

La foudre

P. Lalande & L. Chemartin



Bertrand Kulik

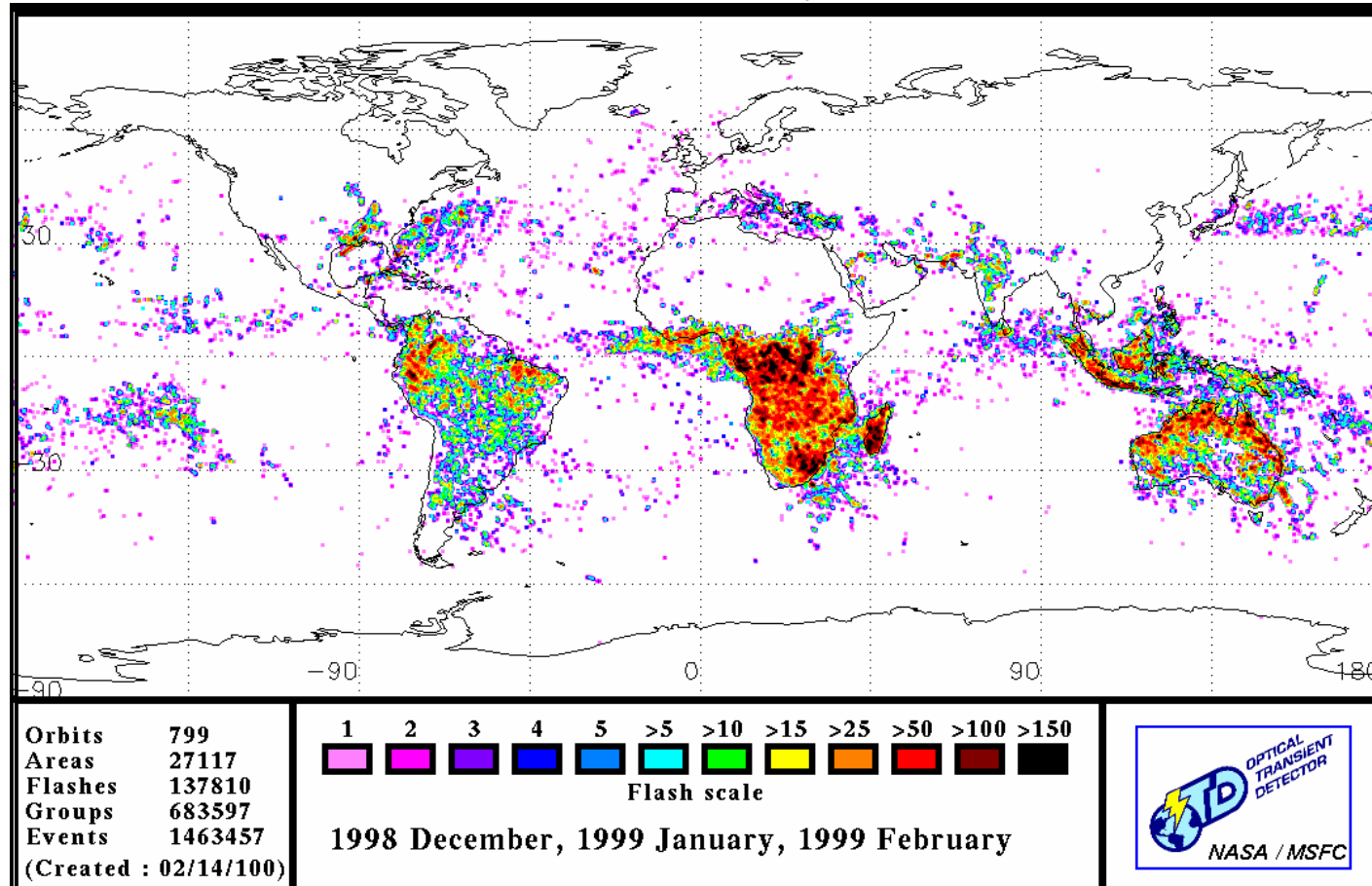
Plan

- Chiffres clés
- Le nuage d'orage
- Les décharges atmosphériques
- Les systèmes de déclenchement/Guidage des éclairs
- Foudroiement des avions
- Modélisation & expérimentation des effets thermomécaniques de la foudre sur un aéronef

Chiffres clés

Chiffres clés : orages/éclairs

100 éclairs/s



AAE 19/10/2011

20 Millions d'orages / an
France : 470 000 éclairs /an

Diamètre d'un orage: 15 à 25 km.
Extension verticale 10, 12 ou 15 km.
Durée 1 heure

Eclair : 500 MJ

Chiffres clés : humain

En France : 10 morts /an (INSERM)

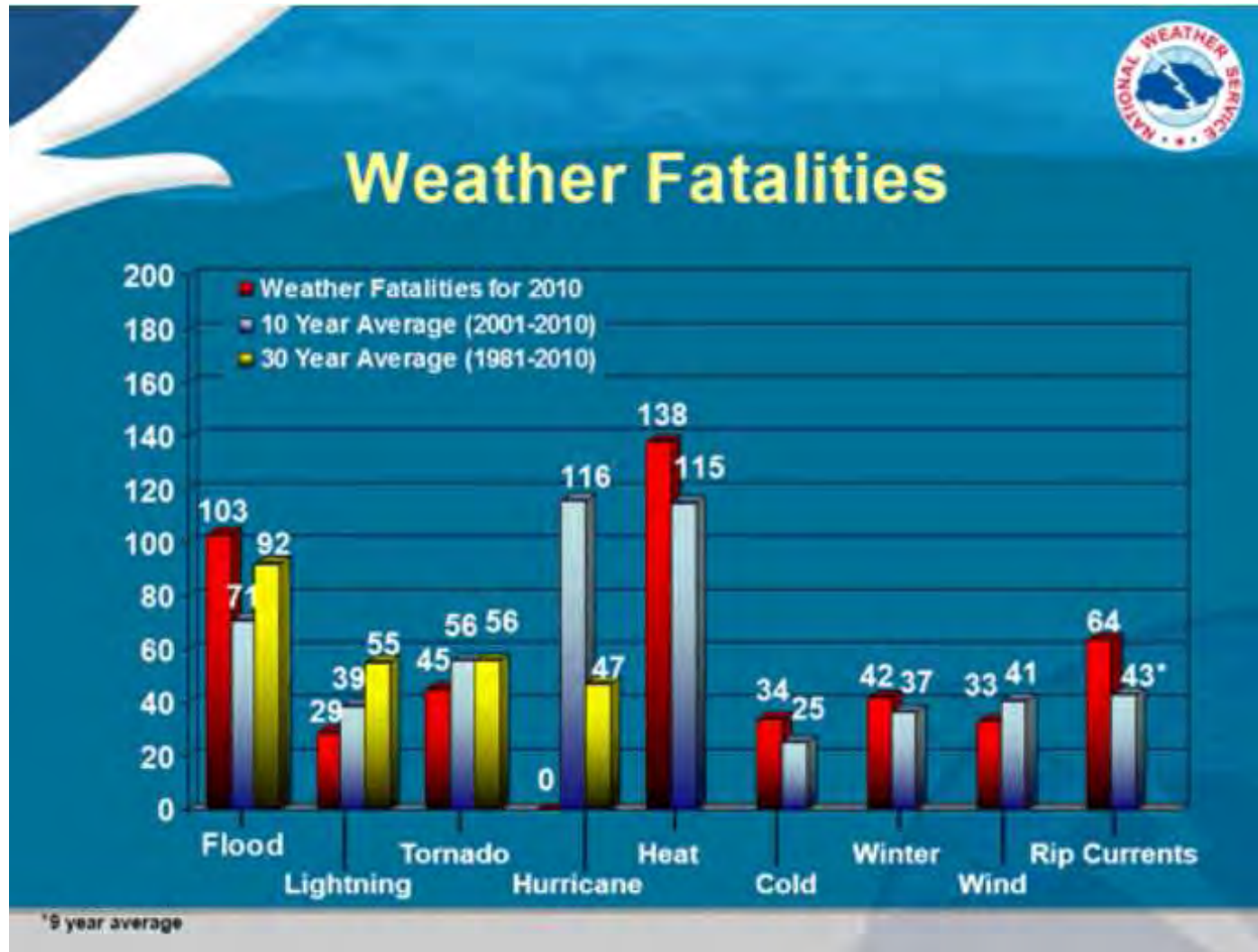
ODDS OF BECOMING A LIGHTNING VICTIM (based on averages for 2001-2010)				
Estimated U.S. population as of 2011				310,000,000
Annual Number of Deaths Reported	39	Number of Injuries Reported	241	280
Estimated number of U.S. Deaths	40	Estimated number of actual Injuries	360	400
Odds of being struck by lightning in a given year (reported deaths + injuries)				1/1,000,000
Odds of being struck by lightning in a given year (estimated total deaths + injuries)				1/775,000
Odds of being struck in your lifetime (Est. 80 years)				1/10,000
Odds you will be affected by someone being struck (Ten people affected for every one struck)				1/1000

Taux de survie à un foudroiement : 90%

Séquelle : 75% des cas

<http://www.lightningsafety.noaa.gov/medical.htm>

Chiffres clés : humain



Chiffres clés : économique

*Evaluation par les assurances du coût des dommages aux USA : 1 b\$**

Nb de sinistres ↘ *mais Coût/sinistre* ↗ (4 800 \$)

- *Réseau électrique*

- *Sites sensibles*

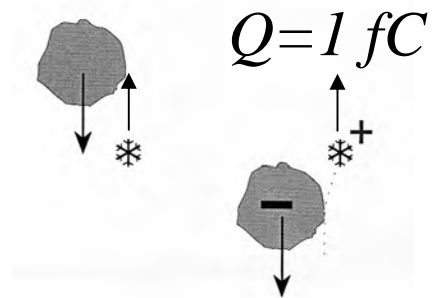
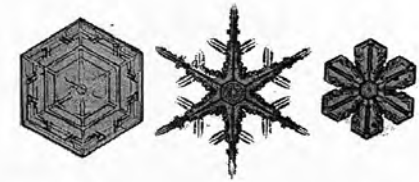
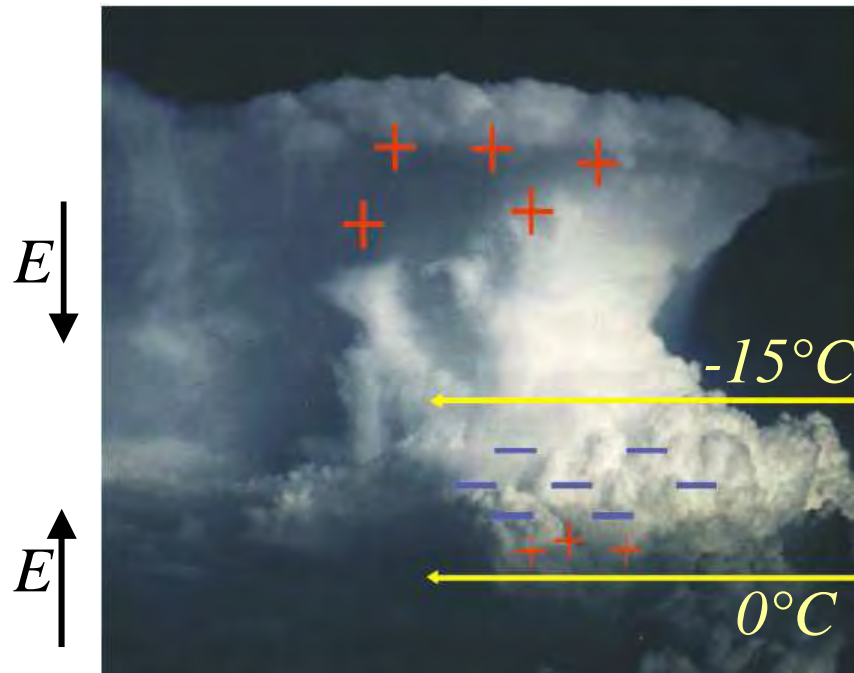
- *Aéronefs (1 fois par an)*



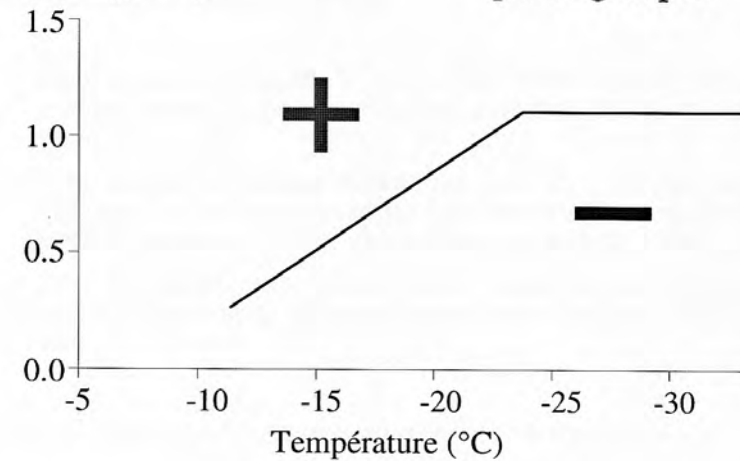
AA 19/10/2011
●
●
●

Nuage d'orage

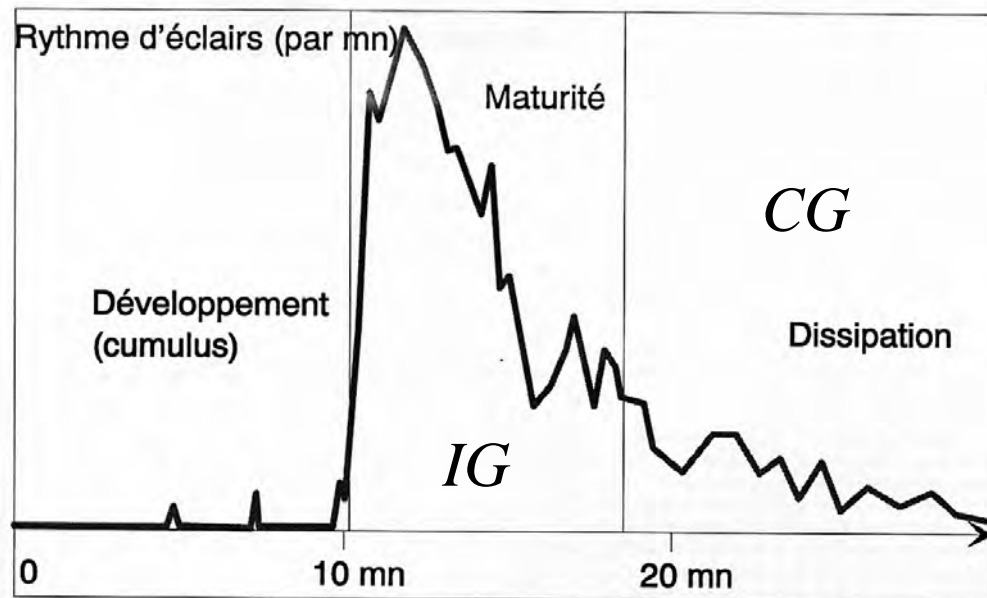
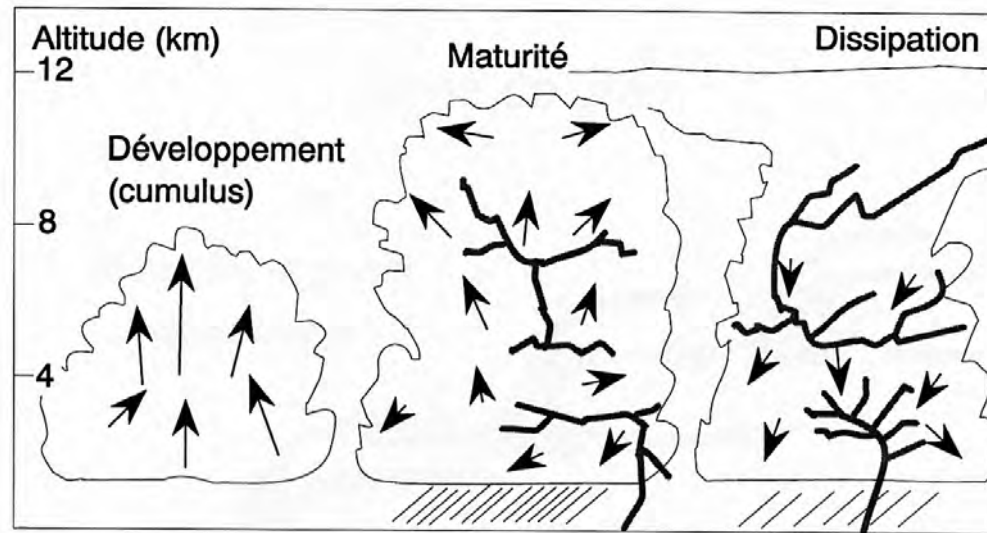
Nuage d'orage : mécanisme d'électrification



LWC (g/m^3)



Nuage d'orage : activité électrique

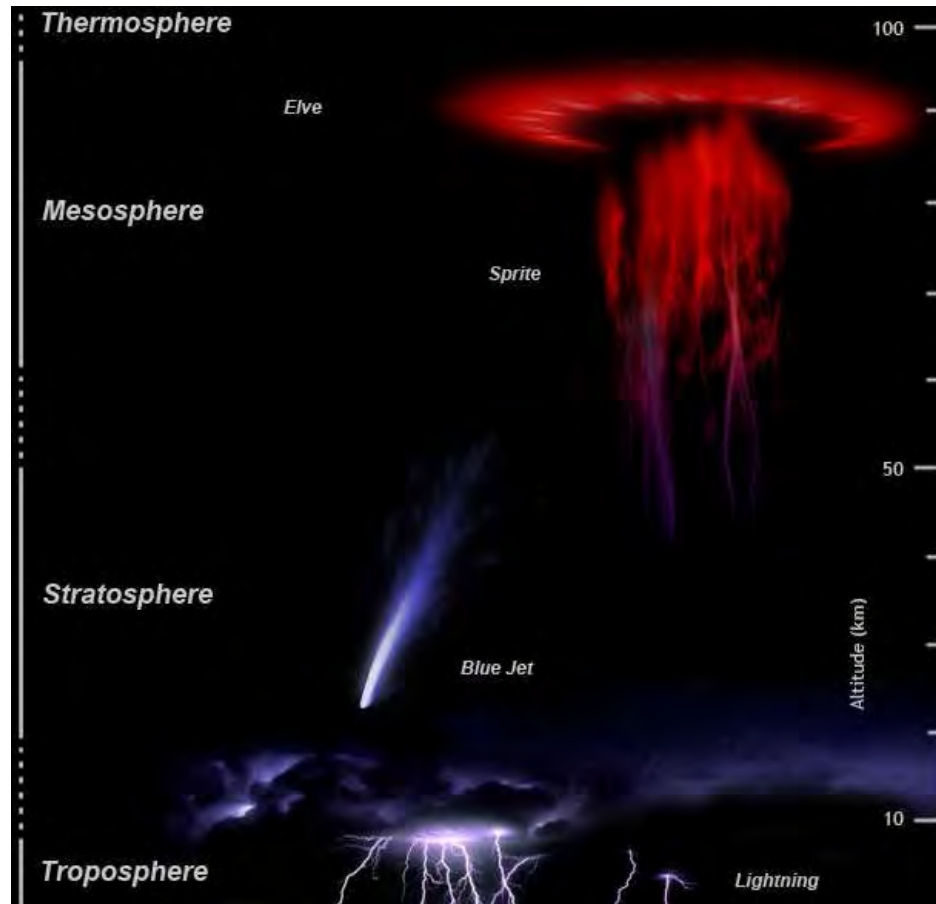


90% IC

10% CG

Décharges atmosphériques

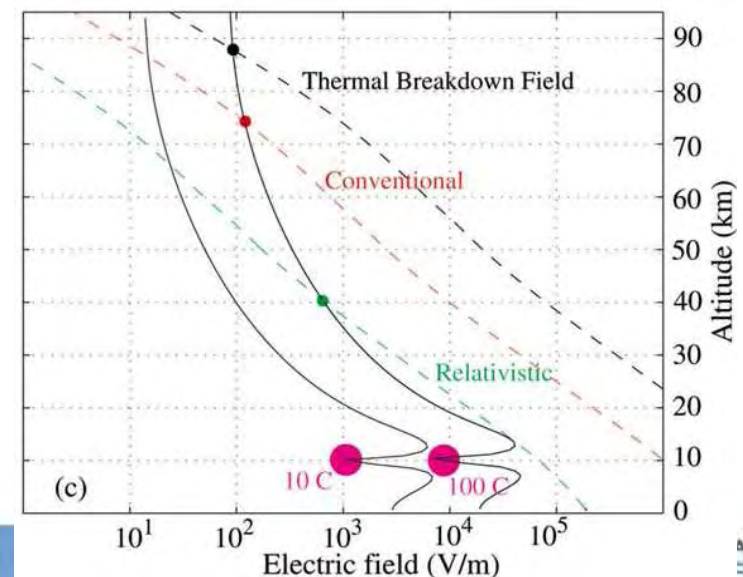
Décharges électriques dans la haute atmosphère



Elve lié à l'impulsion EM de l'éclair

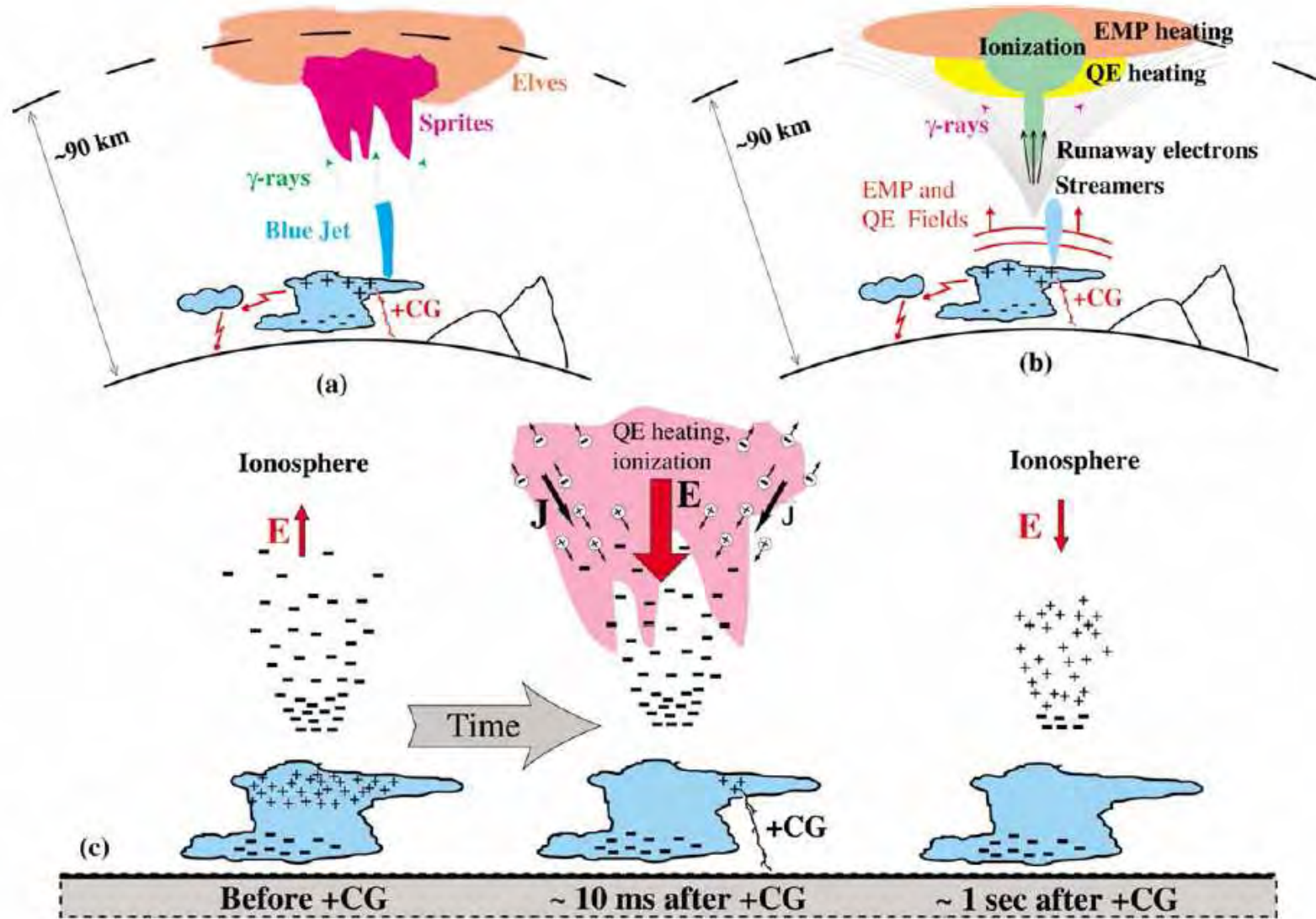
*A 100 km => 5-20V/m; 1 à 100kHz;
durée : 50 μ s*

*Sprite & Blue Jet : Claquage lié au
champ atmosphérique*



Umran S. Inan

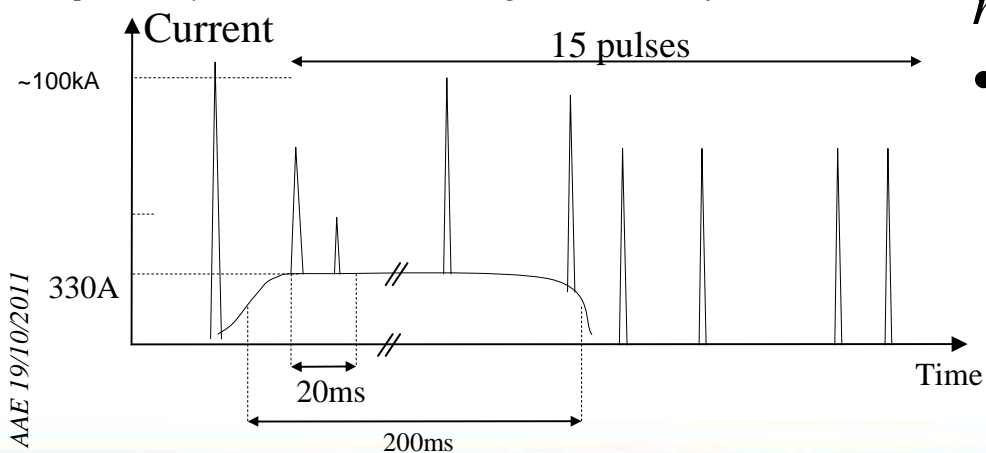
Décharges électriques dans la haute atmosphère



Les éclairs



<http://www.youtube.com/watch?v=IgnebrbWKKw&feature=related>



Précurseurs de la foudre :

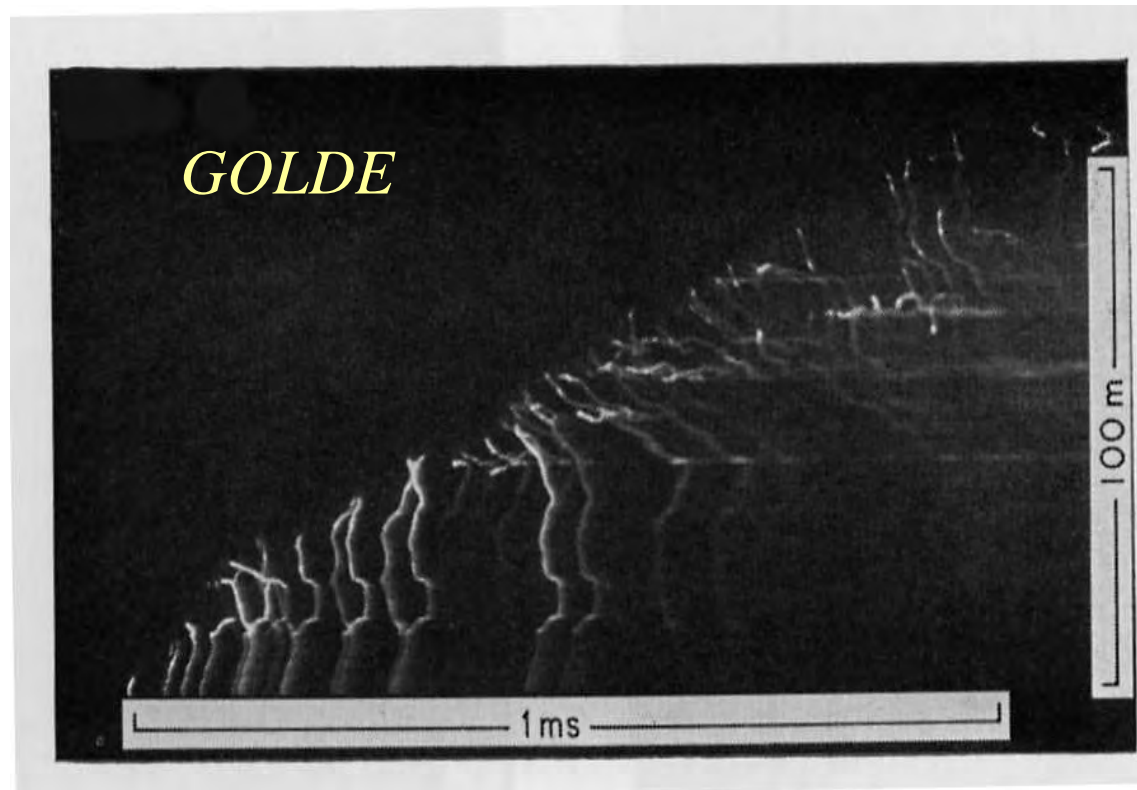
- *Décharge électrique positive*
- *Décharge électrique négative*

Arcs en retour pour les coups au sol ou décharge de jonction pour les intra-nuages

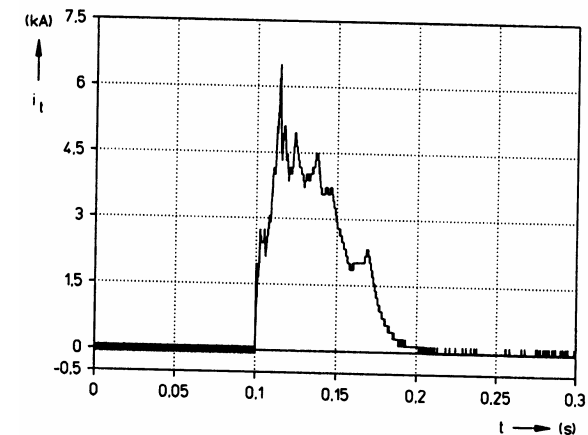
- *Pic de courant d'arc : 30 kA en moyenne*
- *Charge : 5 C*

Eclair : Phénomène imprévisible => difficulté de mettre en place une observation scientifique

Éclair négatif ascendant



Vitesse
moyenne
 10^5 m/s



- *Propagation par bonds de la décharge période 20 à 100 μ s*

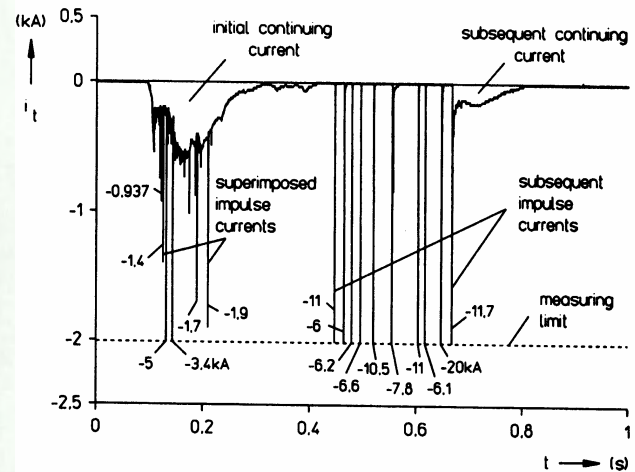
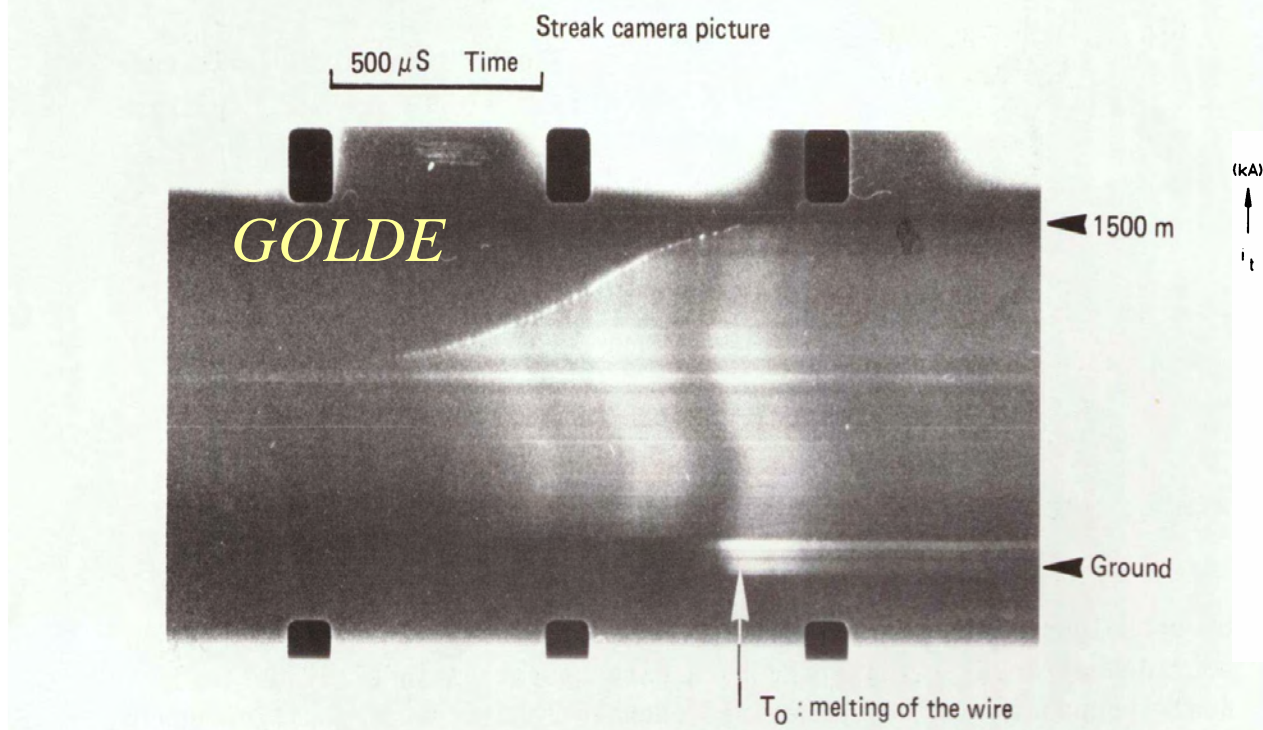


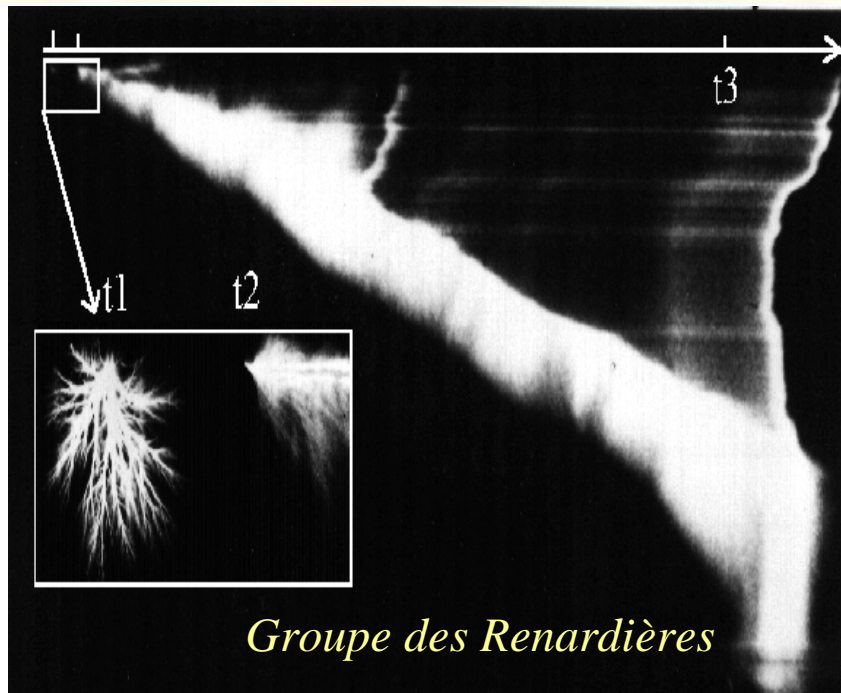
Fig. 3 - Positive leader propagation above ground (flash n° 86-23).

Leader positif ascendant

Propagation pulsée de la décharge (pulse tous les 100 μ s)

Analyse des précurseurs de la foudre à travers les longues décharges de laboratoire

Décharge positive

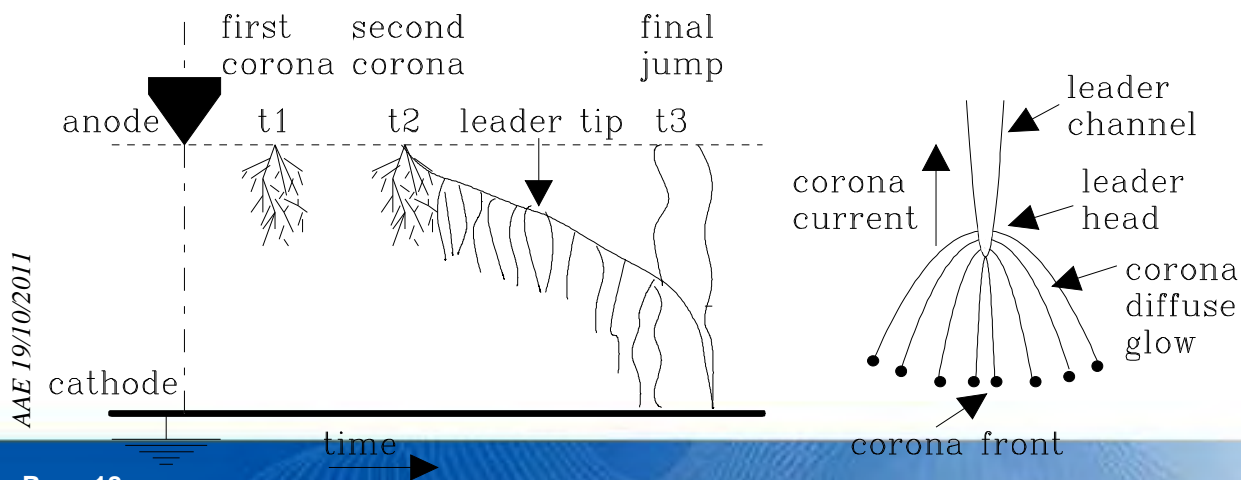


Cameragramme à balayage temporel
(streak) d'une décharge positive
pointe-plan

$D=10\text{m}$

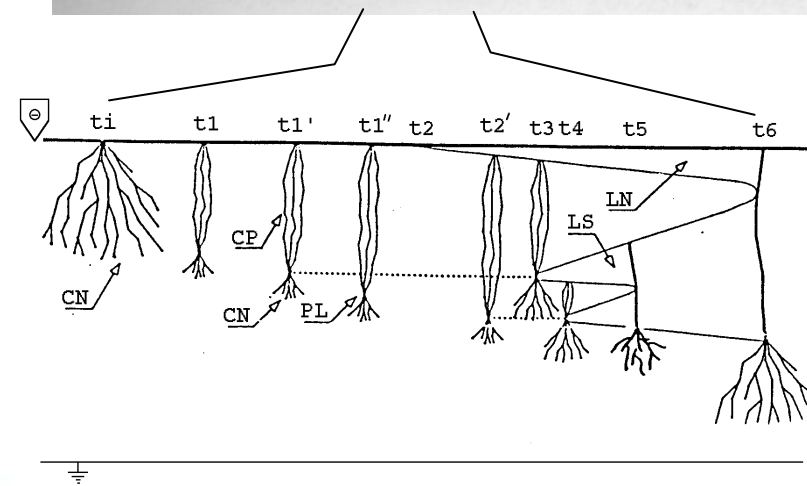
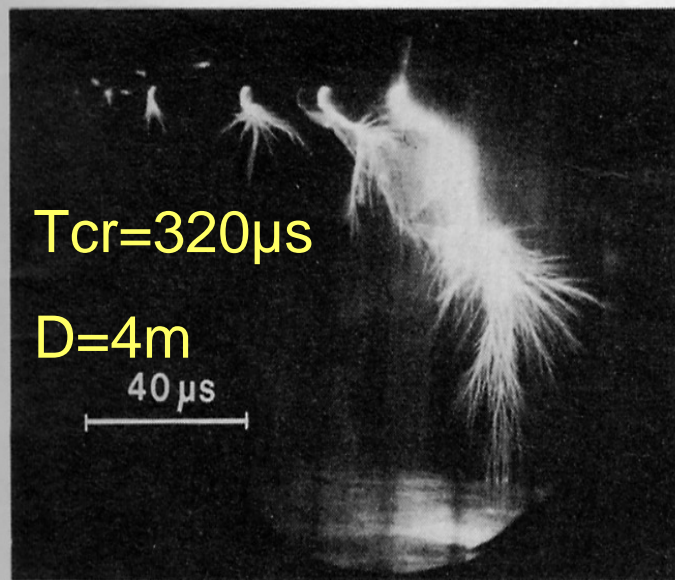
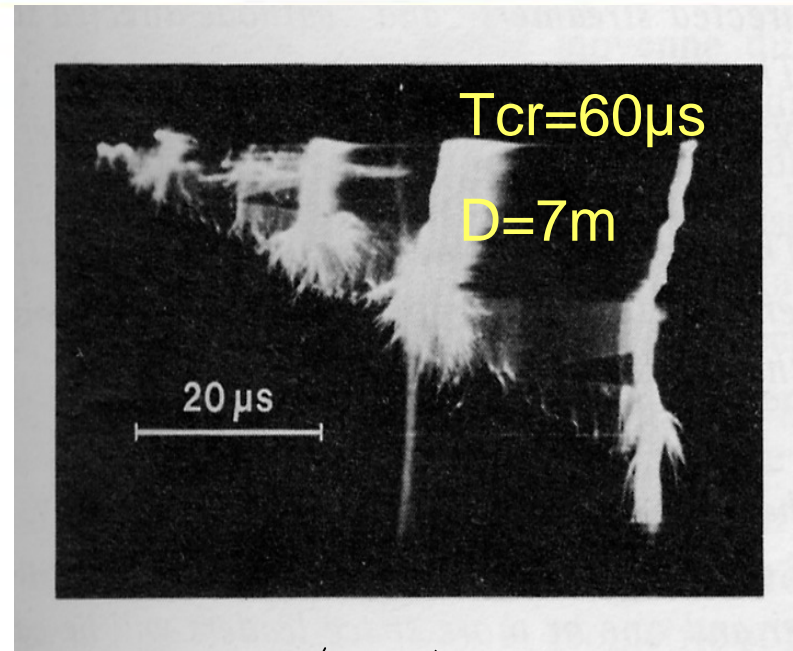
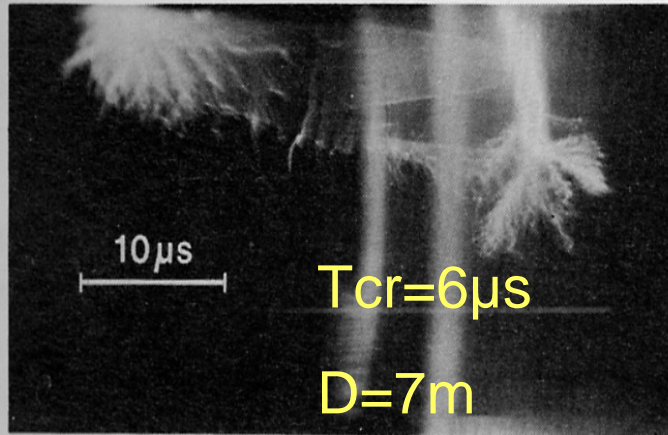
$t_m=500\ \mu\text{s}$

$V_{\text{max}}=2.5\ \text{MV}$



AAE 19/10/2011

Décharge négative : Effet de la forme d'onde



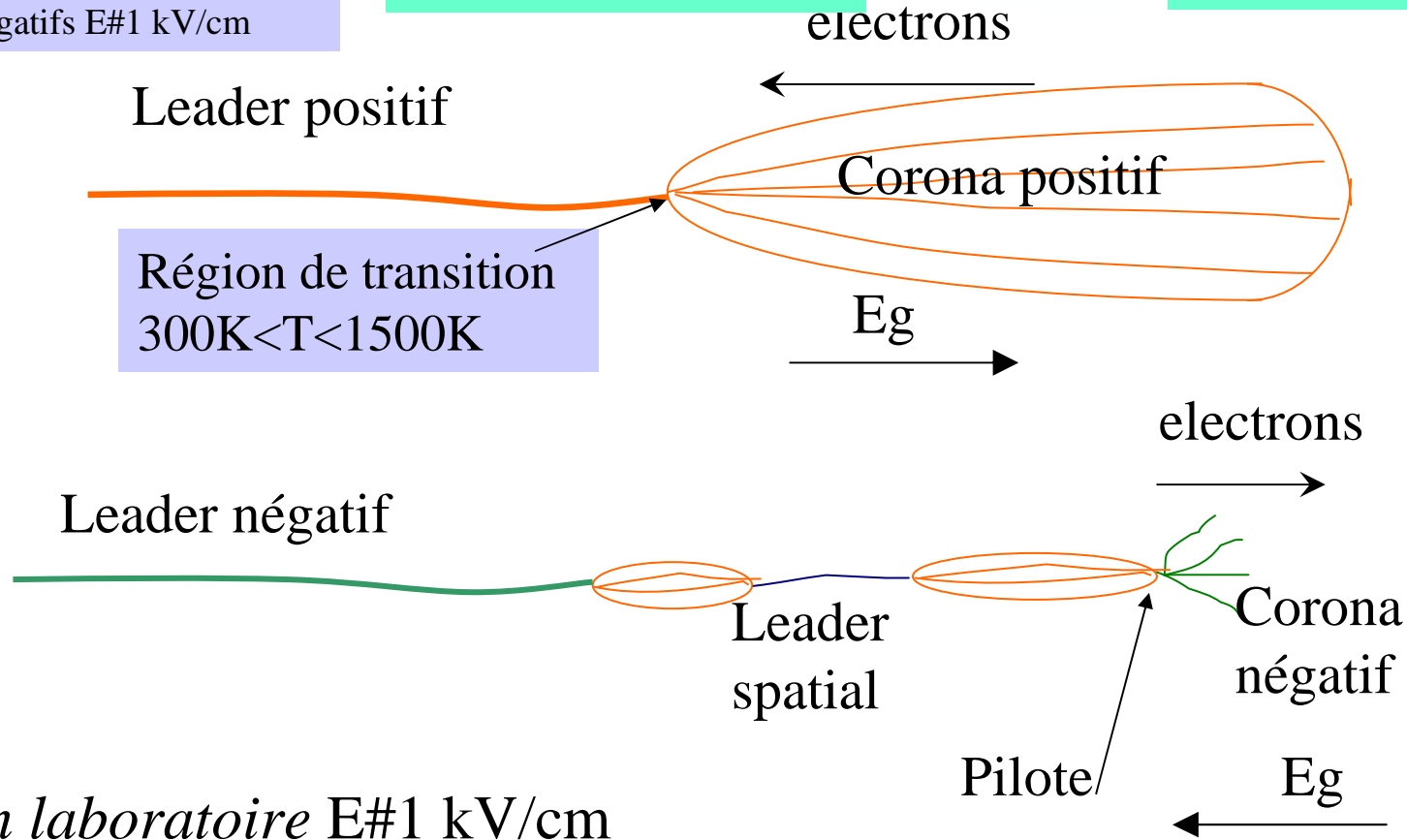
Groupe des Renardières

Structure des leaders positifs et négatifs

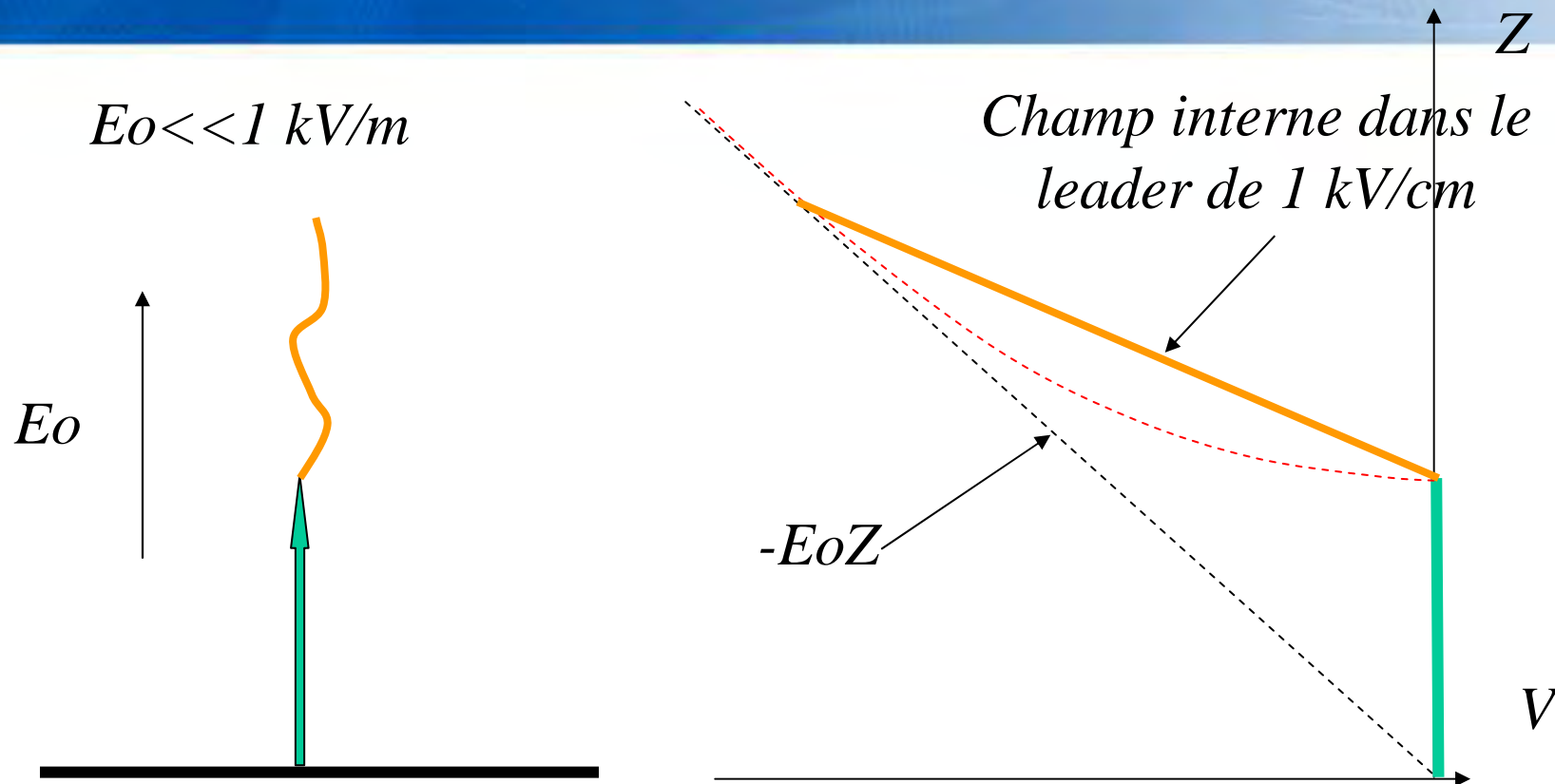
Canal filamentaire
 $1500K < T < 5000K$
 détachement complet des
 ions négatifs $E \approx 1 \text{ kV/cm}$

Filaments de streamers
 $T \approx 300K$; électrons attachés;
 faible conductivité; $E \approx 5 \text{ kV/cm}$

Tête active : Champ de charge
 d'espace élevé; avalanches;
 photoionisation



Filaments de streamers $T \approx 300K$;
 électrons attachés; faible
 conductivité; $E \approx 10 \text{ kV/cm}$

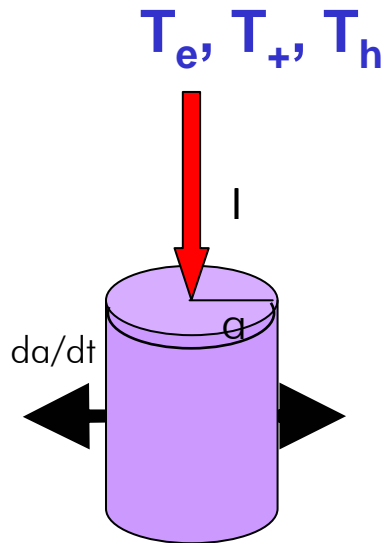


Une longue décharge de laboratoire ne peut a priori pas se développer sur de longues distances dans un champ électrique atmosphérique typique

Canal du leader : calcul du champ interne

Modèle complet

Plasma : N_e, N_+, N_h



Conservation de la masse

$$\frac{dN_e}{dt} = \frac{dN_+}{dt} = \dot{N}_e$$

$$\frac{dN_h}{dt} = -\dot{N}_e + \dot{N}_d$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{d[(N_e m_e + N_+ m_+ + N_h m_h) \langle \dot{a} \rangle]}{dt} = 2\pi a [\langle p_c \rangle - \langle p_s \rangle]$$

Conservation de l'énergie

$$E_{\text{int}} = \frac{I}{eN_e\mu_e}$$

$$R_{\text{int}} = \frac{1}{eN_e\mu_e}$$

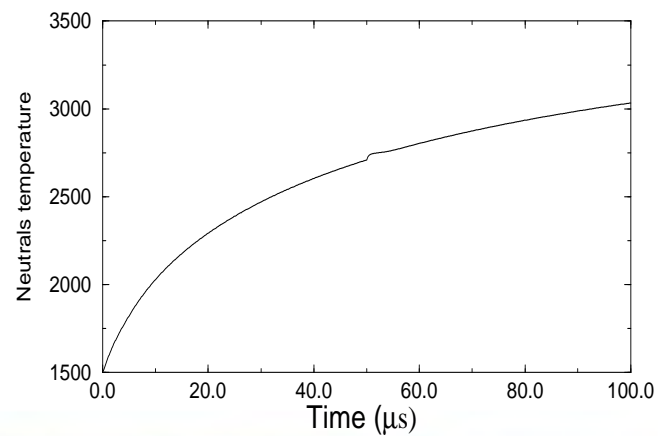
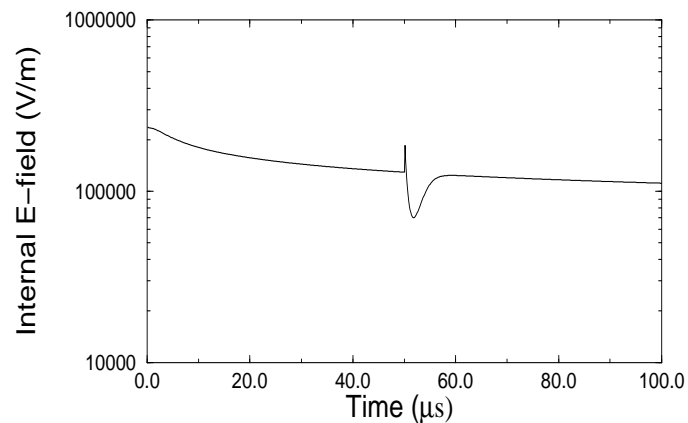
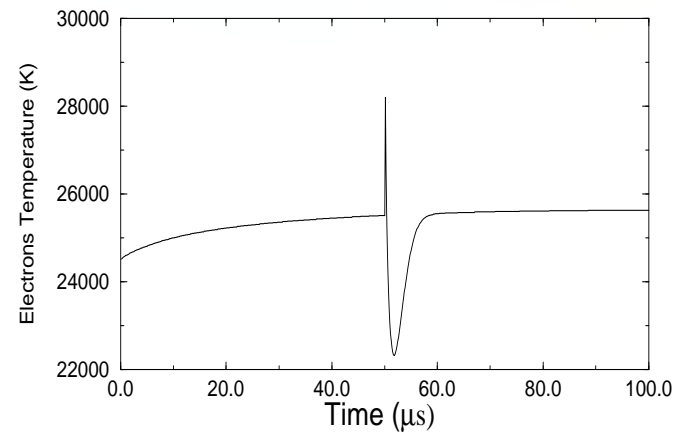
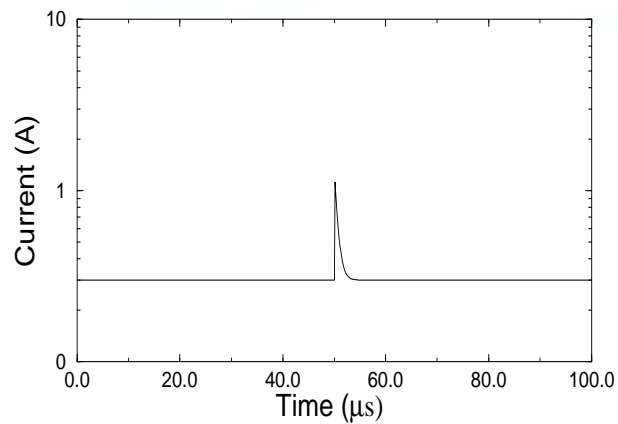
$$\frac{d}{dt} \left[N_e \left(\frac{3}{2} k_B T_e + \varepsilon_e \right) \right] + p_e \frac{d(\pi a^2)}{dt} = E \cdot I - \dot{C}_{\text{eh}} - \dot{C}_{\text{e+}}$$

$$\frac{d}{dt} \left[N_+ \frac{5}{2} k_B T_+ \right] + p_+ \frac{d(\pi a^2)}{dt} = \dot{C}_{\text{e+}} - \dot{C}_{\text{th}}$$

$$\frac{d}{dt} [N_h C_V T_h] + p_h \frac{d(\pi a^2)}{dt} = \dot{C}_{\text{eh}} + \dot{C}_{\text{ph}}$$

Canal du leader : calcul du champ interne [4] Modèle complet

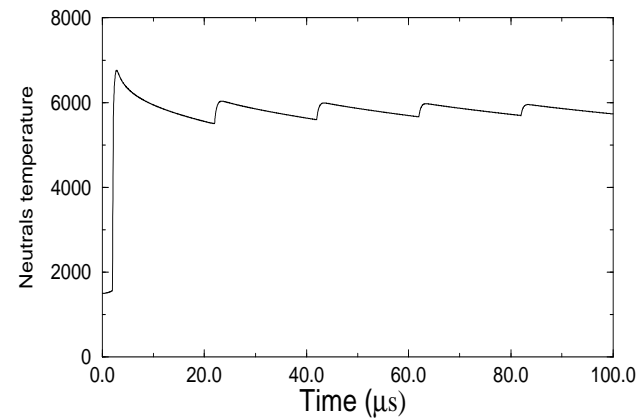
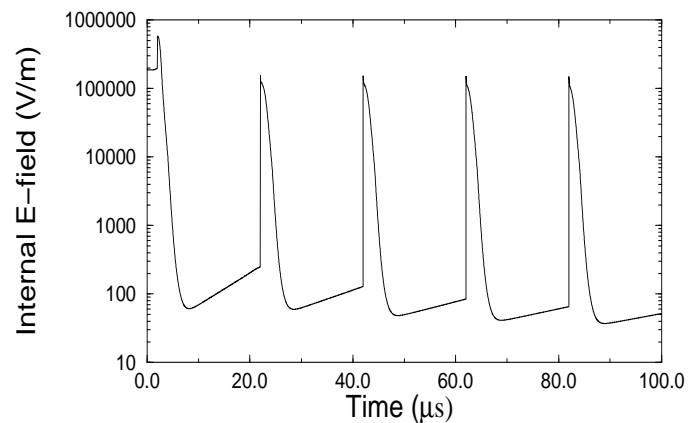
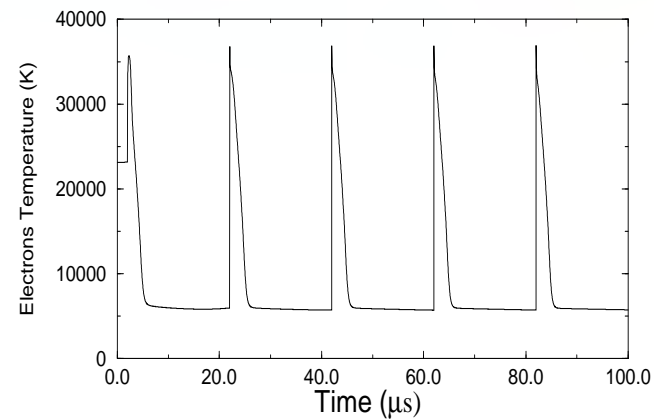
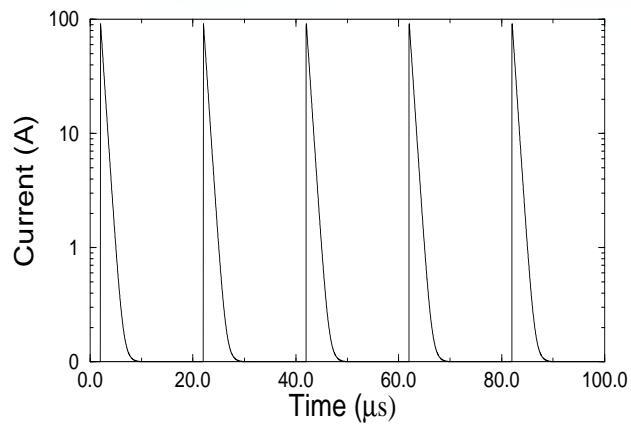
Hors ETL



Canal du leader : calcul du champ interne [4]

Modèle complet

ETL



Canal du leader : calcul du champ interne

Modèle simplifié

Leader froid ($T < 6000\text{K}$)

ionisation par collisions e-



Expansion du canal à E/N constant

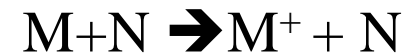
$$E_{\text{int}} = \frac{E}{n} \frac{n_0 \pi a_0^2}{\pi a^2}$$

$E_{\text{int}} \approx 1 \text{ kV/cm}$

Leader chaud ($T > 6000\text{K}$)

(saut final, arc)

ionisation thermique



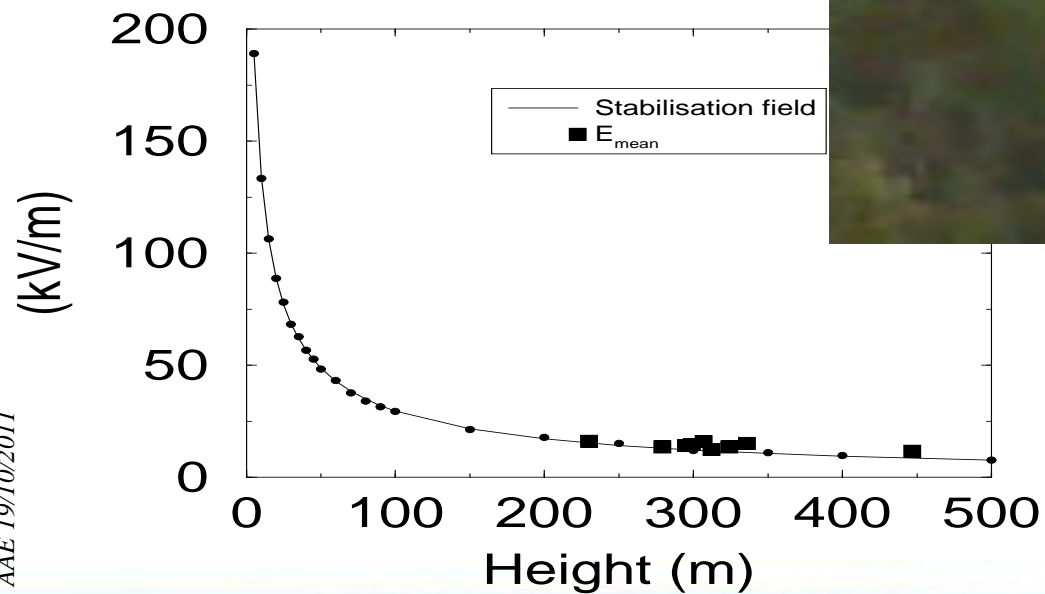
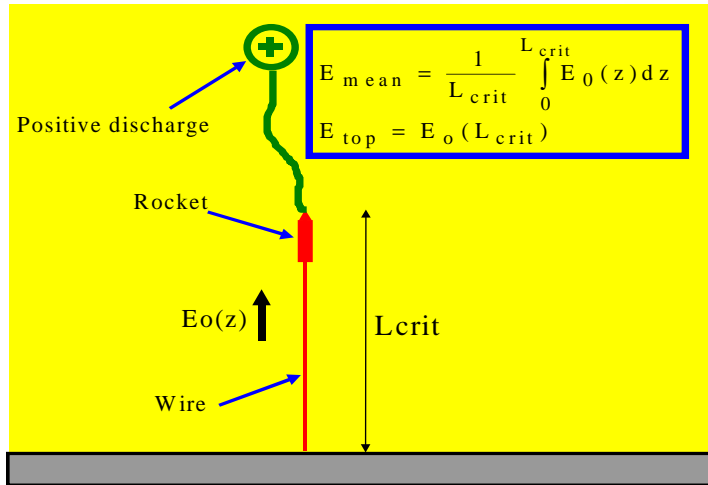
degré d'ionisation = $f(T)$

$$E_{\text{int}} = \frac{I}{(n_0 \pi a_0^2) \mu_e \cdot i}$$

$E_{\text{int}} \approx 10 \text{ à } 100 \text{ V/cm}$

Déclenchement des éclairs

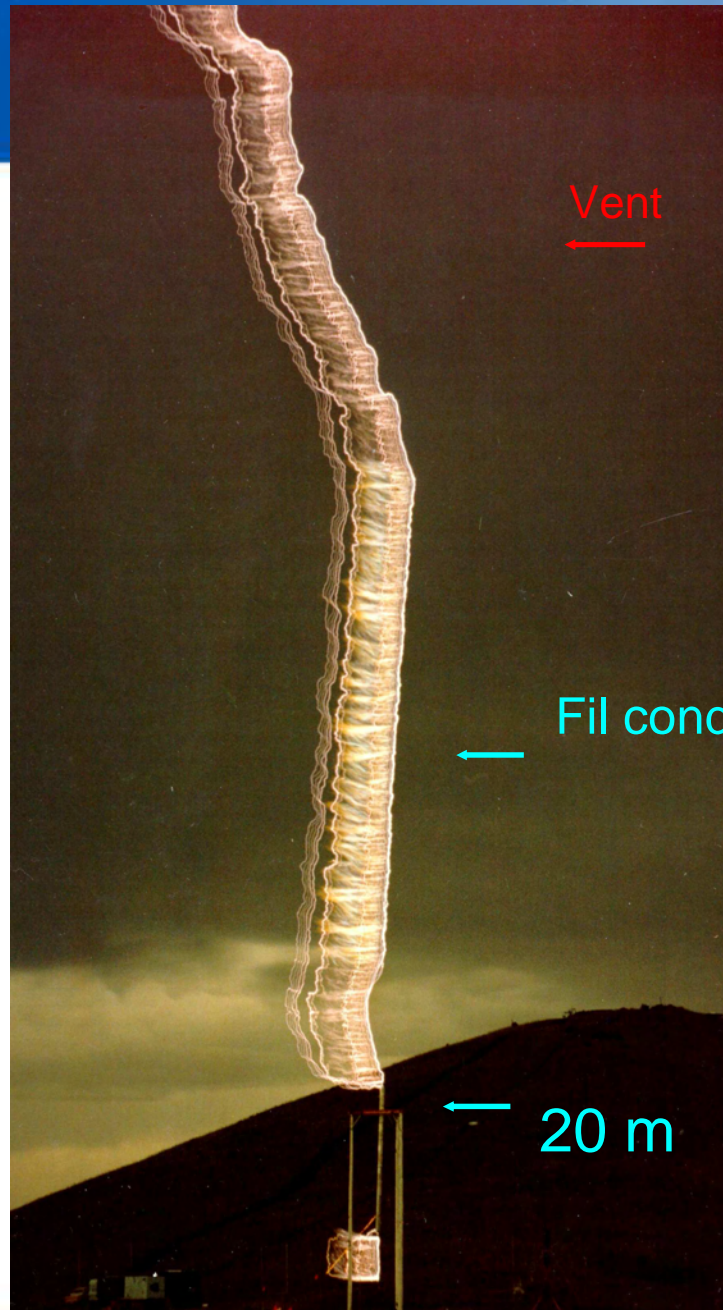
Eclair : déclenchement



AAE 19/10/2011

Socorro ,New Mexico
1982

Mont Baldy
3243 m



ECLAIR ASCENDANT ARTIFICIEL

Photo CEA/ASP

Socorro ,New Mexico
1982

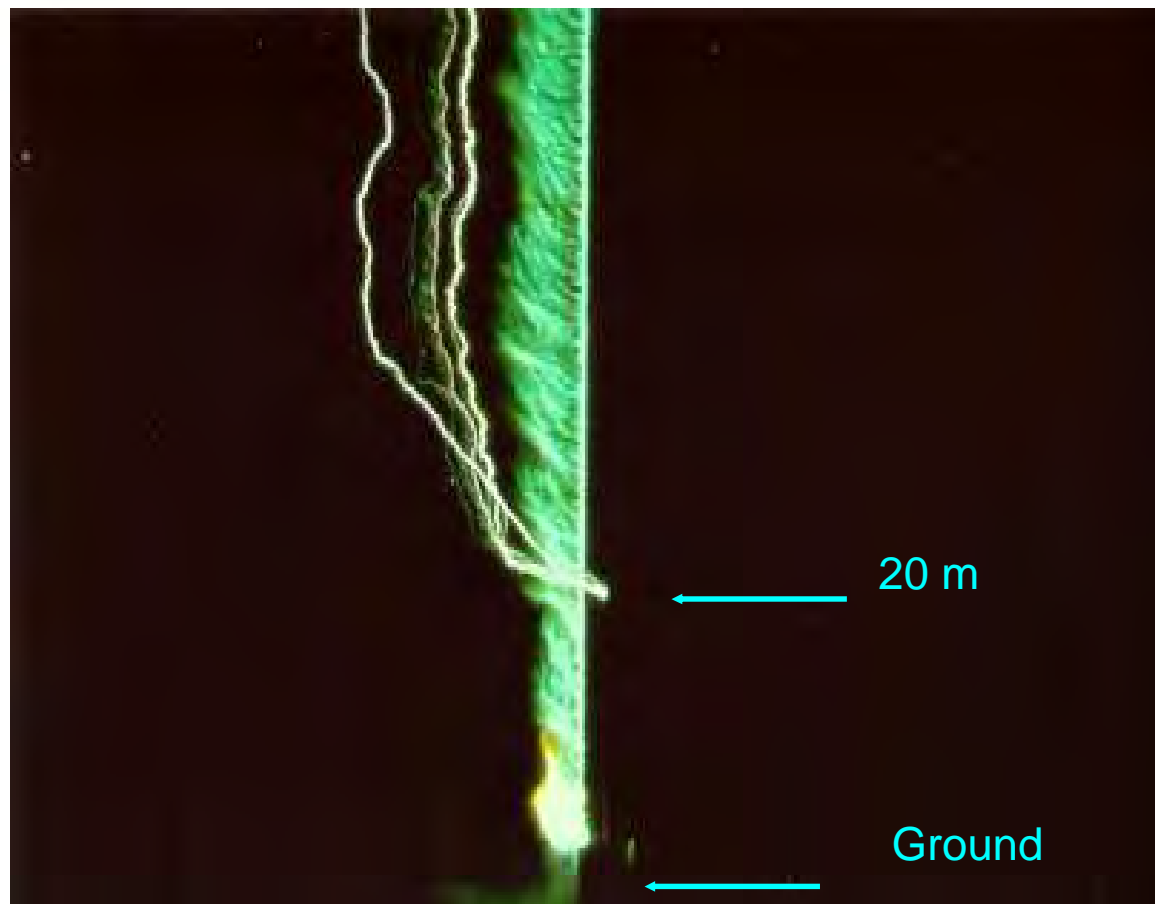
Mont Baldy
3243 m



ECLAIR ASCENDANT ARTIFICIEL

Vue détaillée
des composantes
de l'éclair

ECLAIR ASCENDANT ARTIFICIEL



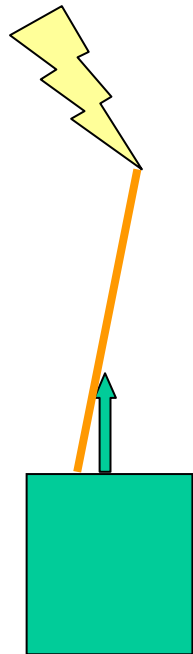
Mosquito Lagoon, Floride 1991

AAE 19/10/2011

Photo CEA/ASP

Les éclairs : technologie pour la maîtrise du point d'impact

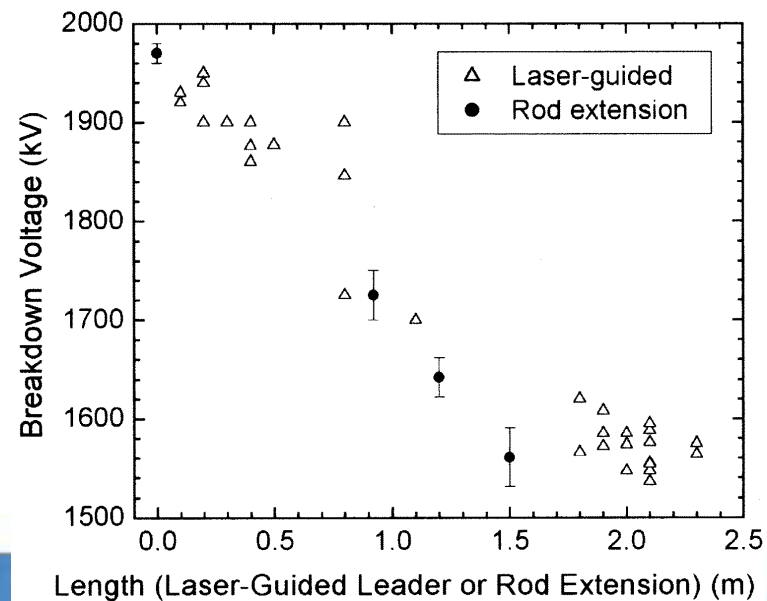
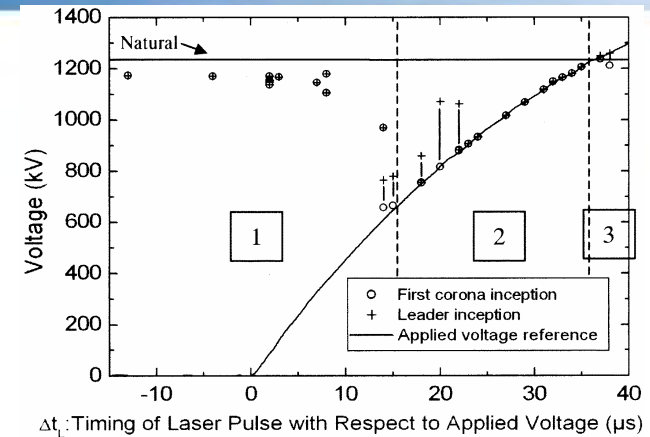
- Franklin : paratonnerre
 - Technologie Laser Femtoseconde
- Laser femtoseconde : 100mJ qq fs => TW
 + Filament laser de plusieurs dizaines de mètres

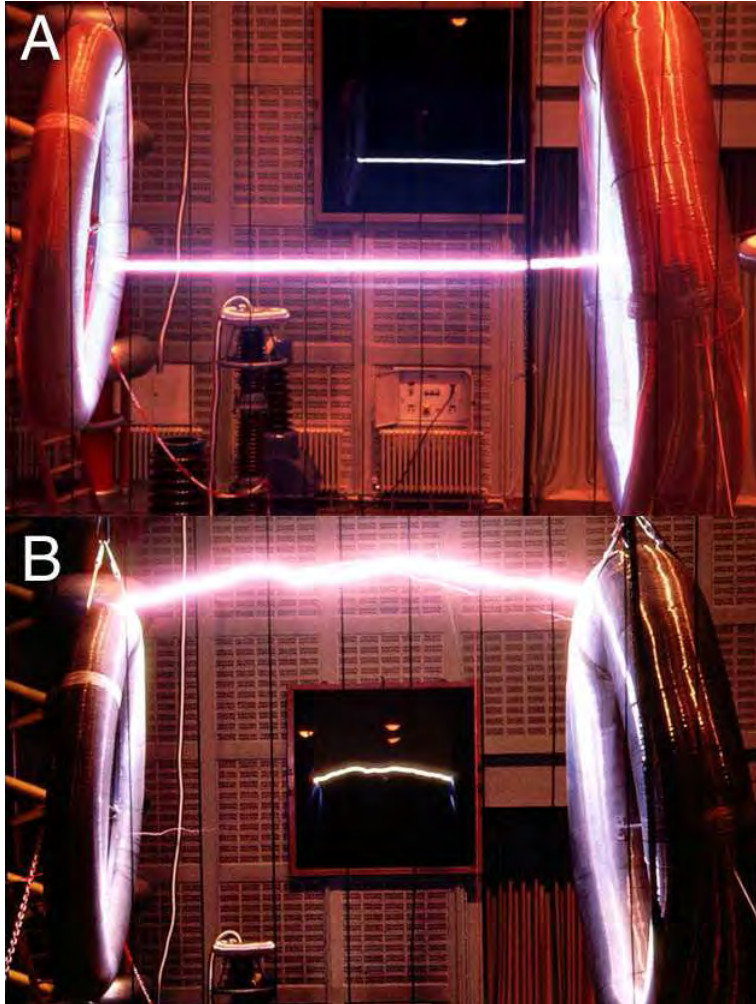


Début 2000 : IREQ & Hydro quebec

Depuis 2004 => reprise du sujet par les équipes du terramobile (LOA)

Comtois et al.





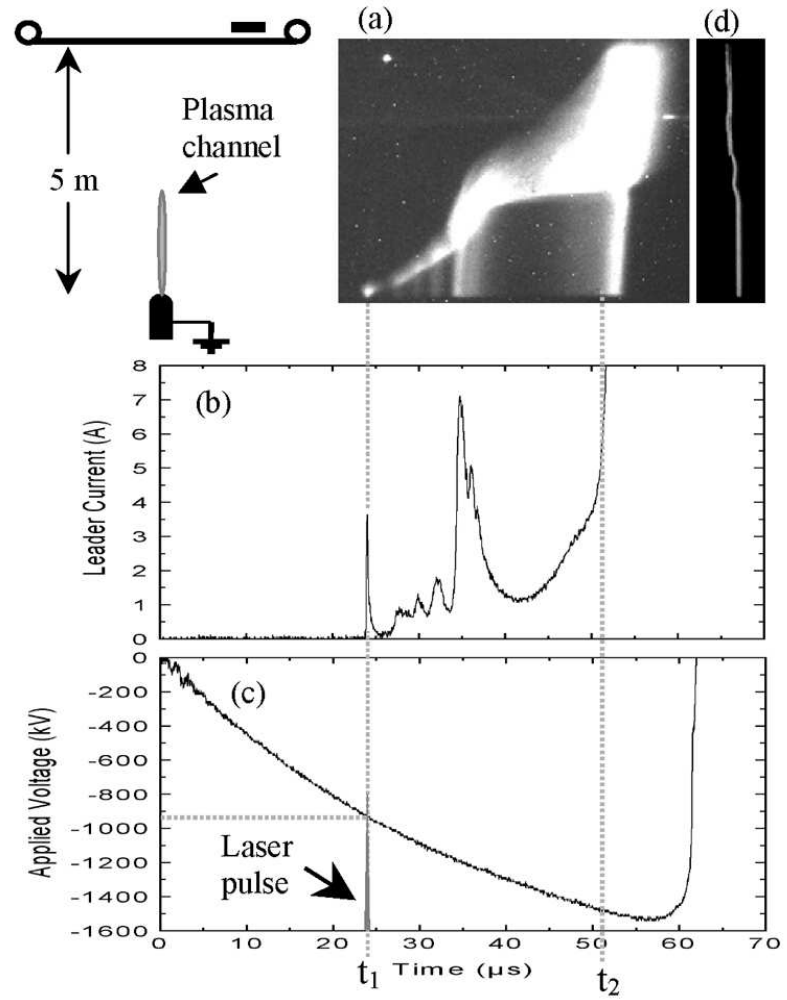
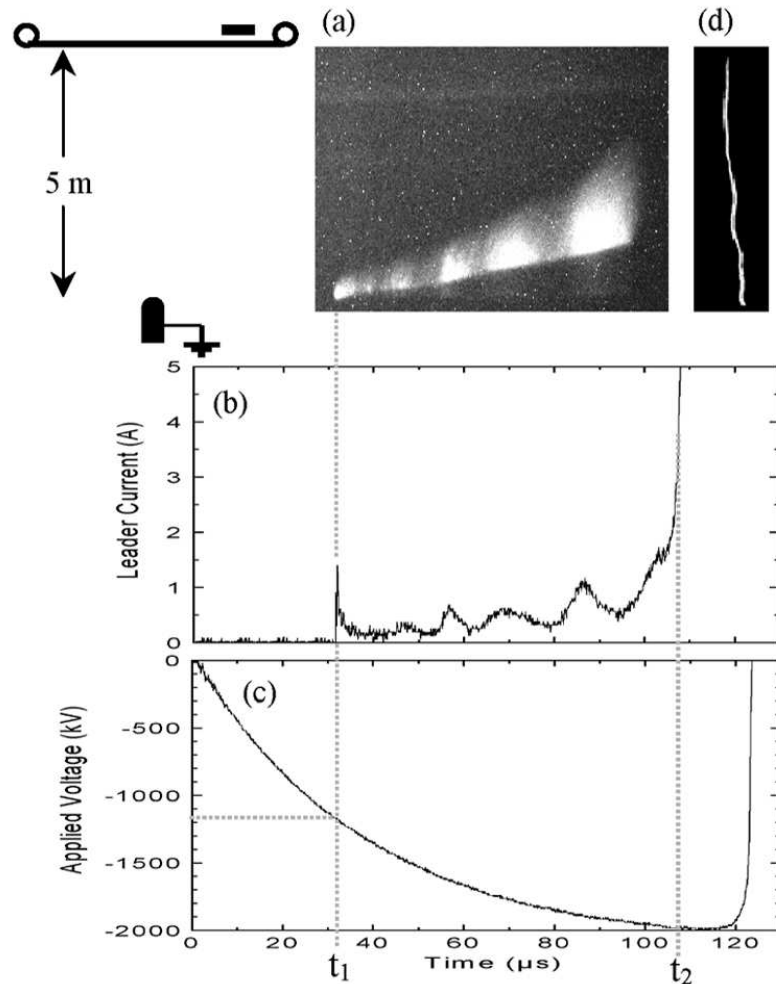
- *Guidage de la décharge positive*

- *Augmentation d'un facteur 10 de la vitesse de propagation 10^4m/s à 10^5m/s*

Diamètre du faisceau : 1 mm

=> Augmentation de la taille de collecte du leader +

Kasparien et al. www.teramobile.org

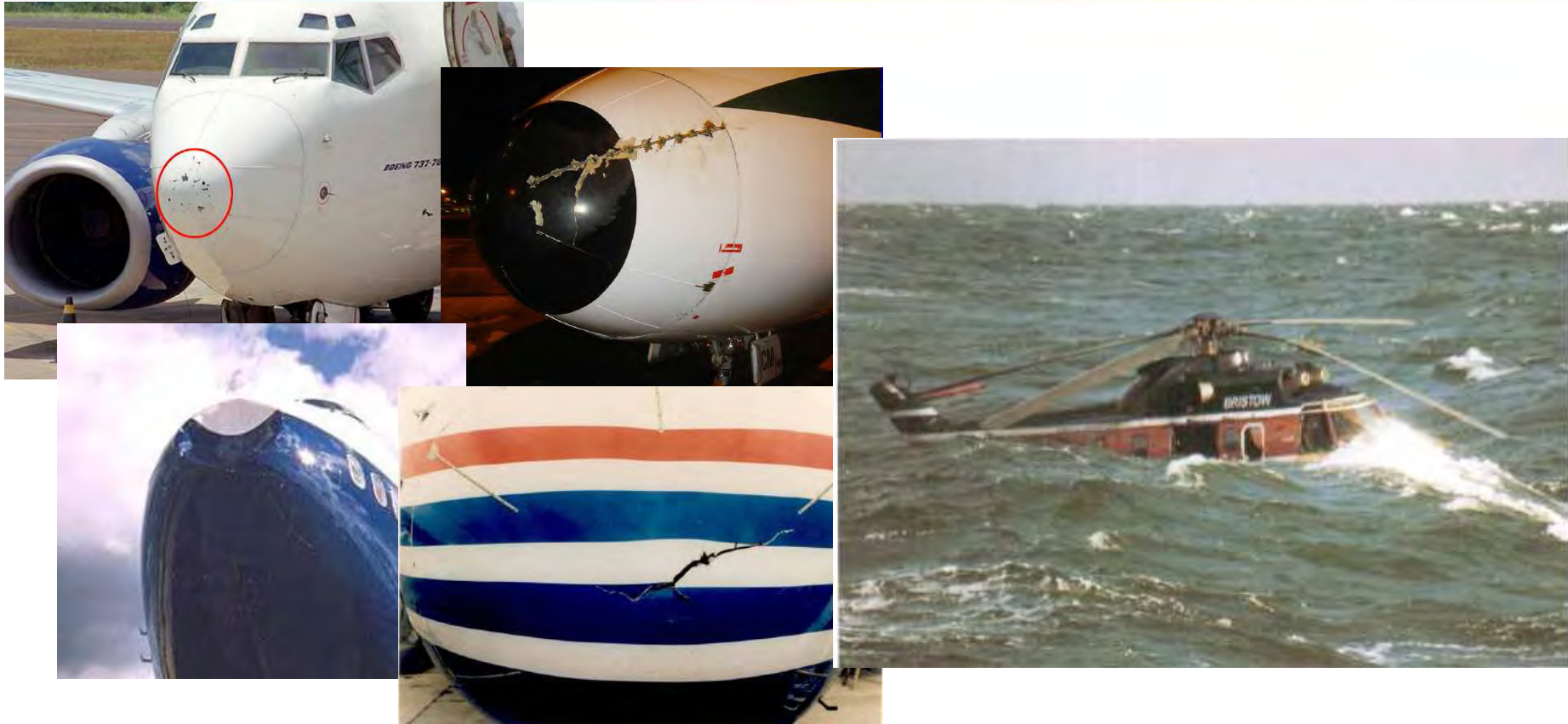


Amorçage à des tensions plus faibles

Comtois et al. 2002

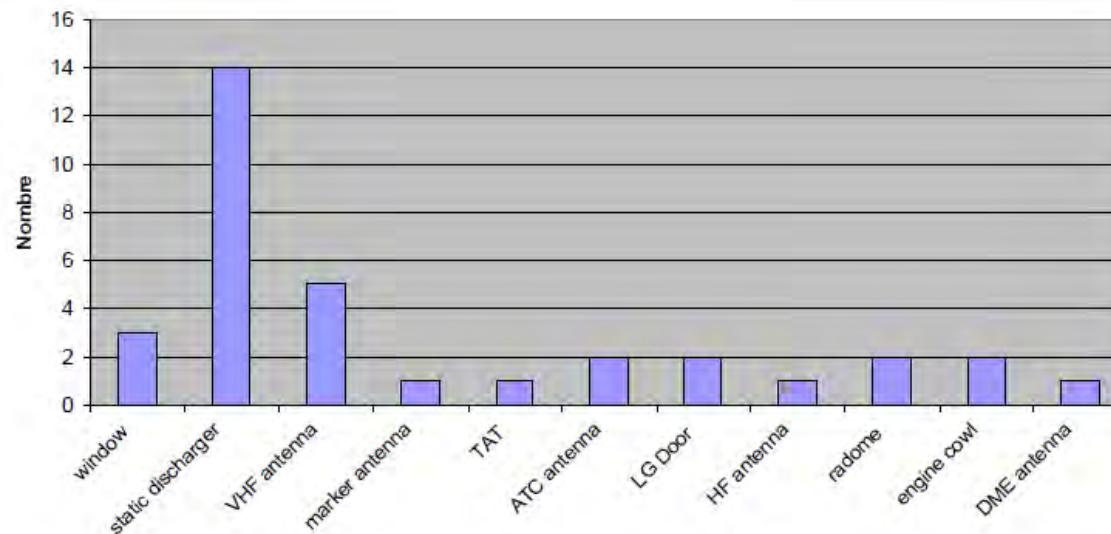
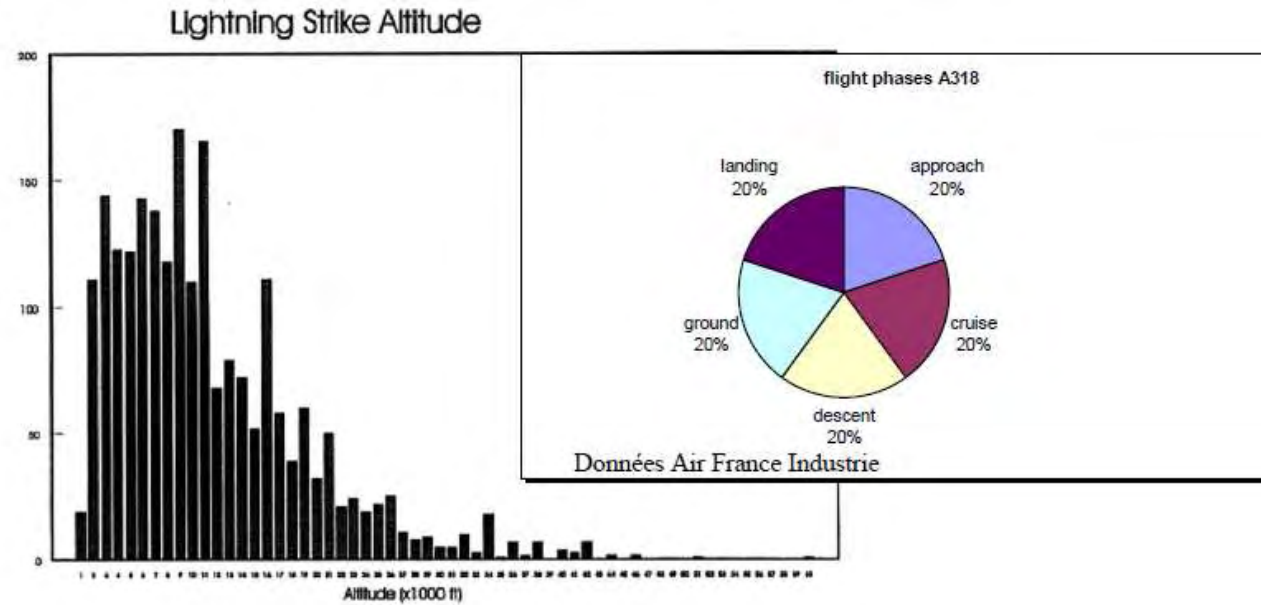
Foudroiement des aéronefs

Foudroiement : les dommages

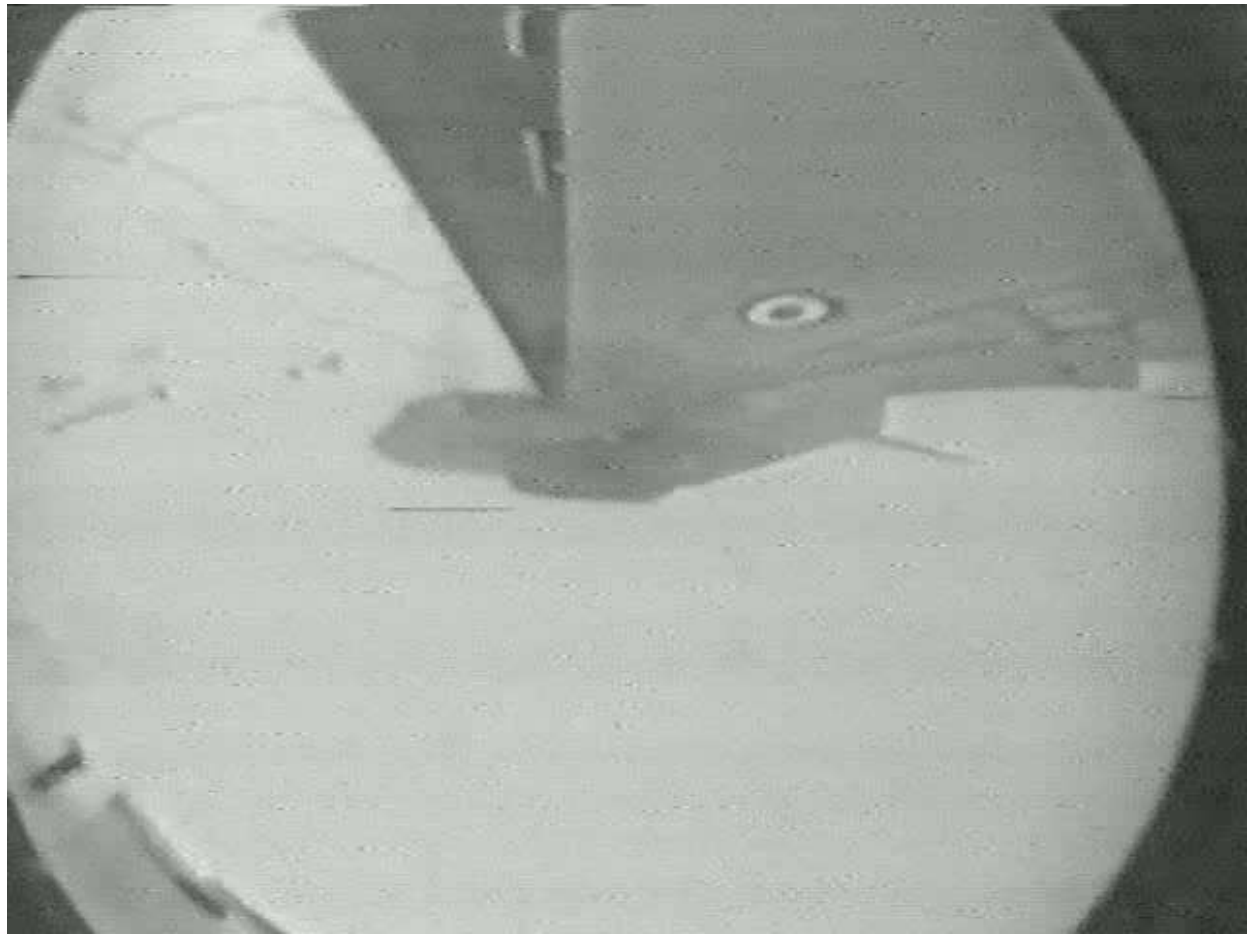
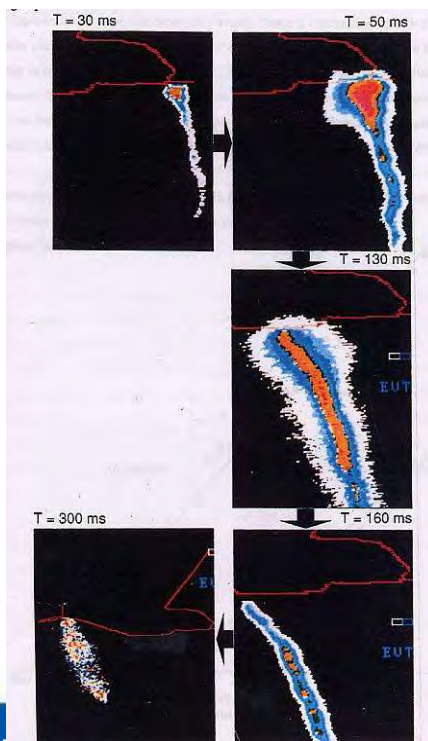


Allen Hall (LTI), ICOLSE 2005

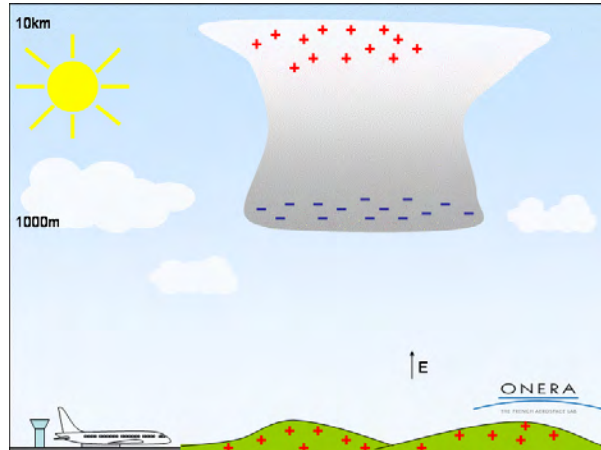
Foudroiement : retour d'expérience



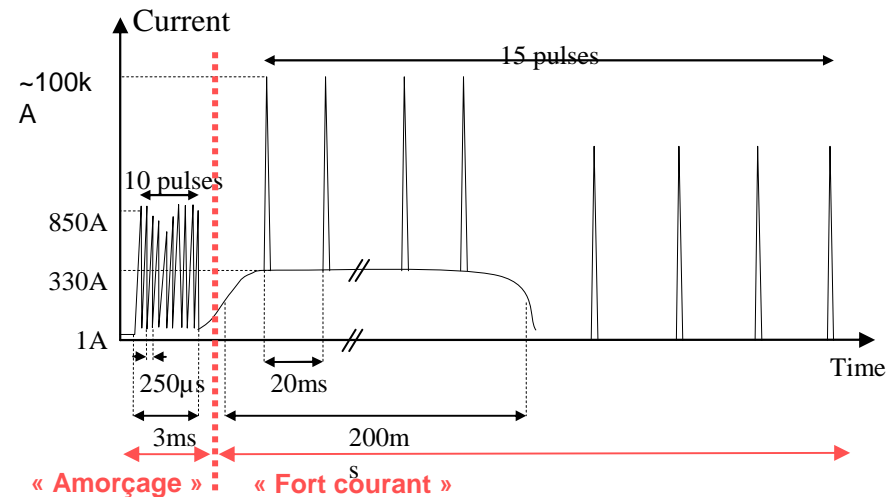
Observations



1. Le foudroiement en vol

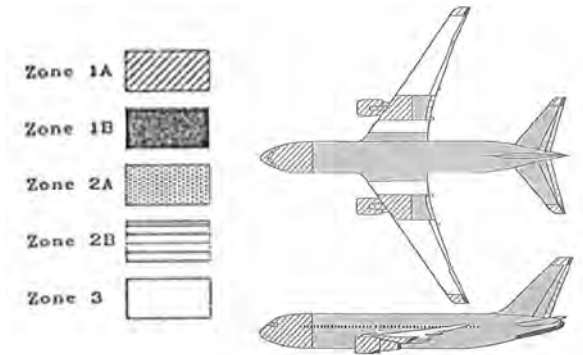


- Foudroyé une fois toutes les 1500 heures de vol en moyenne
- Déclenché dans 90 % des cas par la présence de l'aéronef
- Intercepté dans 10 % des cas
- Généralement en phase de décollage ou d'atterrissage
- Principe de balayage



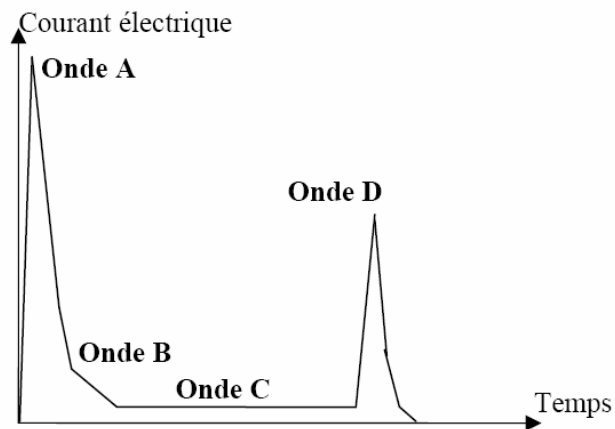
Lalande P, Bondiou-Clergerie A, Laroche P, "Analysis of available in-flight measurements of lightning incidents", Int. Conf. on Lightning and Static Electricity, Toulouse, France, 1999.

1. Aspect normatif et réglementaire



	Onde A	Onde B	Onde C	Onde D
Effets	Directs et indirects	Directs	Directs	Directs et indirects
Durée	< 0,5 ms	5 ms $\pm 10\%$	[250 ms 1000 ms]	< 0,5 ms
Amplitude max.	200 kA $\pm 10\%$	2 kA $\pm 10\%$	[0.2 kA 0.8 kA]	100 kA $\pm 10\%$
Variation max.	140 000 kA/ms	NA	NA	140 000 kA/ms
Charge transférée	NA	10 C $\pm 10\%$	200 C $\pm 10\%$	NA
Intégrale d'action	$2 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$	NA	NA	$2 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s} \pm 20\%$

Propriétés et paramètres de l'onde de courant défini par l'AC 20-53A, 1985

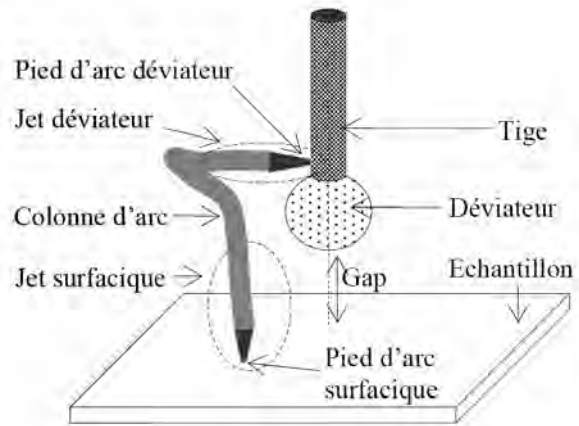


Forme d'onde de courant généralisé défini par l'AC 20-53A, 1985.

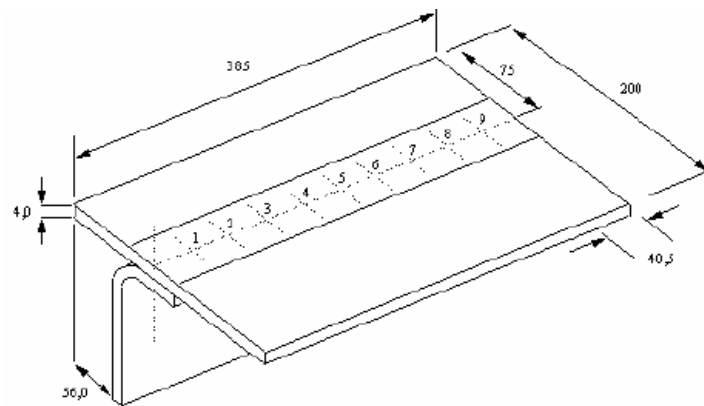
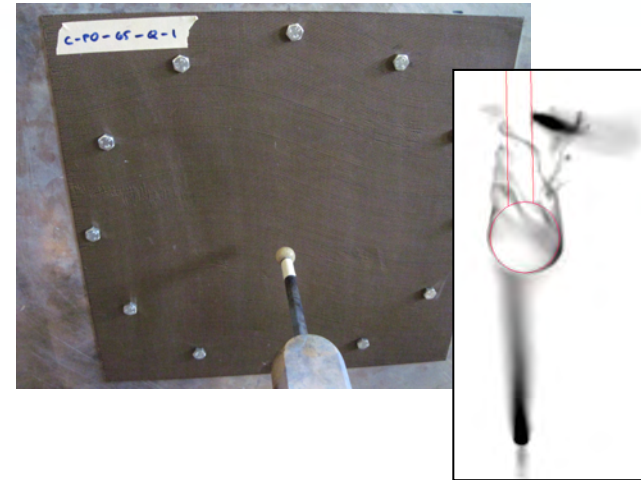
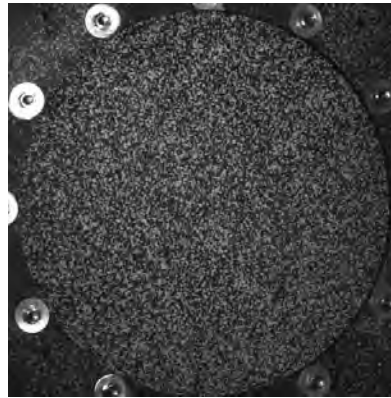
Zone	Attachement	Balayage	Conduction	Onde	Forme
1A	Oui	Oui	Oui	A+B+C*	
1B	Oui	Non	Oui	A+B+C+D	
2A	Non	Oui	Oui	D+B+C*	
2B	Non	Non	Oui	D+B+C	
3	Non	Non	Oui	A+C	

AAE 19/10/2011

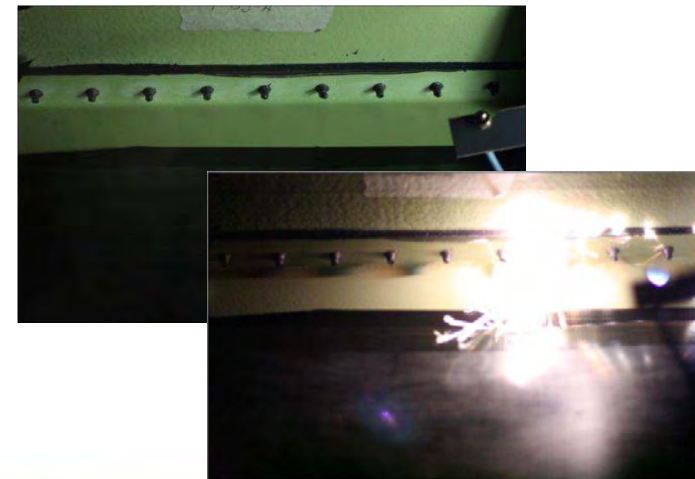
1. Essais foudre



Essais « pleine peau » (DGA-TA)

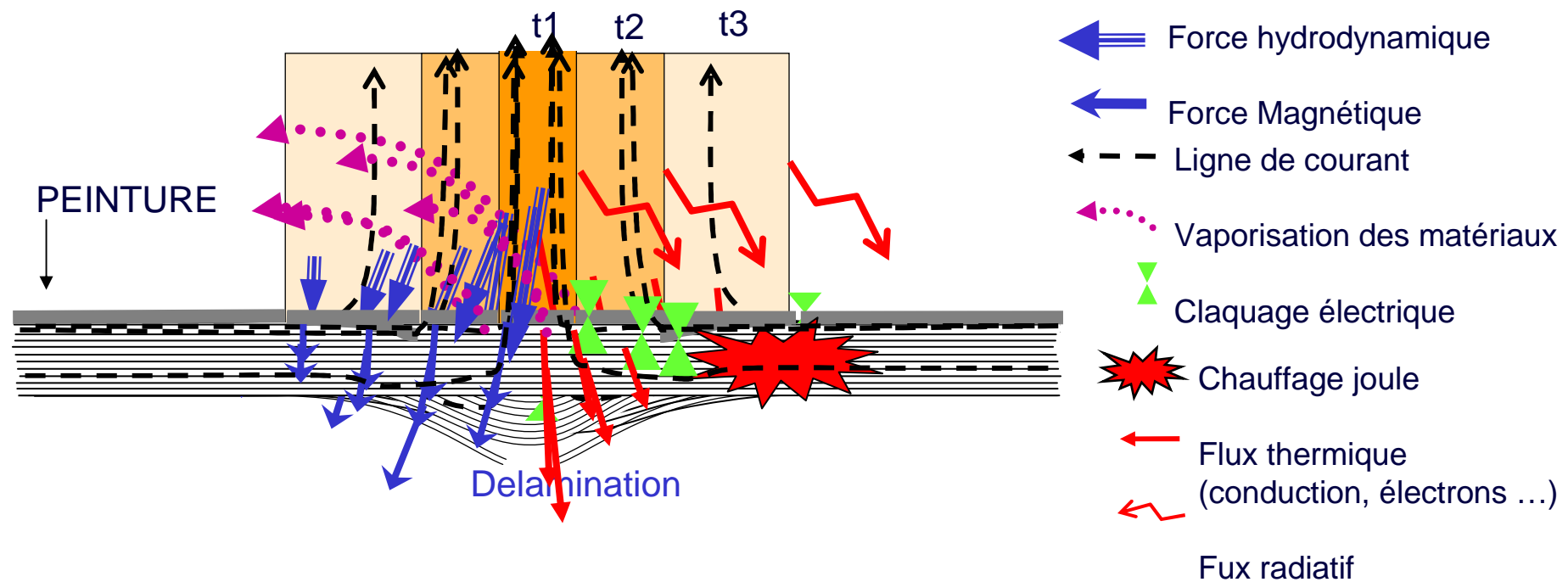


Essais « fixation » (Airbus Military)



AAE 19/10/2011

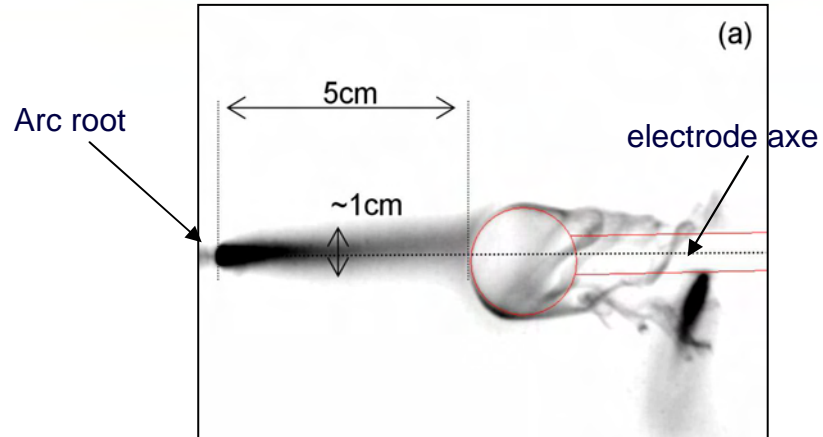
1. Retour d'expérience sur les effets directs foudre



AAE 19/10/2011

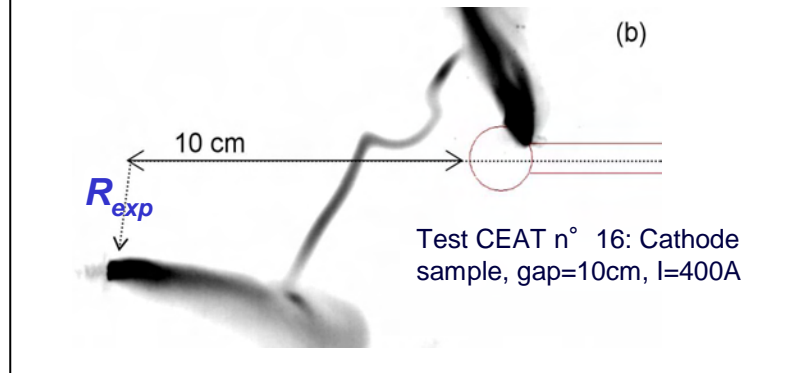
ETUDE EXPERIMENTALE

2. Courant continu / Forme d'arc

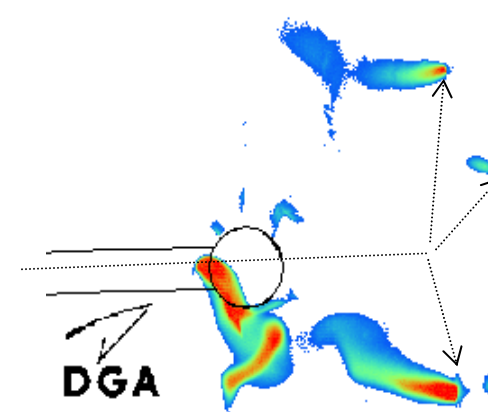


Test CEAT n° 2: Anode sample, gap=5cm, I=400A

The arc has successive arc roots on the panel



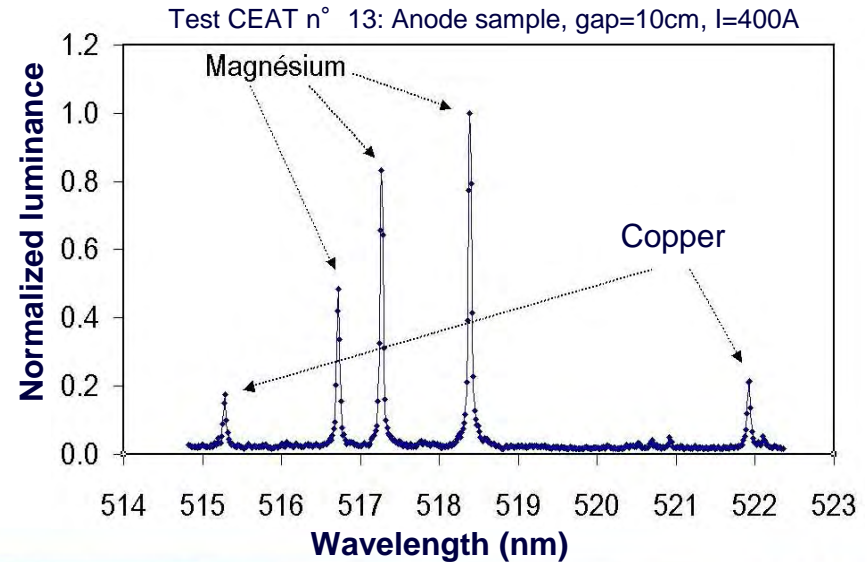
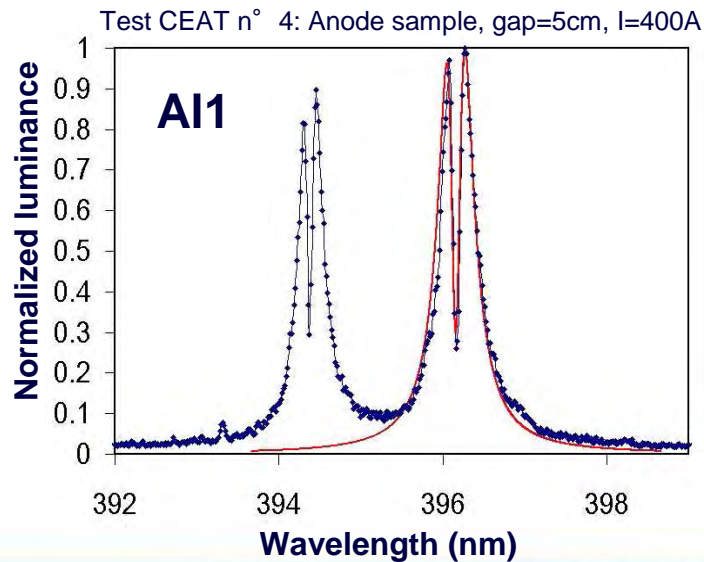
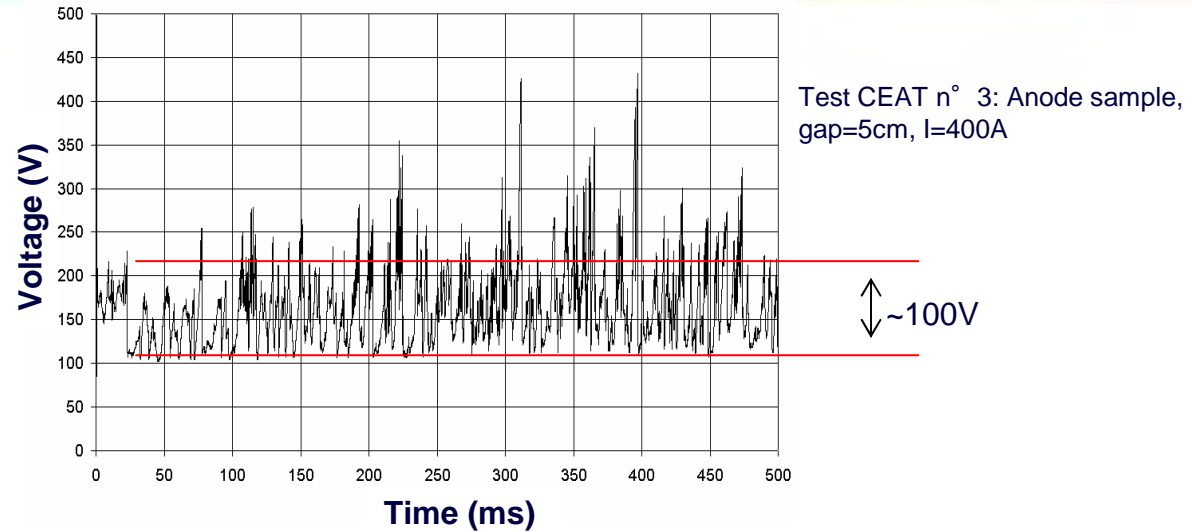
The arc has three simultaneous arc roots



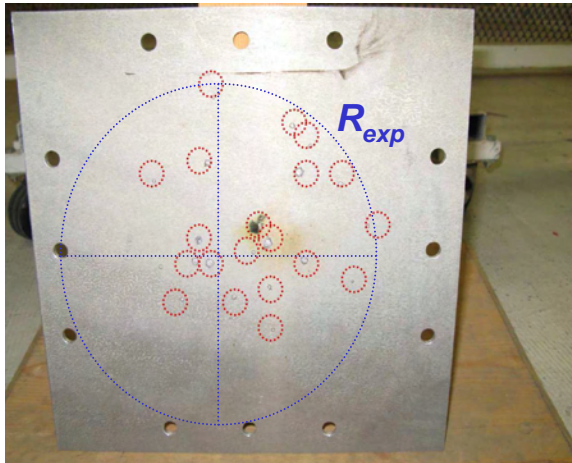
$\Delta t = 10 \text{ ms}$; $t_0 = 270 \text{ ms}$

Test CEAT n° 3: Anode sample, gap=5cm, I=400A

2. Courant continu / Mesures



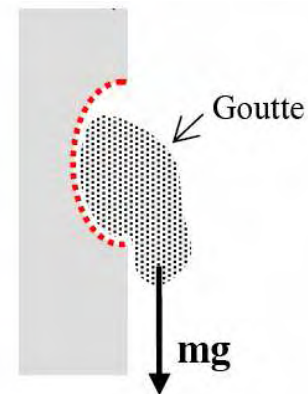
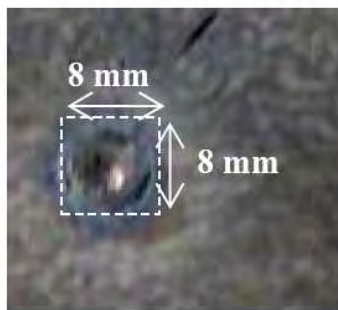
2. Courant continu / Effets sur l'échantillon



Test CEAT n° 5: Anode sample, gap=5cm, I=400A

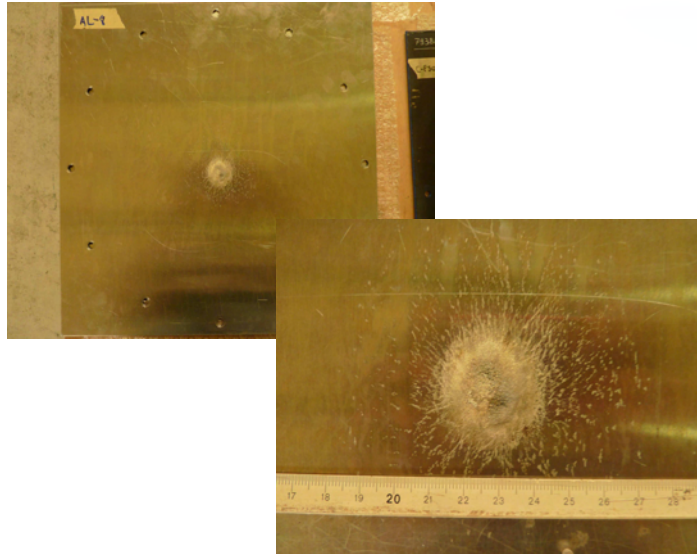
I=400A	Gap = 5 cm			Gap = 10 cm		
	Number of tests	Mean voltage (V)	Mean number of impact	Number of tests	Mean voltage (V)	Mean number of impact
Cathode	3	183	5	6	221	1.6
Anode	4	160	12	6	213	3.3

- ⇒ The electric charges are transferred through several points
- ⇒ The voltage is greater when cathode sample
- ⇒ The number of impacts is two times greater when anode sample

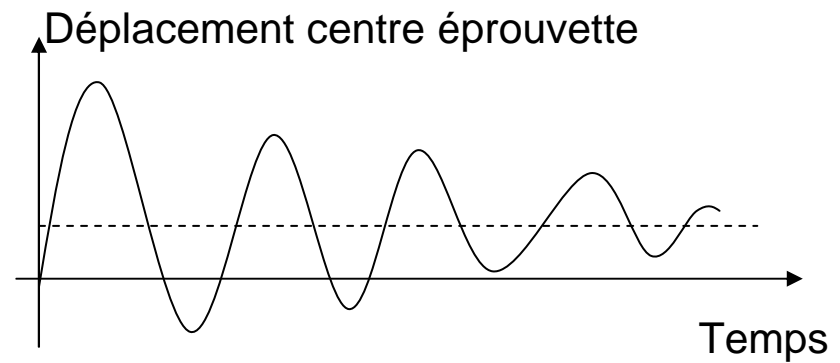
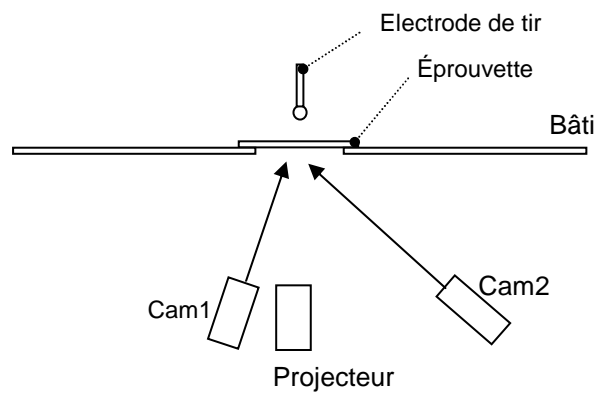
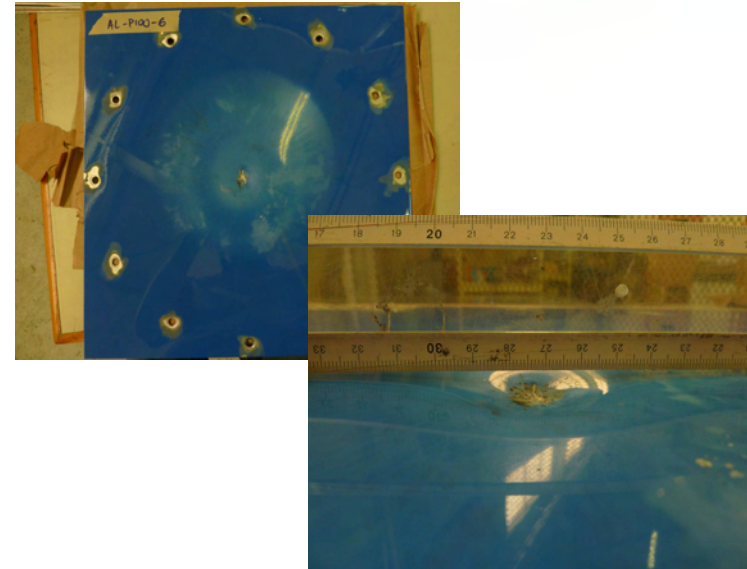


2. Impulsionnel / Effets sur l'éprouvette

Sans peinture



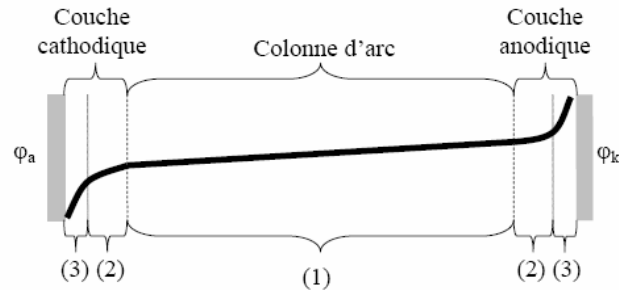
Avec peinture



MODELISATION DE L'ARC Foudre

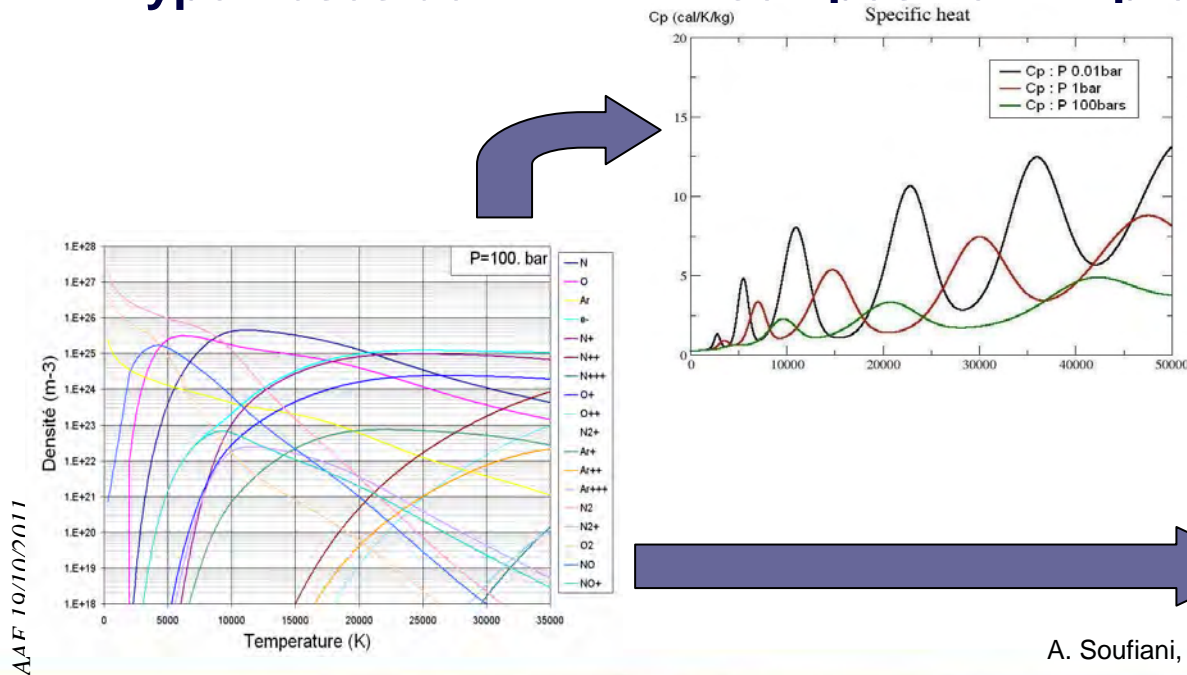
2. Arc électrique et plasma thermique

- Description habituelle de l'arc électrique**

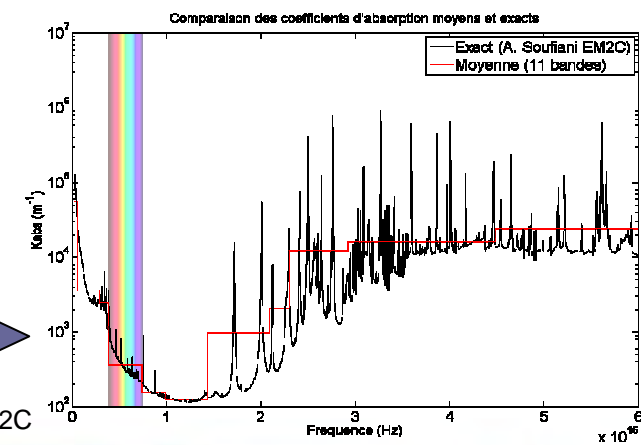


	Equilibre thermique	Equilibre électrique
(1)	$T_L = T_e$	$n_i = n_e$
(2)	$T_L \neq T_e$	$n_i = n_e$
(3)	Non définies	$n_i \neq n_e$

- Hypothèses de l'E.T.L => composition => propriétés du plasma**

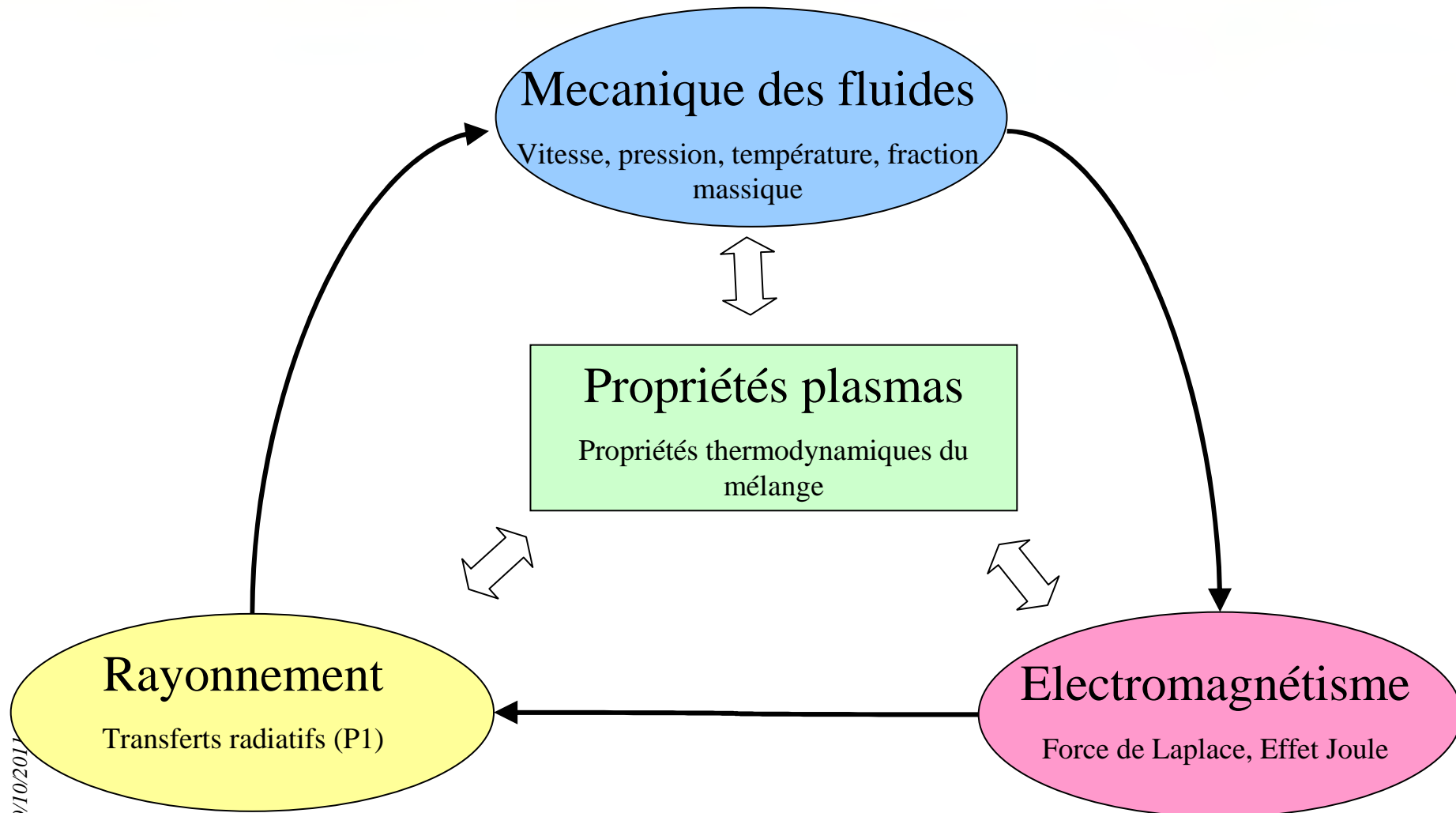


A. D'Angola, G. Colonna, C. Gorse, and M. Capitelli, Eur. Phys. J. D 46, 129–150 (2008)



A. Soufiani, EM2C

2. Modele fluide MHD pour l'arc électrique



AAE 19/10/2011

2. Les hypothèses courantes pour l'arc électrique

Hypothèses	Courant continue ($I < 1\text{kA}$)	Courant impulsionnel ($\Delta t > \mu\text{s}$)
Instationnaire ?	Oui	Oui
Compressible ($Ma > 0.33$) ?	Non: Code_saturne	Oui: CEDRE
Turbulent ?	Non ...	Non ...
E.T.L ?	Oui ...	Oui ...*
EM instationnaire (dA/dt)?	Non	Oui
Loi d'Ohm ($V \times B$) ?	Non	Oui
Réabsorption importante ?	Non	Oui

* "Hydrodynamic chemical non-equilibrium model of a pulsed arc discharge in dry air at atmospheric pressure"; Yasunori Tanaka¹, T Michishita and Y Uesugi; Plasma Sources Sci. Technol. 14 (2005) 134–151

2. Couches cathodique et anodique

- Les gaines/couches en déséquilibres sont négligés.
- Seuls les flux associés sont pris en compte
- Flux thermique totale reçu par une électrode

- Vaporisation de l'électrode

$$X_i = \frac{P_{sat} M_i}{P_{sat} M_i + (P_{atm} - P_{sat}) M_p} \frac{\lambda T_p}{dz} + Q_{net} + L_e \rho_e + Q_e$$

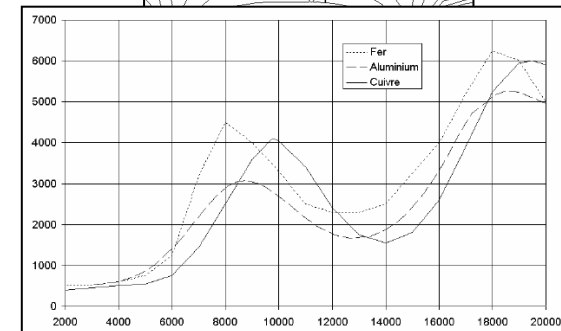
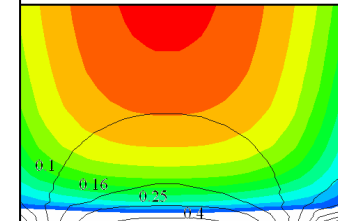
- Approximation du flux

$$Q_A = J \left(\frac{5k_b}{2e} (T_p - T_W) + U_a + \Phi_{Mat} \right)$$

- Approximation du flux propre d'une cathode

$$Q_K = -J_{em} \left(\frac{2k_b}{e} T_W + \Phi_K \right) + J_i \left(\frac{5k_b}{2e} T_W + U_k + \Phi_i \right)$$

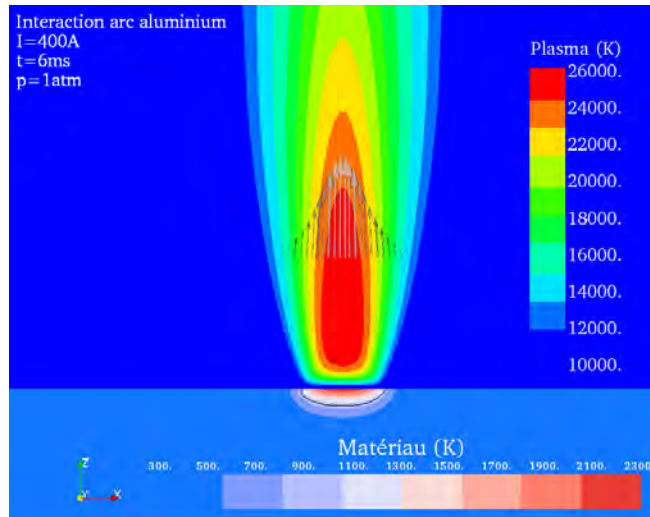
$$J_{em} = e \frac{4\pi k_b^2 m_e}{h^3} T_W^2 \exp \left(-\frac{e\Phi_{Mat}}{k_b T_W} \right)$$



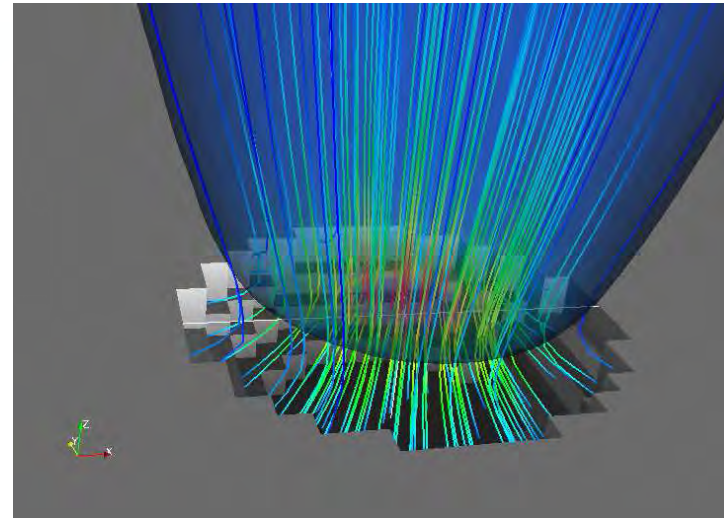
SIMULATION DE L'ARC Foudre EN COURANT CONTINU

Simulation de l'attachement de la foudre en CC

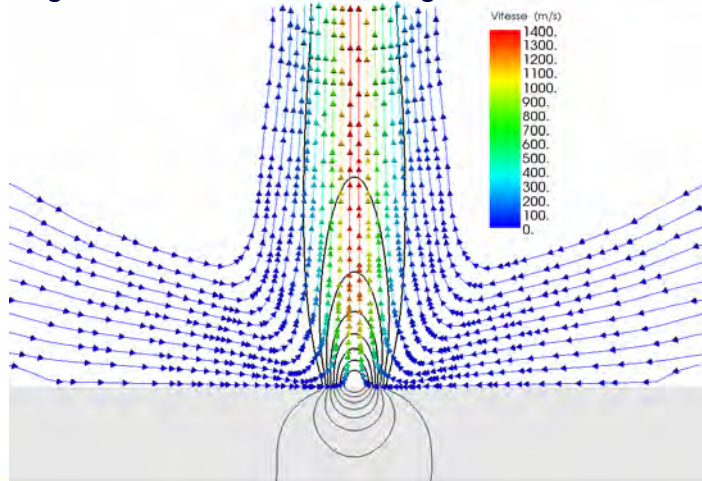
Distribution de la température



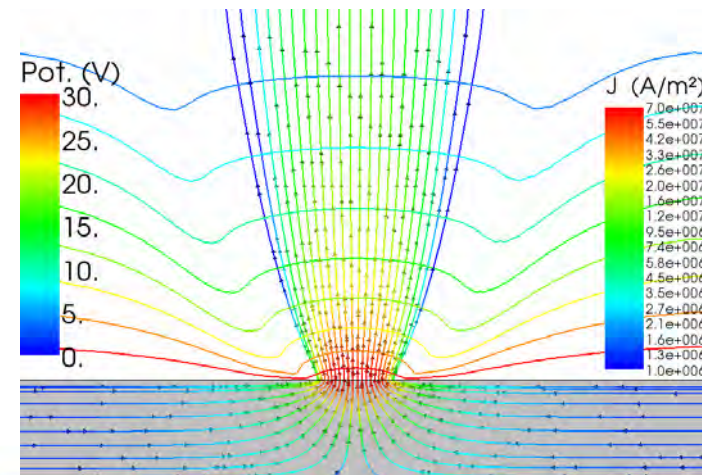
Zone fondue à $t=12ms$



Lignes de flux de masse & lignes isobares



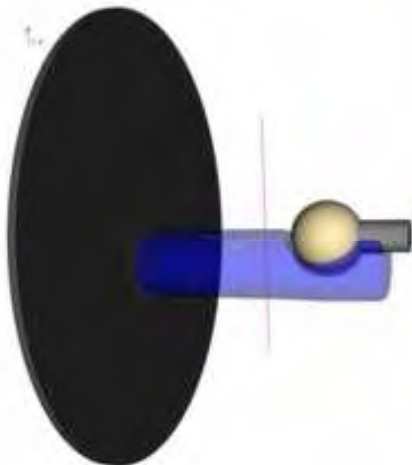
Lignes de courant & lignes iso potentiels



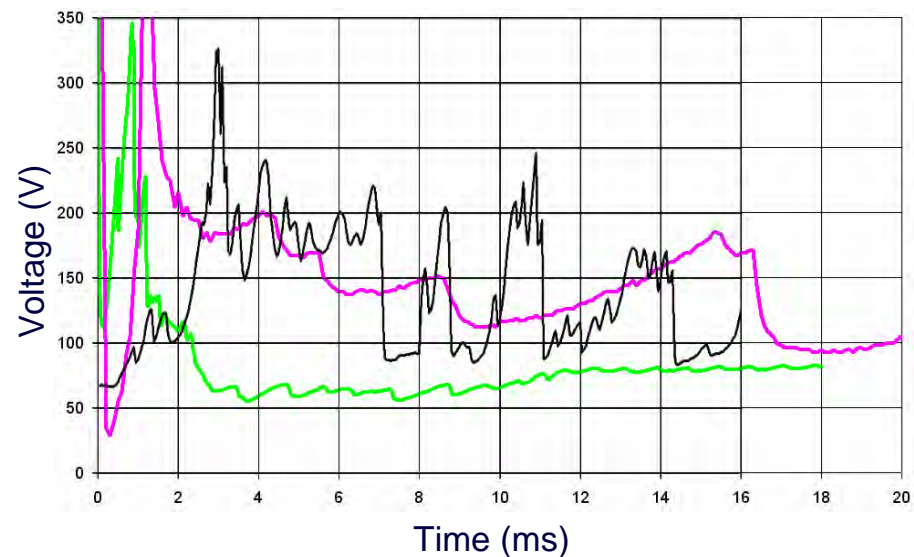
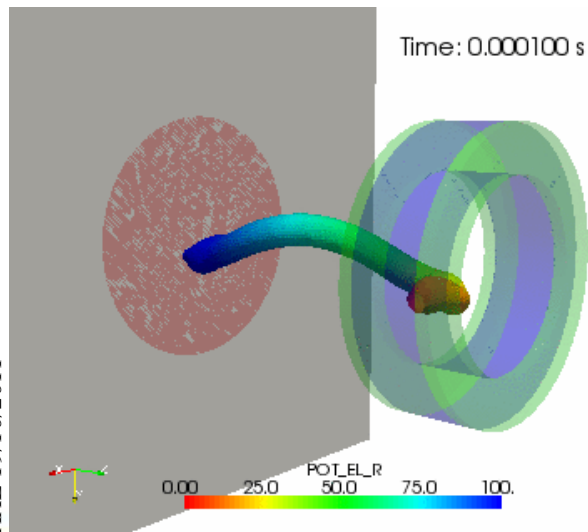
AAE 19/10/2011

Simulation d'arcs de laboratoire d'essais en CC

Diverting ball simulation: gap=5cm



Hollow electrode simulation: gap=5cm

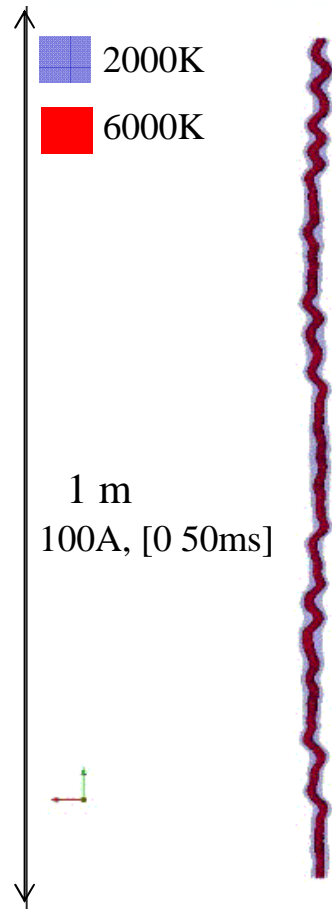


- Experiment (Div. ball, 200A)
- Simulation (Div. ball, 200A)
- Simulation (Hollow elec., 200A)

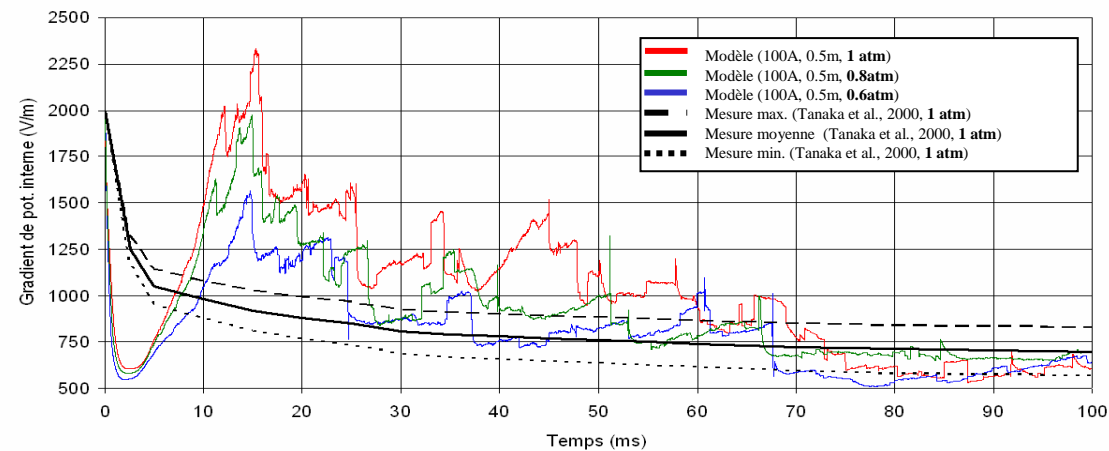
Chemartin et al., Modelling and simulation of unsteady dc electric arcs and their interactions with electrodes, J. Phys. D: Appl. Phys. 44 194003.

Simulation d'une colonne d'arc foudre libre dans l'air en CC

Arc périodique: pas de conditions aux limites en zones d'arc



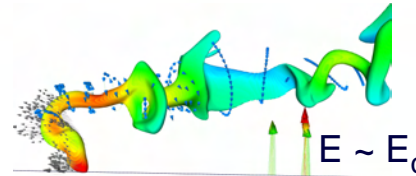
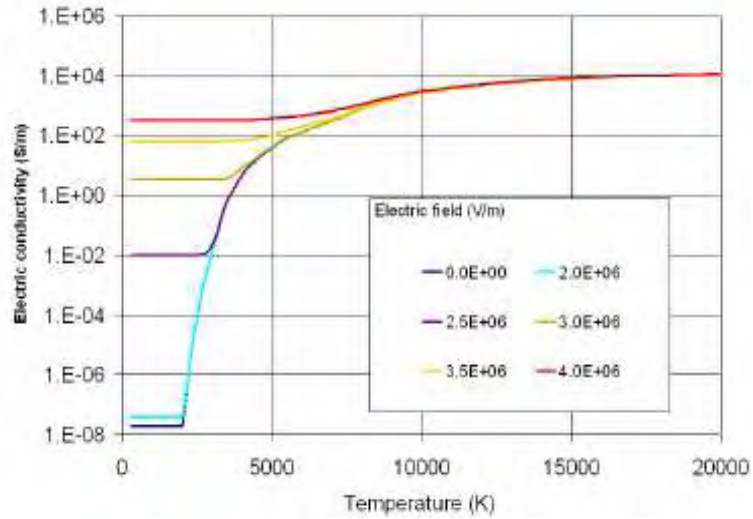
- **Température max. dans la colonne: 7000 à 8000K**
- Latham, 1986 : 7000K pour un courant de 100A
- **Vitesse max. de déplacement radiale: 8 à 15 m/s**
- Sunabe et Inaba, 1989 : 10 m/s pour un courant de 100A
- **Champ électrique moyen (100, 250 et 500A): 1,2 kV/m**
- King, 1961: Champ électrique (100 à 500A) de 1kV/m:



Latham DJ, "Anode column behavior of long vertical air arcs at atmospheric pressure", IEEE Transaction on Plasma Science, PS-14, 220-227, 1986
 Sunabe K, Inaba T, "Electric and Moving Characteristics of DC kilo-Ampere High Current Arcs in Atmospheric Air", IEEJ, vol.109-A, No.3, pp.95-102, 1989.
 King, L.A., "The voltage gradient of the free-burning arc in air or nitrogen", reference G/XT172, the British Electrical And Allied Industries Research Association, Leatherhead, Surrey, England, 1961.

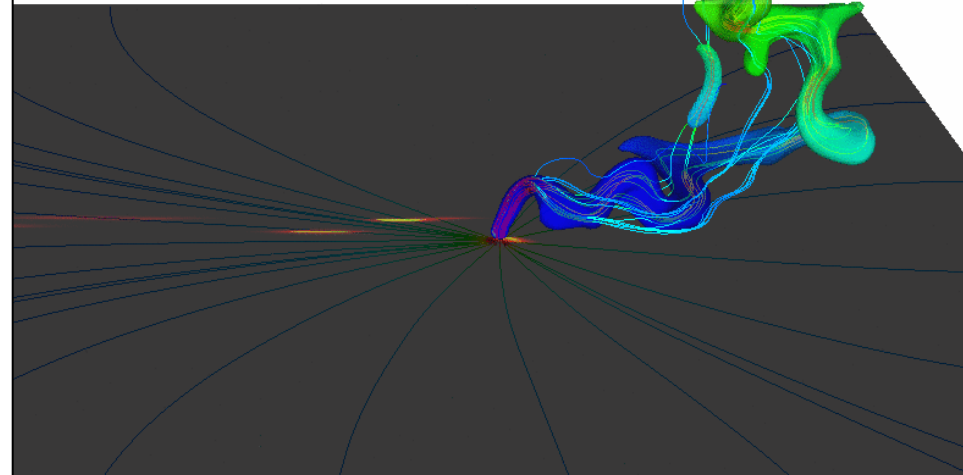
Simulation du balayage de l'arc sur un fuselage mobile en CC

Renforcement de la conductivité électrique avec E

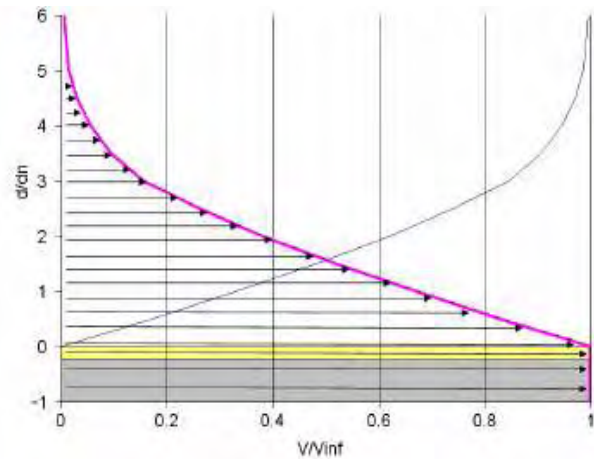


$t=1.00e-02s$
 $ddp=612V$

ONERA
 THE FRENCH AEROSPACE LAB



Couche limite de Blasius



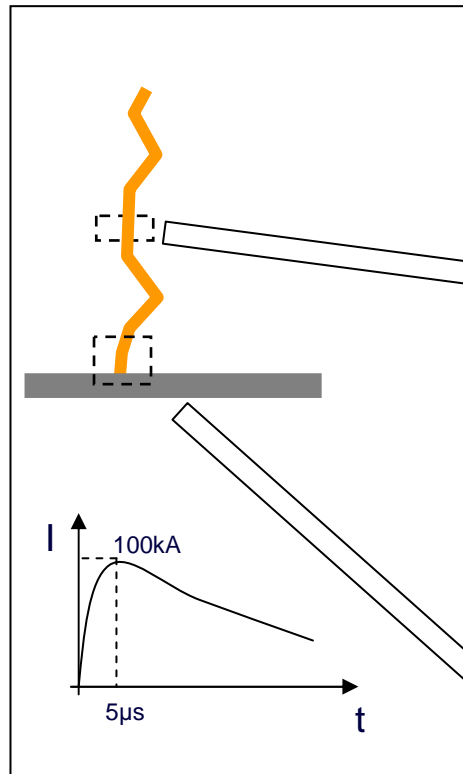
Chemartin et al., Simulation of a swept stroke discharge during lightning strike to aircraft with a three-dimensional electric arc model, GD 2010.

AAE 19/10/2011

SIMULATION DE L'ARC Foudre EN COURANT IMPULSIONNEL

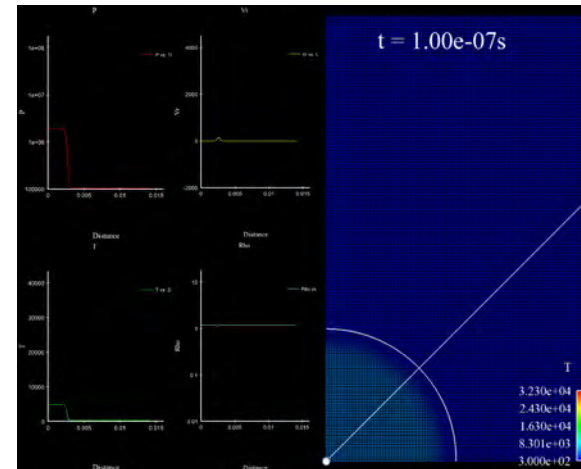
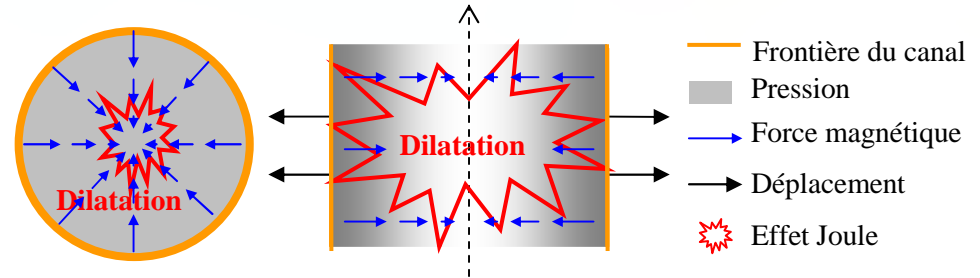
Simulation de l'arc foudre en impulsuel

Quelle approche ?



Arc foudre libre dans l'air

Approche 2D plan (à gauche) ou 1D axi (à droite)

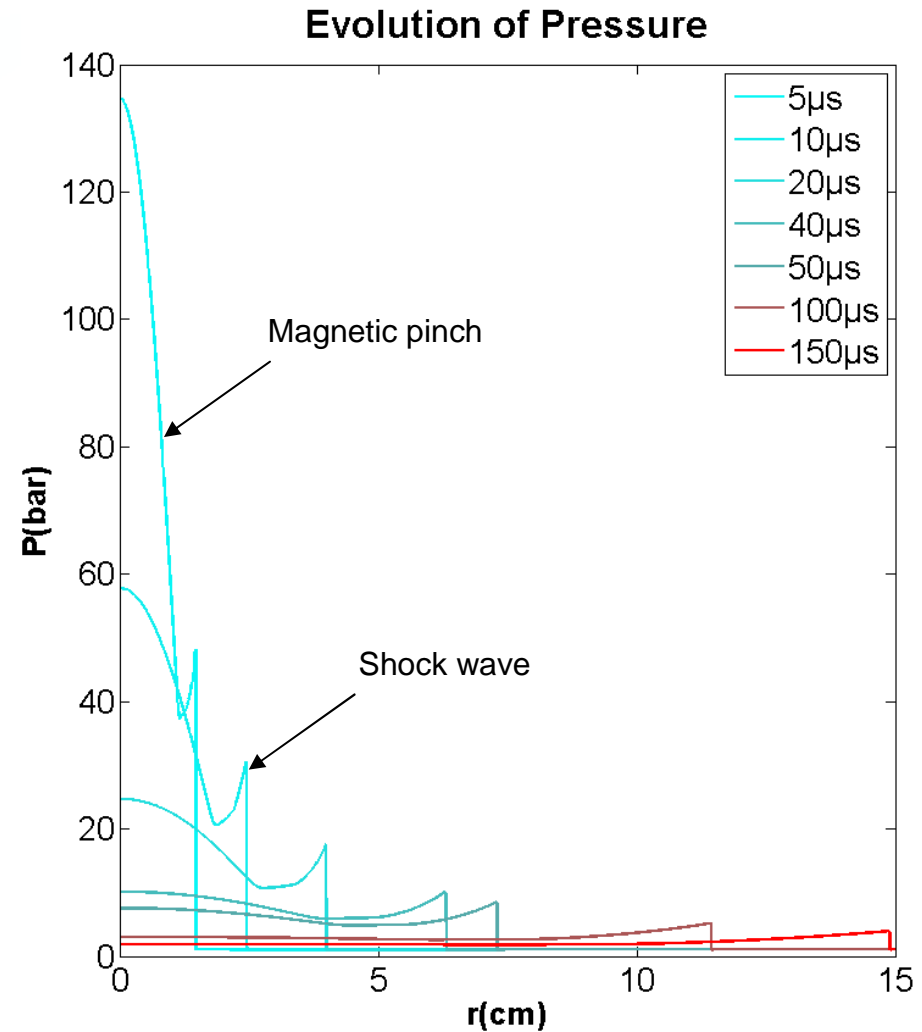
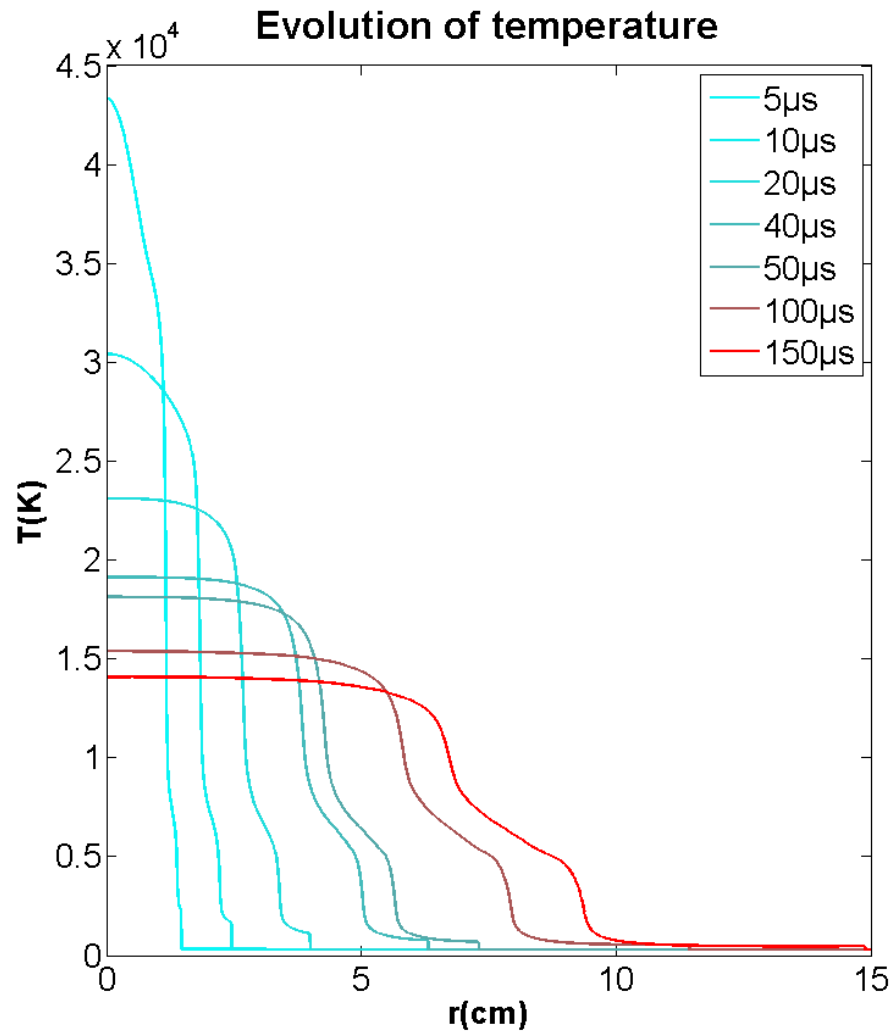


These Bruno Peyrou

Arc foudre en interaction avec une électrode

Approche 2D axisymétrique

Simulation de l'arc foudre libre en impulsionnel 100kA

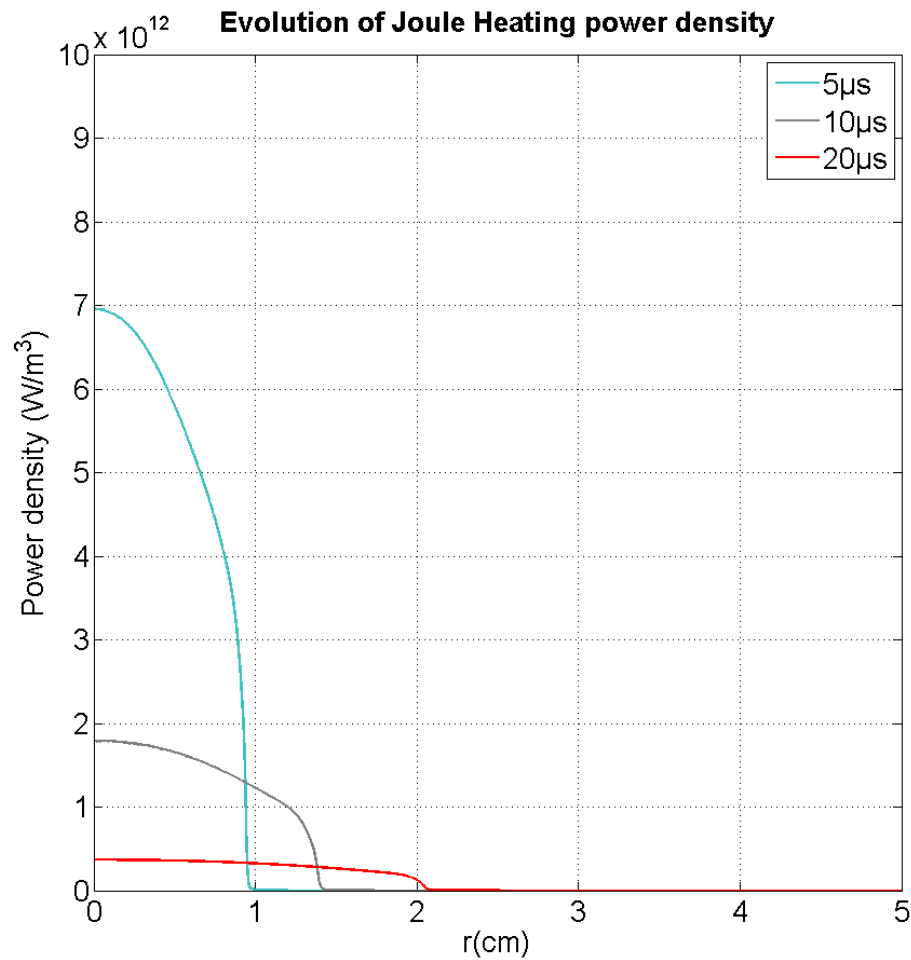


AA

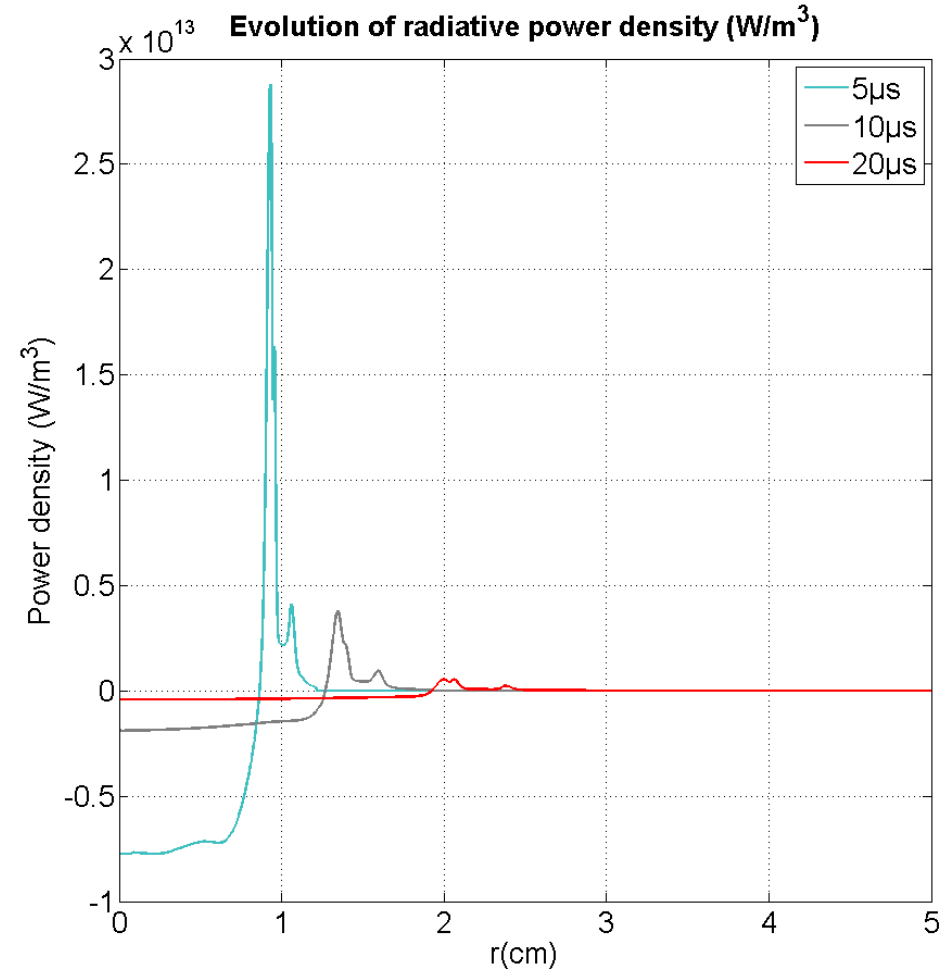
Peyrou et al., Characterization of the Impedance of a Lightning Channel during High Current Pulse, ICAE 2011.

Simulation de l'arc foudre libre en impulsionnel 100kA

Evolution of JE



Evolution of Srad



AA

Peyrou et al., Characterization of the Impedance of a Lightning Channel during High Current Pulse, ICAE 2011.

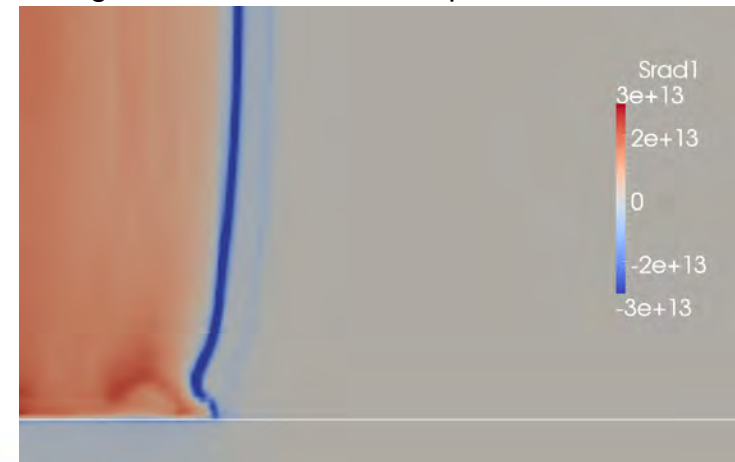
Simulation de l'arc foudre en interaction en impulsional 200kA

- Expansion rapide du rayon d'attachement
- Apparition d'une re-circulation à proximité de l'électrode
- Forte influence des transferts radiatifs
- Modèle en cours de développement
- Modèle à valider par des mesures et observation expérimentales

Evolution de la température, de 0 à 8 μ s



Divergence du flux radiatif, t=4 μ s



Questions