

Maitrise de la foudre et des décharges électrostatiques en aéronautique

G. Peres, Airbus Group Innovations

Airbus Group

Ex EADS : European Aeronautic Defense and Space company

Global leadership in aerospace, defense and related services. The Group includes:

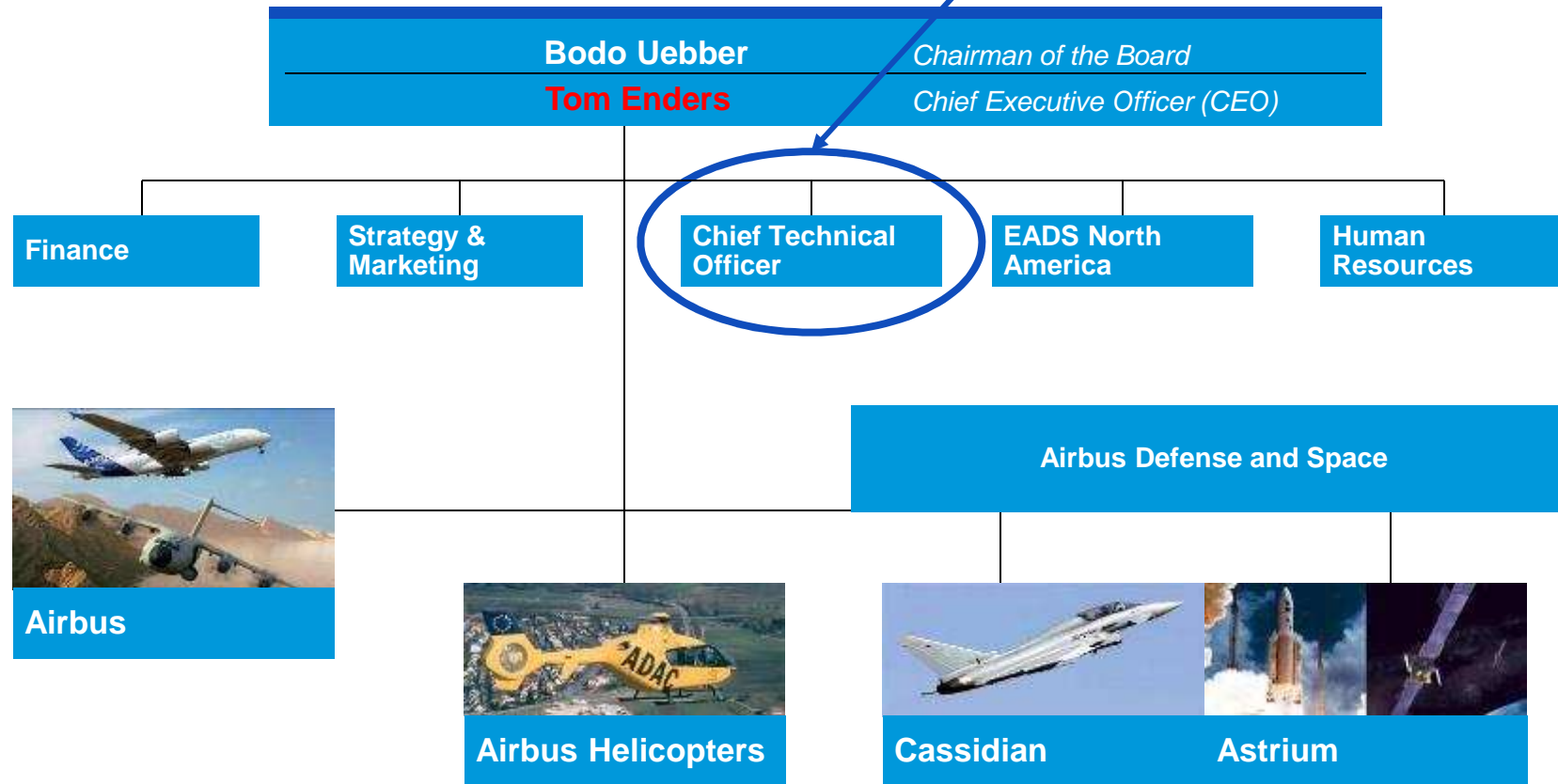
- **Airbus**: leading global manufacturer of commercial and military aircraft, with Airbus Military covering tanker, transport and mission aircraft
- **Airbus Defense and Space**: worldwide leader in solutions for armed forces and civil security, major partner in Eurofighter consortium and stakeholder in **MBDA** (missile systems provider), european leader in space programs and third biggest space provider worldwide, offering civil and military space systems,
- **Airbus Helicopters**: world's primary civil helicopter manufacturer, offering the largest civil and military helicopter range (one third of the world's entire helicopter fleet)

EADS employs around 128,000 people at more than 170 sites worldwide

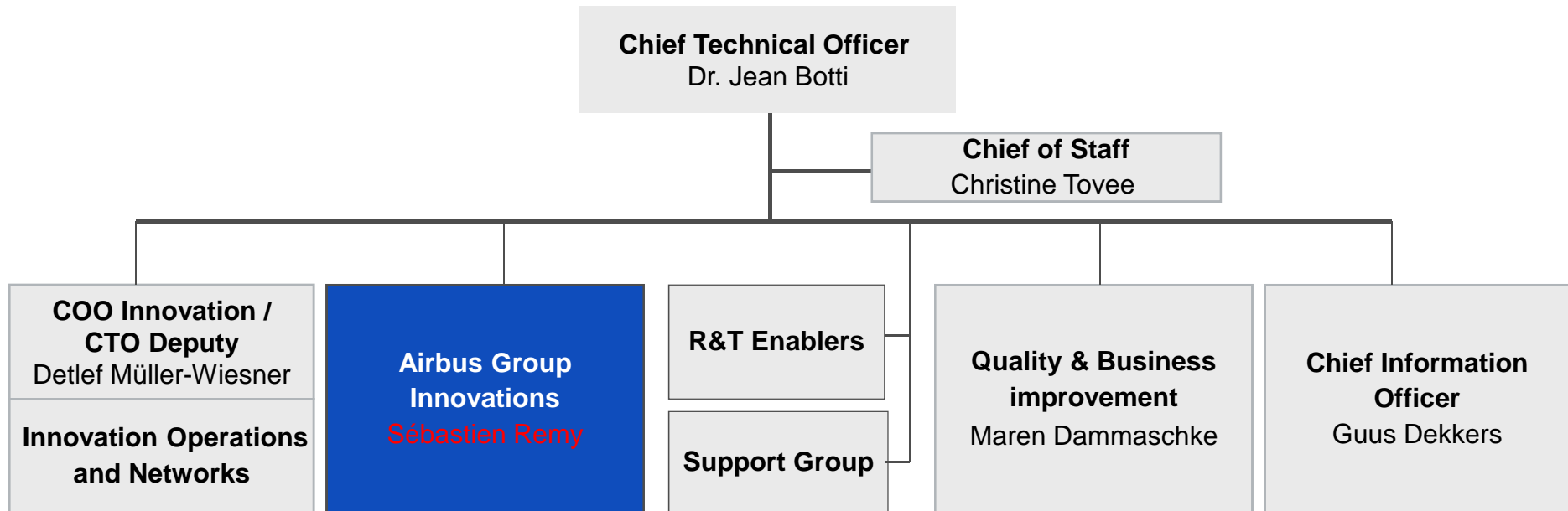
For more information: www.airbusgroup.com

Management Structure



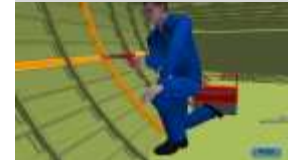



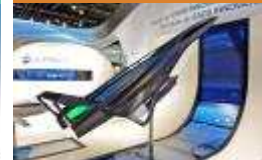
Airbus Group Innovations is part of the Chief Technical Officer's organization



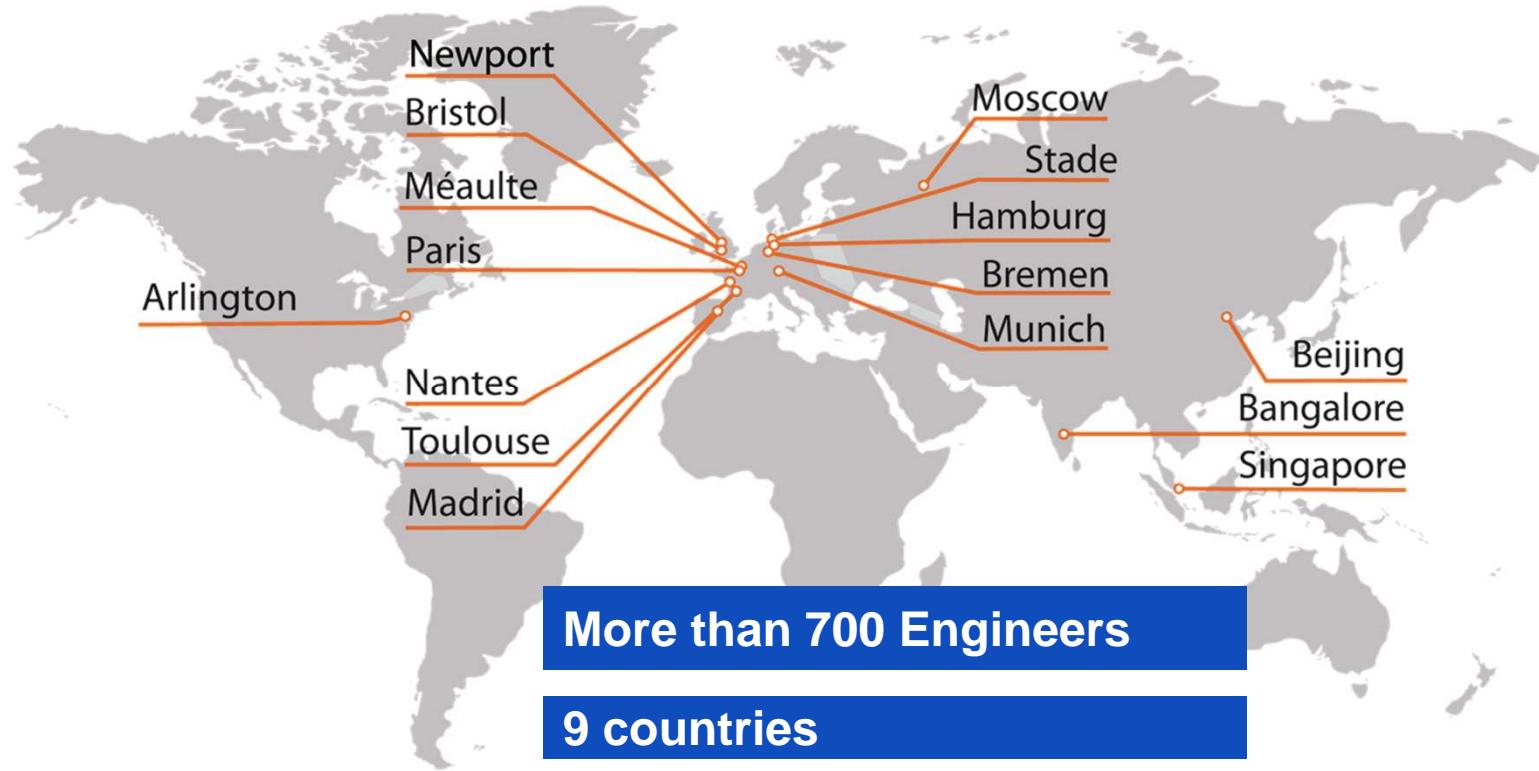
Airbus Group Innovations (AGI) into Corporate Technical Office



AGI Technical Capabilities Centres (TX) overview

Composites Technologies	Metallic Technologies & Surface Engineering	Structure Engineering, Production & Aeromechanics	Sensors Electronics & Systems Integration	Engineering, Physics, IT, Security Services & Simulation	Energy & Propulsion	Innovative Concepts & Scenarios
						
<p>A centre dedicated to develop advanced light and robust materials and processes applicable to new products</p>	<p>A centre dedicated to develop cost efficient, light, reliable and environmental friendly surface treatments, metallic/hybrid structures and associated intelligent production routes</p>	<p>A centre dedicated to engineering of processes in the design and manufacture of advanced crossing mechanics, electronics and IT expertises</p>	<p>A centre specialized in development and integration of sensor, communication and avionic systems to enable functional and operational improvements in safety & security, autonomy, availability and efficiency</p>	<p>A centre dedicated to improving the quality of chain of value from initial design to after sales follow-up, by means of simulation and virtual architecture enhanced by IT technologies</p>	<p>A centre dedicated to new energy and propulsion technologies, and the related architecture, anticipating future regulations & economical trends</p>	<p>A centre dedicated to identifying new technologies for future and competitive products and defining the associated roadmaps with each division by means of concept-demonstrators</p>

AGI - key figures (2010)



More than 700 Engineers

9 countries

16 sites

Funding 126 M€

81 new patent applications

Plan

- ❖ Thématiques étudiées au sein de l'équipe « Electromagnétisme » d'AGI
- ❖ Généralités sur la foudre
- ❖ Description d'un avion
- ❖ Attachement sur un aéronef
- ❖ Interaction entre la foudre et un aéronef
- ❖ Standardisation de la menace foudre
- ❖ Zoning foudre d'un aéronef
- ❖ Quelques mots sur le carbone
- ❖ Exemples de problématiques
- ❖ Autres thématiques liées à la foudre ou aux décharges électriques

Thématiques étudiées au sein du service Electromagnétisme d'AGI

Lightning Direct Effects

- Thermo mechanical damage on material and protection design
- Sparking in assemblies and edge glows
- Electrostatic protection of charged systems : atmospheric charging, refueling, ...
- Lightning zoning on structures
- Materials characterization

Electro-Magnetic Compatibility

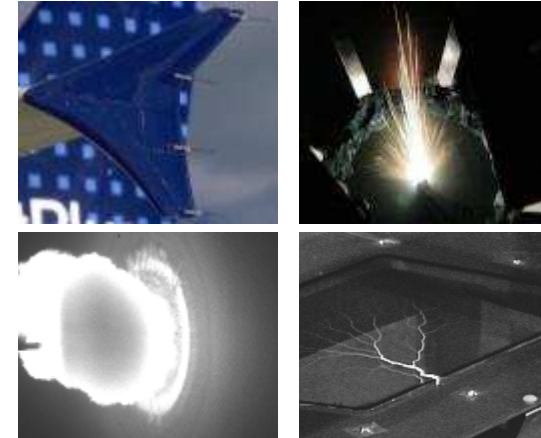
- Lightning/HIRF indirect effects on structures, equipments and systems
- EMC in conducted and radiated mode from system level down to component level
- EMC at electronic level
- Development of tools, models & methodologies delivered to Airbus, Eurocopter, Astrium...

Antenna

- Antenna siting
- Certification support
- Low profile antenna
- Troubleshooting
- Impacts of emerging technologies : meta-materials...

Quelques thématiques du périmètre “effets directs”

- ❑ Electrostatic protection of charged systems
 - ✓ static dischargers on aircrafts
 - ✓ metallic braids between launcher stages
 - ✓ ESD on dielectric surfaces (cockpit canopy, logos)
- ❑ Lightning phenomenology
 - ✓ threat characterization
 - ✓ lightning-structure interaction analysis and protection definitions
- ❑ Lightning zoning on structures
 - ✓ primary attachment locations (aircraft, missiles, launchers)
 - ✓ channel sweeping phenomena, dwell time
- ❑ Non linear phenomena
 - ✓ Subsequent internal discharges induced by lightning (sparking, edge glow, flashover)
 - ✓ ESD in fuel systems due to charging of inner surfaces during refueling
- ❑ Materials characterization
 - ✓ Non linear electrical properties under large current/voltage threat range
 - ✓ Bonding between metallic and CFC structures and CFC ageing



Généralités sur la foudre

Inter ou intra nuage

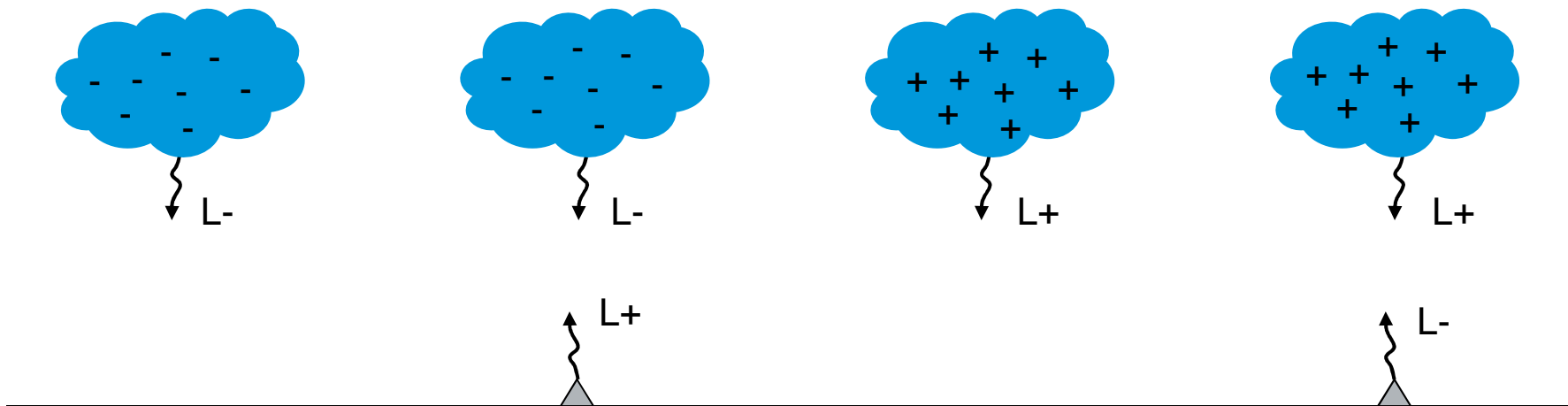


Nuage sol



Généralités sur la foudre

Décharges les plus fréquentes : décharges négatives



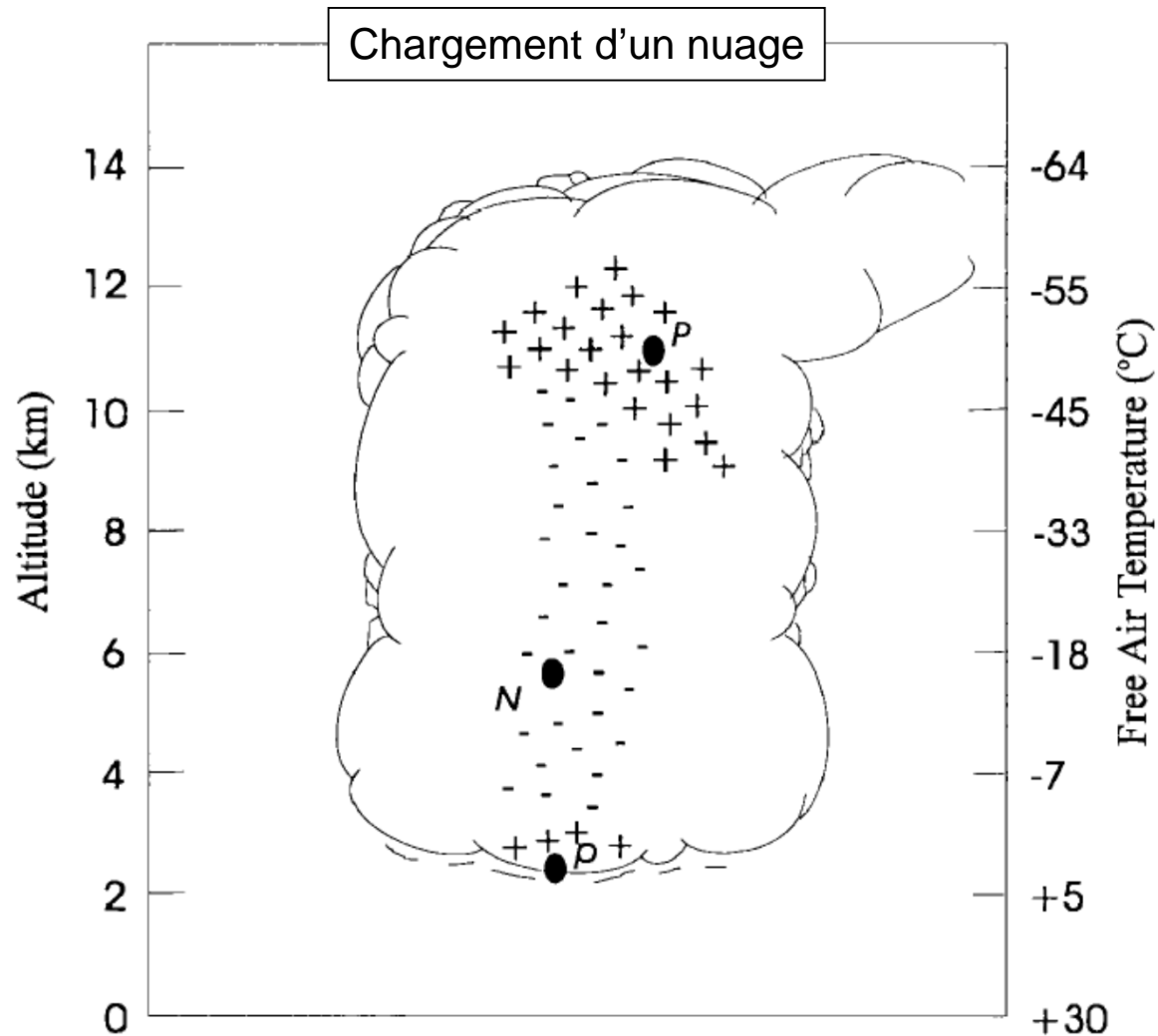
L+, L- : Leaders positifs, négatifs (on parle aussi de précurseurs)

Une fois les leaders descendants et ascendants connectés, on a la décharge en retour

La décharge en retour est une onde de neutralisation du canal formé entre le nuage et le sol (composante impulsionnelle)

Ensuite, on peut avoir une décharge très lente (jusqu'à 1 seconde) qui correspond au vidage ou à la neutralisation (totale ou partielle) de la charge du nuage (composante continue)

Généralités sur la foudre

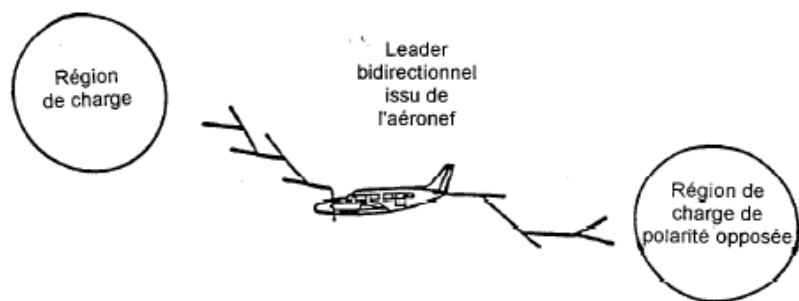


Attachement sur un aéronef

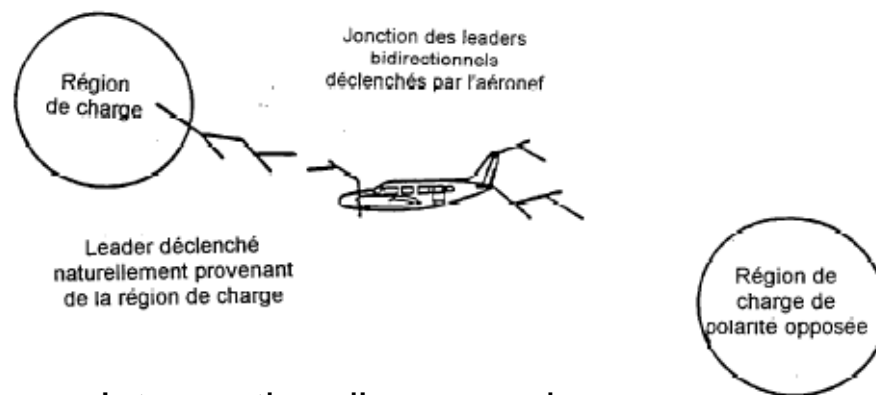
- Un avion civil est foudroyé **1 à 2 fois par an** en moyenne (1/2900 heures de vol)
- Dans 90 à 95% des cas, l'initiation du foudroiement de l'avion **est due à sa présence** : coup de foudre déclenché par l'avion
- Dans 5 à 10% des cas, l'avion intercepte une décharge en phase de développement
- Coup de foudre qui tombe par hasard sur l'avion : hautement improbable
- Dans 95% des cas, le foudroiement se situe dans les **phases ascendantes ou descendantes** de l'appareil:
 - vitesses de l'avion ~ **100 m/s (360km/h)**
 - altitude < **5 km** (max de foudroiement entre 1 et 3km)
- La plupart des coups de foudre sur avion correspondent à des coups intra nuages (les moins sévères)
- Le cas pire (courant et charge) c'est lorsque l'avion est impliqué dans un coup nuage-sol

Attachement sur un aéronef

Mécanisme de déclenchement de la foudre par un aéronef : théorie du **bi-leader** (Kasemir)

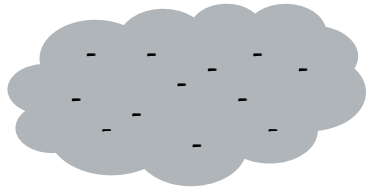


Déclenchement d'un coup de foudre par l'aéronef (90%)



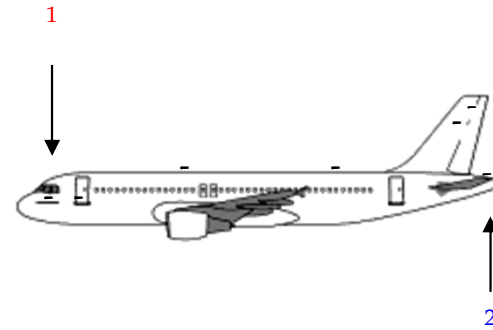
Interception d'un coup de foudre par l'aéronef (10%)

Attachement sur un aéronef



Cas d'un coup de foudre déclenché et d'un coup de foudre négatif (polarité du nuage) : situation la plus fréquente

Avion chargé initialement par processus triboélectrique (indépendant de la foudre)



Concentration des charges aux extrémités géométriques

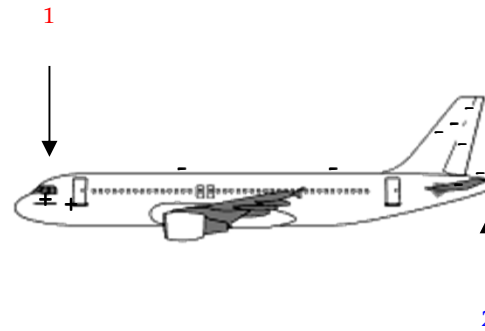
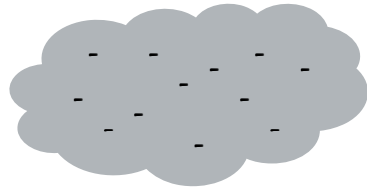


Champ électrique

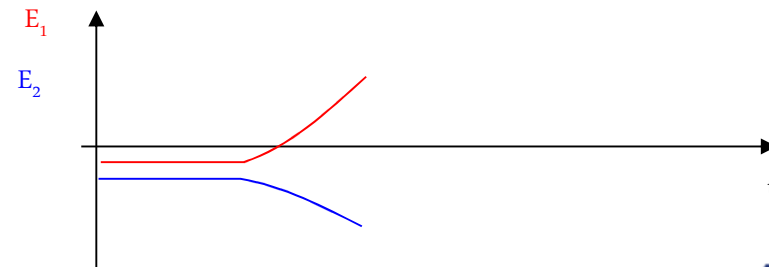


Attachement sur un aéronef

Soumis au champ imposé par le nuage chargé, l'avion se polarise

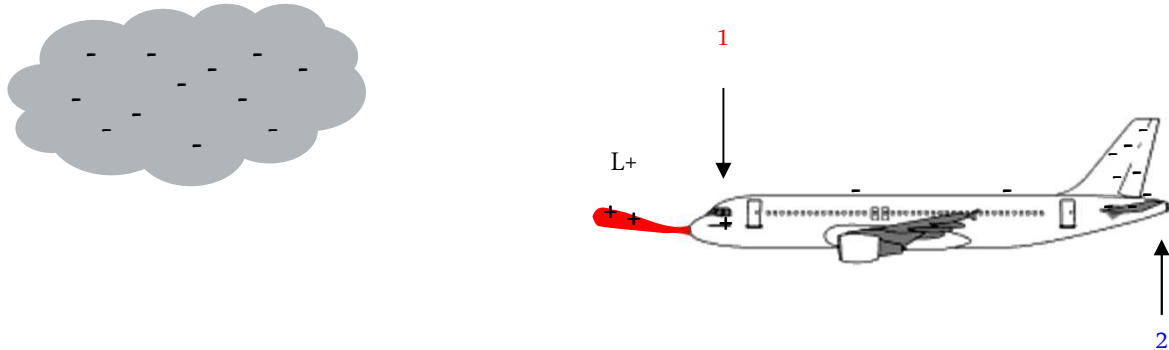


Champ électrique



Attachement sur un aéronef

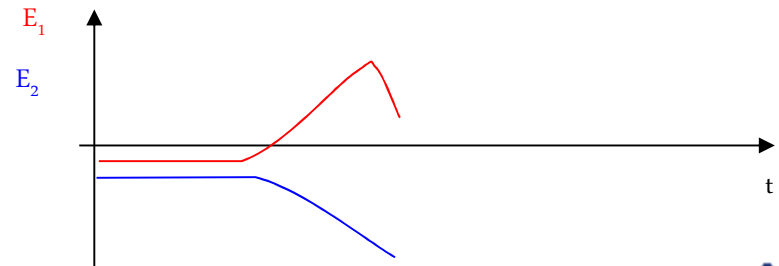
Lorsque le champ et la quantité de charge atteignent un certain seuil, une décharge corona arrive à se propager : leader positif (L+)



Vitesse de propagation L+ : $10^4 - 10^5$ m/s

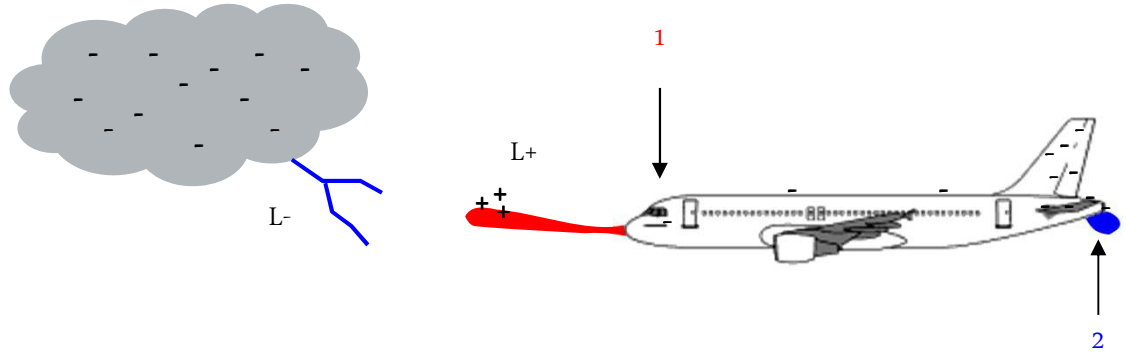


Champ électrique



Attachement sur un aéronef

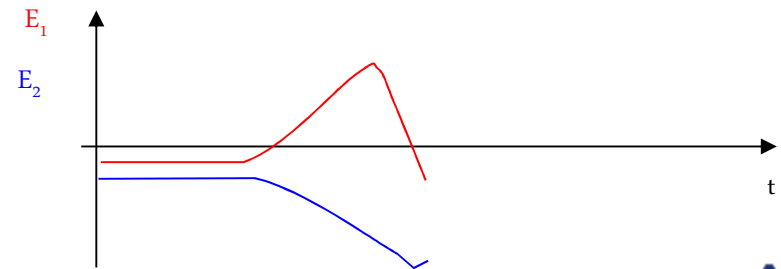
La pointe chargée positivement s'est tellement éloignée de l'avion que le nez, initialement positif devient négatif



Le lieu de concentration de charge négative atteint à son tour un seuil et une décharge corona négative commence à se propager

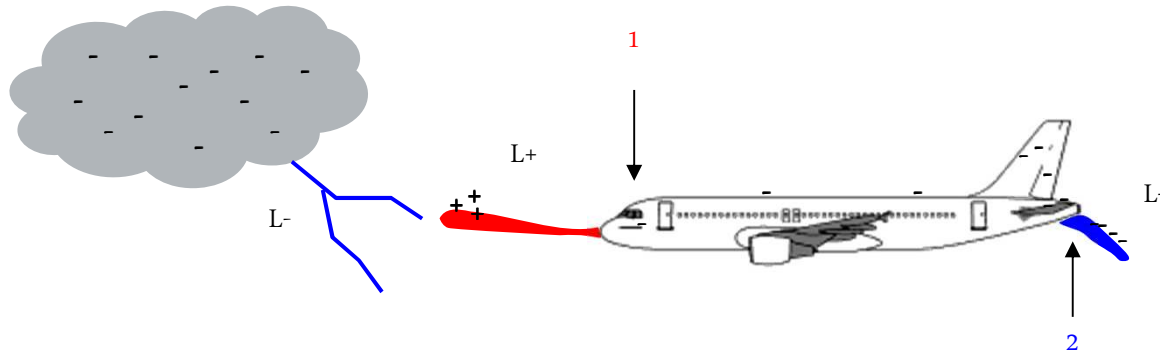


Champ électrique



Attachement sur un aéronef

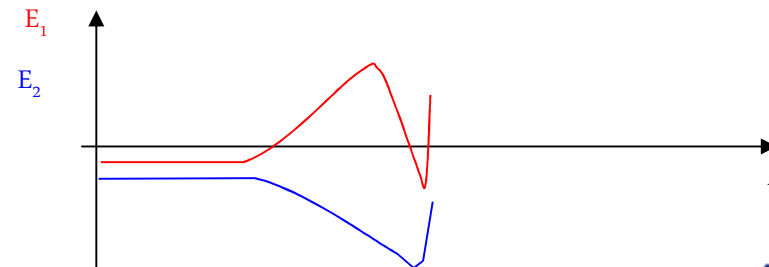
Le courant d'un leader positif (●) est continu et de l'ordre de 1A



La propagation d'un leader engendre des pulses de courant (1kA) tels que $R_L I_{L-}$ fait augmenter le potentiel de l'avion (moins négatif). Cela stoppe la propagation du L_- , jusqu'à ce que le L_+ ait refait baisser le potentiel de l'avion \rightarrow le leader négatif se propage par sauts

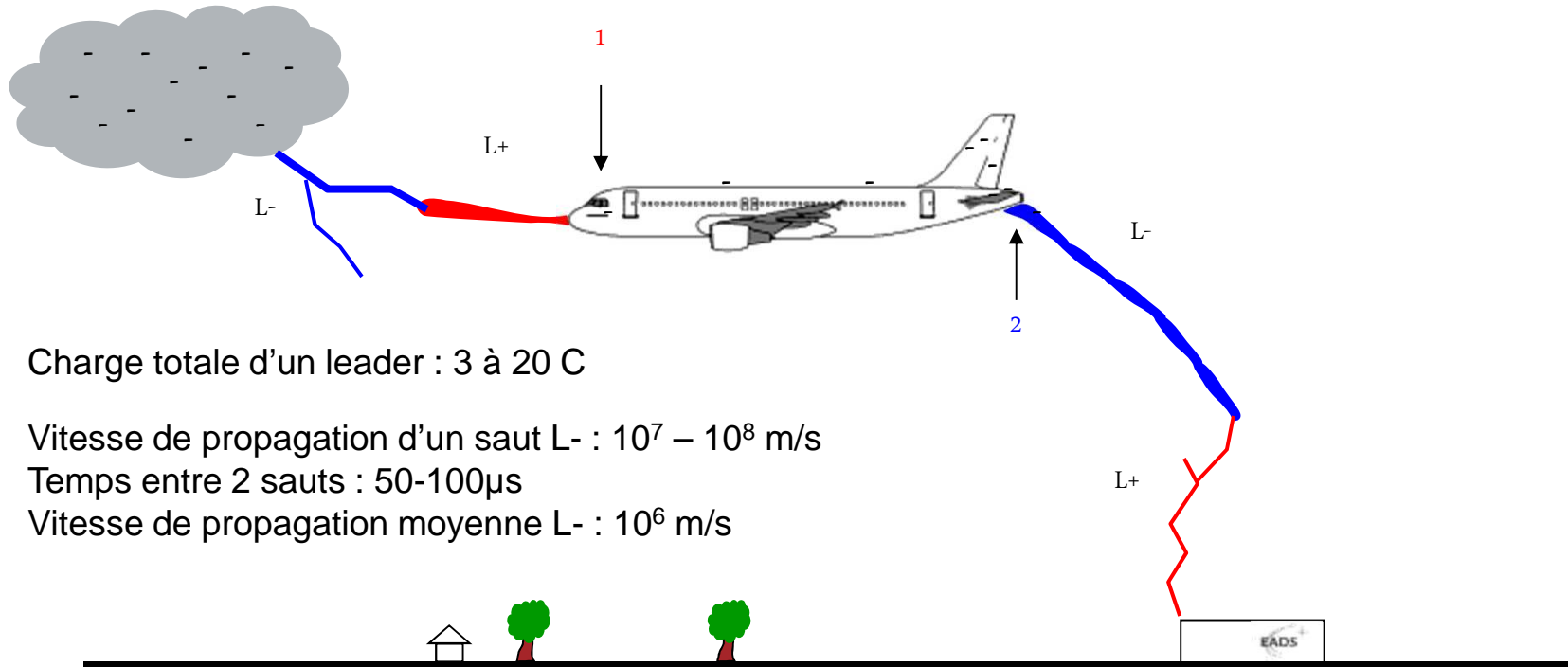


Champ électrique



Attachement sur un aéronef

Au bout d'un certain temps (lié à la vitesse de propagation des leader et à l'altitude de l'avion), l'ensemble des leaders se sont rejoints



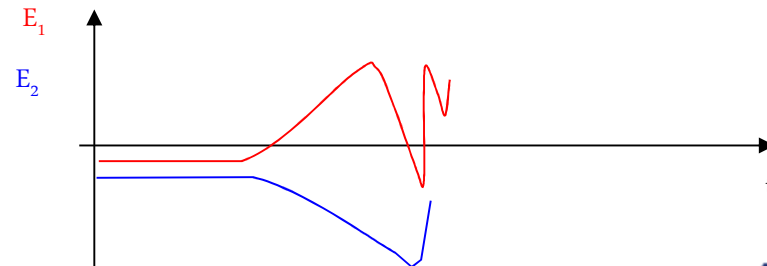
Charge totale d'un leader : 3 à 20 C

Vitesse de propagation d'un saut L- : $10^7 - 10^8$ m/s

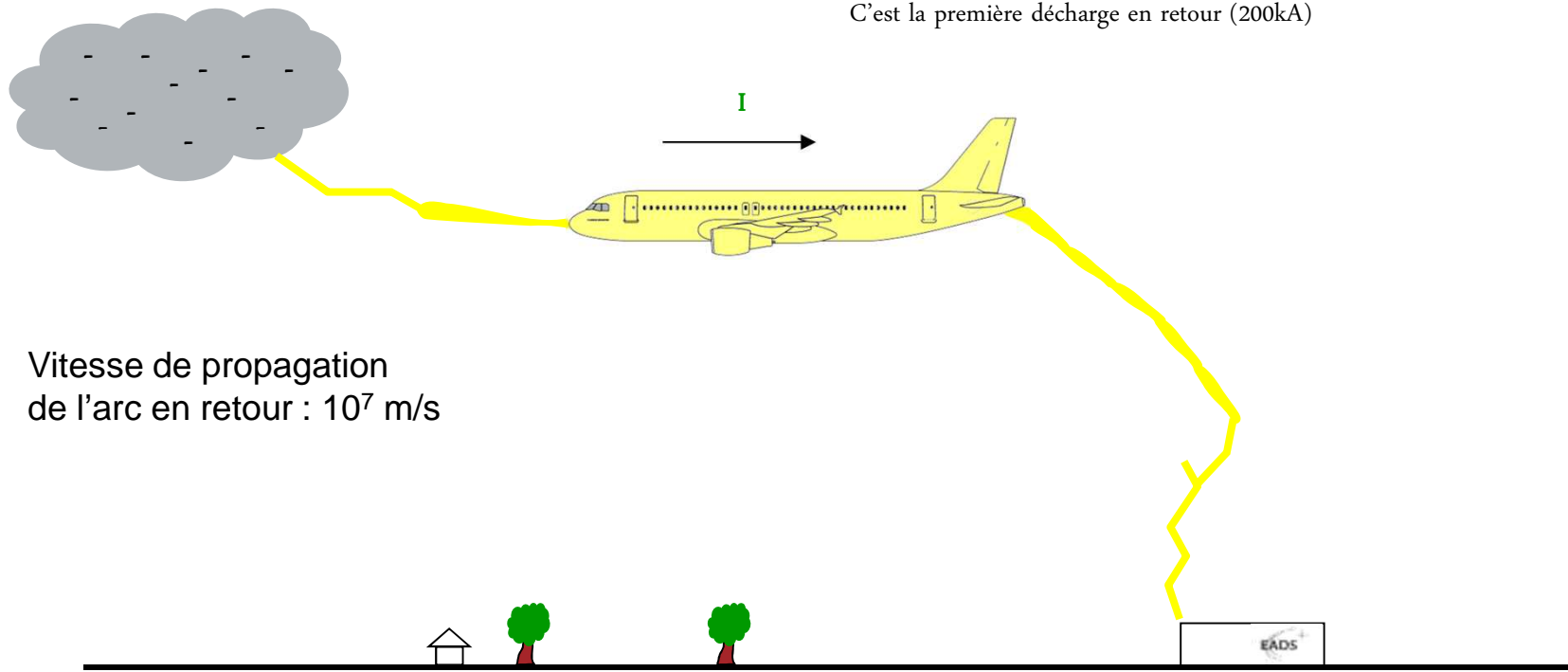
Temps entre 2 sauts : 50-100 μ s

Vitesse de propagation moyenne L- : 10^6 m/s

Champ électrique

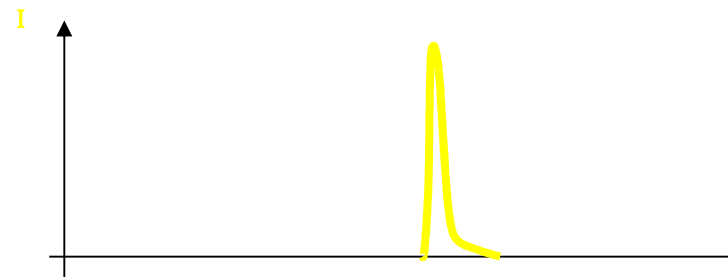


Attachement sur un aéronef

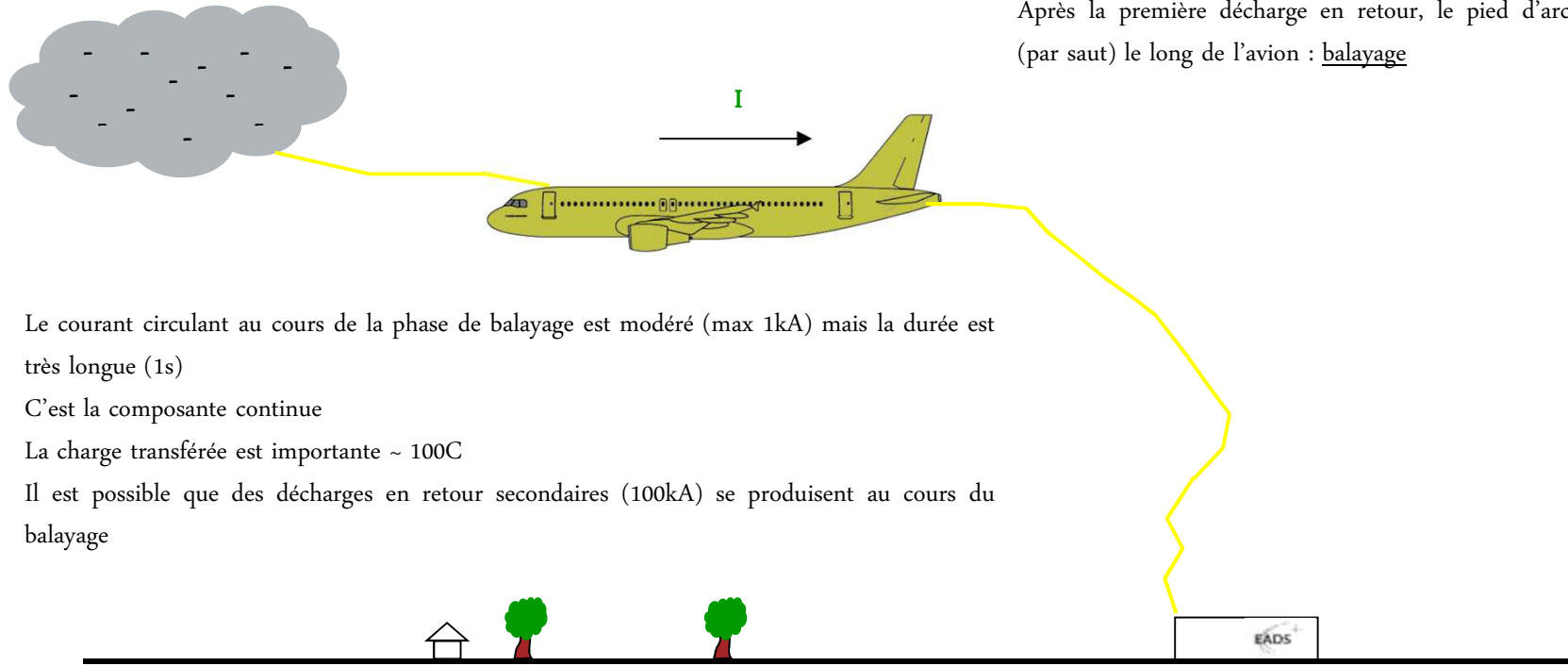


Vitesse de propagation
de l'arc en retour : 10^7 m/s

Courant de décharge



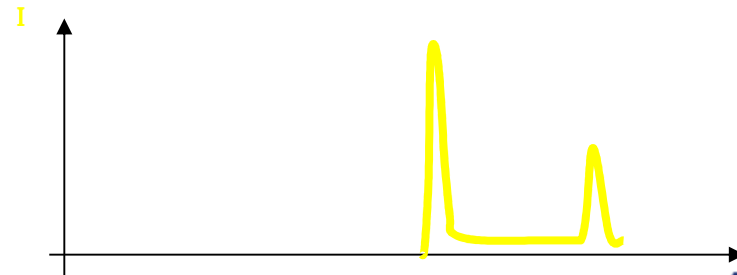
Attachement sur un aéronef



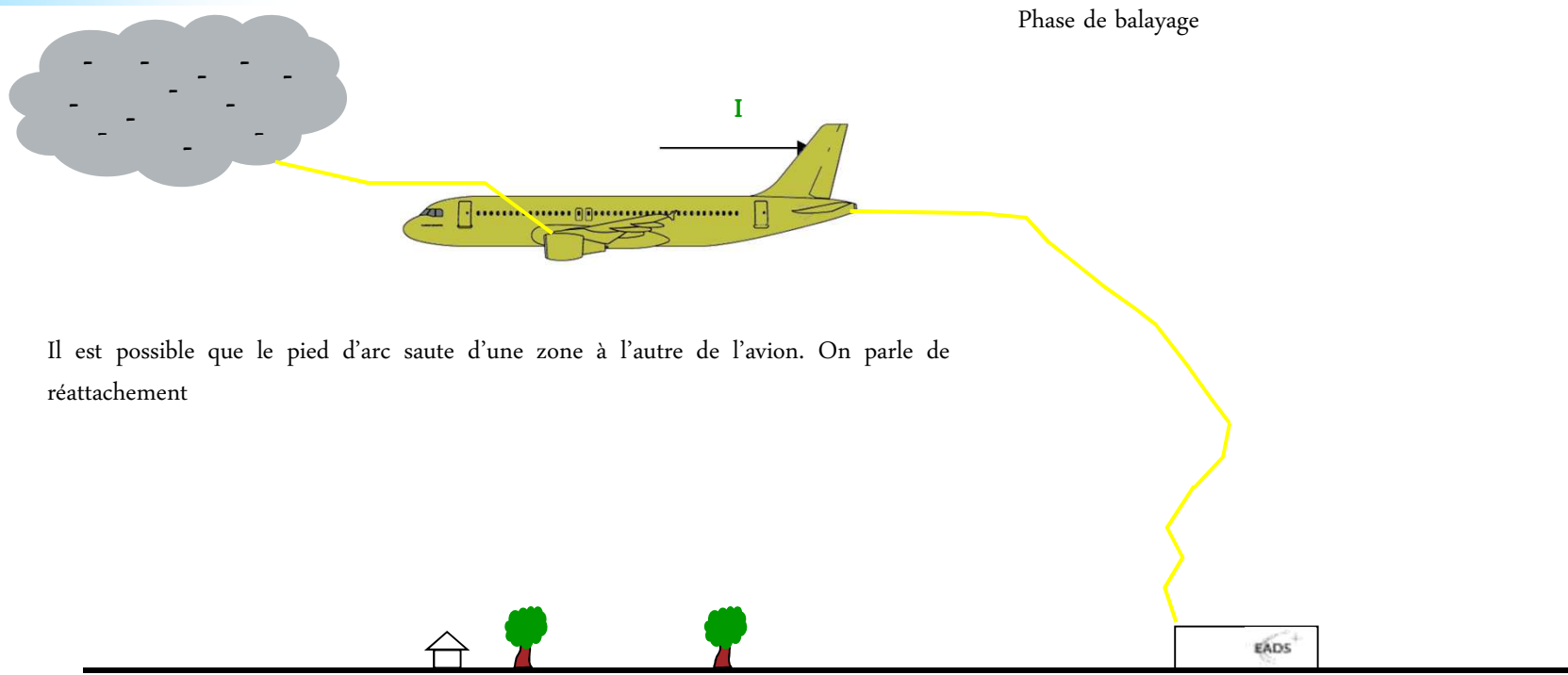
Après la première décharge en retour, le pied d'arc glisse (par saut) le long de l'avion : balayage

Le courant circulant au cours de la phase de balayage est modéré (max 1kA) mais la durée est très longue (1s)
C'est la composante continue
La charge transférée est importante ~ 100C
Il est possible que des décharges en retour secondaires (100kA) se produisent au cours du balayage

Courant de décharge

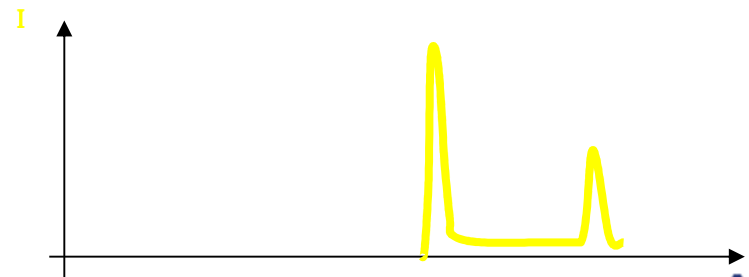


Attachement sur un aéronef



Il est possible que le pied d'arc saute d'une zone à l'autre de l'avion. On parle de réattachement

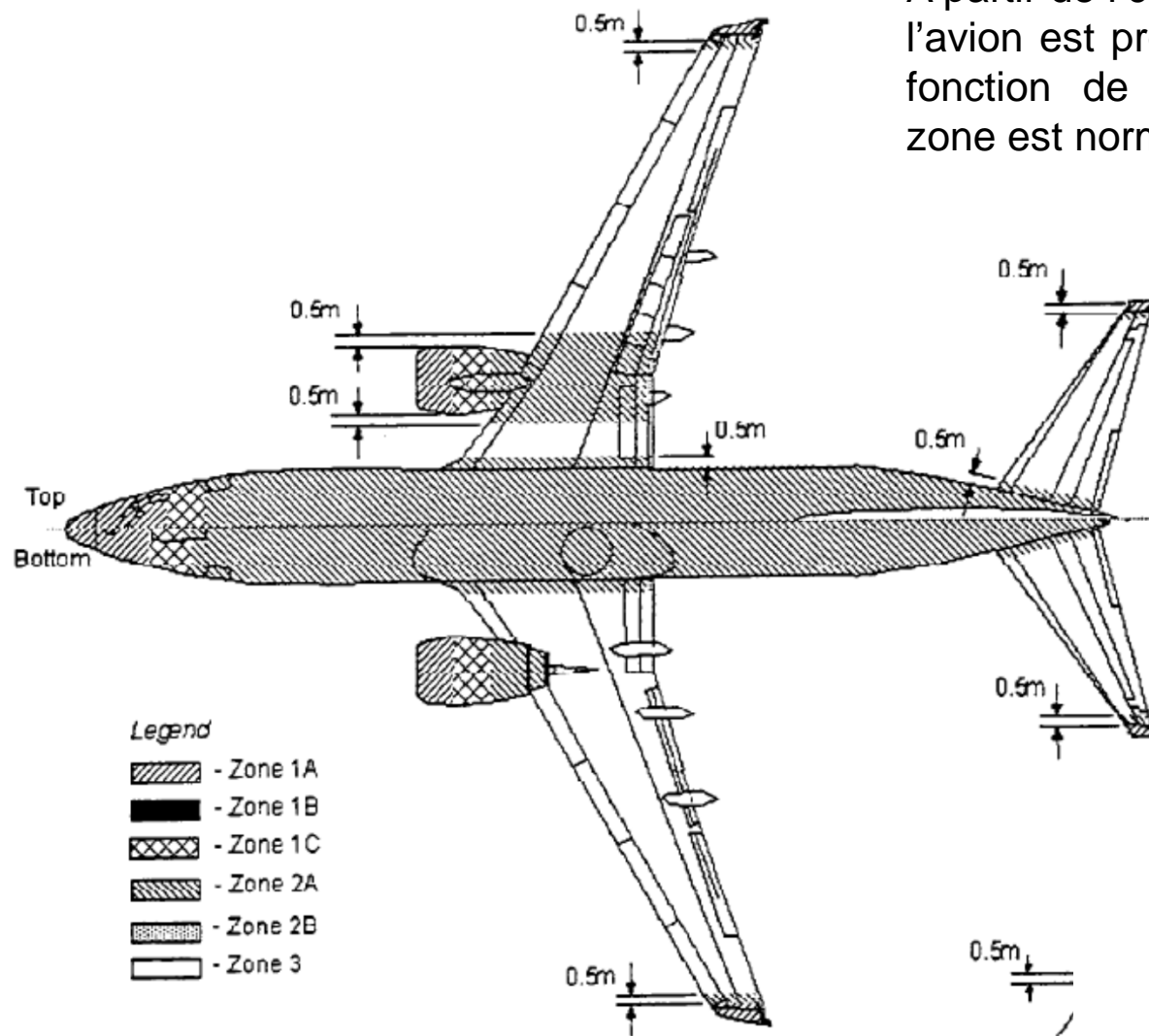
Courant de décharge



Attachement sur un aéronef

Zoning

A partir de l'établissement de ces zones l'avion est protégé en conséquence en fonction de la menace que chaque zone est normativement sensée subir

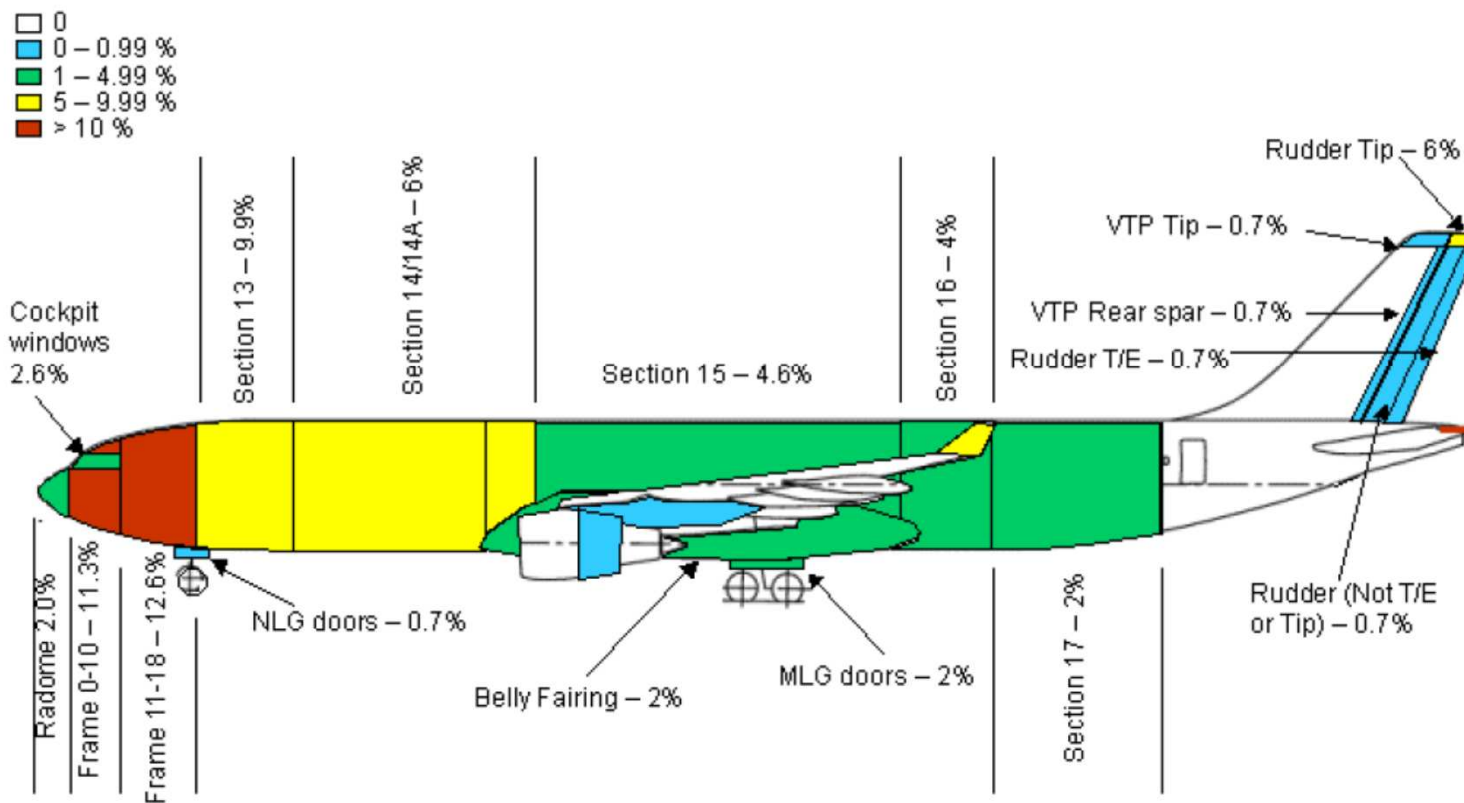


Attachement sur un aéronef

Localisation des dommages observés

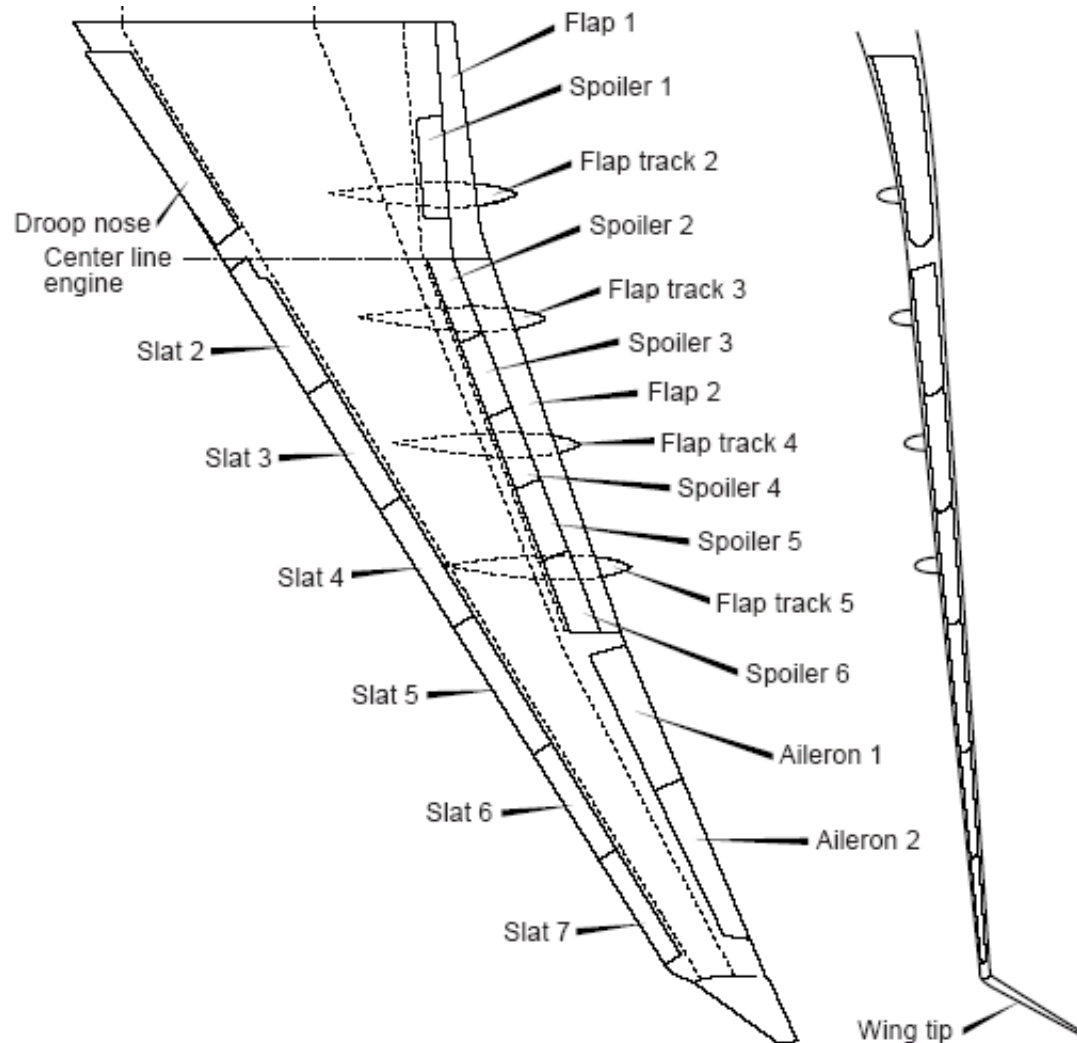
Retour des compagnies sur la localisation des dommages ou traces suites à un coup de foudre

A330 In-Service Lightning Strike Summary - By % of Strikes (Tot 151)



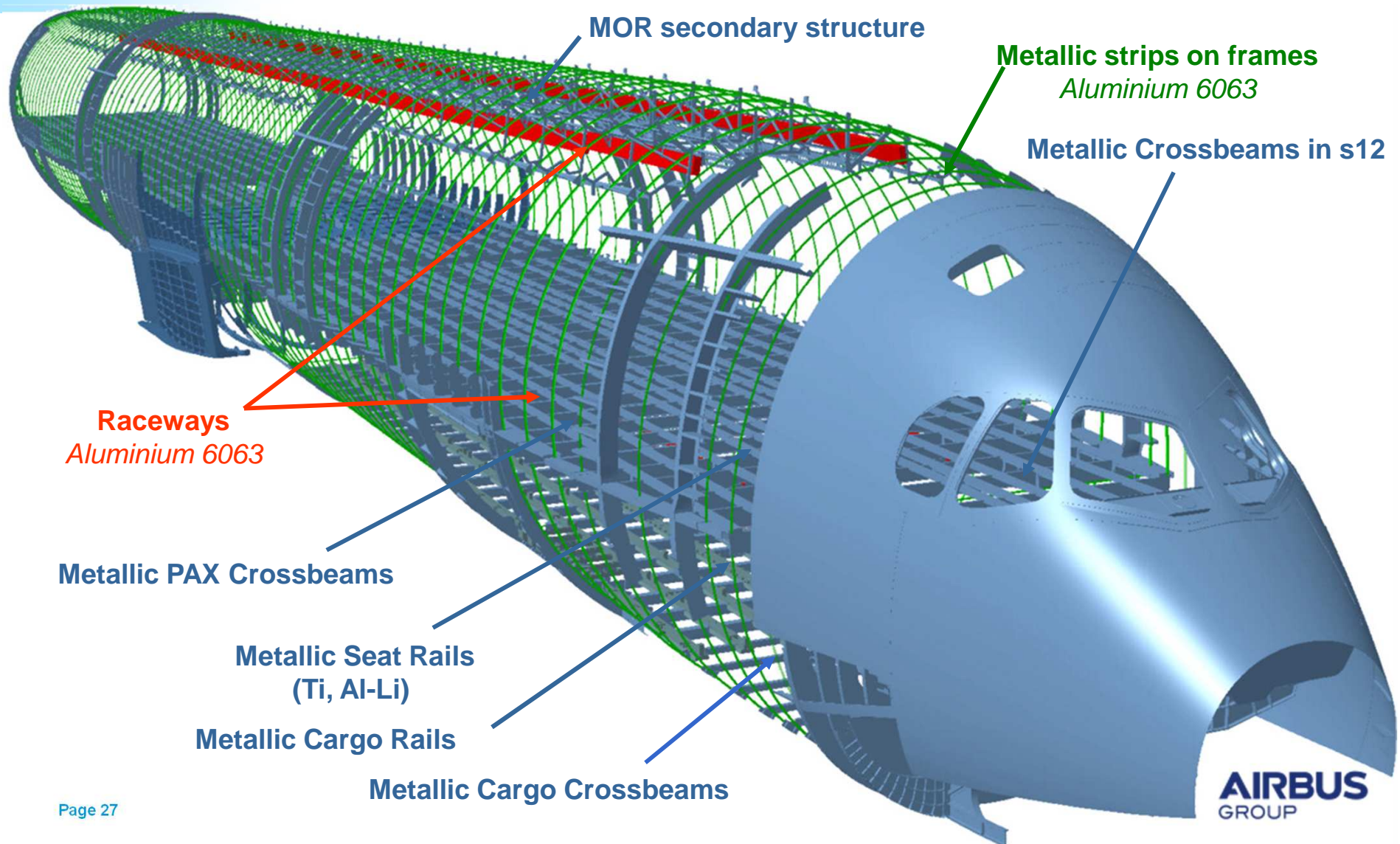
Description d'un aéronef

A350 – Parties mobiles de la voilure (surfaces de contrôle)

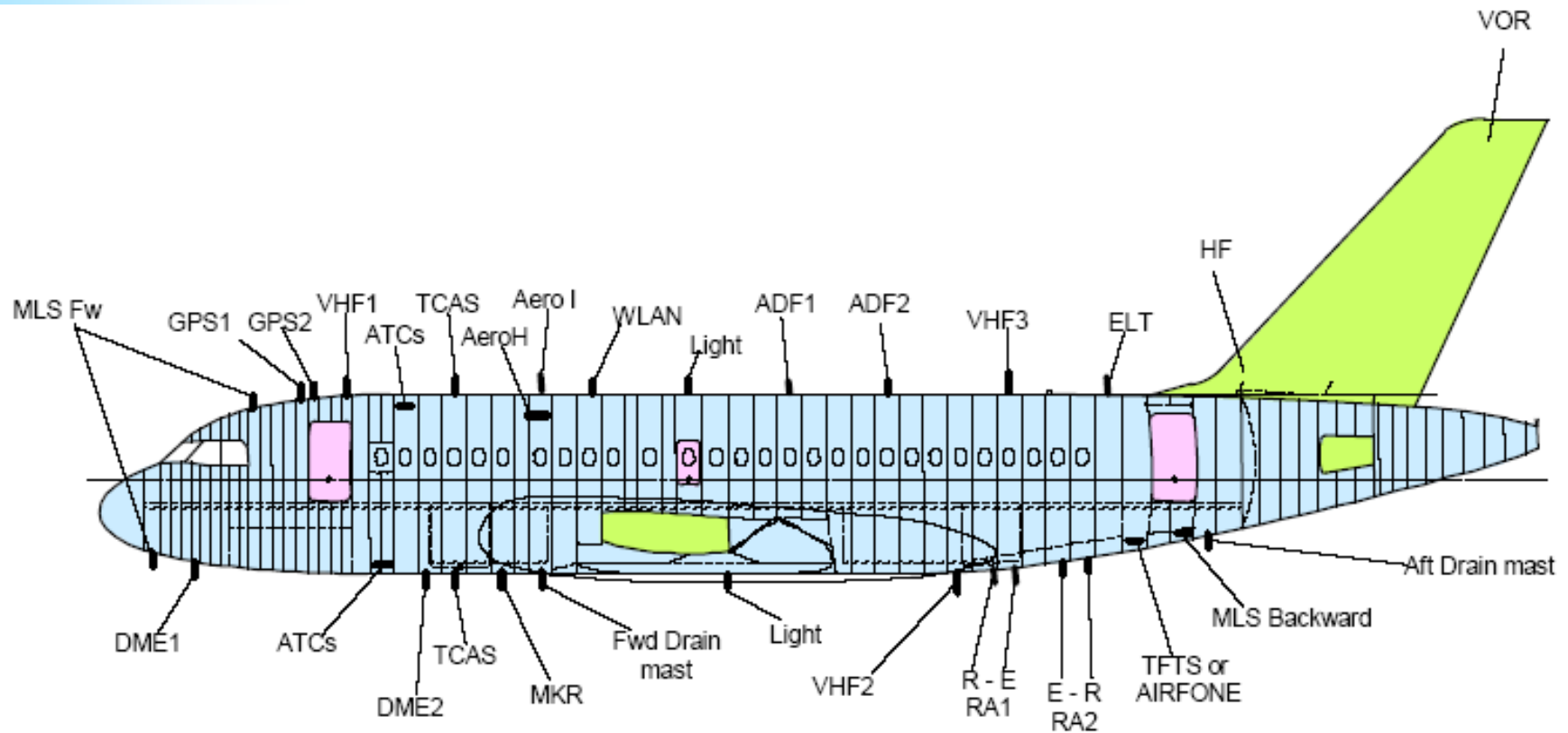


Description d'un aéronef

A350 – Réseau structurel conducteur



Description d'un aéronef A318 – Antennes



Interaction entre la foudre et un aéronef

Deux classes d'effets :

1. **Les effets directs** sont les effets **d'endommagement électrique, thermique et mécaniques**, liés à l'interaction entre le canal de foudre et la structure
 - Ils se produisent de manière prédominante à la jonction arc-structure (point d'entrée et point de sortie), à son voisinage ou dans des zones où le courant foudre se concentre
 - Ceci inclut le percement des diélectriques, l'explosion, la déformation, la fusion, la brûlure et vaporisation des surfaces et de la structure de l'aéronef et ses équipements
2. **Les effets indirects** sont les **effets induits** par le courant foudre sur les **systèmes électriques**
 - Le courant de foudre se répartit sur la structure et se couple sur les systèmes en produisant des courants et des tensions parasites sur les équipements
 - Ces phénomènes dépendent fortement des propriétés électriques des matériaux de structures, des défauts d'intégrité (connexions entre panneaux, ouvertures...), du routage et de la longueur des câbles

Interaction entre la foudre et un aéronef

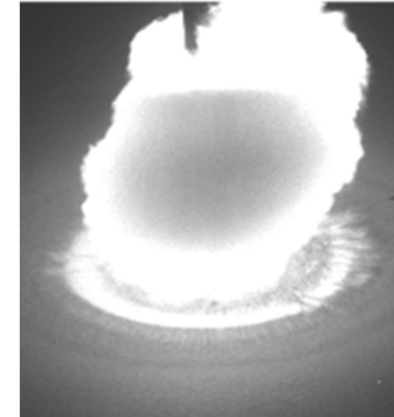
Effets directs

La foudre, c'est :

- Un flux de chaleur
- Une source de pression magnétique
- Une source d'onde de choc acoustique (tonnerre)
- Une source de courant

Les conséquences peuvent être diverses:

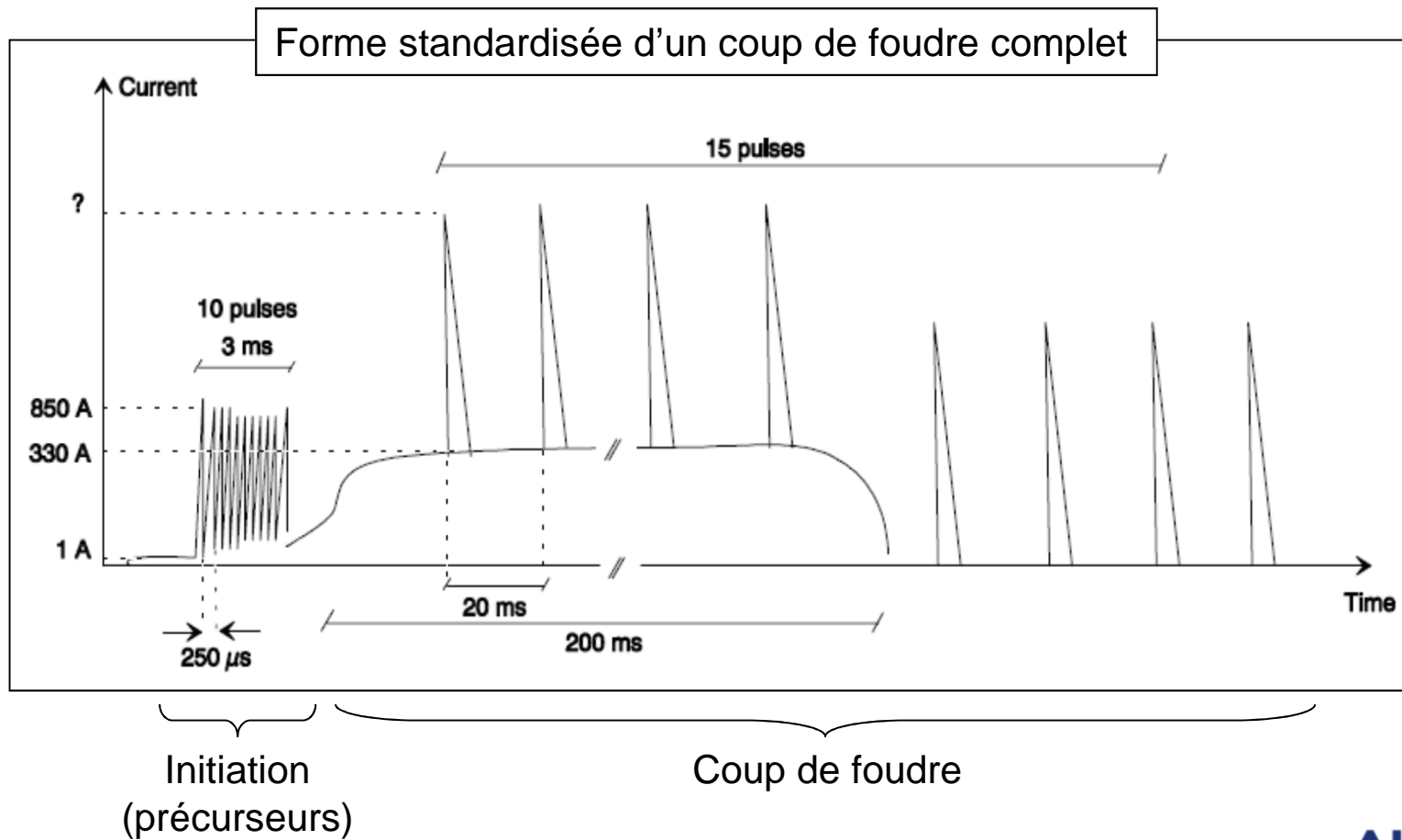
- Effets sur les matériaux métalliques
 - Fusion et percement
 - Enfouissement, déformation de la surface ou de la pièce impactée
- Effets sur les matériaux composites (1000 fois plus résistifs que les métaux)
 - Brulure en surface, disparition de la peinture et de la protection métallique
 - Eclatement/percement des fibres (autour du point d'impact)
 - Délaminage
- Etincelage aux interfaces/assemblages (principalement dans le cas de composites)
- Effets explosifs (conséquence des étincelles en zone fuel)





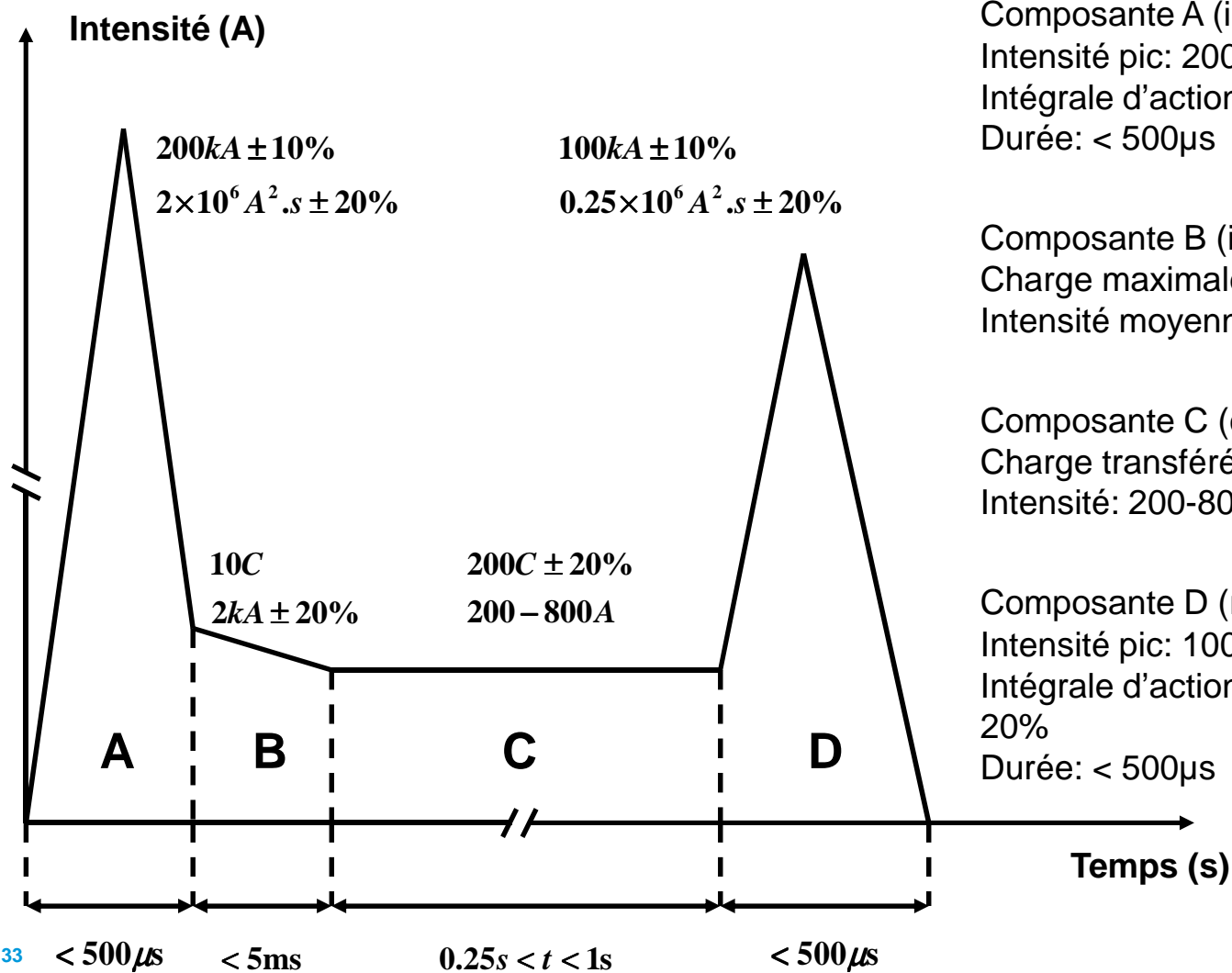
La foudre correspond à quelle menace ?

Standardisation de la menace foudre



Standardisation de la menace foudre

Formes standardisées pour les effets directs



Composante A (initial stroke)
 Intensité pic: 200 kA ± 10%
 Intégrale d'action: 2.10⁶ A².s ± 20%
 Durée: < 500μs

Composante B (intermediate current)
 Charge maximale transférée: 10C
 Intensité moyenne: 2 kA ± 10%

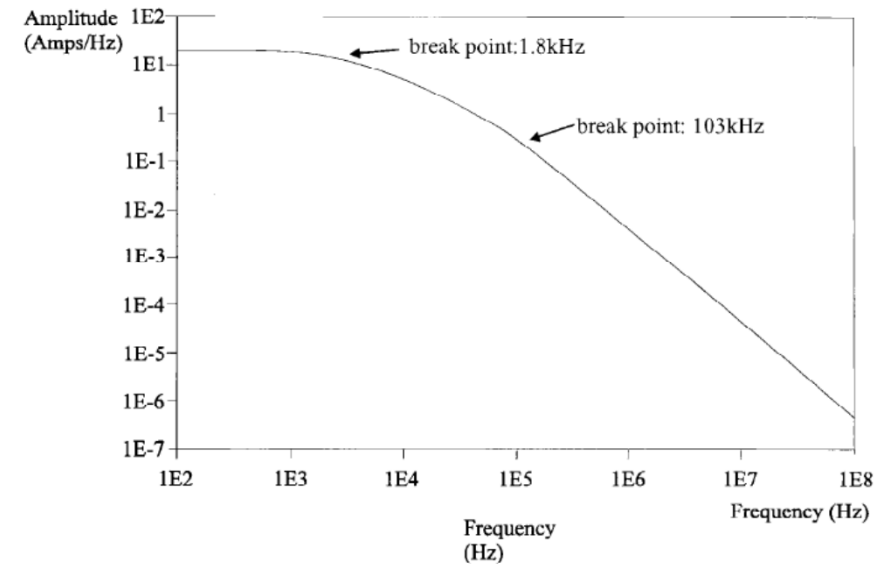
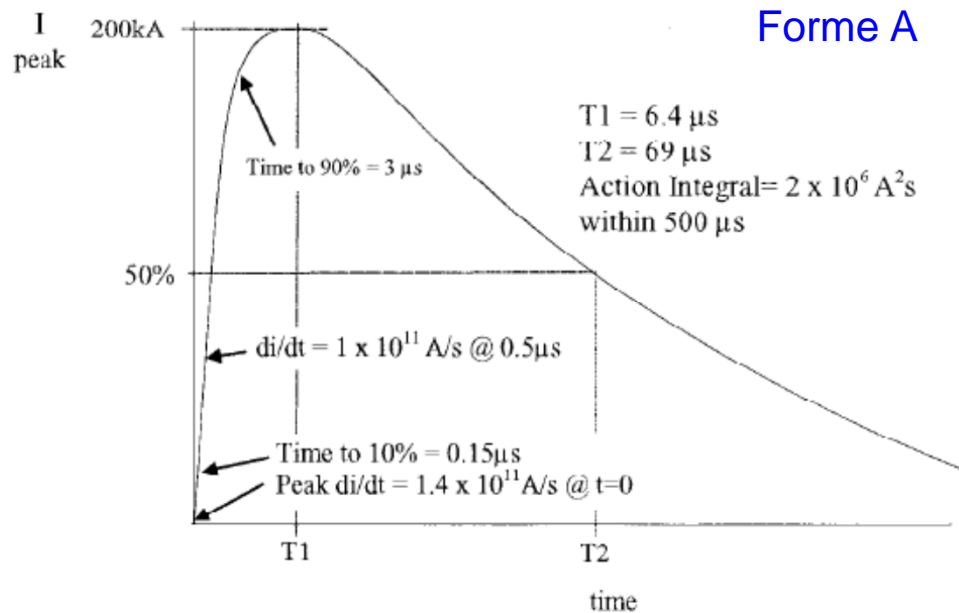
Composante C (continuing current)
 Charge transférée: 200 C ± 20%
 Intensité: 200-800A

Composante D (restrike)
 Intensité pic: 100 kA ± 10%
 Intégrale d'action: 0,25.10⁶ A².s ± 20%
 Durée: < 500μs

Standardisation de la menace foudre

Formes standardisées pour les effets indirects

Pour les effets indirects, le front de montée est un paramètre ayant un effet très important:
 En effet, les niveaux de tension induits dans les câbles sont liés à di/dt ($V = Ldi/dt$)



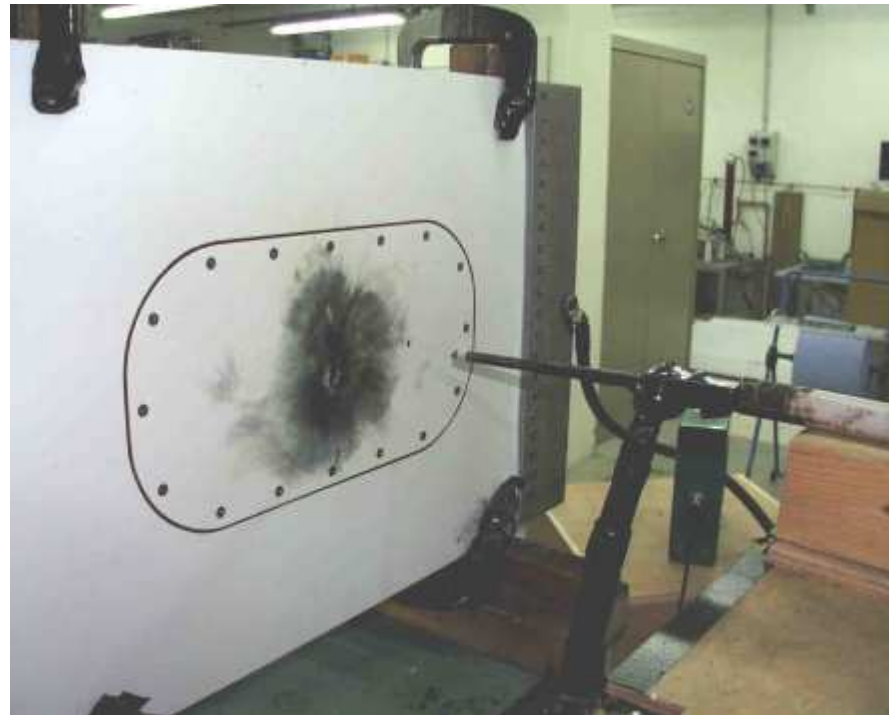
Pour les effets directs, le front de montée n'est pas spécifié car il ne joue pas...
 ... sauf qu'il est possible qu'il joue...

Standardisation de la menace foudre

Les essais « foudre »

Le but des essais:

- Améliorer la compréhension des phénomènes de dégradation, d'étincelage... en vue d'optimiser les dispositifs de protection
- Qualifier puis certifier les matériaux utilisés ou solutions mises en place



Lightning labs

DGA TA : ex CEAT

Laboratory in TOULOUSE

- Location: **DGA TA (Toulouse, France)**
- Direct and priority access for Airbus
- Partnership with DGA TA, LAPLACE (former CPAT), ONERA...
- Development of a new generator with higher performances (2012)



Maximum Performances

- A Component : 250kA; 60kV; 3,5MJ
- C Component : 800A; 1,3kV; 300C

Minimum Performances

- A Component : 170A; 2kV; 1J
- C Component : 70A; 1kV; 3.5C

Maximum sample impedance :

- $L=10\mu\text{H}$, $R=30\text{m}\Omega$

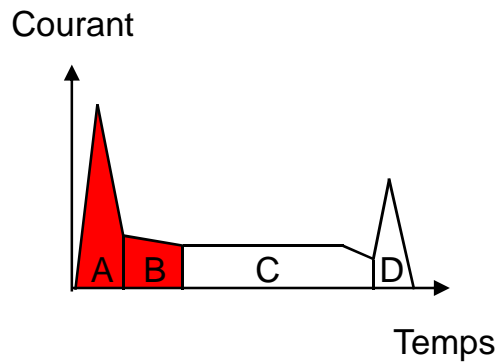
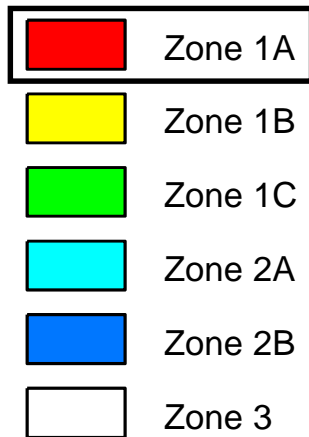
Diagnostics: courant, température (caméra IR), détection d'étincelages (photo, diodes), visualisation de l'arc (caméra ultra-rapide)



Cette menace se situe où ?

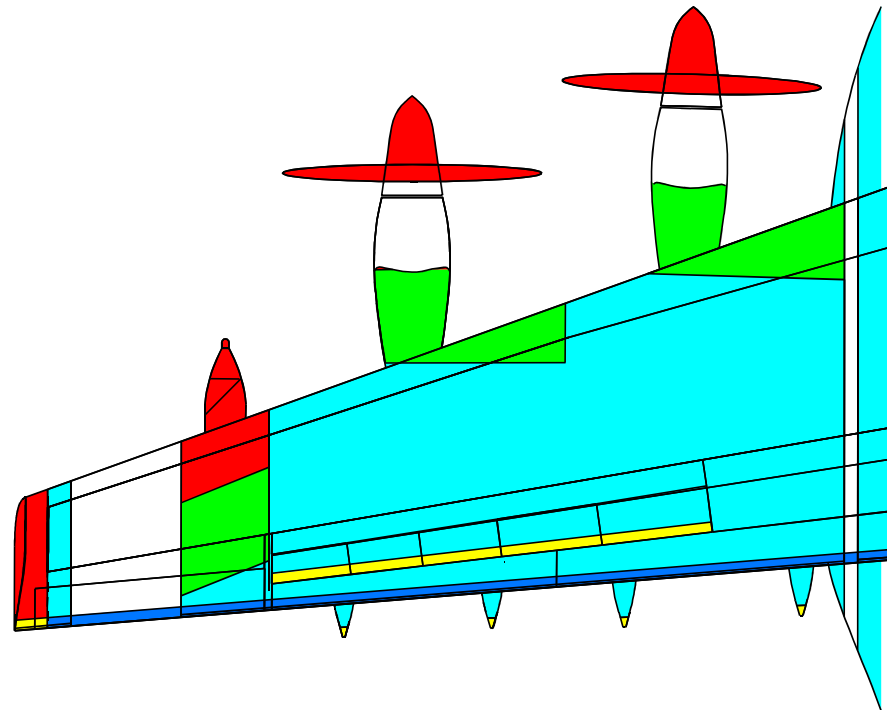
Zoning

Définition standardisée des zones associées à une menace donnée



Zone 1A : Zone de la première décharge en retour (200kA)

Toute surface de l'aéronef où une première décharge en retour est probable lors de l'attachement du canal, avec une faible probabilité de maintien de l'arc

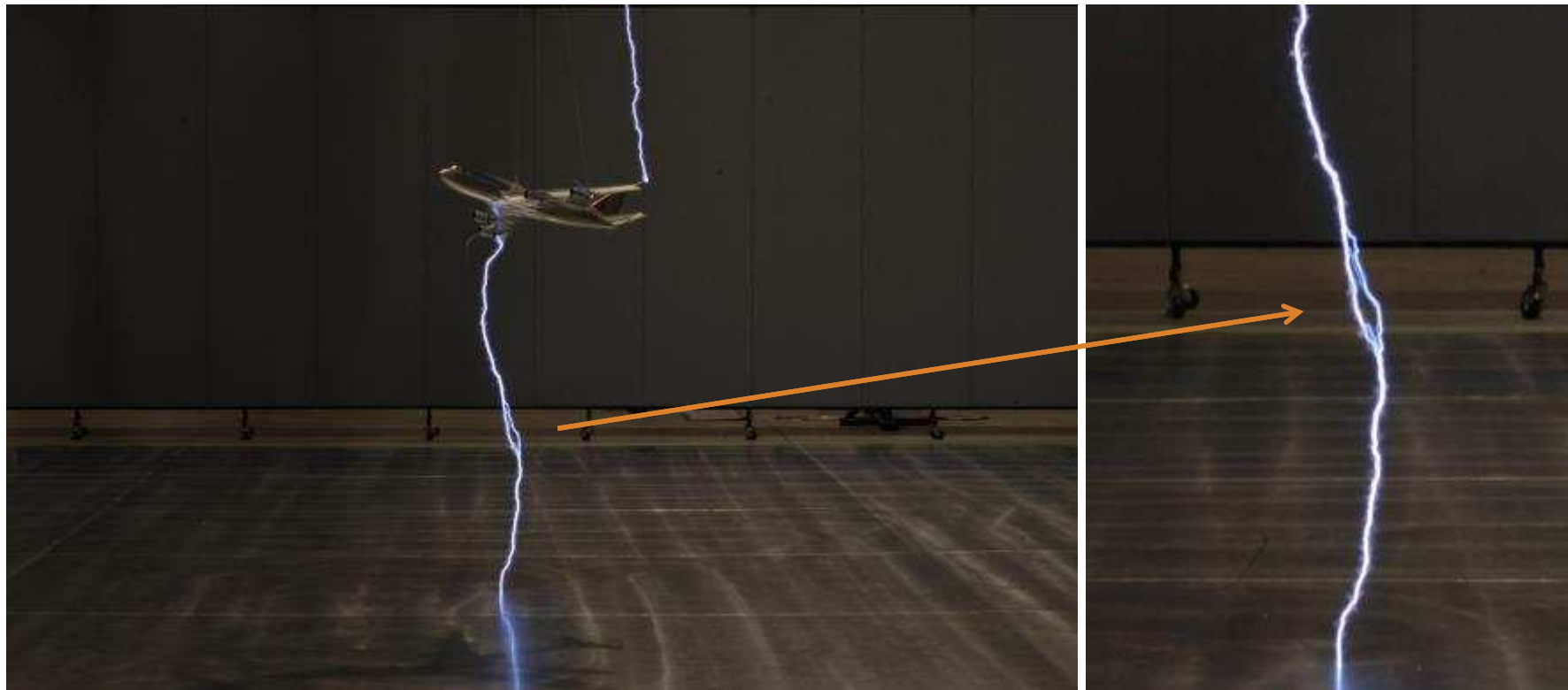


Zoning

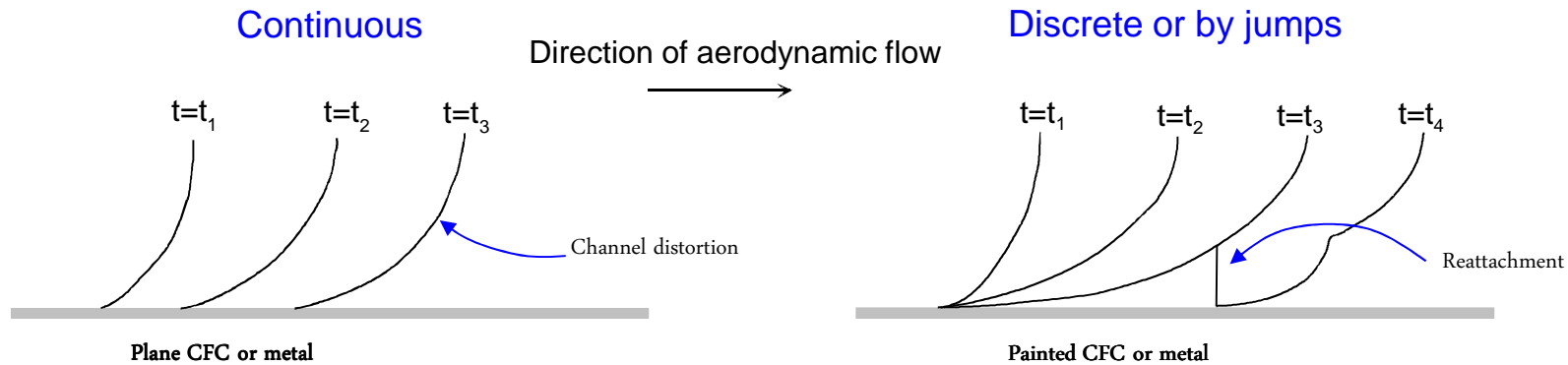
Méthodes de délimitation de ces zones sur aéronef

Il existe plusieurs approches pour établir les zones d'attachement de la foudre sur aéronef :

- Essais sur des maquettes
- Modèles électro-géométriques, lois de similitudes avec des avions précédents...
- Simulation numérique



Zoning Balayage foudre (sweeping)

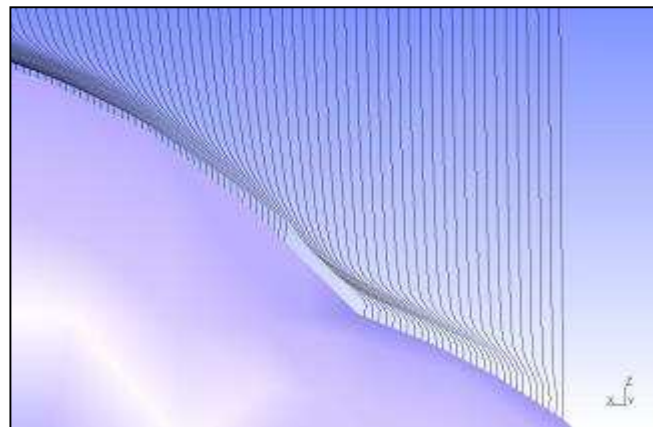


Complex process influenced by many parameters :

- ✓ discharge properties (temporal development of current, intensity, re-strikes)
- ✓ channel attributes (voltage, pressure, temperature distribution, ...)
- ✓ aerodynamic conditions (flow field, flight position, velocity, ...)
- ✓ electric and magnetic fields (in the surrounding of the aircraft)
- ✓ environmental conditions (temperature, pressure, humidity, ...)
- ✓ interaction of arc root with aircraft skin (depending on its geometrical shape, conductivity, dielectric strength)

Zoning

Balayage foudre (sweeping)



- Balayage sur nez d'A319
- Distorsion du canal causé par la couche limite et la présence de la verrière
- Rattachement du canal sur le montant métallique supérieur de la verrière



Interaction avec l'aéronef

Quelques mots sur le carbone

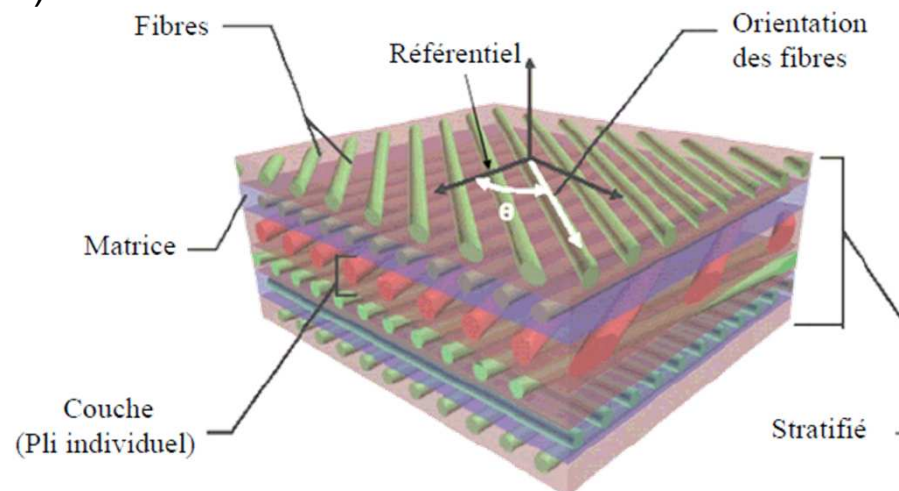
Matériau inhomogène et anisotrope

Conductivity of metal:
 10^6 to $5 \cdot 10^7$ S/m

Increased use of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) in aeronautic industry and large scale installation of electrical systems in new aircrafts

Multilayer composites materials: anisotropic electrical conductivity in the 3 dimensions

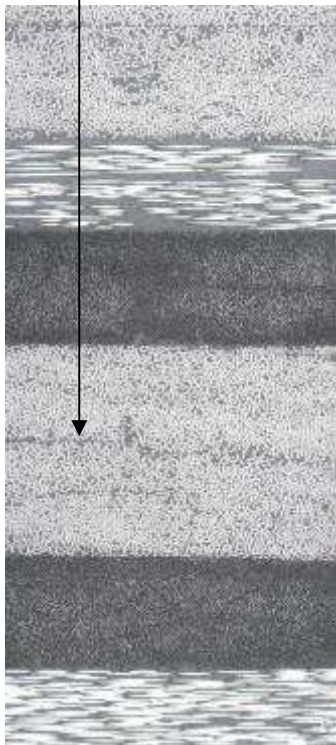
- Conductivity σ_x along carbon fibers (10^4 to 10^5 S/m)
- Conductivity σ_y perpendicular to the fibers direction within a ply (10^2 S/m)
- Effective conductivity σ_z across the thickness (0.1 to 10 S/m) influenced by
 - the matrix and the manufacturing process (non-conductive resin between plies with few fibers contacts)
 - the level of injected current (pre-existing contacts are improved and partial discharges can be created)



Quelques mots sur le carbone

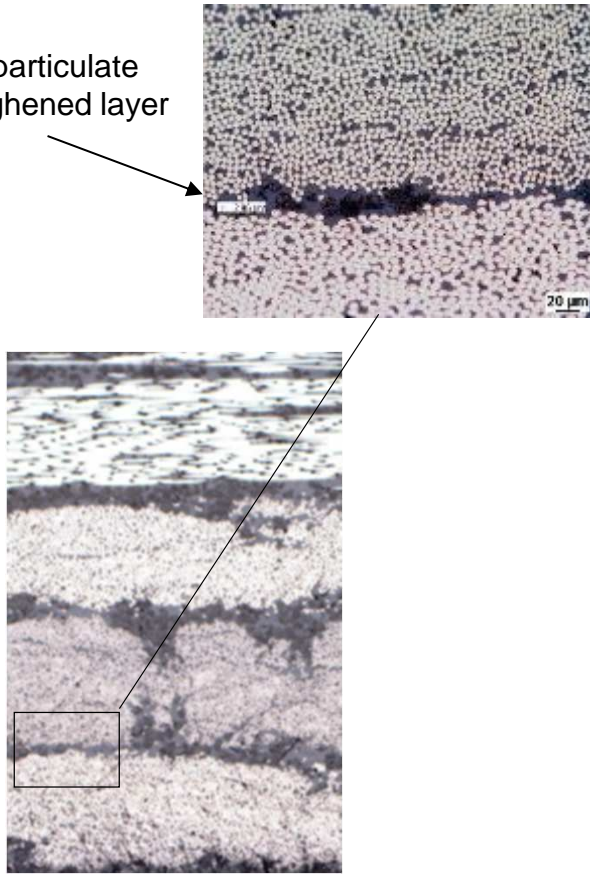
Mauvais contacts électriques entre plis : contraintes méca vs. élec

No particulate interleaved toughened layer



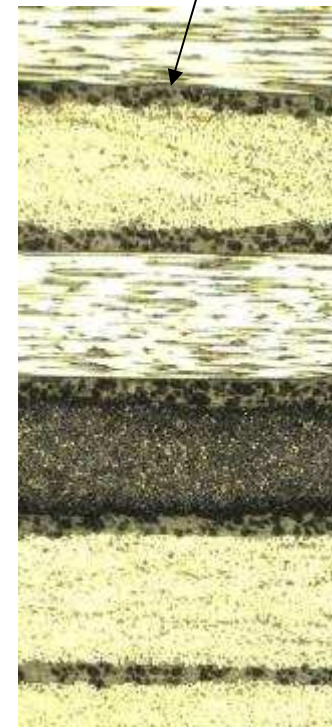
977-2/HTS

Non-uniform particulate interleaved toughened layer



M21/T800

Uniform particulate interleaved toughened layer



M21E/IMA



Quelles conséquences ?

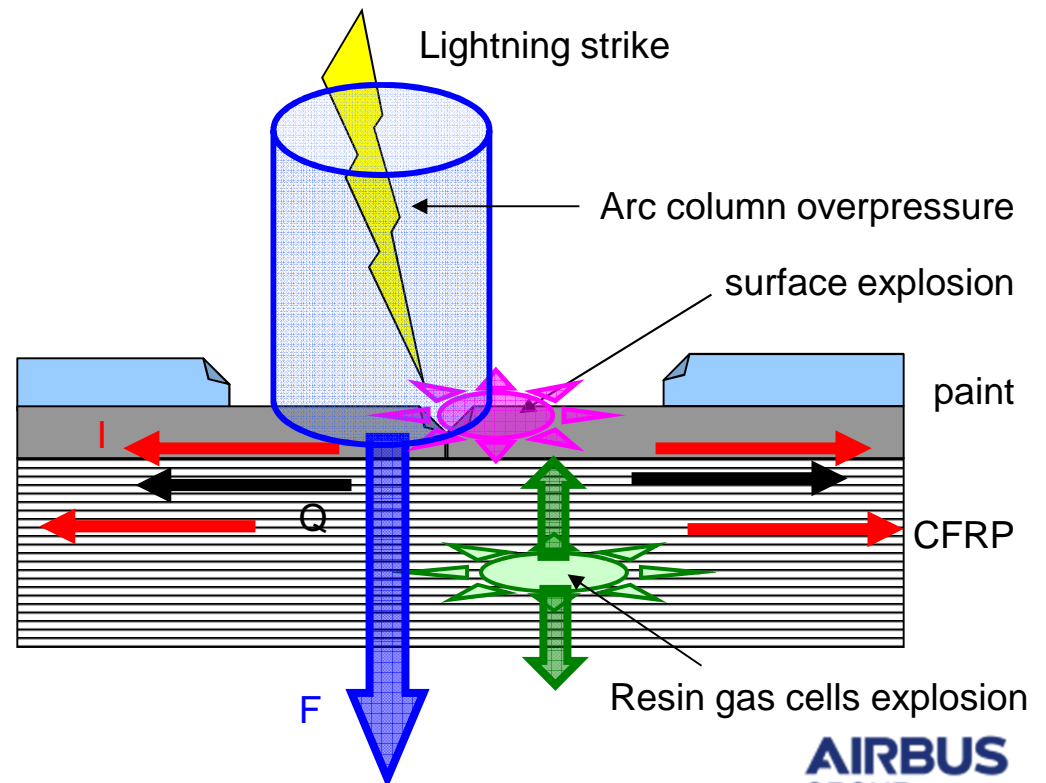
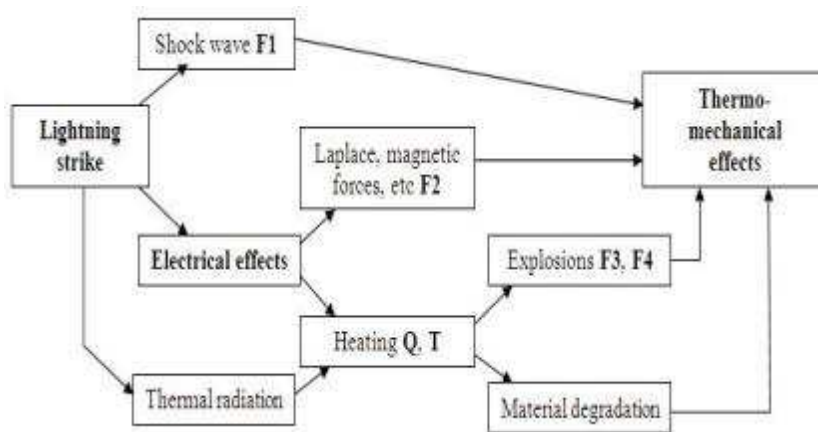
Lightning direct effects

Understanding CFRP damage due to lightning strike

Objectif: comprendre les mécanismes d'endommagement causé par l'attachement de l'arc

Enjeux: amélioration/optimisation des dispositifs ou solutions de protection contre la foudre

Amélioration/optimisation \equiv maintenir/augmenter l'efficacité de protection tout en réduisant la masse et le coût de la protection foudre

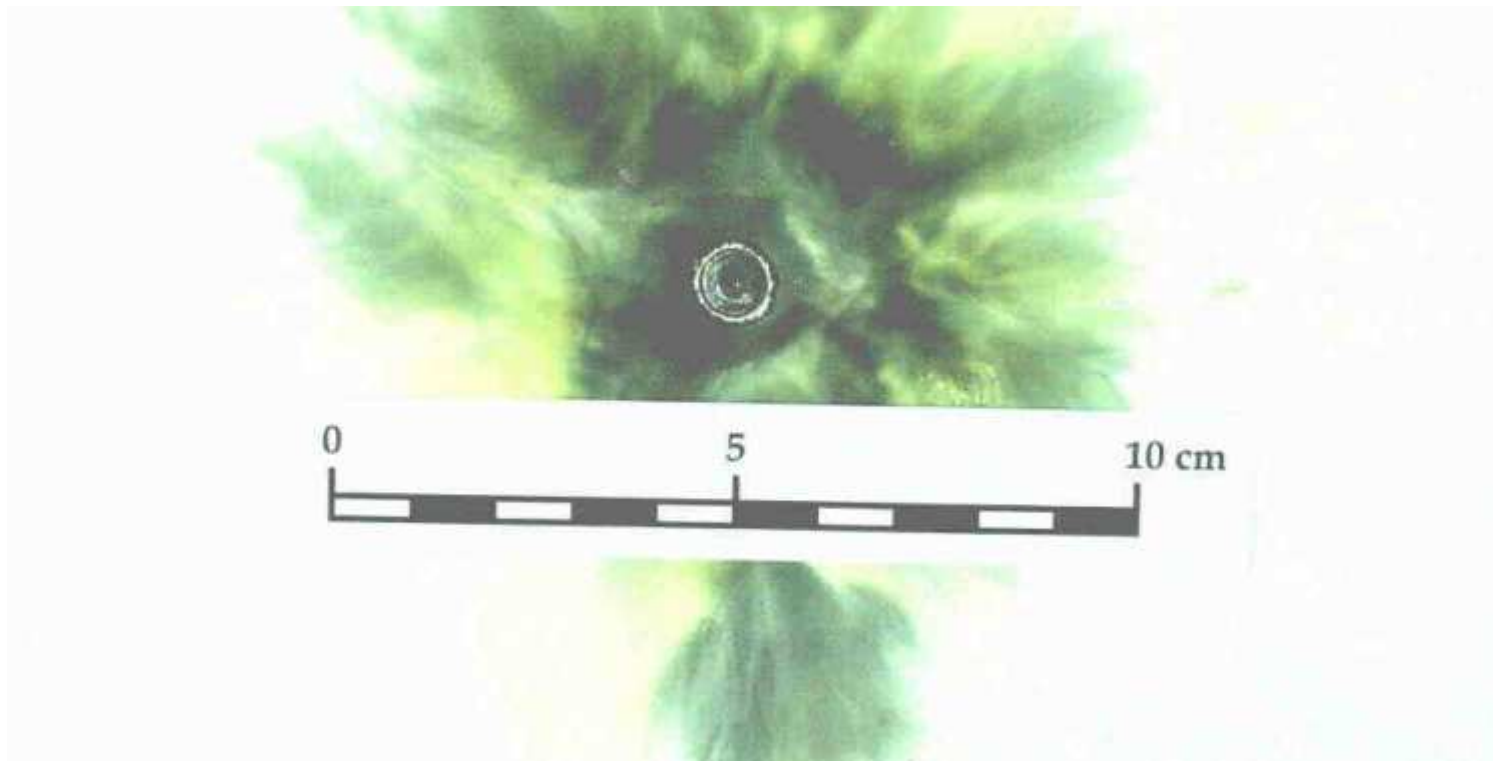


Exemple d'endommagement Métaux



Composante impulsionnelle A sur alliage d'aluminium

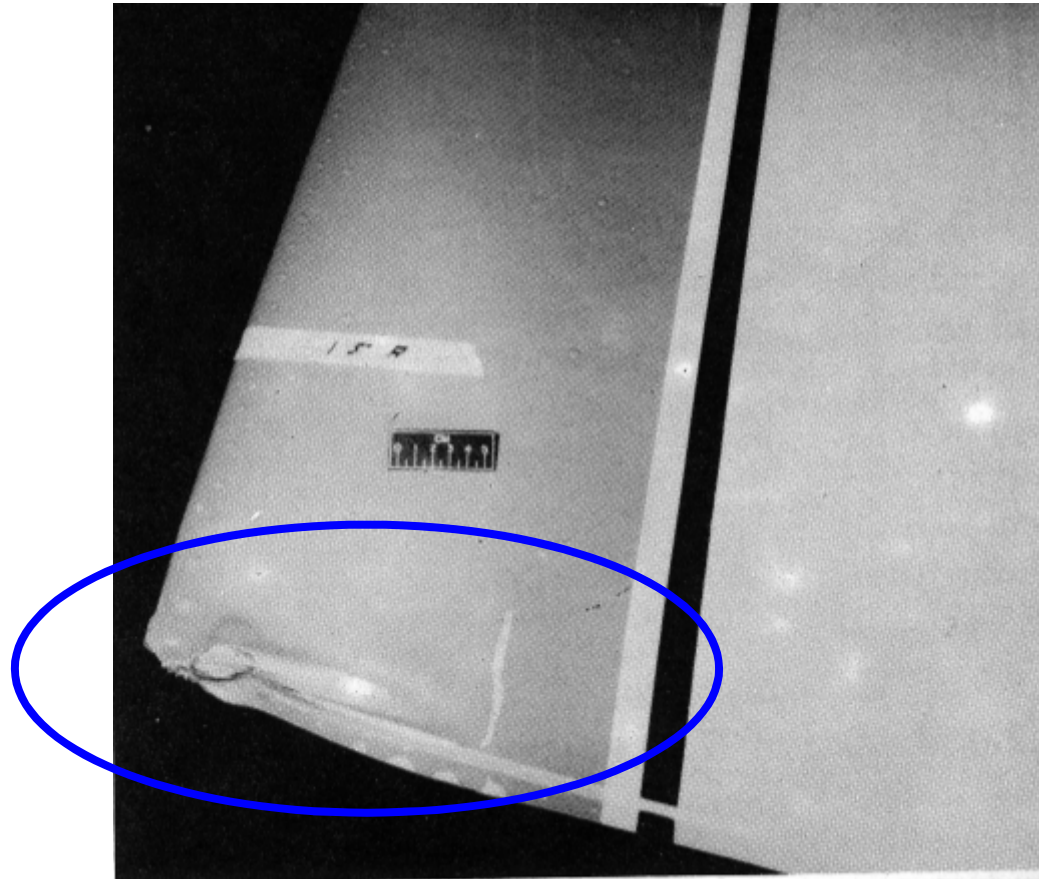
Exemple d'endommagement Métaux



Composante continue C^* (20C) + très faible impulsion (5 kA) sur aluminium peint

La présence de revêtements isolants (peinture, ...) ou de revêtements diélectriques sont des facteurs aggravants pour l'endommagement des matériaux métalliques.

Exemple d'endommagement Métaux



Effets magnétiques sur un saumon métallique

Exemple d'endommagement Métaux



**Effet d'onde de choc sur un
panneau en aluminium peint**

Exemple d'endommagement Composite



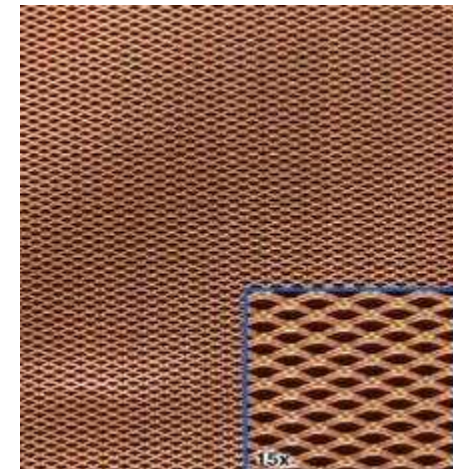
Impulsions type D+C* sur un composite en fibres de carbone

Exemple d'endommagement Composite



Impulsion type A sur composite à fibre de carbone non protégé

Exemple d'endommagement Composite



Expanded copper foil (ECF)

Impulsion D+C* sur carbone protégé par un grillage métallique

Solutions de protection Contre l'endommagement de surface

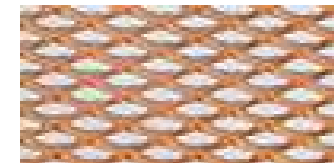
Différents types de protection pour les matériaux composites:

Ça tombe, mais on protège

- Grillage métallique, feuillard ou feuillard expansé (Expanded foil)
- Peinture ionisante ou conductrice (efficacité limitée et mal maîtrisée)
- Fibres métalliques intégrées dans le 1^{er} pli (problème de réparabilité)
- Utilisation de nanotubes de carbone (peinture et composite plus conducteur): voie exploratoire, pas de statut clair sur ce point, problème environnemental, coût...

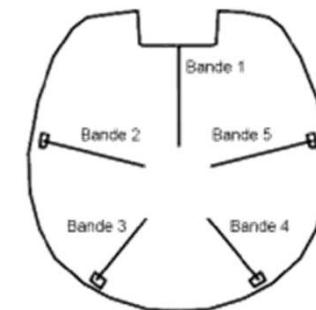
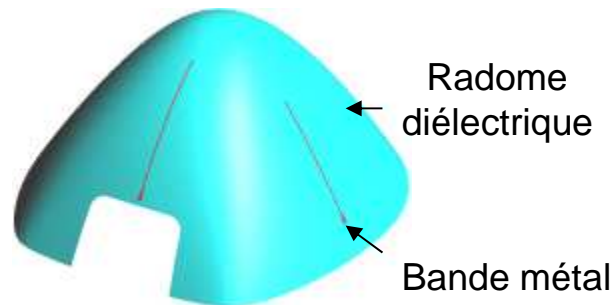
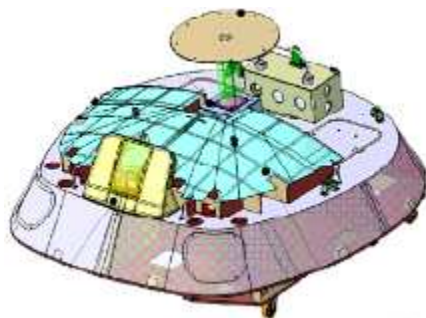


170 g/m²



On évite que ça tombe

- Pour les radomes: bandes métalliques (pleines ou à plots) pour éviter l'accrochage directement sur le radome tout en préservant sa transparence radar



Lightning direct effects

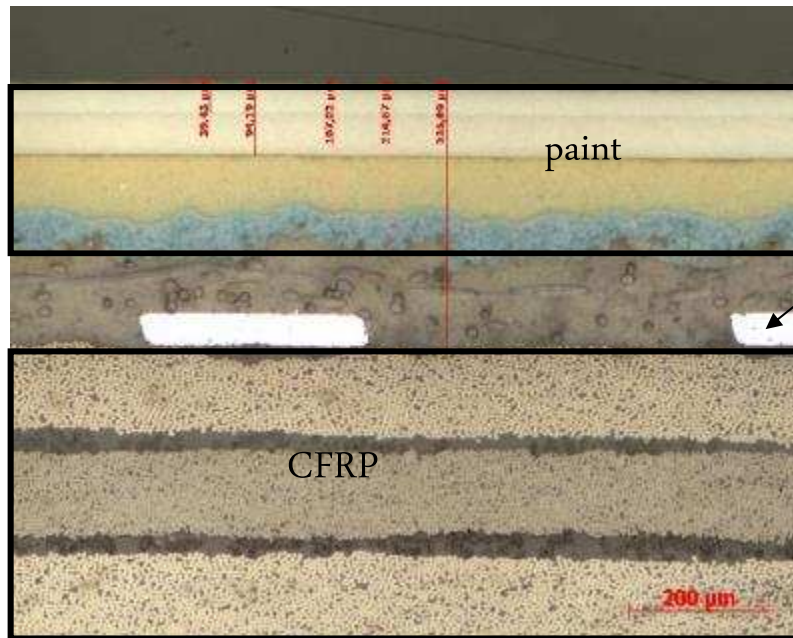
Understanding CFRP damage due to lightning strike

Role of the protection:

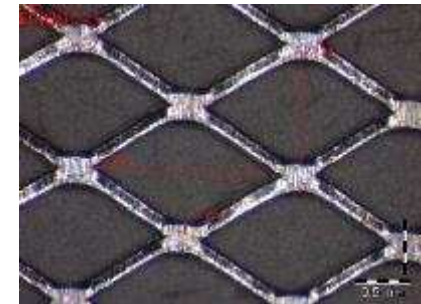
Absorb energy + conduct electrical currents to spread energy

Important parameters for the protection efficiency:

- ✓ Thermo-electric properties of metallic protection embedded in resin
- ✓ {Paint + surface master} thickness (dielectric barrier)



Metallic mesh
embedded in resin



170 g/m²



140 g/m²



90 g/m²

Lightning direct effects

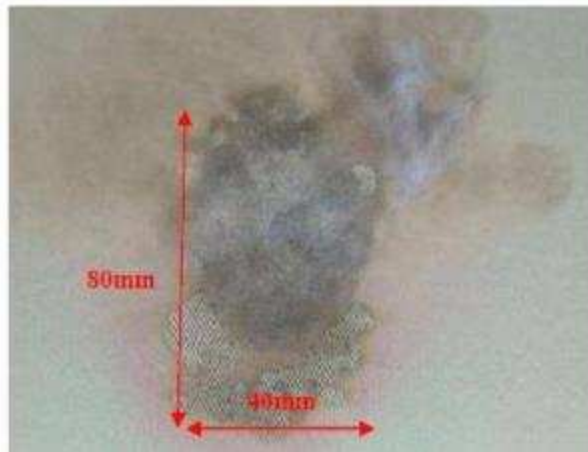
Understanding CFRP damage due to lightning strike

Paint thickness has a detrimental effect on the ability of the protection to absorb the lightning arc energy since it is an insulator and it acts as a dielectric barrier which tends to concentrate and fix the arc root on a localized area

To have an efficient protection, dielectric barrier thickness shall be as thin as possible. Indeed, the efficiency of the metallic protection can be drastically reduced when the paint layer is added

EADS IW has significant skill in protection efficiency understanding and assessment

No paint



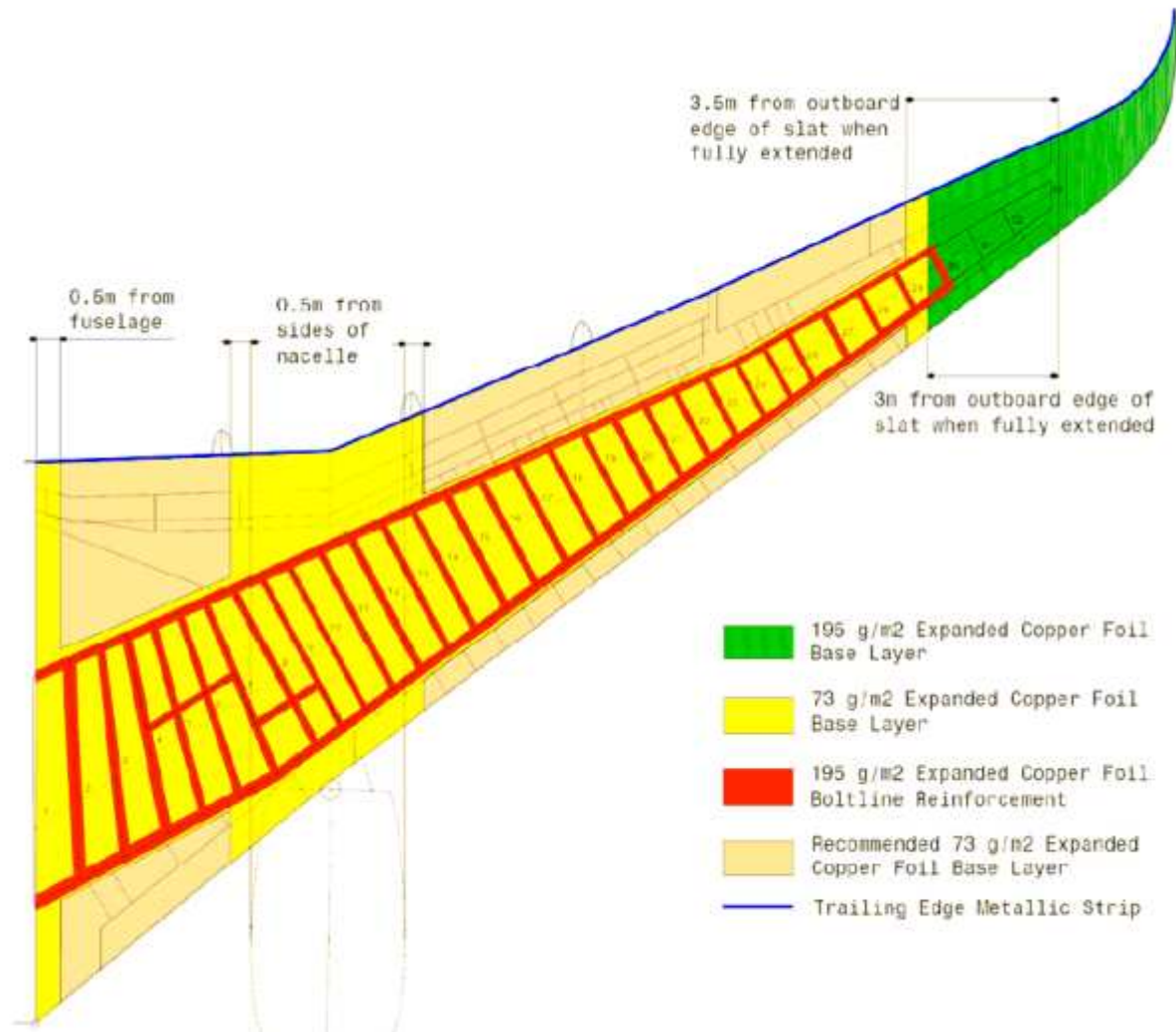
220 µm paint



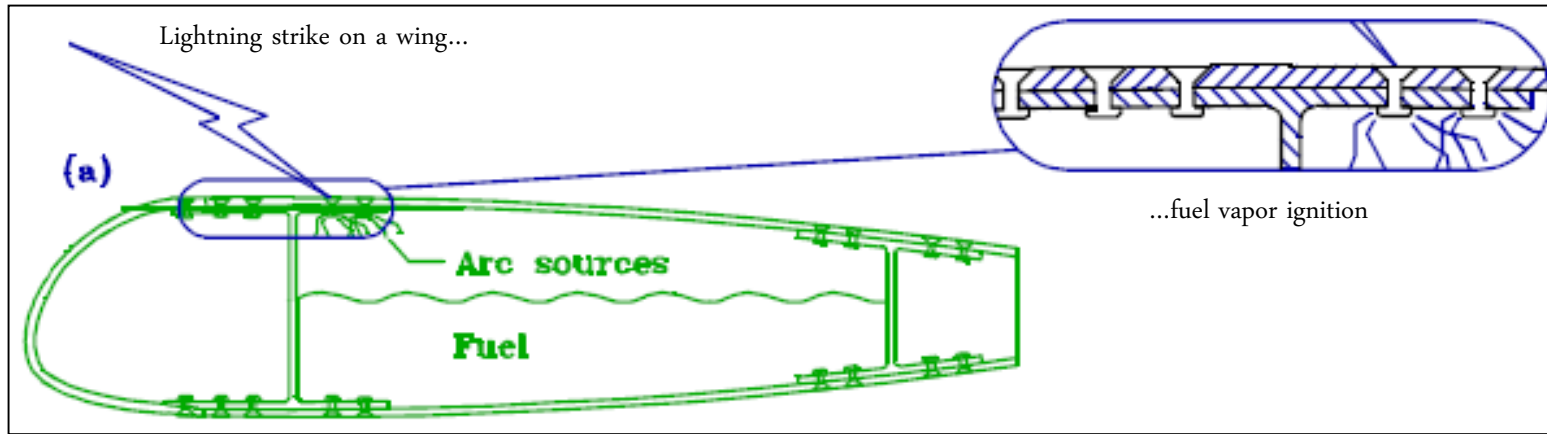
110 µm paint



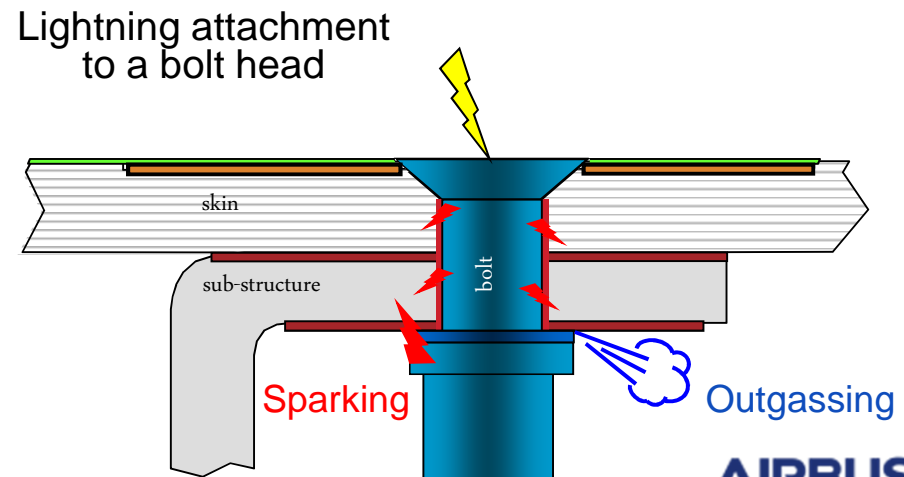
Protection de la voilure d'un aéronef A350



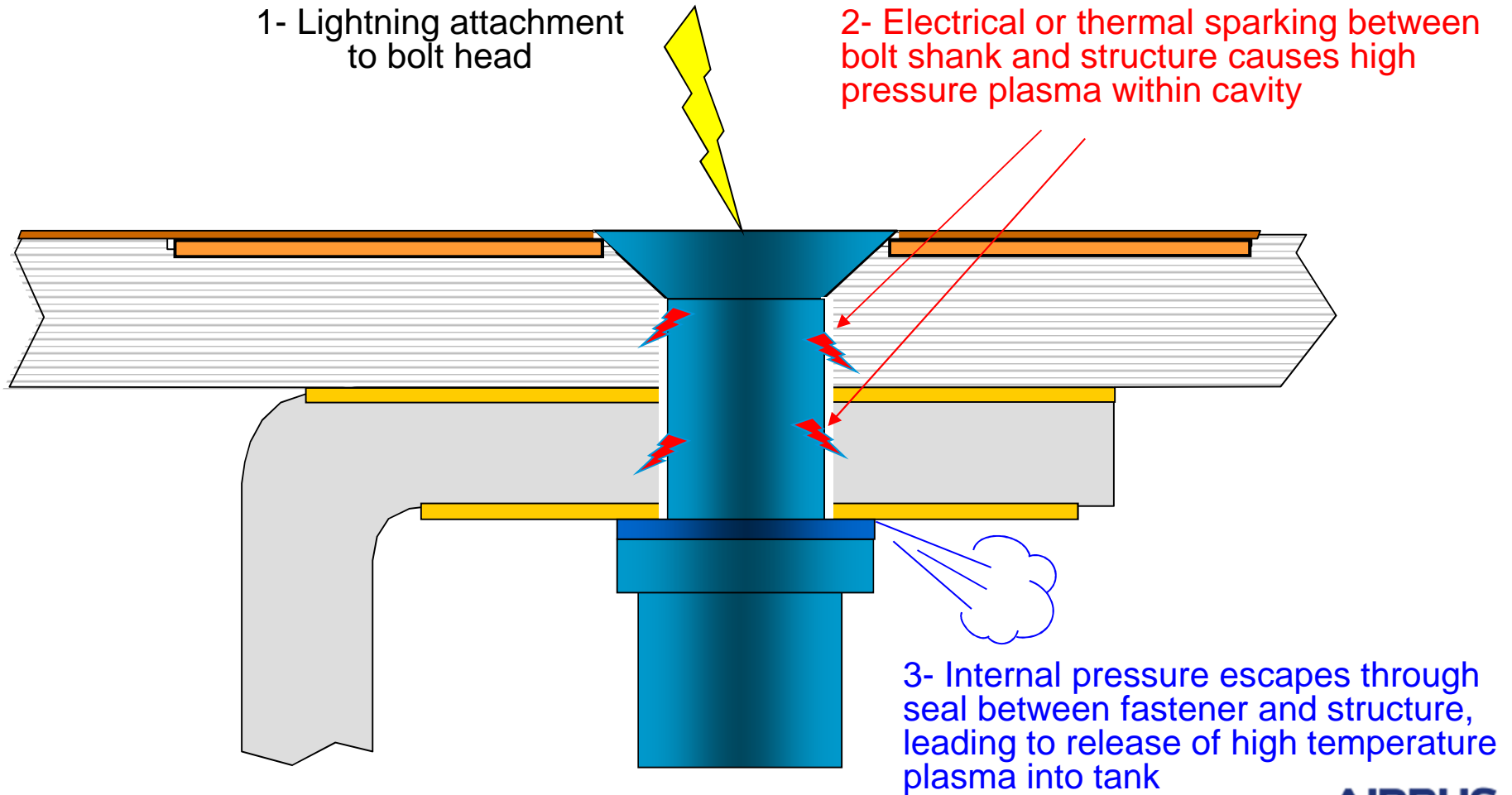
Etincelage Contexte



Lightning strike in fuel area can induce sparking inside the tank and can lead to the fuel ignition!!

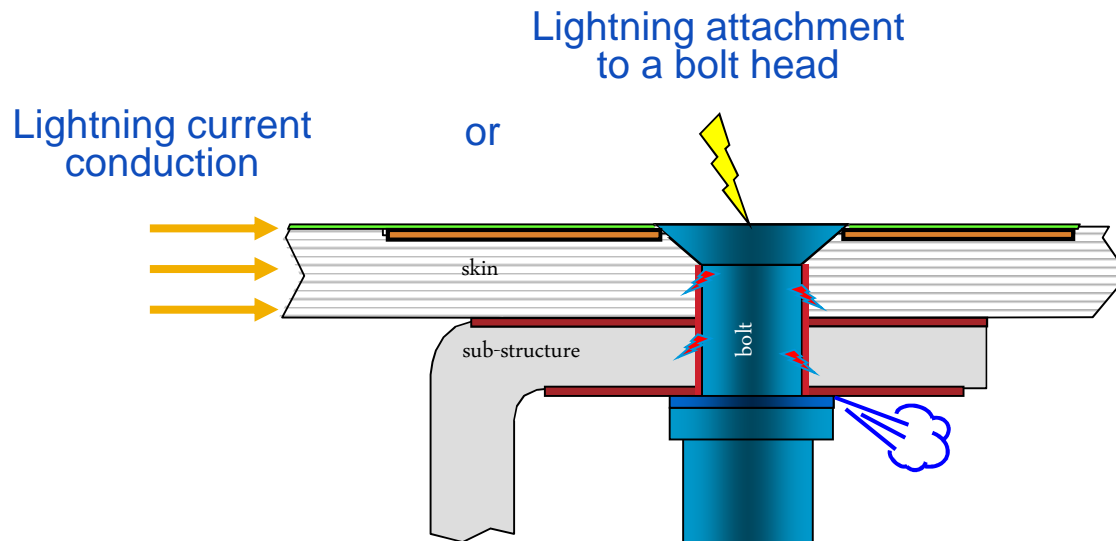


Etincelage Phénoménologie



Etincelage Phénoménologie – in tank outgassing

- **Internal discharge** inside the fastener (between bolt and sub-structure)
 - caused by a voltage sparking between parts initially isolated
 - caused by a thermal sparking between parts in poor electrical contact
- Both mechanisms induce **pressure** rise inside the fastener cavity
- Possible hazardous consequence : **In-tank outgassing** (hot gas entering the tank due to pressure release) that could induce fuel vapor ignition



Etincelage Phénoménologie – in tank sparking

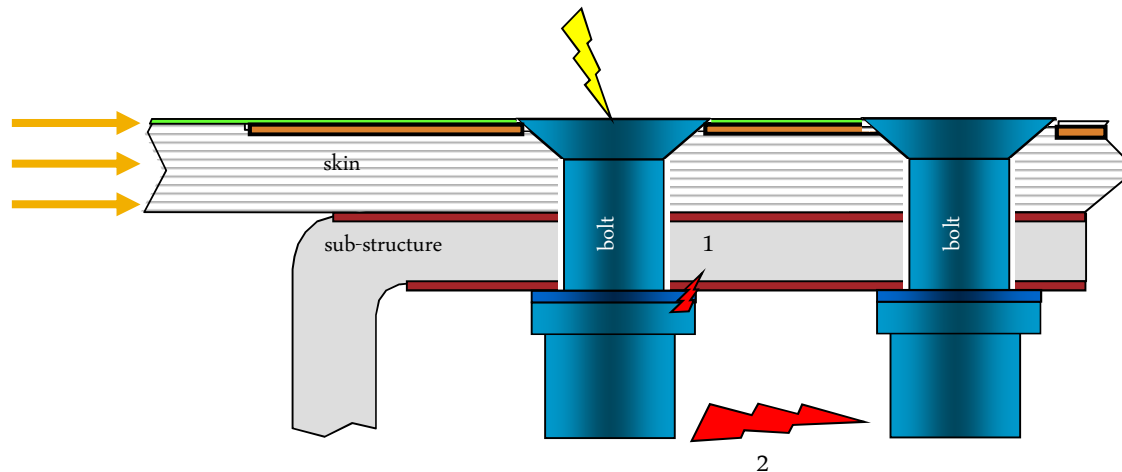
➤ **In-tank discharge**

1. Between nut and rib

- caused by a voltage sparking between nut and sub-structure due to isolation default
- caused by a thermal sparking between nut and sub-structure due to isolation default and presence of poor electrical micro-contacts

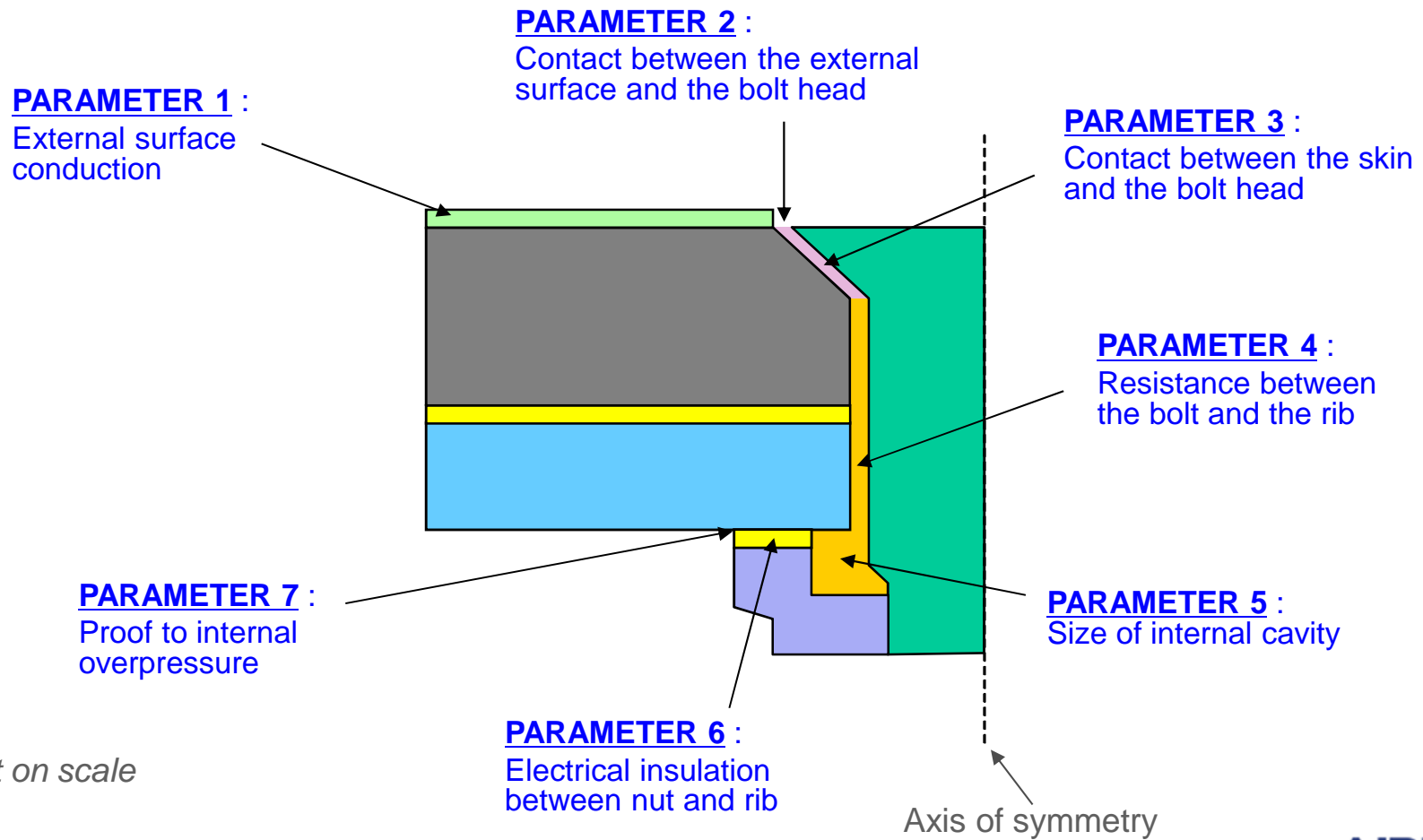
2. Between two adjacent nuts caused by a voltage sparking

➤ Possible hazardous consequence : **in-tank sparking** (plasma with possible hot melt particles inside the tank) that could induce fuel vapor ignition



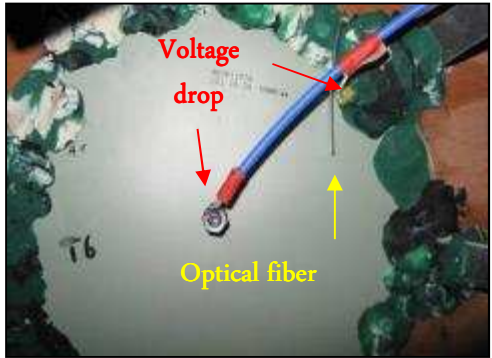
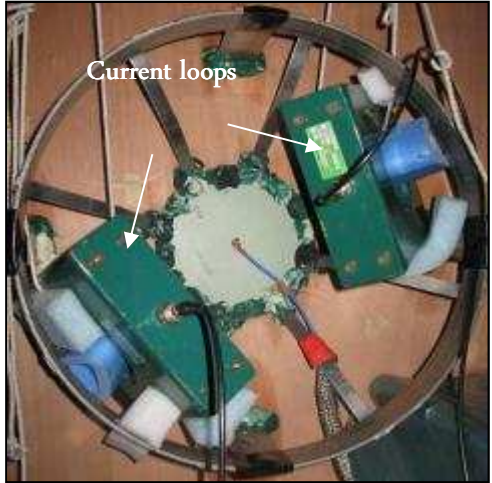
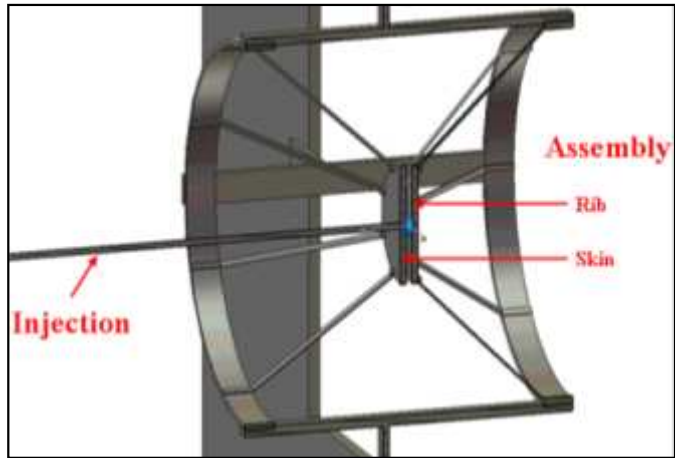
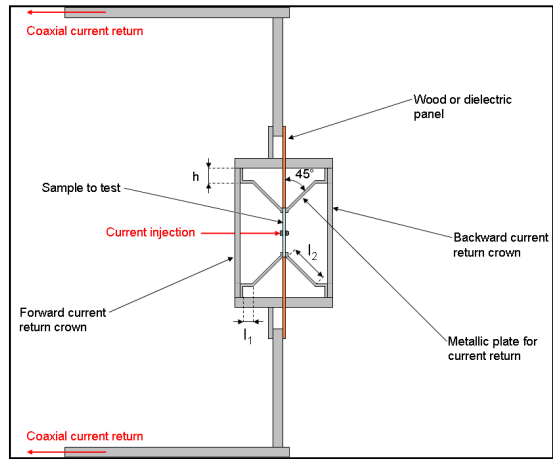
Etincelage

A l'échelle de la fixation : « the magnificent 7 »



Not on scale

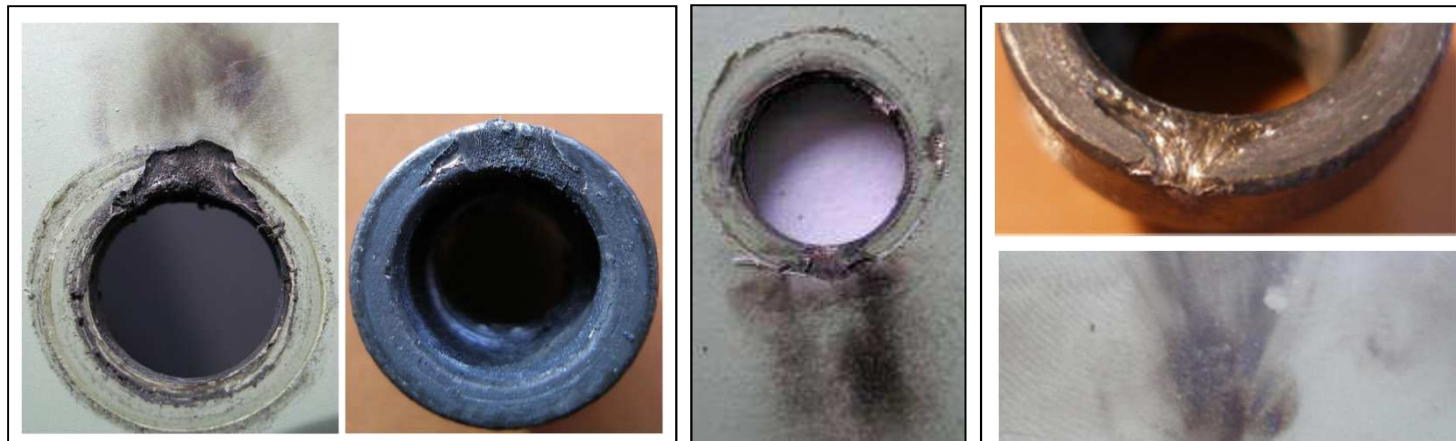
Etincelage Essais

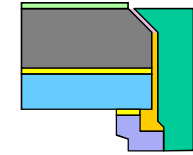


Tests performed at CEAT – DGA TA (Toulouse, 2008)

Etincelage

Essais – point de fusion/éjection sous l'écrou

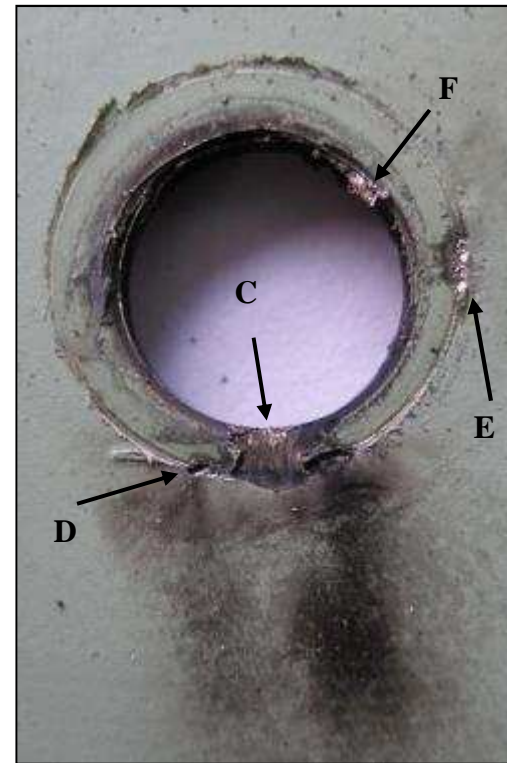
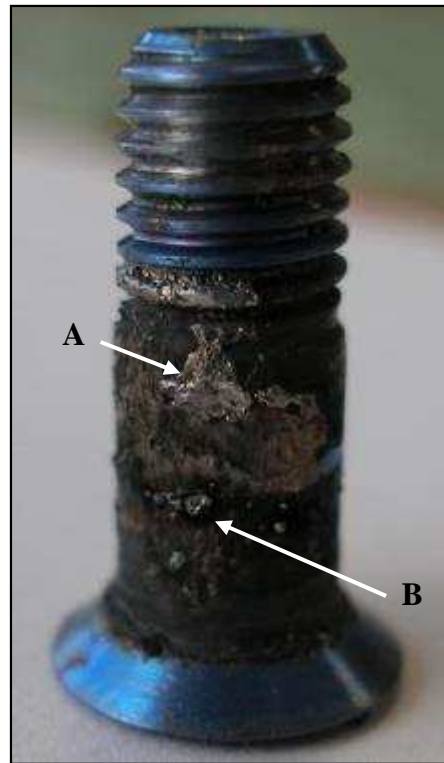




Etincelage



Significant scratch on the paint previous to the shot
Several output points of black traces
Some marks (F) seem not come from the internal but maybe due to breakdown between nut external edge & rib
Main ejection location (C) can be explained differently

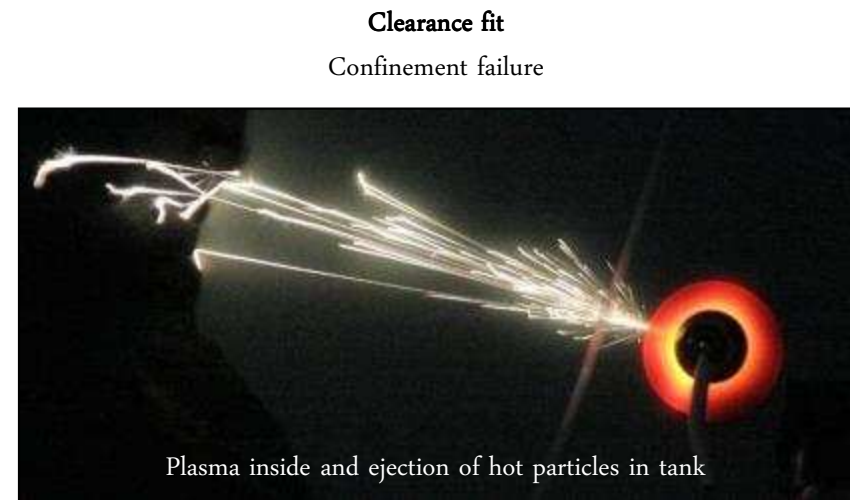
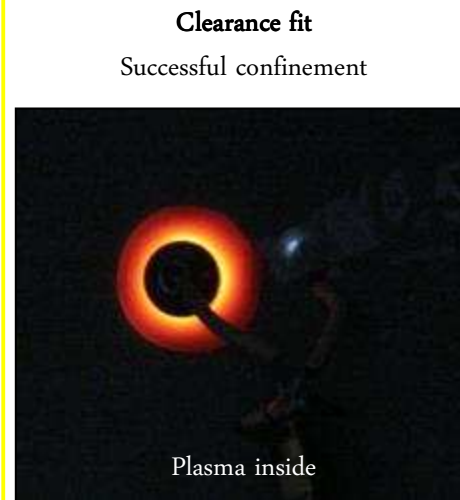
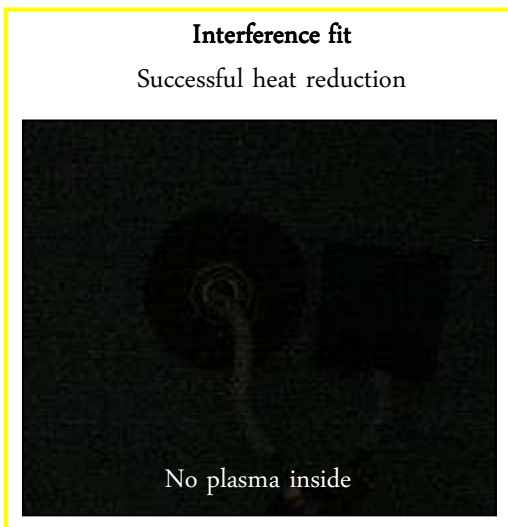
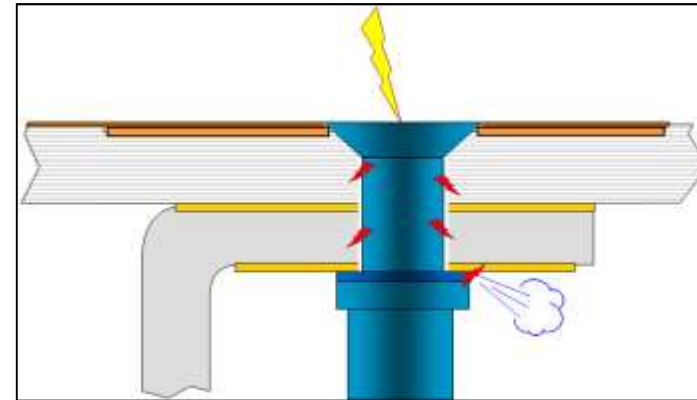


Etincelage

Tests sur assemblages basés sur nos recommandations

How to mitigate sparking inside fuel tank ?

- Allow creation of plasma inside the cavity BUT avoid overpressure release inside tank
- Avoid creation of plasma inside the cavity
 - Electrical isolation
 - Interference fit (& conductive bolt treat)





Et à plus long terme

Projet amont

ILDAS: In-Flight Lightning Strike Damage Assessment System

Project purpose

After a lightning strike on an aircraft, characterize:

- the current flowing on the aircraft skin
- the electrical field around the aircraft
- the lightning attachment locations

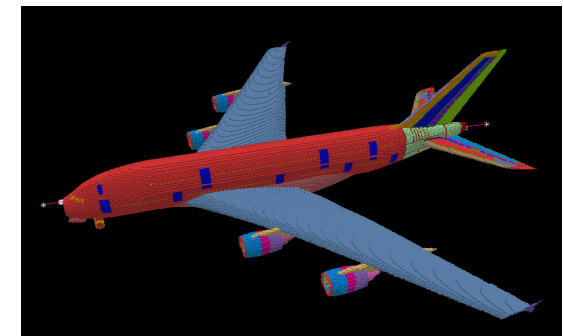
Project purpose

Develop a coherent system and integrated process, that encompass:

- Sensors and measurements
- Electromagnetic prediction, analysis and models validation
- Data collection and management

Goals & Objectives

- Enables a rapid build-up of a lightning database
- Enables standards committees to improve lightning standards
- Enable optimization of the protective measures of aircraft
- Improve efficiency of maintenance operations after a strike
- Strengthen industry competitiveness by reducing aircraft delays and operating cost through reduction of maintenance time



Innovative Inverse Method, based on a numerical simulation (FDTD) of the lightning current propagation

2011: Successful first flight test on A340

2013: Ice campaign on A380 equipped with A350 engines

Projet amont

LLR: Laser Lightning Rod

Since many years the possibility to trigger or to divert lightning has been addressed on-ground with the use of femtosecond laser

→ Laser Lightning Rod (LLR)

Objective : Assess the feasibility of this concept to the protection of aircraft during arrival, departure and taxi way phases and large critical sites (airports, launch pads) in order to better control the location of lightning attachment and devise better protections



Lightning triggered by rocket

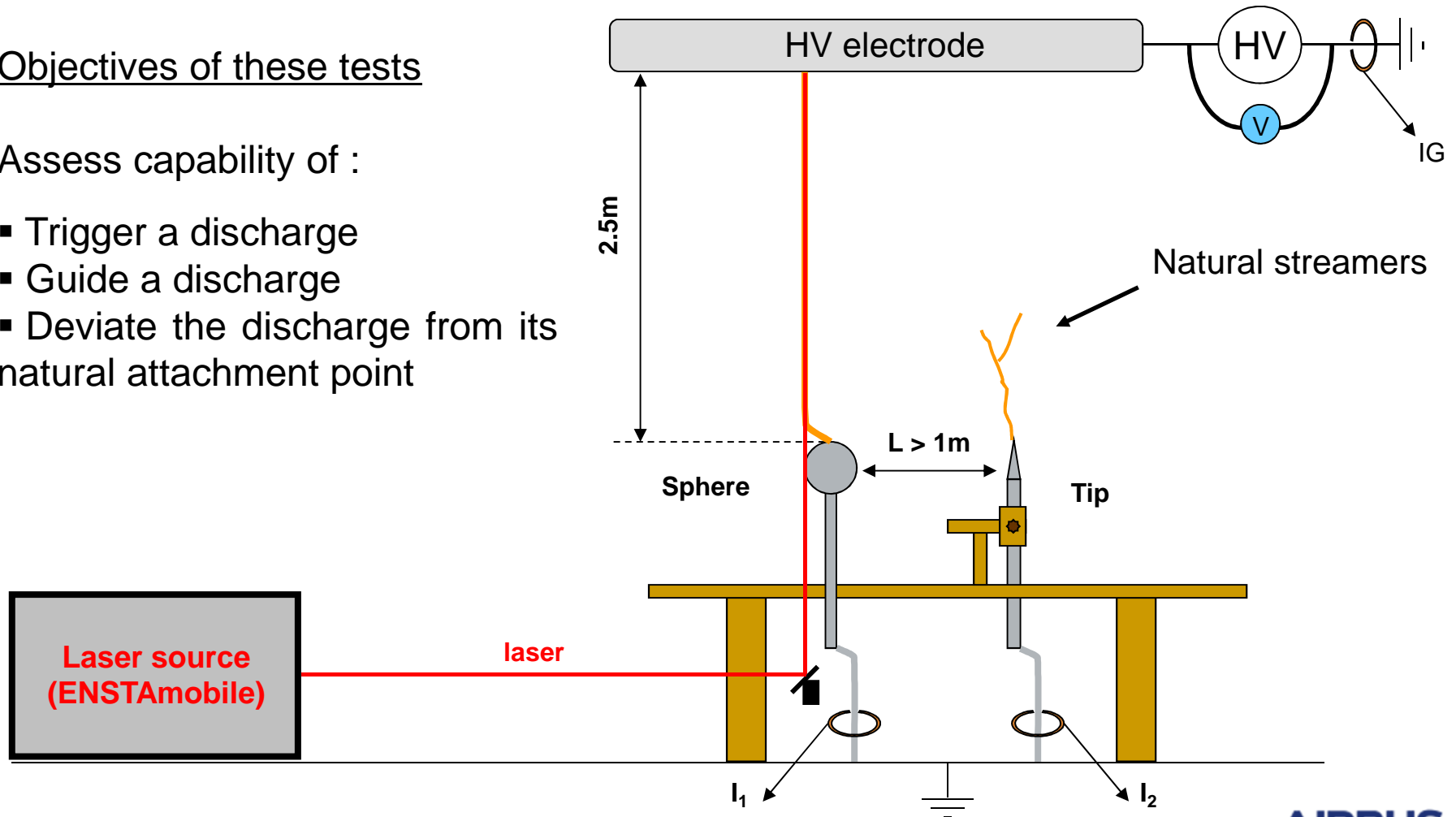


Lightning control experiments 2009: essais préliminaires

Objectives of these tests

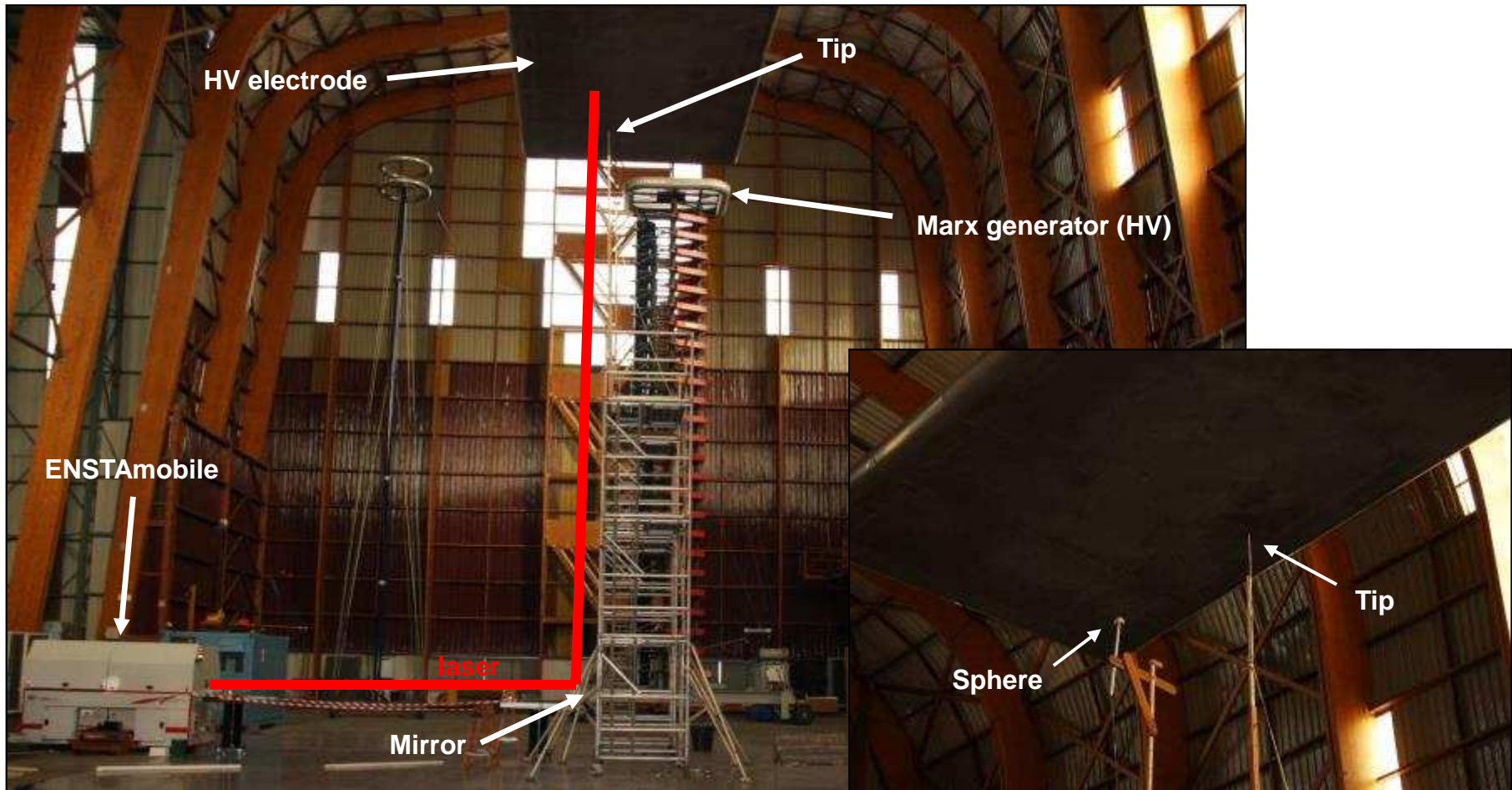
Assess capability of :

- Trigger a discharge
- Guide a discharge
- Deviate the discharge from its natural attachment point





Lightning control experiments 2009: essais préliminaires



DGA Techniques Aéronautiques, Toulouse, 2009



Lightning control experiments 2009: essais préliminaires

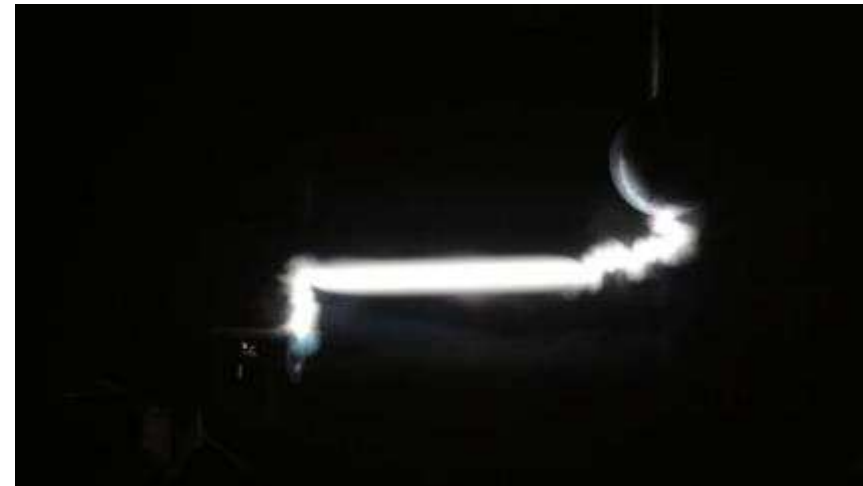
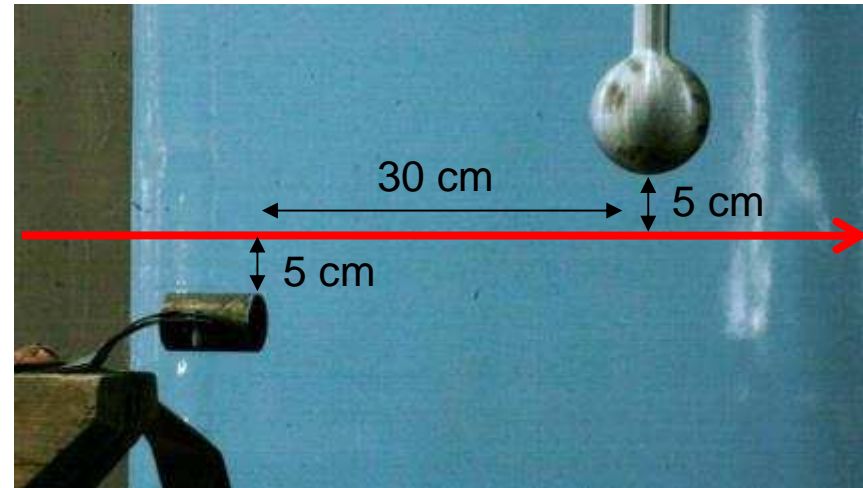
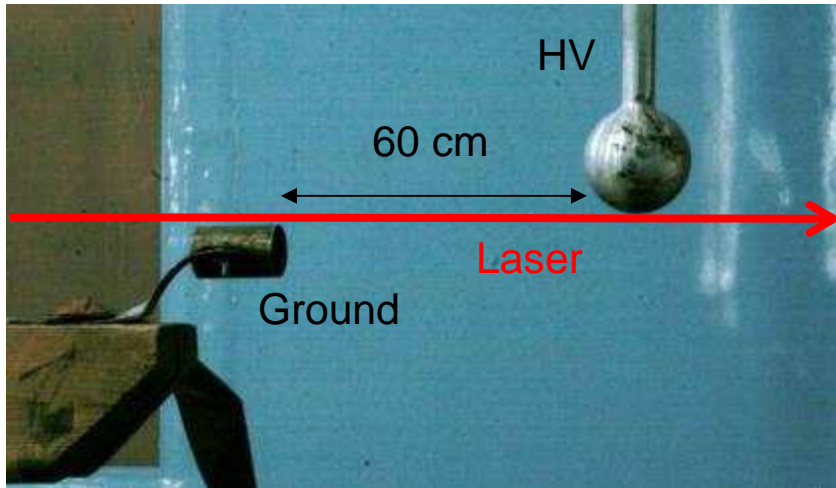
Applied voltage of +1.8 MV



- Delay between laser and discharge : from 0.5 to 5 μ s
- Air dielectric rigidity reduction : 7.2 kV/cm without laser, 3.6 kV/cm with the laser
- 100% reproducible

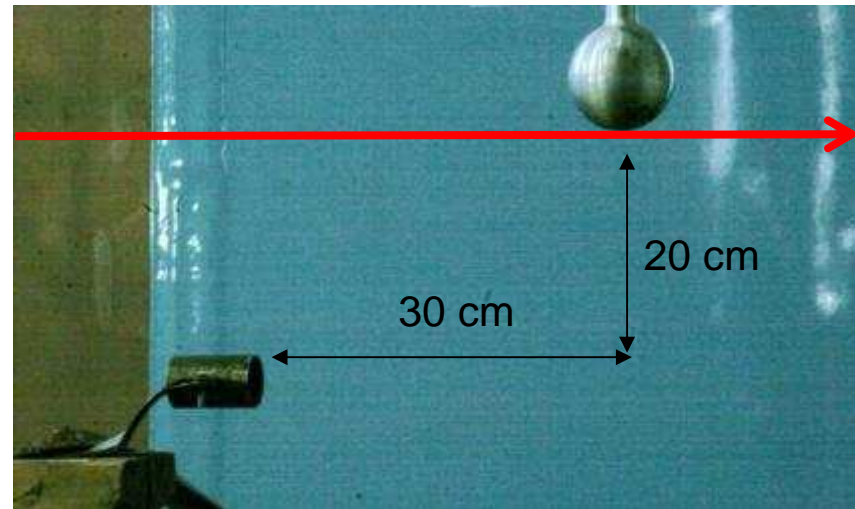
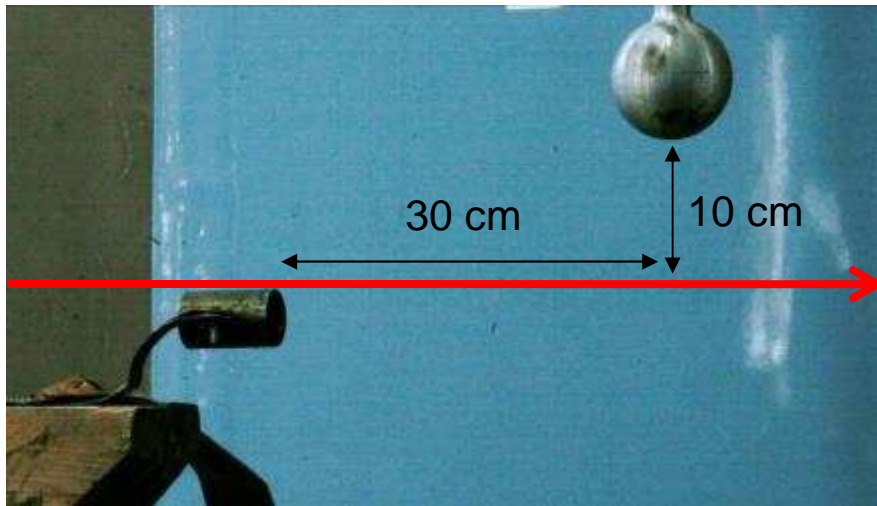


Lightning control experiments 2010: essais intermédiaires





Lightning control experiments 2010: essais intermédiaires





Questions ?