la pression réelle diffère de la pression standard, l'altitude barométrique de tous les avions est faussée de la même quantité, ce qui est exactement ce dont la séparation a besoin : deux avions qui lisent les niveaux de vol 350 et 360 sont à 1 000 ft l'un de l'autre quel que soit le temps. Les messages de position ADS-B portent l'altitude barométrique par pas de 25 pieds ; le message de vitesse porte la différence entre hauteur barométrique et hauteur géométrique, si bien qu'un récepteur peut retrouver les deux. Pour le groupe des plus âgés, la relation ISA $p = p_0 (1 - 0,0065 h / 288,15)^{5,255}$ fait un bon exercice de tableur : inversez-la pour trouver h à partir de p et vérifiez que 11 000 m correspond à environ 227 hPa, un cinquième de la pression au niveau de la mer.

Retournez maintenant le problème. Certains avions émettent sur 1090 MHz sans position satellite : des transpondeurs anciens qui répondent au radar avec seulement une identité et une altitude, ou des avions dont le GNSS est brouillé. Un réseau de récepteurs peut quand même les localiser. Supposons que quatre récepteurs aux horloges synchronisées enregistrent l'heure d'arrivée de la même émission. L'émetteur est inconnu, les récepteurs sont connus : c'est le problème GNSS avec les rôles du connu et de l'inconnu échangés. Un message arrivé au récepteur A une microseconde avant le récepteur B a été émis d'un point 300 m plus proche de A que de B, et le lieu de ces points est un hyperboloïde de foyers A et B. Trois paires indépendantes tirées de quatre récepteurs donnent trois hyperboloïdes, dont l'intersection est l'avion. C'est la multilatération, et elle exige que les horloges des récepteurs s'accordent à environ 100 ns, ce qu'elles obtiennent des satellites. Pour la classe, ramenez-la à deux dimensions avec l'exercice de la cour : trois élèves munis de chronomètres à des points relevés, un quatrième caché quelque part frappe dans ses mains, les trois notent leurs retards corrigés du temps de réaction, et la classe trace les hyperboles (ou, plus simplement, essaie des positions sur un dessin à l'échelle) pour trouver celui qui a frappé, avec 343 m/s. Demandez ensuite quelle précision de temps il faudrait pour faire la même chose avec de la radio sur 200 km, et laissez-les sentir l'écart entre un chronomètre et une horloge atomique.

Exemple à donner

Deux récepteurs distants de 60 km enregistrent un message à 50 microsecondes d'intervalle. De combien l'avion était-il plus proche du premier récepteur ? (15 km.) Si les horloges étaient décalées de 1 microseconde l'une par rapport à l'autre, quelle erreur cela mettrait-il dans la réponse ? (300 m.) Un élève qui sait expliquer pourquoi la seconde réponse ne dépend pas de la distance a compris ce que la multilatération exige.

LEÇON 3 - INFORMATIQUE**Le message numérique : 112 bits, comment ils sont envoyés, et comment les erreurs sont détectées**

Le transpondeur de l'avion envoie ses données ADS-B sous forme de squitter étendu Mode S : un préambule de 8 microsecondes suivi de 112 bits de données à exactement un bit par microseconde. Commencez la leçon par le préambule, parce qu'il répond à une question que les élèves n'ont pas encore pensé à poser : comment un récepteur sait-il qu'un message a commencé, quand le canal est plein de bruit et d'autres avions ? Le préambule est un motif fixe de quatre impulsions à 0, 1, 3,5 et 4,5 microsecondes. Un décodeur cherche constamment ce motif ; quand il le trouve, il sait à la fois qu'un message suit et précisément quand chaque intervalle de bit commence. Tout protocole numérique que les élèves ont rencontré, du Wi-Fi au code QR, a un équivalent, et c'est un bon moment pour le dire.

Puis la modulation. Une radio peut être allumée ou éteinte ; comment envoie-t-on un 1 ou un 0 ? L'ADS-B utilise la modulation par position d'impulsion : chaque intervalle de bit d'une microseconde est divisé en deux moitiés, et une impulsion dans la première moitié suivie de silence signifie 1, le silence suivi d'une impulsion signifie 0. Dessinez quelques bits au tableau sous forme d'impulsions et faites-les lire par la classe. Puis demandez pourquoi c'est mieux que le procédé évident « impulsion veut dire 1, pas d'impulsion veut dire 0 ». Deux raisons émergent avec un peu d'aide. Il y a toujours exactement une impulsion par bit, donc le récepteur garde sa synchronisation même à travers une suite de zéros, et il peut décider chaque bit en demandant quelle moitié a été la plus forte plutôt que si une impulsion a dépassé un seuil absolu, ce qui rend le décodage insensible à la force du signal. Une longue suite de zéros dans le procédé naïf serait indiscernable du silence ; en PPM, c'est un battement régulier d'impulsions en seconde moitié.

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

Chaque intervalle dure 1 microseconde. Impulsion dans la première moitié : 1. Impulsion dans la seconde moitié : 0.

Maintenant la disposition des 112 bits, que la classe devrait pouvoir reproduire de mémoire à la fin de la leçon. Les bits 1 à 5 sont le format de liaison descendante, 17 pour l'ADS-B émis par un transpondeur. Les bits 6 à 8 sont un code de capacité. Les bits 9 à 32 sont l'adresse ICAO de 24 bits, l'identité permanente de l'avion. Les bits 33 à 88 sont le champ de message de 56 bits, dont les cinq premiers bits, le code de type, disent ce que contiennent les 51 autres : un message d'identification (codes de

type 1 à 4) porte l'indicatif de huit caractères sous forme de huit caractères de 6 bits ; une position en vol (9 à 18) porte 12 bits d'altitude barométrique, un drapeau disant s'il s'agit d'une trame paire ou impaire, et 17 bits chacune de latitude et de longitude codées ; un message de vitesse (19) porte les composantes est-ouest et nord-sud de la vitesse sol, la vitesse verticale, et la différence de hauteur barométrique-géométrique. Les bits 89 à 112 sont la parité de 24 bits. Donnez l'arithmétique à faire : 24 bits d'adresse donnent $2^{24} = 16\,777\,216$ avions ; huit caractères de 6 bits permettent 64 symboles chacun, assez pour les lettres, les chiffres et l'espace ; 12 bits d'altitude par pas de 25 pieds couvrent 102 400 pieds ; et 17 bits de latitude, utilisés naïvement sur 180 degrés, ne résoudraient que 1,4 km, ce qui soulève la question à laquelle répond le codage compact de la position. Expliquez le CPR en un paragraphe : les 17 bits donnent la position à l'intérieur d'une zone à quelques mètres près, pas de quelle zone il s'agit ; l'avion alterne entre deux grilles de zones, paire et impaire, et un récepteur qui en a une de chaque résout la zone sans ambiguïté, puis suit à partir de messages isolés. C'est un bel exemple de précision supplémentaire tirée des mêmes bits en utilisant le temps.

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)

Donnez à la classe un vrai message et laissez-la le disséquer. La chaîne hexadécimale 8D4840D6202CC371C32CE0576098 compte 28 chiffres hexadécimaux, 112 bits. La conversion des deux premiers chiffres, 8D, en binaire donne 10001 101 : DF = 17, CA = 5. Les six chiffres suivants, 4840D6, sont l'adresse ICAO, que les tables d'allocation attribuent aux Pays-Bas. Les chiffres suivants, 20 ..., commencent par 00100, code de type 4, un message d'identification, et le décodage des caractères de 6 bits qui suivent donne l'indicatif KLM1023. Les six derniers chiffres, 576098, sont la parité. Une classe avec un tableur ou quelques lignes de Python peut faire tout le décodage en une leçon, et la capacité à prendre une chaîne hexadécimale et à dire « c'est un avion KLM qui annonce son numéro de vol » est le résultat à viser.

8D 4840D6 202CC371C32CE0 576098

8D : format de liaison descendante 17, capacité 5. 4840D6 : adresse ICAO, allouée aux Pays-Bas. 20... : code de type 4, identification, indicatif KLM1023. 576098 : la parité de 24 bits.

Terminez par la parité, parce que c'est l'idée informatique qui mérite le plus d'être développée. Au-dessus d'un aéroport fréquenté, les messages d'avions différents se chevauchent constamment au niveau d'un récepteur, et des impulsions se perdent aussi dans le bruit ; un décodeur assemblera inévitablement des bits faux. Le champ de 24 bits à la fin est un contrôle de redondance cyclique : les 88 bits du message sont traités comme un long nombre binaire et divisés, dans une arithmétique particulière où la soustraction est le ou exclusif, par un générateur fixe de 25 bits ; le reste est le CRC. Le récepteur refait la division sur les bits qu'il a décodés et compare. Tout bit isolé corrompu, toute paire de bits, et toute rafale d'erreurs jusqu'à 24 bits de long change le reste, et le message corrompu est rejeté. Démontrez l'idée à petite échelle avec un CRC de 4 bits sur un message de 8 bits fait à la main, ou avec l'analogie plus simple d'une clé de contrôle sur un code-barres ; puis faites implémenter par le groupe

des plus âgés le vrai CRC-24 en quelques lignes de code et vérifier que la parité du message d'exemple tombe juste, et qu'inverser un bit la fait échouer. C'est la détection d'erreurs telle que tout système moderne la pratique, rencontrée dans un contexte où une erreur manquée pourrait mettre un avion fantôme sur l'écran d'un contrôleur.

Exemple à donner

Combien de temps dure une émission complète, et si un transpondeur envoie 4,5 squitters étendus par seconde, quelle fraction du temps émet-il de l'ADS-B ? (120 microsecondes ; 540 microsecondes par seconde, 0,054 pour cent.) Combien d'avions pourraient en principe partager le canal avant qu'il ne soit occupé en permanence, en ignorant tout ce qui s'y émet d'autre ? (Environ 1 850, ce qui explique que la congestion au-dessus des espaces aériens les plus chargés soit un vrai souci d'ingénierie.)

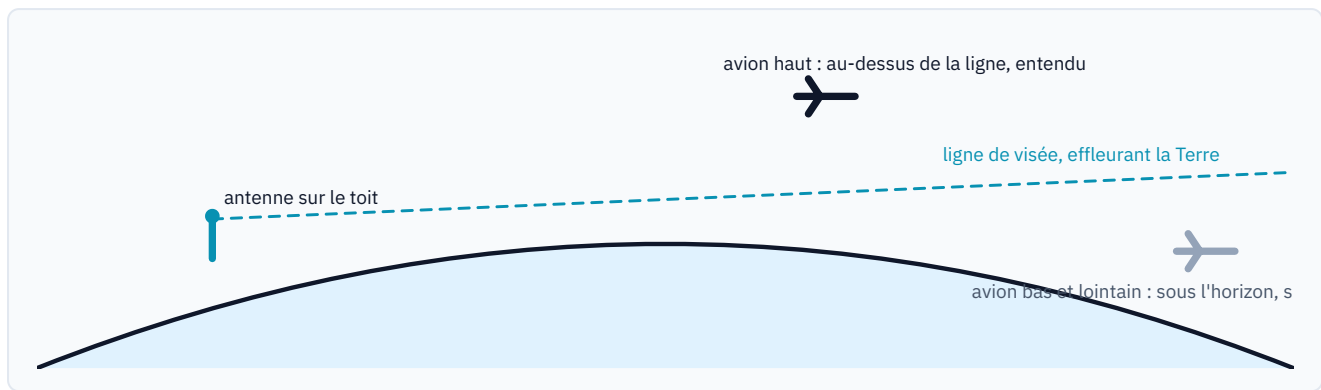
LEÇON 4 - PHYSIQUE

Propagation et portée : la courbure de la Terre et la loi de l'inverse du carré

De quelle distance un récepteur peut-il entendre un avion ? La question a deux réponses indépendantes, géométrique et énergétique, et le but de la leçon est d'établir les deux et de découvrir que les concepteurs se sont arrangés pour qu'elles concordent. Prenez d'abord la géométrie. À 1090 MHz, la radio ne diffracte pas utilement autour de la Terre ; elle se comporte comme la lumière et va en ligne droite. Un récepteur ne peut donc entendre que les avions au-dessus de son horizon, c'est-à-dire ceux depuis lesquels une ligne droite vers l'antenne ne traverse pas le sol. Établissez la distance de l'horizon avec la classe. Une antenne à la hauteur h au-dessus d'une sphère de rayon R voit un horizon là où sa ligne de visée est tangente à la sphère. La tangente, le rayon au point de tangence et le rayon à l'antenne forment un angle droit au point de tangence, donc par Pythagore $d^2 + R^2 = (R + h)^2$, d'où $d^2 = 2Rh + h^2$. Comme h est minuscule devant R , $d = \sqrt{2Rh}$. Avec $R = 6\,371$ km et h en mètres, d en kilomètres = $\sqrt{2 \times 6371 \times h / 1000} = 3,57 \sqrt{h}$. La densité de l'atmosphère, et donc son indice de réfraction, diminue avec la hauteur, ce qui incurve légèrement les rayons radio vers le bas ; la correction standard traite la Terre comme si elle avait les quatre tiers de son rayon réel, remplaçant 3,57 par 4,12. La ligne de visée complète d'une antenne à h_1 vers un avion à h_2 est la somme des deux distances d'horizon :

$$d \text{ (km)} = 4.12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \text{avec } h_1, h_2 \text{ en mètres}$$

Antenne sur un toit de 20 m, avion à 11 000 m : $4,12 \times (4,47 + 104,9) = 451$ km. Même antenne, avion à 1 000 m : $4,12 \times (4,47 + 31,6) = 149$ km. Avion sur la piste à 30 m : $4,12 \times (4,47 + 2) = 27$ km, donc pas entendu.



Faites tracer par la classe d en fonction de h_2 pour la hauteur d'antenne de leur propre école ; la courbe, raide au début puis s'aplatissant, explique la forme de la couverture de tout récepteur : un cercle de 400 km et plus pour le trafic en croisière, quelques dizaines de kilomètres pour les avions en approche, et rien au sol sauf à l'aéroport voisin. Elle explique aussi pourquoi la hauteur compte plus que toute autre propriété d'un récepteur, et pourquoi une colline entre vous et l'aéroport, ou l'aile de l'avion lui-même lorsqu'il s'incline en s'éloignant, coupe une trace instantanément. La démonstration de la cour du cours de primaire, voir plus loin depuis un banc qu'accroupi, n'est pas indigne de cette tranche d'âge si vous la faites suivre de la démonstration mathématique ; l'intérêt est qu'ils savent désormais pourquoi.

Maintenant l'énergie. Un transpondeur rayonne une puissance de crête de quelques centaines de watts, à peu près uniformément dans toutes les directions horizontales. À la distance d , cette puissance s'est répartie sur une sphère d'aire $4\pi d^2$, de sorte que la puissance interceptée par une antenne de surface effective fixe décroît en $1/d^2$: la loi de l'inverse du carré, que la classe doit établir à partir de l'aire de la sphère plutôt que mémoriser. Deux fois la distance, un quart de la puissance ; dix fois, un centième. Les radioélectriciens expriment la perte entre un émetteur isotrope et un récepteur isotrope en décibels, et la formule standard, que le groupe des plus âgés peut admettre ou établir à partir de la surface effective d'une antenne, $\lambda^2 / 4\pi$, est :

$$\text{affaiblissement (dB)} = 20 \log_{10}(d \text{ en km}) + 20 \log_{10}(f \text{ en MHz}) + 32.44$$

À 400 km et 1090 MHz : $20 \times 2,60 + 20 \times 3,04 + 32,44 = 52,0 + 60,7 + 32,4 = 145 \text{ dB}$. Un émetteur de 250 W fait +54 dBm ; la puissance reçue est $54 - 145 = -91 \text{ dBm}$, soit environ $8 \times 10^{-13} \text{ W}$, un millionième de millionième de watt.

Consacrez quelques minutes aux décibels si la classe ne les a pas rencontrés, parce qu'ils transforment une multiplication sur quatorze ordres de grandeur en une addition, et parce que le nombre lui-même est instructif : un récepteur sur un toit détecte un signal $10^{14,5}$ fois plus faible que celui qui a quitté l'avion. Un bon récepteur amateur décode jusqu'à environ -100 dBm, il reste donc à peu près 9 dB de marge à 400 km, c'est-à-dire que la limite énergétique et l'horizon géométrique d'un avion de ligne en croisière tombent au même endroit. Ce n'est pas un hasard ; la puissance du transpondeur et les normes des récepteurs ont été spécifiées pour qu'un avion soit audible jusqu'à l'horizon et guère au-delà, ce qui évite que le canal soit inondé par les émissions du pays voisin.

Deux raffinements pour le groupe des plus âgés. D'abord, Doppler : un avion qui s'approche à 250 m/s décale la fréquence reçue de $f \times v / c = 1,09 \times 10^9 \times 250 / 3 \times 10^8 = 908 \text{ Hz}$, moins d'un millionième de la porteuse, ce qu'un récepteur ne remarque jamais ; comparez avec le décalage Doppler audible du

son de l'avion, où v / c vaut $250 / 343$ et où la hauteur du son change de presque une octave à son passage. Ensuite, le temps de vol du signal : 400 km à c font $1,33 \text{ ms}$, si bien que la position contenue dans le message a déjà $1,33 \text{ ms}$ d'âge, pendant lesquelles l'avion a avancé de 33 cm ; négligeable pour une carte, décisif pour la multilatération de la leçon 2, qui vit précisément de ces microsecondes.

Exemple à donner

Un récepteur sur un mât de 10 m entend un avion en croisière à $11\,000 \text{ m}$ mais pas un avion léger à 600 m situé à 130 km . L'avion léger est-il sous l'horizon ? (Horizon : $4,12 \times (3,16 + 24,5) = 114 \text{ km}$, donc oui.) À quelle hauteur le récepteur devrait-il être pour l'entendre ? (Il faut $4,12 \times (\sqrt{h_1} + 24,5) = 130$, donc $\sqrt{h_1} = 7,05$, $h_1 = 50 \text{ m}$.)

LEÇON 5 - PHYSIQUE ET INGÉNIERIE**Antennes et récepteurs : d'une onde de 27 centimètres à un point sur une carte**

Une antenne est un conducteur dans lequel une onde électromagnétique qui passe induit un courant alternatif ; l'antenne de réception et l'antenne d'émission sont le même dispositif utilisé dans les deux sens, une réciprocité qu'il faut dire explicitement à la classe. Le courant induit est maximal quand le conducteur résonne : quand sa longueur est telle que la répartition du courant le long de lui épouse l'oscillation de l'onde, exactement comme une corde de la bonne longueur résonne avec une note particulière ou une balançoire avec un rythme de poussées particulier. La résonance fondamentale d'un conducteur rectiligne se situe à une demi-longueur d'onde, $13,75 \text{ cm}$ à 1090 MHz , avec un courant maximal au milieu et nul aux extrémités. L'antenne ADS-B pratique, sur l'avion et sur la plupart des récepteurs, est un monopôle quart d'onde : un élément vertical de $6,9 \text{ cm}$ dressé sur un plan de masse conducteur, qui le reflète électriquement de sorte que l'élément et son image forment ensemble le dipôle demi-onde. Sur l'avion, le fuselage est le plan de masse ; une antenne 1090 MHz achetée cache la même géométrie dans son tube, empilée plusieurs fois pour concentrer sa sensibilité vers l'horizon. Une maquette construite en classe avec une tige de $6,9 \text{ cm}$ sur un couvercle de boîte de conserve montre la géométrie et la longueur, mesurée à la règle face à l'onde de $27,5 \text{ cm}$; le récepteur du projet, lui, utilise l'antenne accordée en usine, parce que quelques millimètres d'erreur désaccordent une antenne faite maison et qu'elle n'entend qu'une fraction du ciel.

Développez le diagramme de rayonnement, parce qu'il prédit quelque chose que la classe peut observer. Un monopôle vertical rayonne et reçoit le plus fortement vers l'horizon et pas du tout le long de son propre axe ; sa sensibilité, tracée en trois dimensions, est un tore en forme de donut, l'antenne passant par le trou. Un récepteur entend donc typiquement à la perfection des avions à 300 km et en perd un qui passe exactement à la verticale pendant quelques secondes, et la classe peut le voir se produire sur son propre récepteur. Une antenne colinéaire, plusieurs éléments résonants empilés, aplatit le donut, augmentant la sensibilité à l'horizon, là où sont les avions lointains, au prix du trou au zénith : c'est le gain d'antenne, exprimé en dBi , et il vient d'une redistribution de la sensibilité, jamais d'une création. La polarisation, vue à la leçon 1, a maintenant une conséquence pratique que le projet testera : l'antenne doit être verticale.

Entre l'antenne et l'ordinateur, il y a trois étages, chacun une petite leçon. Un filtre passe-bande laisse passer 1090 MHz et rejette les émissions de téléphonie mobile, bien plus fortes, situées à quelques centaines de mégahertz de là, qui sinon satureraient l'amplificateur. Un amplificateur à faible bruit, placé à l'antenne et non au récepteur, multiplie le signal par mille avant qu'il n'entre dans le câble ; l'ordre compte, parce qu'un câble coaxial à 1090 MHz perd environ la moitié du signal, 3 dB, tous les dix mètres, et qu'amplifier après la perte amplifierait le bruit du câble en même temps que le signal. Puis la radio logicielle : un périphérique USB à 20 euros conçu à l'origine comme tuner de télévision, qui ramène le signal en bande de base et l'échantillonne deux millions de fois par seconde en un flux de nombres. À partir de là, le problème de radio est un problème de programmation. Un logiciel libre balaie le flux d'échantillons à la recherche du motif du préambule, mesure quelle moitié de chaque intervalle d'une microseconde porte le plus d'énergie, assemble 112 bits, calcule le CRC et, s'il est bon, décode les champs. Un module de suivi apparie ensuite les trames de position paires et impaires, fusionne position, vitesse et identification par adresse ICAO, et conserve l'état de chaque avion jusqu'à ce que les messages cessent d'arriver.

Donnez la chaîne à la classe sous forme de schéma qu'elle dessine elle-même, avec la grandeur à chaque étage : des nanovolts de courant alternatif à l'antenne ; des microvolts après l'amplificateur ; deux millions de nombres de 8 bits par seconde en sortie de la SDR ; des trames de 112 bits en sortie du décodeur, peut-être quelques centaines par seconde ; un enregistrement par avion en sortie du module de suivi. Le point à faire passer est qu'un point sur une carte est le bout d'une chaîne dont chaque maillon est une idée qu'ils comprennent maintenant : résonance, filtrage, amplification, échantillonnage, reconnaissance de motif, décodage, contrôle d'erreur, agrégation.

Exemple à donner

Un câble perd 3 dB par 10 m à 1090 MHz. Une longueur de 20 m perd donc quelle fraction du signal ? (6 dB, les trois quarts.) Si la limite du récepteur est -100 dBm et que le signal à l'antenne venant d'un avion à 400 km est -91 dBm, le signal peut-il survivre au câble sans amplificateur ? (Tout juste : -97 dBm. La moindre perte supplémentaire, de la pluie sur les connecteurs ou une longueur plus grande, et l'avion à l'horizon disparaît. C'est pourquoi l'amplificateur va à l'antenne.)

PROJET - DEUX À QUATRE SEMAINES

Construire un récepteur et confronter la physique au ciel

Le projet transforme les cinq leçons en mesures. Le matériel est une clé USB de radio logicielle (environ 25 euros), une antenne 1090 MHz accordée en usine (50 à 70 euros), quelques mètres de câble coaxial, et un ordinateur portable ou un Raspberry Pi faisant tourner l'un des décodeurs libres (dump1090 et ses descendants sont la référence). L'installation prend un après-midi et le logiciel affiche, en quelques minutes, un tableau d'avions avec leurs adresses ICAO, indicatifs, positions, altitudes et vitesses, ainsi qu'une carte. Tout, dans le projet, est en réception seule ; rien n'émet, et la classe doit comprendre qu'émettre sur les fréquences aéronautiques serait à la fois illégal et dangereux. L'accès au toit demande l'autorisation habituelle de l'école ; une fenêtre d'un étage supérieur orientée vers les principaux flux de trafic est un très bon début. La page Devenir contributeur de ce site détaille la même installation pas à pas et permet au récepteur de l'école d'alimenter la carte en direct.

La première investigation est l'horizon radio. Le décodeur indique, pour chaque avion, la distance et l'altitude auxquelles il a été entendu pour la dernière fois. Sur une journée, relevez la portée maximale à laquelle les avions de plusieurs tranches d'altitude ont été reçus et tracez la portée en fonction de l'altitude. Les élèves disposent de la formule de la leçon 4 et de la hauteur de l'antenne ; ils doivent prédire la courbe avant de voir les données, puis comparer. L'accord est généralement bon pour les avions hauts et moins bon pour les bas, et la discussion sur le pourquoi (bâtiments, relief, le trou au zénith de l'antenne, l'avion qui se masque lui-même) est le genre de confrontation entre théorie et mesure qu'un manuel ne peut pas offrir. Une carte de l'avion le plus lointain entendu dans chaque direction, que le logiciel trace, montre le relief de toute la région sous forme d'ombres dans la couverture.

La deuxième est l'antenne. Comparez les taux de messages et la portée maximale avec l'antenne à l'intérieur, à une fenêtre et sur le toit ; verticale et couchée à l'horizontale ; posée sur une surface métallique et tenue à l'écart de tout métal. Chaque comparaison teste une affirmation précise des leçons 1 et 5, et chaque résultat doit être prédit d'abord. Le test de polarisation est le plus frappant : couchée à plat, l'antenne perd la plupart de ses avions.

La troisième est les données. Enregistrez une journée entière de trafic et interrogez-la : l'heure la plus chargée, la distribution des altitudes de croisière (les élèves s'attendent à une dispersion et trouvent la plupart des avions de ligne entre 10 000 et 12 000 m), le taux de montée des départs de l'aéroport le plus proche, les États dont les avions passent le plus souvent (d'après l'allocation des adresses ICAO). Le groupe des plus âgés peut décoder lui-même des messages bruts, à partir de l'hexadécimal que le logiciel enregistre, et vérifier le CRC dans son propre code. Une classe disposant d'un second récepteur dans une école partenaire à 30 kilomètres ou plus, tous deux avec une sortie horodatée par GNSS, peut tenter une multilatération en deux dimensions d'un avion que les deux entendent et la comparer à la position que l'avion a diffusée : le résultat le plus ambitieux du cours, et un vrai.

Terminez par les questions que le système soulève sans y répondre. Les messages ne sont pas signés, donc un émetteur pourrait diffuser un avion fantôme ; qu'est-ce qui défend le système, et que coûterait une version signée ? L'avion dépend de satellites qui peuvent être brouillés ; qu'advient-il de l'image du contrôleur lorsqu'ils le sont ? Les données identifient les avions, et un avion peut identifier une personne ; qui devrait pouvoir suivre qui ? Une classe qui a construit le récepteur a mérité ces questions, et elles font un bon essai final ou un bon débat.

Réponses aux défis de l'élève

La page de l'élève pose huit défis, un ou deux par leçon, qui peuvent servir de devoirs ou de test de fin de cours. Les réponses, avec le raisonnement qu'une copie parfaite doit contenir :

1. Longueur d'onde à 1090 MHz : $\lambda = c / f = 3,00 \times 10^8 / 1,09 \times 10^9 = 0,275$ m. Élément quart d'onde : 6,9 cm. Raisonnement : $c = f \times \lambda$, la vitesse fixe de la lumière imposant une relation inverse.
2. La lumière est plus rapide que le son d'un facteur $3,00 \times 10^8 / 343$, soit environ 875 000. Sur 30 km, le message met 100 microsecondes et le son 87 s ; l'avion à 250 m/s parcourt 22 km pendant ce temps.

3. Une erreur d'horloge de 2 microsecondes donne une erreur de distance de $2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 = 600$ m. Quatre satellites sont nécessaires parce que le décalage d'horloge du récepteur est une quatrième inconnue à côté de x, y et z.
4. $2^{24} = 16\,777\,216$ adresses. Un message de 112 bits à 1 bit par microseconde dure 112 microsecondes, 120 avec le préambule.
5. Dans 8D4840D6..., 8D vaut 10001101 : les cinq premiers bits 10001 font 17, donc DF = 17, un message ADS-B émis par un transpondeur Mode S ; les trois suivants, 101, donnent CA = 5. 4840D6 est l'adresse ICAO.
6. Horizon radio d'une antenne à 15 m vers un avion à 9 000 m : $4,12 \times (3,87 + 94,9) = 407$ km. Pour un avion à 300 m : $4,12 \times (3,87 + 17,3) = 87$ km.
7. Doubler la distance divise la puissance reçue par quatre, parce que la même puissance émise se répartit sur une sphère d'aire quatre fois plus grande. Affaiblissement à 200 km et 1090 MHz : $20 \times 2,30 + 60,7 + 32,4 = 139$ dB, 6 dB de moins qu'à 400 km, cohérent avec un facteur quatre.
8. Une antenne couchée à l'horizontale est en polarisation croisée par rapport à l'onde polarisée verticalement et ne reçoit que très peu ; le courant induit dépend de la composante du champ électrique le long du conducteur. Un récepteur au rez-de-chaussée perd de la portée parce que sa distance d'horizon, $4,12 \times \sqrt{h_1}$, se réduit, et parce que les bâtiments bloquent la ligne de visée.

ET ENSUITE

Le projet, pas à pas

Le projet de la leçon 6 supposait un récepteur ; l'atelier pratique le construit. Il est écrit pour quelqu'un qui n'a jamais utilisé de Raspberry Pi : la liste d'achats avec les prix, l'antenne à choisir, son placement et les pertes du câble, la préparation du Pi, les trois commandes qui installent le feeder Dataero, l'association de la station, le réglage du gain, et cinq mesures, une par leçon, qui confrontent la physique au ciel. Une station qui contribue à Dataero donne à la classe un tableau de bord, une carte de couverture et une année d'historique pour travailler.

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