

INTRODUCTION AU RADAR

Par Bacab

PROGRAMME

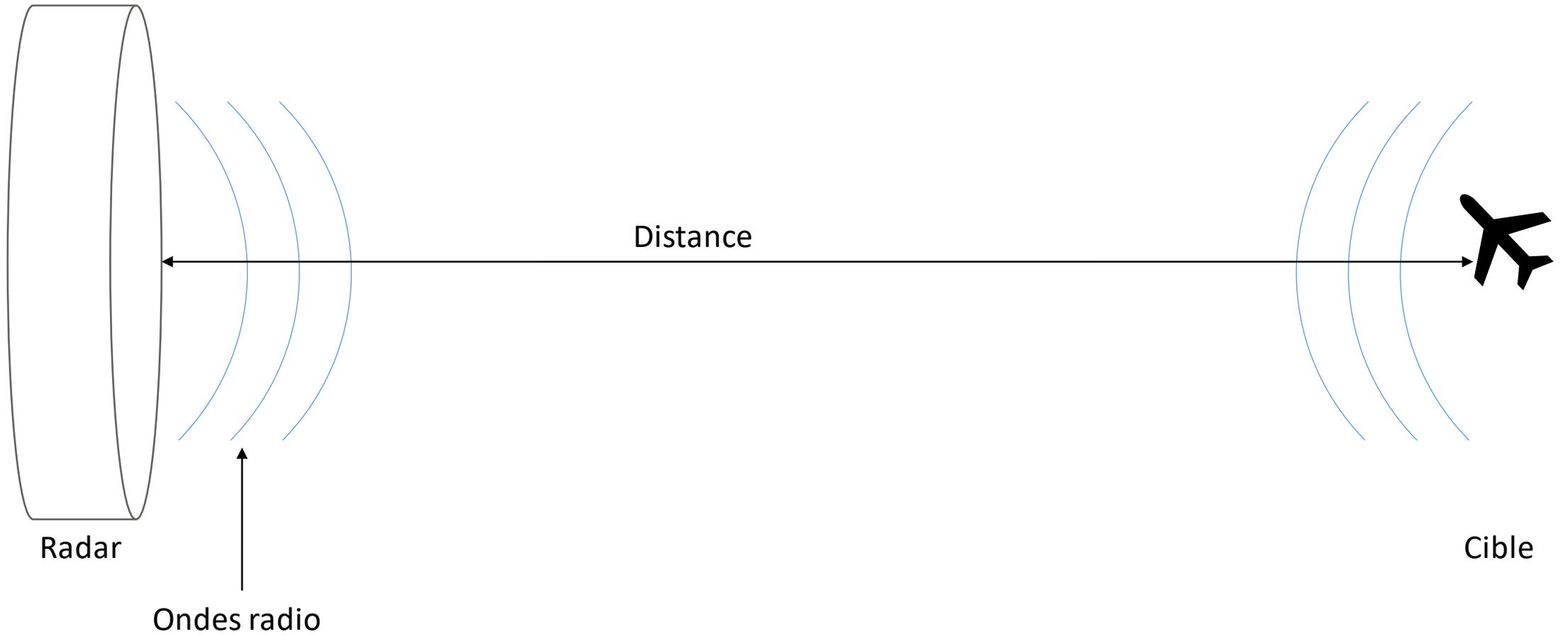
- Introduction
 - Un radar qu'est-ce que c'est ?
 - Un radar à quoi ça sert ?
- Comment ça marche un radar ?
 - Le parcours du signal
 - L'analyse et le traitement du signal
- Qu'est-ce qui fait un bon radar ?
 - Les performances
 - Le contexte
- A quoi ressemblera le radar du futur ?

INTRODUCTION

UN RADAR QU'EST-CE QUE C'EST ?

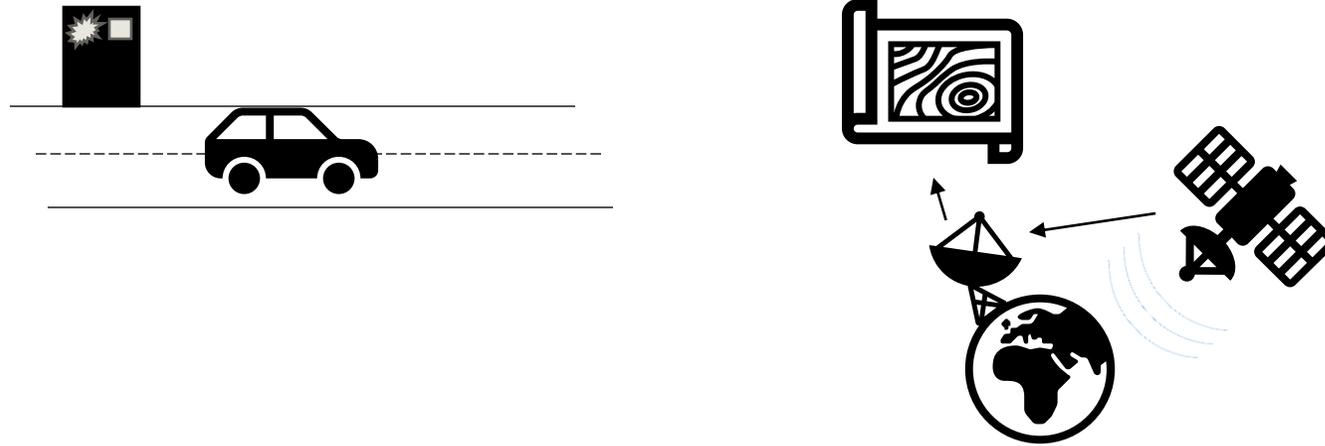
Histoire de savoir de quoi nous parlons...

LE RADAR À L'ORIGINE

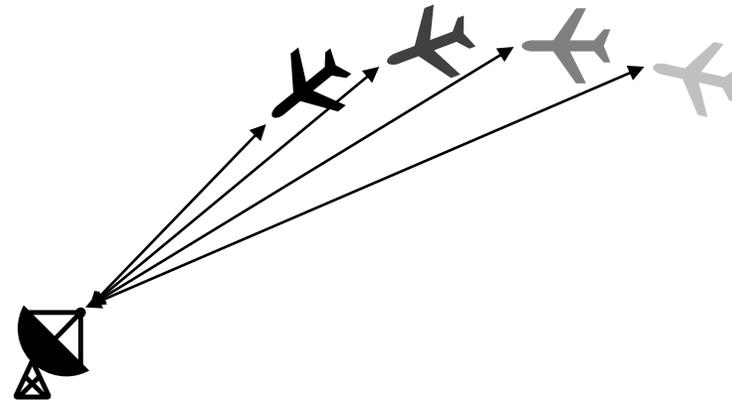


LE RADAR AUJOURD'HUI

Des radars qui ne mesurent aucune distance et qui ne détectent rien:



Des radars qui mesurent beaucoup plus que la distance:



UN RADAR À QUOI ÇA SERT ?

Vous allez voir, ça n'est pas toujours évident...

DES USAGES MULTIPLES: LA CLEF DE SON SUCCÈS

- Cinémomètre radar de contrôle routier



- Radar de navigation sur un bateau



- Radar météo sur un A320

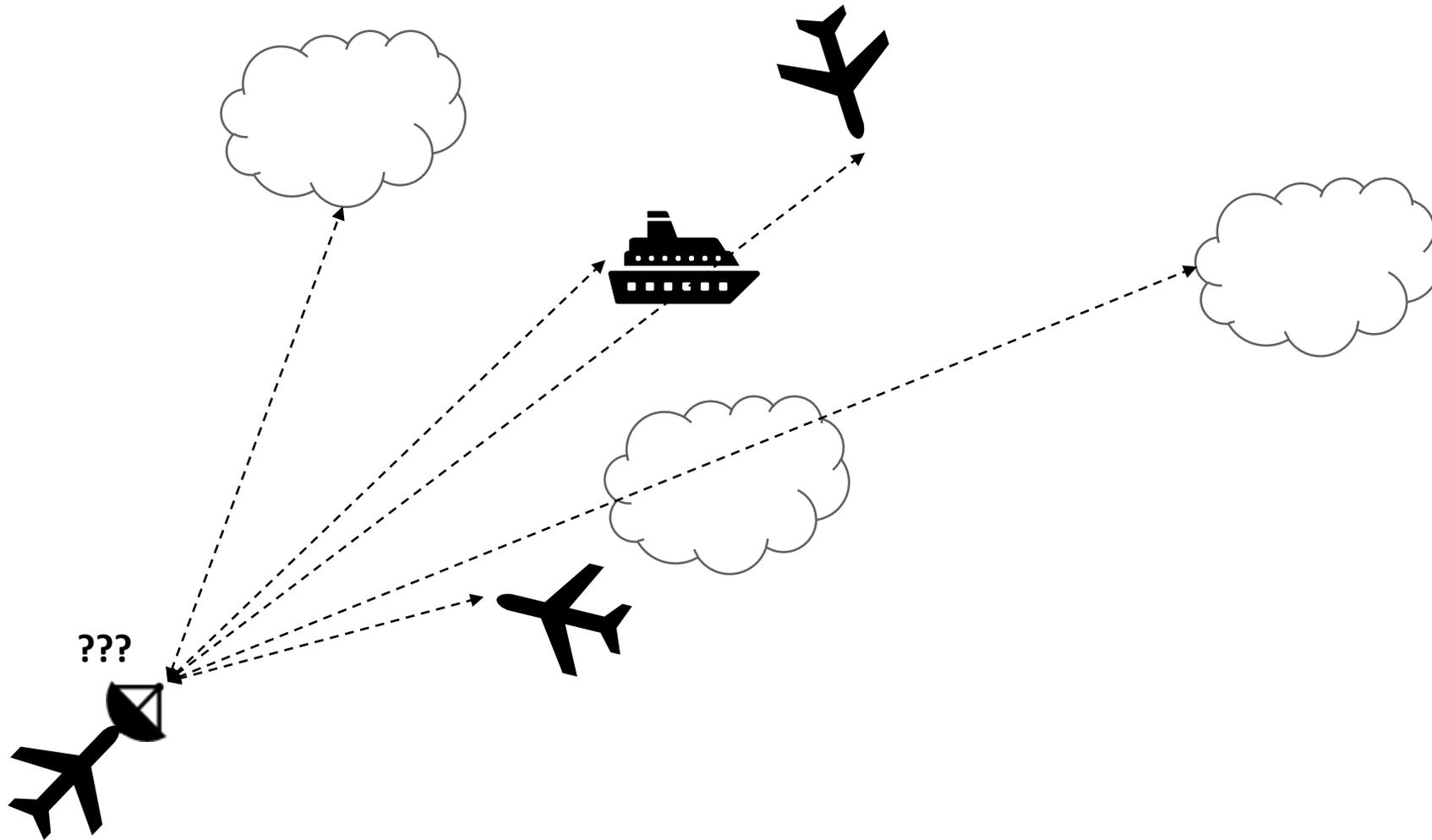


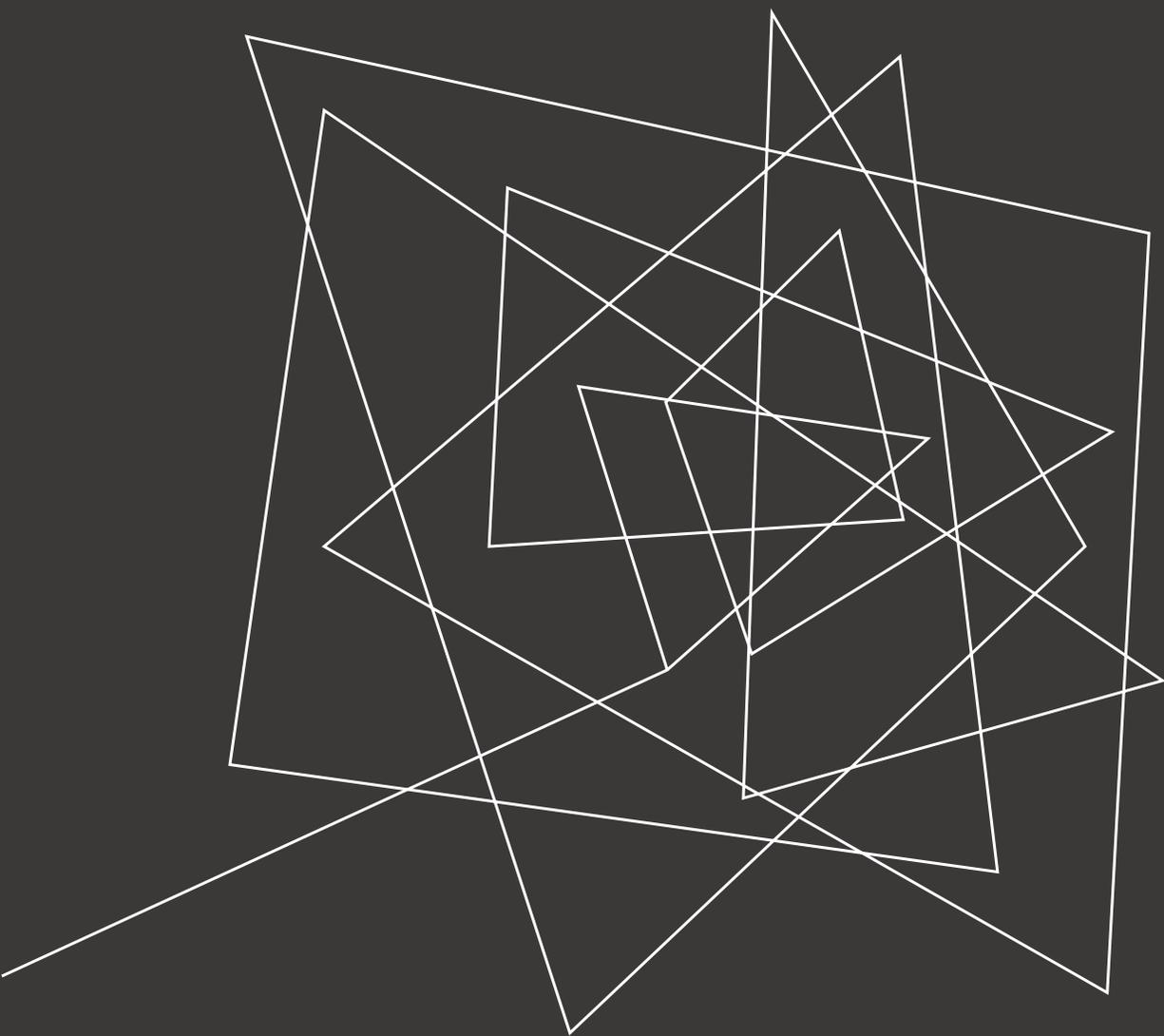
Source : Wikimedia Commons / Auteur Curimedia

- Radar sol/air d'aéroport



DES USAGES MULTIPLES: LA RAISON DE SA COMPLEXITÉ





COMMENT ÇA MARCHE UN RADAR ?

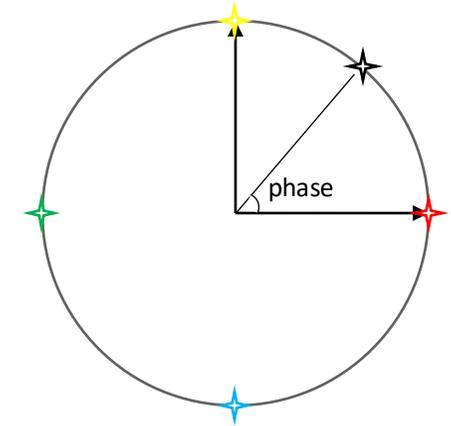
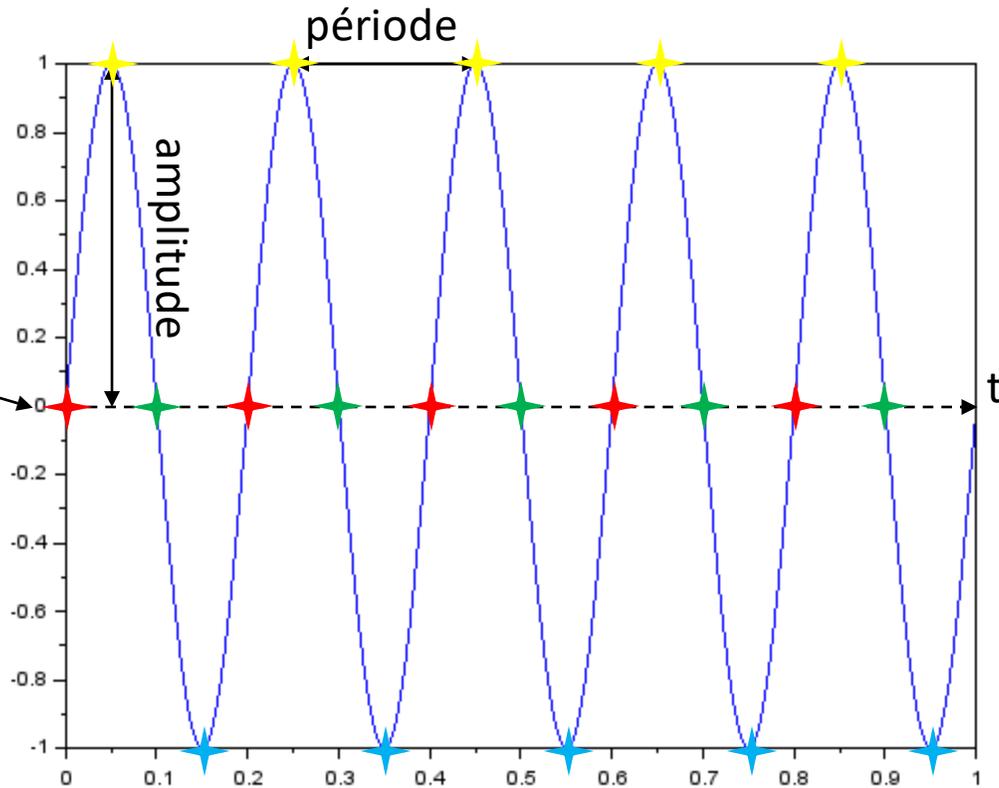
Ça commence simple mais après ça se corse...

LE SUJET DU JOUR:
LE RADAR AÉROPORTÉ MULTIFONCTIONS DE POINTE
AVANT

LE PARCOURS DU SIGNAL

Il est passé par ici, il repassera par là...

QU'EST-CE QU'UN SIGNAL ?

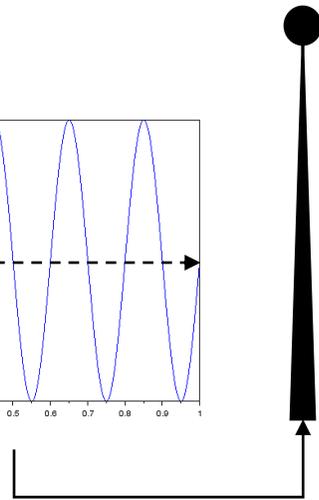
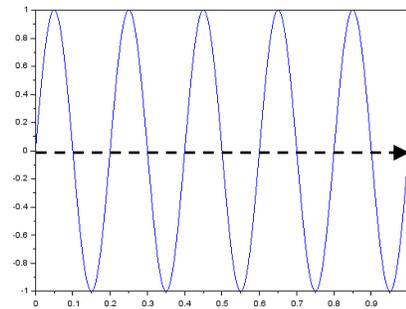


Pour ceux qui préfèrent:
 $S(t)=M+A*\sin(2*\pi*f*t+\omega_0)$
 $S(t)$ est le signal en fonction du temps
 M est la valeur moyenne, on parle aussi de composante continue
 A est l'amplitude, en volts
 f est la fréquence, en Hertz, $1/f$ =période
 t est le temps, en secondes
 ω_0 est la phase à l'origine (quand $t=0$), en radians
 $2*\pi*f*t+\omega_0$ est la phase instantanée, en radians
Comme la phase instantanée dépend de la phase à l'origine, on ne l'utilise jamais (sauf comme abus de langage). Généralement lorsque l'on parle de phase on parle d'un delta de phase par rapport à une référence

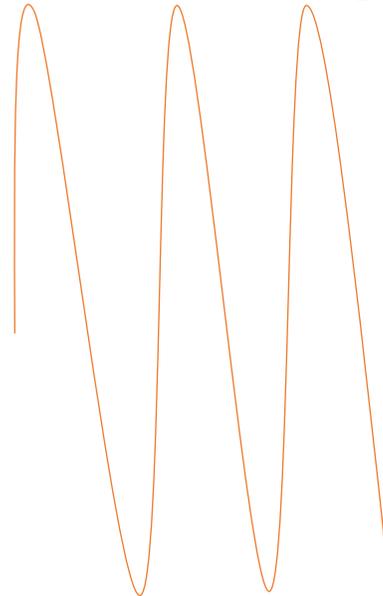
Ceci n'est pas un signal, c'est la représentation (temporelle) d'un signal !

QU'EST-CE QU'UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE ?

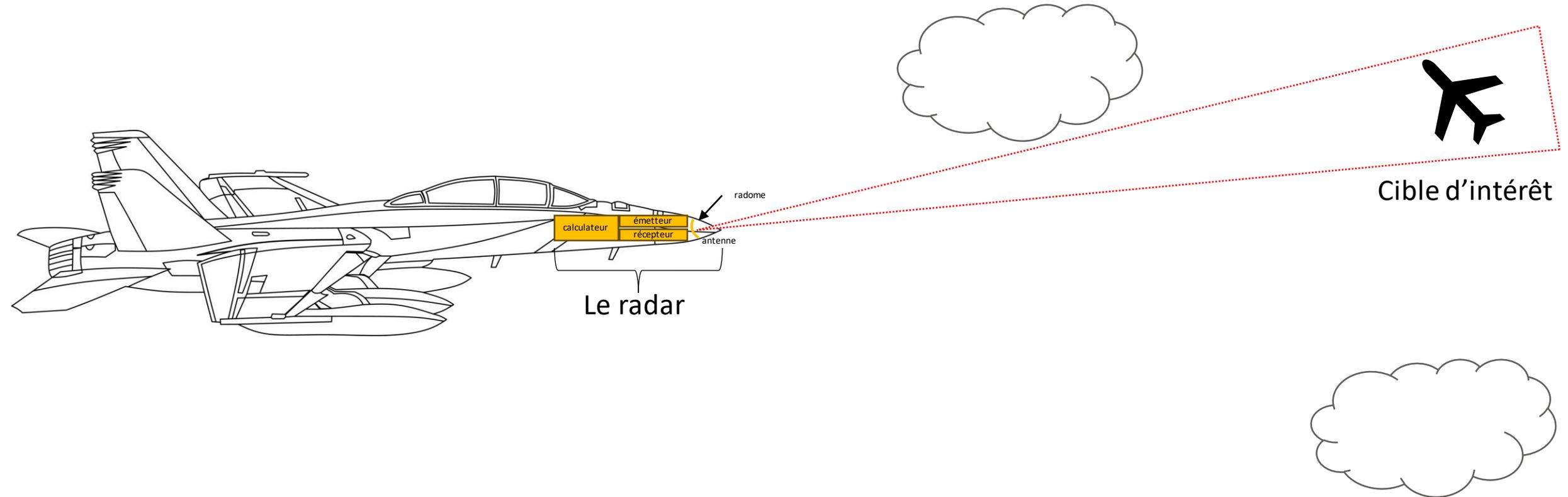
Courant alternatif ↔ Onde électromagnétique



Antenne



COMPOSITION ET ENVIRONNEMENT D'UN RADAR GÉNÉRIQUE



LA NAISSANCE DU SIGNAL: IL ÉTAIT UNE FOIS L'ÉMETTEUR

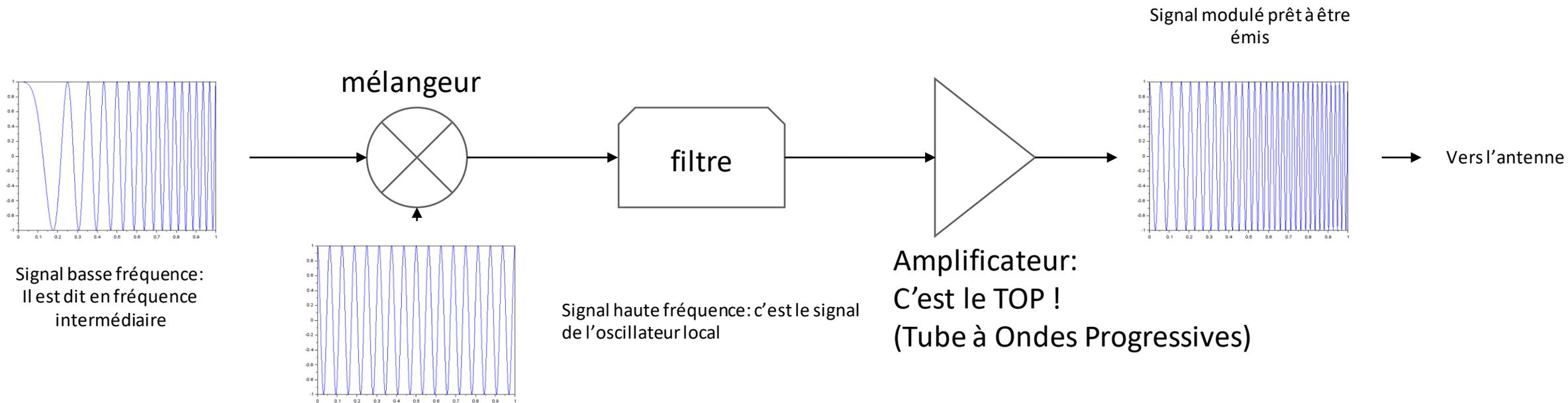
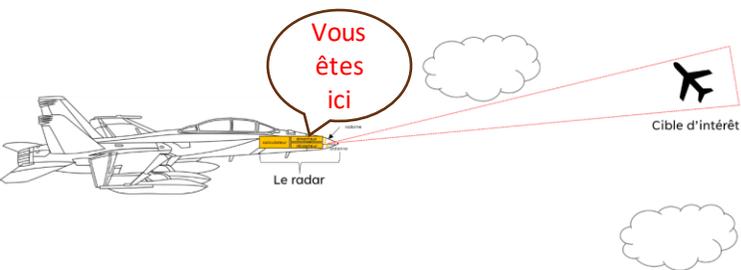
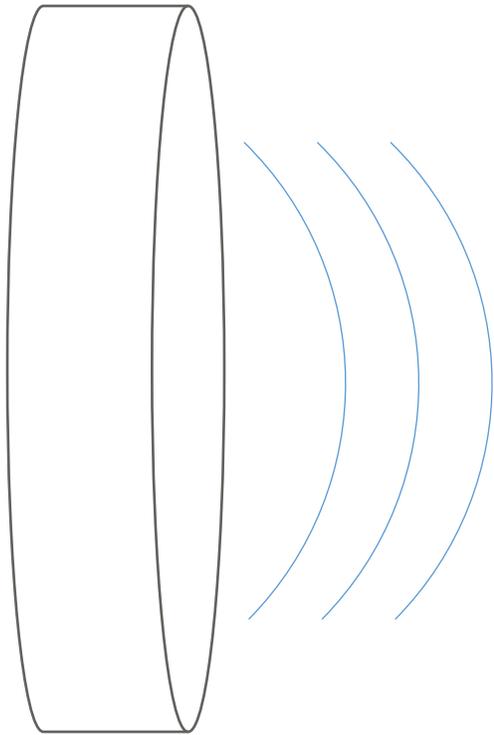


Illustration d'une modulation FM, comme pour la radio



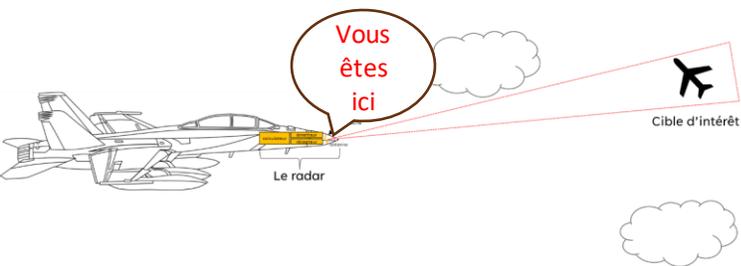
L'ANTENNE À L'ÉMISSION 1/6: TENIR LA DISTANCE



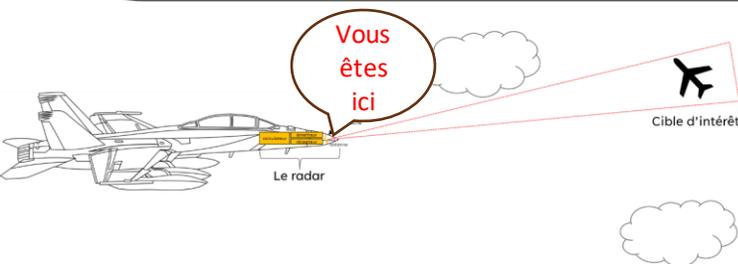
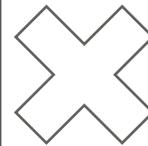
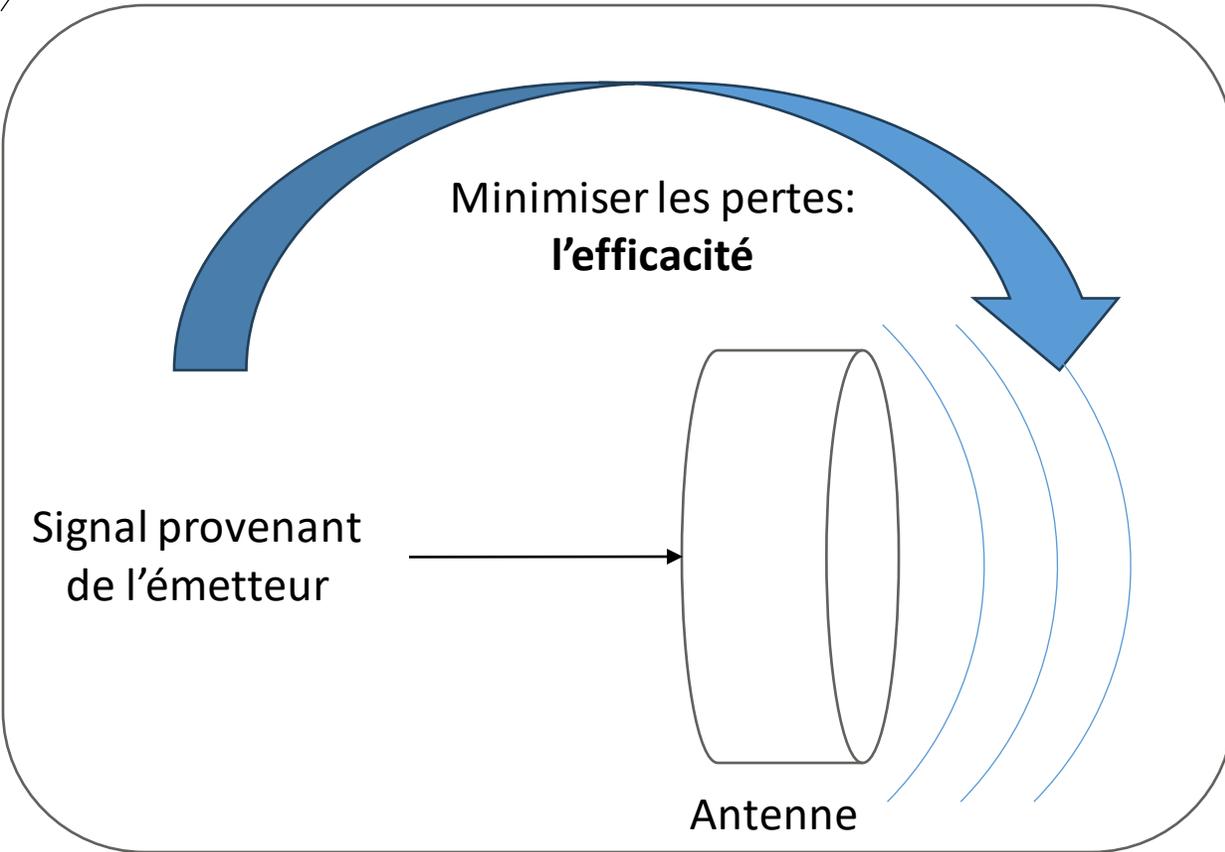
Radar



Cible



L'ANTENNE À L'ÉMISSION 2/6: UN CONCENTRÉ D'ÉNERGIE



Résultats: tous les radars aéroportés ont une antenne à haut gain.

L'ANTENNE À L'ÉMISSION 3/6: LES EFFETS SECONDAIRES



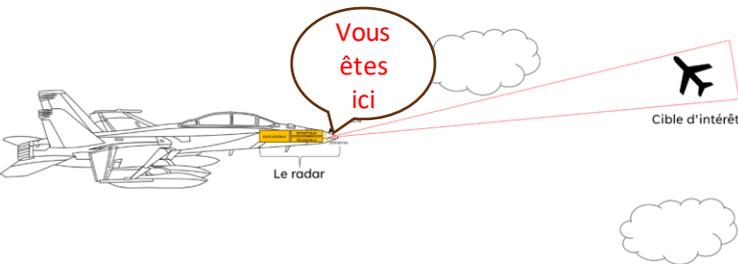
Points positifs:

- on concentre la puissance
- l'essentiel de la puissance part dans une direction assez précise et connue

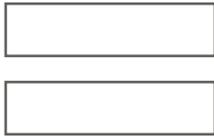
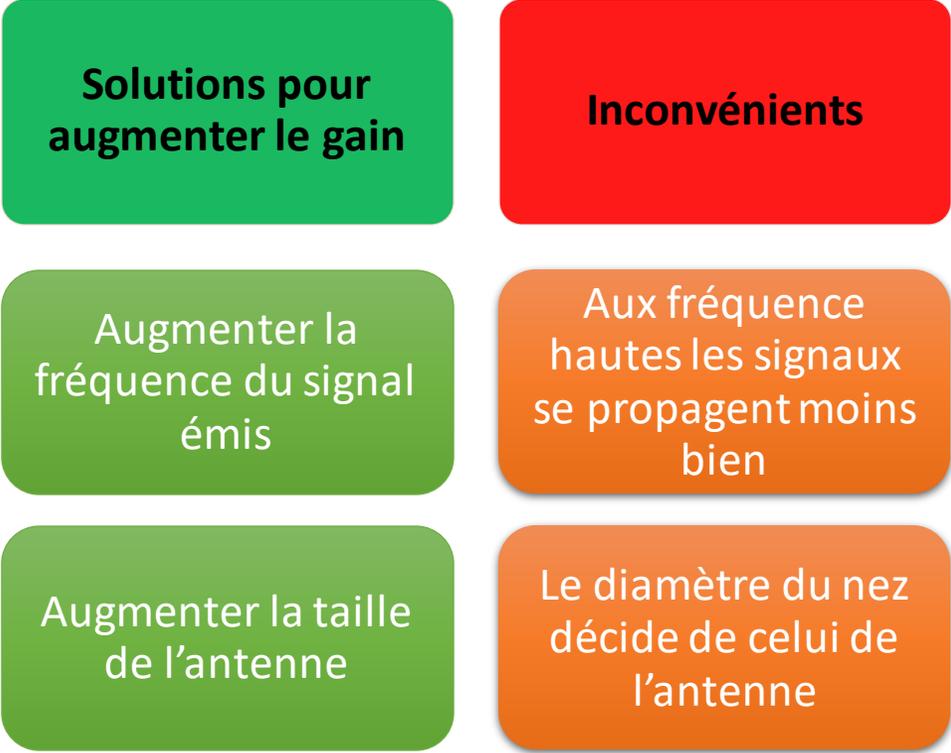


Points négatifs:

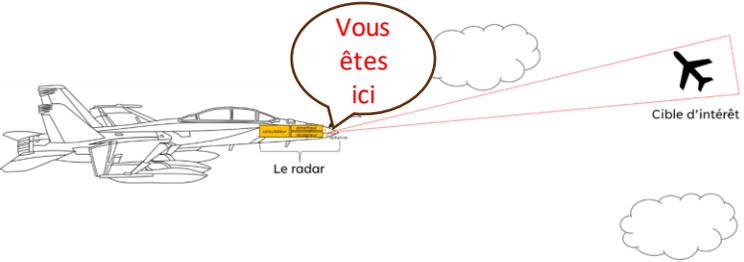
- le faisceau est fin
- c'est encombrant



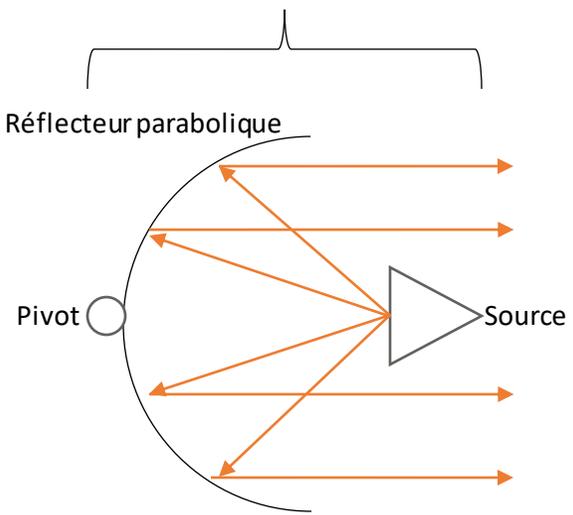
L'ANTENNE À L'ÉMISSION 4/6: LA TAILLE ÇA COMPTE



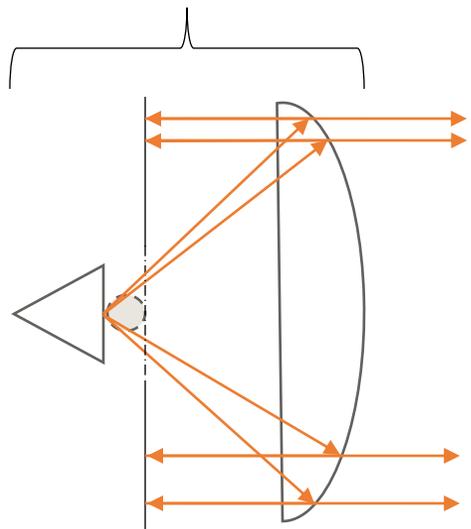
Tous les radars utilisent la même plage de fréquences



L'ANTENNE À L'ÉMISSION 5/6: COMMENT ÇA MARCHE UNE ANTENNE ?

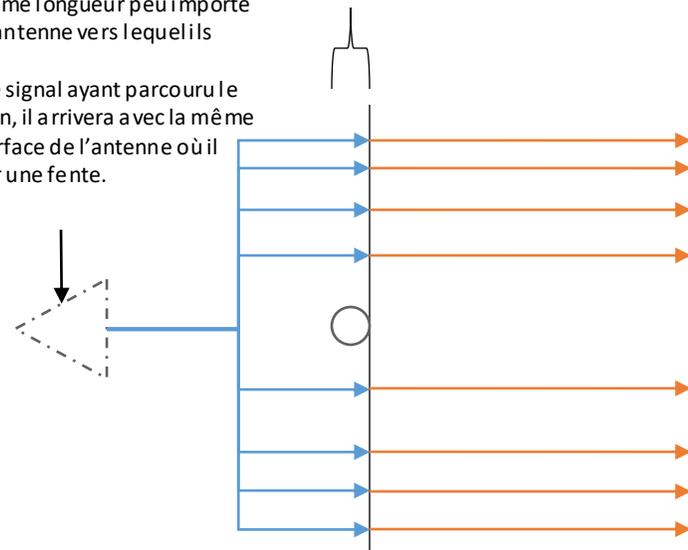


Antenne parabolique



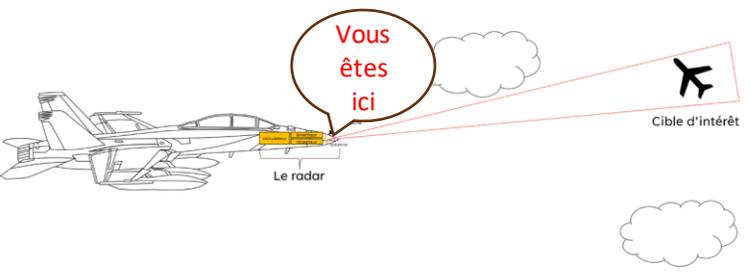
Antenne Cassegrain inverse

Ici la source n'émet pas le signal dans l'air libre mais dans des tuyaux (on parle de guides d'ondes). Ces guides sont tordus de façon à tous être de la même longueur peu importe le point de l'antenne vers lequel ils débouchent. Ainsi, chaque signal ayant parcouru le même chemin, il arrivera avec la même phase à la surface de l'antenne où il sera émis par une fente.

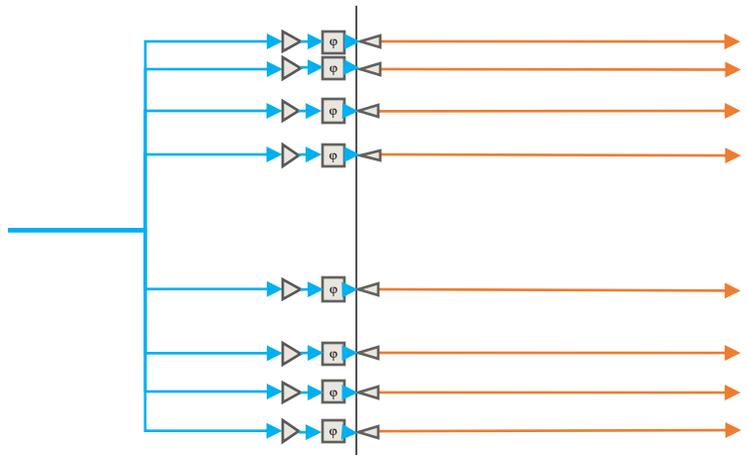


Antenne réseau à fentes

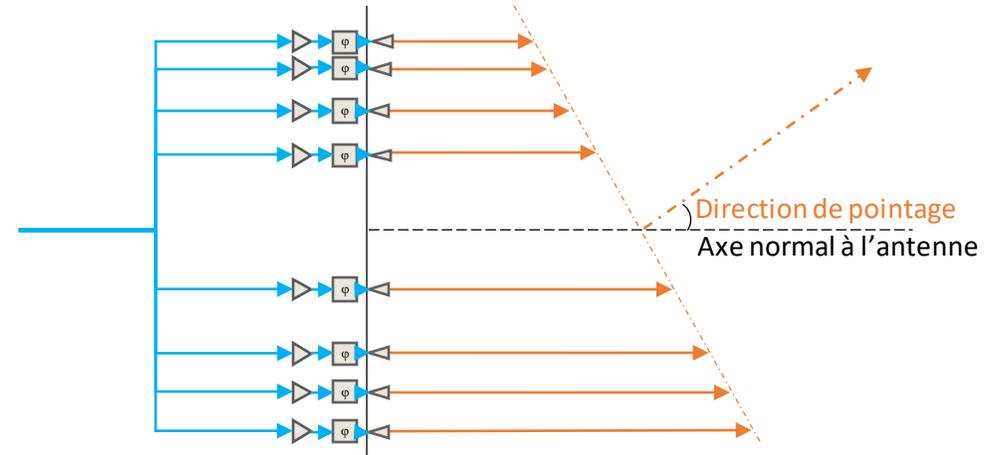
De la gauche vers la droite les antennes sont de moins en moins profondes. Elles peuvent donc être plus proche de la base du nez et donc plus large.



L'ANTENNE À L'ÉMISSION 6/6: COMMENT ÇA MARCHE UNE ANTENNE ACTIVE À BALAYAGE ÉLECTRONIQUE (AESA)?

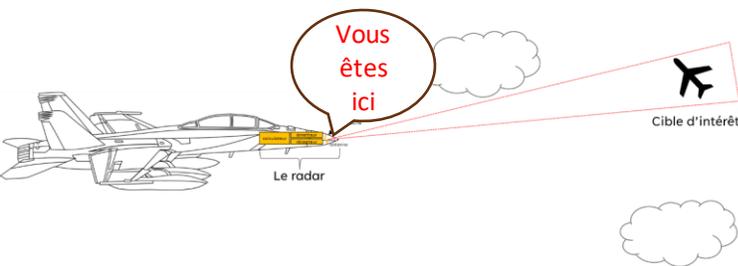


Antenne AESA: pointage dans l'axe
 $\phi=0$

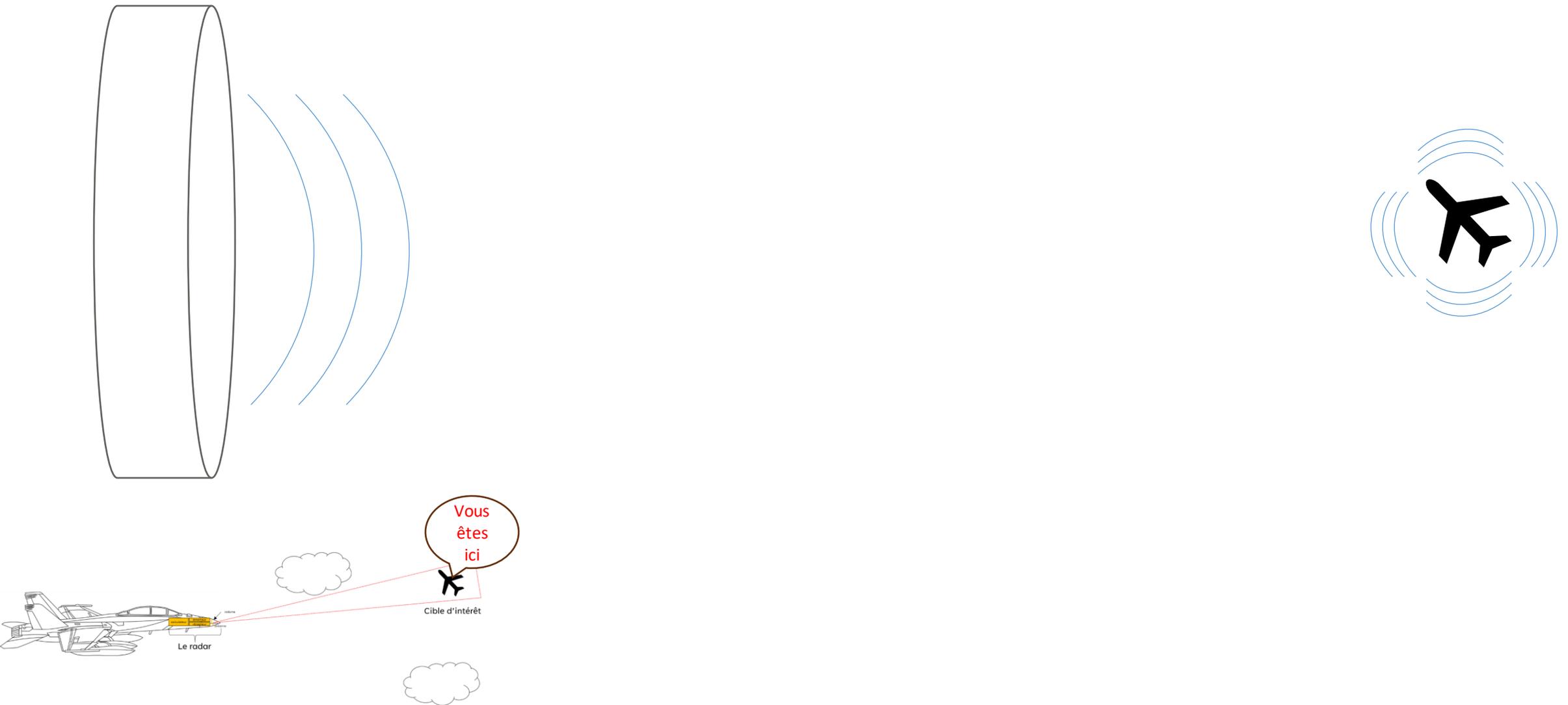


Antenne AESA: pointage quelconque
 ϕ est différent pour chaque élément

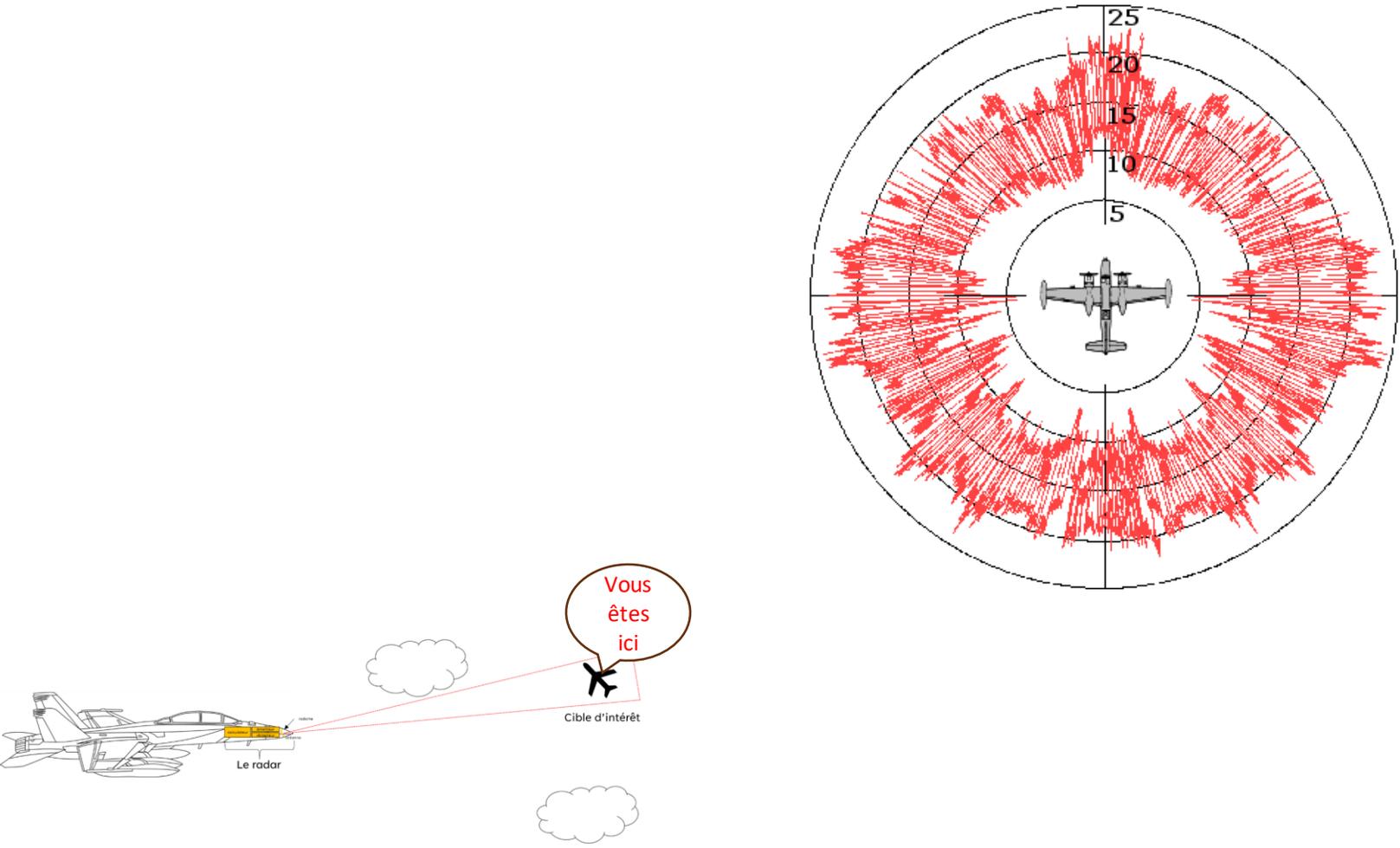
En bleu les signaux électriques, en orange les signaux rayonnés.



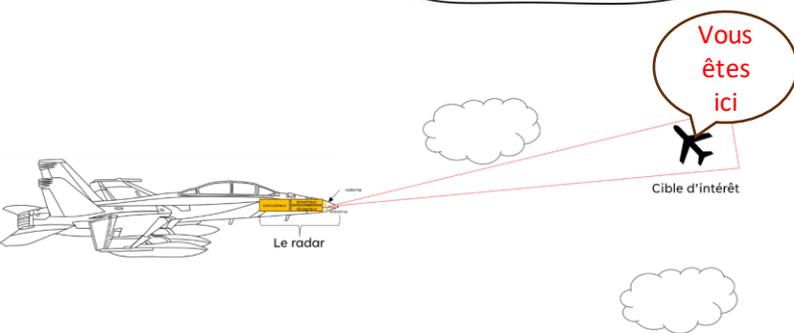
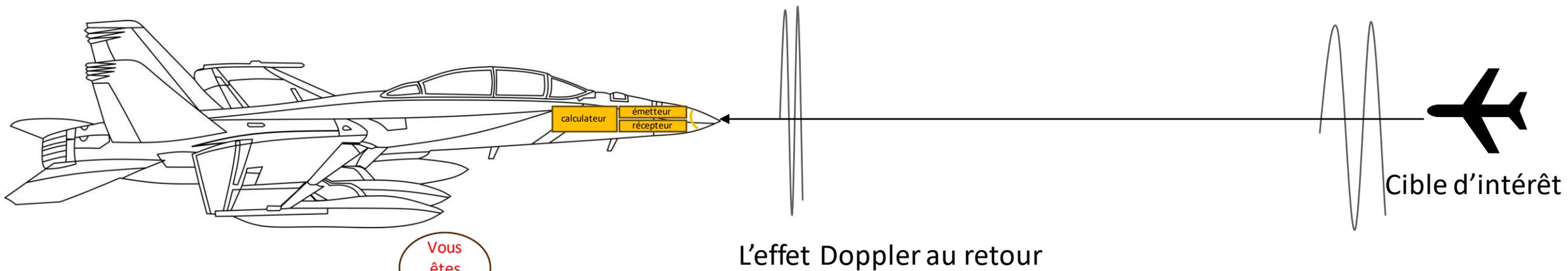
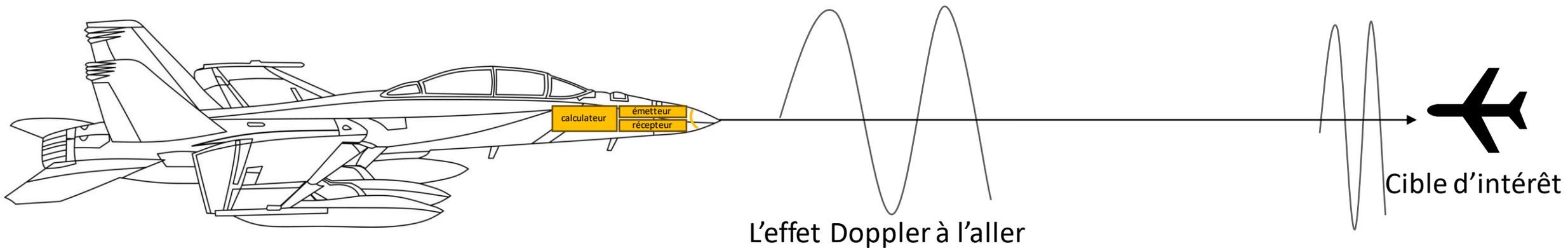
INTERACTION DU SIGNAL AVEC LA CIBLE 1/3: EN RÉSUMÉ



INTERACTION DU SIGNAL AVEC LA CIBLE 2/3: LE MYTHE DE LA SER

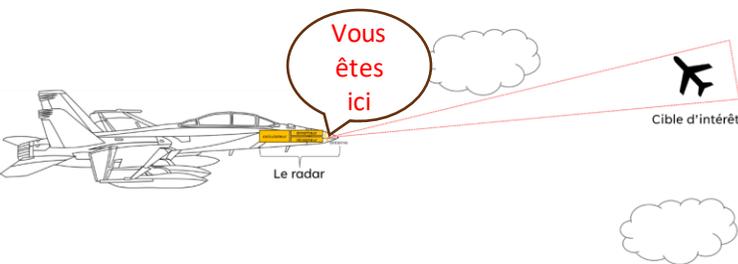


INTERACTION DU SIGNAL AVEC LA CIBLE 3/3: L'EFFET DOPPLER-FIZEAU

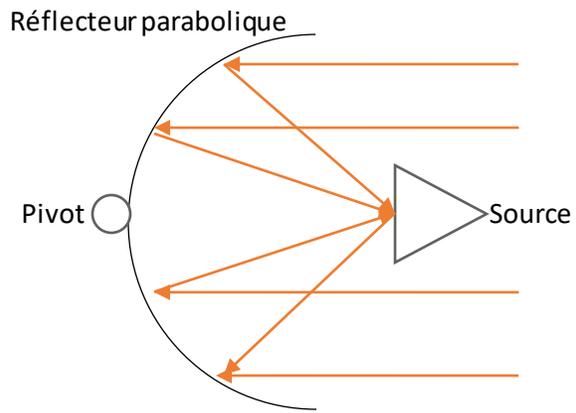


L'ANTENNE À LA RÉCEPTION 1/3: LA FLEMME

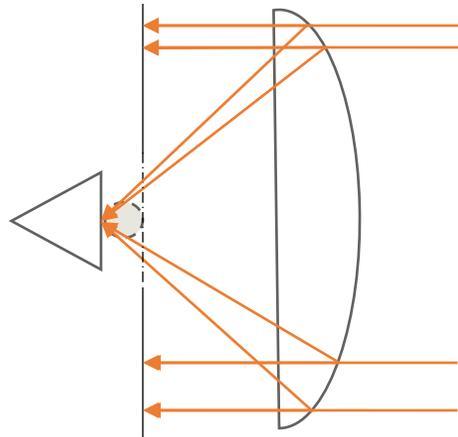
- Une antenne fonctionne de la même manière à l'émission qu'à la réception. C'est drôlement commode ! Vous pouvez donc reprendre les planches sur l'antenne à l'émission et changer le sens des flèches.
- Remarquez que l'antenne intervient deux fois: à l'émission et à la réception. Un gain d'antenne élevé est donc un avantage *au carré* !



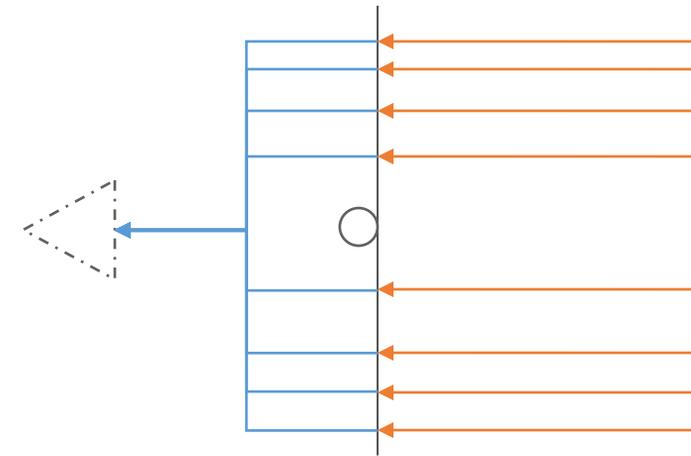
L'ANTENNE À LA RÉCEPTION 1 BIS/3: COMMENT ÇA MARCHE UNE ANTENNE ?



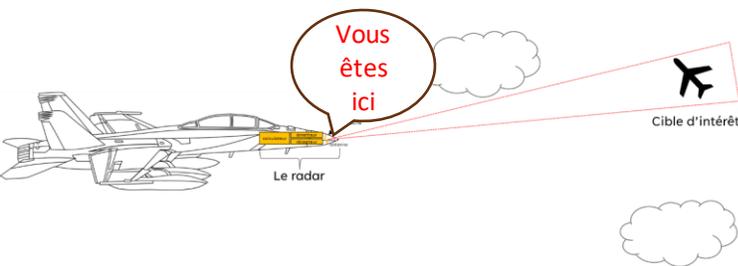
Antenne parabolique



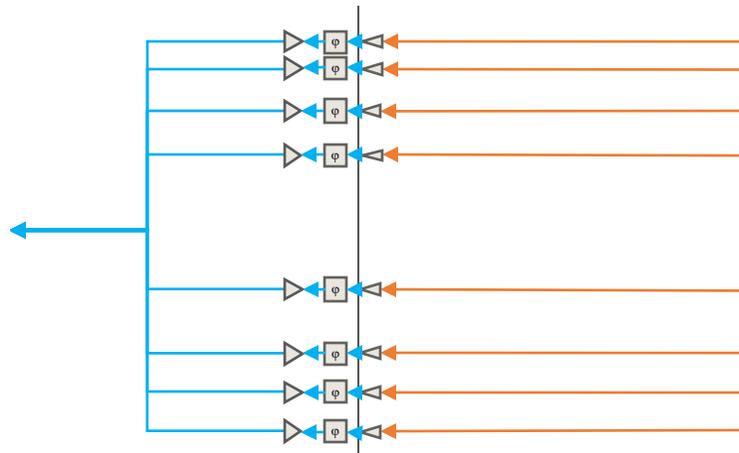
Antenne Cassegrain inverse



Antenne réseau à fentes

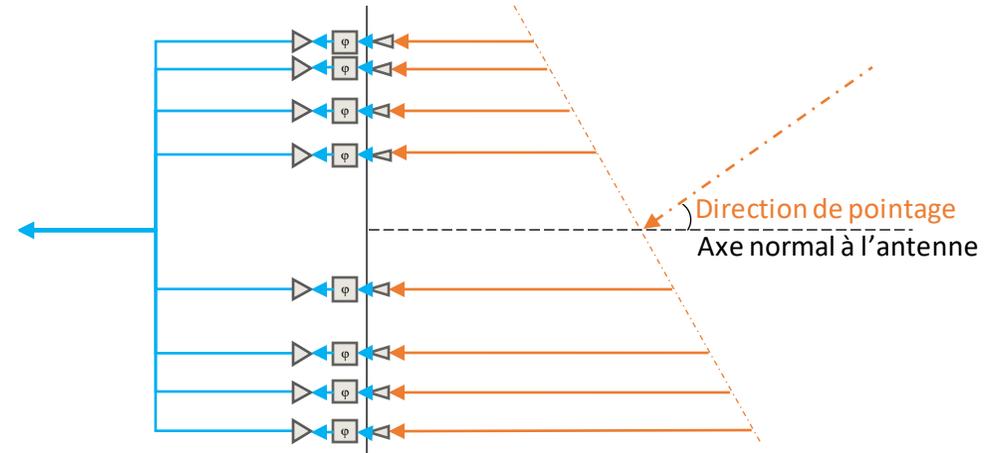


L'ANTENNE À LA RÉCEPTION 1 TER/3: COMMENT ÇA MARCHE UNE ANTENNE ?

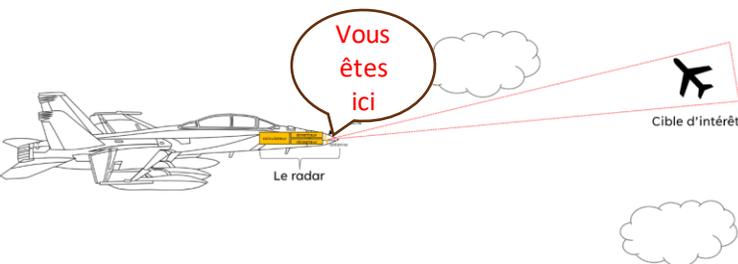


Antenne AESA: pointage dans l'axe
 $\phi=0$

En bleu les signaux électriques, en orange les signaux rayonnés.

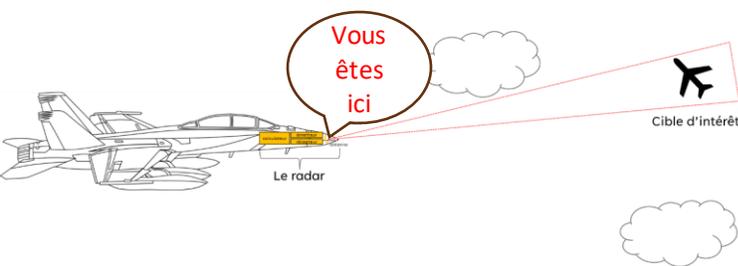
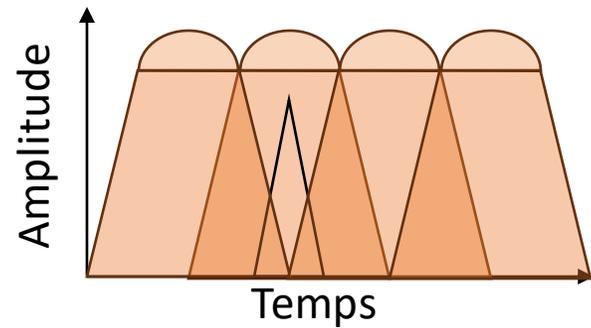
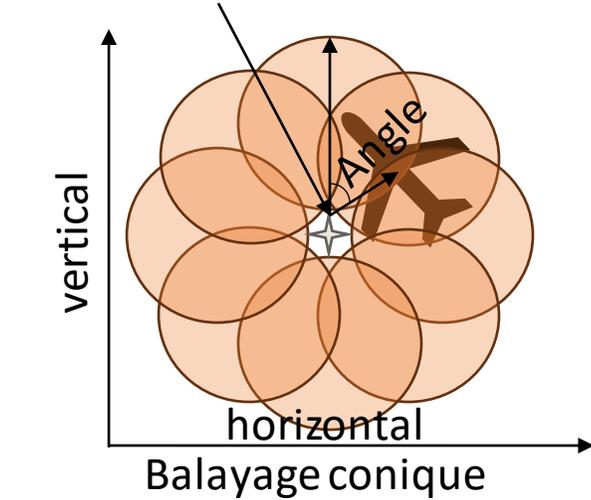


Antenne AESA: pointage quelconque
 ϕ est différent pour chaque élément

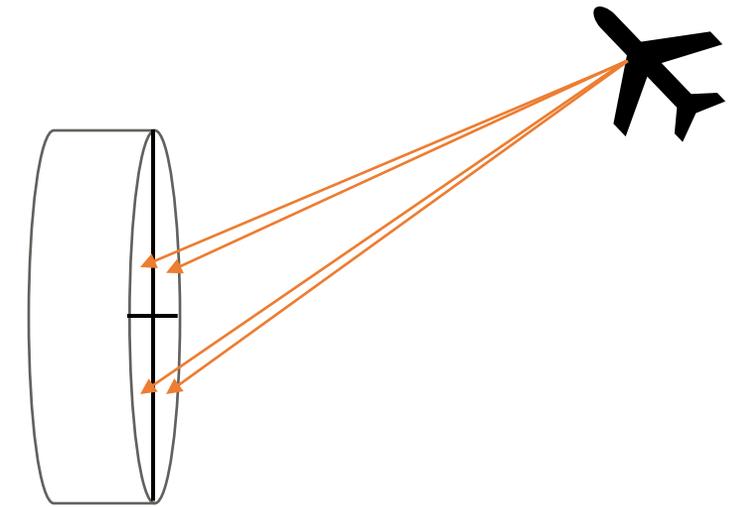
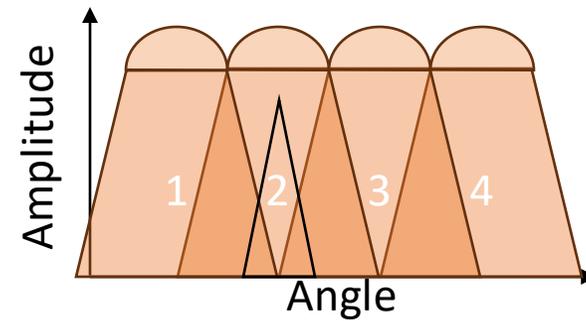
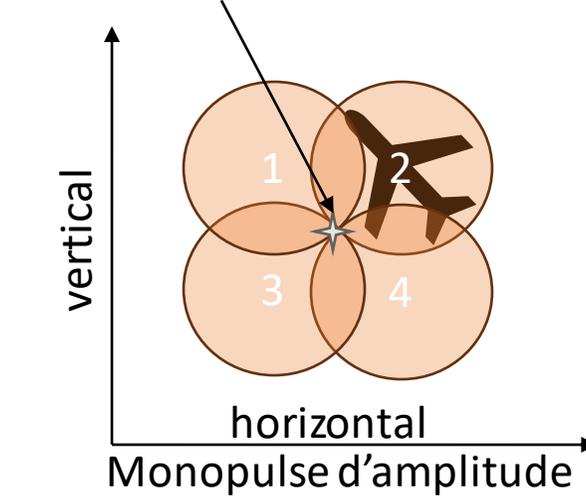


L'ANTENNE À LA RÉCEPTION 2/3: PARLONS PEU, PARLONS BIEN, PARLONS ÉCARTOMÉTRIE

Zéro d'écartométrie



Zéro d'écartométrie



Monopulse de phase

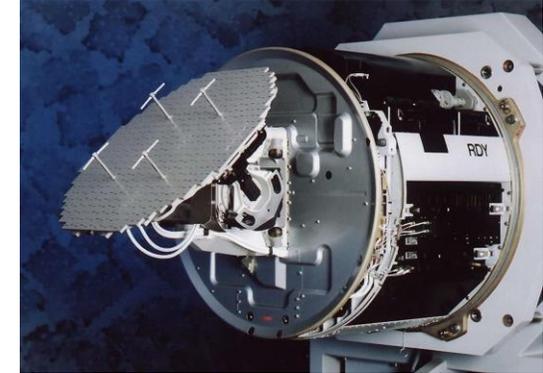
L'ANTENNE À LA RÉCEPTION 3/3: QUELQUES EXEMPLES DE RÉALISATIONS



Antenne Cassegrain inverse sur un Su-27 (ci-dessus sans le réflecteur, ci-dessous avec)



Antenne monopulse équipant l'autodirecteur d'un missile R-27 R

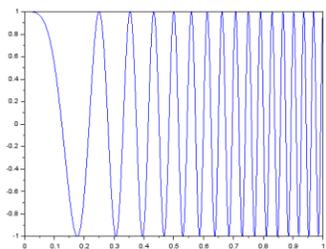


Antenne à fentes de radar RDY (2000-5)

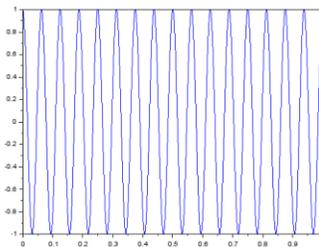
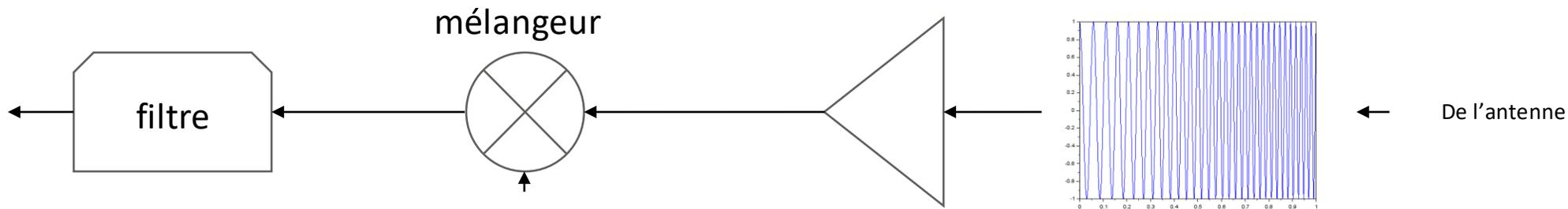


Antenne AESA du radar RBE2 (Rafale)

LA RÉCEPTION DU SIGNAL: IL ÉTAIT UNE FOIS LE RÉCEPTEUR

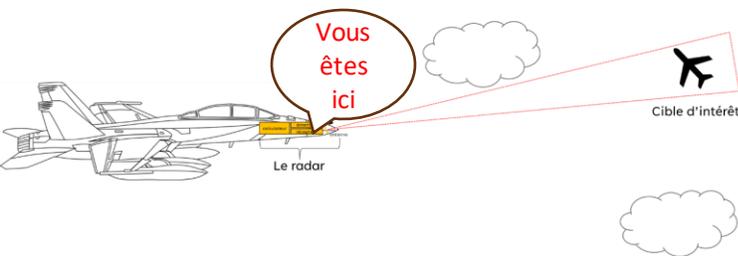


Signal basse fréquence:
Il est dit en fréquence
intermédiaire



Signal haute fréquence: c'est le signal
de l'oscillateur local

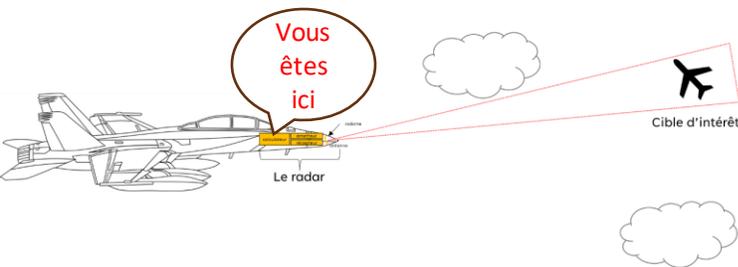
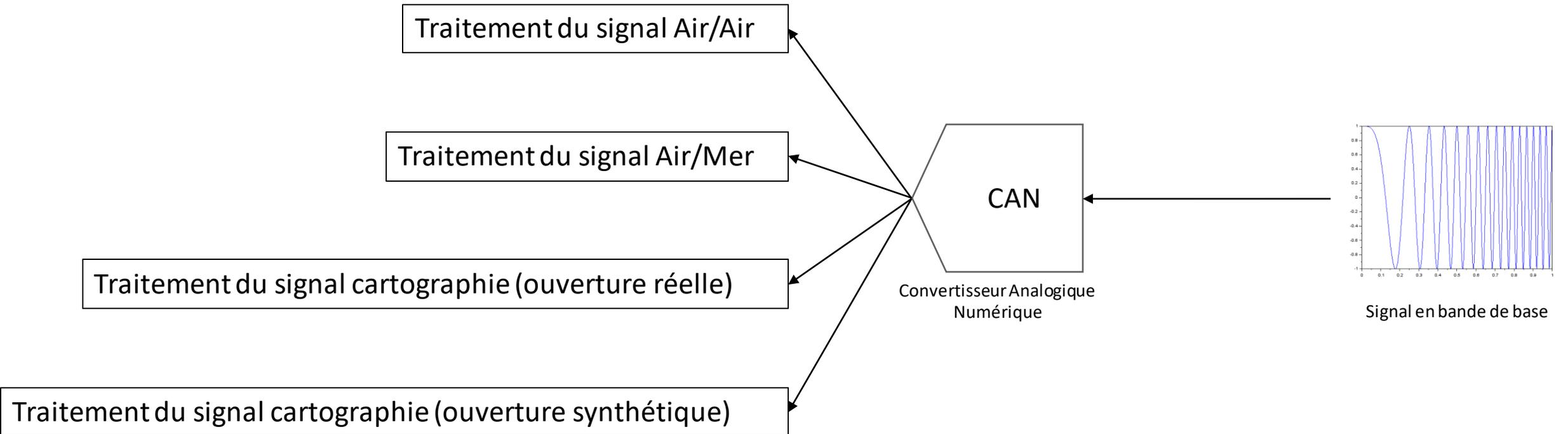
Amplificateur:
C'est le LNA (*Low Noise Amplifier*)



L'ANALYSE ET LE TRAITEMENT DU SIGNAL

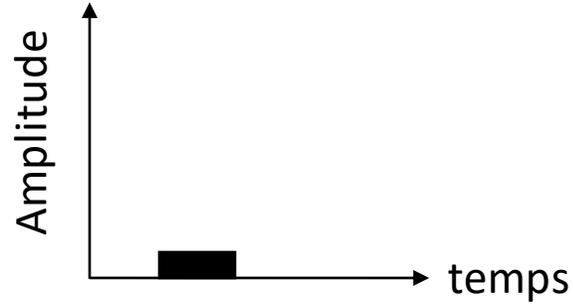
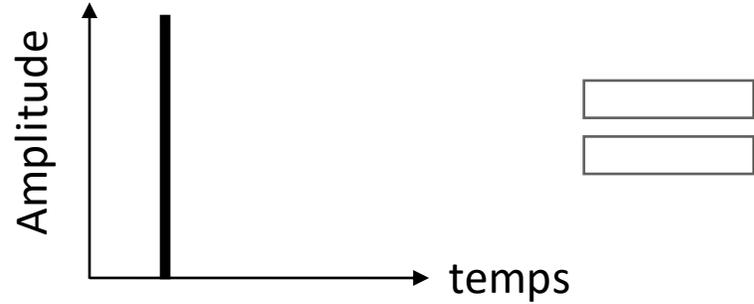
Le summum du fun et de l'éclate !

LE TRAITEMENT DU SIGNAL: C'EST ~~À LA~~ AU MODE



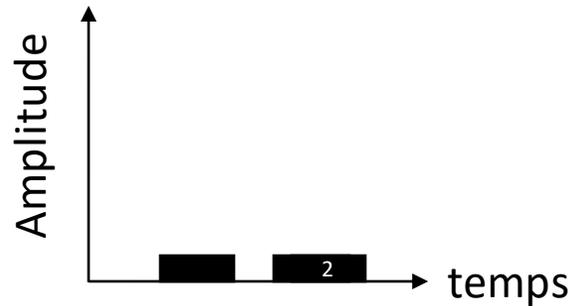
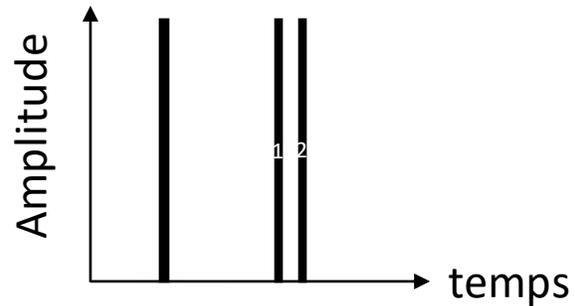
LA COMPRESSION D'IMPULSION: DE L'INTÉRÊT DE LA MODULATION

Le filtre adapté:



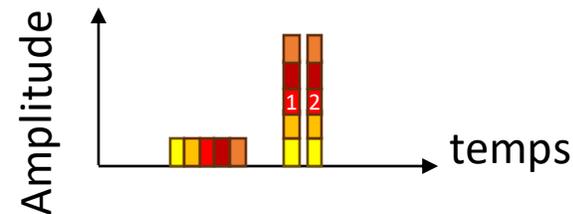
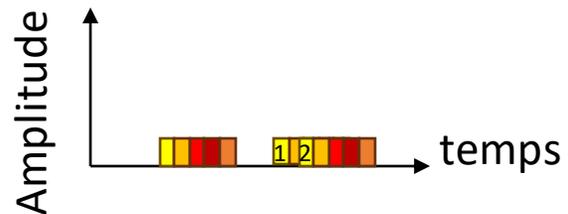
Ce qui compte ça n'est pas la puissance émise mais l'énergie, c'est-à-dire la puissance x le temps d'émission

Problème: s'il y a deux objets rapprochés



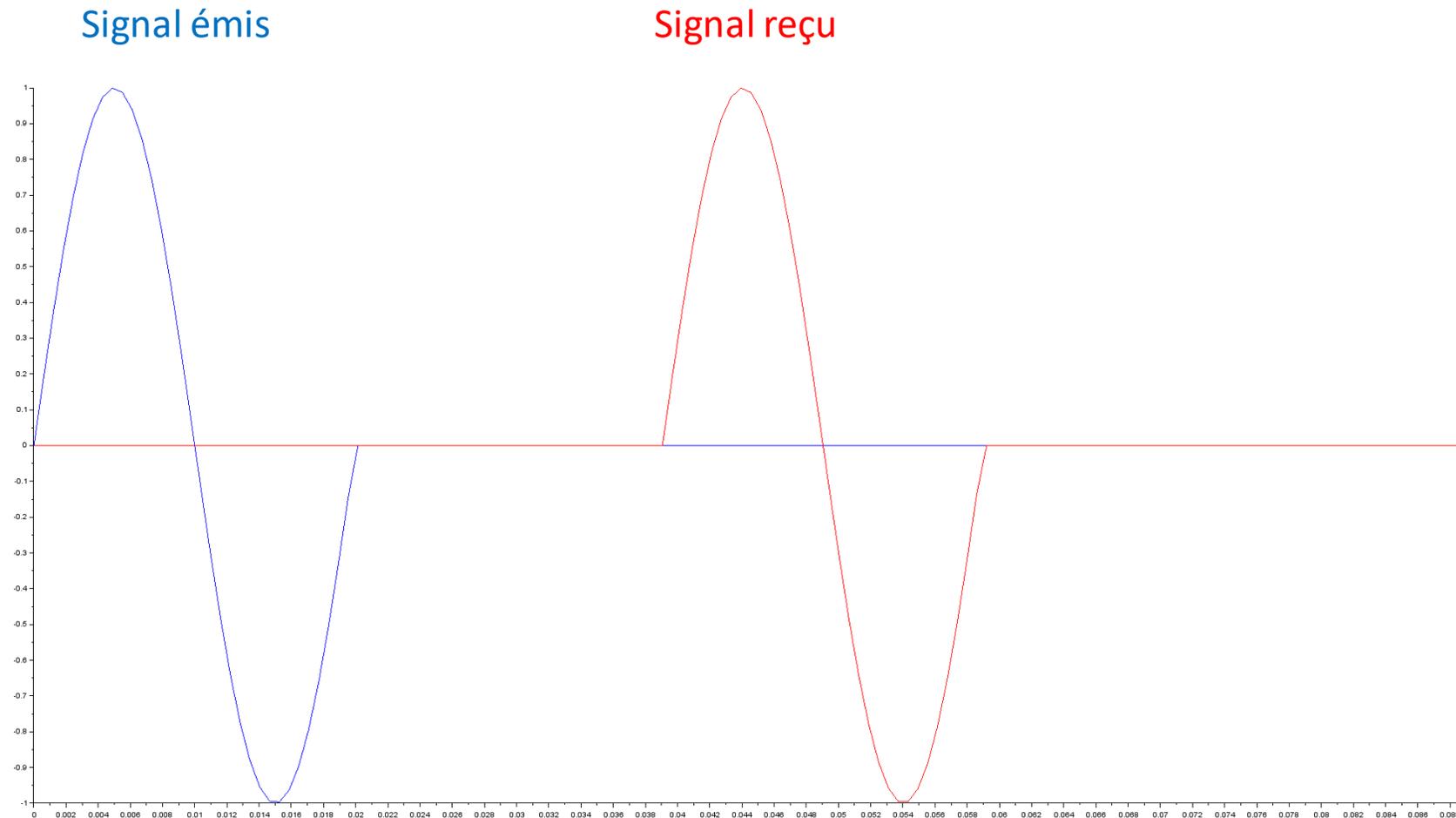
Dans le premier cas, le radar verra 2 objets distincts mais dans le second il n'en verra qu'un.

Solution: moduler le signal, c'est la compression d'impulsion

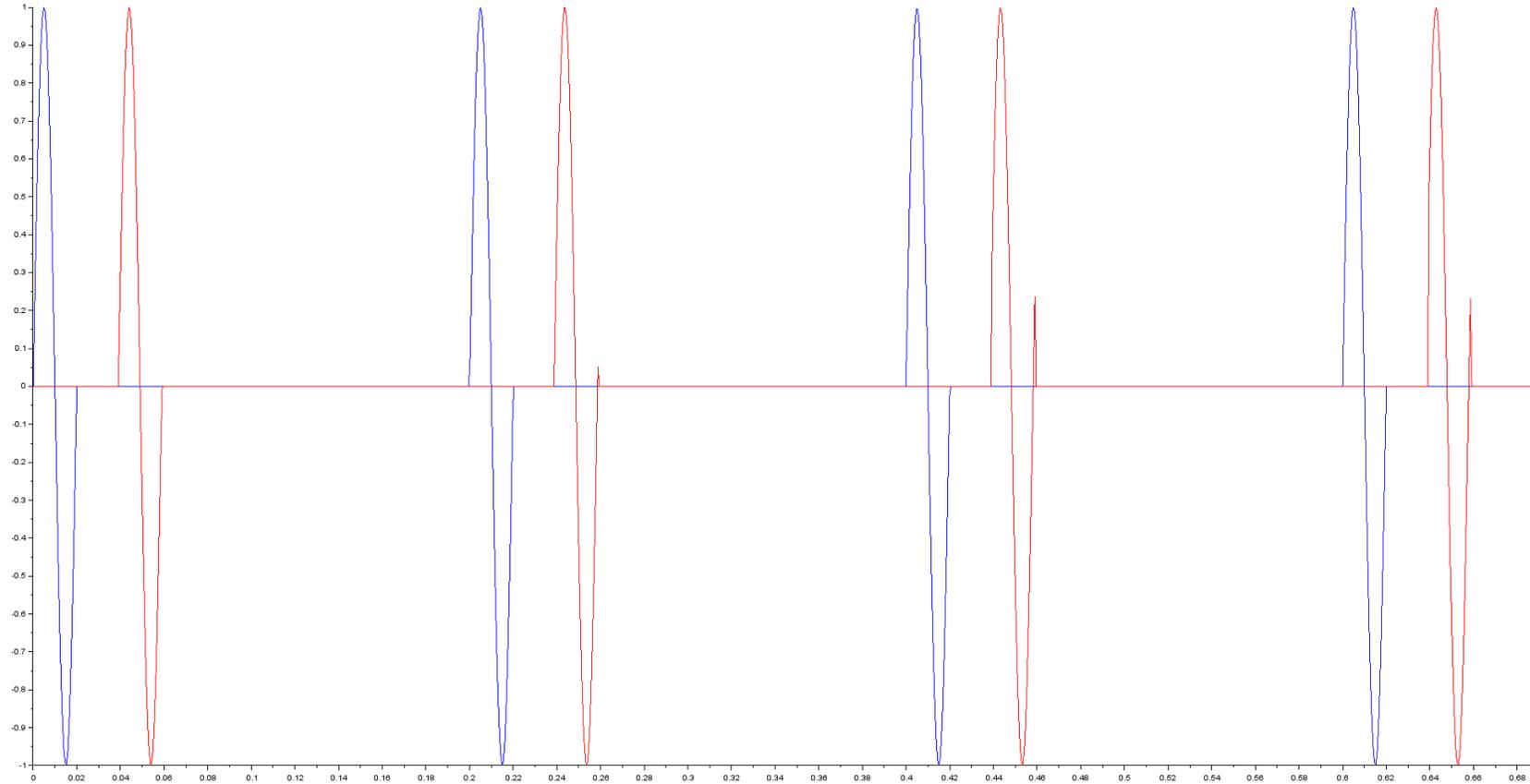


En modulant le signal, on retrouve notre résolution d'origine. Tout ce qu'il faut c'est un signal modulé et un filtrage adapté à cette modulation.

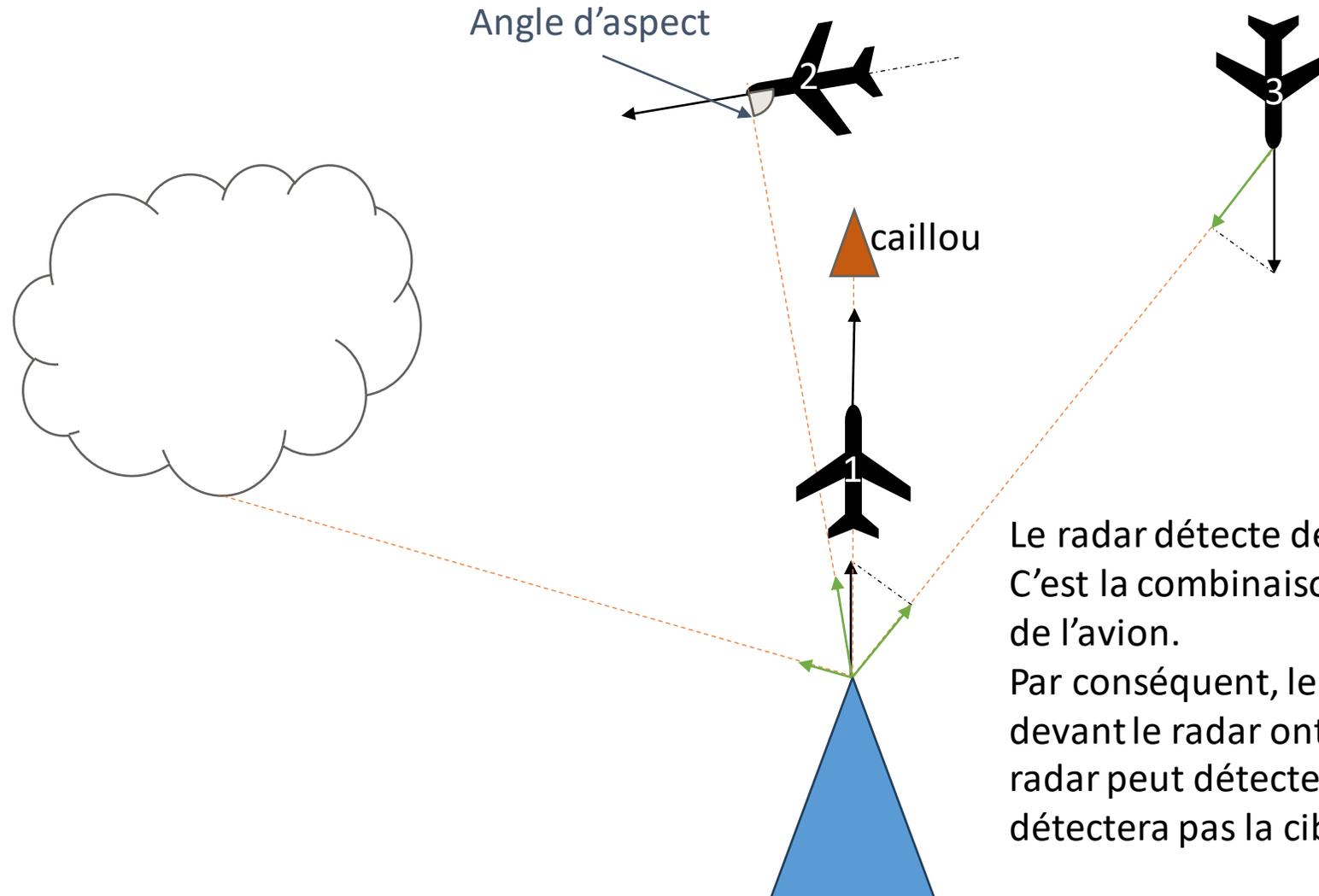
RETROUVER LE DOPPLER: INVISIBLE DANS UNE IMPULSION



RETROUVER LE DOPPLER: MAIS UN DÉCALAGE VISIBLE D'IMPULSION EN IMPULSION



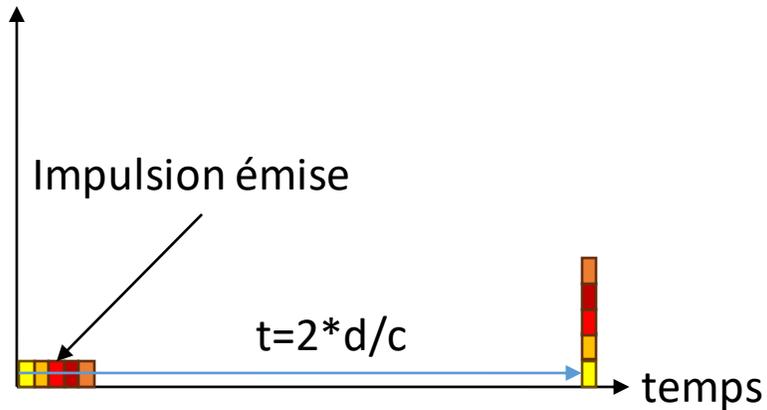
L'ANGLE AVEUGLE D'UN RADAR DOPPLER: UN SUJET MAL COMPRIS



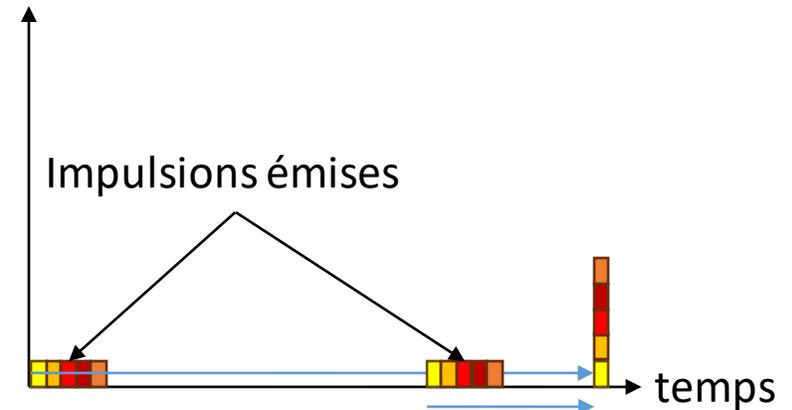
Le radar détecte des vitesses de rapprochement: C'est la combinaison des flèches vertes de la cible et de l'avion.

Par conséquent, le caillou et la cible (n°1) qui vole devant le radar ont bien des Dopplers différents: le radar peut détecter cette cible. En revanche il ne détectera pas la cible (2) qui vole à 90° d'aspect.

RETROUVER LA DISTANCE: PAS SI FACILE !

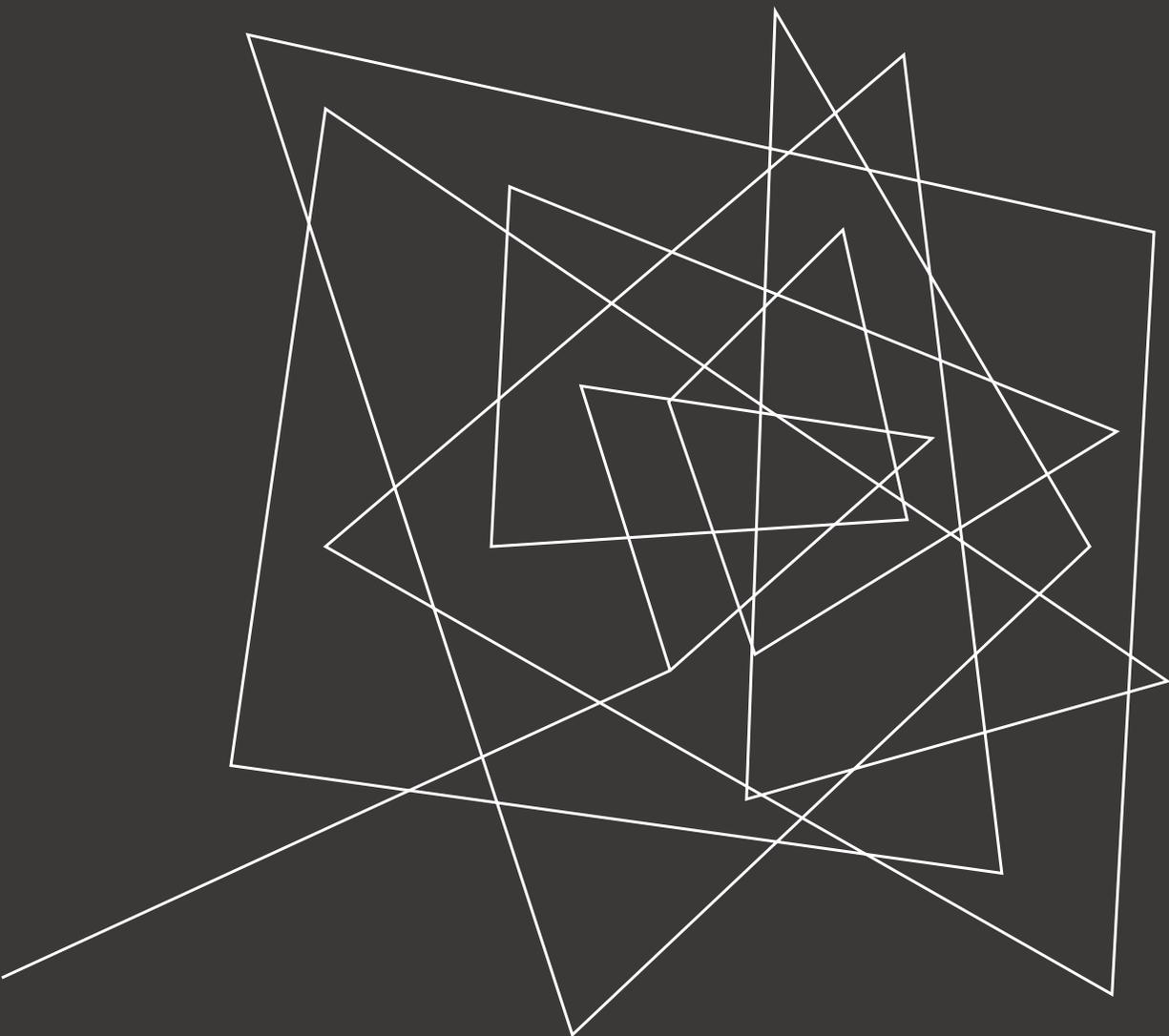


Facile de retrouver d dans ce cas



Et maintenant on fait comment ?

En diminuant le temps entre deux impulsions on facilite la mesure de la vitesse mais on rend plus difficile la mesure de la distance.
Il faut faire un choix !



QU'EST-CE QUI FAIT UN BON RADAR ?

Vous savez, moi je ne crois pas qu'il y ait de bon ou de mauvais radar...

LES PERFORMANCES

Idéalement c'est l'inverse d'une poêle TEFAL: ça accroche et ça ne chauffe pas

C'EST QUOI LA PERFORMANCE D'UN RADAR ?

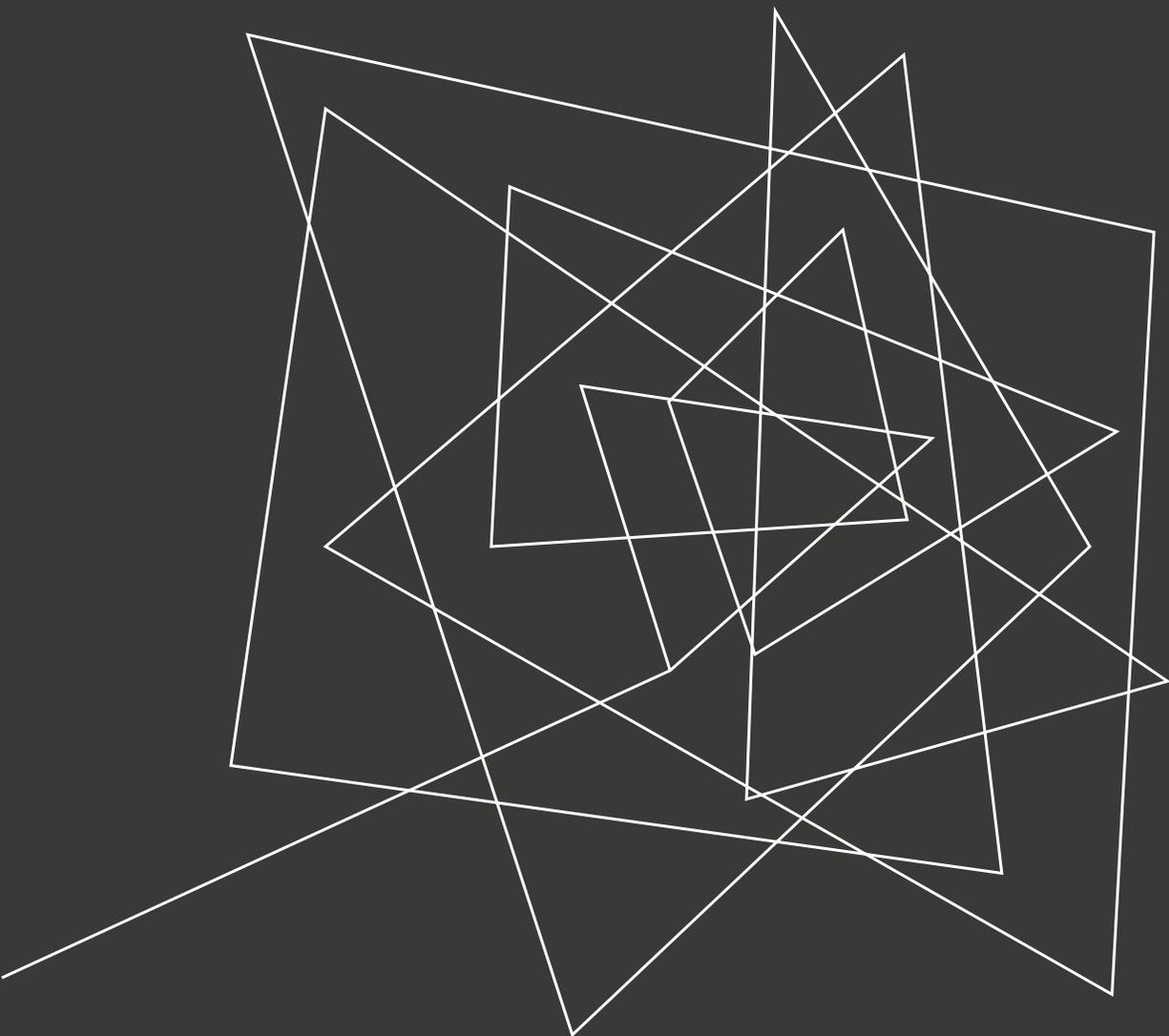
- La sensibilité: quel est le plus petit signal détectable par le radar ?
- La résolution: quelle est la séparation minimale entre 2 mesures de 2 objets pour que le radar les distingue l'un de l'autre ?
- La précision: quelle est l'écart (type) entre la valeur mesurée et la valeur vraie ?
- Le nombre de paramètres mesurés
- La capacité à synthétiser les données
- Le nombre de fonctions
- La sensibilité aux fausses alarmes
- Les faiblesses inhérentes à la conception
- La fiabilité
- L'encombrement, la puissance consommée la chaleur dégagée

LE CONTEXTE

Il y a toujours un contexte...

LE BON RADAR SUR LE MAUVAIS AVION EST UN MAUVAIS RADAR

- C'est quoi un mauvais radar ?
 - Un radar peu fiable (qui tombe en panne sans arrêt ou qui demande une trop grande maintenance ou dont les performances varient trop d'un vol à l'autre pour qu'on s'y fie)
 - Un radar aux performances décevantes (avec une génération de retard par exemple)
 - Un radar difficile à utiliser (trop de réglages pour un radar destiné à un avion monoplace par exemple)
 - Un radar trop optimisé pour un, et un seul, scénario opérationnel (et qui donc, en dehors de ce scénario est inutile)
 - Un radar moins bon que celui de l'adversaire (toujours difficile à prévoir)
 - Un radar dont on n'a pas besoin (inadapté aux nouvelles menaces par exemple)



LE RADAR DU FUTUR ?

La marche du progrès est inarrêtable...

TOUJOURS PLUS LOIN, TOUJOURS PLUS PRÉCIS, TOUJOURS PLUS FORT !

- S'adapter à de nouvelles cibles
 - Cibles furtives
 - Drones
 - Chat volant venu de l'espace 
- Fonctionner dans un environnement toujours plus saturé de rayonnements parasites
 - Parasitage volontaire ou non !



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Est-ce que vous avez des questions ?

SOURCES

- Références en langue française:

- D'une manière générale, le site *radar tutorial*, très riche, mais inégal: <https://www.radartutorial.eu/index.fr.html>
- *Physique et Théorie du radar*, de J. Darricau
 - La référence en français, en plus disponible gratuitement et légalement sur internet: <https://radars-darricau.fr/>
 - Attention: ça n'est pas pour tout le monde, le texte est parfois difficile à comprendre
- *Le traitement du signal radar*, de R. Cariou
 - Un livre récent et bien illustré pour comprendre le traitement du signal

- Références en langue anglaise:

- *Introduction to airborne radar*, de GW. Stimson
 - Si vous lisez l'anglais c'est vraiment le plus abordable et le plus complet
- *Radar Handbook*, de M. Skolnik
 - Considéré comme la bible du radar en langue anglaise mais comme pour le Darricau, c'est un peu ardu à comprendre

SOURCES DES ILLUSTRATIONS

- Planche 8
 - Illustration d'un cinémomètre radar
 - https://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_automatique#/media/Fichier:Radar_auto_face_active.jpg
 - Illustration d'un radar de navigation
 - [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Garmin_Nacka_\(1090781\).jpg?uselang=fr#/media/File:Garmin_Nacka_\(1090781\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Garmin_Nacka_(1090781).jpg?uselang=fr#/media/File:Garmin_Nacka_(1090781).jpg)
 - Illustration d'un radar météo
 - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airbus_A320-214_Vueling_Airlines_EC-HTD.jpg#/media/File:Airbus_A320-214_Vueling_Airlines_EC-HTD.jpg
 - Illustration d'un radar sol/air
 - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sibu_Airport_radar_surveillance_tower.JPG#/media/File:Sibu_Airport_radar_surveillance_tower.JPG
- Planche 15
 - Illustration d'un F-18
 - <https://fr.vecteezy.com/art-vectorel/12067611-image-vectorielle-d-un-avion-de-chasse-pour-cahier-de-coloriage>
- Planche 17
 - Illustration détaillée d'un récepteur radar
 - <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Exciter.en.html#fig1>
- Planche 25
 - Diagramme de la SER
 - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sigma_invader_RCS.png#/media/File:Sigma_invader_RCS.png
- Planche 31
 - Radar N001 de Su-27 sans son réflecteur
 - https://www.digitalcombatsimulator.com/images/products/flanker_fc/Su-27-radar.jpg
 - Radar N001 de Su-27 avec son réflecteur
 - <https://www.ausairpower.net/APA-Flanker-Radars.html>
 - Autodirecteur de R-27R
 - https://vi.wikipedia.org/wiki/Vympel_R-27#/media/T%E1%BA%ADp_tin:R-27_missile_homing_head_Kyiv_2018_02.jpg
 - Radar RDY
 - <https://www.radartutorial.eu/19.kartei/08.airborne/pic/img08-042-02.jpg>
 - Radar RBE2
 - <https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/database/assets/images/2020-12/E.%20Raz%20Regards%20C2%A9%20Thales.JPG>
- Planche 47
 - Nyan cat
 - https://en.wikipedia.org/wiki/Nyan_Cat#/media/File:Nyan_cat_250px_frame.PNG