

Histoire des véhicules et des aventures solaires

*Un récit des origines et des développements des véhicules terrestres,
nautiques et aériennes propulsés à l'énergie solaire*



Auteure : Raphaëlle JAVET

***Rapport réalisé en 2016 par la Fondation SolarPlanet,
en partenariat avec l'ADNV et De Witt.***

Sommaire

Prémices	3
Le moteur électrique	3
L'énergie photovoltaïque.....	4
I) Les véhicules solaires terrestres	6
Les débuts de la mobilité solaire.....	6
Les premiers exploits et un intérêt accru pour les véhicules solaires	8
Courses et records de vitesse : un engouement mondial.....	10
Les premières tentatives de conversion à l'usage quotidien.....	12
Depuis l'an 2000 : tentatives de renouveau	13
Développements actuels : quelques projets prometteurs	15
A côté des voitures : trains, vélos et mobilité solaire inédite.....	18
II) La navigation solaire	21
Les premiers bateaux solaires : des cas isolés	21
L'engouement suisse et l'essor allemand	22
Les premières grandes traversées.....	28
PlanetSolar, premier tour du monde à l'énergie solaire	30
Utilisations actuelles et projets d'avenir	32
III) L'aviation solaire	35
Les débuts : le modélisme.....	35
Les pionniers des vols solaires habités	37
La quête du vol perpétuel.....	41
Solar Impulse : voler autour du monde à l'énergie solaire.....	46
Plus haut, plus fiable : les projets en cours.....	48
Annexe 1 : Chronologie synthétique	50
Annexe 2 : Caractéristiques techniques générales de quelques véhicules solaires	52
Bibliographie	54
Publications, articles.....	54
Liens web	56
Sources des illustrations	58

The future development of solar power has no limit. (...) and in the far distant future, natural fuels having been exhausted it will remain as the only means of existence of the human race.

Frank SHUMAN, 1911, *Scientific American*.

Prémices

Deux éléments ont été essentiels pour permettre le développement des véhicules solaires. Il s'agit de la propulsion électrique, apparue au XIX^{ème} siècle, ainsi que de la mise au point de la technologie photovoltaïque, qui a connu son essor dès le milieu des années 1950.

Le moteur électrique

Le principe du moteur électrique est découvert dès les années 1820-1830 en Angleterre mais c'est en 1871 que l'inventeur belge Zénobe Gramme présente à l'Académie des sciences de Paris la toute première génératrice industrielle de courant continu, que l'on dénommera la machine de Gramme. Hippolyte Fontaine, le partenaire de Zénobe Gramme, met au point en 1873 la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Il présente à l'exposition de Vienne une expérience associant une dynamo et un moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils électriques. Il démontre ainsi que l'énergie peut être transportée. En 1887, le premier brevet du moteur électrique actuel, à courant alternatif, est déposé par le physicien d'origine serbe Nikola Tesla.

Une fois la mise au point du moteur électrique, ses applications dans le cadre de la propulsion de véhicules est rapide. En 1880, les premières voitures électriques sont conçues grâce à l'invention de l'accumulateur au plomb. En 1899, la voiture électrique française dénommée *La Jamais contente* dépasse la vitesse de 100 km/h, ce qui constitue un véritable exploit pour l'époque. C'est en effet la première fois qu'un véhicule automobile, tout type de moteur confondu, parvient à une vitesse de 100 km/h¹. Le début du XX^{ème} siècle voit un grand essor des voitures électriques et en 1911, on trouve à Paris et à Londres bon nombre de taxis électriques. Près d'un tiers des véhicules américains sont électriques avant la Première Guerre mondiale et l'année 1912 est d'ailleurs considérée comme l'année d'apogée de l'électromobilité. 20 fabricants ont alors construit près de 34 000 voitures électriques dans le monde. L'introduction de la

¹ <http://www.france-pittoresque.com/spip.php?article5753> consulté le 09.05.16.

Ford Model T à essence en 1908 va cependant progressivement permettre au moteur à explosion de prendre le dessus, avec le succès ultérieur que l'on connaît.

Concernant la navigation, le premier bateau électrique en France baptisé *Eureka* et utilisant des batteries au plomb fut construit en 1881 par le chimiste français Gustave Trouvé². A la fin du XIX^{ème} siècle, les bateaux électriques deviennent populaires, notamment en Angleterre. Ces embarcations sont en effet silencieuses et propres, en comparaison avec les bateaux à vapeur. Mais les moteurs à essence prennent bientôt le pas sur la propulsion électrique et, comme pour les véhicules terrestres, la navigation électrique connaît un long coup d'arrêt.

Du côté de l'aéronautique électrique enfin, les ingénieurs français Renard et Krebs construisent en 1884 le dirigeable *La France*, premier engin volant à utiliser un système de moteur électrique et non à vapeur. Ce dirigeable gagne cette année-là une course de 10 km en France. Son moteur électrique de 9 CV permettait de propulser l'engin volant de 50 m de long à près de 20 km/h³. L'aviation qui prend son essor réel dans la première décennie du XX^{ème} siècle sera quant à elle exclusivement à moteur à combustion et ce n'est que dans les années 1950 qu'apparaîtront des avions électriques, en premier lieu sous forme de modèles réduits.

L'énergie photovoltaïque

En 1839, le phénomène photovoltaïque est découvert par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel. Il parvient à produire de petites quantités d'électricité en exposant certains matériaux face aux rayons du soleil. Si certains chercheurs s'intéressent par la suite au phénomène photovoltaïque, comme Werner Von Siemens, les premières expériences ne sortent pas des laboratoires, tant la quantité d'énergie obtenue est faible.

La technologie photovoltaïque naît véritablement dans les laboratoires de Bell en 1954. Les Américains Daryl Chaplin, Calvin Fuller et Gerald Pearson conçoivent et développent la première cellule photovoltaïque en silicium qui, avec 6 % de rendement, permet la conversion de suffisamment d'énergie solaire pour l'alimentation d'appareils électriques.

C'est en premier lieu la recherche spatiale qui se tourne vers l'énergie photovoltaïque et en 1958, les premiers satellites alimentés par l'énergie solaire sont lancés dans l'espace. Dans un contexte de Guerre Froide, l'armée s'intéresse elle-aussi à cette nouvelle technologie qui permet un approvisionnement en

² <http://www.afbe.co/index.php/l-afbe/decouvrir-le-bateau-electrique/l-historique> consulté le 09.05.16.

³ http://rbmn.free.fr/Dirigeable_LA_FRANCE_1884.HTML consulté le 09.05.16.

énergie fiable et autonome. Elle finance ainsi en partie les recherches dans le domaine de l'énergie photovoltaïque.

Dans les années 1970, Elliot Berman élabore une cellule fabriquée à base de matériaux moins coûteux que le silicium. Les cellules solaires deviennent ainsi plus abordables et exploitables pour une utilisation davantage courante, notamment pour alimenter en énergie des endroits éloignés de toute source de courant électrique. Dès lors, le recours à l'énergie photovoltaïque, ainsi que le rendement des cellules n'a fait que croître et le prix du watt solaire a considérablement baissé⁴.

⁴ <http://www.guide-panneaux-photovoltaïques.be/historique-des-panneaux-solaires/> consulté le 25.04.16.

I) Les véhicules solaires terrestres

Les débuts de la mobilité solaire

Le premier véhicule solaire de l'histoire - la *Sunmobile* - est un modèle réduit de voiture inventé par William G. Cobb de General Motors (fig. 1). Elle est présentée la première fois à Chicago le 31 août 1955. Cette miniature est dotée de 12 cellules photovoltaïques en sélénium et d'un petit moteur électrique Pooley qui actionne une poulie faisant tourner les roues arrière. La *Sunmobile*, fabriquée en bois de balsa, mesure moins de 40 cm de longueur⁵. Elle prouve néanmoins pour la première fois que l'énergie solaire est capable de faire se mouvoir un véhicule.

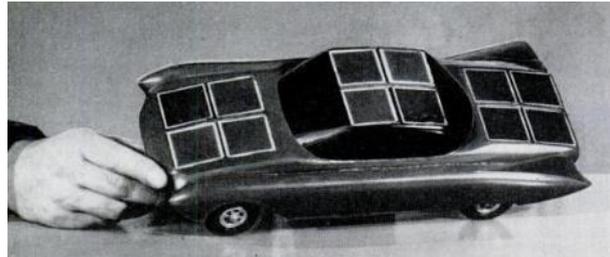


FIGURE 1 : *SUNMOBILE* DE GENERAL MOTORS, PREMIÈRE VOITURE SOLAIRE MINIATURE (1955).

Après 5 ans de travail en Californie, le premier véhicule solaire pouvant transporter un être humain est mis au point et présenté en 1960 à Rome par le physicien et chimiste américain Charles Escoffery. Il s'agit d'une ancienne *Baker*, une voiture électrique datant de 1912, équipée sur son toit de 2,42 m² de



FIGURE 2 : *BAKER* DATANT DE 1912 ÉQUIPÉE EN 1960 DE PANNEAUX SOLAIRES. CRÉDIT PHOTO : HULTON ARCHIVE / GETTY IMAGES.

panneaux solaires amovibles comportant 10 640 cellules (fig. 2). Cette installation a une puissance de 200 W avec des conditions d'ensoleillement optimales mais, pratiquement, cette puissance dépasse rarement les 100 W pour un rendement des cellules atteignant seulement 5 %. Partant d'une charge complète d'électricité, elle peut rouler durant 3 heures à une vitesse maximum de 32 km/h⁶. Cette voiture solaire est présentée dans le monde entier par son concepteur afin de démontrer que l'énergie solaire permet une mobilité propre et économique⁷.

Plus d'une décennie passe sans avancée notable documentée dans le domaine des véhicules terrestres solaires mais tout s'accélère dès la fin des années 1970. En 1977, le Prof. Ed Passerini de l'Université d'Alabama (USA) construit la *Bluebird*, un prototype de voiture solaire. Cette voiture est censée être la première à être propulsée uniquement grâce à l'énergie produite par ses panneaux solaires, sans l'aide

⁵ *Popular Mechanics*, février 1957, vol. 107, no. 2, p. 233.

⁶ *Feuille d'Avis de Lausanne*, 1er septembre 1960, p. 2.

⁷ *Tribune de Lausanne*, 19 juin 1960 ; film présentant la Baker de 1912 transformée en voiture solaire : <https://www.youtube.com/watch?v=CNY0d4EF-s> consulté le 18.04.16.

de batteries. Le véhicule solaire est exposé en 1982 à l'Exposition internationale de Knoxville, dans le Tennessee, exposition qui a pour thème « Energy turns the World ». Elle ne reste par contre qu'un prototype et ne fut jamais reproduite en masse⁸.

Au même moment à l'autre bout du monde, entre 1977 et 1980 (la date exacte n'est pas connue), le Prof. Masaharu Fujita et son équipe de l'Université Denki à Tokyo inventent la première bicyclette solaire puis développent la première voiture solaire japonaise⁹.

En 1979, l'Anglais Alan T. Freeman, concepteur du premier bateau solaire de l'histoire en 1974 (cf. ci-dessous), crée une voiture solaire extrêmement légère (fig. 3)¹⁰. Son véhicule possède trois roues et un panneau solaire sur le toit. Alan Freeman fait enregistrer son véhicule en 1980 et est ainsi le propriétaire et usager du premier véhicule solaire qui peut circuler légalement sur les routes du Royaume-Uni¹¹. L'inventeur anglais conçoit en outre un vélo électrique solaire.



FIGURE 3 : CITICAR (1980).

En 1980, le département d'ingénierie de l'Université de Tel Aviv en Israël met au point, sous la direction d'Arye Braunstein, un modèle de voiture solaire, la *Citicar* (fig. 4). Le véhicule est composé d'un châssis de métal et possède des panneaux solaires sur son toit et son capot. Ceux-ci comprennent 432 cellules produisant 400 W de puissance de crête. La *Citicar* possède 8 batteries de 6 V chacune pour stocker l'énergie photovoltaïque. La *Citicar* pèse un peu moins de 600 kg, peut atteindre une vitesse de 65 km/h (non officialisé) et a une autonomie de 80 km¹².

⁸ PASSERINI E. (1992) – *The Curve to the Future : Food Trees, Solar Cars, War-math, The Fun Economy, and other knowledge essential for a sustainable global future : a one-minute hitch-hiker's guide to the planet earth*, Kendall/Hunt Pub. Co., 302 pp.

⁹ http://sunlake.org/solar/archaeology/archaeology_e/intro_e/archaeology_introduction_e.htm consulté le 15.04.16.

¹⁰ *Electric Boat News*, vol. 21, n°2, 2008, p. 13.

¹¹ <http://creativebloggers.jimdo.com/solar-powered-cars/> consulté le 18.04.16.

¹² <https://discoverbloggers.wordpress.com/2015/06/11/solar-energy-powering-the-auto-industry/> consulté le 18.04.16.

Les premiers exploits et un intérêt accru pour les véhicules solaires

En 1981, les Australiens Hans Tholstrup et Larry Perkins construisent la première voiture de course mue uniquement à l'énergie solaire. Il s'agit de *The Quiet Achiever* (ou *BP Solar Trek*). Leur travail amènera aux premiers exploits à l'énergie solaire et marque un tournant dans l'histoire des voitures solaires.

Hans Tholstrup, chef du projet et Larry Perkins, ainsi que son frère Garry, constructeurs, conçoivent la première voiture solaire de course. *The Quiet Achiever* (fig. 5) a une structure de tubes d'acier, similaire à celle des avions légers, et est recouvert d'une peau en fibre de verre. Il est doté d'une grande fenêtre frontale incurvée ainsi que de fenêtres vitrées latérales en fibre de verre transparente. La puissance du véhicule est de 1 kW et celui-ci est propulsé à une vitesse moyenne de 23 km/h. Le panneau solaire est installé sur le toit et il se compose de 720 cellules solaires. Sa superficie totale est d'environ 8,5 m². Entre décembre 1982 et janvier 1983, Tholstrup et Perkins sont les premiers, avec *The Quiet Achiever*, à traverser un pays, l'Australie, en voiture solaire. Leur parcours, entre Perth et Sydney représente plus de 4 000 km de distance. *The Quiet Achiever* est actuellement conservé au National Museum d'Australie à Canberra. Tholstrup sera en 1987 le fondateur du *World Solar Challenge*, course de voiture solaire à travers l'Australie (cf. ci-dessous)¹³.

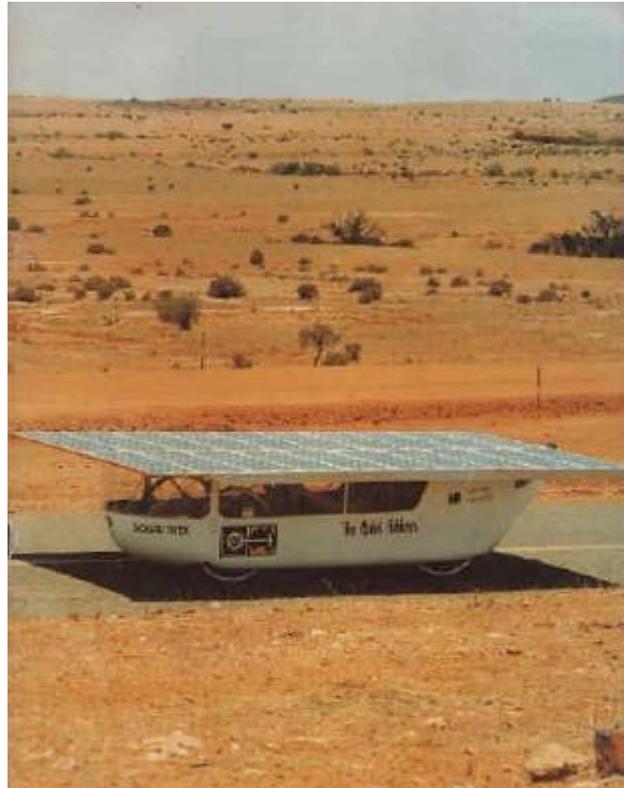


FIGURE 4 : *THE QUIET ACHIEVER* D'HANS THOLSTRUP ET LARRY PERKINS (1982).

L'engouement pour les voitures propulsées à l'énergie solaire devient important, et en 1982, une voiture solaire est présentée au Congrès international de médecine naturelle tenu à Genève¹⁴. Il semble ainsi qu'à ce moment, plus que pour des raisons environnementales, le recours à l'énergie solaire dans le cadre de la mobilité soit vu comme bénéfique pour la santé, puisque les voitures solaires ont l'avantage de ne pas dégager de gaz polluants et nocifs pour la santé humaine.

¹³ http://www.snooksmotorsport.com.au/solartrek/Solar_Trek/bp_solar_car_crossing_of_austral.htm consulté le 18.04.16.

¹⁴ *24 heures*, 16 mars 1982, p. 6.



FIGURE 5 : LA SUNRUNNER DE GREG JOHANSON ET JOEL DAVIDSON (1984).

En 1984, les Américains Greg Johanson et Joel Davidson créent une voiture solaire de course, la *Sunrunner* (fig 6). Cette voiture est dotée de 24 cellules solaires pouvant produire 1 000 W de puissance de crête. La *Sunrunner* n'a aucune batterie pour le stockage de l'énergie. Elle établit le record du monde officiel de vitesse pour une voiture solaire en 1985 à Bellflower, en Californie, à près de 40 km/h. Un autre record est ensuite établi dans le désert de Mojave à 66

km/h. Ce record pour une voiture solaire, sans utilisation de batterie, est rendu public par le Guinness Book des records en 1986¹⁵.

Une voiture propulsée à l'énergie solaire traverse en outre pour la première fois les Etats-Unis en 1984. La traversée entre la Californie et la Floride, un trajet d'environ 3 800 km, dure 44 jours. Le véhicule est équipé de 16 panneaux solaires et a été construit par un groupe d'étudiants d'une université du Missouri, le Crowder College¹⁶.

Les voitures solaires vont bientôt être testées dans les milieux extrêmes. La *Sahara*, voiture solaire conçue par l'électricien automobile suisse Pierre Scholl, entouré de son équipe Scholl Team, parcourt en octobre 1987 quelques 600 km sur les pistes du Hoggar. Ce trajet dans le désert algérien, constituant une étape du Paris-Dakar, fait endurer de rudes conditions à la voiture prototype. Celle-ci est recouverte de capteurs photovoltaïques intégrés au capot et au toit et, de conception très légère, ne pèse que 375 kg¹⁷. La Scholl Team et Pierre Scholl seront par ailleurs très actifs dans les compétitions solaires (voitures et bateaux) dès leurs prémices au milieu des années 1980.



FIGURE 6 : LA SAHARA DANS LE HOGGAR (1987).

¹⁵ *Popular Mechanics*, juin 1985, vol. 162, p. 134.

¹⁶ *L'Express*, 1^{er} septembre 1984.

¹⁷ *Journal de Genève*, 10-11 octobre 1987 ; *Journal de Genève et Gazette de Lausanne*, 30 décembre 1991.

Courses et records de vitesse : un engouement mondial

En juin 1985 est organisée la première édition du *Tour de Sol*, première course au monde de véhicules solaires (fig. 7)¹⁸. Cette course se déroule en Suisse et l'itinéraire parcouru lors de cette première édition va de Romanshorn à Genève (plus de 370 km de distance) en plusieurs étapes. Elle a été imaginée par Hannes Ruesch et Josef Jenni et organisée par la Société suisse pour l'énergie solaire (SSES) afin de faire parler de l'énergie solaire et de son potentiel pour la mobilité. Seules des voitures mues à l'énergie solaire peuvent concourir et cette première édition compte déjà plus de 70 participants. Cette première compétition de véhicules solaires va en inspirer d'autres et le concept du *Tour de Sol* va s'exporter.



FIGURE 7 : PREMIER TOUR DE SOL (1985).



FIGURE 8 : DÉPART DE LA PREMIÈRE ÉDITION DU WORLD SOLAR CHALLENGE (1987).

En 1987 a lieu la première édition du *World Solar Challenge* qui deviendra la course de voiture solaire la plus prestigieuse, considérée bientôt comme le « championnat du monde de véhicules solaires » (fig. 8). Cette course australienne est fondée par Hans Tholstrup, le concepteur du *Quiet Achiever* au début des années 1980 (cf. ci-dessus). Le parcours de la compétition va de Darwin, au nord de l'Australie, à Adelaide au sud du pays, pour un total de 3 000 km. Cette première édition voit s'affronter 24 participants. Le gagnant est la *Sunracer* de General Motors qui remporte la compétition avec une vitesse moyenne de 67 km/h et un peu plus de 5 jours de course. La *Sunracer* marquera un record de vitesse l'année suivante en Arizona avec une pointe à 121 km/h. L'ingénieur Paul MacCready, qui est l'un des pionniers de l'aviation solaire (cf. ci-

¹⁸ Film « Tour de Sol 1985 », disponible auprès de la SSES.

dessous), est le concepteur de la *Sunraycer* et son entreprise AeroVironment est impliquée dans le projet¹⁹.

En été 1987, *Mata-Hari*, une voiture solaire du Touring Club Suisse (TCS) étant arrivée troisième du Tour de Sol 1987 est la première voiture solaire à passer le col du Gothard en Suisse (2 108 m d'altitude)²⁰. En octobre 1988, elle parcourt 151,9 km sans avoir à recharger ses batteries, et à une vitesse moyenne de 36 km/h. C'est alors un record d'endurance pour une voiture solaire, record inscrit au Guinness Book²¹.

A partir de la fin des années 1980, de nombreuses voitures solaires sont élaborées dans les universités pour la participation à des compétitions. Le *Tour de Sol* (1985-1993), la première course de voitures solaires au monde connaît des éditions chaque année entre 1985 et 1993 (avec même deux éditions en 1991). Le *World Solar Challenge* (1987 -) est organisé tous les trois ans puis, dès le début des années 2000, tous les deux ans. Son parcours australien demeure le même, entre Darwin et Adelaide. L'*American Solar Challenge* (1990 -) est une course lors de



FIGURE 9 : SUNRAYCE 95 (1995).

laquelle concourent des collèves et universités américaines. A l'origine et lors de sa première édition en 1990, cette course américaine est dénommée *Sunrayce USA* (en référence à la *Sunraycer GM*) et est sponsorisée par General Motors (fig. 9). Les compétitions suivantes, en 1993, 1995, 1997 et 1999 se font aussi sous le nom *Sunrayce* et en 2001, la course est rebaptisée *Solar American Challenge* et est financée par le Département américain de l'Energie et le Laboratoire national de l'Energie renouvelable. Les éditions se suivent ensuite généralement au rythme d'une tous les deux ans. Sur le continent américain, on peut relever encore le *Solar Car Challenge*²² (1993-) qui fait concourir des étudiants en ingénierie, en sciences et en environnement, ainsi que la version outre-Atlantique du *Tour de Sol* helvétique, l'*American Tour de Sol*²³ (1989-) organisé par la Northeast Sustainable Energy Association (NESEA). Des courses de voitures solaires ont petit à petit été organisées dans de nombreux pays. Au Japon a lieu le *Grand Solar Challenge* avec une première édition en 1992 ainsi que plusieurs autres courses de véhicules solaires dans les années 1990 qui connaissent une participation internationale. Depuis peu, une nouvelle

¹⁹ <http://www.ucar.edu/governance/meetings/oct00/maccready.html> consulté le 20.04.16.

²⁰ *L'Express*, 8 octobre 1987.

²¹ *Le Matin*, 10 octobre 1988.

²² <http://www.solarcarchallenge.org/challenge/> consulté le 21.04.16.

²³ *The Telegraph*, 26 mai 1989.

compétition de voitures solaires est organisée au Chili avec, en 2011, la première édition de la *Carrera Solar Atacama*²⁴ qui se déroule dans le désert d'Atacama (fig. 10)²⁵.



FIGURE 10 : SPIRIT-OF-BIEL/BIENNE III (1994).

En août 1994, un nouveau record de vitesse en voiture solaire, avec des batteries chargées, est établi à 161 km/h par *Spirit-of-Biel/Bienne III* (fig. 11) sur un circuit à Almeria (Espagne). Sans batterie, la voiture de course solaire atteint des pointes de vitesse à 127 km/h²⁶. *Spirit of Biel/Bienne III* avait participé au *World Solar Challenge 1993*, se classant en deuxième position (l'équipe biennoise ayant remporté l'édition 1990 du *World Solar Challenge* avec *Spirit of Biel/Bienne II*). Durant l'été 1995, un nouveau record du monde de vitesse, sans batterie cette fois-ci, est battu par *Spirit of Biel/Bienne III*. Le bolide solaire de l'Ecole d'ingénieur basée à Bienne (Suisse) atteint la vitesse de 148 km/h à Ilanz (Suisse) sur une route cantonale lors du 4ème *Tour de Sol* alpin²⁷. Le véhicule est désormais conservé au Musée des transports de Lucerne (Suisse).

Les premières tentatives de conversion à l'usage quotidien

Au début de l'année 1988 se déroule à Soleure (Suisse) un congrès consacré à l'utilisation de la voiture solaire dans la vie de tous les jours. Ce congrès est organisé par la Fondation du *Tour de Sol* qui voit en l'énergie solaire non seulement un potentiel pour les courses de voitures, mais aussi un enjeu pour la mobilité quotidienne. Plus de 500 personnes participent à cette rencontre²⁸. La voiture solaire commence en effet à faire sa place sur les routes helvétiques : au début de l'année 1988, on ne dénombrait qu'une cinquantaine de véhicules solaires homologués dans le pays²⁹ alors qu'ils sont au nombre de 150 à la fin de l'année³⁰. En février 1989 a lieu un nouveau congrès consacré à l'utilisation de la voiture solaire au quotidien mais cet événement sera surtout l'occasion d'une première mondiale : le Salon de l'Automobile solaire de Berne³¹. Il s'agit du premier salon du genre au monde et il rassemble une vingtaine de voitures solaires. Cet événement est un plein succès puisqu'environ 11 000 personnes s'y sont rendues. Dans le

²⁴ <http://www.carrerasolar.com/?locale=es> consulté le 21.04.16.

²⁵ L'actualité des compétitions de véhicules solaires est disponible sous : <http://www.internationalsolarcarfederation.org/events/> consulté le 19.05.16.

²⁶ *Le Matin*, 16 août 1994.

²⁷ *Le Matin*, 25 août 1995.

²⁸ *L'Impartial*, le 1^{er} février 1988.

²⁹ *24 heures*, 1^{er} février 1988.

³⁰ *Nouvelle revue de Lausanne*, 28 décembre 1988.

³¹ *Nouvelle revue de Lausanne* 28 décembre 1988 ; *L'Express*, 18 février 1989.

cadre de ce salon ont notamment été présentés un camion capable de transporter une charge utile de 650 kg et un projet suisse de voiture pouvant transporter quatre personnes³². Un deuxième Salon de l'Automobile solaire se tient à Bâle (Suisse) en février 1990. L'exposition est alors quatre fois plus vaste – 3000 m² – que la première édition³³. Le troisième salon se déroule à nouveau à Bâle en mars 1991. On dénombre alors plus de 1000 voitures solaires en Suisse³⁴.

Une autre première, plus anecdotique, mais helvétique là aussi, est celle du premier excès de vitesse à l'énergie solaire ! En juin 1989 à Bienne, une voiture solaire engagée dans le Tour de Sol passe à 88 km/h sur une route limitée à 80 km/h. Elle est flashée par un radar pour son excès de vitesse solaire et est soumise à une amende³⁵.

En août 1989 est effectué un voyage à travers les USA avec un véhicule solaire. L'inventeur cette voiture, la *Solectrica* (fig. 12), est James Worden. Il en est aussi l'un des quatre pilotes. Sa voiture solaire, à trois roues, parcourt en deux semaines les 5 150 km qui séparent Los Angeles de Washington. La *Solectrica* est dotée d'un panneau solaire de 3,3 m sur 1,9 m et ne pèse que 122 kg. Elle peut atteindre la vitesse de 144 km /h. D'ailleurs, elle est vainqueur de l'édition 1990 du *Tour de Sol*. James Worden a alors l'espoir de développer une « semi production de masse » de deux modèles de voitures similaires, un modèle « économique » et un modèle « sport »³⁶.

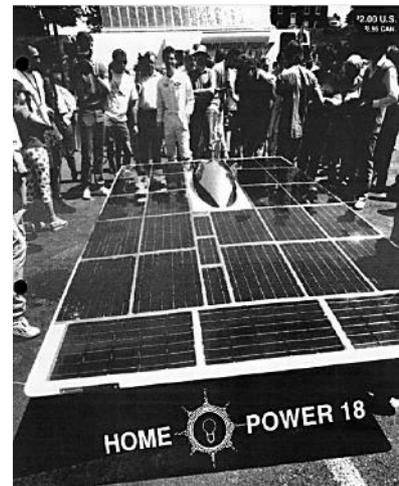


FIGURE 11 : LA SOLECTRICA DE JAMES WORDEN (1989).

Depuis l'an 2000 : tentatives de renouveau

A la fin des années 1990 et malgré le succès des courses, force est de constater que les véhicules solaires n'ont pas connu la percée sur le marché qu'ils laissaient présager au début de la décennie. L'engouement semble s'être rapidement affaibli et les tentatives de commercialisation à grande échelle ont avorté. Cependant, les compétitions de voitures solaires et les exploits individuels destinés à démontrer le potentiel de l'énergie solaire pour la mobilité, notamment pour faire face au réchauffement climatique, sont encore nombreux.

³² 24 heures, 18 février 1989 ; *Nouvelle revue de Lausanne*, 14 février 1989.

³³ *Nouvelle revue de Lausanne*, 16 février 1990.

³⁴ *Nouvelle revue de Lausanne*, 22 mars 1991.

³⁵ 24 heures, 12 juin 1989.

³⁶ *Le Matin*, 6 août 1989.

Entre 2007 et 2008, le Suisse Louis Palmer entreprend le premier tour du monde avec un véhicule électrique en grande partie alimenté à l'énergie solaire avec *Solartaxi* (fig. 13). Conçue avec des universités suisses, *Solartaxi* est voiture électro-solaire à trois roues et capable de transporter deux personnes. Avec ses 6 m² de cellules solaires sur le toit et son poids de 500 kg, il atteint une vitesse de 90 km/h. Louis Palmer peut aussi recharger son véhicule grâce à l'électricité du secteur. Son tour du monde



FIGURE 12 : LOUIS PALMER, CONCEPTEUR ET PILOTE DE *SOLARTAXI* (EN ARRIÈRE-PLAN), EN COMPAGNIE DE BAN KI-MOON, SECRÉTAIRE GÉNÉRAL DE L'ONU (2008).

au départ de la Suisse lui fait parcourir 52 000 km et traverser 38 pays en 17 mois³⁷. Durant ce voyage et à chaque escale, Louis Palmer met son *Solartaxi* au service des personnalités locales afin de les sensibiliser au potentiel de l'énergie solaire: le prince Hassan de Jordanie, le secrétaire général de l'ONU Ban Ki-moon, le prince Albert de Monaco ou le maire de New York, Michael Bloomberg figurent parmi ses

conducteurs les plus prestigieux. Raphaël Domjan (cf. ci-dessous) l'accompagne à bord de *Solartaxi* entre Toronto et Washington. Un film-documentaire réalisé par Erik Schmitt retrace le tour du monde électro-solaire de Louis Palmer³⁸.

³⁷ <http://www.swissinfo.ch/eng/-solar-taxi--completes-circumnavigation/7080972> consulté le 22.04.16.

³⁸ <http://www.solartaxi-themovie.com/> consulté le 22.04.16.

En octobre 2008, le canadien Marcello Da Luz entreprend lui aussi un grand voyage solaire dans le but de sensibiliser ses contemporains à l'utilisation de l'énergie solaire. Avec sa voiture solaire baptisée *Power of One* (fig. 14), il parcourt 15 000 km au Canada en 140 jours. Il pénètre notamment dans les Territoires du Nord-Ouest canadien, prouvant ainsi que l'énergie solaire est efficace aussi au-delà du Cercle polaire. *Power of One*, véhicule monoplace



FIGURE 13 : *POWER OF ONE* À PROXIMITÉ D'INUVIK (CANADA), AU-DELÀ DU CERCLE POLAIRE ARCTIQUE (2008).

de 5 m de long, 1,8 m de large et d'un poids de 300 kg (pilote compris), peut parcourir 200 km sur ses batteries sans soleil ou 500 km en plein jour. Il atteint une vitesse maximum de 120 km/h et passe de 0 à 85 km/h en 6 secondes. Le toit de *Power of One* est recouvert de panneaux solaires monocristallins (Shell Solar) à 15 % de rendement. Les cellules solaires lui fournissent une puissance de crête de 900 W³⁹.



FIGURE 14 : MARC MÜLLER DANS LE CADRE DE SON PROJET *ICARE* (2011).

Entre mai 2010 et septembre 2011, Marc Müller, un ingénieur suisse, réalise un périple autour du monde avec un véhicule élio-solaire dans le cadre de son projet *Icare* (fig. 15). Il traverse, au cours de son voyage, 25 pays et parcourt 20 000 km sur quatre continents⁴⁰.

Développements actuels : quelques projets prometteurs

Si les grandes compétitions de voitures solaires ont toujours lieu régulièrement et qu'elles connaissent un succès important, le développement des véhicules solaires à usage quotidien reste très marginal, notamment en raison de leur prix encore très élevé. Quelques constructeurs ont cependant innové et tenté, avec plus ou moins de succès, de lancer sur le marché des voitures solaires de série. Des projets

³⁹ <http://www.xof1.com/index.php> consulté le 22.04.16.

⁴⁰ MÜLLER M. (2011) - *Un tour du monde en véhicule solaire*, Neuchâtel : Eds. Du Belvédère, 192 p.

en cours, peu nombreux malheureusement mais misant désormais sur un bilan carbone zéro, laissent cependant envisager une nouvelle étape dans la mobilité terrestre solaire.



FIGURE 15 : L'*ELECTRIC* DU CONSTRUCTEUR MONÉGASQUE VENTURI (2006).

Le constructeur monégasque Venturi de l'homme d'affaire et explorateur Gildo Pastor dévoile au Mondial de l'auto de Paris en 2006 un véhicule commercialisé à énergie solaire, l'*Electric* (fig. 16). Cette voiture solaire est équipée de batteries se rechargeant de manière autonome à l'aide non seulement de l'énergie solaire, mais aussi de l'énergie éolienne. Son toit couvert de cellules solaires fait 2,5 m², avec un rendement de 14 %. Elle peut, si nécessaire, stocker de l'électricité du

réseau. Son autonomie atteint 50 km pour une vitesse de 50 km/h. La *Venturi Eclectic* est une voiture de taille modeste (2,86 m de longueur), adaptée au milieu urbain. A côté de l'*Electric*, Venturi présente la même année l'*Astrolab*. Composé de 3,6 m² de cellules photovoltaïques recouvertes d'un film composé de nano-prismes permettant une concentration accentuée de l'énergie solaire, l'*Astrolab* est capable de se mouvoir avec une quantité réduite d'énergie et de se recharger au soleil même en roulant. Pouvant transporter deux personnes en tandem, le véhicule, doté d'une structure en carbone, ne pèse que 280 kg. Ses performances de vitesse atteignent des pointes à 120 km/h et son autonomie est de 110 km⁴¹. Les prix de ces deux véhicules commercialisés sont cependant encore très élevés en comparaison avec les prix des voitures à moteur à combustion, voire même à moteur électrique classique. L'acquisition de l'*Astrolab* par exemple se monte en 2008 à 92 000 euros⁴².

⁴¹ <http://www.v-group.fr/history/> consulté le 22.04.16.

⁴² <http://www.avem.fr/actualite-venturi-devoile-ses-nouveaux-vehicules-electriques-au-mondial-de-l-auto-de-paris-91.html> consulté le 22.04.16.

L'un des véhicules solaires biplaces aujourd'hui disponible sur le marché est commercialisé par Evovelo, coopérative de Malaga (Espagne). Misant l'utilisation de matériaux se régénérant avec le temps, à l'instar des dérivés de bois et les plantes, Evovelo a conçu *Mö* (fig. 19), une voiture solaire urbaine construite avec $\frac{3}{4}$ de matériaux durables. *Mö* peut se mettre en mouvement de manière totalement renouvelable.. Grâce à sa carrosserie courbée, la voiture espagnole intègre des panneaux solaires flexibles « à haut rendement ». Elle a une autonomie de 50 km et roule à environ 50 km/h. Elle est très légère, ne pesant que 85 kg. Son prix en précommande, au début de l'année 2016, est évalué à 4 500 euros⁴⁶.



FIGURE 18 : *Mö* DU CONSTRUCTEUR ESPAGNOL EVOVELO (2016). CRÉDIT PHOTO : EVOVELO.

Le milieu automobile classique voit aussi, après l'arrivée des voitures électriques, le développement de projet de voitures solaires comme la *C-max Solar Energi* de Ford présentée en 2014 qui devrait être disponible chez les concessionnaires prochainement⁴⁷.

A côté des voitures : trains, vélos et mobilité solaire inédite

Si c'est dans le domaine automobile que l'énergie solaire a connu le plus de développement sur le plan de la locomotion terrestre, les autres modes de transports tels que le vélo et le train ont aussi vu des projets solaires voir le jour, tant au niveau de particuliers, pour les vélos notamment, qu'à l'initiative d'entreprises et de collectivités. Des projets totalement innovants en matière de mobilité sont d'ailleurs sur le point de se développer, avec à l'horizon une potentielle révolution du transport terrestre.

Après la bicyclette solaire d'Alan T. Freeman dans les années 1970, le développement de ce mode de locomotion solaire a été relativement peu notable, malgré notamment l'organisation de plusieurs courses de vélos solaires (comme le *World Solar Cycle Challenge* en Australie depuis 1996). Cependant, des projets et exploits isolés méritent d'être mentionnés. En 2010, le français Florian Bailly effectue un trajet de 10 000 km entre la France et Tokyo sur un vélo électrique solaire (fig. 20). Sa bicyclette prototype

⁴⁶ <http://www.efeverde.com/noticias/vehiculo-mo-solar-mercado/> consulté le 04.05.16 ;
<http://www.evovelo.com/en/> consulté le 04.05.16.

⁴⁷ <http://www.objectifeco.com/entreprendre/tendances-sectorielles/aux-etats-unis-le-solaire-permet-d-afficher-des-prix-d-electricite-a-0-05-par-kwh.html> consulté le 30.05.16.



FIGURE 19 : FLORIAN BAILLY ET SON VÉLO SOLAIRE SUR UNE ROUTE DU KAZAKHSTAN (2010).

a été développée avec l'Institut national de l'énergie solaire en France (INES) et est équipée de panneaux transmettant l'énergie solaire à deux batteries lithium fer phosphate fixées à l'avant et à l'arrière de l'engin. L'électricité emmagasinée alimente ainsi un petit moteur fixé sur le pédalier, accélérant la vitesse du coureur. Durant 4 mois, Florian Bailly a parcouru en moyenne 115 km par jour⁴⁸. Après son périple en solitaire, il organise *The Sun Trip*, un rallye de vélos solaires dont la première édition a lieu en 2013 entre la Savoie (France) et Astana (Kazakhstan), en partenariat avec Astana EXPO 2017. La deuxième édition du *Sun Trip* a lieu durant l'été 2015, entre Milan (Italie) où se tenait l'Exposition universelle 2015, et la Turquie⁴⁹. Une prochaine édition est prévue en 2017⁵⁰.

En 2015, le danois Jesper Frausig a mis au point le *Solar Bike* (fig. 21). Ce vélo est muni de capteurs solaires au sein même des roues, remplaçant les habituels rayons, ainsi que d'une batterie en forme de bonbonne fixée sur le cadre. Les roues sont optimisées de telle sorte qu'il y a peu d'ombre gênant l'arrivée du soleil sur les panneaux. Le vélo solaire peut atteindre une vitesse maximale de 50 km/h environ, sa vitesse de croisière étant de 24 km/h. Il peut rouler 70 km lorsque la batterie est complètement chargée. Le *Solar Bike*, décliné en deux types (vélo de route et vélo de terrain) est prêt à être produit à grande échelle⁵¹.



FIGURE 20 : LE SOLAR BIKE (2015). CRÉDIT PHOTO : SOLAR BIKE.

⁴⁸ <http://florianbailly.com/> consulté le 04.05.16.

⁴⁹ <http://thesuntrip.com/> consulté le 04.05.16.

⁵⁰ <http://www.franceinfo.fr/emission/transportez-moi/2015-2016/le-soleil-pour-le-meilleur-et-pour-le-pire-18-03-2016-22-06> consulté le 04.05.16.

⁵¹ <http://ecowatch.com/2015/04/15/solar-bike-jesper-frausig/> consulté le 04.05.16.

L'énergie solaire révèle aussi son potentiel dans le cadre du transport ferroviaire. La SNCB (Société Nationale des Chemins de fer Belges) a développé en 2011 le premier train propulsé par une électricité d'origine exclusivement solaire (fig. 22). La distance du tronçon testé fait 25 kilomètres. Les modules



FIGURE 21 : TRONÇON TEST DU TRAIN SOLAIRE DE LA SNCB (2011).

photovoltaïques ne sont pas placés sur le toit des rames du train, mais sur la toiture d'un tunnel de 3,4 kilomètres entre Anvers et Amsterdam. Près de 16 000 panneaux sont ainsi répartis sur une surface 50 000 m² produisant 3 300 MWh. La réussite de l'expérience semble facilitée par le relief assez plat de la région du Nord d'Anvers⁵².

En 2013, Elon Musk, fondateur de Tesla Motors, rend public son projet de train solaire à induction. Il imagine un train alimenté exclusivement à l'électricité issue du soleil qui pourra atteindre des vitesses de plus de 1 000 km/h en circulant sur des coussins d'airs électromagnétiques à l'intérieur de tubes à basse pression (fig. 23). Il s'agit en fait davantage de capsules propulsées par un champ magnétique généré par des moteurs à induction situés dans les tubes. Recouverts de panneaux solaires, ces tubes devraient selon Elon Musk produire davantage d'énergie (285 MW) qu'il n'en faut pour faire fonctionner le système⁵³. Pour développer ce concept, la société Hyperloop Transportation Technologies a été créée et Dirk Ahlborn, son PDG, estime que le coût de construction de ce nouveau moyen de transport devrait être inférieur à celui d'une ligne de métro souterraine classique. La construction d'un premier tronçon de la ligne devant relier San Francisco à Los Angeles (en 30 minutes et à 1 200 km/h) est envisagé. En Europe, la Slovaquie a montré son



FIGURE 22 : HYPERLOOP TEL QU'IMAGINÉ PAR ELON MUSK

intérêt pour un projet similaire reliant Bratislava à Vienne et Budapest. Les deux voyages prendraient alors respectivement 8 et 10 minutes. Un accord entre la société Hyperloop Transportation Technologies et les autorités slovaques a d'ailleurs été signé⁵⁴. En mai 2016, alors que la société s'apprête à faire une série de tests d'un prototype d'installation à Las Vegas, la SNCF (Société nationale des chemins de fer français) devient l'un des investisseurs d'Hyperloop Tech qui cherche à lever 80 millions de dollars pour le développement de ses projets⁵⁵.

⁵² <http://ecologie.blog.lemonde.fr/2011/06/07/le-premier-train-solaire-roule-en-belgique/> consulté le 04.05.16.

⁵³ http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf consulté le 04.05.16.

⁵⁴ www.radio-monaco.com/news/high-tech/item/10138-la-slovaquie-passe-un-accord-pour-relier-l-autriche-et-la-hongrie-en-hyperloop consulté le 04.05.16.

⁵⁵ 24 heures, 4 mai 2016.

II) La navigation solaire

Les premiers bateaux solaires : des cas isolés

Le premier bateau solaire connu - *Solar Craft 1* - date de 1974 (fig. 24). Il s'agit du prototype d'Alan T. Freeman, un habitant de Rugby en Angleterre, consultant retraité en électrification ferroviaire. Son petit catamaran de 8 pieds possède un panneau solaire lui fournissant l'énergie nécessaire à sa propulsion. Lors de sa navigation inaugurale, le 19 février 1975, Freeman utilise 50 cellules solaires circulaires montées sur le panneau et divisée en 10 modules. Pas la suite et pour améliorer les performances de son embarcation, il installe 2 panneaux de 60 cellules Ferranti. Il possède en outre une batterie qui fournit l'énergie nécessaire en cas de manque momentané de soleil. Cette batterie de 12 V 2,5 Ah est cependant chargée par les cellules solaires quand le bateau est à l'arrêt. Equipé d'un gouvernail amovible et d'un commutateur permettant alternativement de faire tourner l'hélice en pédalant ou grâce aux cellules solaires, *Solar Craft 1* peut atteindre une vitesse maximale de 6 km/h uniquement avec l'énergie du soleil⁵⁶. Après son utilisation par Freeman et avoir été exposé durant plusieurs années dans un musée anglais, *Solar Craft 1* est désormais conservé par la fondation suisse *SolarPlanet* créée par l'eco-explorateur Raphaël Domjan, initiateur du premier tour du monde en bateau solaire entre 2010 et 2012 (voir ci-dessous)⁵⁷.

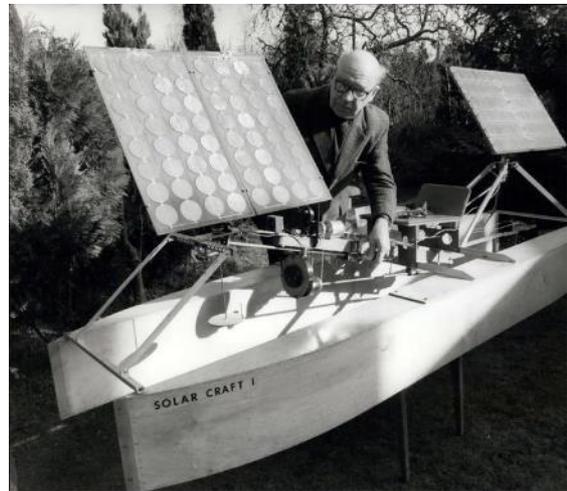


FIGURE 23 : ALAN T. FREEMAN À BORD DE *SOLAR CRAFT 1* (1974). CRÉDIT PHOTO : KEYSTONE PICTURES USA / ALAMY

En janvier 1980, un bateau solaire de plaisance est mis en service sur le lac de l'Ouest à Hangzhou, en Chine. Il s'agit d'une embarcation construite en fibre de verre dotée d'un toit comportant 3 168 cellules solaires capables de fournir une puissance de 120 watts. Elle semble pouvoir naviguer, lors d'un jour ensoleillé, pendant trois heures à une vitesse moyenne de 6 km/h⁵⁸.

⁵⁶ *Electric Boat News*, vol. 21, n°2, 2008, p. 13.

⁵⁷ *24 heures*, 14 août 2014.

⁵⁸ *24 heures*, 12 janvier 1980. L'annonce de cette première en Chine, reprise par les médias mondiaux, est organisée par l'Agence Chine nouvelle, agence de presse nationale souvent pointée du doigt pour être un organe de propagande du régime communiste chinois. N'ayant pas pu vérifier cette information grâce à d'autres sources, c'est ainsi avec réserve que nous mentionnons cette étape dans l'histoire de la navigation solaire.



FIGURE 24 : LE SOLAR GLISSEUR DE ROGER MARTIRE (1982).

En 1982 voit le jour le *Solar glisseur* (fig. 25) de Roger Martire, un fabricant de peinture français. Le *Solar glisseur* est un petit catamaran doté d'un mat sur lequel est fixé un double panneau solaire amovible. Les cellules solaires fournissent une puissance de 100 watts, permettant une vitesse de 3 nœuds (un peu plus de 5 km/h). Le moteur de ce prototype de bateau solaire français a été mis au point par

Martire après plus de dix années de travail passionné⁵⁹. Les démonstrations du *Solar glisseur* prennent place dans plusieurs ports français, ainsi qu'à Monaco, et le bateau solaire est exposé au Salon nautique de Paris en 1982-1983. Le but de Martire est de commercialiser son moteur propre et silencieux. Le Français a ensuite l'ambition de faire la première traversée de la Méditerranée avec un bateau solaire mais ce projet ne s'est pas concrétisé⁶⁰.

L'engouement suisse et l'essor allemand

Après les débuts timides, ou du moins relativement peu documentés, c'est en Suisse, et notamment sur les rives des lacs de Suisse romande, que la navigation solaire va connaître un engouement important. D'abord initiée par des inventeurs ingénieux, un chantier naval spécialisé dans la construction de bateaux solaires, MW-Line, va notamment voir le jour au début des années 1990 au bord du Lac de Neuchâtel. Par ailleurs en Allemagne, les bateaux solaires connaissent un fort succès, notamment en raison de limitations législatives s'appliquant aux bateaux à moteurs classiques.

⁵⁹ *Science et Vie*, n° 789, juin 1983, p. 157

⁶⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=hVprosATCVA> consulté le 25.04.16.

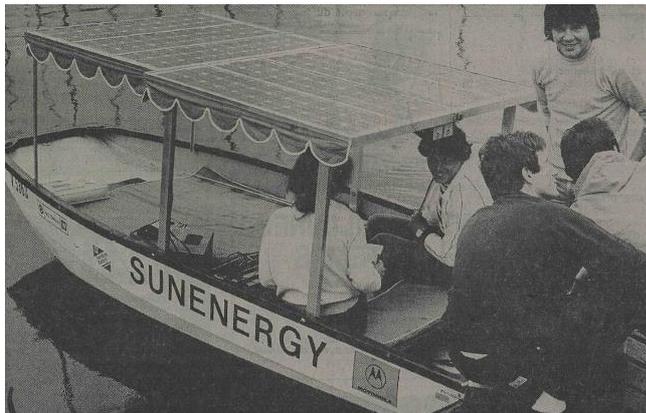


FIGURE 25 : LE *SUNENERGY 1^{ER}* DE MAX SCHICK (1980).

Le 15 août 1980, le *Sunenergy 1^{er}* (fig. 26) construit par Max Schick, patron d'une entreprise de matériel électrosolaire, est mis à l'eau à Vidy, sur le lac Léman (Suisse). Première embarcation solaire sur un lac suisse, il s'agit à l'origine d'une barque classique dotée par Schick d'un toit couvert de cellules solaires. Deux batteries de 12 V chacune permettent de stocker l'énergie du soleil et assurent une

autonomie de 10 h, pour une vitesse maximale de 6 km/h. Durant l'été 1980, le fils de Max Schick, Claude Schick, ainsi que son copilote Jean-Pierre Siegenthaler, testent et contrôlent les performances du bateau. Le *Sunenergy 1^{er}* est exposé la même année Comptoir Suisse de Lausanne⁶¹.

Durant l'été 1981, *La Tribune-Le-Matin*, quotidien de Suisse romande, et la *Radio romande* naviguent à bord d'un bateau solaire entre Yverdon-les-Bains et Soleure, sur les lacs et fleuves suisses. Au fil de cette croisière de 130 km qui dure une semaine, les journalistes embarqués produisent des émissions en direct liées à l'eau et au milieu lacustre. Le bateau solaire, baptisé *l'Arche à Schick* en l'honneur de son concepteur, déjà père du *Sunenergy 1^{er}*, fait 4 m de long, 1,75 m de large, pour un poids de 286 kg⁶². C'est aussi l'équipe de Max Schick qui produit, le même été, le premier bateau solaire au monde destiné à être commercialisé. Ce bateau pouvant transporter quatre personnes est présenté en juin 1981 sur un petit lac à proximité de Sierre (Suisse) et est baptisé du nom dudit lac, *Geronde*⁶³.

⁶¹ 24 heures, 18 août 1980.

⁶² *La Matin - Tribune de Lausanne*, 19 juillet 1991.

⁶³ *L'Impartial*, 9 juin 1981.

Quelques années plus tard, le 1^{er} juillet 1988, la première course de bateaux solaires au monde est organisée à Estavayer-le-Lac (Suisse). Cet évènement sportif et technique est initié par les organisateurs du *Tour de Sol* et se déroule à l'occasion de l'une des étapes de l'édition de 1988 de cette compétition de voitures solaires (cf. ci-dessus)⁶⁴. Au mois de septembre de la même année, une autre course de bateaux solaires est organisée sur le lac Léman. Les concurrents relient Genève à Lausanne en deux jours, avec une escale à Nyon. En août 1990 a lieu une nouvelle

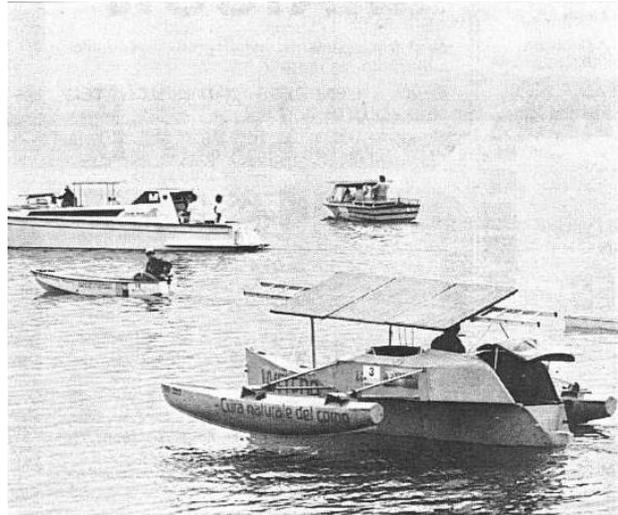


FIGURE 26 : PREMIÈRE ÉDITION DE LA COURSE DES TROIS LACS (1990).

compétition de deux jours entre Morat et Neuchâtel, puis entre Neuchâtel et Bienne, organisée par le groupement neuchâtelois de la Société suisse pour l'énergie solaire (SSES). Il s'agit de la première édition de la course des *Trois Lacs* (fig. 27), qui sera ensuite reconduite annuellement. Deux catégories sont alors prévues : une catégorie « prototype », qui recherche la performance et la vitesse, mais aussi une catégorie « bateaux de séries ». Cette seconde catégorie est créée pour démontrer que les bateaux solaires sont réalisables et qu'ils offrent de nombreux avantages : ils sont alors présentés comme silencieux, ne créant pas de pollution et faciles d'utilisation⁶⁵. Une nouvelle édition de la course a lieu à la fin de l'été 1991 à laquelle participe une majorité de Suisses et d'Allemands. La course se déroule ensuite chaque été.

La présence de nombreux allemands, notamment de provenances munichoise, dans la course des *Trois Lacs* témoigne du succès que connaissent les bateaux solaires dans le sud de l'Allemagne. Cela s'explique en partie en raison de la réglementation allemande alors en vigueur qui restreint, voire interdit, pour des raisons environnementales, la circulation des bateaux à moteur classique sur les cours d'eau et les lacs. Or, les bateaux solaires ne sont pas soumis à ces limitations et constituent ainsi une alternative rapidement très prisées par les Allemands. Alors qu'on ne compte, en 1991, qu'une dizaine de bateaux solaires « amateurs » sur les lacs suisses⁶⁶, on dénote la production du premier bateau solaire produit en série à Koblenz, en Allemagne. Produit à 20 exemplaires, ce bateau solaire élaboré par l'Ecole technique

⁶⁴ *Nouvelle revue de Lausanne*, 16 janvier 1988.

⁶⁵ *L'Impartial*, 27 février 1990.

⁶⁶ *L'Impartial*, 2 septembre 1991.

supérieure de Constance et commercialisé fait 7 m de long, 2,2 m de large et peut atteindre la vitesse de 12km/h⁶⁷.



FIGURE 27 : LE RÂ D'EAU (1992) ET SON CRÉATEUR, PHILIPPE LECHAIRE.

Pour la course de bateaux solaires des *Trois Lacs*, édition 1992, une équipe de l'Ecole d'ingénieurs du canton de Neuchâtel (Suisse) menée par Philippe Lechaire construit un prototype – le *Râ D'Eau* – de 800 kg en fibre de verre, recouvert de 15 m² de panneaux solaires (fig. 28). Les batteries, rechargées en 10 heures, disposent de 12 kWh de réserve qui procure au bateau une autonomie de 8 h, avec un moteur de 3,5 kW. Le *Râ D'Eau* peut

en outre atteindre une vitesse qui dépasse les 15 km/h. Le Fonds national suisse de la recherche énergétique subventionne en bonne partie le projet⁶⁸. Le *Râ D'Eau* remporte l'édition de 1992 et participe aux éditions suivantes, souvent avec beaucoup de succès. Il naviguera en outre en France (à La Rochelle) et à Berlin.

En 1991 est fondé MW-Line SA, un chantier de la région d'Yverdon-les-Bains (Suisse) qui conçoit des bateaux électrosolaires. Le fondateur de la société MW-Line est le constructeur naval Mark Wüst. Le 11 mai 1995, la Ligue suisse pour la protection de la nature (LSPN) inaugure *Solifleur* (fig. 29) à Camp-Pittet, sur le Lac de Neuchâtel (Suisse). Il s'agit du premier bateau solaire d'Europe destiné au transport de public. Il a été élaboré par les Ecoles d'ingénieurs d'Yverdon-les-Bains et du Locle pour les aspects liés à l'énergie solaire et Mark Wüst et son chantier MW-Line en sont les constructeurs. Le *Solifleur* fait de 8,5 m de long, pour une largeur de 2,6 m et peut transporter 12 personnes. Il possède 8 panneaux solaires installés sur son toit, pour une



FIGURE 28 : LE SOLIFLEUR (1995). CRÉDIT PHOTO : THEO SCHMIDT.

⁶⁷ *Nouvelle revue de Lausanne*, 6 août 1991.

⁶⁸ *L'Impartial*, 15 juin 1992.

surface totale de 6 m² de panneaux. Le poids à vide du bateau est de 800 kg et il peut atteindre une vitesse de 15km/h. Le fond du *Solifleur* est en puits transparent afin de permettre à ses passagers de voir les fonds lacustres. Un second bateau du même type est rapidement construit pour étendre l'offre des excursions le long des rives du lac de Neuchâtel⁶⁹.

Suite à cette première expérience de bateau solaire destiné au tourisme et au transport de passagers, d'autres initiatives du même type voient le jour très rapidement. Par exemple, un bateau solaire navigue dès 1996 sur le Danube à Ulm (Allemagne) pour des activités de transport touristique. Ce projet de bateau solaire a été initié par la Fondation Solarstiftung Ulm/Neu-Ulm. Il s'agit d'une embarcation équipée de panneaux solaires pouvant accueillir 15 passagers et naviguer à une vitesse de 6 km/h. Depuis 2004, un autre bateau solaire d'une capacité de 20 passagers viendra d'ailleurs compléter la flotte de Solarstiftung Ulm/Neu/Ulm⁷⁰. En Allemagne également, la société KOPF SA, pionnière dans le domaine de la navigation solaire, met au point en 1996 avec l'Université de Stuttgart et le designer Christoph Behling un catamaran solaire en acier. KOPF SA a depuis réalisé environ 70 bateaux solaires, le plus grand d'entre eux ayant la capacité de transporter 120 passagers. L'un des modèles les plus vendus, à 30 exemplaires, est le *Sol 10*, petite embarcation solaire de près de 4 m de long, produite depuis 2001. En 2000, le *Hamburg Solarshuttle* (fig. 30) est mis à l'eau à Hamburg pour le transport touristique. En 2006, Christoph Behling et SolarLab conçoivent le *Serpentine SolarShuttle*, construit par KOPF SA, qui accueille désormais 40 passagers au Hyde Park de Londres⁷¹.



FIGURE 29 : HAMBURG SOLARSHUTTLE (2000).

⁶⁹ 24 heures, 12 mai 1995.

⁷⁰ <http://www.solarstiftung.eu> consulté le 10.05.16.

⁷¹ <http://www.kopf-solardesign.com/solarboote-und-solarschiffe-fuer-den-tourismus-und-freizeitbereich/> consulté le 20.05.16.



FIGURE 30 : L'UN DES *AQUAREL*, MODÈLE D'*AQUABUS 1050* DE MW-LINE (1997).

En 1997, deux bateaux solaires – *Aquarel 1* et *Aquarel 2* – sont mis à l'eau à Lausanne (fig. 31) (Suisse). Il s'agit de bateaux de 10 m de long disposants de 24 places chacun et destinés à accueillir des passagers pour un transport public le long des rives de la région lausannoise. Les trajets s'effectuent à une vitesse d'environ 10 à 12 km/h. Ces embarcations, des *Aquabus 1050*, sont issues du chantier MW-Line⁷². L'une d'elle est présentée à Monaco la même année. Durant l'été 1999, deux nouveaux bateaux solaires construits par MW-Line viennent compléter la flotte solaire de transport public du littoral lausannois. Un *Aquabus 1050* naviguera aussi à Milan.

Si l'engouement suisse pour les bateaux solaires et la présence importante de bateaux solaires en Allemagne sont particulièrement notables, la navigation solaire fait petit à petit sa place ailleurs dans le monde. Dès 1994, la course de bateaux solaires américaine *Solar Splash* (fig. 32) à laquelle participent des équipes issues de collèges et d'universités est organisée annuellement. Les premières éditions ont lieu dans le Wisconsin (USA) et, pour l'édition 2000, la compétition est déplacée à la Nouvelle-Orléans. Depuis, la course se déplace tous les trois ou quatre ans⁷³.



FIGURE 31 : *SOLAR SPLASH*, ÉDITION 2015.

En 1998 à La Rochelle (France), l'entreprise Alternatives Energies met en service un "passeur à propulsion électro-solaire", bateau-bus solaire ayant la capacité de transporter 30 passagers. En 2009, un nouveau projet rochelais sera par ailleurs achevé, le projet *Copernic*, et plusieurs bateaux-bus sont désormais exploités. Mesurant 15 m de long sur 5 m de large et pouvant accueillir 75 personnes, ils effectuent grâce à leurs 16 m² de panneaux solaires des trajets de navette à l'intérieur du port de La Rochelle⁷⁴.

⁷² *L'Express*, 15 août 1997.

⁷³ <http://solarsplash.com/> consulté le 29.04.16.

⁷⁴ <http://www.avem.fr/actualite-le-bateau-bus-electrique-copernic-investit-les-eaux-de-la-rochelle-715.html> consulté le 28.04.16.



FIGURE 32 : LE *MOBICAT* (2001).

Le 5 juillet 2001, le plus grand bateau solaire construit jusqu'alors est inauguré à Bienne (Suisse). Le *Mobicat* (fig. 32) a une longueur 33 m, une largeur 11 m, une hauteur 5 m et poids à vide 100 tonnes. Il a la capacité de transporter 150 passagers. Sa vitesse moyenne est de 14 km/h mais il peut atteindre une vitesse maximale de 22 km/h. Sa puissance nominale est 20 kW et il possède une autonomie de 170 km. Le *Mobicat* est construit par le Centre de recherche du Mont-Soleil avec soutien financier des Forces motrices bernoises (BKW Energie SA) et de l'Office fédéral de l'énergie, ainsi que de sponsors privés. Le catamaran solaire est notamment utilisé pour transporter des passagers durant Expo.02, l'exposition nationale suisse de 2002 qui s'est déroulée autour des lacs suisses. Ce grand catamaran solaire est depuis lors exploité par la Navigation Lac de Bienne (BSG)⁷⁵.

Le 5 juillet 2001, le plus grand bateau solaire construit jusqu'alors est inauguré à Bienne (Suisse). Le *Mobicat* (fig. 32) a une longueur 33 m, une largeur 11 m, une hauteur 5 m et poids à vide 100 tonnes. Il a la capacité de transporter 150 passagers. Sa vitesse moyenne est de 14 km/h mais il peut atteindre une vitesse

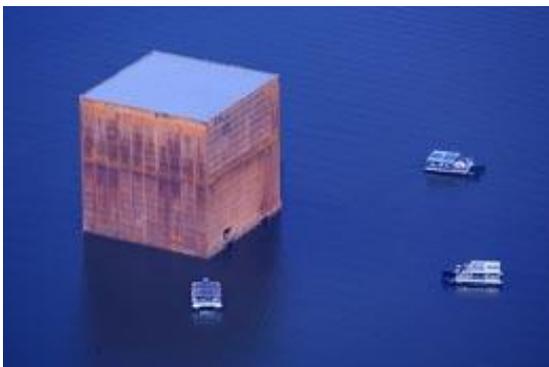


FIGURE 33 : LES *AQUABUS C60* LORS D'EXPO.02 (2002).

A l'occasion d'Expo.02, quatre catamarans *Aquabus C60* (fig. 33) conçus par MW-Line ont en outre transporté un million de passagers en six mois, naviguant en moyenne 12 heures par jour sur les lacs de Suisse occidentale⁷⁶. Le chantier MW-Line de Mark Wüst est repris dès 2009 et s'appelle désormais Grove Boat⁷⁷.

Les premières grandes traversées

A l'instar des voitures solaires, bien que plus tardivement, certains vont tenter de battre des records et de faire des premières, notamment dans le but de faire connaître le potentiel de l'énergie solaire et de promouvoir son utilisation. Dans le domaine de la navigation solaire, ce sont les grandes traversées transocéaniques qui ont suscité l'intérêt. Elles ont ainsi grandement contribué à son développement ultérieur.

⁷⁵ <https://www.allboatsavenue.com/ems-mobicat-le-plus-grand-bateau-solaire-a-passagers-du-monde-fete-ses-10-ans/> consulté le 28.04.16.

⁷⁶ *Points forts*, BCV, n°11, juillet 2007, p. 31.

⁷⁷ *La Région Nord-vaudois*, 13 novembre 2009.



FIGURE 34 : LE *MALTS MERMAID* DE KENICHI HORIE (1996).

Le premier à effectuer un périple nautique grâce à l'énergie solaire est le japonais Kenichi Horie, qui fut déjà, en 1962, le premier à avoir traversé l'océan Pacifique en solitaire à la voile et qui fit plusieurs tours du monde à la voile. En 1985, il effectue un voyage entre Hawaii et Chichi-Jima, une île au sud-est du Japon, en bateau solaire⁷⁸. Parti le 22 mai 1985 d'Hawaii, il effectue un voyage de près de 6 000 km jusqu'à Chichi-Jima sur un bateau solaire de 30 pieds.

Cependant, Kenichi Horie est davantage connu pour avoir réalisé, entre le 20 mars et le 5 août 1996, la première traversée de l'océan Pacifique en bateau solaire. Avec le *Malts Mermaid* (fig. 35), embarcation solaire de sa conception entièrement fabriquée avec des cannettes de bière recyclées (au nombre de 20 000), pesant 379 kg et faisant 31 pieds (environ 9,5 m de long), Kenichi Horie part de Salinas (Equateur) et rejoint Tokyo (Japon). Il parcourt les 16 000 km qui séparent les deux continents en 148 jours. Son exploit est dès lors enregistré dans le Guinness Book comme la traversée la plus rapide de l'océan Pacifique à l'énergie solaire⁷⁹.

Entre décembre 2006 et février 2007, le *Sun21* (fig. 36) accomplit la première traversée de l'océan Atlantique à l'énergie solaire, entre Séville (Espagne), d'où était parti Christophe Colomb, et Le Marin en Martinique. L'initiateur de ce premier projet transatlantique solaire est le médecin suisse Martin Vosseler, fondateur du Forum international sur l'énergie sun21. Le *Sun21*, financé par la médecin Daniela Schlettwein, est un catamaran solaire construit par le chantier MW-Line (cf. ci-dessus) basé dans la région d'Yverdon-les-Bains, en Suisse, et conçu par Mark Wüst et Richard Mesple⁸⁰. Le concept de base du *Sun21* est inspiré des quatre *Aquabus C60* de MW-Line utilisés durant Expo.02 en Suisse. Le *Sun21* a une longueur de 14 m et une largeur de 6,6 m. Le capitaine du bateau solaire durant sa traversée transatlantique est le skipper suisse Michel Thonney. Lors de celle-ci, le bateau solaire suisse navigue à une vitesse moyenne de 4 nœuds en transportant 5 personnes, pour une masse totale de 12 tonnes. La puissance de ses moteurs est de 2 x 8,4 kW et la puissance de ses capteurs solaires de 10 kW. Ce premier exploit transatlantique est mené avec l'aide d'une association de soutien baptisée *transatlantic21*⁸¹. Un

⁷⁸ *United Press International*, 2 août 1985.

⁷⁹ <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/fastest-solar-powered-pacific-crossing-> consulté le 26.04.16 ; <http://www.aparchive.com/metadata/youtube/65586d8e5e6ca42f4d653c889554fc8e> consulté le 27.04.16.

⁸⁰ *L'Impartial*, 17 octobre 2006.

⁸¹ <http://www.transatlantic21.org> consulté le 26.04.16.

data logueur étant installé durant toute la traversée de l'Atlantique à bord du *Sun21*, les données d'ensoleillement de la traversée ont pu être récoltées et permettront par la suite à Raphaël Domjan et à son équipe d'initier le développement du logiciel de routage solaire de *PlanetSolar* (cf. ci-dessous). Raphaël Domjan effectue d'ailleurs sa première expérience en bateau solaire en participant à une partie de la navigation transatlantique du *Sun21*. Après sa traversée, le *Sun21* est donné au WWF Espagne. Le bateau solaire effectue ainsi depuis 2010 des missions de sensibilisations environnementales du monde marin⁸².



FIGURE 35 : LE *SUN21* LORS DE LA PREMIÈRE TRAVERSÉE DE L'ATLANTIQUE EN BATEAU SOLAIRE (2007).

PlanetSolar, premier tour du monde à l'énergie solaire

Le premier tour du monde à l'énergie solaire – le projet *PlanetSolar* – est lui aussi imaginé et mené par un Suisse, l'éco-explorateur Raphaël Domjan. Le projet de tour du monde en bateau solaire est présenté à la presse pour la première fois en 2006. Dès 2008, la construction du bateau, conçu par l'architecte naval néo-zélandais Craig Loomes et financé par l'entrepreneur allemand Immo Ströher, est menée à Kiel en Allemagne par le chantier Knierim Yachtbau. Le *MS TÛRANOR PlanetSolar* (fig. 37) est un gigantesque catamaran de 31 m de long et de 16 m de large. Sa longueur avec les « flaps », ailerons latéraux pouvant s'ouvrir ou se rabattre de façon à augmenter la surface photovoltaïque, passe à 35 mètres et sa largeur à 26 mètres. Le catamaran géant a une hauteur de 6,5 m au-dessus de la ligne de flottaison.

Avec un poids à vide de 89 tonnes, le *MS TÛRANOR PlanetSolar* est équipé d'une surface totale de 536,65 m² de panneaux solaires, pour un total de 825 modules, équipés de 38 000 cellules photovoltaïques

⁸² http://www.wwf.es/colabora/participa/grandes_eventos/embarcat_2015/wwf_solar/ consulté le 17.06.16.

individuelles. Sa puissance de crête est de 93,6 kW et l'énergie produite est récoltée dans 6 blocs de 12 batteries lithium-ion chacun, chaque bloc pesant environ deux tonnes. Ce stockage d'énergie permet au catamaran une autonomie de 3 jours sans ensoleillement. Sa vitesse de croisière est de 5 nœuds bien qu'il puisse atteindre une vitesse maximale de 9 nœuds.

La mise à l'eau du *MS TÛRANOR PlanetSolar* a lieu en mars 2010. Grâce à une collaboration avec l'Ecole d'ingénieur d'Yverdon-les-Bains, MeteoFrance et la société française Adrena, un logiciel simulant le meilleur routage solaire complète le système de navigation de *PlanetSolar*⁸³. L'équipage à bord lors du tour du monde du *MS TÛRANOR PlanetSolar* est composé de quatre personnes : le chef d'expédition est l'initiateur du projet, le suisse Raphaël Domjan; le capitaine est Patrick Marchesseau (France), puis, dès Nouméa (Nouvelle-Calédonie) Erwann le Rouzic (France) ; le chef ingénieur de l'expédition est Christian Ochsenbein (Suisse) ; Jens Langwasser (Allemagne) complète l'équipage comme bosco et pour la navigation (fig. 38). Patrick Marchesseau reprendra la barre comme capitaine pour la traversée du golfe d'Aden et pour l'arrivée à Monaco.



FIGURE 36 : LE *MS TÛRANOR PLANETSOLAR* (2010).

Le 27 septembre 2010, *PlanetSolar* débute son tour du monde à Monaco. Son périple commence par la traversée de l'océan Atlantique. Suivant au plus près la ligne de l'Equateur, qui permet un ensoleillement optimal, c'est ensuite la route via le canal de Panama qui est empruntée par le catamaran solaire. Après une traversée de l'océan Pacifique et de l'océan Indien, le canal de Suez lui

permet de rejoindre la Méditerranée. Le 4 mai 2012, en pénétrant dans le port de Monaco, le *MS TÛRANOR PlanetSolar* achève son tour du monde après 585 jours de navigation et plus de 60 000 km parcourus.

A chaque escale (notamment Miami, Cancun, Sydney, Singapour, Abu Dhabi, etc.), la présence de *PlanetSolar* a servi de plateforme de promotion de l'énergie solaire, et plus généralement des énergies renouvelables. Le premier tour du monde à l'énergie solaire mené par Raphaël Domjan et l'équipage de *PlanetSolar* a connu une notoriété mondiale et a permis d'enregistrer de nombreux records (premier tour

⁸³ *L'Impartial*, 9 juin 2010 ; *Electrosuisse*, bulletin 6, 2011, pp. 22-26.

du monde à l'énergie solaire ; traversée de l'océan Atlantique la plus rapide uniquement à l'énergie solaire ; plus long trajet effectué à l'énergie solaire ; première traversée de l'océan Indien à l'énergie solaire ; première remontée de la Mer rouge à l'énergie solaire ; plus grand bateau solaire au monde, etc.)⁸⁴.



FIGURE 37 : L'ÉQUIPAGE DE PLANETSOLAR À SON ARRIVÉE À MONACO (2012). CRÉDIT PHOTO : CHRISTIAN OCHSENBEIN.

Depuis la fin de son tour du monde, le catamaran *PlanetSolar* a entrepris diverses missions scientifiques et promotionnelles en faveur de l'environnement sur les mers du globe. Son capitaine est aujourd'hui le célèbre navigateur français Gérard d'Aboville. Rebaptisé en 2015 *Race for Water*, du nom de la Fondation qui l'exploite désormais, il est dédié aujourd'hui à des missions de préservation des eaux de la pollution plastique⁸⁵.

Utilisations actuelles et projets d'avenir

A Monaco et depuis 2007, il est possible de traverser le port grâce à une navette solaire, reliant Monaco-Ville au Casino tous les jours entre 8h et 20h⁸⁶. Depuis 2014 par ailleurs, la *Solar1 Monte-Carlo Cup* (fig. 39), championnat du monde de bateaux solaires, a lieu à Monaco⁸⁷. D'autres courses en ont en outre lieu, comme le *DONG Energy Solar Challenge*, une compétition biennale se déroulant aux Pays-Bas⁸⁸, ou le *Solar Splash* qui a lieu depuis 1994 (cf. ci-dessus)⁸⁹.



FIGURE 38 : SOLAR1 MONTE-CARLO CUP (2015).

⁸⁴ DOMJAN R., JAUNIN R. (2012) – *PlanetSolar, premier tour du monde à l'énergie solaire*, Editions Favre. Voir aussi : *Rapport de l'expédition « PlanetSolar » 2004 – 2012*, en ligne : <http://www.rafaeldomjan.com/wp-content/uploads/2013/02/Rapport-dexpedition-premier-tour-monde-solaire-PlanetSolar-flag-71.pdf> consulté le 28.04.16.

⁸⁵ <http://raceforwater.com/bateau-ambassadeur/rfw-naviresolaire> consulté le 28.04.16.

⁸⁶ <http://www.cam.mc/services.php?idservice=14> consulté le 28.04.16.

⁸⁷ <http://www.solar1races.com/intro.php> consulté le 28.04.16.

⁸⁸ <http://www.dutchsolarchallenge.nl/nl/wedstrijd/> consulté le 10.05.16.

⁸⁹ <http://solarsplash.com/> consulté le 10.05.16.



FIGURE 39 : UN MODÈLE DE BATEAU À VOILES SOLAIRES CONÇU PAR SOLAR SAILOR (2009).

Depuis le début des années 2000, le groupe australien Solar Sailor fondé par Robert Dane conçoit des bateaux hybrides et solaires⁹⁰. Robert Dane avait en 1997 proposé un prototype de bateau à voile solaire. Son Marjorie K était en fait un catamaran de série conventionnel sur lequel il avait aménagé une voile solaire. Solar Sailor a notamment développé ce type de voiles solaires pouvant pivoter sur deux axes et s'orienter en fonction

du soleil et du vent (fig. 40). Un prototype navigue durant 10 ans (2000-2010) dans le port de Sydney. Avec une longueur de 21 m et une largeur de 10 m, ce catamaran solaire a la capacité de transporter 100 passagers avec une vitesse maximum de 10 noeuds. Un autre bateau d'une capacité de 186 passagers a été construit pour l'Exposition mondiale de Shanghai, en collaboration avec Suntech Power. Enfin, quatre bateaux solaires capables de transporter 100 personnes chacun sont en services à Hong Kong⁹¹.

Les kayaks sont désormais un nouveau type d'embarcation qui voit l'aménagement de panneaux solaires pour permettre la propulsion. Le constructeur Klepper basé à Rosenheim (Allemagne) a notamment conçu un système d'installation de panneaux solaires destiné aux kayaks et les commercialise⁹². C'est d'ailleurs avec



FIGURE 40 : RAPHAËL DOMJAN ET SON KAYAK SOLAIRE (2015). CRÉDIT PHOTO : ALAIN BLANC / SOLARPLANET.

un kayak solaire (fig. 41) que Raphaël Domjan, auteur du premier tour du monde à l'énergie solaire (cf. ci-dessus), a tenté durant l'été 2015 le Passage du Nord-Ouest (Nord du Canada). Accompagné de la navigatrice bretonne Anne Quéméré, il avait pour objectif, avec la Fondation *SolarPlanet*, de démontrer le grand potentiel de la production d'énergie solaire dans les régions polaires en saison estivale et d'ouvrir ces régions à l'exploration grâce à l'énergie du soleil⁹³.

⁹⁰ <http://ocius.com.au/> consulté le 28.04.16.

⁹¹ <http://en.nauticwebnews.com/809/latest-solarsailor-launched-in-hong-kong/> consulté le 28.04.16.

⁹² <http://www.klepper.com/en/solar-en-2.html> consulté le 10.05.16.

⁹³ <http://www.raphaeldomjan.com/arctic/> consulté le 10.05.16.

Ainsi, sans être pour autant devenue courante, la navigation solaire a réussi aujourd'hui à se faire une place pour le transport de plaisanciers et de touristes, notamment sur les fleuves des grandes villes du monde. On dénote en outre plusieurs constructeurs de bateaux solaires de plaisances, comme *Aqua Watt*, constructeur autrichien de bateaux électriques qui propose plusieurs modèles de bateaux solaires⁹⁴. *Solarwave*, basé en Autriche et en Suisse, construit quant à lui depuis 2010 des bateaux de croisière solaires⁹⁵.

⁹⁴ <http://www.aquawatt.at/> consulté le 20.05.16.

⁹⁵ <http://www.solarwave-yachts.com/english/history/> consulté le 20.05.16.

III) L'aviation solaire

Comme dans le cadre de la propulsion de véhicules terrestres et nautiques, l'aéronautique solaire a débuté sur une base solide de technique électrique et y a adjoint les innovations en matière de technologie photovoltaïque. Dans l'histoire de l'aviation solaire cependant, on trouve une grande séparation, dès les années 1990, entre l'aviation solaire habitée et l'aviation solaire non habitée. Un seul grand objectif anime cependant les acteurs de ces deux développements : le vol perpétuel à l'énergie solaire⁹⁶.



FIGURE 41 : *SUNRISE I* (1974).
une envergure de 9,76

cellules
de 450 W⁹⁷. Avant que
tempête de sable
parvient à faire des
II (fig. 43), une version
septembre 1975. Pour
est abaissé à 10,21 kg.
480 fournissent alors
Les vols tests ne
défaillances mais les
photovoltaïque sont désormais prouvées pour les engins volants.

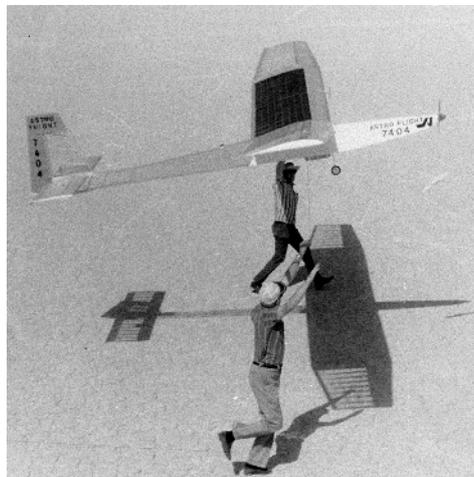


FIGURE 42 : *SUNRISE II* (1975).

Les débuts : le modélisme

Après des tests effectués à l'aide d'avions électriques de modélisme, le 4 novembre 1974 en Californie a lieu le tout premier vol à l'énergie solaire. Il s'agit premier envol de *Sunrise I* (fig. 42), un modèle réduit d'avion conçu par Robert J. Boucher d'Astro Flight Inc., sous contrat avec ARPA (Advanced Research Project Agency) du Département américain de la Défense. Le vol dure alors 20 min à une altitude d'environ 100 m. Ce modèle a

m et pèse 12,25 kg. Il est doté de 4 096 photovoltaïques pour une puissance *Sunrise I* ne soit endommagé dans une quelques mois plus tard, le modèle vols de trois à quatre heures. *Sunrise* revue et révisée, le remplace dès une envergure identique, son poids Les cellules solaires, au nombre de 4 600 W grâce à une efficacité de 14%⁹⁸. seront pas nombreux en raison de possibilités d'utilisation de l'énergie

⁹⁶ Ce chapitre sur l'aviation solaire et sa composition se basent fortement sur le travail de recherche historique effectué en 2008 par André Noth dans le cadre du projet Sky-Sailor du Laboratoire des Systèmes Autonomes de l'EPFZ, Zurich : <http://www.sky-sailor.ethz.ch/docs/Histoire%20de%20l'Aviation%20Solaire%20v2.0-%20A.Noth%202008.pdf> consulté le 29.04.16.

⁹⁷ BOUCHER R. J. (1984) – "History Of Solar Flight", *AIAA paper 84-1429* présenté au AIAA/SAE/ASME, 20th Joint Propulsion Conference, June 11-13, 1984 in Cincinnati, Ohio, pp. 3-4.

⁹⁸ http://www.projectsunrise.info/First_Solar_Powered_Aircraft.html consulté le 29.04.16.

Plus ou moins à la même période, mais de l'autre côté de l'océan Atlantique, l'Allemand Helmut Bruss met au point un modèle réduit d'avion solaire. Apparemment, Helmut Bruss n'a pas connaissance du projet similaire d'Astro Flight Inc. mené par Robert J. Boucher. Les tentatives de vol de Bruss n'aboutissent cependant pas et c'est finalement son ami Fred Militky qui parvient le 16 août 1976 à réaliser trois vols de 150 secondes en atteignant l'altitude de 50 m⁹⁹.

Le modélisme solaire suscite l'engouement et, rapidement, les progrès sont notables, notamment en termes de durée de vol. Dans les années 1990, de nombreux passionnés se distinguent avec les capacités



FIGURE 43 : DAVE BECK ET SON SOLAR SOLITUDE (1996).

de leurs créations solaires miniatures. Par exemple, l'américain Dave Beck du Wisconsin établit deux records (catégorie avion modèle réduit solaire F5 open SOL de la FAI). Le *Solar Solitude* (fig. 44) de Beck parcourt en effet en août 1996 une distance de 38,84 km en ligne droite. En 1998, il parvient à l'altitude record pour un modèle d'avion solaire avec 1 283m¹⁰⁰. Avec son *Solar Excel*, l'allemand Wolfgang Schaeper établit lui aussi à la fin de années 1990 plusieurs records dans cette catégorie : durée (11h 34min et 18s, de vitesse (80,63 km/h), distance en circuit fermé (190 km) et vitesse en circuit fermé (62,15 km/h). Des avions solaires miniatures comme *MikroSol*, *PicoSol* et *NanoSol* de Sieghard Dienlin sont aussi des références importantes dans le modélisme solaire des années 1990. Le plus petit d'entre eux ne pèse que 159,5 gr et a une envergure de 1,11 m seulement¹⁰¹.

⁹⁹ BRUSS H. (1988) – *Solar Modellflug Grundlagen, Entwicklung, Praxis*, Baden-Baden: Verlag für Technik and Handwerk, Baden-Baden, 114 pp.

¹⁰⁰ <http://www.fai.org/records> consulté le 29.04.16.

¹⁰¹ Roberts C., Vaughan M., Bowman W (2002) – « Development of a solar powered micro air vehicle », *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Aerospace Sciences Meetings.

Les pionniers des vols solaires habités

Le 19 décembre 1978, *Solar One* (fig. 45) effectue le premier vol solaire habité de l'histoire lors de son vol inaugural à Lasham Airfield, dans le Hampshire (Angleterre). Cet avion conçu par l'anglais David Williams et Fred To, un architecte de Hong Kong, et la société Solar-Powered Aircraft Developments utilise alors une



FIGURE 44 : SOLAR ONE (1978).

batterie Ni-Cd lui permettant de stocker suffisamment d'énergie solaire pour de courts vols. *Solar One* est un monoplane de 20 m d'envergure, pesant 104 kg à vide et disposant de quatre moteurs qui actionnent une unique hélice. Les cellules utilisées, au nombre de 750, installées sur les ailes, sont alors très peu productives et les constructeurs sont persuadés qu'avec un rendement plus important des cellules des vols seraient envisageables sans batterie. Le 13 juin 1979, *Solar One* effectue un vol à 9 m d'altitude sur 1 126 m de long à nouveau à Lasham Airfield¹⁰². Les deux pilotes du jour sont Ken Stewart et Bill Maidment¹⁰³.



FIGURE 45 : SOLAR RISER (1979).

Le premier vol de *Solar One* à la fin de l'année 1978, sur lequel David Williams et Fred To ont à l'époque peu communiqué, a longtemps été contesté en tant que premier vol solaire habité car le 29 avril 1979¹⁰⁴, Larry Mauro s'envole pour la première fois avec son *Solar Riser* (fig. 46) à l'aéroport Flabob, en Californie. *Solar Riser* est un prototype solaire d'un planeur de sa conception, l'*Easy Riser*. Les

panneaux solaires de son avion lui fournissent 230 W. Là-aussi, une batterie est utilisée et le moteur du *Solar Riser* parvient, après trois heures de charge de la batterie Ni-Cd, à le faire voler durant 10 min. Le

¹⁰² *Le Matin*, 16 juin 1979.

¹⁰³ *Flight international*, 26 mai 1979.

¹⁰⁴ Certaines sources rapportent que ce vol a été effectué le 20 avril 1979 et non le 29 avril 1979.

vol le plus notable de Larry Mauro lui permet de parcourir une distance de 800 m à une altitude comprise entre 1,5 et 5 m¹⁰⁵.

Le premier avion solaire à s'envoler sans avoir préalablement stocké de l'énergie dans des batteries est le *Gossamer Penguin* (fig. 47). Ce prototype a été conçu en Californie par le Dr. Paul B. MacCready¹⁰⁶ et AeroVironment Inc. L'inventeur des avions solaires modèles *Sunrise I* et *Sunrise II*, Robert A. Boucher est alors consultant du projet. Ce sont d'ailleurs la motorisation et les cellules solaires des deux prototypes

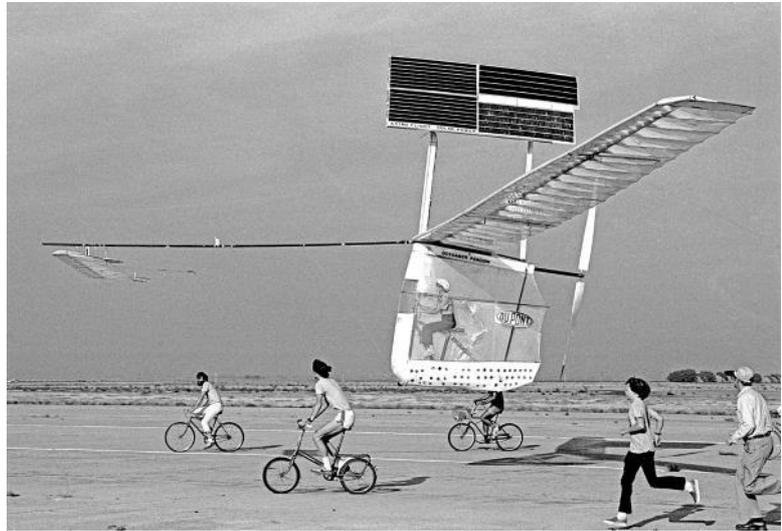


FIGURE 46 : LE GOSSAMER PENGUIN (1980). CRÉDIT PHOTO : DON MONROE.

miniatures de Boucher qui sont récupérées pour la construction du *Gossamer Penguin*. L'avion fait près de 22 m d'envergure et est extrêmement léger, avec un poids de 30 kg à vide. C'est le 18 mai 1980 qu'est effectué le premier vol du *Gossamer Penguin*. Le pilote de ce premier envol est le fils de MacCready, Mashall, qui n'est alors âgé que de 13 ans. Il est choisi pour tester en premier l'avion solaire en raison de sa légèreté, puisqu'il ne pèse alors qu'environ 35 kg. La pilote officielle du *Gossamer Penguin* sera ensuite Janice Brown, une institutrice californienne pilote commerciale et de planeurs, elle aussi très légère (environ 45 kg), et elle effectuera une quarantaine de vol avec l'avion solaire, souvent avec l'aide batteries¹⁰⁷.

¹⁰⁵ BOUCHER R. J. (1984), *op. cit.*

¹⁰⁶ Paul MacCready est le concepteur du *Gossamer Condor*, un avion actionné à la force humaine testé en 1977, et du *Gossamer Albatros*, avion du même type qui accomplit l'exploit de traverser la Manche en 12 juin 1979. *Le Matin*, 31 mai 1980.

¹⁰⁷ <http://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/Albatross/HTML/ECN-13413.html> consulté le 29.04.16.



FIGURE 47 : LE SOLAR CHALLENGER (1981). CRÉDIT PHOTO : DON MONROE.

Malheureusement, le *Gossamer Penguin* ne parvient pas à dépasser quelques mètres d'altitude en vol. Suite à cette expérience et grâce au financement de la compagnie Dupont, McCready entreprend la construction du *Solar Challenger* (fig. 48). Cet avion, conçu dans le but d'effectuer la première traversée de la Manche à l'énergie solaire en vol habité, fait 14,2 m d'envergure pour 90 kg. Il produit 2 500 W grâce à ses 16 128 cellules photovoltaïques et ne possède pas de batterie¹⁰⁸. Le 15 mai 1981, *Solar Challenger* atteint l'altitude de 4 000 m au cours d'un vol d'essai à Shafter, en Californie¹⁰⁹. La pilote de ce vol est Janice Brown. Le 7 juillet 1981, *Solar Challenger* réalise pour la première fois l'exploit de la traversée de la Manche à l'énergie solaire. Piloté par Steve Ptacek et ayant décollé de Cormeilles-en-Vexin, dans le

Val-d'Oise (France), il atterrit cinq heures et demi plus tard et après un vol de 350 km à la RAF Manston, dans le Kent (Angleterre)¹¹⁰.

Günter Rochelt, un fabricant de deltaplane, conçoit en Allemagne au même moment un projet similaire à celui du *Solar Challenger*. Son *Solair I* (fig. 49) est un avion de 16 m d'envergure et de 120 kg basé sur un Canard 2FL d'AviaFiber doté de 2 499 cellules solaires fournissant 1 800 W. Rochelt souhaite lui aussi relier la France à l'Angleterre en traversant la Manche. Il invite par ailleurs Robert J. Boucher et les membres de l'équipe de *Solar Challenger* à venir



FIGURE 48 : SOLAIR I (1981).

découvrir son avion et ceux-ci semblent très impressionnés par la qualité du prototype allemand¹¹¹. L'avion de Günter Rochelt utilise une batterie Ni-Cd pour pouvoir voler car il ne produit pas assez d'énergie pour son décollage. L'Allemand réussira sa traversée de la Manche le 21 août 1983 avec *Solair*

¹⁰⁸ http://library.propdesigner.co.uk/solar_challenger.pdf consulté le 29.04.16.

¹⁰⁹ *Le Matin*, 18 mai 1981.

¹¹⁰ *Le Matin*, 8 juillet 1981 ; pour une galerie de photographies exhaustive des projets de Paul MacCready, et en particulier du Solar Challenger, cf. : <http://www.donaldmonroe.com/index.html> consulté le 29.04.16.

¹¹¹ BOUCHER R. J. (1984), *op. cit.*

I, utilisant l'énergie du soleil mais aussi des thermiques, et volant durant 5h et 41 min. *Solair I* est dorénavant exposé au Deutsches Museum de Munich (Allemagne)¹¹².

Entre 1986 et 1989 aux Etats-Unis, Eric Raymond construit le *Sunseeker 1* (fig. 50). Il entreprend en août 1990 de faire une traversée des Etats-Unis, partant du Sud de la Californie et arrivant en Caroline du Nord après 21 étapes. Le *Sunseeker 1* accumule, durant ce périple, 121 heures de vol. L'avion solaire s'aide, pour le décollage, de l'énergie d'une batterie rechargée à l'énergie du soleil puis ses vols sont entièrement alimentés avec l'énergie produite grâce aux cellules solaires installées sur ses ailes¹¹³.



FIGURE 49 : ERIC RAYMOND ET SON *SUNSEEKER 1* (1990).



FIGURE 50 : *ICARÉ 2* (1996).

En 1996, le planeur solaire *Icaré 2* (fig. 51) conçu par le Prof. Rudolf Voit-Nitschmann de l'Université de Stuttgart remporte le prix d'une compétition aéronautique qui se déroule dans la ville d'Ulm, en Allemagne. Initialement destinée aux avions classiques et organisée en mémoire d'Albrecht Berblinger, un pionnier des machines volantes au début du XIX^{ème}

siècle, la compétition offre, lors de son édition 1996, des prix pour les concurrents qui développeraient des prototypes d'avions solaires. Plusieurs projets sont élaborés à cette occasion et plus de 30 sont annoncés aux organisateurs allemands. Le jour de la compétition cependant, le projet *Icaré 2* est le seul à s'être totalement concrétisé. D'une envergure de 25 m, l'avion solaire est constitué de carbone et d'une structure en nid d'abeille. Il pèse 300 kg, transportant 27 kg de batteries. Les cellules solaires dont il est doté sur les ailes ont une efficacité de 17 %¹¹⁴. D'autres



FIGURE 51 : *SOLAIR II* (1998).

projets initiés dans ce cadre mais développés par la suite sont *O Sole Mio* d'Antonio Bubbico et *Solair II* (fig 52) de l'équipe du Prof. Günter Rochelt, père du *Solair I*. *Solair II* prend d'ailleurs son envol en mai 1998¹¹⁵.

¹¹² [http://www.deutsches-museum.de/de/flugwerft/sammlungen/propellerflugzeuge/solair-1/?sword_list\[\]=solair&no_cache=1](http://www.deutsches-museum.de/de/flugwerft/sammlungen/propellerflugzeuge/solair-1/?sword_list[]=solair&no_cache=1) consulté le 28.04.16.

¹¹³ <http://www.solar-flight.com/projects/sunseeker-i/> consulté le 29.04.16.

¹¹⁴ <http://www.icare-solar.de/index.php/flugzeug> consulté le 29.04.16.

¹¹⁵ <http://www.delago.de/solair/DHome.htm> consulté le 29.04.16.

La quête du vol perpétuel

Parallèlement aux premiers exploits en avion solaire habité et dès 1983, AeroVironment Inc. de Paul MacCready (cf. plus haut) commence à étudier, grâce au financement du gouvernement américain, la faisabilité de vols solaires de longue durée à très haute altitude (abrégé HALE pour *High-Altitude Long Endurance*).



FIGURE 52 : PATHFINER PLUS (1998).

« Environmental Research Aircraft Sensor Technology » (ERAST Program) de la NASA. En 1995, *Pathfinder* atteint l'altitude record de 15 392 m, record qu'il dépassera en 1997 en atteignant 21 802 m d'altitude. En 1998, *Pathfinder* est transformé en *Pathfinder Plus* (fig. 53). Son envergure fait désormais 36 m et ses cellules solaires sont revues. Le but premier de cette transformation est la validation de nouveaux éléments en vue de la construction d'un prototype amélioré, *Centurion*¹¹⁶.

Comme ses prédécesseurs *Pathfinder* et *Pathfinder Plus*, *Centurion* (fig. 54) est un avion solaire ultraléger piloté à distance. Il a pour but de démontrer la capacité de tels engins volants à rester durant une très longue durée (des semaines, voire des mois) à très haute altitude. L'utilité de telles plateformes volantes résiderait alors dans les possibilités qu'elles offrent en termes d'imagerie à distance, de télécommunication et d'exécution de missions scientifiques¹¹⁷. *Centurion* fait près de 62 m d'envergure et



FIGURE 53 : CENTURION (1998).

emporte avec lui 45 kg de capteurs et d'instruments de mesure pour différentes études environnementales, ainsi que 270 kg de matériel permettant la communication et l'imagerie. Il parvient à une altitude maximale de 24 400 m. Sa batterie au lithium lui permet jusqu'à 5 heures d'autonomie, lui

¹¹⁶ NOLL T. E. et al. (2004) – *Investigation of the Helios Prototype Aircraft Mishap, Volume I : Mishap Report*. En ligne: http://www.nasa.gov/sites/default/files/64317main_helios.pdf consulté le 29.04.16.

¹¹⁷ <http://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-054-DFRC.html> consulté le 29.04.16.

offrant la possibilité du vol de nuit mais sur une durée encore insuffisante pour assurer un vol d'une nuit entière.



FIGURE 54 : HÉLIOS (2001). CRÉDIT PHOTO : CARLA THOMAS, COURTESY DFRC, NASA.

Hélios (fig. 55) est le dernier prototype du programme ERAST de la NASA et il devait être l'avion accomplissant pour la première fois le vol perpétuel¹¹⁸. En 2001, *Hélios* atteint une altitude record à 29 524 m. Son second objectif devait être un vol de 24 heures non-stop, incluant au moins 14 heures de vol au-dessus de 50 000 pieds (15 240 m). Or, le 26 juin 2003, *Hélios* est détruit en chutant dans l'océan Pacifique à cause d'une défaillance structurelle. Cet accident met fin au projet ERAST¹¹⁹.

Les Américains ne sont pas les seuls à viser vol perpétuel à haute altitude. En Europe, des projets sont menés et plusieurs plateformes volantes HALE sont développées. *Solitair* est conçu dans le cadre d'une étude du DLR Institute of Flight Systems entre 1994 et 1998. Le but du projet est de parvenir à maintenir un avion non-habité à haute altitude dans les latitudes intermédiaires de l'Europe du Nord, uniquement grâce à l'énergie fournie par ses panneaux solaires. Le modèle réduit utilisé pour démontrer la fiabilité du projet fait 5,2 m d'envergure pour un poids de 8 kg. Sa vitesse maximale atteint 120 km/h¹²⁰. En outre, de janvier 2002 à mars 2003, le projet *Helinet*, financé par des fonds de l'Union Européenne, est mené sous la coordination générale du Politecnico di Torino (Italie). Il a pour objectif lui aussi de mener une étude sur la faisabilité d'une plateforme solaire de haute altitude et d'une endurance perpétuelle, dénommée *Heliplat*. Là aussi, le but est d'obtenir un relai de communication et un point d'observation et d'imagerie privilégié. Le projet conçoit un engin volant de 73 m d'envergure et pesant 750 kg. Un prototype d'*Heliplat* à l'échelle de 24 m d'envergure est développé. Politecnico di Torino a par la suite poursuivi le projet et développé une autre plateforme dénommée *Shampo*¹²¹.

¹¹⁸ *Libération*, 28 juillet 1999.

¹¹⁹ *Science Daily*, 1^{er} juillet 2003.

¹²⁰ http://www.dlr.de/ft/Desktopdefault.aspx/tabid-1388/1918_read-3385/ consulté le 02.05.16.

¹²¹ LAVAGNO E., GERBONI R. (2004) – « Helinet energy subsystem : an integrated hydrogen system for stratospheric applications », in : AFGAN N. H. , BOGDAN Z., DUIC N. (2004) – Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Proceedings of the conference on sustainable development of energy, water and environment systems, 2-7 June 2002, Dubrovnik, Croatia, Lisse/ Abingdon/ Exton (Pa)/ Tokyo : A.A. Balkema Publishers, pp. 129-136.

Parmi les projets de vols solaires sans pilote, l'Université de Stuttgart (Allemagne) développe dès 1991 son premier dirigeable solaire non-habité. *LOTTE 1* (fig. 56), premier dirigeable solaire au monde, est présenté en 1993 dans le cadre de l'Exposition horticole de Stuttgart. Il fait 15,6 m de long pour un diamètre de 4 m, un volume total de 109 m³ et un poids de 98 kg. Il est doté de 7 m² de panneaux solaires. *LOTTE 1* peut voler à une vitesse maximale de 46 km/h et ne dépasse pas 1000 m d'altitude. En 1993, une nouvelle version du dirigeable est conçue et *LOTTE 2* est transporté en Australie à l'occasion du *World Solar Challenge*. Depuis lors, *LOTTE 2* est exposé au Musée d'aviation de Darwin (Australie). *LOTTE 3* voit le jour en mai 1994 et est affecté, dès l'hiver 1996, à des transports tests pour la société Cargo Lifter SA. En 1999, le dirigeable est vandalisé à Leipzig¹²².



FIGURE 55 : *LOTTE 1* (1991).



FIGURE 56 : *SOLONG* (2005).

La barrière de la nuit pour le vol perpétuel est franchie le 22 avril 2005, lorsque *SoLong* (fig. 57), avion solaire piloté à distance, effectue un vol de 24 heures et 11 minutes dans le Colorado, en Californie. *SoLong* a été conçu par Alan Cocconi, fondateur d'AC Propulsion, société californienne qui développe des systèmes de propulsion électrique. Le 1^{er} juin 2005, *SoLong* bat un nouveau record et devient le premier avion solaire sans pilote à effectuer un vol de 48 heures non-stop grâce à l'énergie produite par ses ses

panneaux solaires. Avec des cellules solaires d'une efficacité de 20 % et un matériel (batteries, moteurs électriques) très performant, il parvient à passer deux nuits dans les airs et atterrir avec des batteries encore à moitié chargées¹²³. L'utilisation des thermiques à la manière d'un planeur et l'expérience du pilote se sont aussi révélées décisives pour accomplir cet exploit. *SoLong* est doté de 76 cellules solaires Sunpower, fait 4,75 m d'envergure d'aile et pèse 12,6 kg¹²⁴.

Des projets issus d'universités fleurissent en outre dans la première partie des années 2000 en ce qui concerne le vol solaire non-habité. On peut notamment citer le projet mené en 2002 par l'Université

¹²² <https://web.archive.org/web/20070625210210/http://www.isd.uni-stuttgart.de/lotte/lotte/geschichte.htm> consulté le 02.05.16.

¹²³ <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2005/07/solar-plane-breaks-two-night-flight-barrier-34057.html> consulté le 02.05.16.

¹²⁴ <http://documents.mx/documents/solong-info-24122a.html> consulté le 02.05.16.

royale de Suède ainsi que les prototypes conçus en 2006 par des étudiants du Technion IIT de Haïfa (Israël) qui ont pour but – non atteint – de réaliser le record de distance pour un avion solaire non-habité. Ces projets ont globalement tous pour objectif fournir aux étudiants des compétences dans toutes les phases du développement d'un avion solaire, de la conception aux phases tests¹²⁵.

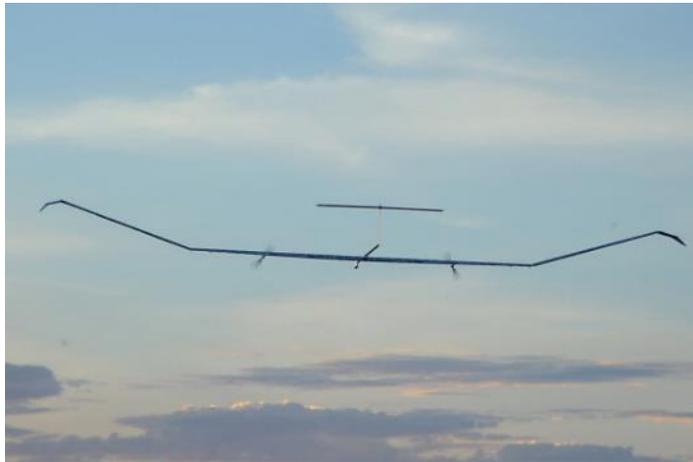


FIGURE 57 : ZÉPHYR 7 (2014).

Une compagnie anglaise d'armement et de recherche militaire, QinetiQ, va elle aussi développer des plateformes solaires de haute altitude et de grande endurance (HALE). Elle teste en décembre 2005 deux avions dirigés à distance au Nouveau-Mexique, les *Zéphyr*. Les *Zéphyr* sont des engins volants non-habités possédant deux moteurs électriques alimentés par des batteries lithium-souffre et rechargées par

l'énergie solaire. Ils pèsent chacun 30 kg et ont une envergure de 16 m. D'abord peu probants, les vols tests sont réitérés et les records d'endurance s'enchaînent ensuite rapidement. Le 10 septembre 2007, un *Zéphyr* effectue au Nouveau-Mexique un vol record de 54 heures, en atteignant durant son périple l'altitude maximale de 17 786 m. En août 2008, *Zéphyr 6* bat à nouveau le record d'endurance avec 82 heures et 37 min de vol en totale autonomie. Avec ses 22,5 m d'envergure et ses 53 kg, *Zéphyr 7* (fig. 58) détient actuellement le record du monde d'endurance pour un véhicule aérien solaire non-habité grâce à son vol qui a duré du 9 au 23 juillet 2010, passant ainsi 336 heures, 22 minutes et 8 secondes dans les airs grâce à l'énergie du soleil¹²⁶. Le projet fait désormais partie du programme High Altitude Pseudo-Satellite (HAPS) d'Airbus qui a effectué en 2014 ses premiers vols tests civils avec *Zéphyr 7* à Dubaï¹²⁷. Au début de l'année 2016, La Grande-Bretagne fait l'acquisition de deux exemplaires de l'avion-drone solaire expérimental *Zéphyr 8*. Il est destiné à pouvoir emporter de petites charges, telles que des capteurs optiques et thermiques. Prévu pour 2017/2018, *Zéphyr 8* doit pouvoir voler 45 jours et évoluer à plus de 21 000 m d'altitude¹²⁸.

¹²⁵ HOFFBORN M. (2009) – *A historical survey of solar powered airplanes and evaluation of it's potential market*, Bachelor thesis in aeronautical engineering, Mälardalen Université (Suède). En ligne: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:280067/fulltext01.pdf> consulté le 02.05.16.

¹²⁶ <https://www.qinetiq.com/media/news/releases/Pages/three-world-records.aspx> consulté le 02.05.16 ; Fédération aéronautique internationale, Record 16052 : <http://www.fai.org/records> consulté le 20.05.16.

¹²⁷ <https://airbusdefenceandspace.com/newsroom/news-and-features/record-breaking-first-civil-flight-for-the-airbus-zephyr/> consulté le 02.05.16.

¹²⁸ <http://www.air-cosmos.com/londres-achete-deux-zephyr-8-62313> consulté le 02.05.16.

Depuis quelques années, la course à la maîtrise du vol solaire d'altitude stratosphérique fait concourir les plus grands. Google avait déjà lancé son projet *Loon*, élaborant des montgolfières stratosphériques qui servent de relais pour connecter à Internet les régions qui en sont dépourvues, mais il rachète en 2014

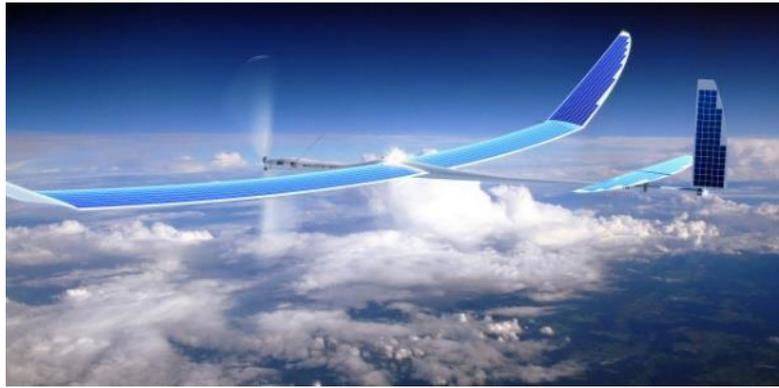


FIGURE 58 : PROJET DE DRONES SOLAIRES DE TITAN AEROSPACE, RACHÉTÉ PAR GOOGLE (IMAGE DE SYNTHÈSE).

Titan Aerospace, société qui développe des drones solaires de haute altitude (fig. 59). Les drones conçus par Titan seraient capables de voler durant cinq ans à plus de 20 000 m d'altitude en fonctionnant à l'énergie solaire. Leur avantage résiderait notamment dans leur coût peu élevé en comparaison à celui des satellites géostationnaires et dans leur capacité à effectuer bon nombre des tâches de ces derniers, comme de l'imagerie ou de la télécommunication¹²⁹. Aujourd'hui, Google travaille sur un projet baptisé *Skybender* qui vise à permettre une connexion Internet extrêmement rapide, transmise par des drones solaires. Il teste cette technologie secrètement dans le spatioport de Virgin Galactic, au Nouveau-Mexique (USA). Le but est de mettre au point la transmission d'une connexion Internet par des ondes millimétriques décuplant considérablement le débit de données (environ 40 fois la 4G)¹³⁰.

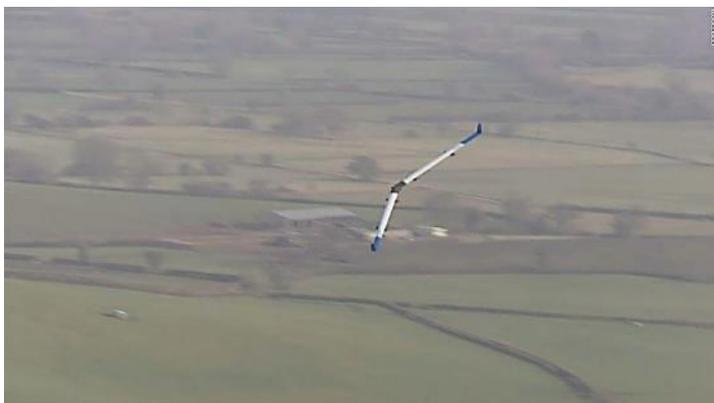


FIGURE 59 : LE DRONE *AQUILA*, CONÇU PAR ASCENTA POUR LE COMPTE DE FACEBOOK (2015).

De son côté, Facebook, s'intéresse lui aussi à des relais de télécommunications via des drones solaires stratosphériques. Comme Google, il cherche notamment à pouvoir assurer une desserte Internet dans les régions où celle-ci est difficile. Ayant initialement lui aussi négocié, en vain, avec Titan Aerospace, il se tourne en 2014 vers l'équipe d'Ascenta, une entreprise anglaise, pour le développement de drones solaires de haute altitude et de longue endurance (HALE)¹³¹. Durant l'été 2015, Facebook a annoncé

¹²⁹ <http://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/2014/04/15/32001-20140415ARTFIG00031-google-achete-les-drones-solaires-titan-aerospace-sous-le-nez-de-facebook.php> consulté le 02.05.16.

¹³⁰ <http://www.lesechos.fr/tech-medias/hightech/021669455962-avec-skybender-google-veut-connecter-le-monde-en-5g-1197449.php#> consulté le 02.05.16.

¹³¹ <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2592035/Facebook-use-solar-powered-British-drones-earths-remotest-spots-internet.html> consulté le 02.05.16.

pouvoir commencer les vols tests d'un prototype de drone solaire HALE baptisé *Aquila* (fig. 60) mis au point avec son équipe anglaise d'Ascenta. Avec une envergure d'un peu plus de 28 m et un poids de moins de 450 kg, il serait capable de voler durant 90 jours à une altitude comprise en 18 000 et 27 000 environ¹³².

Solar Impulse : voler autour du monde à l'énergie solaire

Le projet *Solar Impulse* voit le jour en 2003. Initié par le suisse Bertrand Piccard, auteur du premier tour du monde en montgolfière et successeur d'une famille de pionniers, ce projet a pour but de faire voler perpétuellement un avion solaire en accueillant un pilote. Le projet doit aller jusqu'à la réalisation du premier tour du monde solaire par les airs en réalisant des vols de plusieurs jours et de plusieurs nuits avec un pilote.



FIGURE 60 : SOLAR IMPULSE 1 LORS DE LA MISSION ACROSS AMERICA, SAN FRANCISCO (2013). CRÉDIT PHOTO : SOLAR IMPULSE.

Bertrand Piccard développe son projet avec le pilote et ingénieur suisse André Borschberg et une étude de faisabilité est réalisée par l'Ecole polytechnique de Lausanne (EPFL). Après la conception d'un prototype, le premier avion du projet, *Solar Impulse 1* (fig. 61) (immatriculé HB-SIA), est présenté en juin 2009 à Payerne (Suisse) et effectue ses premiers vols en 2010. Ce prototype constitué de fibre de carbone et de nid d'abeille en sandwich a une envergure de 63,4 m pour 21,8 m de long. Il pèse 1 600 kg. L'avion possède quatre moteurs électriques d'une puissance maximale de 7,35 kW chacun. Ses ailes et son stabilisateur horizontal sont dotés de 11 628 cellules photovoltaïques SunPower encapsulées. *Solar Impulse 1* a pour objectifs de valider les technologies et procédés de construction employés en vue de la réalisation de l'avion destiné à effectuer le tour du monde. Le prototype a alors une vitesse moyenne de 70 km/h et atteint une altitude de 8 500 m (son altitude maximale étant de 12 000 m). Entre les 7 et 8 juillet 2010, André Borschberg accomplit le premier vol solaire habité de plus de 24 heures, nuit incluse, en restant dans les airs 26 heures et 9 minutes¹³³. Entre 2010 et 2013, *Solar Impulse 1* effectue plusieurs vols internationaux accomplis par Bertrand Piccard et par André Borschberg. Entre mai et juillet 2013, le projet mène sa mission *Across America* qui consiste en une série de vol de 16 à 25 heures en faisant des étapes dans les villes principales des Etats-Unis. Suite

¹³² <http://newsroom.fb.com/news/2015/07/new-milestones-in-connectivity-labs-aircraft-and-laser-programs/> consulté le 02.05.16.

¹³³ http://www.nytimes.com/2010/07/09/world/europe/09plane.html?_r=2&hp consulté le 02.05.16.

à cette mission, *Solar Impulse 1* est démonté et rapatrié par avion cargo en Suisse. L'avion a ainsi plus de 400 heures de vol à son actif. Il est mis en vente en 2014 et acquis par la Cité des Sciences de Paris.

Le 9 avril 2014, *Solar Impulse 2* (fig. 62) (immatriculé HB-SIB) est présenté officiellement à Payerne (Suisse). Avion destiné à réaliser l'exploit du tour du monde, il a une envergure de 72 m, envergure supérieure à celle d'un *Boeing 747*, et pèse 2 300 kg. Il est doté de 17 248 cellules solaires SunPower qui fournissent l'énergie



FIGURE 61 : SOLAR IMPULSE 2 À HAWAÏ (2015). CRÉDIT PHOTO : SOLAR IMPULSE.

nécessaire pour le fonctionnement des 4 moteurs électriques de près de 13 000 kW, permettant ainsi d'actionner 4 hélices faisant chacune 4 m de diamètre. Le cockpit non pressurisé de *Solar Impulse 2* permet au pilote de s'allonger pour se reposer durant des vols qui vont durer plusieurs jours. Il effectue ses premiers vols d'essai en juin 2014. Le 9 mars 2015 à 3h12 GMT, *Solar Impulse 2* décolle d'Abu Dhabi (Emirats arabes unis). L'objectif est alors d'effectuer l'exploit du tour du monde avec escales en 5 mois environ, dont 25 jours de vol effectif. En juillet cependant, après avoir dû attendre durant de nombreux jours l'ouverture d'une fenêtre météo favorable au Japon et après avoir enfin pu rallier Hawaï, une des batteries se trouve être endommagée et la suite du tour du monde est reporté à l'année 2016. Le vol entre Nagoya (Japon) et Honolulu (Hawaï, USA)), effectué dès le 28 juin 2015 et piloté par André Borschberg, est cependant jusqu'alors le plus long vol en solitaire sans ravitaillement jamais réalisé. *Solar Impulse 2* est en effet resté en l'air durant 117 heures et 51 minutes, parcourant 7 212 km au-dessus de l'océan Pacifique¹³⁴.

Le tour du monde de *Solar Impulse 2* se poursuit en 2016. Le 21 avril 2016, Bertrand Piccard décolle d'Hawaï pour la seconde partie de la traversée du Pacifique. Après 62 heures et 29 minutes de vol et après avoir parcouru plus de 4 000 km, l'avion solaire atteint San Francisco (USA). Plusieurs étapes se succèdent ensuite pour la traversée des Etats-Unis. Le 23 juin 2016 à 5h38 UTC, Bertrand Piccard atterrit à Séville après un vol transatlantique historique de plus de 71 heures, sur les traces de Charles Lindbergh. *Solar Impulse 2*, avec Bertrand Piccard aux commandes, boucle son tour du monde le 26 juillet à 00h05 UTC en retrouvant son point de départ, Abu Dabi. 503 jours après le départ pour sa première étape, il

¹³⁴ Fédération aéronautique internationale, Record 17595 : <http://www.fai.org/records> consulté le 20.05.16.

devient ainsi le premier avion solaire à avoir effectué un tour du monde sans une goutte de carburant, uniquement grâce à l'énergie solaire¹³⁵.

Plus haut, plus fiable : les projets en cours



FIGURE 62 : SUNSEEKER II (2009).

Pilote du *Sunseeker I* lors du tour de la traversée des Etats-Unis en 1990, Eric Raymond entreprend un voyage en Europe avec un nouvel avion solaire, le *Sunseeker II* (fig. 63), durant l'année 2009. Assisté de l'équipe de SolarFlight, il est ainsi le premier à traverser les Alpes avec un avion solaire, 99 ans après la première traversée des Alpes par les airs effectuée par Geo Chavez. Le *Sunseeker II* est en réalité un planeur d'une

envergure de 17 m muni de panneaux solaires et de batteries qui lui permettent de décoller et de se maintenir en vol. SolarFlight projette le développement d'autres avions solaires, notamment un avion sans pilote HALE ainsi qu'un avion solaire à 6 places¹³⁶.

Depuis 2001, la société allemande PC-Aero fondée par l'ingénieur aéronautique Calin Gologan fabrique des avions électriques ultra-légers, avec l'ambition de les vendre en série. Intégrant des panneaux solaires aux ailes de l'avion, Gologan conçoit *Elektra One Solar* (fig. 64), un avion solaire



FIGURE 63 : ELEKTRA ONE SOLAR (2015). CRÉDIT PHOTO : ARNO TRÜMPER.

monoplace d'une envergure de 13 m. Durant le mois de juillet 2015, cet avion électro-solaire traverse les Alpes à l'énergie solaire, parvenant à dépasser l'altitude de 3 000 m et en parcourant plus de 190 km en 2 heures et demi. *Elektra One Solar* effectue ensuite le trajet du retour en survolant à nouveau les Alpes. L'avion est doté de 280 cellules solaires appliquées sur les ailes et possède des batteries de 11,5 kWh. La production des cellules fournissent à *Elektra One Solar* environ 30 % de l'énergie nécessaire au vol, le reste étant emmagasiné dans ses batteries. L'avion de PC-Aero a une autonomie de 500 km¹³⁷.

¹³⁵ <http://www.solarimpulse.com/> consulté le 05.09.16.

¹³⁶ <http://www.solar-flight.com/news/> consulté le 18.05.16.

¹³⁷ Communiqué de presse de PC-Aero, 25 juin 2015. En ligne : http://www.aircraft-certification.de/tl_files/PC-Aero/images/Press/Press%20Release%20Alps%20Crossing%20Elektra%20One%20Solar_PC-Aero.pdf consulté le 18.05.16.

Enfin, après avoir réalisé le premier tour du monde à l'énergie solaire avec le catamaran *PlanetSolar* entre 2010 et 2012 (cf. ci-dessus), le suisse Raphaël Domjan conçoit un nouveau projet solaire, *SolarStratos*, lancé officiellement en 2014 (fig. 65). Il s'agit d'un projet aéronautique qui a pour but d'emmener pour la première fois un pilote dans la stratosphère, à environ 25 000 m



FIGURE 64 : SOLARSTRATOS (IMAGE DE SYNTHÈSE).

d'altitude, grâce à un avion solaire biplace. Le projet *SolarStratos* entend ainsi démontrer que l'énergie solaire et un moteur électrique permet d'aller au-delà des limites d'altitude qu'un moteur classique imposerait. Avec une équipe internationale constituée d'experts en aéronautique, en technologie photovoltaïque et d'astronautes, l'avion en cours de construction est conçu par l'ingénieur Calin Gologan de PC-Aero (cf. ci-dessus). Il doit faire 24,8 m d'envergure pour une longueur de 8,5 m et un poids de 450 kg (avec pilote). Les 22 m² de cellules solaires d'une efficacité de 24 % doivent permettre de faire fonctionner un moteur électrique de 38 kW qui actionnera une hélice à trois pales de 1,6 m. L'énergie solaire pourra en outre être stockée dans environ 120 kg de batteries Li-Ion d'une capacité de 28 kWh. Il n'est pas prévu que la cabine du prototype soit pressurisée, raison pour laquelle le pilote devra être équipé d'une combinaison spatiale à la manière d'un astronaute. Raphaël Domjan espère pouvoir présenter son avion solaire stratosphérique à la fin de l'année 2016 et faire lui-même le vol record à l'horizon 2018. L'objectif est de rendre par la suite l'avion de la mission *SolarStratos* commercialisable, la phase commerciale ayant pour but d'emmener des passagers dans la stratosphère, à la frontière de l'espace, après le vol record¹³⁸. Les technologies développées par *SolarStratos* et ses partenaires devraient en outre leur permettre de développer, par la suite, des drones solaires stratosphériques (HALE) destinés à la télécommunication et à l'imagerie (cf. ci-dessus concernant les projets HALE).

¹³⁸ <http://www.solarstratos.com/> consulté le 03.05.16.

Annexe 1 : Chronologie synthétique

1955	- La <i>Sunmobile</i> , premier véhicule solaire (miniature), est présentée au public à Chicago.
1960	- Une <i>Baker</i> , voiture électrique datant de 1912, est dotée de panneaux solaires.
1974	- Alan T. Freeman conçoit le premier bateau solaire, <i>Solar Craft 1</i> (Angleterre). - Premier vol de <i>Sunrise 1</i> , premier modèle réduit d'avion fonctionnant à l'énergie solaire (Californie, USA).
1977	- La <i>Blubird</i> (Alabama, USA), voiture solaire fonctionnant sans l'aide de batterie est mise au point. - Une bicyclette et une voiture solaire sont conçues au Japon.
1978	- <i>Solar One</i> effectue le premier vol solaire habité (Angleterre).
1979	- Premier vol du <i>Solar Riser</i> , planeur solaire (Californie, USA). - Alan T. Freeman conçoit une petite voiture solaire, la première à être immatriculée en Angleterre.
1980	- Premier vol du <i>Grossamer Penguin</i> , sans stockage d'énergie préalable (Californie, USA). - La <i>Citicar</i> , petite voiture solaire pouvant atteindre une vitesse de 65 km/h (non officiel) est développée en Israël. - Le <i>Sunenergy 1er</i> , conçu par Max Schick, est mis à l'eau sur le lac Léman (Suisse).
1981	- Après avoir atteint l'altitude record de 4 000 m lors d'un vol d'essai (Californie, USA), <i>Solar Challenger</i> réalise pour la première fois la traversée de la Manche à l'énergie solaire.
1982	- Roger Martire construit le <i>Solar Glisseur</i> , premier bateau solaire français.
1982/83	- <i>The Quiet Achiever</i> (ou <i>BP Solar Trek</i>) conçu par Hans Tholstrup et Larry Perkins traverse l'Australie entre Perth et Sydney.
1985	- Record du monde de vitesse pour une voiture solaire établi à 66 km/h par la <i>Sunrunner</i> (Californie, USA). - Première édition du <i>Tour de Sol</i> , première course de voitures solaires au monde (Suisse). - Kenichi Horie navigue d'Hawaii à Chichi-Jima (Japon) en bateau solaire.
1987	- Première édition du <i>World Solar Challenge</i> (Australie). - La <i>Sahara</i> de Pierre Scholl traverse le désert du Hoggar (Algérie).
1988	- Première course de bateau solaire au monde, à Estavayer-le-Lac (Suisse).
1989	- Voyage à travers les Etats-Unis par James Worden avec <i>Solectrica</i> .
1990	- Première édition de la course de bateaux solaires des <i>Trois Lacs</i> (Suisse). - Eric Raymond traverse les Etats-Unis en 21 vols solaires avec le <i>Sunseeker</i> .
1991	- <i>LOTTE 1</i> , premier dirigeable solaire (Allemagne).
1993	- Vol inaugural de <i>Pathfinder</i> , plateforme solaire HALE (USA).
1994	- Première édition de la <i>Solar Splash</i> (USA).
1994/98	- Projet solaire HALE du DLR dénommé <i>Solitair</i> (Allemagne).
1995	- Le <i>Solifleur</i> conçu par MW-Line, premier bateau solaire destiné au transport de public (Suisse).
1996	- Kenichi Horie effectue la première traversée de l'océan Pacifique en bateau solaire avec le <i>Malts Mermaid</i> en 148 jours. - KOPF SA met au point un catamaran solaire en acier (Allemagne). A Ulm, un bateau solaire navigue pour du transport touristique sur le Danube. - Plusieurs projets d'avions solaires sont développés en Allemagne à l'occasion d'une compétition, dont <i>Icaré 2</i> (Allemagne), <i>O Sole Mio</i> (Italie) et <i>Solair II</i> (Allemagne).
1997	- <i>Aquarel 1</i> et <i>2</i> sont mise à l'eau à Lausanne pour du transport de passager (Suisse). - Robert Dane conçoit un bateau à voile solaire. Il fondera Solar Sailor (Australie).
1998	- <i>Pathfinder</i> est transformé en <i>Pathfinder Plus</i> (USA). - Premier vol de <i>Centurion</i> , une nouvelle plateforme HALE (USA).
2001	- Premier vol d' <i>Hélios</i> , plateforme HALE destiné au vol perpétuel (USA).

	- Le <i>MobiCat</i> , plus grand bateau solaire construit jusqu'alors, est mis à l'eau à Bienne (Suisse).
2002	- Les catamarans <i>Aquabus C60</i> de MW-Line transportent un million de passagers durant Expo.02 (Suisse).
2002/03	- Projet solaire HALE financé par l'Union Européenne baptisé <i>Helinet</i> .
2003	- Lancement du projet <i>Solar Impulse</i> par Bertrand Piccard (Suisse). - Crash d' <i>Hélios</i> et fin du projet HALE de la NASA (USA).
2005	- <i>SoLong</i> , avion solaire piloté à distance, effectue le premier vol de plus de 24 heures, passant la barrière de la nuit (Californie (USA)). - QinetiQ teste ses premiers <i>Zephyr</i> , plateformes solaires HALE. Ils battent rapidement plusieurs records d'endurance.
2006	- Mise sur le marché de l' <i>Electric</i> et de l' <i>Astrolab</i> , deux voitures solaires conçues par Venturi (Monaco).
2006/07	- Le <i>Sun21</i> de Mark Wüst (MW-Line) est le premier bateau solaire à effectuer une traversée de l'océan Atlantique.
2007/08	- Tour du monde de Louis Palmer avec <i>Solartaxi</i> .
2008	- Périple de Marcello Do Luz à travers le Canada avec <i>Power of One</i> .
2009	- Lancement du projet d'avion écologique hybride <i>Eraole</i> par Raphaël Dineli (France).
2010	- Premiers vols de <i>Solar Impulse 1</i> (Suisse). André Borschberg effectue le premier vol solaire habité de plus de 24 heures, nuit incluse. - <i>Zéphyr 7</i> de QinetiQ établit le record du monde d'endurance pour un véhicule aérien solaire non-habité grâce à un vol de 336 heures, 22 minutes et 8 secondes. - Florian Bailly parcourt 10 000 km entre la France et Tokyo avec un vélo solaire.
2010/11	- Tour du monde en voiture solaire effectué par Marc Müller dans le cadre du projet <i>Icare</i> .
2010/12	- Le <i>MS Tûranor PlanetSolar</i> , dont le projet a été initié par Raphaël Domjan, effectue le premier tour du monde accompli exclusivement à l'énergie solaire.
2011	- Un tronçon test de 25 km de train solaire est construit en Belgique
2013	- Mission <i>Across America</i> de <i>Solar Impulse 1</i> . - Elon Musk propose son projet de train solaire à induction, l' <i>Hyperloop</i> . - Conception de la <i>Stella</i> , voiture destinée à concurrencer les voitures familiales classiques (Pays-Bas).
2014	- Lancement du projet d'avion solaire stratosphérique <i>SolarStratos</i> par Raphaël Domjan (Suisse). - Première édition du <i>Solar1 Monte-Carlo Cup</i> , championnat du monde de bateaux solaires (Monaco).
2015	- Première partie du tour du monde de <i>Solar Impulse 2</i> , avec record du plus long vol en solitaire lors de la première partie de la traversée de l'océan Pacifique par André Borschberg. - Périple à travers les Alpes d' <i>Elektra One Solar</i> (Allemagne). - Premiers vols tests d' <i>Aquila</i> , prototype de drone solaire HALE conçu par Ascenta pour Facebook. - Présentation du projet de l' <i>Immortus</i> , voiture de sport solaire (Australie). En Espagne, mise sur le marché de la <i>Mö</i> , voiture solaire urbaine, par le constructeur Evovelo. Au Danemark, le <i>Solar Bike</i> est développé. - Raphaël Domjan entreprend de traverser le Passage du Nord-Ouest (Canada) en kayak solaire. - <i>Solar Impulse 2</i> effectue les premières étapes de son tour du monde, et notamment la première partie de la traversée du Pacifique (Japon-Hawaï).
2016	- <i>Solar Impulse 2</i> traverse l'océan Atlantique et termine le premier tour du monde en avion solaire.

Annexe 2 : Caractéristiques techniques générales de quelques véhicules solaires

Les champs laissés vides le sont en raison de données non disponibles dans les sources utilisées.

Voitures solaires

Nom	Année	Designer, constructeur	Pilote / passagers	Longueur (m)	Largeur (m)	Cellules (nbre ; m ² ; %)	Puissance (W)	Poids (kg, à vide)
<i>Sunmobile</i>	1955	W. G. Cobb, General Motors	-	0.40		12		
<i>Baker</i>	1960	Ch. Escoffery				10 640 ; 2.42 m ² ; 5%	100	
<i>Bluebird</i>	1977	E. Passerini, Uni Alabama						
<i>Citicar</i>	1980	A. Braunstein, Uni Tel Aviv				432	400	600
<i>The Quiet Achiever</i>	1981	H. Tholstrup; L. Perkins; G. Perkins	H. Tholstrup; L. Perkins	4.00	2.10	720 ; 8.5 m ² ; 11%	1 000	150
<i>Sunrunner</i>	1984	G. Johanson; J. Davidson				24 ;	1 000	
<i>Sunraycer</i>	1987	General Motors; P. MacCreedy, AeroVironment; Hughes Aircraft	J. Harvey	6.00	1.82	8 800 ;	1 500	177
<i>Mata-Hari</i>	1987	(?) Constructeurs argoviens (Suisse)	1 / 1	3.33	1.33			
<i>Solectrica</i>	1989	J. Worden	J. Worden			; 6.27 m ² ;		122
<i>Spirit-of-Biel/Bienne II</i>	1990	Ecole d'ingénieur Bienne, R. Jeanneret						
<i>Spirit-of-Biel/Bienne III</i>	1993	Ecole d'ingénieur Bienne, R. Jeanneret						
<i>Electric (*)</i>	2006	Venturi		2.86		; 2.5 m ² ; 14 %		
<i>Astrolab (*)</i>	2006	Venturi				; 3.6 m ² ; 21 %		280
<i>Solartaxi</i>	2007	L. Palmer; Haute Ecole de Lucerne	L. Palmer			; 6 m ² ;		500
<i>Power of One</i>	2008	M. Da Luz	M. Da Luz	5.00	1.80	; ; 15 %	900	230
<i>Stella (*)</i>	2013	Solar Team Eindhoven	1 / 3	4.50	1.70			375
<i>Mö (*)</i>	2015	Evovelo	1 / 1		2.00	1.40		85

Bateaux solaires

Nom	Année	Designer, constructeur	Capitaine, équipage	Longueur (m)	Largeur (m)	Cellules (nbre ; m ² ; %)	Puissance (W)	Poids (kg, à vide)
<i>Solar Craft 1</i>	1974	A. T. Freeman	A. T. Freeman			120		
<i>Sunenergy 1^{er}</i>	1980	M. Schick	M. Schick; C. Schick, J.-P. Siegenthaler					
<i>Solar Glisseur</i>	1982	R. Martire	R. Martire				100	
<i>Râ D'Eau</i>	1992	Ph. Lechaire, Ecole d'Ingénieur, Neuchâtel	Ph. Lechaire			; 15 m ² ;		800
<i>Solifleur</i>	1995	M. Wüst, MW-Line		8.50	2.60	; 6 m ² ;		800
<i>Malts Mermaid</i>	1996	K. Horie	K. Horie	9.50	1.60			379
<i>Hamburg Solarshuttle</i>	2000	Christoph Behling, KOPF SA		27.00	5.30			40 000
<i>Solar Sailor</i>	2000	R. Dane, Solar Sailor		21.00	20.00			
<i>MobiCat</i>	2001	Centre de recherche du Mont-Soleil		33.00	11.00	; 180 m ² ;		100 000
<i>Aquabus C60 (*)</i>	2001	MW-Line		14.00	6.85	; 20 m ² ;		14 000
<i>Sun21</i>	2006	MW-Line	M. Wüst ; M. Thonney ; M. Vosseler ; B. von Scarpatetti ; D. Senn ; B. von Scarpatetti ; R. Domjan	14.00	6.60	; 65 m ² ;	10 000	12 000
<i>MS Tûranor PlanetSolar</i>	2010	C. Loomes ; Knierim Yachtbau	R. Domjan ; P. Marchesseau ; E. le Rouzic ; C. Ochsenein ; J. Langwasse	35.00	26.00	38 000 ; 536.65 m ² ;	93 500	89 000

Avions solaires

Nom	Année	Designer	Pilote(s)	Envergure (m)	Longueur (m)	Cellules (nbre ; m ² ; %)	Puissance (W)	Poids (kg, à vide/pilote)
<i>Sunrise 1</i>	1974	R. J. Boucher, Astro Flight	-	9.75	4.38			12.25/-
<i>Sunrise 2</i>	1975	R. J. Boucher, Astro Flight	-	9.75	4.38			10.21/-
<i>Solar One</i>	1978	D. Williams ; Fred To	K. Stewart ; B. Maidment	20.72	6.70	750		104.32/
<i>Solar Riser</i>	1979	L. Mauro		9.14	2.44		230	55.8/124.7
<i>Grossamer Penguin</i>	1980	P. B. MacCready, Aerovironment	M. MacCready; J. Brown	21.64		16 128		30.84/67.7
<i>Solair I</i>	1980	G. Rochelt	G. Rochelt	16.00	5.40	2 499	1 800	120/200
<i>Solar Challenger</i>	1981	P. B. MacCready, Aerovironment	J. Brown; S. Ptacek	14.8	9.22	16 128	2 500	100/153
<i>Sunseeker</i>	1990	E. Raymond	E. Raymond					
<i>Pathfinder</i>	1993	Aerovironment, NASA	-	29.50	3.60		7 500	250/-
<i>Solair II</i>	1996	G. Rochelt	G. Rochelt	20.00	6.12	13.44 m ² ; 17.3 %	1163	140/230
<i>Icare II</i>	1996	R. Voit-Nitschmann, Uni Stuttgart		25.00	7.70			270/360
<i>Solarflugzeug</i>	1996	U. Heinemann		18.00				190/280
<i>Centurion</i>	1997	Aerovironment, NASA	-	61.80	3.60		31 000	862/-
<i>Hélios</i>	1999	Aerovironment, NASA	-	75.30	3.60			930/-
<i>Zephyr 1</i>	2005	QinetiQ	-	18.00				30/-
<i>SoLong</i>	2005	A. Cocconi, AcPropulsion	-	4.75				12.6/-
<i>Solar Impulse 1</i>	2009	B. Piccard	B. Piccard; A. Borschberg	63.40	21.85	11 748 ; 200 m ² ; 12 %	6 000	1 600
<i>Sunseeker II</i>	2009	E. Raymond	E. Raymond	17.00				
<i>Zephyr 7</i>	2010	QinetiQ	-	22.50				53
<i>Solar Impulse 2</i>	2014	B. Piccard	B. Piccard; A. Borschberg	71.90	22.40	17 248 ; 269.5 m ²		2 300
<i>Elektra One Solar</i>	2015	C. Gologan, PC-Aero		13.00		280		300

* Véhicules construits en série.

Bibliographie

Publications, articles

BOUCHER R. J. (1984) – « History of Solar Flight », *AIAA Paper* 84-1429, June 1984. Extraits:

https://www.researchgate.net/publication/267362353_History_of_Solar_Flight consulté le 07.04.16.

BOUCHER R. J. (1985) – « Sunrise, the world's first solar-powered airplane », *Journal of Aircraft*, vol. 22, n°10, pp. 840-846.

BRUSS H. (1988) – *Solar Modellflug Grundlagen, Entwicklung, Praxis, Baden-Baden: Verlag für Technik and Handwerk*, Baden-Baden, 114 pp.

DOMJAN R., JAUNIN R. (2012) – *PlanetSolar, premier tour du monde à l'énergie solaire*, Lausanne : Editions Favre.

DOMJAN R. (2013) – Rapport de l'expédition « PlanetSolar » 2004 – 2012. En ligne :

http://www.raphaeldomjan.com/wp-content/uploads/2013/02/Rapport-dexpedition_premier_tour_monde_solaire_PlanetSolar_flag_71.pdf consulté le 28.04.16.

HADORN W. (1996) – *Der Geist von Biel – The Spirit of Biel-Bienne – Mit der Kraft der Sonne quer durch Australien*, Bienne : W. Gassmann.

HOFFBORN M. (2009) – *A historical survey of solar powered airplanes and evaluation of it's potential market*, Bachelor thesis in aeronautical engineering, Mälardalen University (Suède). En ligne:

<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:280067/fulltext01.pdf> consulté le 02.05.16.

LAVAGNO E., GERBONI R. (2004) – « Helinet energy subsystem : an integrated hydrogen system for stratospheric applications », in : Afgan N. H. , Bogdan Z., Duic N. (2004) – *Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Proceedings of the conference on sustainable development of energy, water and environment systems, 2-7 June 2002, Dubrovnik, Croatia*, Lisse/ Abingdon/ Exton (Pa)/ Tokyo : A.A. Balkema Publishers, pp. 129-136.

MACCREADY P. B. et alii (1983) – « Sun-Powered Aircraft Designs », *Journal of Aircraft*, Vol. 20, No. 6, juin 1983, pp.487-493. Extrait:

<http://arc.aiaa.org/action/showMultipleAbstracts?doi=10.2514%2F3.44898&href=%2Ftoc%2Fja%2F20%2F6&title=Journal+of+Aircraft+%281983%29> consulté le 15.04.16.

MERTENS K. (2014) - *Photovoltaics : fundamentals, technology, and practice*, Chichester: Wiley, 280 p.

Extraits :

[https://books.google.ch/books?hl=fr&lr=&id=7mJKAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP6&dq=Mertens+K.+\(2014\)+Photovoltaics:+fundamentals,+technology&ots=uDtz_n-4WI&sig=36mRAKHCUOrSZJo2SQpVXHkBNi4#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ch/books?hl=fr&lr=&id=7mJKAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP6&dq=Mertens+K.+(2014)+Photovoltaics:+fundamentals,+technology&ots=uDtz_n-4WI&sig=36mRAKHCUOrSZJo2SQpVXHkBNi4#v=onepage&q&f=false) consulté le 17.04.16.

MORRIS N. (2006) – *Solar Power*, North Mankato, Minn. : Smart Apple Media, 32 pp.

MÜLLER M. (2011) - *Un tour du monde en véhicule solaire*, Neuchâtel : Eds. Du Belvédère, 192 p.

NOLL T. E., BROWN J. M., PEREZ-DAVIS M. E., ISHMAEL S. D., TIFFANY G. C. GAIER M. (2004) – *Investigation of the Helios Prototype Aircraft Mishap, Volume I : Mishap Report*. En ligne:

http://www.nasa.gov/sites/default/files/64317main_helios.pdf consulté le 29.04.16.

NOTH A. (2008) – *Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight*, Phd Thesis, Autonomous Systems Lab, ETH Zürich. En ligne:

http://www.sky-sailor.ethz.ch/docs/Thesis_Noth_2008.pdf consulté le 30.03.16.

NOTH A. (2008) – *Histoire de l'Aviation Solaire*, Laboratoire des Systèmes Autonomes, ETH Zürich, Suisse. En ligne :

<http://www.sky-sailor.ethz.ch/docs/Histoire%20de%20l'Aviation%20Solaire%20v2.0-%20A.Noth%202008.pdf> consulté le 03.05.16.

PASSERINI E. (1992) – *The Curve to the Future : Food Trees, Solar Cars, War-math, The Fun Economy, and other knowledge essential for a sustainable global future : a one-minute hitch-hiker's guide to the planet earth*, Kendall/Hunt Pub. Co., 302 pp.

PICCARD B., ADDOR J.-H. (2010) – *Solar Impulse HB-SIA*, Lausanne: Favre.

PICCARD B. (2015) – *Solar Impulse – Objectif: Tour du monde*, Lausanne: Favre.

PUDNEY P. (2000) – *Optimal energy management for solar-powered cars*, University of South Australia. En ligne:

<http://www.unisanet.unisa.edu.au/staff/PeterPudney/thesis/frontmatter.pdf> consulté le 02.05.16.

ROBERTS C., VAUGHAN M., BOWMAN W. (2002) – « Development of a solar powered micro air vehicle », *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, Aerospace Sciences Meetings.

SHUMAN F. (1911) – « The Power from Sunshine », in *Scientific American*, 30 septembre 1911. En ligne:

<http://www.scientificamerican.com/article/power-from-sunshine/> consulté le 30.05.16.

TAYLOR R. L. (1995) - *The First Human-Powered Flight: The Story of Paul B. MacCready, Jr. and His Airplane, the Gossamer Condor*, Watts Franklin.

THACHER E. F. (2005) - *A Solar Car Primer, A Guide to the Design and Construction of Solar-Powered Racing Vehicles*, New York: Springer, 462 pp.

Liens web

Le moteur électrique et l'énergie photovoltaïque

- <http://www.france-pittoresque.com/spip.php?article5753> consulté le 09.05.16.
- <http://www.afbe.co/index.php/l-afbe/decouvrir-le-bateau-electrique/l-historique> consulté le 09.05.16
- [http://rbmn.free.fr/Dirigeable LA FRANCE 1884.HTML](http://rbmn.free.fr/Dirigeable_LA_FRANCE_1884.HTML) consulté le 09.05.16.
- <http://www.guide-panneaux-photovoltaïques.be/historique-des-panneaux-solaires/> consulté le 25.04.16.

I) Les véhicules solaires terrestres

- http://sunlake.org/solar/archaeology/archaeology_e/intro_e/archaeology_introduction_e.htm consulté le 15.04.16.
- <http://creativebloggers.jimdo.com/solar-powered-cars/> consulté le 18.04.16.
- <https://discoverbloggers.wordpress.com/2015/06/11/solar-energy-powering-the-auto-industry/> consulté le 18.04.16.
- [http://www.snooksmotorsport.com.au/solartrek/Solar Trek/bp solar car crossing of austral.htm](http://www.snooksmotorsport.com.au/solartrek/Solar_Trek/bp_solar_car_crossing_of_austral.htm) consulté le 18.04.16.
- <http://www.ucar.edu/governance/meetings/oct00/maccready.html> consulté le 20.04.16.
- <http://www.solarcarchallenge.org/challenge/> consulté le 21.04.16.
- <http://www.carrerasolar.com/?locale=es> consulté le 21.04.16.
- <http://www.internationalsolarcarfederation.org/events/> consulté le 19.05.16.
- <http://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon.html> consulté le 21.04.16.
- <http://www.swissinfo.ch/eng/-solar-taxi--completes-circumnavigation/7080972> consulté le 22.04.16.
- <http://www.solartaxi-themovie.com/> consulté le 22.04.16.
- <http://www.xof1.com/index.php> consulté le 22.04.16.
- <http://www.v-group.fr/history/> consulté le 22.04.16
- <http://www.avem.fr/actualite-venturi-devoile-ses-nouveaux-vehicules-electriques-au-mondial-de-l-auto-de-paris-91.html> consulté le 22.04.16.
- <http://www.solarteameindhoven.nl/> consulté le 22.04.16.
- http://www.lepoint.fr/automobile/innovations/stella-lux-la-familiale-electrique-solaire-07-08-2015-1955330_652.php consulté le 11.05.16.
- <http://www.evventures.com/the-immortus.html> consulté le 21.04.16.
- <http://www.efeverde.com/noticias/vehiculo-mo-solar-mercado/> consulté le 04.05.16.
- <http://www.evovelo.com/en/> consulté le 04.05.16.
- <http://www.objectifeco.com/entreprendre/tendances-sectorielles/aux-etats-unis-le-solaire-permet-d-afficher-des-prix-d-electricite-a-0-05-par-kwh.html> consulté le 30.05.16.
- <http://florianbailly.com/> consulté le 04.05.16.
- <http://thesuntrip.com/> consulté le 04.05.16.
- <http://www.franceinfo.fr/emission/transportez-moi/2015-2016/le-soleil-pour-le-meilleur-et-pour-le-pire-18-03-2016-22-06> consulté le 04.05.16.
- <http://ecowatch.com/2015/04/15/solar-bike-jesper-frausig/> consulté le 04.05.16.
- <http://ecologie.blog.lemonde.fr/2011/06/07/le-premier-train-solaire-roule-en-belgique/> consulté le 04.05.16.
- http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf consulté le 04.05.16.
- www.radio-monaco.com/news/high-tech/item/10138-la-slovaquie-passe-un-accord-pour-relier-l-autriche-et-la-hongrie-en-hyperloop consulté le 04.05.16

II) La navigation solaire

- <http://www.solarstiftung.eu> consulté le 10.05.16.
- <http://www.kopf-solardesign.com/solarboote-und-solarschiffe-fuer-den-tourismus-und-freizeitbereich/> consulté le 20.05.16.
- <http://solarsplash.com/> consulté le 29.04.16.
- <http://www.avem.fr/actualite-le-bateau-bus-electrique-copernic-investit-les-eaux-de-la-rochelle-715.html> consulté le 28.04.16.
- <https://www.allboatsavenue.com/ems-mobicat-le-plus-grand-bateau-solaire-a-passagers-du-monde-fete-ses-10-ans/> consulté le 28.04.16.
- <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/fastest-solar-powered-pacific-crossing-> consulté le 26.04.16.
- <http://www.transatlantic21.org> consulté le 26.04.16.
- http://www.wwf.es/colabora/participa/grandes_eventos/embarcat_2015/wwf_solar/ consulté le 17.06.16.
- http://raceforwater.com/bateau-ambassadeur/rfw_naviresolaire consulté le 28.04.16.
- <http://www.cam.mc/services.php?idservice=14> consulté le 28.04.16.
- <http://www.solar1races.com/intro.php> consulté le 28.04.16.
- <http://www.dutchsolarchallenge.nl/nl/wedstrijd/> consulté le 10.05.16.
- <http://ocius.com.au/> consulté le 28.04.16.
- <http://en.nauticwebnews.com/809/latest-solarsailor-launched-in-hong-kong/> consulté le 28.04.16.
- <http://www.klepper.com/en/solar-en-2.html> consulté le 10.05.16.
- <http://www.raphaeldomjan.com/arctic/> consulté le 10.05.16.
- <http://www.aquawatt.at/> consulté le 20.05.16.
- <http://www.solarwave-yachts.com/english/history/> consulté le 20.05.16.
- <http://www.delago.de/solair/DHome.htm> consulté le 29.04.16.
- <http://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-054-DFRC.html> consulté le 29.04.16.

III) L'aviation solaire

- http://www.projectsunrise.info/First_Solar_Powered_Aircraft.html consulté le 29.04.16.
- <http://www.fai.org/records> consulté le 29.04.16.
- <http://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/Albatross/HTML/ECN-13413.html> consulté le 29.04.16.
- http://library.propdesigner.co.uk/solar_challenger.pdf consulté le 29.04.16.
- <http://www.donaldmonroe.com/index.html> consulté le 29.04.16.
- [http://www.deutsches-museum.de/de/flugwerft/sammlungen/propellerflugzeuge/solair-1/?sword_list\[\]=solair&no_cache=1](http://www.deutsches-museum.de/de/flugwerft/sammlungen/propellerflugzeuge/solair-1/?sword_list[]=solair&no_cache=1) consulté le 28.04.16.
- <http://www.solar-flight.com/projects/sunseeker-i/> consulté le 29.04.16.
- <http://www.icare-solar.de/index.php/flugzeug> consulté le 29.04.16.
- http://www.dlr.de/ft/Desktopdefault.aspx/tabid-1388/1918_read-3385/ consulté le 02.05.16.
- <https://web.archive.org/web/20070625210210/http://www.isd.uni-stuttgart.de/lotte/lotte/geschichte.htm> consulté le 02.05.16.
- <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2005/07/solar-plane-breaks-two-night-flight-barrier-34057.html> consulté le 02.05.16.
- <http://documents.mx/documents/solong-info-24122a.html> consulté le 02.05.16.
- <https://www.qinetiq.com/media/news/releases/Pages/three-world-records.aspx> consulté le 02.05.16.
- <https://airbusdefenceandspace.com/newsroom/news-and-features/record-breaking-first-civil-flight-for-the-airbus-zephyr/> consulté le 02.05.16.
- <http://www.air-cosmos.com/londres-achete-deux-zephyr-8-62313> consulté le 02.05.16.

- <http://www.lefigaro.fr/secteur/high-tech/2014/04/15/32001-20140415ARTFIG00031-google-achete-les-drones-solaires-titan-aerospace-sous-le-nez-de-facebook.php> consulté le 02.05.16.
- <http://www.lesechos.fr/tech-medias/hightech/021669455962-avec-skybender-google-veut-connecter-le-monde-en-5g-1197449.php#> consulté le 02.05.16.
- <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2592035/Facebook-use-solar-powered-British-drones-earths-remotest-spots-internet.html> consulté le 02.05.16.
- <http://newsroom.fb.com/news/2015/07/new-milestones-in-connectivity-labs-aircraft-and-laser-programs/> consulté le 02.05.16.
- http://www.nytimes.com/2010/07/09/world/europe/09plane.html?_r=2&hp consulté le 02.05.16.
- <http://www.solarimpulse.com/> consulté le 03.05.16.
- <http://www.solar-flight.com/news/> consulté le 18.05.16.
- http://www.aircraft-certification.de/tl_files/PC-Aero/images/Press/Press%20Release%20Alps%20Crossing%20Elektra%20One%20Solar_PC-Aero.pdf consulté le 18.05.16.
- http://www.liberation.fr/sciences/2015/06/19/eraole-le-biplan-solaire-hybride-qui-veut-traverser-l-atlantique_1332627 consulté le 03.05.16.
- <http://www.solarstratos.com/> consulté le 03.05.16.

Sources des illustrations

- Figure 1 : https://en.wikipedia.org/wiki/File:Sunmobile_15_inch_model.jpg consulté le 11.05.16.
- Figure 2 : http://www.greencarreports.com/news/1101986_the-solar-powered-electric-car-from-back-in-1960-video consulté le 11.05.16. Crédit photo : *Hulton Archive / Getty Images*.
- Figure 3 : <http://www.automostory.com/first-solar-car.htm> consulté le 11.05.16.
- Figure 4 : http://www.snooksmotorsport.com.au/solartrek/Solar_Trek/Solar_Trek_The_Journey.htm consulté le 11.05.16.
- Figure 5 : <http://www.solarsolar.com/suncar.html> consulté le 11.05.16.
- Figure 6 : <http://www.eco-logique.ch/2%20referencs/4%20articles-specialises/2013-04-22%20art%20chauffage%20et%20voitures%20%C3%A9lectriques.pdf> consulté le 30.09.16.
- Figure 7 : <https://www.migrosmagazin.ch/bonus/bitte-melde-dich/artikel/teilnehmer-der-tour-de-sol> consulté le 11.05.16.
- Figure 8 : <http://hosting.more-elements.com/MoccaMS/projects/plusenergie/index.php?p=home&pid=78&L=1&host=2titleRolf> consulté le 11.05.16.
- Figure 9 : <http://www.cleanerfutures.com/projects> consulté le 11.05.16.
- Figure 10 : *Le Matin*, 16 août 1994, p. 6.
- Figure 11 : *Home Power Magazine*, numéro 18, août/septembre 1990, photographie de couverture.
- Figure 12 : <http://www.solartaxi.com/blog/2008/09/12/banki/> consulté le 11.05.16.
- Figure 13 : <http://www.vancouversun.com/WolfSolarCar/2739945/story.html> consulté le 11.05.16.
- Figure 14 : <http://www.leregional.ch/N44454/sur-les-traces-d-icare..html> consulté le 25.05.16.

- Figure 15 : https://www.netcarshow.com/venturi/2007-eclectic/1280x960/wallpaper_01.htm consulté le 11.05.16.
- Figure 16 : <http://www.solarteameindhoven.nl/stella-lux/stella-2013/> consulté le 11.05.16. Crédit photo : *Solar Team Eindhoven*.
- Figure 17 : <http://www.theimmortus.com/concept.html> consulté le 11.05.16. Crédit photo : *EVX Ventures Pty Ltd*.
- Figure 18 : <http://www.evovelo.com/vehiculos-solares.php> consulté le 11.05.16. Crédit photo : *Evovelo*.
- Figure 19 : <http://www.ledauphine.com/savoie/2014/05/28/direction-le-kazakhstan-a-velo-solaire> consulté le 11.05.16.
- Figure 20 : <http://ecowatch.com/2015/04/15/solar-bike-jesper-frausig/> consulté le 11.05.16. Crédit photo : *Solar Bike*.
- Figure 21 : http://ecologie.blog.lemonde.fr/files/2011/06/000_Par6315236.jpg consulté le 11.05.16.
- Figure 22 : <http://news.nationalgeographic.com/energy/2015/06/150602-Musk-sonic-hyperloop-gets-California-stretch/> consulté le 11.05.16.
- Figure 23 : <http://www.alamy.com/stock-photo/alan-freeman.html> consulté le 11.05.16. Crédit photo : *Keystone Pictures USA*.
- Figure 24 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Bateau_solaire#/media/File:Bateau-solaire.jpg consulté le 11.05.16.
- Figure 25 : *24 heures*, 18 août 1980, p. 21.
- Figure 26 : *L'Express*, 27 août 1990, p. 3.
- Figure 27 : <http://www.solarly.ch/mapage4/index.html> consulté le 18.05.16.
- Figure 28 : <http://electricvehiclesnews.com/Boats/main.htm> consulté le 18.05.16. Crédit photo : *Theo Schmidt*.
- Figure 29 : <http://christophbehlingdesign.com/work/solar/hamburg-solarshuttle/> consulté le 20.05.16.
- Figure 30 : <http://www.loisirs.ch/loisirs/232/aquarel> consulté le 18.05.16.
- Figure 31 : <http://www.ieee-pels.org/mobile-news/2591-2015-solar-splash-a-great-success> consulté le 18.05.16.
- Figure 32 : <http://www.myswitzerland.com/fr-ch/catamaran-solaire-sur-le-lac-de-bienne.html> consulté le 18.05.16.
- Figure 33 : <http://deco-design.fr-bb.com/t6141-jean-nouvel> consulté le 18.05.16.
- Figure 34 : http://www.solarnavigator.net/history/first_pacific_crossing.htm consulté le 18.05.16.
- Figure 35 : <http://www.eboat.org.uk/solar.php> consulté le 18.05.16.
- Figure 36 : Rapport de l'expédition « PlanetSolar » 200-2012, p. 1. En ligne : http://www.raphaeldomjan.com/wp-content/uploads/2013/02/Rapport-dexpedition_premier_tour_monde_solaire_PlanetSolar_flag_71.pdf consulté le 18.05.16.
- Figure 37 : *Ibid.*, p. 19. Crédit photo : *Christian Ochsenbein*.
- Figure 38 : <http://www.solar1races.com/rules/> consulté le 18.05.16.
- Figure 39 : <http://www.solarchoice.net.au/blog/floating-on-to-greener-pastures/> consulté le 18.05.16.

- Figure 40 : <http://www.franceinfo.fr/emission/france-info-extreme/2015-ete/en-kayak-solaire-face-au-grand-nord-canadien-01-08-2015-10-40> consulté le 18.05.16. Crédit photo : *Alain Blanc / SolarPlanet.*
- Figure 41 : Rapport : *Sunrise Photo History*, p. 2. En ligne : <http://astroboob.com/show-and-tell/x-sunrise.pdf> consulté le 18.05.16.
- Figure 42 : *Ibid.*, p. 8.
- Figure 43 : <http://www.rcgroups.com/articles/ezonemag/1997/krc/nonscale.htm> consulté le 18.05.16.
- Figure 44 : <http://www.youtube.com/watch?v=LDZRVILH6QI> consulté le 18.05.16.
- Figure 45 : <http://ecoble.com/2009/02/16/sun-power-jet-fuel-for-the-21st-century/> consulté le 18.05.18.
- Figure 46 : <http://www.donaldmonroe.com/index.html> consulté le 18.05.16. Crédit photo : *Don Monroe.*
- Figure 47 : <http://www.donaldmonroe.com/index.html> consulté le 18.05.16. Crédit photo : *Don Monroe.*
- Figure 48 : <http://www.solar-flight.com/dedication/> consulté le 18.05.16.
- Figure 49 : <http://www.solar-flight.com/projects/sunseeker-i/> consulté le 18.05.16.
- Figure 50 : <http://ecotopie.chez.com/solavion.html> consulté le 18.05.16.
- Figure 51 : <http://www.delago.de/solair/DSol2B3.htm> consulté le 18.05.16.
- Figure 52 : <http://www.fiddlersgreen.net/models/aircraft/NASA-Pathfinder.html> consulté le 18.05.16.
- Figure 53 : https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_Centurion consulté le 18.05.16.
- Figure 54 : <http://apod.nasa.gov/apod/ap031220.html> consulté le 18.05.16. Crédit photo : *Carla Thomas, courtesy DFRC, NASA.*
- Figure 55 : <http://www.aerobernie.bplaced.net/Tauschecke-Zeppelin.html> consulté le 18.05.16.
- Figure 56 : <http://machinedesign.com/news/solar-powered-uav-flies-two-days-straight> consulté le 18.05.16.
- Figure 57 : <http://www.flugrevue.de/militaerluftfahrt/uav/zephyr-absolviert-testflug-in-dubai/592966> consulté le 18.05.16.
- Figure 58 : <http://www.fastcompany.com/3029099/most-innovative-companies/google-buys-titan-aerospace-the-drone-company-facebook-had-its-eye> consulté le 18.05.16.
- Figure 59 : <http://money.cnn.com/2015/04/07/technology/facebook-drone-in-flight-f8> consulté le 18.05.16.
- Figure 60 : https://www.bluewin.ch/fr/conso/solar_impulse/projet/grandes-etapes-du-projet-solar-impulse.html consulté le 18.05.16. Crédit photo : *Solar Impulse.*
- Figure 61 : http://www.liberation.fr/futurs/2015/07/15/solar-impulse-2-bloque-a-hawai-pour-plusieurs-mois_1348510 consulté le 18.05.16. Crédit photo : *Solar Impulse.*
- Figure 62 : <http://www.solar-flight.com/gallery/sunseeker-ii/> consulté le 18.05.16.
- Figure 63 : <http://www.aircraft-certification.de/index.php/press-release.html> consulté le 18.05.16. Crédit photo : *Arno Trümper.*
- Figure 64 : <http://www.raphaeldomjan.com/projets/solarstratos/> consulté le 05.09.16.