

LA FURTIVITÉ



Northrop B-2 Spirit

Ce dossier présente la furtivité, technique pour rendre indétectable au radar des engins, essentiellement les avions, hélicoptères et bateaux. Il s'agit de démystifier cette technologie, trop sou-

vent affublée par les médias de connotations quasiment magiques comme «invisible». Ce dossier est dédié à la technologie furtive appliquée pour le moment aux véhicules militaires, et essentiellement aux avions, aux hélicoptères et aux bateaux. Face au fantasme de l'invisibilité, découvrez le véritable principe de la furtivité, bâtie sur les moyens d'évitement du radar. Au travers d'exemples d'avions furtifs mais aussi d'autres véhicules (porte-avions, bateaux...), apprenez à reconnaître ces formes caractéristiques et saisissez les enjeux actuels et futurs de cette technique de conception.



PRINCIPE DE LA FURTIVITÉ

La furtivité évoquée ici concerne seulement la discrétion passive face aux radars. La furtivité regroupe en effet plusieurs solutions actives ou passives au regard des radars, de la lumière et de la chaleur. Un véhicule dit « furtif » dans le cas qui nous intéresse est aussi dit « invisible aux radars » ou « stealth » en anglais. Rendre un véhicule furtif consiste à le dissimuler complètement ou partiellement aux opérateurs radar.



Lockheed Martin F-22 Raptor



Rockwell B-1 Lancer

POURQUOI RENDRE UN VÉHICULE FURTIF ?

Pour qu'il passe inaperçu. Dans le domaine militaire, la furtivité permet ainsi des attaques surprises car le véhicule attaquant est détecté (idéalement) au dernier moment par l'ennemi, c'est-à-dire au moment où il frappe. Dans le domaine militaire toujours, le véhicule permet de s'approcher au plus près de l'ennemi pour l'observer sans être repéré.

EXEMPLES DE VÉHICULES FURTIFS

Les véhicules actuellement largement conçus autour de la furtivité sont :

- l'hélicoptère américain RAH-66 Comanche de Boeing ;
- le bombardier tactique américain F-117 Night Hawk de Lockheed Martin ;
- le bombardier stratégique américain B-2 Spirit de Northrop Gruman;
- l'avion de chasse F-22 Raptor de Lockheed Martin.

Mais d'une manière générale, désormais beaucoup de véhicules militaires bénéficient de la technologie stealth comme :

- le porte-avion nucléaire français Charles-de-Gaulle ;
- la frégate française LaFayette ;
- l'avion de chasse français Rafale de Dassault ;
- voire le char d'assaut français Leclerc de GIAT.



Northrop B-2 Spirit



LE RADAR : PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT

Pour savoir comment les véhicules furtifs déjouent les radars, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de ces derniers.

PRINCIPE DU RADAR

Radar est l'acronyme anglais de RA-dio Detection And Ranging traduit par « détection et télémétrie radio ». Le système des radars a été créé à la fin des années 1930, et son rôle a été

une onde électromagnétique, tout comme le sont :

- les rayons infrarouges (télécommande de TV, chaleur) ;
- les rayons ultraviolets (lampes à bronzer) ;
- les rayons X (matériel d'imagerie médicale) ;
- les rayons gamma (la radioactivité) ;
- les signaux émis et reçus par les CB, talkie-walkie, téléphone fixe sans-fil, téléphone portable ;
- et les rayons microondes (les fours à microondes).



Boeing E-3 Sentry

déterminant dans la bataille d'Angleterre pendant la seconde guerre mondiale.

Un radar est un émetteur et un récepteur d'ondes électromagnétiques. Une onde électromagnétique correspond à une variation temporelle de champs magnétiques et de champs électriques. La lumière est

Certaines ondes électromagnétiques sont perceptibles (visibles) par les êtres humains, d'autres le sont par les insectes, c'est le cas des ultraviolets avec les abeilles.

Les radars travaillent avec une gamme d'ondes électromagnétiques proche de celles des rayons mi-



Northrop B-2 Spirit

croondes. Pourquoi cette gamme-ci d'ondes électromagnétiques ? Parce que les essais ont montré qu'elle était la plus facilement exploitable selon les besoins que sont la détection et la télémétrie, et ceci dans toutes les conditions météorologiques.

CYCLE DE TRAVAIL D'UN APPAREIL RADAR

1. La partie émettrice du radar crée, émet, une onde électromagnétique vers une direction précise, appelons-la OEM pour onde électromagnétique.
2. L'OEM file à travers l'air à la vitesse de la lumière (environ

300.000 km/s).

3. Si elle ne rencontre aucun obstacle sur son passage, elle continue, elle peut alors quitter l'atmosphère et s'évader dans l'espace.
4. Si elle rencontre un obstacle, une partie de l'OEM continue en étant éventuellement modifiée, cette partie de l'OEM initiale est l'OEM réfractée, et l'autre partie est réfléchie.
5. Admettons que les conditions font que l'OEM réfractée ne retourne pas vers l'appareil radar, et que l'OEM réfléchie revienne vers l'appareil radar.
6. L'appareil radar détecte ce retour et en déduit la présence d'un obstacle, c'est la fonction Detection de Radio Detection And Ranging.



Radar

Comme l'appareil radar a été construit de façon à savoir quand il a envoyé l'OEM et quand il a détecté le retour de l'OEM réfléchi, il connaît la durée séparant ces deux moments ; il peut alors calculer la distance entre lui et l'obstacle détecté en se basant sur la vitesse connue de l'OEM (300.000 km/s environ), c'est la fonction Ranging (télémétrie) de Radar Detection And Ranging.

NOTE ET TERMINOLOGIE

Le principe est identique pour les sonars actifs utilisés sur les sous-marins, l'air est remplacé par l'eau, et l'OEM est remplacée par

cle. Elle existe avant de rencontrer l'obstacle, elle disparaît ensuite car elle se transforme en OEM réfléchi et OEM réfractée.

- OEM réfléchi : cette OEM est celle qui est renvoyée par l'obstacle. Elle n'existe qu'une fois que l'OEM incidente a rencontré l'obstacle.

- OEM réfractée : cette OEM est celle qui est absorbée par l'obstacle. Elle n'existe qu'une fois que l'OEM incidente a rencontré l'obstacle.

Une OEM a une énergie dont l'unité internationale est le Joule (J).

La somme de l'énergie de l'OEM réfléchi et de l'énergie de l'OEM réfractée est égale à l'énergie de l'OEM incidente (idéalement, en négligeant des pertes).

L'ANALOGIE DU RADAR AVEC UNE LAMPE TORCHE

Par analogie, comparons l'appareil radar à une personne qui tient une lampe torche électrique allumée et braquée dans la direction dans laquelle elle regarde. Cette personne est dehors dans la nuit noire, il n'y a rien autour d'elle, sa lampe n'éclaire rien, elle ne voit donc rien. À force de scruter, la lampe éclaire un objet, cet objet renvoie une partie de la lumière de la lampe vers la personne qui la tient, et il apparaît enfin à cette personne. La lampe représente la partie émettrice du radar, les yeux de la personne sont la partie réceptrice. La lumière de la lampe représente l'OEM créée par la partie émettrice du radar, quand elle arrive sur l'objet elle représente l'OEM incidente arrivant sur l'obstacle. La lumière renvoyée par l'objet représente l'OEM réfléchi par l'obstacle. Si l'objet est un peu transparent comme une boule de verre, la lumière qui est visible à l'intérieur de la boule, représente l'OEM réfractée.

Seule la fonction détection est représentée par cette analogie. Pour représenter la fonction télémétrie il faudrait que la personne soit capable de mesurer le temps que met la lumière pour revenir, ce qui est impossible avec une analogie aussi simple.



Radar dans le nez d'un avion

LES SOLUTIONS DE FURTIVITÉ : COMMENT CACHER UN AVION À UN RADAR ?



Navire furtif

Le but de la furtivité est de dissimuler un objet aux radars. Les radars ne doivent pas « voir » l'objet bien qu'il soit présent. Un radar ne détecte un objet que s'il reçoit l'OEM réfléchi. Donc pour que le radar ne détecte pas l'objet il « suffit » d'empêcher qu'une OEM réfléchi lui parvienne.

Comment empêcher une OEM réfléchi de parvenir au radar ? Il existe alors deux solutions.

- Obliger l'objet à diriger l'OEM réfléchi ailleurs que sur la partie réceptrice du radar ;
- Interdire l'objet de créer une OEM réfléchi en absorbant complètement l'OEM incidente, l'OEM incidente est transformée en OEM réfractée et en pertes créées volontairement.



Northrop B-2 Spirit

DIRIGER L'OEM RÉFLÉCHIE AILLEURS

En reprenant l'analogie de la lampe torche : imaginons que l'objet soit une plaque horizontale très fine à quelques mètres de hauteur et équipée d'un miroir sur sa face inférieure. La lampe ne peut éclairer que la face inférieure de l'objet, et son miroir va renvoyer la lumière vers le bas mais dans la direction opposée à celle de la personne qui tient la lampe. Comme la personne ne reçoit aucun retour de lumière, elle ne s'aperçoit pas de la présence de l'objet, et ce même si la plaque mesure 30 m x 30 m.



Navire furtif

INTERDIRE L'OBJET DE CRÉER UNE OEM

En reprenant l'analogie de la lampe torche (voir page précédente de ce dossier) : imaginons que l'objet soit un morceau de charbon de bois noir et terne. La lampe l'éclaire mais sa lumière est absorbée par la couleur noire de l'objet. Aucune lumière n'est retournée. Comme la personne ne reçoit aucun retour de lumière, elle ne s'aperçoit pas de la présence de l'objet.

Souvent les deux solutions sont adoptées, c'est ainsi que les avions stealth comme le B-2 et le F-117 sont « plats » sur leur dessous quand toutes leurs trappes (atterrisseurs et soute d'armement) sont fermées et que leurs formes sont plutôt convexes.

AVIONS FURTIFS : LE CAS CONCRET DES B2 ET F117

Intéressons-nous à deux avions furtifs. Le F117 et le B2 ne sont pas nés à la même époque, le F117 fut opérationnel en premier, et leur constructeurs sont différents ; leurs solutions de furtivité sont donc différentes.

F-117 NIGHT HAWK DE LOCKHEED MARTIN

Il est remarquable par ses facettes. Toutes ses formes sont « cassées » par des facettes sur sa partie supérieure. Sa partie inférieure est quasiment plate et lisse tout comme celle du B-2.



Lockheed-Martin F-117 Nighthawk

En reprenant l'analogie de la lampe torche : comparons le F117 à une demi-boule à facettes du genre de celles suspendues des discothèques et réfléchissant les lumières des spots, l'objet de l'analogie est plat sur son dessous avec un miroir, et sa partie supérieure est une demi-boule à facettes constituée d'autant de petits miroirs. Si l'objet (F117) est plus haut que la lampe (radar), il n'est pas détecté comme nous l'avons conclu plus haut. S'il est à hauteur de la lampe (radar) ou s'il s'incline en plaçant ses facettes vers la lampe / radar (dans le cas où le F117 est en virage), la personne (radar) ne voit qu'une facette ou ne

voit rien du tout. En effet, si aucune des facettes n'est inclinée suivant un angle précis qui renvoie la lumière réfléchie (l'OEM) réfléchie vers la personne (radar), l'objet (F-117) n'est pas perçu. Si l'une des facettes est inclinée de façon à renvoyer la lumière réfléchie (l'OEM) réfléchie vers la personne (radar), seule cette facette est détectée alors qu'en fait c'est un objet / F117 entier qui est présent. Comme les facettes sont disposées sur une surface convexe, quelle que soit l'orientation de l'objet (F117), il n'y a au maximum qu'une seule facette qui est détectée, il se peut qu'aucune facette ne soit détectée.



Northrop B-2 Spirit



Northrop B-2 Spirit

B-2 SPIRIT DE NORTHROP GRUMAN

Il est remarquable par sa forme d'aile volante ; il ne dispose d'aucune dérive. Sa forme est extrêmement travaillée, tous les éléments de l'avion sont noyés dans une forme finalement très courbe, très « floue » et très « simple ».

En reprenant l'analogie de la lampe torche : comparons le B2 à une demi-boule sans facette cette fois mais toujours aussi réfléchissante. Cette demi-boule miroir est plate sous sa partie inférieure, et elle est aussi un miroir. Si l'objet (B2) est plus haut que la lampe (radar), il n'est pas détecté comme nous l'avons conclu plus haut. S'il est à hauteur de la lampe (radar) ou s'il s'incline en plaçant sa moitié sphérique vers la lampe (radar), il retourne toujours de la lumière réfléchie (l'OEM) vers la personne (radar). Cependant, même si l'objet / B2 est toujours détecté par la personne (radar) quand il lui présente sa partie sphérique,

il n'apparaît que sous une taille très petite car, idéalement, la section du faisceau de lumière réfléchie (OEM) réfléchie est strictement de la taille d'un point.

Le F117, sans tous ses calculateurs, volerait aussi bien qu'une pierre. Son aérodynamisme n'est pas très performant. Il faut se rappeler que le F117 est un avion invisible au radar à l'origine et non pas un avion de voltige racé, et qu'il est le premier de sa lignée. Ses formes ont été calculées sur ordinateur, mais comme au moment de sa conception, l'informatique (matériel et logiciel) était limitée, ses formes ne sont pas abouties. C'est pourquoi elles ont ces formes cassées. Sur le B2, les calculs ont été aboutis, et les formes sont pures. Le B2 est beaucoup plus aérodynamique.

LES INCONVÉNIENTS ET LES CONTRAINTES DE LA FURTIVITÉ



Lockheed Martin F-22 Raptor

La furtivité est donc une technique que l'on souhaite développer. Mais elle présente des inconvénients majeurs.

LES INCONVÉNIENTS DE LA FURTIVITÉ

Son premier inconvénient est son coût. Le B2 Spirit coûte environ 1,5 milliard d'euros. Pour comparaison le Rafale coûte lui 75 millions



Navire furtif

d'euros (leurs rôles sont cependant différents). Seuls les États-Unis ont les moyens de s'offrir une telle technologie.

Ensuite, elle exige une maintenance sévère. Les peintures et les revêtements des appareils doivent être entretenus et changés régulièrement pour rester efficaces. Ceux-ci

sont très fragiles, et les intempéries par exemple peuvent compromettre la furtivité même au cours d'une mission.

LE DÉVELOPPEMENT DE LA FURTIVITÉ DANS LE MONDE

La furtivité est « à la mode ». Seuls les États-Unis produisent des avions furtifs. Les autres nations, Russie et Ukraine comprises, la laissent plus ou moins de côté dans le domaine de l'aviation pour se concentrer sur d'autres caractéristiques comme la manœuvrabilité (avions derniers nés de Sukhoï, Russe), la polyvalence (avion Rafale, France), le prix de vente (avion Grippen, Suède),



Prototype hélicoptère furtif



Navire furtif

le leurrage actif (systèmes électroniques et projectiles embarqués), la détection passive (scrutation de l'horizon au moyen de caméras infrarouges au lieu de radar émetteur-récepteur) et la méthode de combat (envoi de troupes au sol pour supprimer toute menace an-

par les forces serbes. Rien n'est sûr quant aux causes tant il y a de propagandes, d'antipropagandes et de contre - propagandes. Les raisons de cette détection peuvent être multiples : l'avion a été aperçu « à l'oeil » et il a été touché par des armes à feu individuelles, ou il a été malgré tout



Navire furtif

tiaérienne).

Si elles se concentrent ailleurs, c'est aussi quand, elles l'avouent, parce que la furtivité est chère. Il est aussi raisonnable d'affirmer que la furtivité a ses limites. Les Américains en ont fait l'expérience quand l'un de leurs F117 Night Hawk a été abattu

détecté par un radar terrestre et il a reçu un missile sol - air, ou il a été engagé par un avion, à force de passer régulièrement au même endroit il a été attendu, soit un ensemble de toutes ces hypothèses. Mais le fait est qu'un avion invisible a été abattu pour la première fois. Ceci montre

que l'adversaire s'organise, s'adapte et cherche des solutions pour contrer cet agresseur soit-disant « impunissable » qu'est l'avion furtif.



Hélicoptère furtif

COMMENT PEUT-ON DÉTECTER UN AVION FURTIF ?

Et les solutions apparaissent. Pendant la guerre du Golfe, une rumeur courait déjà annonçant qu'un radar terrestre français avait détecté un F117 Night Hawk. Si c'est vrai, c'était probablement un hasard. Mais les hasards se succédant, des conditions de détection commencent à être perçues. Par exemple, il est possible qu'un radar détecte un avion furtif en illuminant son dos, ainsi, les avions de type Awacs embarquant un radar en plein ciel seraient susceptibles de détecter un avion furtif volant plus bas que lui. Il se pourrait aussi que certains anciens radars employant des fréquences généralement délaissées de nos jours soient capables de détecter un avion furtif. En outre, comme l'un des principes de la furtivité est de renvoyer l'onde

radar ailleurs que sur son émetteur, il suffirait de séparer géographiquement l'émetteur radar de son récepteur, et avec de la chance, l'onde radar renvoyée arriverait bien sur un récepteur radar où qu'il soit, signalant la présence d'un tel avion. Une autre solution, valable dans les régions à forte activité électromagnétique comme les villes, serait de surveiller en permanence l'environnement électromagnétique constitué des émissions de télévisions, radios, téléphones, etc. et de détecter toute éventuelle anomalie causée par exemple par le passage d'un avion furtif. D'autres solutions se portent sur la détection des autres caractéristiques d'un avion furtif, comme la chaleur de ses moteurs (très difficile car maintenant les gaz des moteurs sont souvent refroidis avant d'être éjectés au-dehors de l'avion) et de son fuselage, les vortex créés dans l'air (intéressant vu la mauvaise aérodynamique du F117 Night Hawk par exemple), etc.

LA FURTIVITÉ DE DEMAIN : LES DRONES



Quel sera le futur visage de la flotte de combat ? Quel avenir pour la furtivité

Jusqu'à maintenant, les seuls véhicules exploitant pleinement la technologie de furtivité sont des bateaux (frégates, porte-avions), des avions lourds (bombardiers stratégiques) et des avions patauds (bombardiers tactiques).

Actuellement, la tendance porte plutôt vers des véhicules furtifs petits, agiles et à doter tous les aéronefs d'une certaine furtivité.

Ces tendances se remarquent par exemple avec le chasseur polyvalent des États-Unis, le F-35, et avec l'apparition de drones aériens furtifs.

C'est le cas, par exemple du drone développé par Dassault Aviation, le Neuron. La possible furtivité des drones civils, de son côté, commence à inquiéter les autorités.



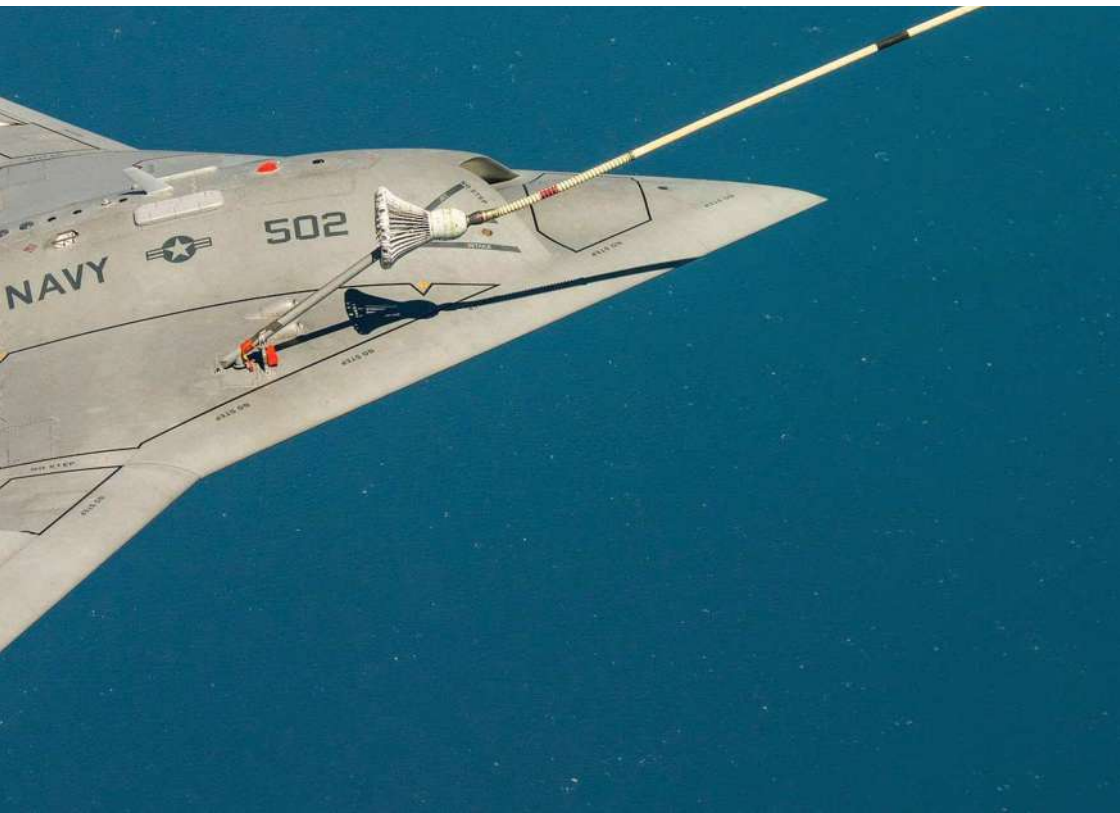
EN SAVOIR PLUS SUR LA FURTIVITÉ

Un dossier réalisé par Briconique.
Pour aller plus loin, consultez la
sitographie proposée.

Merci à Rid64, Pypu et Frenchy.

LES SITES ET LEUR WEBMASTERS

- www.netmarine.net
- www.fas.org (en anglais)
- www.defense.gouv.fr/marine/



SOLAR IMPULSE,



Bertrand Piccard et André Borschberg

L'INCROYABLE AVION SOLAIRE



De 2002 à 2014, ingénieurs, physiciens, informaticiens, électriciens, spécialistes de structure et de matériaux, ont uni leurs forces, du concept à la construction, pour réaliser un avion révolutionnaire : un avion solaire, baptisé Solar Impulse. Après son premier vol en 2010 puis plusieurs vols internationaux sans ennui technique, le prototype HB-SIA a démontré la faisabilité de ce projet unique.

Au fur et à mesure de la conception de Solar Impulse, les questions ont été nombreuses : comment se comportera l'appareil, comment le pilote parviendra-t-il à gérer l'énergie à sa disposition pour réussir un vol transatlantique et finalement un tour du monde ?

Si des doutes subsistent, l'objectif poursuivi est de voler nuit et jour sans carburant afin de permettre de démontrer le réel potentiel des



Solar Impulse



énergies renouvelables pour induire les changements nécessaires à une meilleure utilisation des ressources énergétiques et un plus grand respect de l'environnement.

Ce dossier propose un tour d'horizon complet du projet Solar Impulse, depuis l'étude de faisabilité de l'avion solaire en passant par les entraînements en simulateur de vol, la présentation de l'équipe, jusqu'aux premiers vols historiques et au tour du monde de Solar Impulse. Suivez cette aventure extraordinaire en image.

NAISSANCE DE SOLAR IMPULSE : LA PROBLÉMATIQUE DU CARBURANT



Le projet Solar Impulse est construit sur une collaboration entre Bertrand Piccard et André Borschberg. Mais comment est née cette idée de création d'un avion solaire ? Tout vient en réalité de la volonté de se passer de carburant pour privilégier les énergies renouvelables.

PREMIER TOUR DU MONDE EN BALLON : LA PRISE DE CONSCIENCE

L'idée de Solar Impulse est venue à Bertrand Piccard à la suite du premier tour du monde en ballon réalisé avec Brian Jones en 1999. C'est en prenant conscience que le manque de carburant aurait pu faire rater son aventure qu'il s'est fait

la promesse de refaire un tour du monde, mais cette fois sans carburant ni émissions polluantes.

À LA CONQUÊTE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

« Les grands exploits du XXe siècle ont été des conquêtes : les Pôles, l'Everest, les abysses, la Lune. Ceux du XXIe siècle, à mon avis, devraient consister beaucoup plus à préserver, voire améliorer la qualité de vie sur notre Planète. Comment concilier intérêts économiques et écologiques, promouvoir l'utilisation de nouvelles technologies pour économiser l'énergie et créer des sources alternatives ? Solar Impulse est un symbole de cet état d'esprit », explique Bertrand Piccard. Il est temps de découvrir pas à pas dans les pages suivantes les étapes de cet exploit du XXIe siècle.

SOLAR IMPULSE :

LA PRÉSENTATION DU PROJET

Plus qu'un exploit pour l'histoire de l'aviation, Solar Impulse est un projet porteur de symboles et de principes qui soutiennent les recherches sur les nouvelles énergies. Parmi l'un de ses objectifs : le vol perpétuel grâce à l'énergie solaire.



Solar Impulse

LES PRINCIPES DU PROJET SOLAR IMPULSE

En écrivant à l'énergie solaire une nouvelle page de l'histoire de l'aviation, jusqu'à effectuer un tour du monde sans carburant ni émissions polluantes, Solar Impulse cherche à promouvoir les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique que permettent les nouvelles technologies. Sa volonté est de sensibiliser la société et d'amener chacun à économiser les ressources énergétiques de notre planète. Solar Impulse s'inscrit en droite ligne dans une tradition d'exploration, d'aventure et de développement scientifique. En initiant ce défi, Bertrand Piccard perpétue l'aventure familiale des Piccard, dans la suite de l'exploration de la stratosphère et des abysses, puis du tour du monde en ballon. Il entraîne dans son sillage une équipe, dirigée par André Borschberg et de nombreux partenaires.

LA PORTÉE SYMBOLIQUE ET POLITIQUE DE SOLAR IMPULSE

En avril 2008, la Commission européenne assure son parrainage à



Bertrand Piccard et André Borschberg, signe de reconnaissance de l'impact et de l'action de Solar Impulse en faveur des énergies renouvelables.

Les contacts se nouent également avec le monde politique suisse. Bertrand Piccard présente le projet devant le Parlement fédéral, les conseillers fédéraux Doris Leuthard et Moritz Leuenberger viennent tour à tour visiter la halle de construction et tester le simulateur de vol. Le projet progresse ainsi non seulement sur le plan technique, mais sa notoriété et sa portée symbolique s'affirment, bien au-delà des

frontières naturelles de l'Europe. Bertrand Piccard et André Borschberg présentent Solar Impulse en Chine, lors des JO de Beijing, en Inde et dans les Émirats.

Diverses personnalités engagées à chercher des solutions concrètes pour assurer l'avenir de notre planète décident de participer à l'aventure en la parrainant. Parmi elles, le prince Albert II de Monaco, Buzz Aldrin, Yann-Arthus Bertrand, Paulo Coelho, Nicolas Hulot, Hubert Reeves, Jean-Louis Etienne, et, les prix Nobel de la paix Elie Wiesel et Al Gore.



LES PARTENAIRES DU PROJET DE BERTRAND PICCARD ET ANDRÉ BORSCHBERG

Solar Impulse est un vaste projet, tant par sa portée que par le nombre de ses soutiens. En parallèle aux personnalités engagées, comme nous venons de le voir, ce sont de multiples organisations, associations et entreprises qui s'associent au projet, apportant leur collaboration concrète ou souhaitant démontrer leurs valeurs et leurs actions en faveur de l'environnement. Et cette collaboration permet de bâtir un plan complet de réalisation, depuis

la logistique jusqu'aux matériaux, en passant par le financement et l'apport de compétences techniques concrètes.

OBJECTIFS, ENJEUX ET DÉFIS DE L'AVION SOLAIRE

Faire décoller et voler de façon autonome, de nuit comme de jour, un avion propulsé exclusivement à l'énergie solaire, est un défi impossible à relever sans une réduction drastique de la consommation d'énergie. Les cinquante ingénieurs et techniciens de Solar Impulse, épaulés par une centaine d'experts



et de conseillers, ont dû mettre en œuvre des solutions inédites dans le domaine aéronautique. Solar Impulse n'est pas le premier projet d'avion solaire, mais le but du prototype HB-SIA, et par la suite du HB-SIB (le Solar Impulse 2), est d'approcher le vol perpétuel.

Un prototype, trois objectifs :

- valider les résultats des simulations numériques, les choix technologiques et les techniques de construction ;
- tester un domaine de vol inexploré, car jamais jusqu'ici un avion présentant ces caractéristiques de taille, de poids et de vitesse n'a réussi à voler ;
- démontrer l'efficacité énergétique de l'ensemble en étant capable de voler toute la nuit après avoir stocké suffisamment d'énergie solaire durant la journée.

Les enseignements tirés du proto-

type HB-SIA ont été intégrés dans la conception, le design et les choix technologiques du HB-SIB (le Solar Impulse 2) qui entreprit son tour du monde début 2015.

UN PROJET COLLECTIF AUQUEL TOUT LE MONDE PEUT PARTICIPER

Pour offrir une plateforme à tous ceux qui souhaitent participer à l'aventure et apporter leur voix au projet, Solar Impulse a lancé son « Supporters Program » simultanément à la présentation du prototype HB-SIA. Accessible par le site Internet de Solar Impulse, original et ludique, il proposait aux supporters d'acquiescer une des 10.748 cellules de l'aile, de visiter la base de l'avion solaire ou encore d'apposer leur nom sur son fuselage.

L'AVION SOLAR IMPULSE : LE PROTOTYPE HB-SIA ET LE SI2

D'une envergure équivalente à celle d'un Airbus A340 pour un poids proportionnellement minime, le prototype HB-SIA présente des attributs de construction et d'aérodynamisme originaux. L'avion du tour monde, le HB-SIB, appelé SI2, est construit sur les mêmes principes mais avec des améliorations tous azimuts et une envergure de 72 m, dépassant celle d'un Boeing 747.

La structure en fibre de carbone, la chaîne de propulsion, le domaine de vol, l'instrumentation de bord, tout a été repensé et conçu à la fois pour économiser de l'énergie, résister aux conditions hostiles que subissent le matériel et le pilote en haute altitude et intégrer les contraintes de poids aux impératifs de résistance.

FICHE TECHNIQUE DE SOLAR IMPULSE 1, OU HB-SIA

- Envergure : 63,40 mètres
- Longueur : 21,85 mètres
- Hauteur : 6,40 mètres
- Motorisation : 4 moteurs élec-



Solar Impulse

triques de 10 CV chacun

- Cellules solaires : 11.628 (10.748 sur l'aile, 880 sur le stabilisateur horizontal), 166 microns d'épaisseur
- Batteries : 4 X 200 WH/kg
- Vitesse moyenne : 70 km/h
- Altitude maximale de croisière : 8.500 mètres (27.900 ft)
- Poids : 1.600 kilos
- Vitesse de décollage : 35 km/h



STRUCTURE ET MATÉRIAUX

Atteindre 63,40 mètres d'envergure pour 1.600 kilos tout équipé est un défi aéronautique pour la rigidité, la légèreté et la contrôlabilité en vol. Le Solar Impulse est construit autour d'une structure en matériaux

composites constitués de fibre de carbone et de nid d'abeille assemblés en sandwich. L'extrados de l'aile est recouvert d'une peau composée de cellules solaires encapsulées, et l'intrados d'un film flexible à haute résistance. Cent-vingt nervures en fibre de carbone réparties tous les 50 centimètres profilent ces deux couches pour leur donner leur forme aérodynamique.

SYSTÈME DE PROPULSION

Sous l'aile sont fixées quatre nacelles contenant chacune un moteur de 10 CV, un ensemble de batteries au lithium polymère et un système de gestion contrôlant le seuil de charge et de température. L'isolation thermique est conçue pour conserver la chaleur dégagée par les batteries et leur permettre ainsi de fonctionner malgré les -40 °C rencontrés à 8.500 mètres. Chaque moteur est muni d'un réducteur limitant à 200-400 tours/minute la rotation d'une hélice bipale de 3,5 mètres de diamètre.

RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES

À midi, chaque mètre carré de surface terrestre reçoit l'équivalent de 1.000 watts, soit 1,3 CV, sous forme d'énergie lumineuse. Sur 24 heures, le soleil ne fournit qu'une moyenne de 250 W/m². Avec 200 m² de cellules photovoltaïques et 12 % de rendement total de la chaîne de propulsion, la puissance moyenne

fournie par les moteurs de l'avion n'atteint plus que 8 CV ou 6 KW. C'est à peu de choses près ce dont disposaient les frères Wright en 1903 lorsqu'ils ont réalisé le premier vol motorisé. Et c'est avec cette énergie-là, optimisée du panneau solaire à l'hélice par le travail de toute une équipe, que Solar Impulse a imaginé voler jour et nuit sans carburant.

batteries au lithium polymère. Au stade actuel, la densité énergétique maximale est de 220 Wh/kg. La masse d'accumulateurs nécessaire pour le vol de nuit de Solar Impulse se monte à 400 kilos, soit le quart de la masse totale de l'avion. La réussite ne peut passer que par la maximisation des performances aérodynamiques et l'optimisation de la chaîne énergétique.



CAPTATION ET STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Les 11.628 cellules en silicium monocristallin de 150 microns d'épaisseur ont été sélectionnées pour leurs qualités de légèreté, de flexibilité et d'efficacité. Avec 22 %, leur rendement aurait pu être encore meilleur, mais leur poids aurait alors été excessif, pénalisant l'avion pendant le vol de nuit. Cette phase étant la plus critique, la contrainte majeure du projet se situe au niveau du stockage de l'énergie dans les

FICHE TECHNIQUE DE SOLAR IMPULSE 2, OU HB-SIB

L'avion du tour du monde, le SI2, reprend les caractéristiques essentielles du prototype mais avec des améliorations dans tous les domaines : envergure plus grande, cellules solaires plus efficaces, plus nombreuses et plus fines, moteurs plus puissants, espace intérieur plus grand (3,8 m³) et avionique améliorée.

- Envergure : 72,30 mètres
- Longueur : 22,40 mètres
- Hauteur : 6,37 mètres



- Motorisation : 4 moteurs électriques de 17,5 CV (12,9 kW) chacun
- Batteries : 4 x 260 Wh/kg, 633 kg au total
- Cellules solaires : 17.248, 135 microns d'épaisseur, 269,5 m²
- Vitesse de croisière : 90 km/h de jour, 60 km/h de nuit
- Altitude maximale de croisière : 8.500 mètres (27.900 ft)
- Poids : 2.300 kilos
- Vitesse de décollage : 35 km/h

EN RÉSUMÉ, L'AVION DE SOLAR IMPULSE, C'EST :

- L'envergure d'un Airbus A380, afin de minimiser la traînée induite et d'offrir une surface maximale aux cellules solaires.
- Le poids d'une voiture, après avoir traqué chaque gramme pour construire un avion hyperléger.
- La puissance d'un scooter, après optimisation à l'extrême de toute la chaîne énergétique.

L'ÉQUIPE DE SOLAR IMPULSE : LES PILOTES ANDRÉ BORSCHBERG ET BERTRAND PICCARD

Deux hommes, pionniers et innovateurs, tous deux pilotes, assurent le développement de Solar Impulse : Bertrand Piccard, psychiatre, aéronaute, auteur du premier tour du monde en ballon sans escale, en est l'initiateur et le président. André Borschberg, ingénieur, licencié en sciences du management, formé comme pilote de chasse et pilote professionnel d'avion et d'hélicoptère, en est le directeur général.

ANDRÉ BORSCHBERG : PILOTE, INGÉNIEUR ET ENTREPRENEUR

André Borschberg, 56 ans, ingénieur de formation, licencié du Massachusetts Institute of Technology (MIT) en science du management, dispose d'une solide expérience de créateur et d'administrateur d'entreprises ainsi que de pilote. Sa passion de l'aviation et son intérêt pour les solutions nouvelles l'ont poussé à s'associer à Bertrand Piccard, pour diriger Solar Impulse et pour être l'un des deux pilotes qui effectueront le tour du monde en avion solaire. André Borschberg a fait sa formation de pilote à l'école des Forces aériennes suisses, d'abord sur



Bertrand Piccard
et André Borschberg



Equipe du Solar Impulse

Venom, puis Hunter et Tiger, avions qu'il a pilotés pendant plus de vingt ans. Aujourd'hui, il collectionne les licences de pilote professionnel d'avion et d'hélicoptère et affectionne aussi la voltige à ses heures. Des finances au marketing, des problèmes d'ingénierie aux ressources humaines, André Borschberg a acquis pendant plus de vingt ans une solide expérience comme entrepreneur, administrateur et consultant. Il s'est également engagé dans le social, en faveur des Restos du Cœur et de l'aide aux malades. Directeur général de Solar Impulse, il a réuni et motivé une équipe de 65 personnes, composée de spécialistes d'origines et d'horizons très divers. « Cette diversité recherchée

à tous les niveaux stimule leur créativité et fait leur force. De la confrontation de leurs expériences naissent des solutions originales et inédites. »

Comme ingénieur mécanicien et pilote, il dirige la construction de l'avion et la préparation des missions de vol. « Nous devons arriver à construire ultrarobuste et hyperléger en même temps, et par-dessus tout extrêmement efficace en consommation énergétique, pour n'avoir besoin que d'infimes quantités d'énergie pour voler. Tout en offrant le degré de résistance que requiert un avion. C'est là la grande complexité de ce projet, qui donne toute la mesure de sa philosophie et de ses objectifs. »



Le 7 juillet 2010 pour la première fois de sa vie, André Borschberg a effectué un vol de 26 heures avec l'avion de Solar Impulse, démontrant ainsi la possibilité de voler jour et nuit au moyen de l'énergie solaire. Il se lance également en 2015 au côté de Bertrand Piccard dans l'aventure du tour du monde.

BERTRAND PICCARD : LE PREMIER TOUR DU MONDE EN BALLON SANS ESCALE

Descendant d'une famille d'explorateurs et de scientifiques, Bertrand Piccard a réalisé le premier tour du monde en ballon sans escale. Psychiatre, aéronaute, conférencier

de réputation internationale, il est également président de la fondation humanitaire Winds of Hope et ambassadeur itinérant des Nations unies.

« La question maintenant n'est pas tant de savoir si l'Homme pourra aller encore plus loin et peupler d'autres planètes, la question est de savoir comment s'organiser de façon à rendre la vie sur Terre de plus en plus digne d'être vécue. » déclarait Auguste Piccard en 1931 à la suite de sa première ascension stratosphérique. Quoi de plus logique, dès lors, que son petit-fils initie soixante-dix ans plus tard un projet combinant exploration scientifique et promotion des énergies



Bertrand Piccard et André Borschberg

renouvelables.

Pour approfondir sa compréhension du « monde intérieur », Bertrand Piccard suit des études de médecine d'où il ressort avec une double spécialisation en psychiatrie et psychothérapie de l'adulte et de l'enfant.

Intéressé depuis toujours par le comportement de l'être humain en situation extrême et passionné d'exploration depuis son enfance, il est l'un des pionniers du vol libre (deltaplane) et de l'ULM dans les années 1970. Il devient champion d'Europe de voltige en aile delta en 1985.

Pilote de montgolfière, il remporte la première course transatlantique en ballon en 1992 avec le Belge Wim

Verstraeten et initie le projet de tour du monde en ballon sans escale « Breitling Orbiter ». Commandant de bord, il relève ce challenge en mars 1999 avec l'Anglais Brian Jones, réalisant du même coup le vol le plus long en distance et en durée de toute l'Histoire de l'aviation. Cette réussite le projette sur le devant de la scène et lui vaut le qualificatif de « savanturier ». Suite à ce succès, Bertrand Piccard reçoit la Légion d'honneur, l'Ordre olympique ainsi que les plus hautes distinctions de la Fédération aéronautique internationale (FAI), de la National Geographic Society et de l'Explorers Club. Il crée avec Brian Jones la Fondation

humanitaire Winds of Hope qu'il préside. Développant une collaboration avec l'OMS, il engage Winds of Hope dans la lutte contre le noma, maladie infectieuse. Les Nations unies le nomment ambassadeur itinérant dans le cadre de leur Fonds pour la population (FNUAP). Bertrand Piccard imagine un tour du monde en avion solaire, sans carburant ni émissions polluantes, dans le but de promouvoir les énergies renouvelables et d'encourager les économies d'énergie. Il s'associe avec André Borschberg pour lancer officiellement le projet Solar Impulse en 2003 et commencer la construction d'un avion révolutionnaire.

« L'aventure au XXI^e siècle consiste

à utiliser la créativité humaine et l'esprit de pionnier pour développer la qualité de vie à laquelle les générations actuelles et futures ont droit. » Pionnier, explorateur, innovateur hors des certitudes et des stéréotypes, Bertrand Piccard est avant tout un visionnaire et un communicateur. Président de Solar Impulse, il développe la philosophie avant-gardiste du projet, et trace la portée symbolique et politique qui a convaincu les partenaires financiers de ce défi. Il partage avec André Borschberg les commandes de cette entreprise, comme il partagera avec lui, en alternance, les commandes de l'avion.



Equipe du Solar Impulse

SOLAR IMPULSE, DU RÊVE À LA RÉALITÉ : L'ÉTUDE DE FAISABILITÉ

Bertrand Piccard est donc à l'origine de l'idée (folle ?) de faire voler un avion solaire. Une idée qu'il a ensuite fallu réaliser concrètement, et donc évaluer minutieusement. L'École polytechnique fédérale de Lausanne a accepté de mener une étude de faisabilité, confiée à André Borschberg. Solar Impulse SA naît en 2004.

En 2001, Bertrand Piccard et son coéquipier Brian Jones sillonnent les États-Unis pour faire un état des lieux de la recherche et se lient avec plusieurs spécialistes de l'aviation solaire. Tous les encouragent à relever le défi de faire voler ainsi un pilote autour du monde.

TOUR DU MONDE EN AVION SOLAIRE : DE L'IDÉE À LA RÉALITÉ

Bertrand se tourne alors vers l'École polytechnique fédérale de Lausanne, qui accepte de mener une étude de faisabilité et en confie la direction à André Borschberg,

ingénieur et pilote de chasse. Les résultats concluants de cette étude permettent d'annoncer officiellement le lancement du projet le 28 novembre 2003. André Borschberg s'associe au projet pour transformer



la vision en réalité.

Solar Impulse SA est officiellement fondée le 29 juin 2004 par Bertrand Piccard, André Borschberg, Brian Jones et Luigino Torrigiani, un spécialiste du marketing sportif. Suivent alors la mise en place d'un noyau technique et les premiers accords de partenariats scientifiques : École polytechnique fédérale de Lausanne, Agence spatiale euro-

péenne et Dassault Aviation.

SOLAR IMPULSE, UN PROJET COLLECTIF : L'EPLF, L'ESA ET DASSAULT AVIATION

Solar Impulse peut dès lors compter sur le savoir-faire et l'expérience de partenaires qui apportent de la crédibilité au projet. Ces collaborations vont permettre de stimuler des recherches de très haut niveau avec de vastes perspectives d'application, tant pour l'environnement que pour la qualité de vie : L'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) apporte ses compétences intellectuelles et scientifiques dans plus de dix domaines de recherche. Elle s'attache notamment à relever des défis en matière de structures ultralégères, de gestion de la chaîne énergétique et d'interfaces homme-machine.

L'expertise de l'Agence spatiale européenne (Esa) sera utile dans plusieurs domaines technologiques de pointe : batteries et cellules solaires, systèmes de gestion de l'énergie, matériaux de construction ultralégers.

Dassault Aviation est engagé comme avionneur conseil pour la révision du design de l'avion solaire d'une part, et d'autre part comme expert du programme de développement, particulièrement dans les domaines de l'aéroélasticité et des commandes de vol, de la sécurité et de la fiabilité des systèmes.



SOLAR IMPULSE : FINANCEMENT ET DESIGN



Une fois le projet validé, reste à trouver le financement nécessaire et à conduire les premières ébauches de l'avion lui-même. Qui finance Solar Impulse et comment est né le prototype ?

L'idée et la structure sont en place. Reste à trouver ceux qui y croient suffisamment pour les concrétiser. Les contacts privilégiés de Bertrand Piccard avec plusieurs entreprises permettent d'apporter le financement nécessaire au démarrage du projet et leurs compétences technologiques.

LE FINANCEMENT : SEMPER, SOLVAY, ALTRAN, OMEGA ET D'AUTRES PARTENAIRES

En été 2004, Semper devient le premier supporter officiel. L'arrivée de Solvay, grand groupe industriel belge, en octobre 2004 comme premier partenaire principal, permet d'engager les premiers ingénieurs. Le projet peut démarrer. La contribution de Solvay au projet Solar Impulse portera sur la recherche de matériaux innovants et de solutions techniques, la modélisation et la simulation de leur comportement dans des environnements extrêmes, leurs évaluations techniques et la

conduite de séries de tests. Le partenariat conclut ensuite avec Altran comme partenaire en engineering, offre à Solar Impulse une expertise pluridisciplinaire (management de projet, gestion de risque) et multi-sectorielle (aéronautique, gestion de l'énergie, simulation et modélisation).

André Borschberg s'attèle à mettre sur pied et à motiver une équipe d'ingénieurs venant d'horizons divers, aux compétences très variées, et construit un réseau de partenaires techniques, d'experts et de spécialistes, déterminant pour la réalisation du projet. Un bureau technique est ouvert à Winterthur et le design de l'avion commence.

Rejoignant Solar Impulse en mai 2006, Omega apporte son savoir-faire dans les secteurs de l'automatisation et de la propulsion hybride. Son banc d'essai permet d'optimiser toute la chaîne énergétique du prototype, des panneaux solaires jusqu'au moteur, et cela dans des conditions de température allant de -40°C à $+55^{\circ}\text{C}$. Sur une idée de l'équipe de vols d'essais dirigée par Claude Nicollier, Omega développe un instrument de bord aussi révolutionnaire que l'avion, qui, en indiquant au pilote l'inclinaison de l'appareil au degré près, lui apportera une assistance essentielle pour le pilotage en vol comme à l'atterrissage.

En mars 2007, un accord avec Deutsche Bank est officialisé. Pour

Solar Impulse c'est une étape importante dans son intention de tisser des liens étroits entre les mondes économique et écologique. Ce troisième partenaire principal fait bénéficier le projet de sa longue expérience en management durable comme en Corporate Social Responsibility (CSR) et met à disposition des outils de communication respectueux de l'environnement (dits « ecofriendly ») pour diffuser les messages de Solar Impulse.

Plusieurs accords de partenariat sont conclus avec des fournisseurs officiels, comme SolarMax, Victorinox, Toyota Suisse, BKW-FMB et SQS. Un grand nombre de PME s'engagent dans le projet comme partenaires spécialisés et y jouent un rôle, de la conception à la réalisation de l'avion. Leur contribution se traduit en développements techniques ciblés, en productions « sur mesure », en assistance et conseil.



Bertrand Piccard



L'ÉVOLUTION DU DESIGN DE SOLAR IMPULSE

La première configuration, celle de l'étude de faisabilité, tient compte de tout ce que les chercheurs ont découvert et imaginé, c'est-à-dire un avion de très grande envergure et performant aérodynamiquement. Cependant, tous les détails ne sont pas encore pris en compte et les premières images ne sont que des vues d'artistes.

Début 2004, des études plus approfondies conduisent à la première version du prototype, déjà sensiblement différente. Les moteurs sont placés devant le bord d'attaque des

ailerons, afin d'équilibrer la force de propulsion de l'avion et les forces aérodynamiques. Cette version présente un cockpit-nacelle nettement détaché sous l'aile. Finalement, une troisième version naît du travail des ingénieurs qui décident de commencer par un premier prototype à cabine non pressurisée.

En novembre 2007, après quatre ans de recherches, de calculs complexes et de simulations, Bertrand Piccard et André Borschberg présentent le design final du premier prototype d'une envergure de 63 mètres pour une masse de 1.600 kilos, immatriculé HB-SIA.

Comme le souligne André Borschberg : « Un tel défi ne se relève qu'en associant des ingénieurs venant de tous horizons. Cette diversité recherchée à tous les niveaux stimule leur créativité et fait leur force. De la confrontation de leurs expériences naissent des solutions originales et inédites. »

C'est l'addition des forces de plus de cinquante collaborateurs épaulés par plus d'une centaine d'experts et de conseillers qui a permis de repousser les limites de la connaissance et de réaliser de réels progrès technologiques. Le HB-SIA est cependant un avion prototype « brut ». Son plafond d'altitude est volontairement limité à 8.500 mètres, pour éviter l'encombrement d'une cabine pressurisée, limiter la consommation d'énergie et réduire le tableau de bord à l'essentiel.