



LA FURTIVITÉ DU

B-2 SPIRIT

PAR XAVIER LAURENT

Le B-2 Spirit n'a rien d'un avion ordinaire, sa forme futuriste et ses hautes performances font de lui un engin unique et mystérieux. Cependant, ce concept d'avion furtif n'est pas innovateur puisqu'il se base sur certains appareils qui ont vu le jour lors de la seconde guerre mondiale. Nous allons donc, à travers cet article, tout d'abord présenter les avions qui ont amené à la création du B-2, puis nous ferons une description de ce dernier en étudiant en particulier les systèmes et principes lui permettant de réduire sa signature radar.

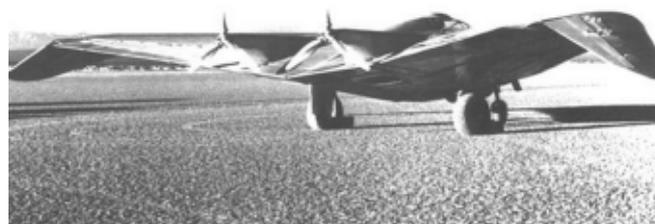
Bref historique

C'est un certain John Knudsen Northrop qui fut à l'origine de l'usine Northrop. Surnommé par la suite "Jack" Northrop, il a terminé ses études en 1913 avec un baccalauréat. Trois ans plus tard (à vingt ans), il travailla comme mécanicien automobile à Santa Barbara. Non loin de là, se trouvait un atelier où l'on dessinait des plans d'hydravions. Le jeune Northrop fut bien vite remarqué par le patron de l'atelier d'hydravion et intégra rapidement l'équipe ou il fut rebaptisé "ingénieur maison". C'est en 1927 que Jack concrétisa son premier projet, le célèbre Lockheed Vega. Ce fut une première mondiale: un monomoteur à aile haute non haubanée. Cet avion pouvait emporter quatre passagers à 170 km/h sur une distance de 900 kilomètres. Ces avantages firent de cet avion un des plus vendus de l'époque. Par la suite, Northrop fonda sa propre société.



Le Lockheed Vega est le premier succès de John Northrop. (SW)

La guerre se profilant, Jack décida de concevoir un avion plus performant, plus puissant et plus résistant dans le but de combattre de manière plus efficace les unités ennemies. Il s'intéressa particulièrement aux avions démunis de tout empennage et fuselage [appelés ailes volantes NDLR]. C'est ainsi qu'il conçut le N-1M.



Le N-1M, l'appareil a déjà la forme d'aile volante qui va tant fasciner John Northrop. (SW)

Cet avion présentait d'importantes innovations, il était construit en bois d'acajou et deux moteurs de 65 chevaux venaient propulser cette aile volante de douze mètres d'envergure. L'appareil était "à géométrie variable", le N-1M pouvait ainsi voir l'inclinaison de ses ailes (ci-dessus en position baissée) modifiées au sol.

La guerre accéléra les recherches et les machines virent leurs lignes s'affiner, comme le N-9M qui effectua une centaine de vols en 1943. Cette machine pouvait atteindre

400 km/h et monter jusqu'à 6000 mètres d'altitude. Les Américains voulurent pousser un projet de bombardiers à très long rayon d'action, afin d'être à même d'atteindre une cible depuis des positions éloignées. Ainsi naquit le premier élément du projet, l'YB-35 à quatre moteurs développant chacun trois mille chevaux.



En haut le N-9M. Ci-dessus, l'YB-35 propulsé par quatre moteurs de 3000 chevaux fait son premier vol en juin 1946. L'apparition du réacteur signe l'arrêt du projet. (SW)

Lors de la guerre, l'apparition d'une nouvelle technologie en matière de motorisation fut une évolution importante. Ainsi, le projet de l'YB-49 vit le jour en 1947. En réalité un YB-35 doté de huit turboréacteurs. A ce moment, les Américains découvrirent le concept de furtivité; à chaque fois que l'aile volante approchait de l'aérodrome constituant sa destination, les radars s'avéraient incapables de la détecter.



Ci-dessus, l'YB-49 propulsé par huit réacteurs représente la première aile volante furtive. L'avion vol pour la première fois en 1947. (SW)

En 1979, l'US Air force décida de se munir d'un bombardier stratégique invisible aux radars. L'aile volante s'imposa alors comme la solution la plus efficace et c'est ainsi que le fameux projet du B-2 Spirit prit naissance aux usines Northrop. L'US Air Force fut autorisé à commander 131 B-2,

mais des restrictions budgétaires répétées ont ramené les commandes à seulement 21 exemplaires.

Objet de nombreuses critiques tant techniques que politiques, le B-2 est l'avion le plus coûteux jamais construit. Il revient au final à environ deux milliards de dollars pièce.



Rarissime photographie d'une chaîne de montage des B-2. (Northrop)

Description du B-2

Le Grumman Northrop B-2 Spirit, plus communément appelé B-2, est l'un des avions les plus performants et les plus chers au monde, c'est un véritable bijou technologique, tant du point de vue de sa furtivité que du point de vue de son aérodynamisme. Il assure le rôle de bombardier stratégique à long rayon d'action avec une autonomie de 9 600 km et peut être ravitaillé en vol, ce qui lui permet alors de voler sur 16 000 km (il est donc capable de se rendre en n'importe quel point du globe à partir de sa base, au Missouri).

Il a été conçu dans le but de s'infiltrer au travers des zones ennemies afin de détruire des cibles bien précises, le tout sans être détectable. Ce genre de tâche pourrait être réalisée par d'autres bombardiers, mais cela demanderait une flotte beaucoup plus importante et les risques de pertes en vie humaine et matériels seraient beaucoup plus grands. Le B-2 surprend par sa forme insolite, résultant de l'utilisation du concept d'aile volante qui permet d'emporter une immense quantité de carburant tout en conservant un excellent aérodynamisme. L'aile volante était à l'époque incontrôlable et ce n'est que dans les années 70 que celle-ci fut maîtrisée, notamment grâce aux évolutions de l'informatique qui permirent de développer des calculateurs surpuissants. Ceux-ci peuvent piloter des gouvernes qui assurent la stabilité de l'appareil.

Le constructeur principal de l'avion est Northrop Grumman mais d'autres constructeurs sont venus apporter leur pierre à l'édifice. General Electric a fourni les réacteurs, Boeing et Vought Aircraft Industries sont intervenus dans la réalisation de base de l'aile et les radars ont été fournis par Hughes.

Avec ses 52,43 m d'envergure, ses 21,03 m de longueur, sa hauteur de 5,18 m pour une masse maximale de 170 550 kg, le B-2 se révèle être un avion imposant. Ses quatre réacteurs à double flux G-E F118 de 13 610 kg le propulsent à une vitesse maximale de 973 km/h et à une altitude maximale de 15 200 m. [La vitesse maximale du bombardier a été volontairement fixée à 973 km/h en effet, un appareil supersonique offre une cible infrarouge plus importante NDLR]

Chaque B-2 porte un nom particulier: "Spirit" suivi d'un état américain. Ils se retrouvent tous dans la même base de Whiteman dans le Missouri. Ils ont été conçus pour rester en service jusqu'en 2040 au moins, et plusieurs programmes de modernisation ont déjà été lancés afin que le B-2 reste le numéro un des avions furtifs. [Il y a quelques années, un programme visant à réduire le coût unitaire des B-2 à été lancé. Avec un coût unitaire de 2 milliards de dollars, le B-2 reste un appareil extrêmement cher à produire pour une USAF soumise aux coupes budgétaire. 21 appareils ont été produits et deux ce sont crashés. NDLR]



Ci-dessus, un crash à 2 milliards de dollars. 23 Juillet 2008 le B-2 n° 89-0127 Spirit of Kansas s'écrase suite à un problème technique. (USAF)

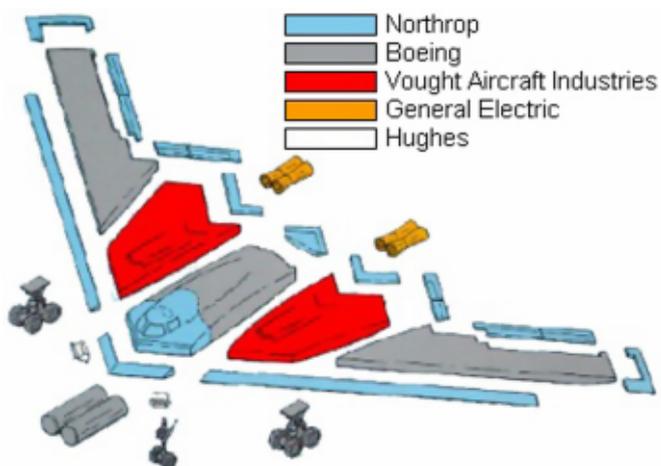
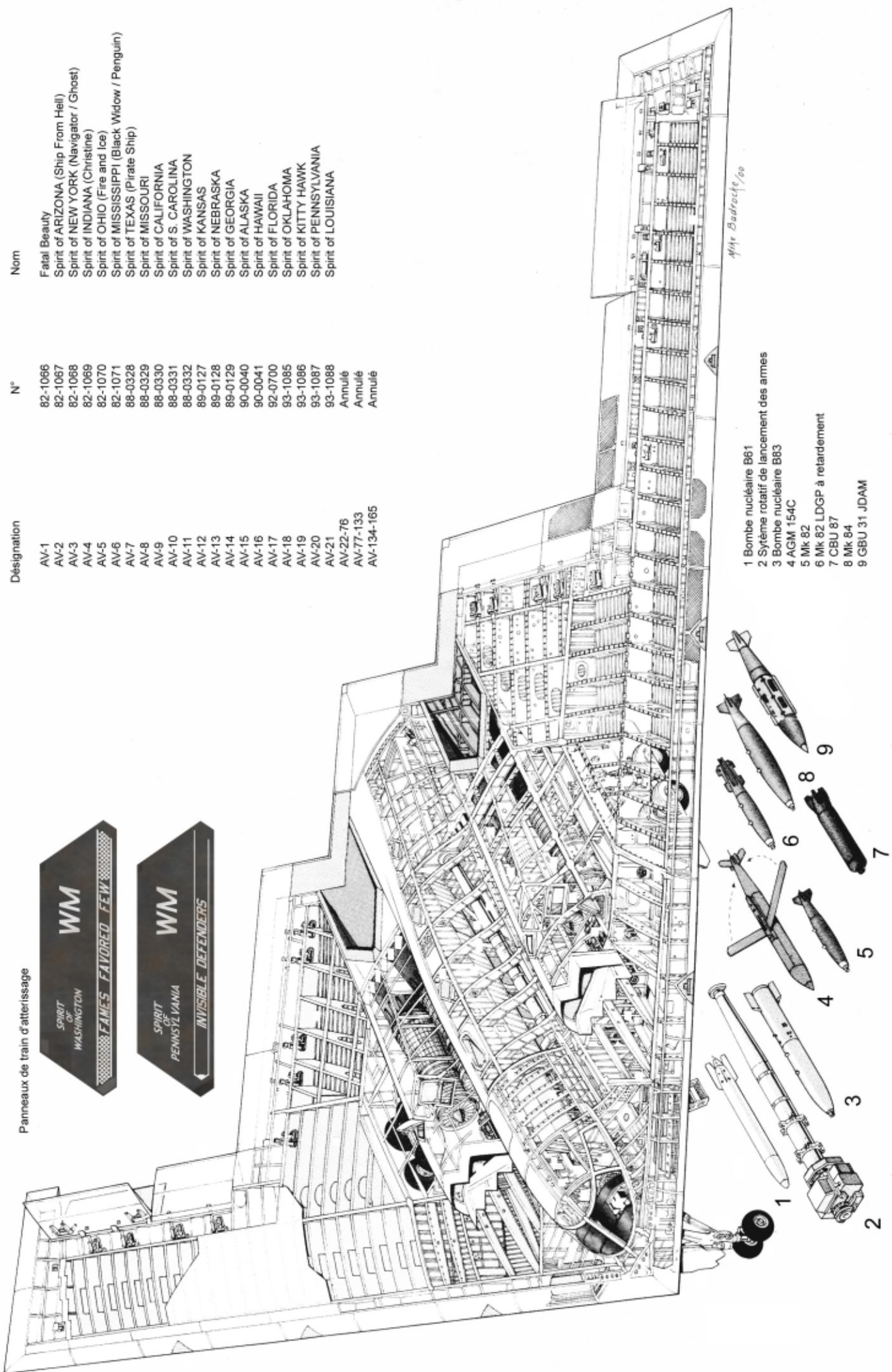


Schéma de la production des différentes parties du B-2 et de leurs constructeurs respectifs. (USAF)



Désignation

- AV-1
- AV-2
- AV-3
- AV-4
- AV-5
- AV-6
- AV-7
- AV-8
- AV-9
- AV-10
- AV-11
- AV-12
- AV-13
- AV-14
- AV-15
- AV-16
- AV-17
- AV-18
- AV-19
- AV-20
- AV-21
- AV-22-76
- AV-77-133
- Annulé
- Annulé
- Annulé
- AV-134-165

N°

- 82-1066
- 82-1067
- 82-1068
- 82-1069
- 82-1070
- 82-1071
- 88-0328
- 88-0329
- 88-0330
- 88-0331
- 88-0332
- 89-0127
- 89-0128
- 89-0129
- 90-0040
- 90-0041
- 92-0700
- 93-1085
- 93-1086
- 93-1087
- 93-1088
- Annulé
- Annulé
- Annulé

Nom

- Fatal Beauty
- Spirit of ARIZONA (Ship From Hell)
- Spirit of NEW YORK (Navigator / Ghost)
- Spirit of INDIANA (Christine)
- Spirit of OHIO (Fire and Ice)
- Spirit of MISSISSIPPI (Black Widow / Penguin)
- Spirit of TEXAS (Pirate Ship)
- Spirit of MISSOURI
- Spirit of CALIFORNIA
- Spirit of S. CAROLINA
- Spirit of WASHINGTON
- Spirit of KANSAS
- Spirit of NEBRASKA
- Spirit of GEORGIA
- Spirit of ALASKA
- Spirit of HAWAII
- Spirit of FLORIDA
- Spirit of OKLAHOMA
- Spirit of KITTY HAWK
- Spirit of PENNSYLVANIA
- Spirit of LOUISIANA

Panneaux de train d'atterrissage



- 1 Bombe nucléaire B61
- 2 Système rotatif de lancement des armes
- 3 Bombe nucléaire B83
- 4 AGM 154C
- 5 Mk 82
- 6 Mk 82 LDGP à retardement
- 7 CBU 87
- 8 Mk 84
- 9 GBU 31 JDAM

Techniques de réduction de la signature radar

Pour rendre un avion furtif, il faut s'assurer que ce dernier ne comporte pas de dièdres ou trièdres et pas de surface perpendiculaire à la direction du radar (comme les pales du réacteur par exemple). Les contraintes qui en résultent ne contribuent généralement pas à améliorer les performances de l'appareil. En effet, performance et furtivité sont rarement en harmonie, il faut donc toujours trouver un compromis.

Le B-2 est loin d'être l'avion le plus rapide avec sa vitesse de 973 km/h, mais il a l'avantage de présenter une SER (Section Efficace Radar) minimale, équivalente à un petit oiseau.

Pour détruire une onde qui viendrait frapper le fuselage de l'avion, il suffit de renvoyer une onde de même amplitude et fréquence, mais en opposition de phase avec la première. Cette méthode de destruction constitue ce qui est appelé un système actif.

Pour cela, il est nécessaire de construire un fuselage possédant des réflecteurs aux dimensions adéquates, créant ainsi un écho optimal pour l'anéantissement du faisceau radar. Mais cette méthode ne fonctionne que pour une seule fréquence et les dimensions des réflecteurs devraient être grandes, il est donc nécessaire de trouver un moyen plus réactif. Par exemple, des capteurs montés sur le fuselage de l'appareil qui pourraient mesurer la fréquence, la forme d'onde, la force et la direction du signal devant être contrée, constituant ainsi ce que l'on appelle un brouilleur radar.

Les concepteurs du B-2 ont mis au point un tel système grâce à une avionique sophistiquée. L'avion est muni d'un radar à synthèse d'ouverture (AN/APQ-181 de Hughes) comportant deux antennes à balayage électronique qui sont noyées dans le fuselage ainsi que d'un détecteur d'émission radar (AN/APR-50 de IBM Federal Systems) et d'un système de contre mesure (ZSR-63). Les caractéristiques et les performances de ce dispositif sont tenues secrètes par l'US Air Force, l'APR-50 fonctionnerait toutefois dans les bandes 500 MHz à 40 GHz. L'utilisation de cette méthode d'annulation active se situe plutôt dans le domaine des basses fréquences, où l'emploi des absorbants et les possibilités de jouer sur les formes géométriques deviennent plus difficiles.

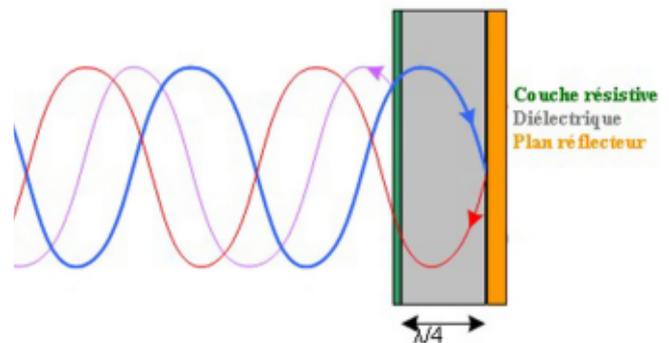
Absorption d'ondes

Certains types de matériaux permettent d'absorber des ondes radars, on les désigne généralement sous le nom de RAM (Radar Absorbent Materials). Ils sont largement utilisés par les avions furtifs et, sur le B-2, recouvrent la quasi-totalité du fuselage dont les parties sensibles font

l'objet d'attention particulière. Il existe deux catégories de RAM: l'une appelée absorbant résonnant et l'autre large bande. Les matériaux "résonnants" sont conçus pour travailler à une fréquence déterminée tandis que les matériaux "large bande" sont prévus pour agir dans toute une gamme de fréquence. La séparation entre ces deux concepts n'est toutefois pas formelle, en effet les matériaux résonnants peuvent aussi fonctionner sur des bandes de fréquences très grandes par association entre eux. L'un des plus anciens et des plus simples écrans absorbants est connu sous le nom d'écran de Salisbury; d'autres existent tel que les écrans à circuits analogiques et les RAM magnétiques.

Ecran de Salisbury

La technique "Salisbury" agit de la même manière que les systèmes anti-reflets omniprésents dans les systèmes optiques: lorsque l'énergie radar (en bleu sur le schéma) frappe un écran de Salisbury, une partie est immédiatement réfléchi (en violet) et l'autre traverse la première couche pour ensuite venir frapper la seconde et être réfléchi (en rouge).



Les deux faisceaux réfléchis doivent entrer en opposition de phase de manière à ce que la quantité totale d'énergie renvoyée par le matériau soit faible, voire nulle si les deux faisceaux réfléchis sont de même intensité.

Le matériau doit dès lors posséder deux propriétés: le faisceau incident doit, pour moitié, être directement réfléchi, et pour autre moitié être réfléchi par la surface orange. De plus, la distance entre les deux surfaces de réflexion doit avoisiner un quart de la longueur d'onde du faisceau radar émis. Ce système ne sera donc optimal que pour une longueur d'onde précise.

On parle de "l'écran Salisbury" ou de RAM résonnant. Cet écran se compose donc d'une fine épaisseur de matériau résistant (en vert), occasionnant la première réflexion, d'un diélectrique (en gris) valant un quart de la longueur d'onde du faisceau émis par le radar, et d'une surface métallique (en orange). Le matériau diélectrique a la propriété de résister aux courants électriques tout en laissant librement

Ravitaillement en vol pour ce B-2. Cette photographie nous permet d'avoir quelques détails intéressants de la structure avant de l'appareil. (USAF)



circuler les forces électromagnétiques ou électrostatiques, et se reconnaît par sa forme souvent en nid d'abeille. Pour mieux comprendre le fonctionnement de la couche résistive, il est important de définir la notion d'impédance intrinsèque Z du milieu de propagation des ondes électromagnétiques:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad [\Omega]$$

Où μ représente la perméabilité du milieu [H/m] et la permittivité du milieu [F/m].

Pour le vide et l'air, la valeur d'impédance est connue et vaut:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120 \cdot \pi \approx 377 \quad [\Omega]$$

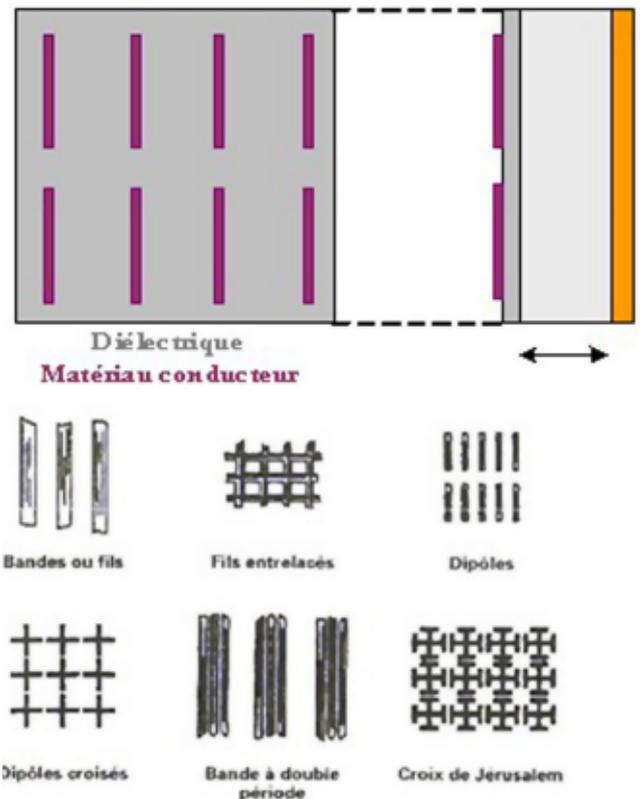
Où μ_0 représente la perméabilité du vide [H/m] et ε_0 la permittivité du vide [F/m].

Le métal, quant à lui, possède une impédance intrinsèque nulle. La couche résistive possède une impédance de surface identique à celle de l'air ($R_S = Z_0 = 377 \quad \Omega$), ce qui correspond à la condition d'égalité des amplitudes. En effet, rappelons que pour qu'il y ait extinction globale, il faut que les deux ondes réfléchies en opposition de phase aient la même amplitude.

La largeur de bande de l'écran de Salisbury peut être améliorée en construisant un absorbant multi-écrans, on l'appelle alors écran de Jaumann. Celui-ci peut compter jusqu'à six écrans ; malheureusement, l'épaisseur totale du matériau augmente de plusieurs centimètres, voire décimètres, ce qui est impensable dans le secteur aérien. En effet, l'avion serait d'une taille plus importante et nous savons que la SER est en fonction de la taille de la cible.

Ecran comportant des circuits analogiques

L'écran de Salisbury étant difficile à mettre en œuvre, il a fallu lui trouver un remplaçant. C'est là qu'intervient le circuit analogique qui va permettre d'obtenir les mêmes propriétés, simplement en remplaçant la feuille résistive par une couche de diélectrique sur laquelle est disposé un matériau conducteur. Les formes des conducteurs utilisés peuvent être bidimensionnelles (lignes,...) ou tridimensionnelles (croix de Jérusalem,...) comme présenté en haut de la colonne ci-contre. Ces derniers ont l'avantage d'être insensibles au type de polarisation.

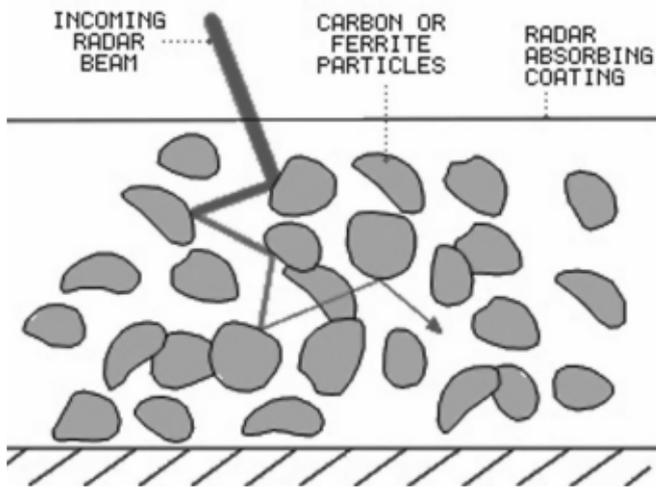


La raison principale de l'emploi de feuilles à circuits analogiques par rapport aux feuilles résistives est l'obtention de bandes de fonctionnement plus larges. Il est même possible de créer un RAM large bande en y ajoutant un matériau plastique chargé de carbone à une base en polyuréthane. Plus le matériau est épais, plus il absorbera. En effet, le "Plessey's ADRAM" offre d'excellentes performances à grands angles d'incidence. Lorsque son épaisseur se situe entre 1 et 4 mm, l'absorption minimale respective est de 6 dB entre 6 et 35 GHz, et plus de 20 dB entre 10 et 12 GHz.

RAM magnétique

A l'inverse des techniques électriques étudiées jusqu'à présent où l'on place une couche résistive à une certaine distance du plan réflecteur, les techniques magnétiques ne sont efficaces que lorsque cette distance est nulle. En effet, le RAM magnétique doit pouvoir absorber l'onde sans la réfléchir mais en dissipant son énergie sous forme de chaleur. Le RAM magnétique (voir ci-dessous) est constitué par des matériaux alliant métal et carbone tels la ferrite, le cobalt, le nickel ou le fer carbonyle. Il a donc tendance à oxyder, ceci diminuant son efficacité. Lorsqu'il atteint des températures supérieures à 500 °C, cette dégradation augmente encore.

Mis à part ce désavantage, la très fine épaisseur de cette technique est une réelle innovation, d'autant plus que ce RAM reste efficace sous la barre du gigahertz (un écran de Salisbury travaillant à 100 MHz devrait avoir une épaisseur



de 75 cm et un absorbant diélectrique devrait être épais de plusieurs centimètres). Un RAM magnétique opérant à la même fréquence qu'un diélectrique présente une épaisseur dix fois moindre. Chaque RAM magnétique possède sa zone d'absorption en fréquence et on augmente celle-ci via superposition de plusieurs RAM.

Signalons enfin que les RAM magnétiques sont plus efficaces à basses fréquences, tandis que les diélectriques le sont à hautes fréquences. La combinaison des deux permet d'obtenir un RAM multi-couches capable de couvrir une très large gamme de fréquences.



Voici peut être la phase d'installation des différents revêtements furtifs du bombardier. Toutefois, nous ne pouvons l'affirmer par manque d'information au sujet de cette photographie. (Northrop)

Application sur le B-2

Les matériaux RAM sont abondamment utilisés, tout d'abord sur l'ensemble du fuselage du B-2, mais également sur les organes réputés pour offrir une grande SER. Parmi ceux-ci, les entrées d'air des réacteurs ainsi que les bords d'attaques et chaque "pointe" constituée par les dents de scie des bords de fuite.

Environ 80 % de la masse du B-2 fait usage de matériaux composites absorbants radars "RAS " avec du graphite /

époxyde en nid d'abeilles (réalisés par la filiale américaine de l'entreprise française Saint-Gobain). La résine d'époxyde étant un isolant. La structure de l'avion conduit mal l'électricité et donc l'énergie radar arrivant sur cette structure a beaucoup de mal à induire un courant électrique et magnétique, ce qui diminue d'autant plus la réflectivité du B-2.

Un des points faibles de cet avion est la fragilité de son revêtement antiradar, qui lui interdit de stationner à l'extérieur des hangars trop longtemps. La maintenance courante a été longtemps impossible en dehors de la base de Whiteman à cause des soutiens logistiques très spécifiques qu'il nécessitait et qui n'étaient disponibles que sur cette base. Et cela jusqu'à la création d'hangars démontables et la construction des bases de Guam dans l'Océan Pacifique, de Diego Garcia dans l'Océan Indien et celle de la RAF de Fairford en Angleterre. Les hangars démontables et pressurisés connus sous le nom de "B-2 Shelter System [B2SS]" ont été créés pour surmonter cette difficulté à partir de 1999 ; ils coûtent entre 2 et 2,5 millions de dollars pièce et nécessitent 29 sorties d'avion C-130 pour leur transport.

Sa lourde maintenance fait que seule la moitié de la flotte de B-2 peut être utilisée au même moment en opération. Des améliorations portant sur le revêtement furtif du B-2 afin de le rendre plus résistant à l'humidité et nécessitant une maintenance allégée, notamment grâce à un système de diagnostic des revêtements furtifs, sont actuellement en cours.



Un B-2 largue ses bombes Mk 82 dans l'océan pacifique. La photographie date de 1994. (USAF)

Deux bombardiers B-2 du 509th Bomb Wing. Seulement quatre bases aériennes dans le monde peuvent accueillir le bombardier furtif américain. Whiteman au Missouri a été la première spécialement aménagée. (Northrop)

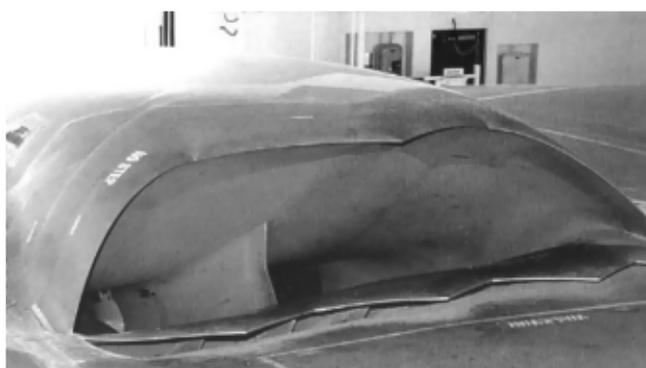


Nous allons maintenant étudier l'influence qu'a la géométrie de l'avion sur sa SER. Les entrées d'airs et le système de propulsion sont connus pour leur haute contribution dans la SER totale. C'est pourquoi nous traiterons des techniques qu'utilise le B-2 pour dissimuler le moteur et pour augmenter la discrétion des entrées d'air. Nous traiterons ensuite des solutions apportées aux détails, souvent négligés, mais contribuant également à réduire la SER de l'appareil.

Système de propulsion

Le B-2 est équipé de 4 réacteurs General Electric F118-Ge-100 dépourvus de post-combustion, chacun de 78.47 kN de poussée. Le F118 est dérivé du F101 actuellement utilisé sur le bombardier B-1. Alors que le F118 utilise plus de carburant à vitesse subsonique, il nécessite moins d'air que le F101. Le choix de moteurs sans post combustion n'est pas anodin, en effet ceux-ci sont plus petits, ce qui permet de réduire leur espace alloué sous le fuselage mais également de diminuer la signature infrarouge de l'appareil. Ces réacteurs sont regroupés deux à deux, côte à côte. Il y a deux prises d'air avec au centre de chacune une cloison séparant les flux destinés à chaque turboréacteur. Plusieurs paramètres sont à prendre en considération pour le système de propulsion, à savoir la position des moteurs,

les entrées d'air et l'utilisation de matériaux absorbant radar.



Photographie d'une entrée d'air. La cloison de séparation ainsi que la forme en "S" sont ici bien visible. (USAF)

Position des moteurs

Les réacteurs sont probablement les organes les plus révélateurs de la présence d'un avion, tant sur plan infrarouge que radar. Le B-2 étant un bombardier de haute altitude, il sera surtout observé par le bas, c'est pourquoi les organes de propulsion sont positionnés sur le haut du fuselage. Toutefois, l'alimentation en air devient difficile à hauts angles d'incidences (c'est-à-dire au décollage et à l'atterrissage), phases au cours desquelles le pilote doit pouvoir disposer d'un maximum de poussée. Cette forte

diminution de l'alimentation du compresseur en air est compensée par deux trappes, disposées au-dessus de chaque moteur, qui augmentent la quantité d'air capable d'être aspirée. Une fois l'angle d'incidence diminué, ces trappes se referment, offrant à nouveau une signature radar discrète.



Ci-dessus, les trappes d'entrées d'air situées au-dessus des réacteurs sont ici bien visibles. (Northrop)

Les entrées d'air

Si les entrées d'air sont indispensables pour le bon fonctionnement de la propulsion de l'appareil, elles constituent également une grande source d'écho radar. Ceci suite au fait que les ondes radar pénétrant par les prises d'air rejoignent les pales des compresseurs des moteurs et se réfléchissent sur celles-ci.

La détermination de la SER d'une telle cavité rentrante est complexe et dépend de son contenu. Cependant, la visibilité du moteur est avant tout fonction de la fréquence d'émission du radar. Trois régimes électromagnétiques sont à distinguer, dépendant du rapport entre la longueur d'onde et la dimension caractéristique de la première roue mobile du compresseur.

- Aux basses fréquences, et pour des longueurs d'onde qui sont supérieures aux dimensions transversales de la section de l'entrée d'air, la tubulure d'alimentation agit comme un filtre passe-haut avec une fréquence de coupure qui se situe approximativement en bande L (c'est-à-dire de 1 à 2 GHz) ou en dessous. Les ondes émises par le radar se réfléchissent sur l'entrée d'air et le moteur ne contribue pas à la signature de l'avion.

- Aux fréquences intermédiaires (bandes C ou X, de 4 à 12 GHz), les ondes se propagent dans l'entrée d'air et se diffractent ensuite sur les aubes directrices du compresseur. Celles-ci agissent comme un filtre passe-haut dont la caractéristique de coupure est plus haute en fréquence. Cet effet peut augmenter considérablement lorsque les fréquences émises franchissent la fréquence de coupure

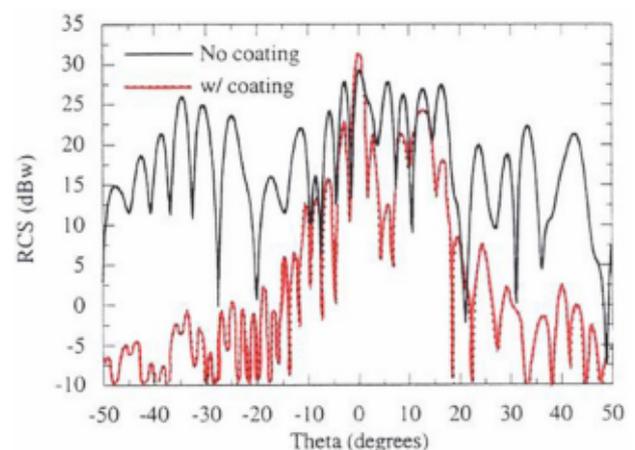
(effet tunnel électromagnétique).

- Aux fréquences élevées, les ondes se propagent à travers la roue directrice d'entrée puis se diffractent (avec effet Doppler) sur la première roue mobile. Le moteur possède alors une signature propre qui se caractérise par des raies de modulation (dues à l'effet Doppler). Le traitement du signal reçu permet alors de compter le nombre d'aubes des roues mobiles du compresseur, de chercher à identifier le type d'avion, et donc l'armement susceptible d'être emporté. On parle alors de "JEM" ou Jet Engine Modulation. Les réacteurs, lorsqu'on regarde l'avion de face, contribuent à la SER statique de l'avion mais possèdent également une SER dynamique dont l'origine est l'interaction des ondes électromagnétiques avec les différentes roues mobiles du compresseur. Cette signature dynamique est en général du même ordre de grandeur que la signature statique et peut même lui être supérieure.

On voit donc l'importance de camoufler ces réacteurs. Sur le B-2, les ingénieurs ont principalement utilisé deux techniques: l'utilisation de RAM sur les parois des entrées d'airs ainsi que des diffuseurs en forme de "S".

Utilisation de RAM dans les entrées d'air

Cette technique consiste à recouvrir l'intérieur de la manche à air avec une couche de RAM de sorte que les multiples réflexions d'ondes radar soient absorbées ou atténuées. Le graphique de la Figure ci-dessous nous permet d'observer la variation de SER d'une entrée d'air droite en fonction de l'angle d'incidence sous lequel le radar l'observe. Cet angle va de -50° (illumination de type "sol-air", où le radar illumine la cavité du dessous) jusqu'à 50° . Cette cavité a été observée avec et sans RAM (w/coating et No coating).



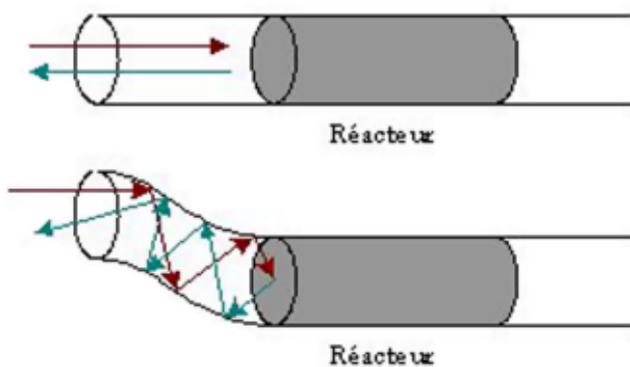
Cette entrée d'air étant droite, la différence entre -10° et 10° est quasi nulle (les réflexions sur les parois sont quasi inexistantes pour de tels angles d'illumination). Par contre, pour de plus grands angles, la différence devient très

importante. Une manière élégante de tirer profit au maximum de cette technique est d'utiliser des entrées d'air en "S", ce qui oblige toutes les ondes radar à se réfléchir plusieurs fois contre les parois.

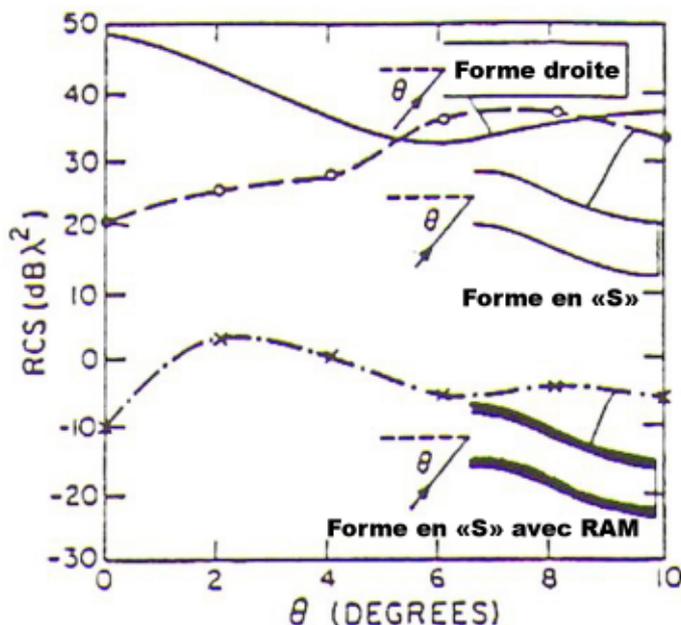
Les diffuseurs en forme de "S"

Le B-2 présente, en plus de l'installation de RAM dans la manche à air, des tuyères d'entrée d'air en forme de "S", permettant de piéger l'énergie émise par un radar en évitant qu'elle ne retourne vers ce dernier. De plus, ce diffuseur empêche l'observation des pales du compresseur lorsque l'on regarde l'avion de face ce qui, connaissant la haute réflectivité de ce dernier, est un avantage certain.

Nous observons, à la figure ci-dessous, que l'onde réfléchi par le diffuseur en "S" rebondit plusieurs fois sur les parois. Ces parois étant recouvertes de RAM, l'énergie radar réfléchi diminue de manière importante.



Le schéma suivant nous montre une comparaison des SER d'une entrée droite, d'une entrée en forme de "S" et d'une entrée en "S" recouverte de RAM. Les mesures effectuées pour ce graphique ont été réalisées de 0 à 10° d'inclinaison, c'est-à-dire les vues qui offrent la plus grande SER, comme nous l'avons observé plus haut.



Verrière du cockpit traitée

Le cockpit du B-2 présente une verrière de grande taille, constituant une cavité parfaite. Il est donc primordial de la rendre imperméable aux ondes radars. Pour cela, l'introduction d'une fine pellicule d'or ainsi que d'indium dans la verrière et, grâce à l'effet de peau des micro-ondes, permet de créer un obstacle aux ondes radar tout en garantissant une excellente visibilité au pilote. En effet, le radar détectera cette surface comme étant un conducteur électrique et non pas comme étant transparente.

Les discontinuités du fuselage

Nous avons vu précédemment que le phénomène d'ondes rampantes apparaissait lorsqu'une onde radar vient frapper le fuselage de l'avion avec un faible angle d'incidence. Ce cas se présente fréquemment, notamment lorsqu'un avion ennemi essaye de détecter le B-2 volant à peu près à même altitude. Ces ondes rampantes, lorsqu'elles rencontrent une discontinuité, retournent dans la direction du radar augmentant ainsi la SER de l'appareil. Il est donc primordial de diminuer au maximum le nombre de discontinuité même si ces ondes rampantes en rencontreront toujours une, tel que les bouts de l'aile.

Les soutes pour l'armement

Les bombes et missiles présents généralement sous les ailes des avions militaires possèdent des géométries complexes et des matériaux métalliques augmentant considérablement la SER totale de l'appareil. Les ingénieurs du B-2 ont donc décidé de cacher cet armement dans le fuselage même. Cependant, le recours aux RAM et aux formes géométriques en dents de scie devront être nécessaires de manière à empêcher le B-2 de devenir visible aux radars lors de l'ouverture des trappes. Cela implique également l'utilisation de munitions furtives, afin de ne pas trahir la position de l'appareil au moment du largage. Le lancement des missiles se réalise au moyen d'un système rotatif permettant de larguer rapidement un grand nombre de munitions tout en gagnant un maximum d'espace dans le fuselage.

Les rivets, prises statiques et jointures

De petites cavités sont omniprésentes sur un avion et sont souvent négligées. Parmi celles-ci, citons les espaces entre chaque panneau du fuselage ou encore les prises d'airs, les rivets et autres fixations externes. Bien qu'ils semblent insignifiants pris séparément, ces éléments contribuent

Fixation d'une bombe sur le système rotatif d'un B-2 du 509th Bomb Wing. Pour assurer la furtivité de l'armement, celui-ci est intégré dans deux soutes à bombes dont les panneaux d'ouverture ont été étudiés pour ne pas révéler la position de l'appareil au moment du largage. (USAF)

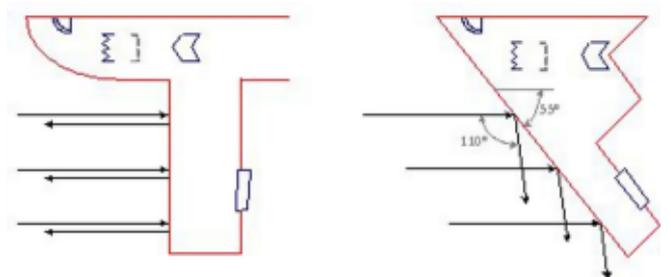


dans leur ensemble à la signature radar de l'appareil. Chaque détail a son importance et c'est ainsi que le B-2 n'utilise aucun rivet mais les composés devant être assemblés sont soudés ou collés. Les panneaux du fuselage sont assemblés via de la ferrite, utilisée comme lien électrique.

La flèche des ailes

Le bord d'attaque de l'avion peut également être un réflecteur d'ondes pour un faisceau incident arrivant face à l'appareil. Les ondes réfléchies présentent un angle par rapport aux ondes incidentes égal à deux fois l'angle de flèche des ailes. Il est donc intéressant d'augmenter cet angle de flèche afin de diminuer la quantité d'énergie radar renvoyée vers la source émettrice comme nous le montre le schéma ci-dessous. Le B-2 utilise un bord d'attaque avec un angle de flèche de 55° , suffisant pour rediriger significativement l'énergie radar dans une direction éloignée de la source d'émission. Cependant, l'objectif principal de la flèche est d'origine aérodynamique. Le B-2 volant à une vitesse haut subsonique (c'est-à-dire légèrement inférieur à la vitesse du son), cet angle de flèche est requis pour éviter une vitesse supersonique locale, notamment au niveau de l'extrados, qui provoquerait des ondes de chocs, fatales à la furtivité du B-2. Cependant, lorsque l'avion diminue

d'altitude en survolant la mer ce phénomène peut apparaître et s'accompagner d'une condensation locale (l'atmosphère étant humide), ce qui permet de visualiser l'onde de choc sous la forme de nuage. Le nuage est dû au phénomène appelé "singularité de Prandtl-Glauert", pour laquelle une baisse soudaine de la pression de l'air se produit. Le pilote doit donc toujours rester vigilant et ne pas utiliser les moteurs à pleine puissance dans toutes les situations.



Malgré cela, une aile munie d'une flèche vers l'arrière présente des désavantages. Ainsi, pour une même vitesse de vol et une même surface, une aile avec une flèche arrière produira une portance moins importante que pour une aile droite. Cela explique l'imposante envergure du B-2 qui, pour être performant, doit pouvoir emporter de lourds armements ainsi qu'un volume de kérosène important, ce qui tend à augmenter significativement son poids et donc la portance doit être d'autant plus grande.

Absence de surface verticale

Les surfaces verticales présentes sur la plupart des avions contribuent de manière importante à leurs signatures radars. Deux gouvernes formant un angle de 90° provoquent une double réflexion des ondes radars, en les renvoyant vers la source émettrice.

Le B-2 est une aile volante qui ne présente donc aucun empennage vertical. C'est un avion présentant une allure plate, le rendant peu maniable. Les dernières technologies en matière d'électronique ont permis de réaliser un tel projet. En manipulant les seules gouvernes présentes sur les bords de fuite de l'avion, il est possible de piloter entièrement l'appareil. Seules des surfaces courbes sont visibles sur le dessus de l'avion. Celles-ci présentent un rayon de courbure relativement grand, mais comme elles sont noyées avec le reste du fuselage, elles ne contribuent que faiblement à la SER du bombardier.

Construction en dent de scie

Le bord de fuite d'une aile volante est reconnu pour sa haute contribution à la SER totale de l'appareil, offrant un très grand bord propice à la réflexion radar. Les concepteurs du B-2 ont donc dû imaginer un profil géométrique capable de dévier les ondes radar venant frapper l'arrière de l'appareil: les dents de scie. Pour comprendre ce phénomène, nous nous reportons à l'écran de Salisbury et à la définition de l'impédance intrinsèque Z que nous avons vu un peu plus haut.

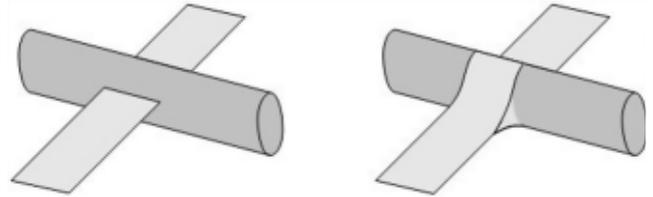
La construction en dents de scie permet en effet le passage graduel d'un $Z = 377$ (l'air) à un $Z = 0$ (le métal structurel de l'avion), formant ainsi un absorbant radar. On trouvera une découpe en zig-zag non seulement sur toute les parties de l'appareil faisant office de bord d'attaque ou de bord de fuite mais aussi sur toutes zone faisant office de raccord entre deux matériaux de natures différentes (ou de même nature, comme pour toutes les trappes de l'appareil, train d'atterrissage, entrées d'air, etc.).



Sur cette photographie, nous voyons la trappe du train d'atterrissage avant en dent de scie ainsi que les panneaux des soutes à bombe. (Northrop)

Le "blending"

La technique de blending vise principalement l'amélioration de la jonction entre le fuselage et l'aile. En effet, un angle droit est présent à cet endroit, réfléchissant donc idéalement le faisceau radar vers la source d'émission. Le "blending" est une solution simple (et peu coûteuse) consistant à redessiner l'emplanture de l'aile en supprimant cet angle droit, comme indiqué sur la figure suivante. Notons que cette technique a également l'avantage de créer des zones supplémentaires disponibles dans le fuselage par exemple pour le carburant et l'avionique.



Les projets d'amélioration du B-2

Cet avion furtif est réputé pour être un avion mystérieux et beaucoup de bruits courent disant qu'il pourrait utiliser certaines technologies inédites. Cependant, aucune information officielle ne circule et il est donc difficile de faire le point. Outre les améliorations relatives au revêtement anti-radar, à l'armement, etc., il n'y a que peu de sources qui se recoupent au sujet des nouvelles technologies utilisées. Toutefois, nous allons décrire celle qui semble la plus réalisable, à savoir l'utilisation de la magnétohydrodynamique.

Evolution du revêtement

Le B-2 Spirit a longtemps souffert d'un problème de grande ampleur: la maintenance de son revêtement exige beaucoup de travail au sol, et implique l'utilisation fréquente de bande et de calfeutrant. La furtivité étant la seule vraie défense du bombardier, le piloter avec un revêtement mal entretenu n'est pas une option. C'est dans l'optique de réduire le temps d'attente au sol que l'US Air Force entreprit (en avril 2006) un nouveau programme de maintenance, dont la fabrication accélérée de RAM. La production des matériaux RAM est passée de 26 à 12 semaines et les périodes de test ont été optimisées, permettant d'épargner encore plusieurs jours d'immobilisation du B-2. Des matériaux pareils avaient été précédemment produits en quantité modeste par de petits

fabricants spécialisés. Le matériel peut maintenant être mis en œuvre en grande quantité, répondant à des caractéristiques strictes d'exécution. Etre dans des "files d'attente" lors de l'entretien d'un B-2 est absurde, et ce n'est maintenant plus d'actualité. L'entretien, qui immobilisait l'avion pendant une semaine, est maintenant réduit à moins d'une journée.

La magnétohydrodynamique

La magnétohydrodynamique (MHD) est un domaine très vaste de la physique qui concerne l'interaction entre un champ électromagnétique et un fluide conducteur de l'électricité. Ainsi, on conçoit aisément que, suivant le type d'interaction, on puisse trouver la MHD liée aux problèmes apparemment disjoints de la couronne solaire, de la magnétosphère, de la conversion d'énergie fossile en énergie électrique, de la fusion thermonucléaire de la propulsion ou encore aux techniques industrielles de la métallurgie. Cependant, la MHD est plus connue pour son application à la conversion d'énergie fossile en énergie électrique.

La notion de conversion MHD remonte à Faraday qui, en plaçant des électrodes dans une rivière d'eau saumâtre, convenablement orientée par rapport au champ magnétique terrestre, recueillit un faible courant induit. Le remplacement de l'eau saumâtre par un gaz conducteur à très grande vitesse dans un champ magnétique intense a transformé rapidement l'idée de Faraday en générateur électrique dans lequel les pièces tournantes étaient remplacées par un fluide conducteur et pour lequel les prévisions théoriques de rendement étaient très élevées (60 %).

Selon un grand nombre de sources et selon certaines révélations du livre de Jean-Pierre Petit, l'injection d'une très haute tension sur le bord d'attaque du B-2 ioniserait l'air qui, en s'écoulant, entourerait l'avion entier d'un "cocon" de plasma absorbant les ondes radar. Outre l'intérêt de ce système pour la furtivité, des études montrent qu'il peut réduire sensiblement la résistance de l'air à l'avancement de l'avion et l'onde de choc à vitesse supersonique. Ajoutons que l'ionisation de l'air permet aussi d'utiliser un système MHD, nécessaire en outre pour générer l'électricité.

Une courte séquence d'un film de promotion diffusé sur le site officiel de la firme Northrop Grumman, montre que, juste après l'apparition d'une "bulle" de condensation caractéristique d'un passage à vitesse transsonique (proche de la vitesse du son, et limite officielle de vitesse du B-2) dans une atmosphère très humide, le capot des réacteurs s'illumine pendant une fraction de seconde (images en haut de la colonne de droite).



Photographies extraites de la vidéo de présentation de Northrop. A gauche nous voyons la bulle de condensation. A droite après disparition de celle-ci. (Northrop)

Sur la partie supérieure de l'appareil, là où se situerait le système MHD, principalement localisé à l'entrée d'air des réacteurs et en sortie de tuyère, la bulle de vapeur est fortement lumineuse. En effet, l'air peuplé de micro-gouttelettes de vapeur d'eau est conducteur d'électricité. La décharge électrique a dès lors tendance à s'étendre dans toute cette région. De toute évidence cette bulle de vapeur émet de la lumière, due à la désexcitation radiative des molécules du gaz, ces dernières étant excitées par les collisions qu'elles subissent avec les électrons libres constituant la décharge. Cette luminosité est très atténuée, voire inexistante sur le dessous de l'appareil. Pour créer un plasma autour du B2, il faudrait appliquer une différence de potentiel importante entre deux points du B2. Lors de la montée en tension d'un tel dispositif, les quelques ions H_3O^+ et OH^- présents (en quantité infime: 10^{-7} g.L⁻¹ dans une eau liquide et pure) vont migrer vers leurs pôles respectifs. Cette condition est loin d'être suffisante pour créer un plasma, d'autant plus que l'avion se déplace à la vitesse du son. Il faudrait donc augmenter la différence de potentiel pour générer des ions supplémentaires, par hydrolyse, à moins d'ioniser l'air, ce qui serait encore plus difficile. Le seuil de claquage (brusque production d'ions) sera plus facilement atteint en raison de la présence de la vapeur d'eau, et un éclair se produira. La différence de potentiel sera alors ponctuellement nulle, et il faudra recommencer plusieurs fois l'opération, à cadence élevée, pour parvenir à l'effet attendu, celui d'un plasma.

Rappelons que lorsque le seuil d'ionisation de l'hydrogène ($E_0 = 13,6$ eV), tout comme celui de l'oxygène ($E_0 = 12,06$ eV), est atteint, une lumière de couleur verte est émise. L'azote ionisé ($E_0 = 15,6$ eV), quant à lui, émet une couleur rouge. Si seule la vapeur d'eau est ionisée, la couleur du plasma résultante sera verte. Si l'air est ionisé, il y aura un mélange de couleur verte et rouge (ce qui donne du jaune-orange), or comme l'atmosphère est composée à 78 % d'azote et à 21 % d'oxygène, la couleur résultante sera plutôt orange foncé proche du rouge.

Remarquons que cela implique beaucoup de contraintes mais certaines applications utilisant la MHD ont déjà vu le

jour. Aucune information officielle n'indique que le B-2 puisse utiliser cette technique mais un certain nombre d'éléments nous permettent d'en douter. Premièrement, le coût de cet avion est très élevé pour un bombardier subsonique, et rien ne peut justifier ce prix exorbitant de deux milliards de dollars l'unité. D'autant plus qu'une grande partie des instruments de bord ont été simplement repris d'autres appareils, tout comme les réacteurs provenant du B-1B. Ensuite, la photographie ci-dessus nous montre un nuage de couleur orangée (ce qui écarte la possibilité que ce soit un nuage de condensation, qui serait parfaitement blanc) or ces images proviennent d'une vidéo officielle. Il reste la possibilité d'une manipulation de la vidéo dont sont extraites ces photographies pour nous faire croire que le B-2 serait justement équipé d'un MHD.

La fin de la furtivité du B-2 est-elle proche ?

La furtivité du B-2 est souvent mise à l'épreuve et plusieurs recherches sont poursuivies dans le but de le détecter. En effet, c'est un des avions qui pourrait être le plus inquiétant en cas de conflit. Beaucoup de pays se sont dès lors concentrés sur de nouveaux principes de détection, comme le radar Nostradamus ou encore l'utilisation des antennes GSM, radio et TV.

Le radar transhorizon de Nostradamus

Nostradamus est un radar français capable de voir bien au-delà de l'horizon. Il se joue de la rotondité de la terre en émettant des ondes basses fréquences (entre 3 et 30 MHz) ayant la particularité de se réfléchir sur les couches ionosphériques de l'atmosphère situées entre 100 et 300 km du sol. Ainsi, l'onde réfléchi par ce miroir naturel illumine une zone de 500 km de côté. Par effet Doppler, tout engin situé dans la zone renvoie un écho vers les antennes réceptrices. Suivant l'angle de réflexion le radar peut balayer des zones situées de 800 à 2000 km de l'installation au sol sur 360°. Nostradamus est composé de 288 antennes émettrices et réceptrices réparties sur les bras d'une étoile à trois branches déployée sur plusieurs centaines de mètres. C'est un radar pour tout type de climat, il est en continuel développement et fonctionnera 24 h sur 24 toute l'année pour détecter, localiser et identifier toute menace potentielle. Nous pensons qu'il sera capable de détecter tout type de cible, dont les avions furtifs tel le B-2. Nostradamus a d'ores et déjà prouvé sa capacité à détecter et localiser des petits avions à très grande distance. Lors d'essais, des cibles ont été détectées avec une précision de 5 km à 1 700 km de distance. Les travaux en cours ont maintenant pour objectif d'atteindre les mêmes



Photographie du radar transhorizon Nostradamus. Grâce à la réflexion de ses ondes radars sur la ionosphère, Nostradamus est capable de détecter n'importe quel type d'avion furtif. (DR)

performances pour des cibles encore plus petites.

Exploitation des signaux radio, TV et GSM

Une antenne diffusant des émissions de radio, de télévision ou relayant des communications téléphoniques émet continuellement un signal relativement puissant. Ce signal est bien entendu destiné aux postes de radios et de télévision ainsi qu'aux téléphones portables, mais il rayonne aussi dans toutes les directions... et donc dans l'atmosphère.

Imaginons que ce signal vienne butter contre un avion, les ondes seront alors réfléchies par la carlingue et une certaine quantité d'énergie retournera vers le sol, pas nécessairement dans la même direction. Si un récepteur est capable de capter cet écho, il peut alors détecter, voire localiser l'avion. C'est le principe du radar passif: utiliser opportunément un émetteur conçu pour tout autre chose afin d'analyser les échos renvoyés par des cibles en mouvement.

Le premier intérêt d'un tel système, c'est qu'il ne coûte pas cher: environ 250 000 euros contre environ 5 millions pour un système traditionnel utilisant un émetteur radar. Deuxième intérêt, il est indétectable puisqu'il se résume à un récepteur. Un avion ennemi équipé d'un détecteur de radar n'enregistre en fait qu'une activité radioélectrique banale, faite d'émissions de télévision, de radio et de réseaux de téléphonie mobile. Troisième intérêt, il peut détecter les avions furtifs. Le B-2 est en effet conçu pour limiter la puissance des échos renvoyés en direction de l'émetteur. Une parade qui fonctionne pour les radars traditionnels puisqu'ils cumulent les fonctions d'émission et de réception. Dans le cas des radars passifs, l'émetteur et le récepteur ne sont pas placés au même endroit. Le

principe de furtivité s'en trouve donc totalement contrarié. Plusieurs conférences ont fait le point sur les avancées en matière de radars passifs et il apparaît que la plupart des produits sont encore à l'état de prototypes ou de projets pilotes. Cependant, le "Vera-E", de l'entreprise tchèque Era, est déjà au stade commercial, tout comme le "Silent Sentry", proposé par Lockheed Martin depuis 1998 et utilisant la bande FM. Sa version 3, présentée en mai 2002, est notamment proposée pour la détection d'avions aux frontières, la surveillance côtière ou pour les tours de contrôle des petits aéroports civils.

Les Anglais de Roke Manor Research, filiale du géant de l'électronique Siemens AG, associés à l'équipementier militaire BAE Systems, continuent quant à eux à développer leur "Cellidar", basé sur l'exploitation des antennes relais de téléphonie portable. Roke Manor pensait utiliser ce système pour surveiller le trafic routier ; pourtant, c'est bien dans le cadre militaire qu'il est utilisé.

Le GSM et même l'UMTS intéressent également une équipe de l'université de Nanyang, à Singapour, et les Allemands de FGAN-FHR. Pourtant, la faible puissance des émetteurs laisse perplexes beaucoup de spécialistes. Ils ne seraient utiles que sur de faibles distances, alors que les systèmes basés sur les signaux radio sont capables de détecter des cibles jusqu'à 100 km de distance, et pour les émetteurs télévision jusqu'à 250 km. Ces derniers systèmes de détection sont efficaces mais peu précis (on parle d'une centaine de mètres), excepté quand plusieurs sources émettrices peuvent être utilisées en même temps. La généralisation de la radio numérique (DAB) et surtout de la télévision numérique (DVB) sont à cet effet attendu avec impatience. Les premiers résultats de radars passifs s'appuyant sur ces technologies montrent une nette amélioration de la localisation des cibles.

Autre avancée notable: la capacité d'identification. Aaron Lanterman, chercheur au Georgia Institute of Technology, a ainsi montré que l'on pouvait coupler un radar passif à une

base de données comprenant les signatures radars des avions courants. Par ailleurs, les spécialistes français de l'Onera alliés à Thalès tablent sur des systèmes de radars passifs aéroportés dès 2010. Un avion "muet" utiliserait par exemple les émetteurs radio et télé de la zone survolée pour détecter les avions ennemis.

"Mesures et contre-mesures sont l'essence de la planification militaire", a rappelé John Pike de GlobalSecurity.org, un groupe de politique de défense. "Des avions impossibles à abattre durant la Première guerre mondiale n'auraient été que des jouets durant la Seconde guerre mondiale. Des avions presque invincibles durant la guerre du Vietnam sont aujourd'hui de simples cibles. Les qualités furtives d'avions tels que le B-2 sont efficaces pour quelques temps encore, mais elles vont inévitablement décliner avec le temps".

Conclusion

Au terme de cet article, nous pouvons dire que la conception d'un avion furtif n'est pas simple, elle résulte d'un compromis entre les différents impératifs de la mission assignée à l'appareil. Du fait de la course entre technologies et contre-mesures, qui s'est tout de même ralentie depuis la fin de la guerre froide, l'avion peut souffrir de la furtivité.

En effet, la manoeuvrabilité et la stabilité de l'appareil sont souvent mises à mal par les formes imposées par la furtivité: sans ses commandes de vol électriques, le B-2 aurait été impossible à piloter. Opérationnellement, il nécessite une maintenance très contraignante et des installations qui lui sont propres en raison notamment des matériaux utilisés. A l'origine, la couche de matériau absorbant des B-2 supportait mal le soleil et l'humidité. Finalement, sans sa capacité furtive, ce bijou technologique n'est plus qu'un simple avion très coûteux, à l'emport et aux capacités aériennes réduites, et à la vitesse limitée.



Deux symboles de l'aviation furtive américaine, une paire de F-117 escorte un B-2 du 509th Bomb Wing. (USAF)