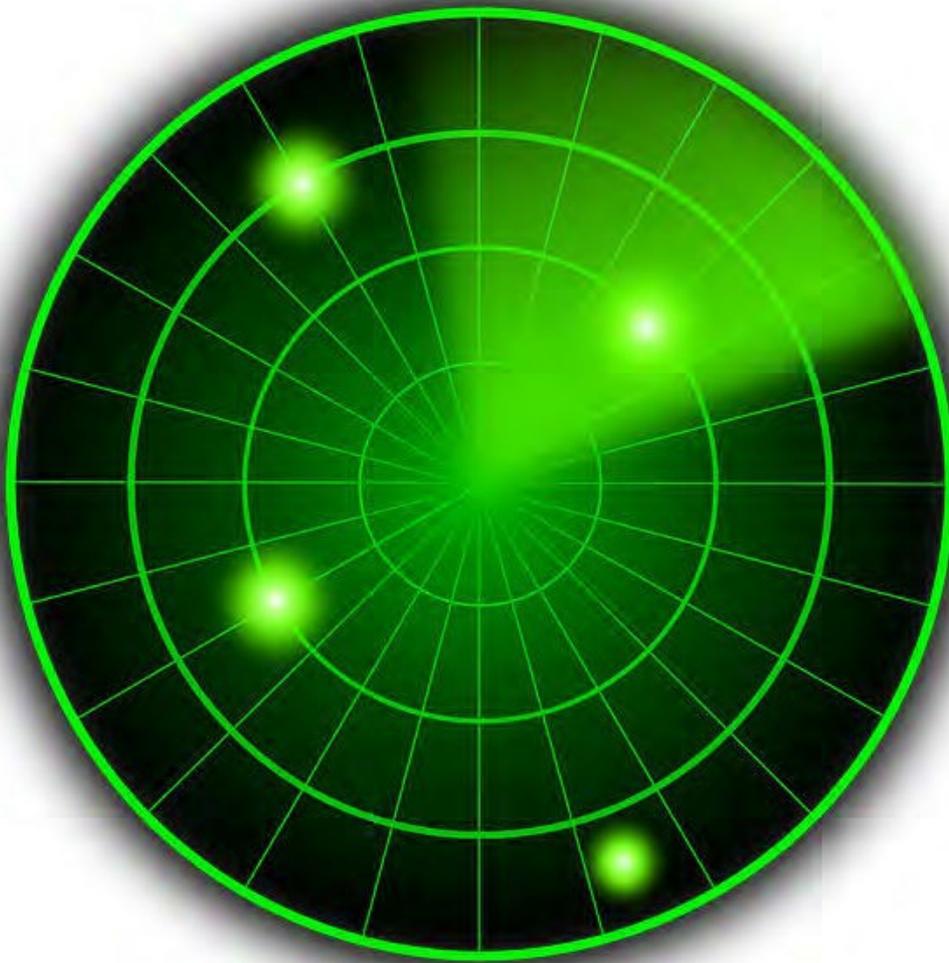


TANLET Quentin
PICHAT Corentin
LE BLAVEC Noé
1S4

Prix du trinôme académique de Lyon 2018

Les enjeux de la Défense Nationale



Problématique :

En quoi la furtivité Radar est-elle un enjeu de la
Défense Nationale ?

PLAN :

Introduction

I. Par quels procédés peut-on rendre un véhicule furtif face aux ondes radar ?

1. La géométrie
2. Les matériaux

II. Quels sont les enjeux de la furtivité dans le cadre de la Défense nationale ?

Conclusion

Introduction

Dans ce dossier, nous allons étudier dans quelle mesure la furtivité radar est un enjeu de la Défense Nationale. Avant d'approcher la dimension militaire du sujet, nous allons tout d'abord expliquer ce qu'est la furtivité radar, le fonctionnement d'un radar puis les moyens à notre disposition afin de rendre un véhicule indétectable par ces systèmes. Par la suite, nous étudierons comment ce domaine de recherche est un enjeu plus ou moins important dans la Défense Nationale.

Tout d'abord, nous devons expliquer le terme de **furtivité**: il s'agit de l'ensemble des moyens permettant de se dissimuler à un observateur tiers. Elle peut concerner la vision (peinture de camouflage..), le son, les sonars ou encore les ondes radar. Nous allons nous intéresser à cette dernière catégorie.

Le domaine aérien de la France est le deuxième plus survolé du monde, après celui des États-Unis. De ce fait la France a dû adopter une posture permanente de sécurité de l'espace aérien français. La France c'est donc doté d'une constellation de radars de surveillance, une des meilleures au monde. Mais pourquoi se doter d'une constellation de radars et mettre en place une posture permanente de sécurité ? C'est pour savoir et pouvoir détecter les appareils qui sont au dessus du territoire Français pour pouvoir en cas de menaces intervenir le plus rapidement possible et en cas de contre mesure adverse (brouillage) de pouvoir réagir le plus vite possible.

Avant de nous pencher sur les différents moyens possibles pour rendre un véhicule furtif aux ondes radar, il nous faut aussi expliquer le fonctionnement de ces dispositifs.

On peut regrouper les radars en 2 catégories:

Les **radars de position** (2D ou 3D), qui permettent de détecter l'emplacement d'un objet/véhicule. Pour cela, le radar émet des ondes électromagnétiques à intervalles réguliers, ondes qui se réfléchissent sur les obstacles sur leur route. Le radar perçoit alors l'écho de cette onde et en mesurant le temps que celle-ci a mis pour revenir et connaissant sa vitesse, on peut donc aisément retrouver la position de l'objet détecté.

Les radars « 2D » fonctionnent en quarts de cercle, ils les balayent à intervalle régulier. Ils envoient une impulsion radar puis ils écoutent un éventuel écho puis passent au quart suivant. Les radars « 3D » ont le même fonctionnement sauf que en plus de balayer latéralement un balayage verticale est ajouté ce qui permet d'évaluer la hauteur de l'objet.

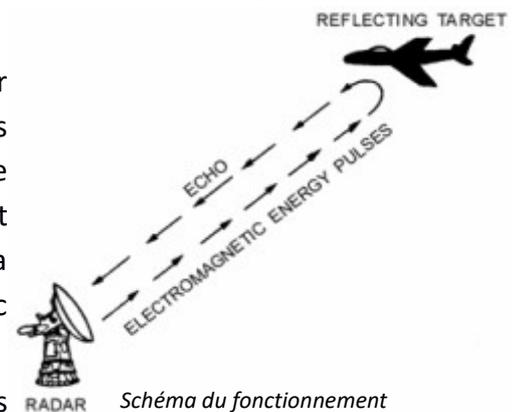


Schéma du fonctionnement simplifié d'un radar de position



Awacs français (avion radar)



Radar aladin (basse altitude, 2D)

Les **radars Doppler**, qui détectent la vitesse relative d'un objet en plus de sa position, grâce à l'effet Doppler-Fizeau.

L'effet **Doppler-Fizeau** est le phénomène physique qui permet aux radars de détecter la position et la vitesse d'un objet. Il désigne le changement apparent de la fréquence d'un signal sonore ou électromagnétique reçu par un observateur mobile par rapport à une source émettrice fixe ou bien par un observateur fixe par rapport à une source émettrice mobile. La variation de fréquence est proportionnelle à la vitesse relative entre l'observateur et la source, le long du chemin qui les sépare.

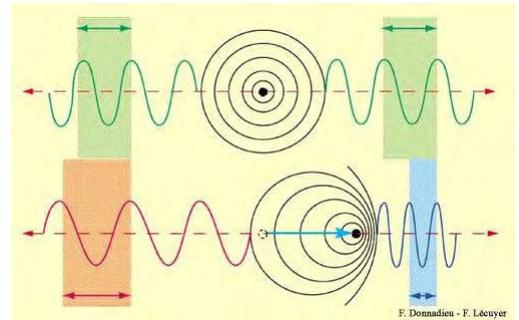
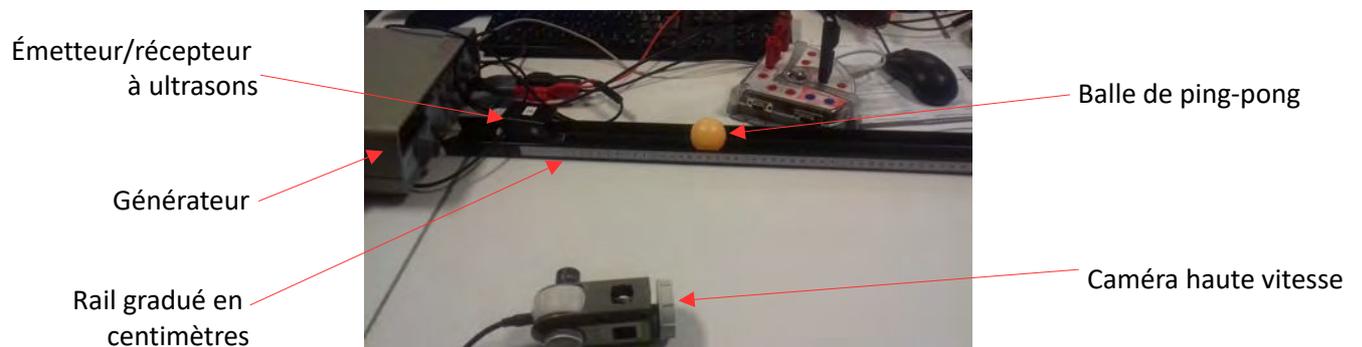


Schéma représentant l'effet Doppler : on observe que les ondes réfléchies par l'objet en mouvement vers la source ont une fréquence plus élevée

Démonstration :

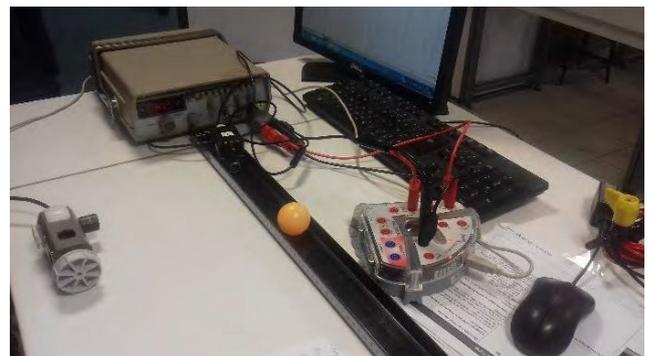
Afin de démontrer ce phénomène physique, nous avons réalisé une expérience à l'aide d'une balle de ping-pong, d'un système émetteur/récepteur ultrasonore et d'une caméra rapide : dans un premier temps nous avons monté l'émetteur et le récepteur en série et les avons connectés au PC via le logiciel LatisPro.

Par la suite nous les avons disposés à l'extrémité d'un rail et positionné la caméra haute vitesse de façon à filmer les dix derniers centimètres de la course de la balle.



Photographie du montage effectué pour l'expérimentation

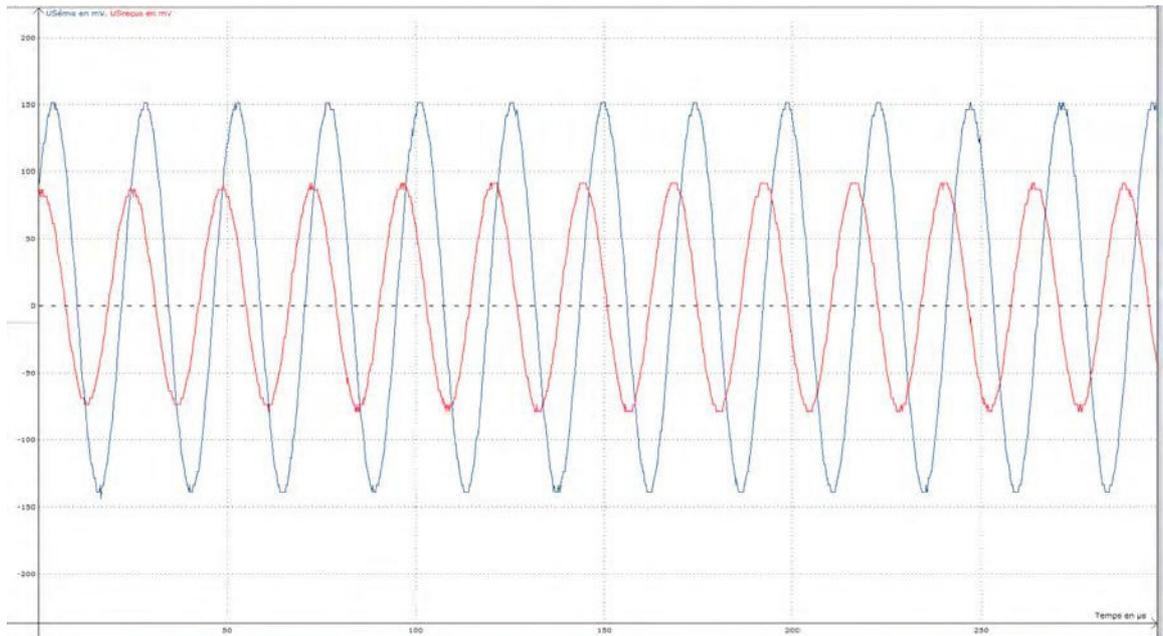
Nous avons lancé la balle le long du rail et mesuré la différence de fréquence d'émission et de réception des ultrasons 10 cm avant la fin de la course. En même temps nous avons filmé la balle sur les 10 derniers centimètres. Ensuite nous avons reporté les mesures des émetteur / récepteur sous formes de courbes sinusoïdales. À l'aide de la formule suivante :



Autre photographie du même montage

$$v = \frac{f_{\text{reçue}} - f_{\text{émise}}}{2 \times f_{\text{émise}}} \times c ;$$

avec c la vitesse de propagation de l'onde émise.



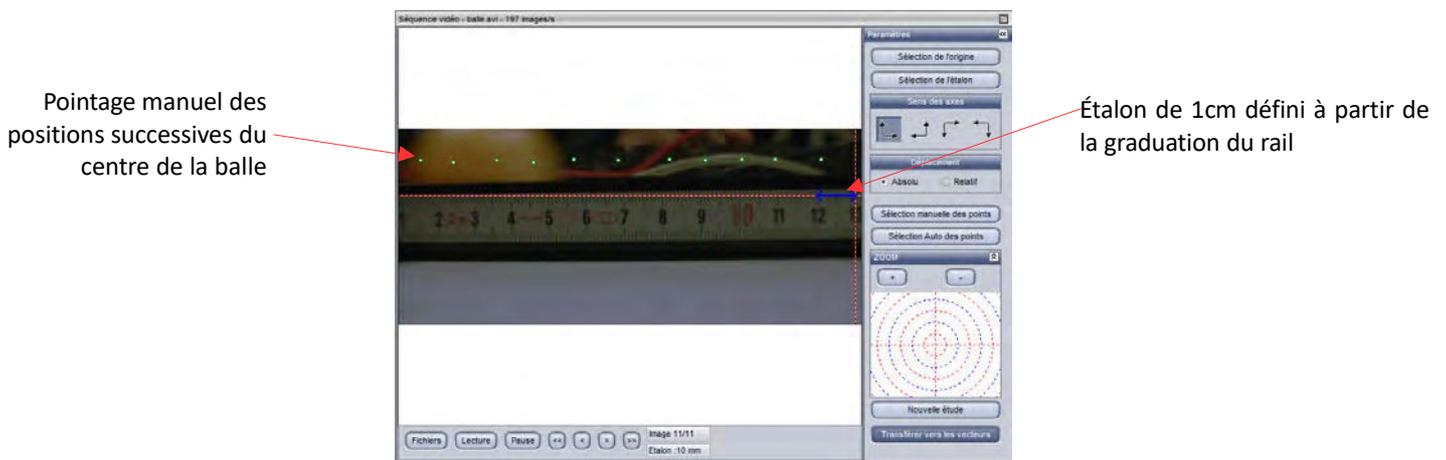
Sur les courbes sinusoïdales obtenues par le logiciel, on peut observer le léger décalage entre la longueur de l'onde émise (courbe bleue) et de celle de l'onde reçue (courbe rouge)

Dans le cas de notre expérimentation nos résultats ont été : $f_{\text{émise}} = 42,254 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{reçus}} = 42,857 \text{ kHz}$, $c = 340 \text{ m/s}$
 $v = [(42857 - 42254) / (2 \times 42254)] \times 340 = 2,426 \text{ m/s}$
 $v = 8,73 \text{ km/h}$

Donc, d'après les mesures de l'effet Doppler sur les ondes ultrasonores, la balle se déplaçait à 8,73 km/h.

Cependant il nous faut vérifier ces résultats d'une manière sûre, avant de pouvoir conclure que l'effet Doppler nous a permis de calculer la vitesse.

Afin de vérifier nos résultats, nous avons donc réalisé un pointage vidéo sur le LatisPro, à partir des images capturées par la caméra haute vitesse, pour que le logiciel calcule la vitesse de la balle.



Capture d'écran de la fenêtre de pointage du logiciel LatisPro

Le logiciel a calculé une vitesse de 2,262 m/s qui équivaut à 8,14 km/h

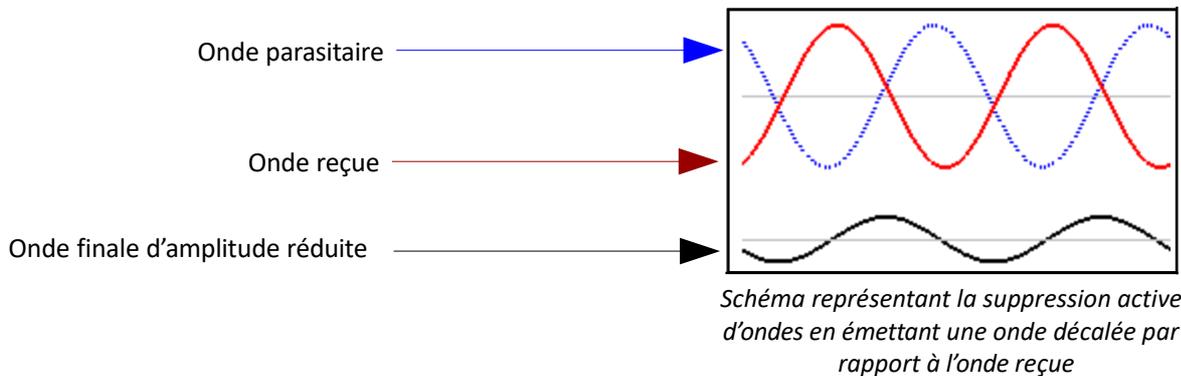
Nous pouvons observer une petite différence entre les résultats du calcul (pour rappel, la vitesse calculée avec l'effet Doppler était de 8.73km/h) et du pointage grâce à LatisPro. Elle peut être due aux imprécisions du pointage manuel.

Nous pouvons donc en conclure que, grâce à l'effet Doppler, nous avons pu obtenir une mesure de vitesse plutôt précise. Cela est dû à la grande vitesse du son (340 m/s) et de sa haute fréquence, ce qui permet de bien observer le décalage.

Durant cette expérience nous avons utilisé des ondes sonores, qui sont des ondes mécaniques (utilisant un milieu matériel pour se propager), tandis que les radars utilisent des ondes de la famille électromagnétique. Cela n'a pas d'incidence pour l'expérience, puisque l'effet Doppler est possible avec les deux familles d'ondes. Mais les ondes mécaniques sont le phénomène de propagation d'une perturbation locale dans un milieu matériel comme l'air alors que les ondes électromagnétiques sont le phénomène de propagation d'énergie dans l'espace pas forcément matériel et donc par conséquent ces deux familles d'ondes ont des propriétés radicalement différentes.

De plus, les ondes électromagnétiques ont une célérité bien plus grande, et les fréquences utilisées pour les radars sont autour de mille fois supérieures à celles expérimentées avec les ultrasons (on passe de l'ordre du kHz à celui du MHz). La détermination de la position et de la vitesse d'un objet est donc d'autant plus précise avec un radar.

Après cette brève explication de l'effet Doppler nous allons nous concentrer sur la furtivité radar passive, qui consiste à limiter la réflexion directe de l'onde émise par le Radar afin d'être le moins détectable par ces dispositifs. On la différencie de la furtivité radar active, qui quant à elle consiste à brouiller les signaux radar en émettant une onde similaire avec un léger décalage afin d'annuler celle émise par le radar.



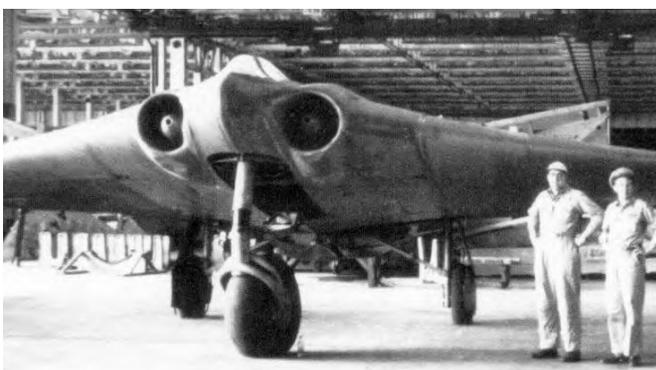
Afin de maximiser cette furtivité radar passive, nous pouvons dégager deux axes de développement :

- premièrement, nous nous intéresserons à la géométrie, à la forme ;



Le Sea Shadow (IX-529) est un navire furtif expérimental construit en 1982 et possédant une géométrie singulière, qui lui permettait d'être très peu détectable par les radars

- par la suite, nous étudierons quel matériaux seraient les plus propices à sa conception.



En 1944, les Nazis développèrent un prototype d'avion furtif, le Horten Ho 229, en utilisant un mélange de bois et de charbon pour l'armature afin d'absorber les ondes radar.

I. Par quels procédés peut-on rendre un véhicule furtif face aux ondes radar ?

1 - La géométrie

Le fonctionnement d'un radar, que nous avons expliqué dans l'introduction, lui permet de détecter la SER d'un objet. Il s'agit de la Surface Équivalente Radar, qui équivaut à la surface de l'objet que le radar va percevoir. Le principe même de la furtivité radar passive (sans émission d'ondes parasites) est de réduire cette SER afin de diminuer la perception de l'objet par le radar.

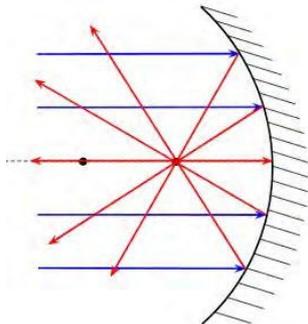
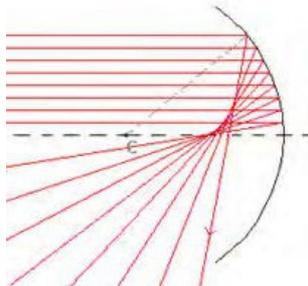
Afin d'atteindre cet objectif, une des solutions implique de modifier la géométrie des surfaces de l'objet à rendre furtif. Or, nous savons que certaines formes renvoient mieux l'onde radar à l'émetteur que d'autres, par conséquent nous allons effectuer une expérience pour étudier en particulier quelles formes géométriques sont les plus propices à être utilisées dans la conception d'un véhicule furtif.

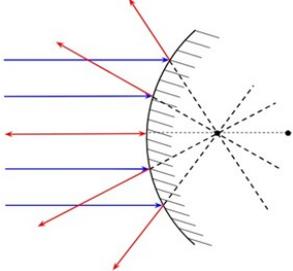
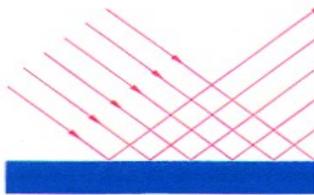
Afin d'obtenir une expérience parlante au premier regard nous avons commencé par étudier la réflexion d'un faisceau lumineux sur une surface afin d'obtenir un résultat observable à l'œil. La lumière faisant partie de la famille des ondes électromagnétique, tout comme les ondes radar, donc on peut l'utiliser pour démontrer le comportement de ces dernières vis à vis de différentes surfaces.

Expérimentation n°1:

Au cours de cette expérience, nous avons observé la réflexion d'un faisceau lumineux dirigé sur différentes formes de miroirs : un plat, un convexe ainsi qu'un concave. De plus, nous avons ajouté aux surfaces à tester une surface diffusante (feuille blanche) et une autre absorbante (feuille noire). L'expérience ayant réalisée dans une pièce sans lumière afin de pouvoir observer les rayons lumineux, nous n'avons pas pu photographier les résultats. Nous les avons donc schématisés.

Nos observations furent les suivantes :

	<p>Avec un miroir concave et un faisceau large, nous observons que les rayons réfléchis se réunissent en un point avant de repartir dans toutes les directions, dont la source lumineuse.</p>
	<p>Avec le même miroir mais un faisceau plus réduit, nous observons qu'aucun rayon n'est renvoyé à la source. Cependant, les radars utilisent toujours un cône d'émission assez large, et par conséquent cette configuration est impossible.</p>

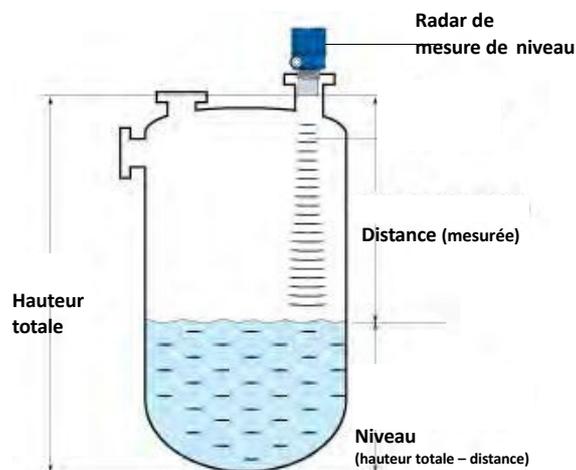
	<p>Avec un miroir convexe, peu importe l'emplacement de la source, le retour lumineux est inévitable. Cependant, il est réduit à un faible rayon.</p>
	<p>Enfin avec un miroir plat, tout le faisceau est renvoyé dans la même direction. Il y a un retour seulement quand la source est alignée avec le centre du miroir. Car l'ensemble du faisceau est réfléchi avec le même angle d'incidence.</p>
	<p>Et voilà la diffusion d'une surface blanche, qui renvoie la lumière dans toutes les directions mais avec une intensité plus faible</p>

Donc afin de rendre un objet furtif à une source de lumière diffuse, il faut donc privilégier les formes planes et sans aspérités, qui renvoient le faisceau dans une seule direction. Comme nous l'avons déjà dit, les ondes lumineuses et électromagnétiques du radar ont les mêmes comportements. On peut donc conclure la même chose pour les micro-ondes utilisées par le radar.

Cette hypothèse a d'ailleurs été confirmée par M. Christophe Barbier, chef de produit chez Siemens et spécialiste des radars industriels de mesure de niveau. Au cours d'un entretien, nous avons pu lui poser de nombreuses questions sur ses outils, et parmi elles leur comportement face à une surface inclinée. En effet, lors de la mesure du niveau d'un liquide dans une cuve, et alors qu'il est en agitation, un vortex se crée et le radar doit alors mesurer une surface penchée. Ce problème se pose aussi avec le stockage de solides tels que des graviers ou des poudres, qui forment des monticules quand ils sont versés. Il nous a donc confirmé que ces situations étaient un réel obstacle pour les appareils de mesure, puis nous a expliqué comment ils palliaient à ce problème : les radars de mesure conçus pour des cuves avec agitateur, formant donc des turbulences et même des mousses, ont souvent un cône d'émission plus large, ainsi qu'une fréquence et une puissance plus élevées. Cela permet de détecter plus précisément les retours d'onde électromagnétiques, même très faibles.



Un radar de mesure de niveau de marque Siemens, qui nous a été présenté au cours de l'exposition BTS CIRA



Fonctionnement d'un radar de mesure de niveau

Expérimentation n°2:

Afin de vérifier la conjecture de la première expérience, nous avons réalisé une seconde expérience, cette fois-ci avec des radars industriels pour pouvoir étudier réellement leur comportement. Ceux-ci nous ont été aimablement fournis par M. Roy, professeur de BTS CIRA, qui nous en a expliqué le fonctionnement et que nous tenons particulièrement à remercier.

Le radar que nous avons en majorité utilisé est un VEGA 50 Pulse HART, émettant des ondes à une fréquence de 5.8GHz dans un cône d'émission de 40°. Nous avons aussi à notre disposition un radar de marque Siemens, mais dont les courbes étaient moins facilement exploitables. Tous deux étant destinés à la mesure de niveau, ils ont donc un temps de rafraîchissement lent, mais cela n'influe pas sur notre expérience.

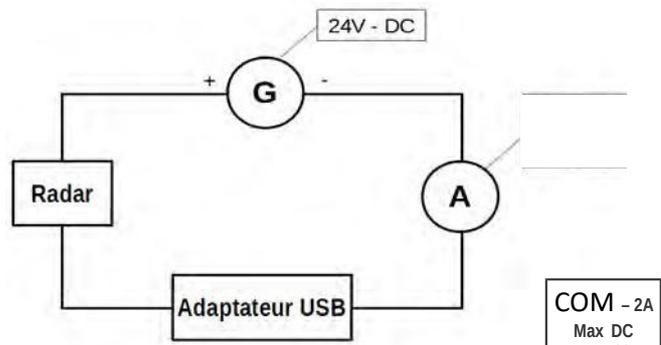
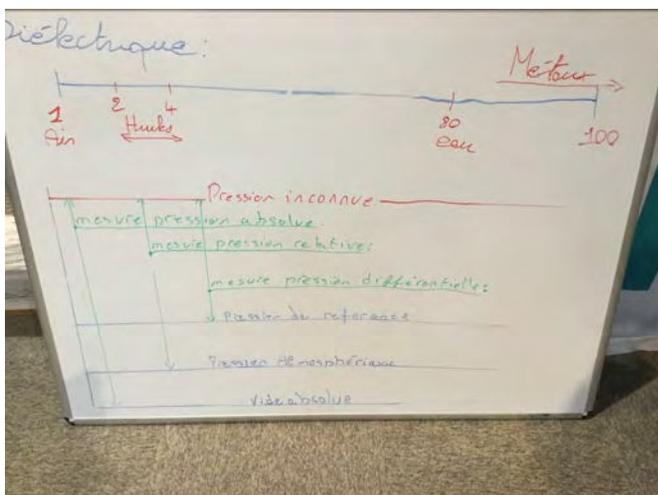


Photo et schéma du montage de l'expérience du radar VEGA, mis en place avec l'aide de M. Roy.



Échelle de diélectricité simplifiée, présentée sur un

tableau lors de l'exposition BTS CIRA

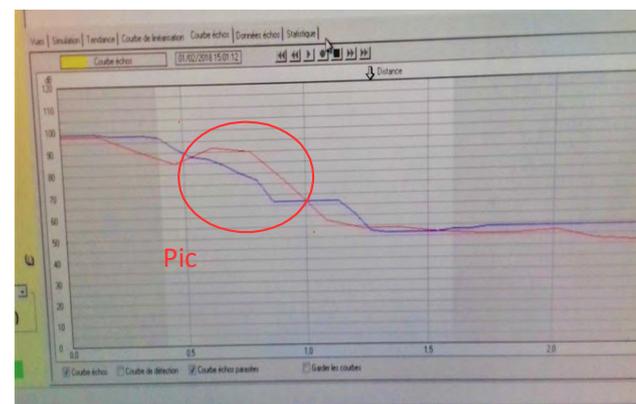
moins il laissera passer d'ondes électromagnétiques, et plus l'écho sera fort. À l'inverse, plus celle-ci se rapproche de 1 (air), plus le matériau laissera passer d'ondes électromagnétiques. Cette échelle est très utile dans le domaine de l'industrie afin de pouvoir calibrer les radar de mesure de niveau en fonction du liquide / solide à mesurer. Sur cette échelle (ci-contre), on peut observer que les métaux ont la plus grande constante diélectrique, et sont donc très réfléchissants. C'est pour cela que nous avons choisi une plaque de métal pour représenter le miroir lors de notre expérience.

Le montage mis en place, nous avons calibré le radar, sans aucun obstacle. Sur la courbe obtenue, on observe une diminution progressive du signal, et la courbe de l'écho obtenu (rouge) ne dépasse pas la courbe des échos parasites (obtenue lors du calibrage). Le radar ne détecte donc pas d'obstacle en face de lui, les murs/plafond étant trop distants.



Voici les courbes obtenues après le calibrage, sans obstacle. La courbe bleue est la celle des échos parasites, c'est la courbe obtenue dans sa position de référence (le radar était réglé pour mesurer les échos sur 2m, ce qui explique sa chute brutale), la courbe rouge est la courbe des échos mesurés à chaque rafraîchissement. Le radar calcule le niveau en comparant les deux courbes : si la rouge dépasse la bleue, il en déduit qu'un obstacle est présent.

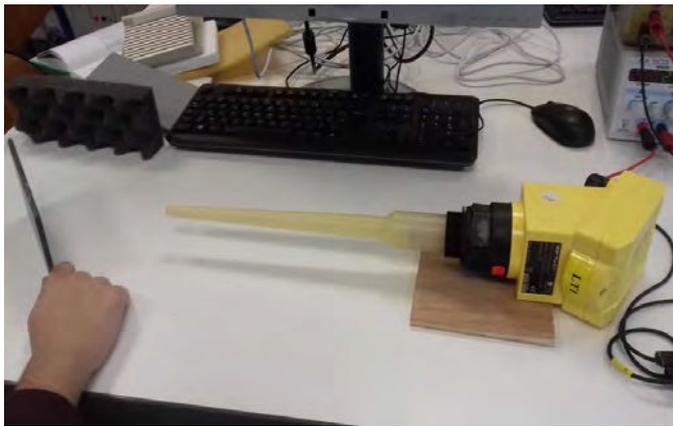
Après avoir observé la courbe des échos perçus sans obstacles, nous avons placé une plaque de métal perpendiculaire au radar, à environ 60cm de celui-ci.



Photographies du montage et des courbes obtenues

Après avoir placé la plaque en métal, nous pouvons constater l'apparition d'un pic sur la courbe rouge entre 0.6m et 1m, qui dépasse la courbe bleue. Cela qui signifie qu'un obstacle a été détecté à environ 0.6m, ce qui est précisément la distance à laquelle nous avons disposé la plaque. Notre radar a donc facilement détecté la plaque de métal.

Après avoir mesuré l'intensité de l'onde renvoyée par la plaque perpendiculaire au radar, ce qui représente le maximum de réflexion, nous reproduit la même expérience en inclinant la plaque de métal.



Photographie du montage avec la plaque de métal inclinée.

Photographie des courbes des échos obtenues sur le logiciel au cours du même montage



Cette fois ci, le résultat est totalement différent. En effet, le pic sur la courbe des échos mesurés (rouge) a presque totalement disparu, et celle-ci dépasse que très légèrement la courbe bleue. Dans cette situation, le radar ne reçoit pas d'écho de la plaque et ne détecte donc pas l'obstacle. Comme dans la première expérience avec le miroir plat, les ondes électromagnétiques ont été réfléchies dans une direction autre que celle du radar.

Nous pouvons donc conclure, après cette expérience, que nos résultats lors de l'expérimentation avec les ondes lumineuses étaient identiques avec les ondes radar. Par conséquent, la conjecture de notre première expérience est vérifiée : les surfaces planes réfléchissantes (avec une constante diélectrique forte) renvoient une grande partie des ondes électromagnétiques émises, dans une direction précise.

Pour concevoir un véhicule furtif, il faut donc privilégier des matériaux à diélectrique forte, et disposés en plusieurs surfaces planes et de façon à éviter qu'un radar ne soit directement en face de ces surfaces, ou si c'est le cas, d'une seule surface à la fois.



Le F-117 Nighthawk, un avion d'attaque au sol furtif conçu par l'armée américaine pour avoir la signature radar la plus faible possible. Il est constitué de surfaces planes disposées de façon à ne jamais être en même temps face à un radar.

2 - Les matériaux

Après avoir étudié la géométrie à appliquer dans la conception d'un véhicule furtif, nous nous sommes intéressés aux différents matériaux à notre disposition et à leurs différentes propriétés.

Lors de notre expérience utilisant des faisceaux lumineux (voir Partie 1), après avoir testé les différents miroirs, nous avons aussi éclairé différents matériaux et mesuré l'intensité lumineuse diffusée à l'aide d'un luxmètre. Nous avons alors testé des feuilles de papier noir, blanche et colorée, puis des échantillons de mousses et de plastique. Malheureusement, avec les ondes lumineuses les résultats ne furent pas concluants : comme on pouvait s'y attendre, l'intensité lumineuse diffusée ne changeait pas entre différents matériaux de même couleur, mais uniquement lors du changement de couleur (les matériaux plus clairs, voire blancs, diffusent une grande partie du faisceau tandis que les matériaux les plus sombres, voire noirs, l'absorbent).

Après plusieurs recherches sur internet et notre conversation avec M. Barbier, nous savons que certains matériaux réfléchissent mieux les ondes électromagnétiques, en fonction de leur constante diélectrique. En particulier, il nous a présenté le bois, le plastique et le verre comme étant les plus perméables aux ondes radios et aux micro-ondes, utilisées par les radars, et les métaux comme étant les plus réfléchissants. Nous nous étions d'ailleurs servis de ses explications pour le choix de la plaque de métal dans l'expérience de la Partie 1.

De plus, il nous a fait part d'un problème récurrent dans le domaine de la mesure de niveau d'un liquide par radar: la formation de mousses lors de l'agitation dudit liquide. En effet, les mousses sont des amas de petites bulles d'air, qui forment des structures complexes qui ont la particularité de pouvoir absorber une partie des ondes radar. Elles font partie d'une famille de matériaux appelés RAM, soit Radar Absorbent Materials. Ceux-ci sont souvent utilisés dans la conception de véhicules furtifs dans l'armée, mais les plus efficaces sont chers et leur composition exacte est protégée, comme les matériaux "quart-d'onde" qui réfléchissent l'onde de manière légèrement décalée. Ils sont pour la plupart composés de structures microscopiques qui absorbent les ondes électromagnétiques, un peu à la manière des isolants phoniques pour les ondes sonores.

Nous avons donc mené plusieurs essais avec plusieurs matériaux, et plusieurs mousses, pour établir lesquels sont les plus absorbants et donc propices à la conception d'un véhicule furtif.

Expérimentation :

Nous avons utilisé le montage de la 2^{ème} expérimentation de la partie 1, avec le radar de mesure de niveau VEGA 50 Pulse, pour ces tests. Comme nous avons observé dans la première partie que l'angle de la surface à détecter par rapport au faisceau du radar modifiait considérablement l'intensité de l'onde renvoyée, nous avons effectué tous nos essais perpendiculairement au faisceau, à environ 60 cm. Les matériaux que nous avons testés sont les suivants:

- Plastique
- Matériau composite proche du plastique
- Bois
- Mousses de différentes densités

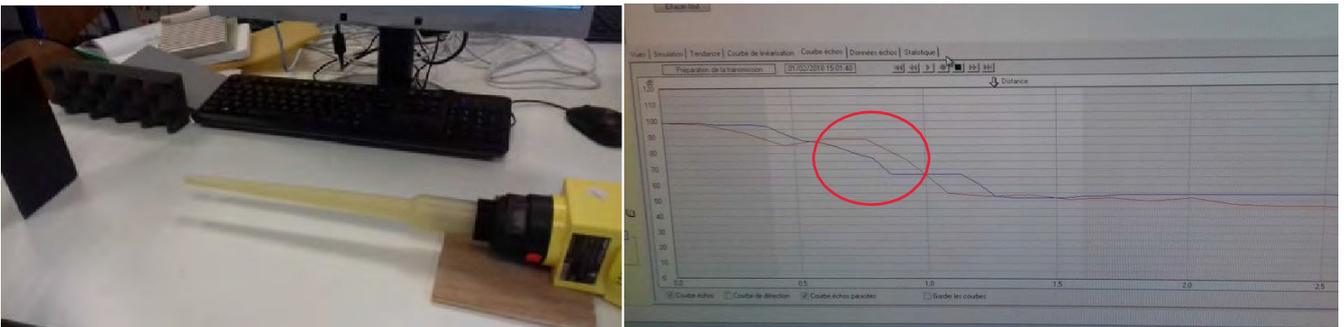
- Le premier matériau que nous avons testé est le plastique. Après la mesure, on peut observer sur le logiciel un pic sur la courbe des échos reçus (rouge), qui dépasse la courbe des échos parasites (bleue) à environ 60cm. Même si le pic n'est pas aussi haut que celui du métal, la plaque de plastique a été détectée.

P



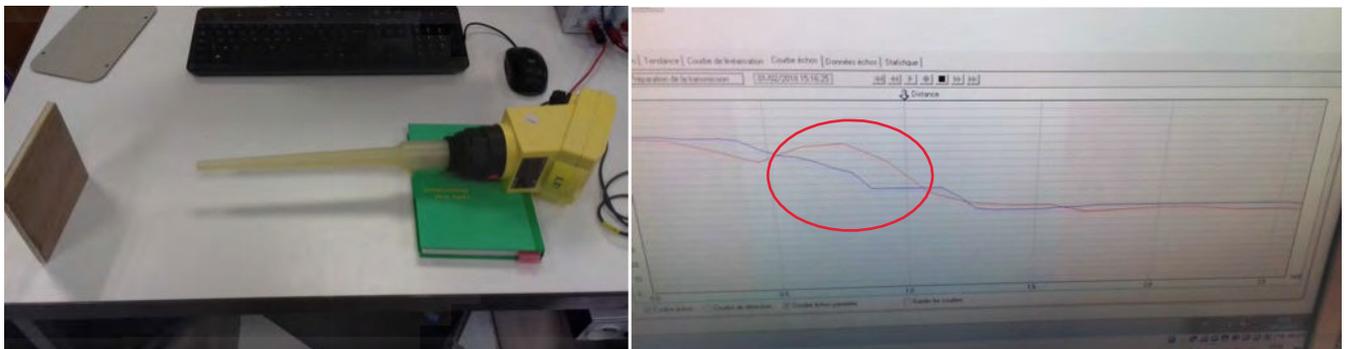
photographies du montage avec le matériau composite, et des courbes.

- Le second matériau sur le banc d'essais est le matériau composite, proche du plastique. Sur les courbes rapportées par le radar, on observe le même pic que pour le plastique, mais légèrement plus faible. La courbe des échos reçus dépasse toujours la courbe des échos parasites, et la plaque a donc été détectée.



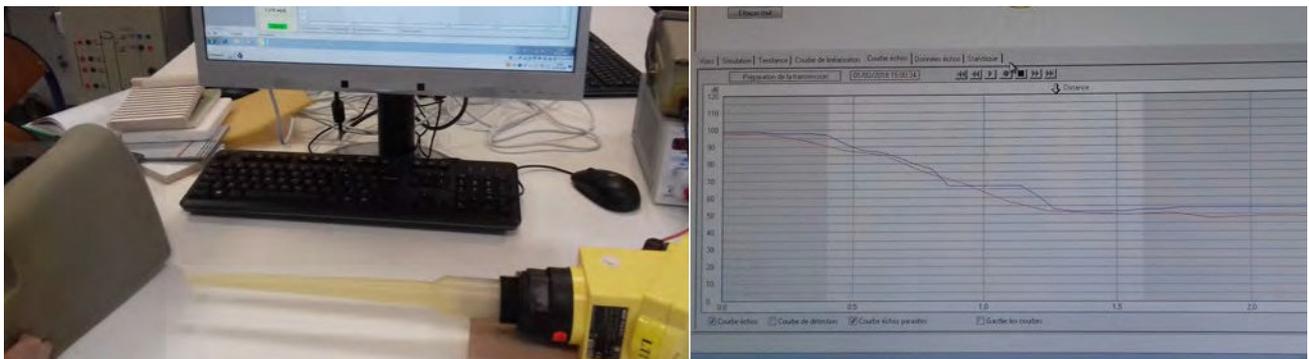
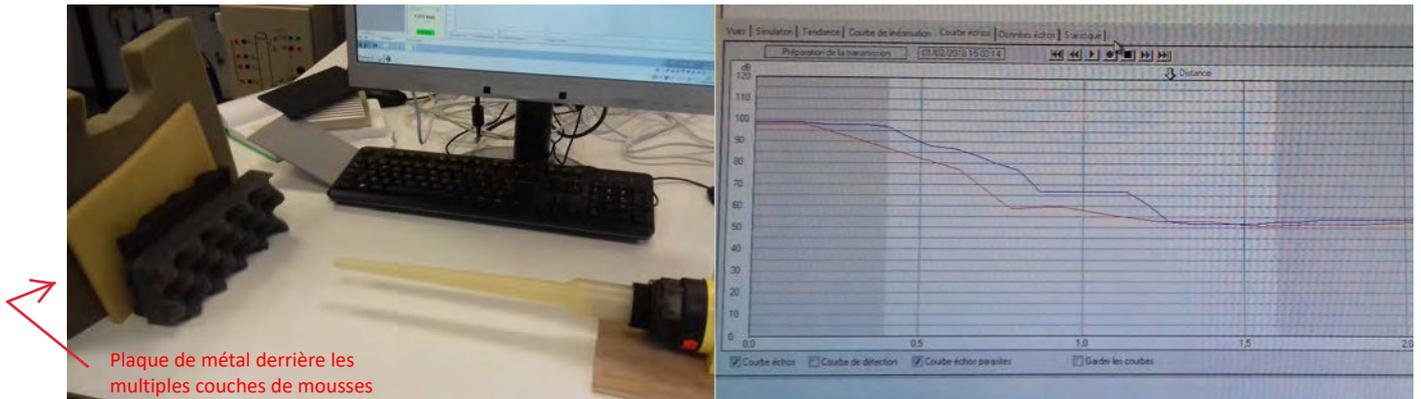
Photographies du montage avec le plastique, et des courbes.

- Dans le cas du troisième matériau, le bois, on observe sur les courbes du logiciel, un pic à 60cm plus important que ceux du plastique et du composite. Il reste tout de même plus faible que celui du métal. On peut donc conclure que le bois est plus facilement détecté par le radar que les deux précédents matériaux, mais moins que la plaque de métal.



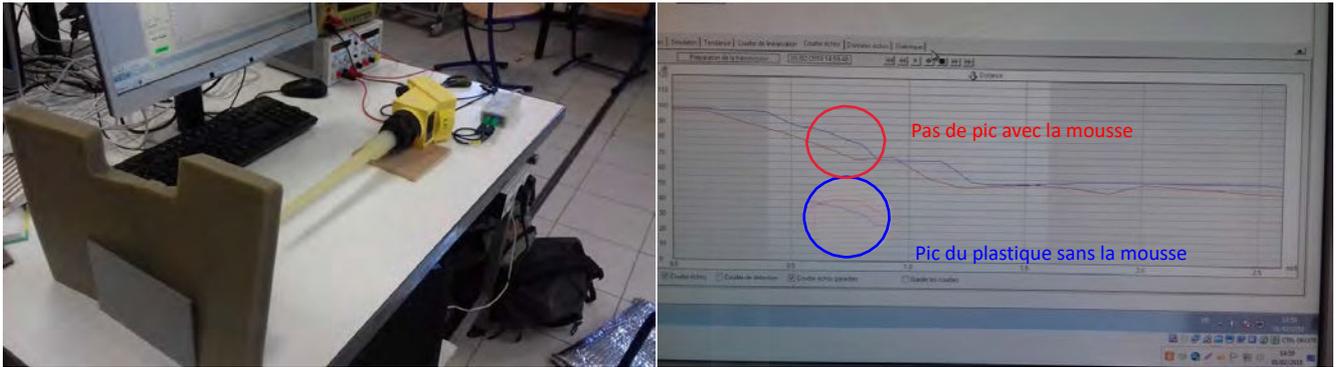
Photographies du montage avec le bois, et des courbes.

- Enfin, nous avons réalisé plusieurs essais sur les mousses: tout d'abord, nous avons testé la réflexion des ondes radars sur chacune des mousses séparément. Au total, nous avons pu tester 4 mousses solides, listées dans l'ordre croissant en fonction de l'intensité de l'onde réfléchie: une mousse acoustique légère, du polystyrène expansé, et deux mousses plus denses. Même si certaines mousses étaient donc plus réfléchissantes que d'autres, la courbe des échos reçus n'a jamais dépassé celle des échos parasites et donc aucune mousse n'a été détectée par le radar.



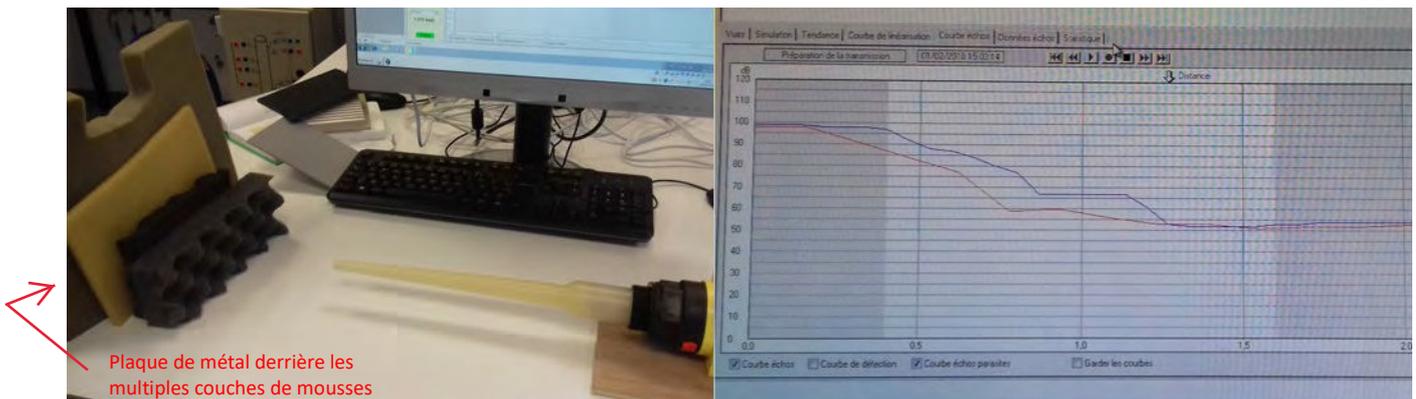
Photographies du montage avec la mousse dense, pliée pour augmenter l'épaisseur, et des courbes.

- Nous avons donc pu constater que toutes ces mousses ne réfléchissaient quasiment pas les ondes radar émises. Cependant, nous pouvons nous demander si celles-ci traversent la mousse ou si elles sont absorbées. Pour répondre à cette question, nous avons placé la plaque de plastique utilisée précédemment, et nous avons placé une couche de mousse la séparant du radar.



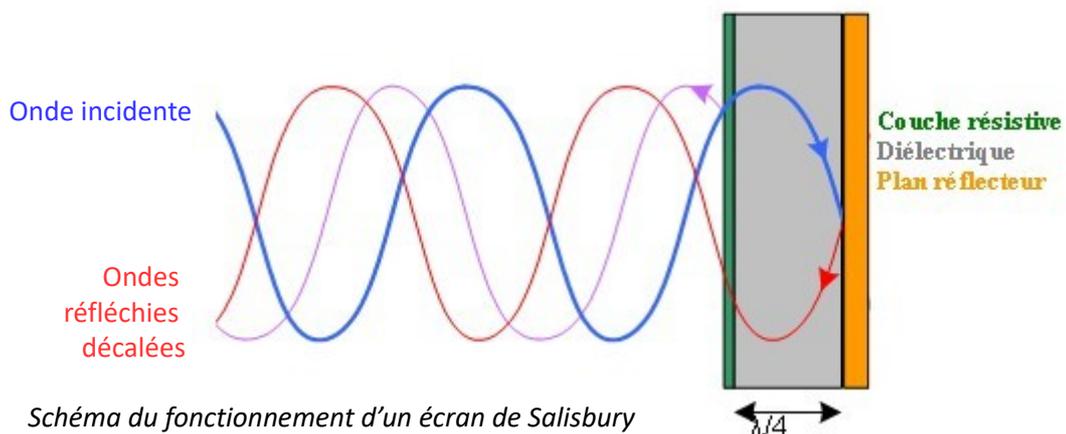
Photographies du montage avec la mousse dense devant la plaque de plastique, et des courbes avec une comparaison sans la mousse.

- Dans cette situation, on peut voir sur le logiciel que le pic de la courbe rouge observé avec la plaque de plastique seule a complètement disparu. On peut donc affirmer que la mousse a absorbé la partie de l'onde qu'elle n'a pas renvoyée.
- Afin de pousser cette expérience plus loin, nous avons alors tenté de dissimuler au radar la plaque de métal qui, ayant une constante diélectrique bien plus grande que le plastique, réfléchissait tout le faisceau. Pour cela, nous avons utilisé plusieurs couches de mousses successives avant d'atteindre notre objectif. Finalement, nous avons réussi à faire complètement disparaître le pic sur la courbe des échos reçus.



Photographies du montage avec la plaque de métal derrière plusieurs couches de mousses, et des courbes.

On peut donc conclure qu'il est possible de dissimuler entièrement un objet / véhicule à un radar en utilisant une couche de matériau absorbant tel que des mousses ou des peintures absorbantes dans le cas des avions furtifs de l'armée. Un exemple de revêtement furtif utilisé dans l'armée est celui de l'écran de Salisbury. Celui-ci est composé de deux couches espacées d'une longueur égale au quart de la longueur d'onde du rayon incident et permet l'annulation de l'onde incidente. Ce procédé est très efficace pour une longueur d'onde précise, mais ne fonctionne plus après un léger changement de fréquence.

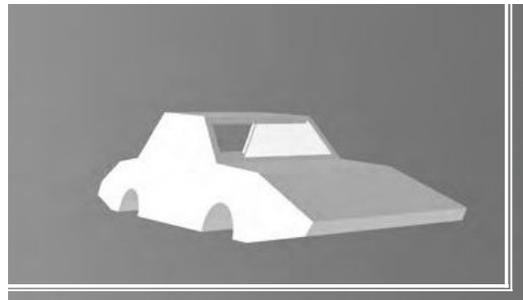


Synthèse

Après notre travail de recherche, nous avons donc dégagé **3 solutions** envisageables pour rendre un véhicule furtif aux ondes radar :

- La première serait de concevoir un véhicule avec des **surfaces très réfléchissantes**, en matériau à haute constante diélectrique comme du métal, et de travailler les formes extérieures de sorte qu'elles soient **planes, sans arrondis ni aspérités**. De cette façon, les ondes émises par le radar sont renvoyées dans des directions précises. Il faudrait donc disposer ces surfaces de façon à ce que le radar ne se retrouve jamais exactement en face et que par conséquent tous les rayons lui soient réfléchis.
- La deuxième serait de recouvrir le véhicule de **matériaux absorbants** comme des mousses. Cette solution, quoique peu esthétique et assez onéreuse, permet de se soustraire à la « vue » du radar peu importe sa position.
- La dernière serait une **combinaison des deux**. C'est la solution la plus complexe à mettre en place mais c'est aussi la plus efficace : elle permet d'absorber une grande partie des ondes émises par le radar, et dans le même temps de prévenir le retour de celles qui sont tout de même réfléchies. C'est aussi celle employée dans l'armée car elle permet un bon compromis entre les avantages des deux solutions, tout en gardant un prix « raisonnable ».

Afin d'essayer l'une de ces solutions, nous avons conçu un prototype de voiture furtive sur SolidWorks, composées de surfaces planes et sans aspérités, puis nous l'avons imprimée en 3D (*ci-contre*).



Fregate Fremm 01

Suite à notre maquette que nous avons construite à partir des conclusions tirées de nos recherches, nous pouvons voir une ressemblance au niveau des formes entre cette maquette et la frégate furtive, nous pouvons en déduire que la frégate est contruite selon les même principe que l'on a vu durant nos recherches.

II. Quels sont les enjeux de la furtivité dans le cadre de la Défense nationale ?

Après avoir récapitulé les différents procédés permettant de rendre un véhicule furtif aux ondes radar, nous nous sommes demandés si ces différentes techniques étaient ou non un enjeu de la Défense Nationale, et dans quelle mesure. Pour répondre à cette question, nous avons eu la chance et le plaisir de discuter avec le Commandant Jean-François BOYER, Chef section ARS, lors d'une rencontre organisée par le Colonel Arnaud BOURGUIGNON. Le commandant s'occupe de la surveillance de l'espace aérien français, à l'aide de radars positionnés à travers la France, et est donc bien placé pour répondre à nos questions. Tout d'abord, il nous a expliqué que, les États-Unis étant la seule nation à posséder des avions totalement furtifs, ceux-ci ne représentent pas une menace directe à court et moyen terme. Cependant il faut tout de même garder à l'esprit que ces technologies existent et ne pas les négliger dans le cas où une autre nation viendrait à les maîtriser. Dans le cadre de la Défense aérienne, l'hypothèse d'une attaque par avion furtif sur le territoire français est très improbable et négligeable.

Sur le plan offensif, l'armée française ne produit ni n'utilise pas d'avions totalement furtifs tels que le B-2 ou le F-117 américains. Ceci s'explique par plusieurs raisons : le coût élevé d'un avion furtif (2.2 milliards de \$ pour un B-2, contre environ 70M€ pour un Dassault Rafale) pour un rôle limité (bombarder sans être détecté et effectuer des observations en territoire ennemi), sa forme peu aérodynamique qui le rend moins polyvalent et plus énergivore, et son utilité réduite dans les guerres menées aujourd'hui par la France. En effet ces guerres sont asymétriques, c'est à dire que l'ennemi ne possède pas autant de technologies avancées que la France. Enfin, ces technologies ne sont pas forcément durables dans le temps, compte tenu des avancées constantes dans le domaine de la détection, et un avion furtif pourrait ne plus l'être dans dix ans.

Toutes ces conditions réunies font que la France préfère produire et utiliser des avions plus manœuvrables et polyvalents que des avions furtifs que l'on pourrait qualifier de « fer à repasser ». Cependant, les technologies de la furtivité sont appliquées sur les véhicules de l'armée lorsqu'elles ne le désavantagent pas et n'ont pas un coût trop important. Dans ce sens, les Rafale sont équipés de peinture absorbant les ondes électromagnétiques, et d'une verrière équipée d'une feuille d'or pour éviter les échos dans le cockpit. Si ces technologies ne permettent pas de dissimuler entièrement l'aéronef, elles peuvent réduire son empreinte radar et celui-ci peut être confondu avec un appareil de plus petite taille.

Enfin, ces technologies peuvent être mises en œuvre de manière plus significative dans le cas d'autres véhicules armés, tels que les frégates furtives de classe La Fayette (*ci-contre*). Ces embarcations sont conçues avec de grandes surfaces planes, en matériau composite absorbant les ondes radar et bon isolant thermique et sonore. Ces procédés ont pour but de rendre les frégates indétectables pour pouvoir jouer un rôle d'éclaireur et de se glisser dans le trafic maritime en quasi-impunité.



Frégate Surcouf de la Marine nationale française de classe La Fayette.

Conclusion

La furtivité radar est un thème dont on entend souvent parler dans les médias, mais qui est souvent mystifié et inconnu du grand public. Cependant, ce domaine n'est pas aussi complexe qu'il pourrait paraître. En effet nous avons pu, au cours de ce travail de recherche, dégager 2 différentes façons de rendre un véhicule furtif : travailler ses formes en utilisant des surfaces planes et sans aspérités, et utiliser des matériaux absorbant les ondes électromagnétique. Une combinaison de ces deux méthodes est utilisée dans l'armée pour rendre des véhicules totalement ou partiellement furtifs en réduisant sa SER.

Par la suite, nous nous sommes penchés sur les enjeux de cette technologie dans la Défense Nationale : il en ressort que celle ci n'est pas une menace importante pour notre pays, les États-Unis étant le seul pays possédant des avions furtifs. Parallèlement, la furtivité totale n'est pas recherchée dans l'aviation militaire française, qui opte pour la polyvalence et la manœuvrabilité de ses avions. Cependant, les avions/bateaux militaires français restent conçus en essayant de réduire leur signature radar, mais cette furtivité reste limitée.

Pour conclure, on peut dire que la furtivité n'est pas un enjeu principal de la Défense Nationale, même si elle n'est pas négligeable lors de la conception de véhicules aériens, terrestres ou marins, et lors de la surveillance radar du territoire : il ne faut pas oublier que des avions totalement furtifs aux ondes radar existent, et alors appuyer les dispositifs radar de détecteurs à ondes infrarouges, par exemple. D'un autre côté, il ne faut pas oublier le développement exponentiel des drones civils qui possèdent, eux aussi, une furtivité passive. En effet, leur petite taille leur permet de ne pas être détectés par les dispositifs de surveillance, et ils peuvent causer des dommages importants, notamment en cas d'attaque terroriste. En ce sens, ces appareils furtifs constituent un risque important pour la défense nationale. Mais la furtivité représente un enjeu industriel car certaines industries se sont spécialisées dans le domaine du radar comme Thalès, d'où provient certains radars installés sur le territoire français. Mais la furtivité possède également un enjeu technologique car développer des appareils furtifs entraîne par la même occasion la création d'appareil capable de détecter cet appareil et donc les industries comme Thalès sont constamment obligés d'innover ce qui fait avancer la technologie et fait vivre les industries.

Pour finir, nous tenons à remercier Mme GRANGEON et Mme LEVELLER, professeurs de Physique-Chimie et de Sciences de l'Ingénieur, pour nous avoir accompagnés dans nos travaux de recherche et d'expérimentation, puis M. Christophe BARBIER pour avoir accepté de prendre le temps de répondre à nos questions, ainsi que M. ROY, professeur de BTS CIRA, pour nous avoir permis de rencontrer M. BARBIER et pour nous avoir expliqué le fonctionnement du radar industriel. Enfin, nous remercions le commandant Jean-François BOYER, Chef section ARS, Centre de Détection et de Contrôle CDC 05.942, pour nous avoir reçus, ainsi que le Colonel Arnaud BOURGUIGNON, Commandant la Base Aérienne 942 "Capitaine Jean Robert" Lyon-Mont Verdun, pour avoir organisé cette rencontre.

Sources

- <https://fr.wikipedia.org/> et <https://en.wikipedia.org/>
- <https://www.futura-sciences.com/>
- <http://www.larousse.fr/>
- <http://w3.siemens.com/>
- <http://www.aeroweb-fr.net/>
- <http://www.obs-hp.fr/>
- <https://www.fr.endress.com/>
- CDI : magazines *Cosinus* et *Pour la science* ainsi que le document vidéo de *Universcience.tv*