

# Avion Électrique

—  
Eco-conception



22 Mars 2017

Renato Carinha ~ Lola Molines ~ Luis Oraá

**INSA**  
LYON

# Sommaire

---

## Histoire

Différentes technologies

Problématiques et solutions

Etude de cas: Solar Impulse 2

L'éco-conception

ACV de l'avion électrique

Futur de l'AE

## Conclusion

# HISTOIRE

# Histoire

Pathfinder (1981-1997)



Figure 6.1 - Solar Aircraft Evolution through the ERAST Program

1974 Glossamer Penguin. 1<sup>ère</sup> vol avec propulsion solaire + vélo.

1981 NASA Solar Challenge. Puissance: 2.5 kW

1981-2003 ERAST PROGRAM

2007 Premier vol totalement électrique monoplace en France

2008 ETA: German Project

2009 Solar Impulse

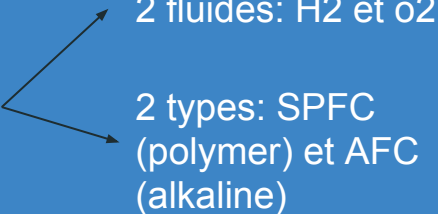
2010 Premiers avions totalement électriques commerciales

2010-2017 Développement de plusieurs projets

2016 Solar Impulse 2: Tour du monde

# DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES

# Types de production et stockage:

- **Batteries**: limitées par leur poids. 1ere source de puissance.
  - **Générateurs avec câbles de puissance**: limités par leur poids par rapport à la hauteur
  - **Pile à combustible**: en développement dans le domaine aéronautique
  - **Micro-ondes**: en développement
  - **Condensateur haute capacité**: 2eme source de puissance. Demande ponctuelle grande pendant l'usage.
  - **Panneaux solaires**
- 
- 2 fluides: H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub>
- 2 types: SPFC (polymer) et AFC (alkaline)

# 2 modèles d'avion électrique

- Avion alimenté par batteries

**L'E-Fan : l'avion à propulsion électrique**  
Développé par une société bordelaise et Airbus Group, il doit être commercialisé d'ici 2017-2018



**Avantages**

- ✓ niveau de bruit faible
- ✓ aucune émission de CO2
- ✓ coût de l'heure de vol 20 fois moins élevé

**biplace**

**45 min à 1h** d'autonomie

**220 km/h** de vitesse maximum, **160km/h** en croisière

**2 moteurs** (un dans chaque aile) avec **deux packs de 60 batteries** au lithium-ion polymère de 250 volts

**6,7 m** de longueur  
**9,5 m** d'envergure

Emplacement des batteries

AFP

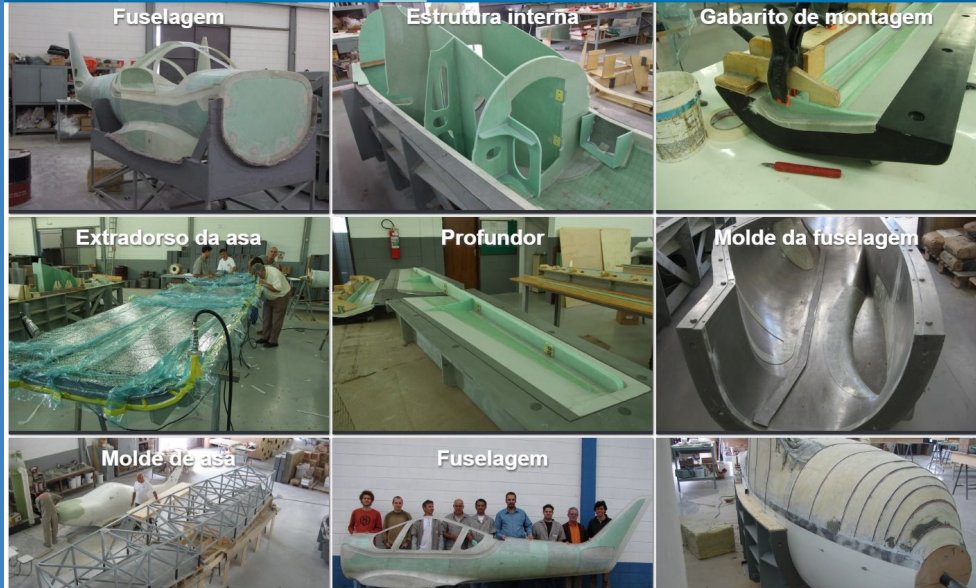
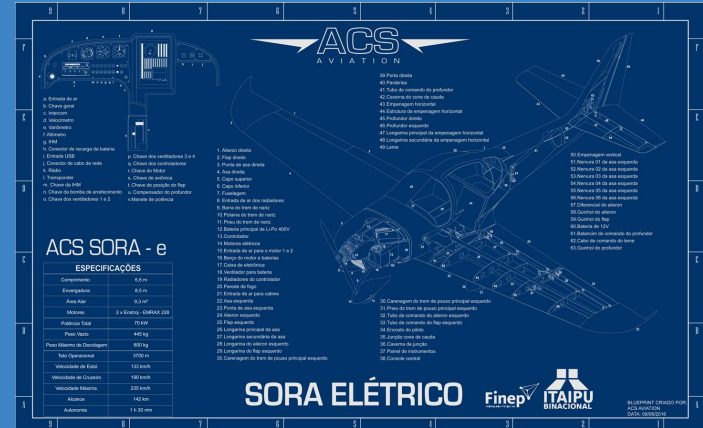
- Moteur alimenté par des panneaux solaires

Solar Impulse 2: tour du monde



# Structure d'un petit avion électrique

Procédé de fabrication de la structure d'un petit avion:  
**la fibre de carbone et le bois**  
 => avion ultra léger



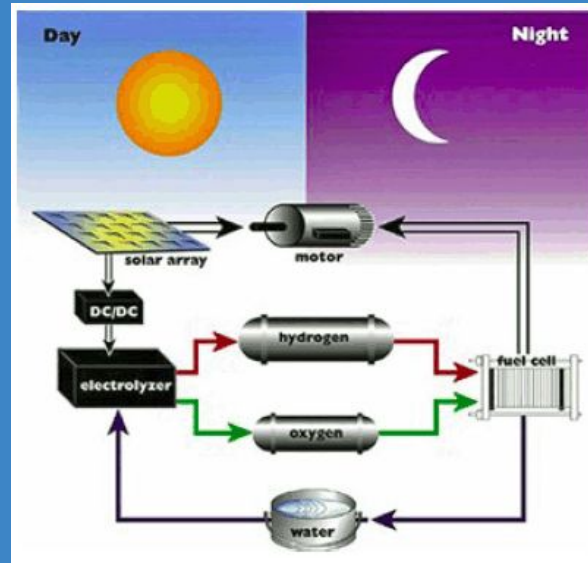


# Problématiques

- Batteries: autonomie + poids  
30 kilos de batteries = 1 kilo de carburant
- Avion solaire: dépendance du soleil

# Solutions

- Batteries de graphène
- Pile de combustible



# Etude de cas: Solar Impulse 2



## L'avion:

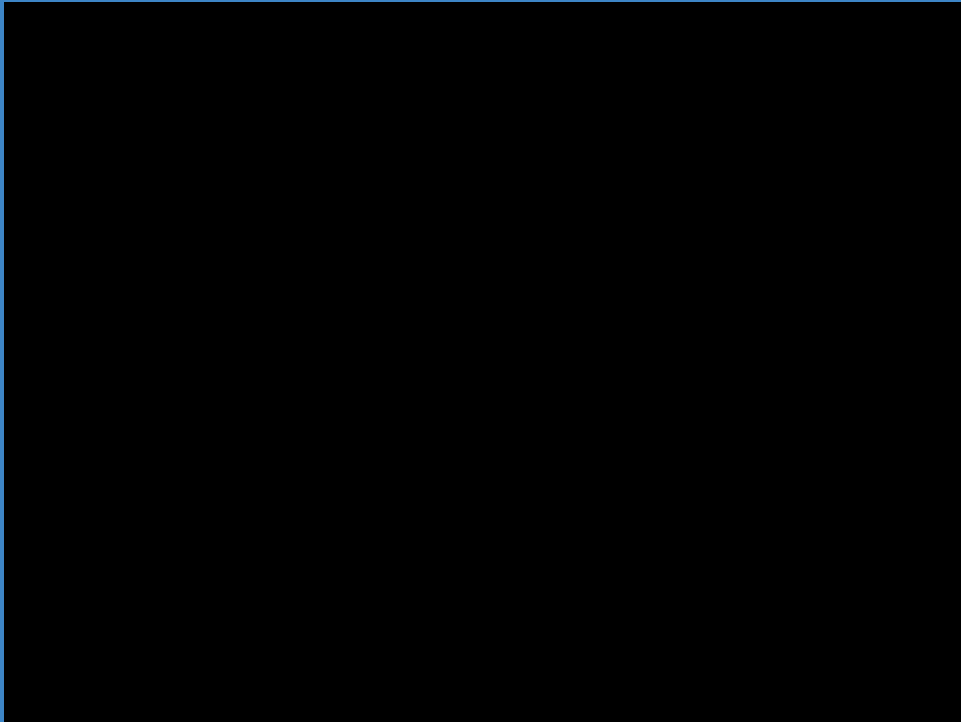
- Avion solaire monoplace
- 72 mètre d'envergure
- 17248 cellules photovoltaïques
- 4 batteries

## L'aventure:

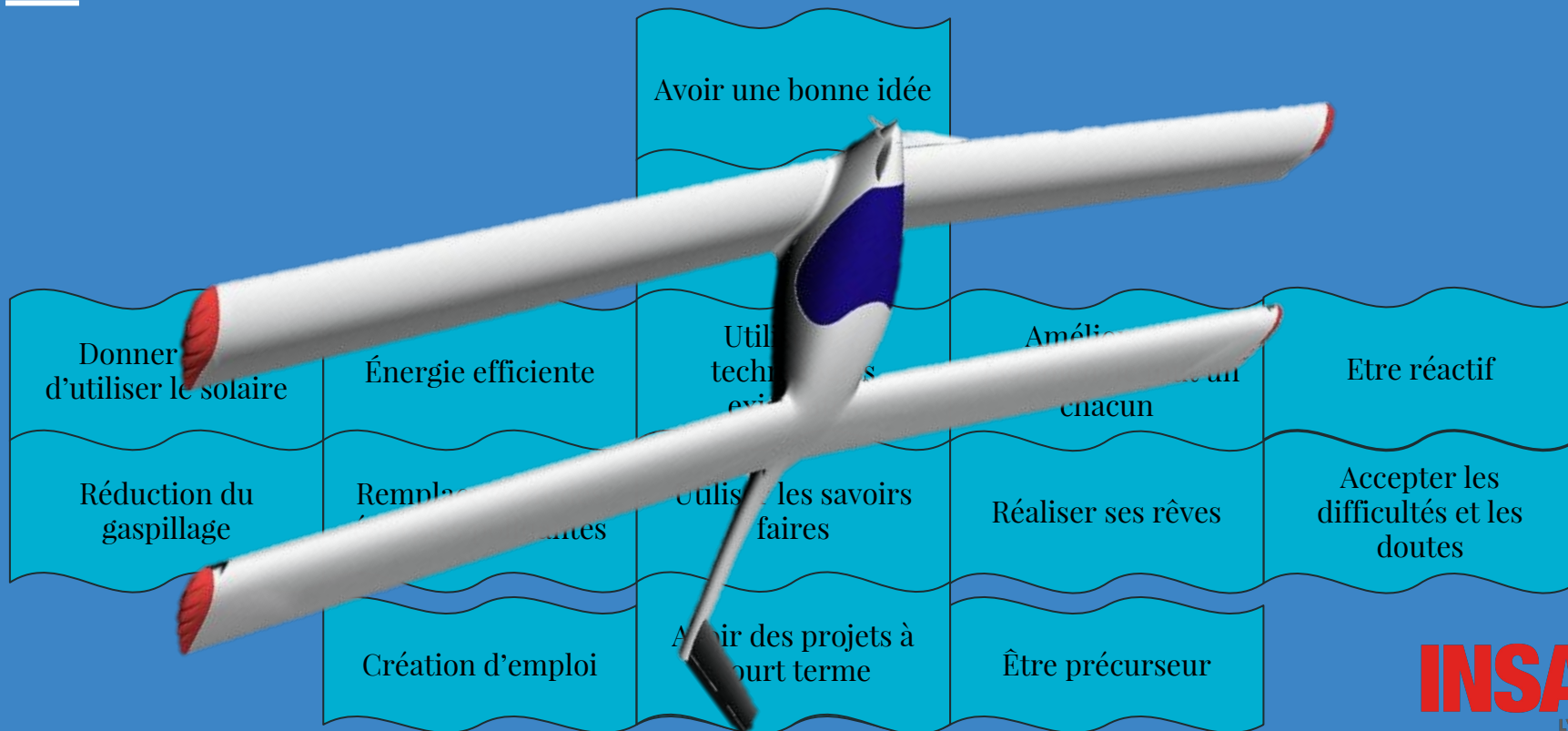
- 43 000 kms sans une goutte de carburant
- 17 vols
- 15 mois (arrivée 26 juillet 2016 à abu dhabi)
- 500 heures de vols

## Le but:

- Technologie propre
- Être pionnier en la matière
- Avoir un avion qui puisse voler de "manière étendue"
- Dans un monde durable



# L'éco-conception et l'innovation au service de la planète et de ses habitants



ACV

# Solar Impulse 2

---

- 4 batteries – **38.5 kWh** – total **154 kWh**
- **150 Ah (ampère.heure)** avec 96% efficacité
- Poids total des batteries **633 kg**
  
- **17,248** cellules solaires de silicium mono-cristalline ont produit 11,000 kWh d'électricité sur les 43,041 kilomètres → 0.26 kWh/km
- L'avion peut voler à une vitesse moyenne de 70 km/h

A titre comparatif,  
Batterie Tesla: 450 kg et contient l'équivalent énergétique de 53 kWh



*La fabrication d'une batterie NMC de chez Kokam*

# Avion conventionnel

- *Objectif de l'étude* – Impact environnemental du transport d'un passager en **avion (de ligne)** de Paris à New-York
- *Fonction* – Transporter un passager d'un point A à un point B
- *Unité fonctionnelle (flux de référence)* – 1 homme de 80 kg transporté de Paris à New-York (5840 km) – Unité: t\*km
- *Frontières du système* – De la production de l'avion et du kérosène aux émissions émises lors du trajet

- *Inventaire*
  - Pétrole brut
  - Gaz
  - Matériaux
  - Eau
- *Emissions*
  - Benzene
  - CO2
  - NOX
  - Particules
  - Métaux lourds
- *Evaluation des impacts*
  - énergie non renouvelable
  - acidification, eutrophication
  - déchets
  - ...

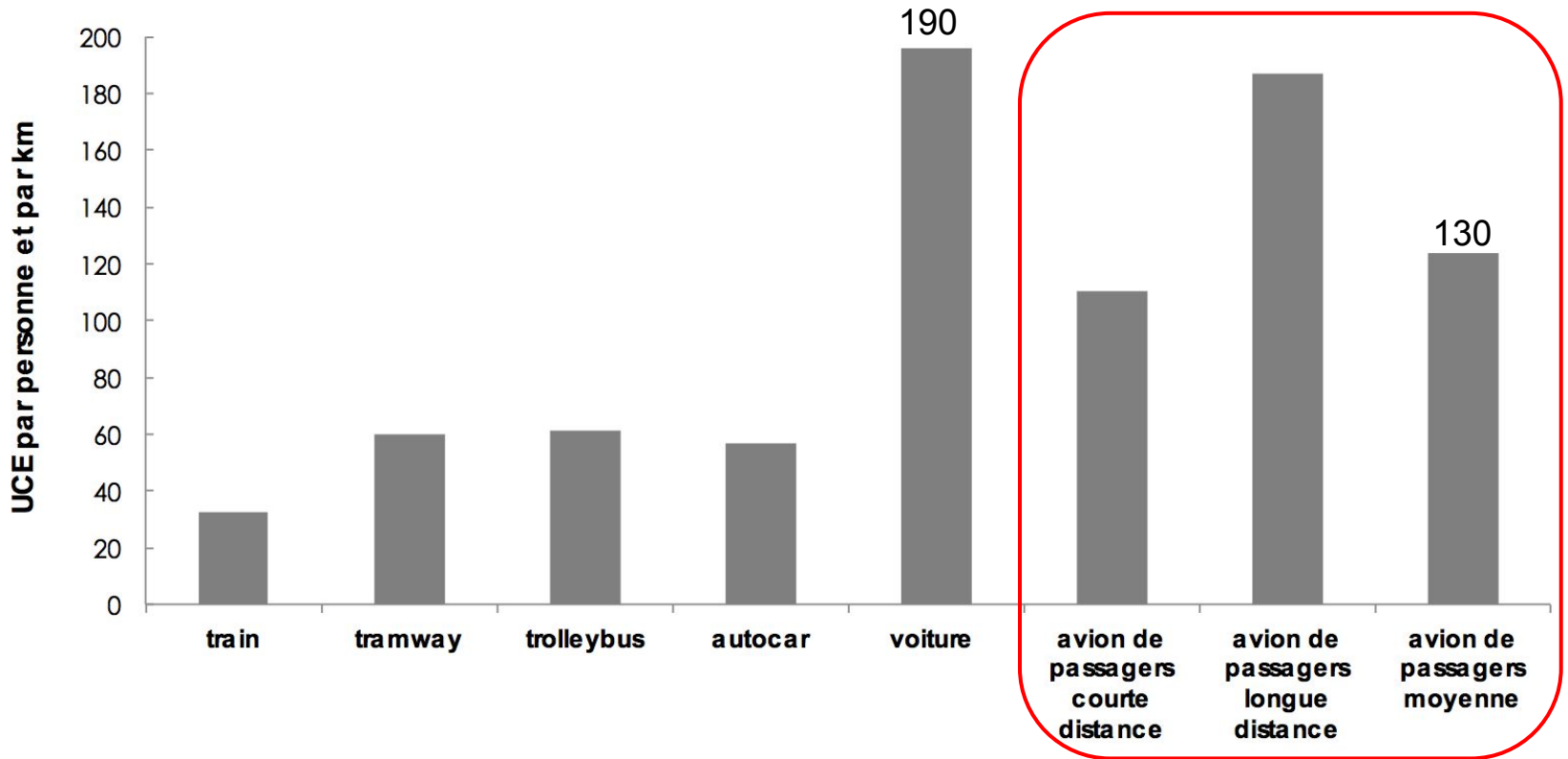
$$w_i = \text{le copoint} \cdot \underbrace{K_j}_{\text{Characterisation (optional)}} \cdot \underbrace{\frac{1}{F_{n,i}}}_{\text{Normalisation}} \cdot \underbrace{\left(\frac{F_i}{F_{k,i}}\right)^2}_{\text{Weighting}} \cdot \underbrace{\zeta}_{\text{Constant (10}^{12}\text{)}}$$

### Formule de la saturation écologique

Pondération ou saturation: **(F/Fk)**

- Situation actuelle (F)
- Objectif défini à l'échelle politique/juridique de l'Etat (Fk )
- Objectif international signé par l'Etat (Fk )






\*Unité de Charge Écologique


source: ESU services


# Comparaison avion électrique/avion conventionnel

<http://eco-calculateur.aviation-civile.gouv.fr/>

Choix  de l'itinéraire

Aéroport de départ (France) : PARIS-CHARLES DE GAULLE  
Pays de destination : ETATS-UNIS  
Aéroport de destination : NEW YORK-KENNEDY  
 Aller simple  Aller-retour

Résultats  de votre recherche

Distance (km)	Emissions de CO <sub>2</sub> / passager (en kg) pour le vol	Consommation de kérosène / passager (en litre)
 5840	491	195 soit 3,3 l/100 km

Emissions de CO<sub>2</sub>/passager (en kg) pour la production et distribution du kérosène

94

Emissions totales de CO<sub>2</sub>/passager (en kg)

585

Rapport avion conventionnel/voiture conventionnelle =  $190/130 = 1.46$

Emission avion conventionnel paris new york = **585 kg CO<sub>2</sub>-eq**

Hypothèse 1: même rapport avion électrique/voiture électrique

Emission avion électrique paris new york:  
 $585/1.46 = 400.7$  kg CO<sub>2</sub>-eq

Problème : contrairement à la voiture, l'avion électrique fonctionne avec des panneaux solaires.

Hypothèse 2: les panneaux "fonctionnent" 50% du temps d'utilisation donc les batteries sont rechargées deux fois moins souvent que dans la voiture

# Comparaison avec la voiture électrique

Production d'électricité pour la recharge de la batterie: 26%

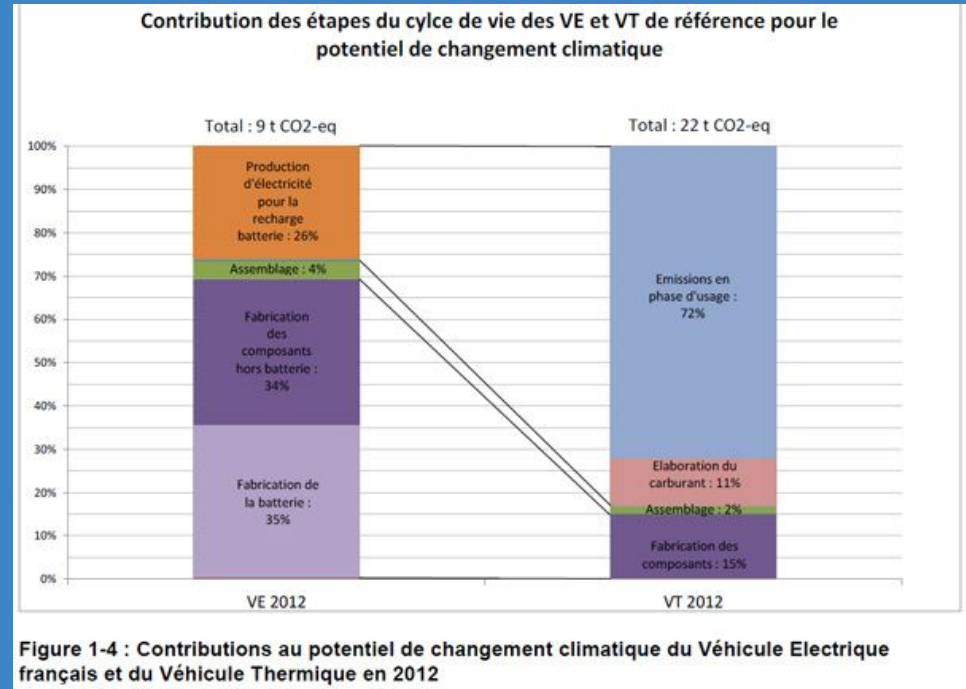
Dans le cas d'étude d'un trajet Paris - New York

Dans le cas de l'avion électrique  $400.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$   
 $0.26 * 400.7 = 104.182$

et d'après **hypothèse 2** (utilisation des batteries divisée par 2)

$104.182 / 2 = 52.091$

$400.7 - 52.091 = 348.609 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$



## Conclusion de l'ACV:

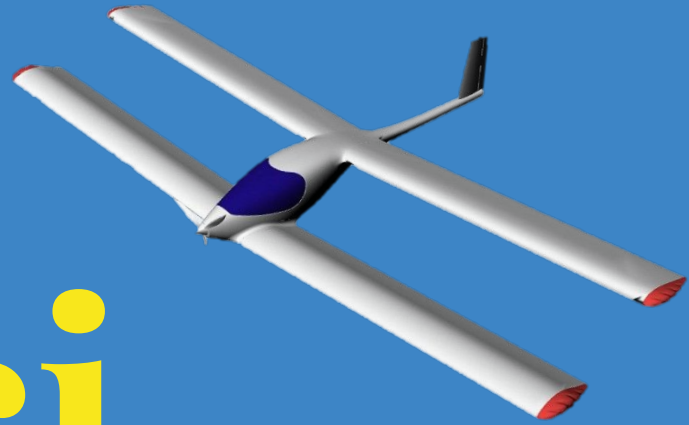
Notre avion électrique (type Solar Impulse 2) aura un impact de **348.6 kg CO<sub>2</sub>-eq**, lors de la traversée de l'atlantique de Paris à New-York, soit **1.7x** moins que l'avion conventionnel .

# QUEL FUTUR POUR L'AVION ÉLECTRIQUE ?

- 
1. Technologie forcément liée au développement des batteries
  2. Voies de réduction des impacts de fabrication des panneaux solaires
  3. Développement au niveau industriel pour des grands avions de lignes ou commerciaux pas encore possible
  4. Principaux projets d'avions commerciaux électriques:
    - 
    - **E-THRUST Projet:** Airbus + Rolls-Royce.  
Objectif: finir dans 20 ans.
    - **SUGAR Volt.** NASA + Boeing.
    - Russe. Government + Tupolev Corporation



# Merci



# Bibliographie

---

[1] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Avion\\_%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Avion_%C3%A9lectrique)

[2] <http://www.futura-sciences.com/planete/actualites/energie-renouvelable-hy4-avion-electrique-hydrogene-etonnant-pris-so-n-envol-64644/>

[3] Solar Impulse <https://www.franceinter.fr/emissions/la-tete-au-carre/la-tete-au-carre-28-fevrier-2017>

[http://www.lexpress.fr/actualite/societe/environnement/solar-impulse-1000-solutions-pour-un-monde-durable\\_1879438.html](http://www.lexpress.fr/actualite/societe/environnement/solar-impulse-1000-solutions-pour-un-monde-durable_1879438.html)

[4] ACV - panneaux photovoltaïques

[http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV\\_Fab\\_Envt\\_final\\_26082009.pdf](http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/PV_Fab_Envt_final_26082009.pdf)

[5] Batterie

<http://insideevs.com/solar-impulse-2-154-kwh-of-high-density-nmc-lithium-batteries-details/>



# Images

## L'E-Fan : l'avion à propulsion électrique

Développé par une société bordelaise et Airbus Group, il doit être commercialisé d'ici 2017-2018



**2 moteurs** (un dans chaque aile) avec **deux packs de 60 batteries** au lithium-ion polymère de 250 volts

**6,7 m** de longueur  
**9,5 m** d'envergure

**Avantages**

- ✓ niveau de bruit faible
- ✓ aucune émission de CO2
- ✓ coût de l'heure de vol 20 fois moins élevé

**biplace**

**45 min à 1h** d'autonomie

**220 km/h** de vitesse maximum, **160km/h** en croisière

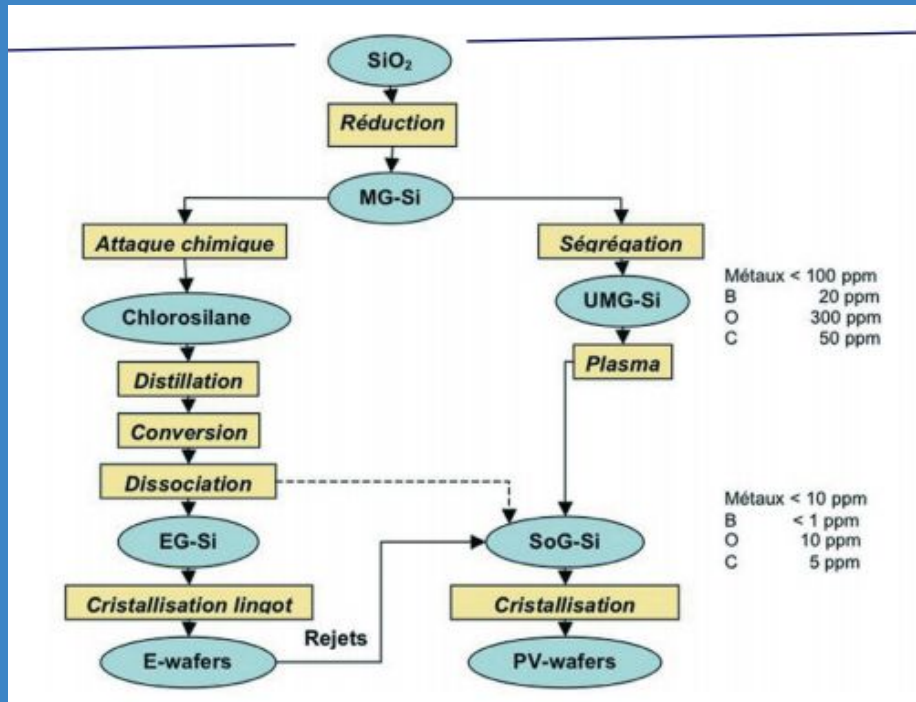
Emplacement des batteries

AFP

[www.larepubliquedespyrenees.fr/2014/04/25/pre-de-l-avion-electrique-e-fan,1191203.php](http://www.larepubliquedespyrenees.fr/2014/04/25/pre-de-l-avion-electrique-e-fan,1191203.php)

# Annexes

# Extraction du silicium - une industrie en plein essor



Solution insuffisante aujourd'hui !

2 nouvelles voies:

- voie gazeuse
- voie directe

# Panneaux photovoltaïques

---

## Résultats de l'analyse du cycle de vie:

l'énergie est l'impact majeur, avec environ **30000 MJ d'énergie primaire par kWc**, soit **2500 kWh d'énergie finale**

→ plus de 40% **dus aux procédés de fabrication:**

## Comment caractériser les effets sur l'environnement d'un système photovoltaïque en France ?

→ temps de retour énergétique

**3 ans**

→ l'effet de serre,

**70 g de CO2-eq/kWh**

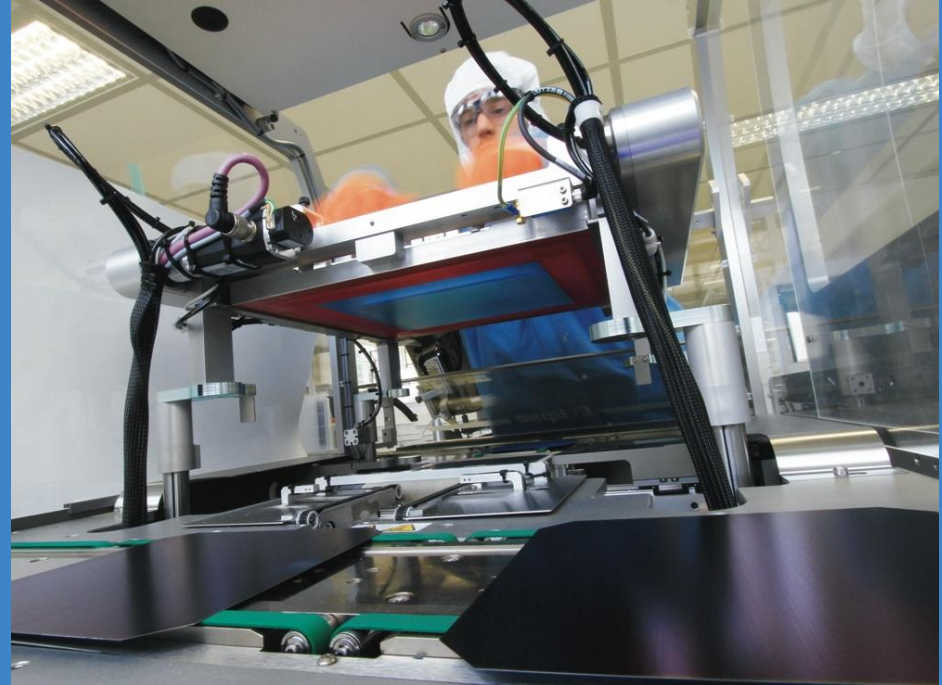
## Voies de réduction des impacts de fabrication:

- réduire l'énergie grise des matériaux lors de leur fabrication (nouvelles voies de production)
- réduire l'épaisseur des plaques (ex : Sliver! cell d'Origin Energy < 70 µm et 1.7 g Si/Wc)
- réutilisation des chutes et de l'eau
- repenser le démontage du laminé en intégrant l'éco-design dès la conception du module
- recyclage des modules en fin de vie

# Différents procédés de construction des panneaux photovoltaïques

---

- Pour 1000 kWh/m<sup>2</sup> /an et le procédé **Siemens traditionnel** : 3,3 ans
- Pour 1117 kWh/m<sup>2</sup> /an (Suisse) et le procédé **Siemens modifié** : 2,9 ans
- Pour 1000 kWh/m<sup>2</sup> /an et le procédé **Elkem métallurgique** : 1.9 ans (avec le mix énergétique norvégien 100% hydraulique).



# Modules photovoltaïques: le cœur de l'installation

Les modules les plus répandus :

**48-72** cellules en série qui permettent le couplage avec les accumulateurs de **12 Vcc** (courant continu) nominaux.

