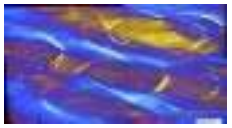
Phénomènes diélectriques dans l'aéronautique

Introduction

G. Teyssèdre, Th. Lebey

LAPLACE, Université de Toulouse; CNRS, UPS, INPT; Toulouse, France

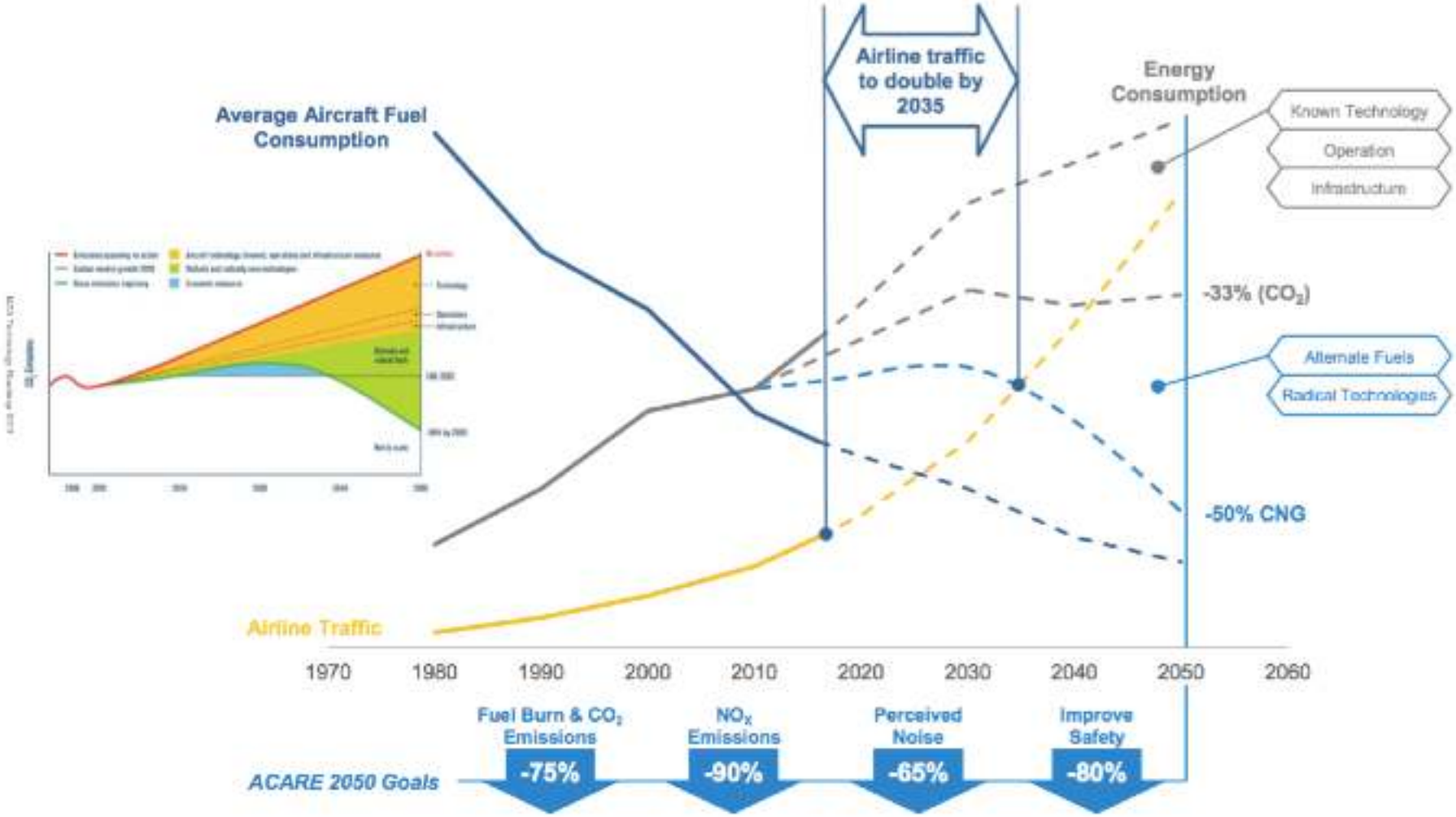


Make our planet great again

Laplace

→"*Le temps du monde fini commence*":
Paul Valery

→**Prise de conscience** « écologique »
populaire et politique
→Notion de « **durabilité** »
→Notion de **transition écologique**
→Forte **pression réglementaire** :
-EURO x pour l'automobile
-ACARE pour l'aéronautique
-Accords de Paris
-…


Average Aircraft Fuel Consumption
Airline traffic to double by 2035
Energy Consumption
Known Technology
Operation
Infrastructure
-33% (CO_2)
Alternate Fuels
Radical Technologies
-50% CNG
Airline Traffic
1970
1980
1990
2000
2010
2020
2030
2040
2050
2060
Fuel Burn & CO_2 Emissions
NO_X Emissions
Perceived Noise
Improve Safety
ACARE 2050 Goals
-75%
-90%
-65%
-80%

Convergence des Technologies

→ **Evolutions rapides** dans :

- l'électronique numérique
- les communications
- les technologies liées à l'énergie (Electronique de Puissance/Stockage/…)
- les méthodes de fabrication

→Convergences dans les **outils de design et de simulation**

→Apparition de **nouveaux acteurs** : startup & GAFA

Make our planet great again & Convergence des Technologies

Laplace

→"*Le temps du monde fini commence*": **Paul Valery**

→**Prise de conscience** « écologique » populaire et politique

→Notion de « **durabilité** »

→Notion de **transition écologique**

→Forte **pression réglementaire** :

-EURO x pour l'automobile

-ACARE pour l'aéronautique

-Accords de Paris

-…

→**Evolutions rapides** dans :

- l'électronique numérique
- les communications
- les technologies liées à l'énergie (Electronique de Puissance/Stockage/…)
- les méthodes de fabrication

→Convergences dans les **outils de design et de simulation**

→Apparition de **nouveaux acteurs** : startup & GAFA

Vecteur électricité

Le Génie électrique dans les transports

Laplace

Vecteur électricité

Energies non propulsives

AERONAUTIQUE : Simplifier les réseaux énergétiques, réduire le cout de possession, augmenter la modularité

AUTOMOBILE : Augmenter les fonctionnalités Optimiser la gestion et de la consommation de l'énergie (clim, direction…), Favoriser les véhicules autonomes

Energie propulsive

AERONAUTIQUE: nouvelles architectures, hybridation, VTOL

AUTOMOBILE : hybridation, tout électrique, confort de conduite (souplesse, bruit…)

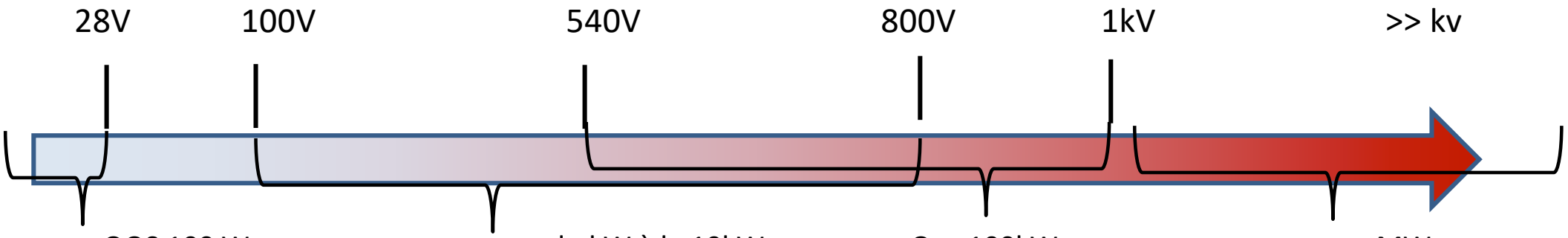
SPATIAL : Propulsion Plasma

HYPERLOOP : Sustentation magnétique

Forte réduction de l'empreinte environnementale

Les mêmes besoins pour tous

Pondération des critères propres à chaque application
MAIS
Tendance claire à la montée en Tension et en Puissance



QQS 100 W
- Powering the brain

du kW à la 10kW
- Actuation

Qqs 100kW
- Actuation et chaine de puissance intermédiaire (traction/propulsion)

> MW
- chaine de forte puissance (traction/propulsion)

Et les mêmes besoins : -technologique
-Fiabilité
-réduction de cout
- méthodologique
-moyens d'essais
-…

Une révolution dans l'aéronautique

Civil Aerospace technology

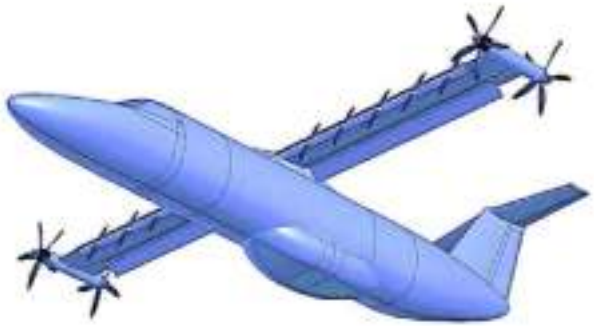
The last revolution in aircraft design came with the introduction of the jet engine. The Boeing 707 entered in service in the year

1958 almost 60 years ago

Une révolution dans l'aéronautique

Alternative Concepts

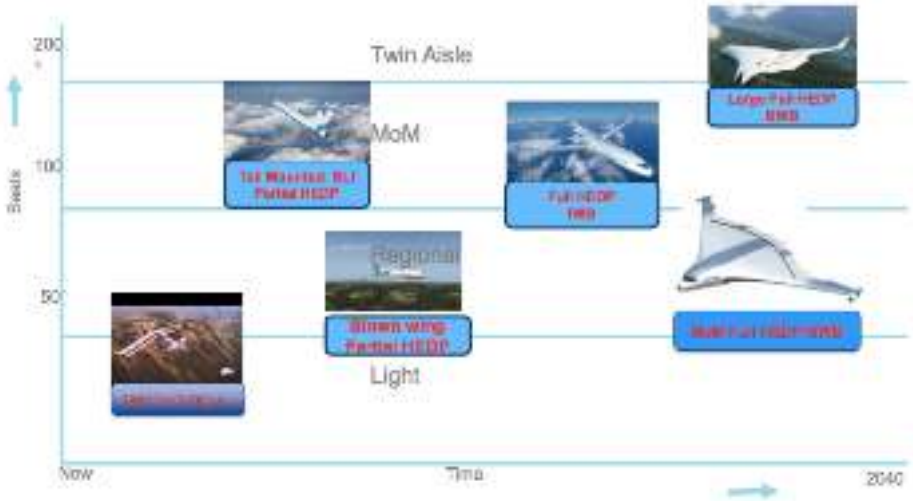
STOL Turbojet with partial turbo-electric power unit and retractable in cruise flight distributed propellers

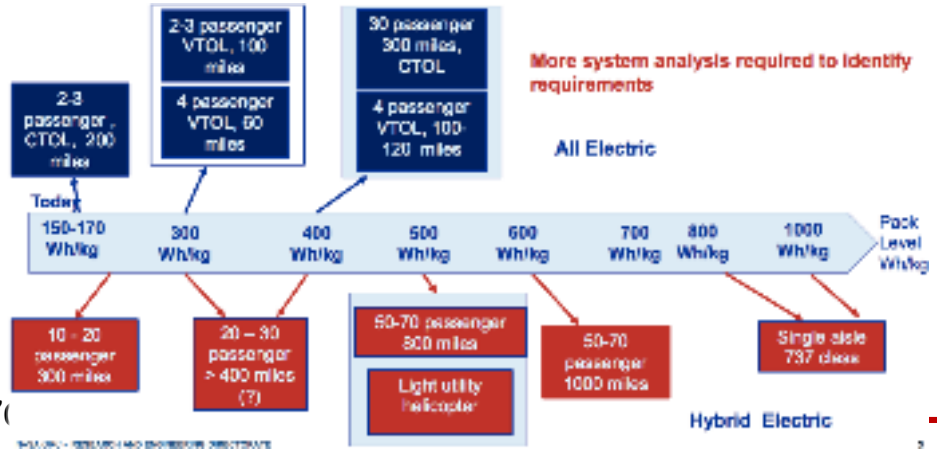


STOL Aircraft with turbo-electric power unit, electric engines mounted on wing-tips and distributed propellers retracted in cruise flight

Une révolution dans l'aéronautique

Des feuilles de route qui convergent et accélerent





Une révolution dans l'aéronautique

Distributed Electrical Propulsion VTOL - EVTOL

Joby S2

Lilium Jet

Urban Aeronautics

Une révolution dans l'aéronautique

City Airbus

170 annonces à ce jour!!

Airbus Vahana

Ehang 184

Joby Aviation

Lilium Aviation

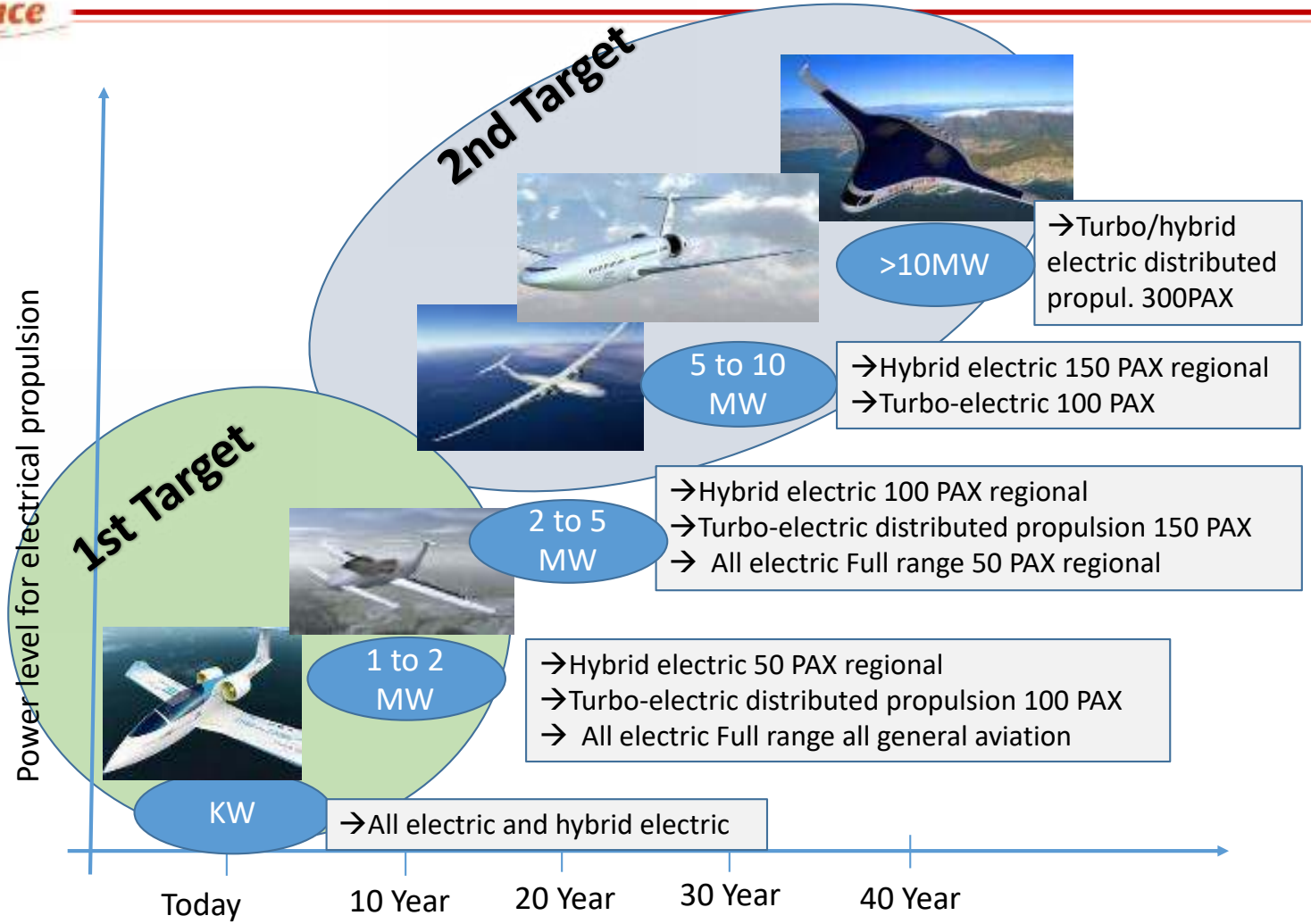
Terrafugia TF-X

Volocopter

Une révolution dans l'aéronautique

Une révolution dans l'aéronautique

Des applications envisagées



Une concurrence mondiale très dynamique

Siemens, Airbus, Rolls-Royce team up on hybrid-electric propulsion

Airbus CEO sees 'flying car' prototype ready by end of year

REUTERS

ENTREPRENEUR

Lilium raises $90 million to build flying taxis

theguardian

Is the flying car ready for takeoff?

At least six developers have re watch the skies

THE VERGE

These hybrid electric jets could change how we live and work by 2022

Zunum Aero aims to reinvent regional air travel

BUSINESS DAY

The New York Times

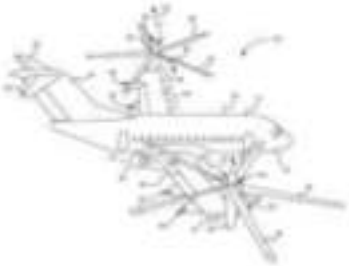
OCT. 5, 2017, 11:30 A.M. E.D.T.

Boeing to Buy Autonomous and Electric Flight Firm Aurora

Une concurrence mondiale très dynamique

Airbus
Prototype 2017,
Production 2020

Airbus
Pop Up Autonomous
PATS/Car



Boeing
Patent for 100
seat VTOL Aircraft
Aurora Flight
Sciences
GoFly
Competition

EVOLO – VC200
Certified in Germany
for testing
Real start Oct 2012
Certification 2016
Crowdfunding 1.2m
Euros
Daimler investment

Ehang 184
Dubai Summer 2017

Lilium Jet
190mi 200kg Payload

Une concurrence mondiale très dynamique

Laplace

THE OHIO STATE UNIVERSITY
COLLEGE OF ENGINEERING

The Team

WISCONSIN
- Electric Machines

THE OHIO STATE UNIVERSITY
- Center for Automotive Research—Batteries
- Center for High Power Performance Electronics—Power Electronics

CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY
- Batteries

NASA
- NEAT Test Facility

Georgia Tech
- Systems Integration

NORTH CAROLINA A&T STATE UNIVERSITY
- Thermal Management

UNIVERSITY OF MARYLAND
- Thermal Management

Fully Integrated University Team Working Together

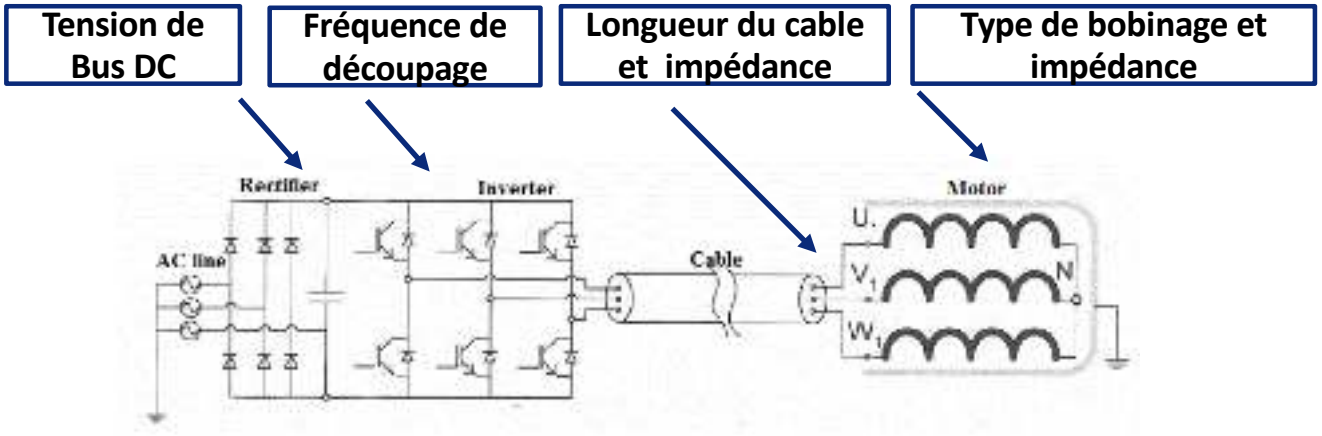
What We Set Out to Achieve?

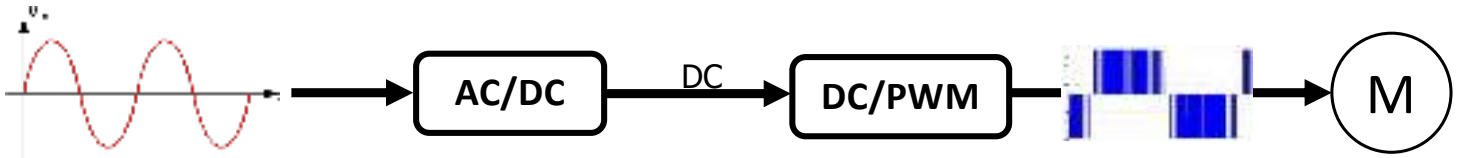
Higher power density, Higher voltage, Higher altitude
- Electric Machines: > 14 kW/kg, efficiency >94%
- Power Electronics: > 25 kW/kg, efficiency >99%
- Voltage: > 2kV without partial discharge

Two stages of deliverables:
- 200 kVA high power density electric machine with off-the-shelf power electronics (Month 30th)
- 500 A Silicon Carbide (SiC) based power module (Month 30th)
- 1 MWA integrated drive (Month 60th)

Un verrou partagé

Les systèmes d'isolation et leur comportement dans les conditions de l'aéronautique





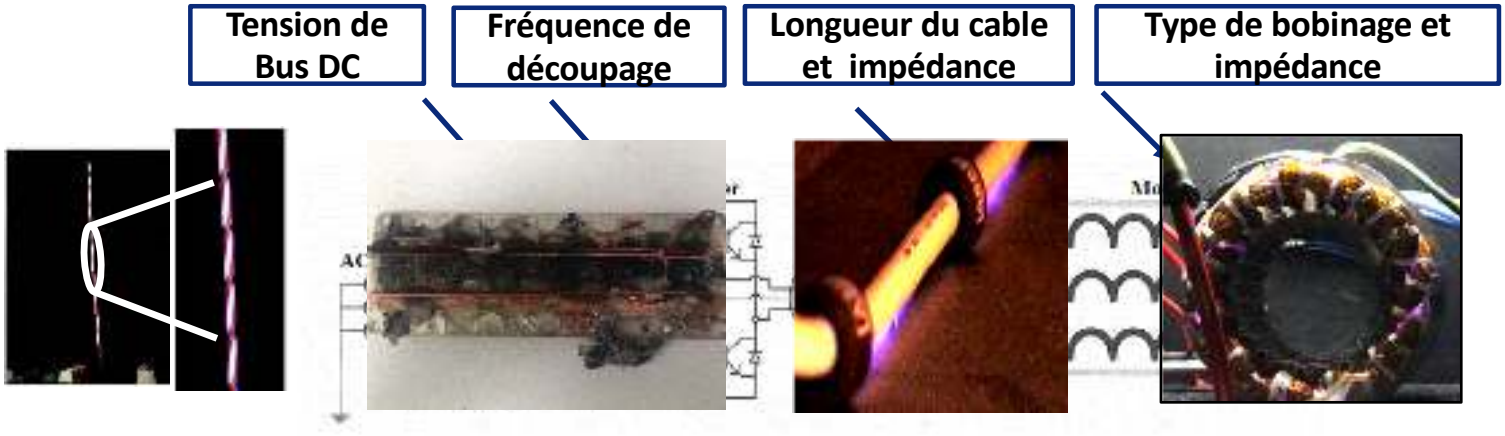
Source AC
3 phases
230Vrms @ 400Hz

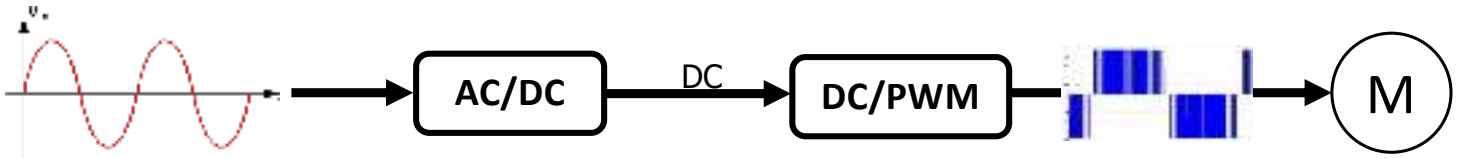
DC liaison
$400V_{DC}$

PWM output
3 phases
+/- 400Vpk
150Hz
20kHz (+/- 5kHz) fréquence de découpage

Un verrou partagé

Les systèmes d'isolation et leur comportement dans les conditions de l'aéronautique





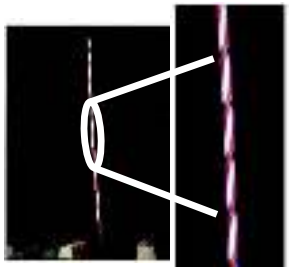
Source AC
3 phases
230Vrms @ 400Hz

DC liaison
$400V_{DC}$

PWM output
3 phases
+/- 400Vpk
150Hz
20kHz (+/- 5kHz) fréquence de découpage

Un verrou partagé

Les systèmes d'isolation et leur comportement dans les conditions de l'aéronautique



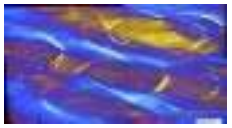
Cables => Gilbert

Phénomènes diélectriques dans l'aéronautique

Problématique DP

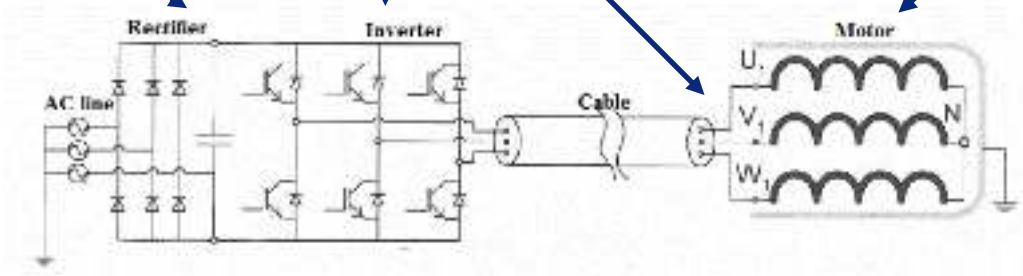
G. Teyssèdre, Th. Lebey

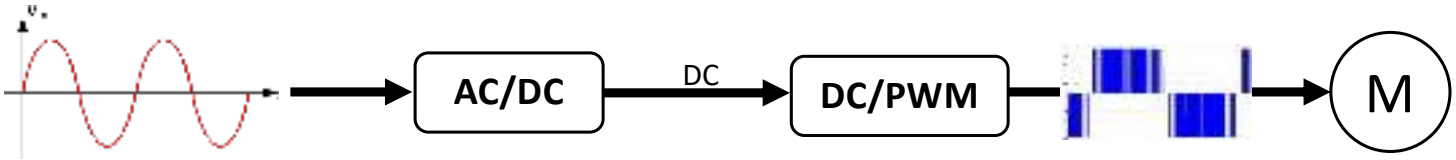
LAPLACE, Université de Toulouse; CNRS, UPS, INPT; Toulouse, France



Example of Power Chain

DC bus voltage | Switching speed | Cable length and impedance | Windings arrangement and impedance





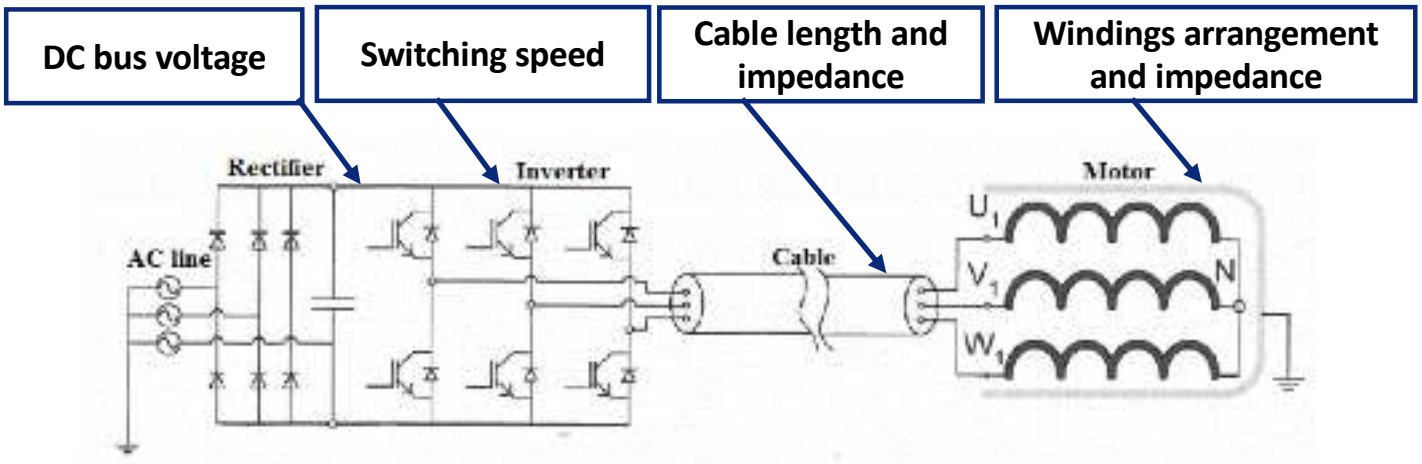
AC power source
3 phases
230Vrms rated
400Hz

DC link
400V_{DC} rated

PWM output
3 phases
+/- 400Vpk rated
150Hz
20kHz (+/- 5kHz) switching frequency

Challenges for Aeronautics

Voltage	Switching speed	Cable length and impedance	Motor
• Increase of voltage 230 / 400 V AC ± 270 V DC	• Non-homogeneous voltage distribution • Overvoltages	• Non-homogeneous voltage distribution • Overvoltages	• Type I motor • Random wound 80% of voltage between turns



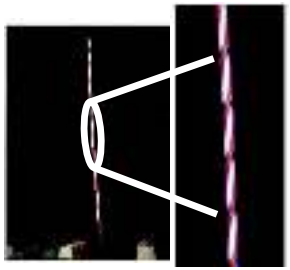
Risk of partial discharge occurrence in the weakest equipment: the motor

Challenges for Aeronautics

Associated risks

Weibull : “The weakest link drives the reliability of the whole chain”…

Power Source



Static converter

Energy carrier

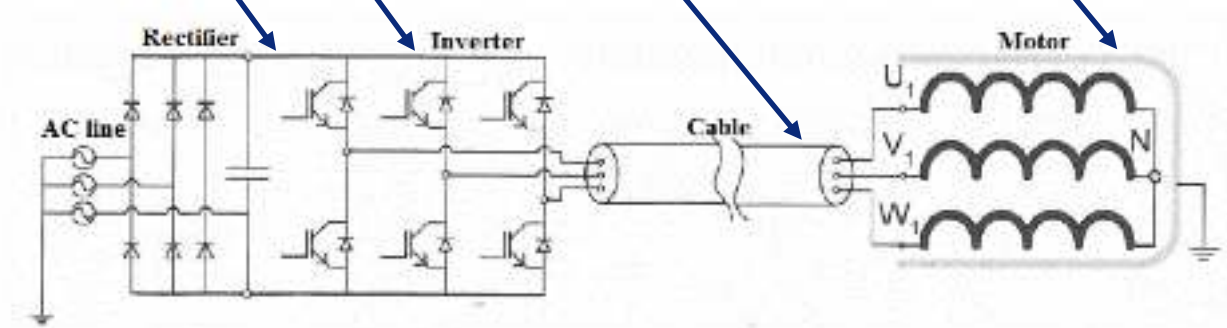
Energy converter

DC bus voltage

Switching speed

Cable length and impedance

Windings arrangement and impedance



Partial Discharges ?

The silent (yet harmful) enemy

Why partial? Do not bridge (short-circuit) the whole system

Cause: Electrical field and free electrons

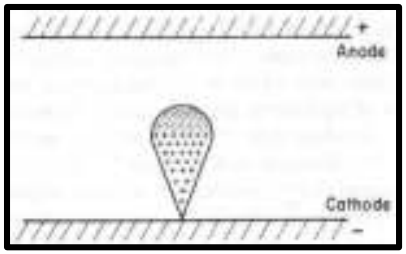
Mechanism: Electronic avalanche (Townsend mechanism)

Effects: Mechanical, chemical, thermal, …

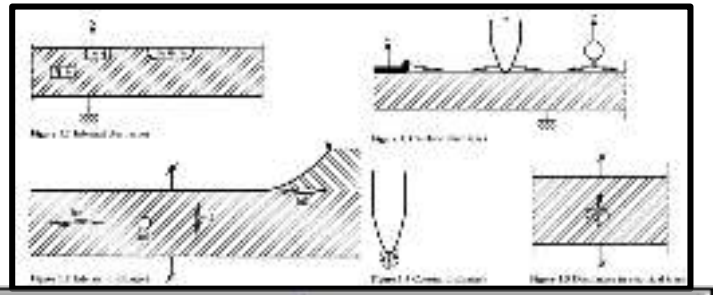
Consequence: Lead to premature failure

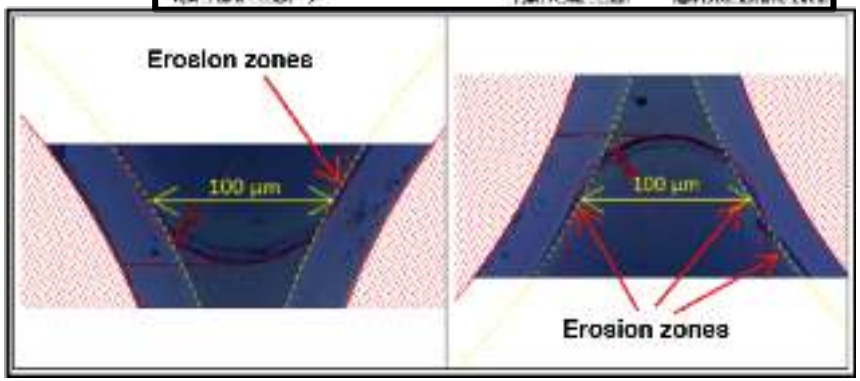
Criteria: RPDIV and PDIV to qualify insulation system performance

[BARTNIKAS] Bartnikas R. and McMahon E. J., "Engineering dielectrics – Volume 1 – Corona measurements and interpretation"

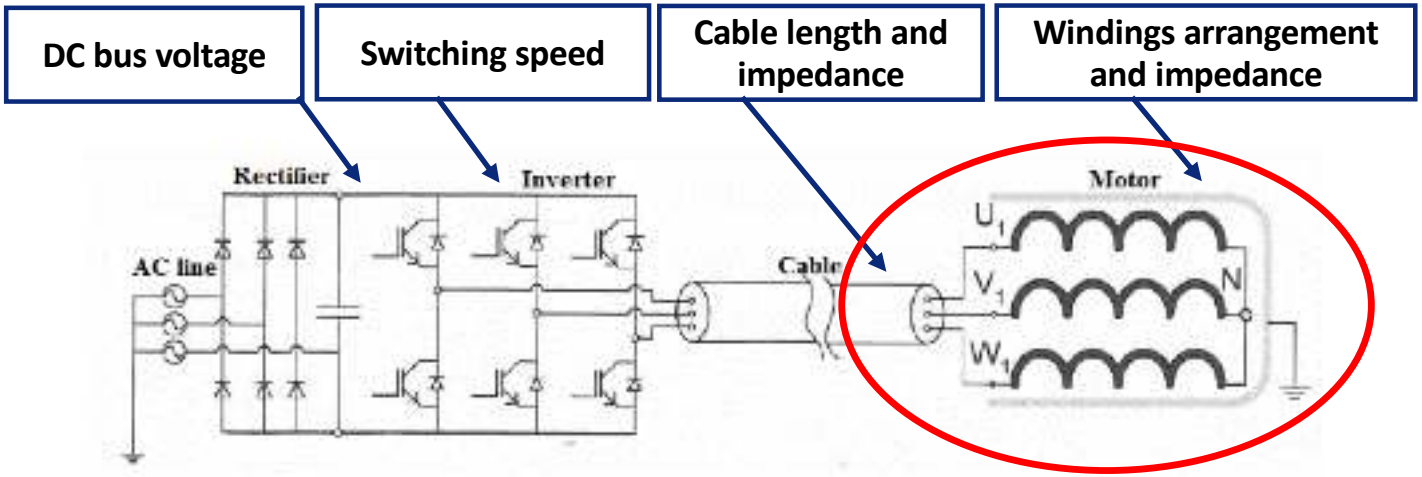


[KREUGER] Kreuger F., "Partial Discharges detection in High Voltage equipment"





Challenges for Aeronautics



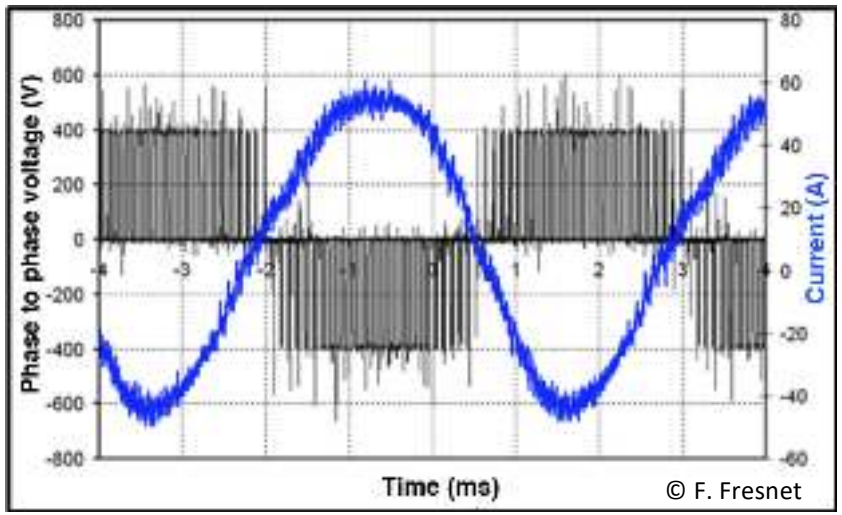
Consequences for the insulation ?

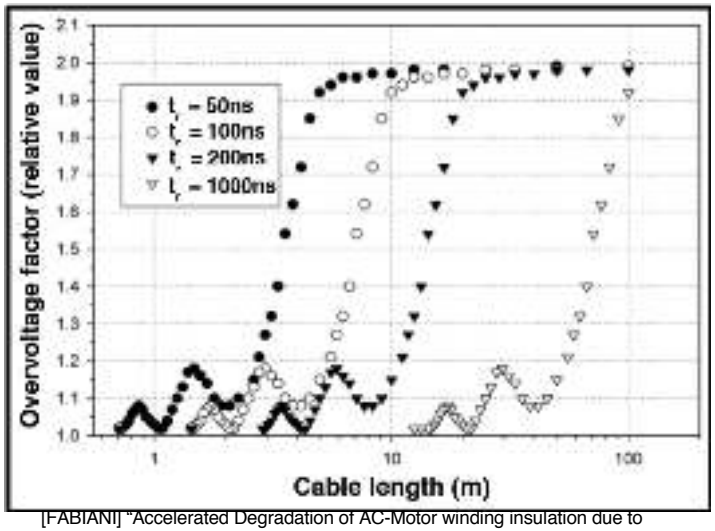
Increasing electric stress: overvoltage

Cause: Impedance mismatch between cable and motor terminal causing reflections

Consequence: Overvoltage at motor terminal, up to 2 times DC bus

Function of: Cable length and rise time (component type)





[FABIANI] "Accelerated Degradation of AC-Motor winding insulation due to voltage waveforms generated by adjustable speed drives." Ph.D Thesis, 2003.

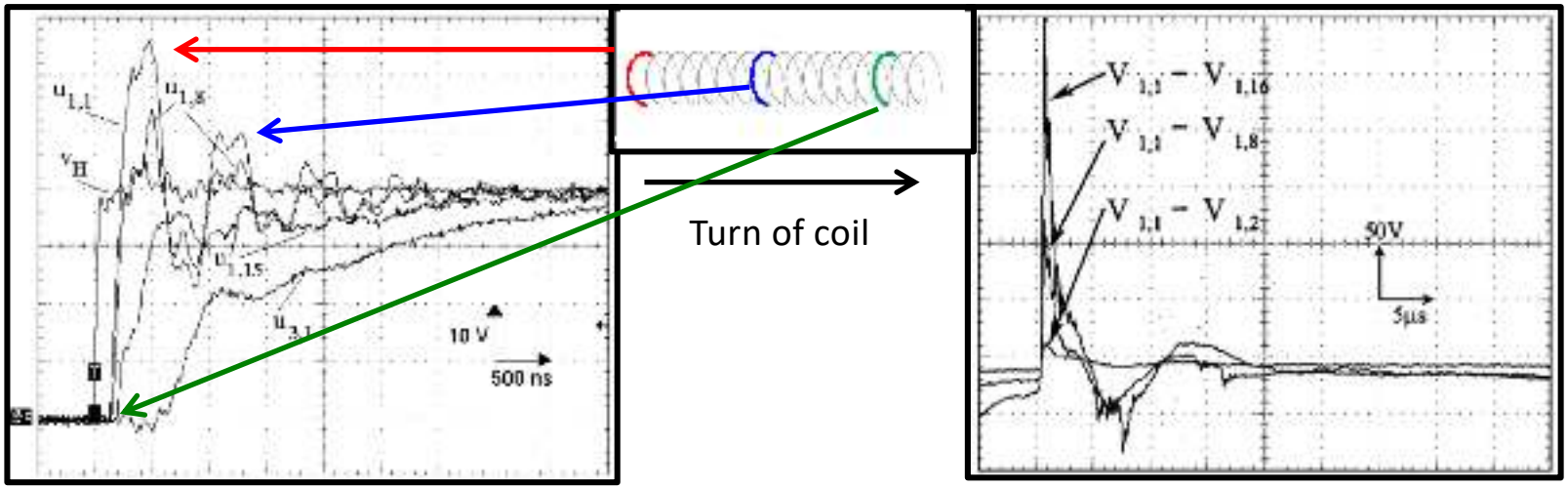
Consequences for the insulation ?

Increasing electric stress: inhomogeneity

Cause: Propagation delay of the voltage pulse along the coil

Consequence: Inhomogeneity of voltage between turns of the same coil

Function of: the shorter the rise time, the more inhomogeneous the voltage



[NEACSU] "Contribution à l'étude des défaillances statoriques des machines asynchrones" Ph;D Thesis, Univerty Paul Sabatier (Toulouse 3), 2002.

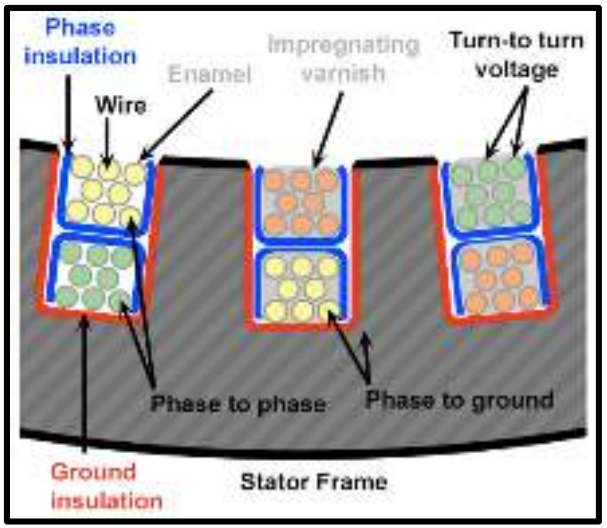
Insulation System

Random wound motor and PWM inverter drive

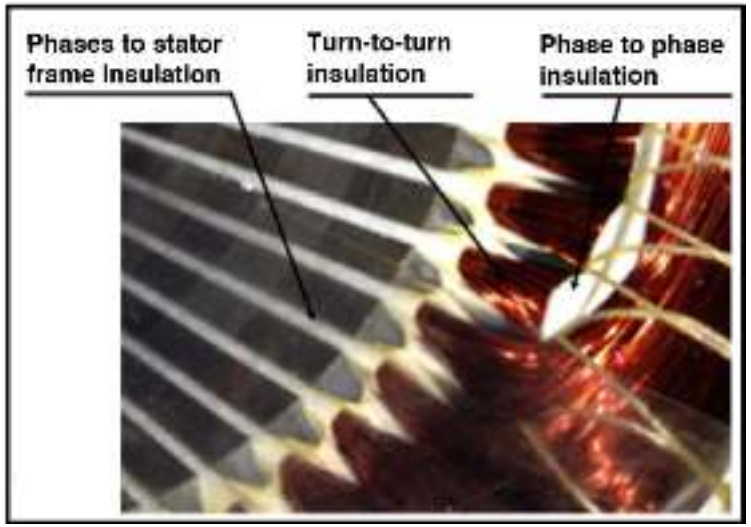
Turn-to-turn isolation: enamel wire + impregnating varnish

Not designed to withstand voltage inhomogeneity in low voltage machine

Trade-off between performance and cost

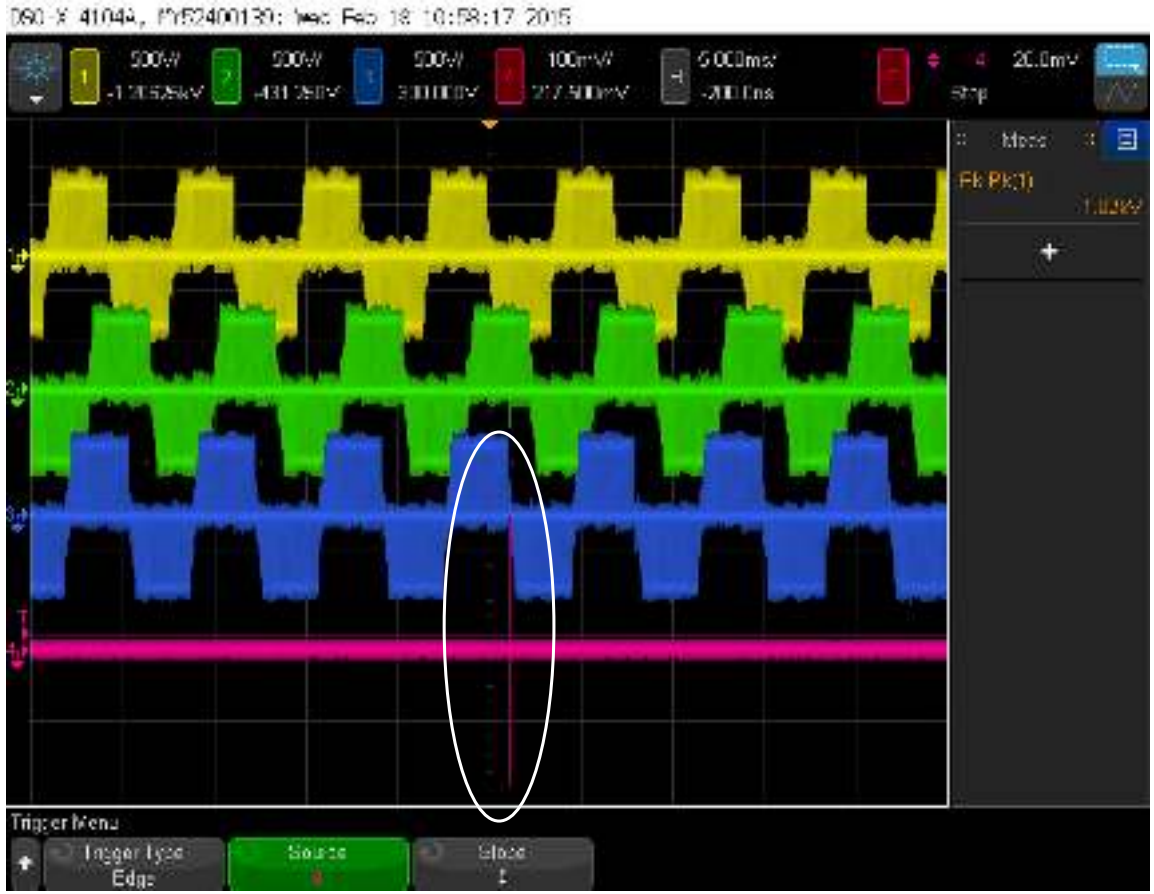


EV Motor prototype - Zoom



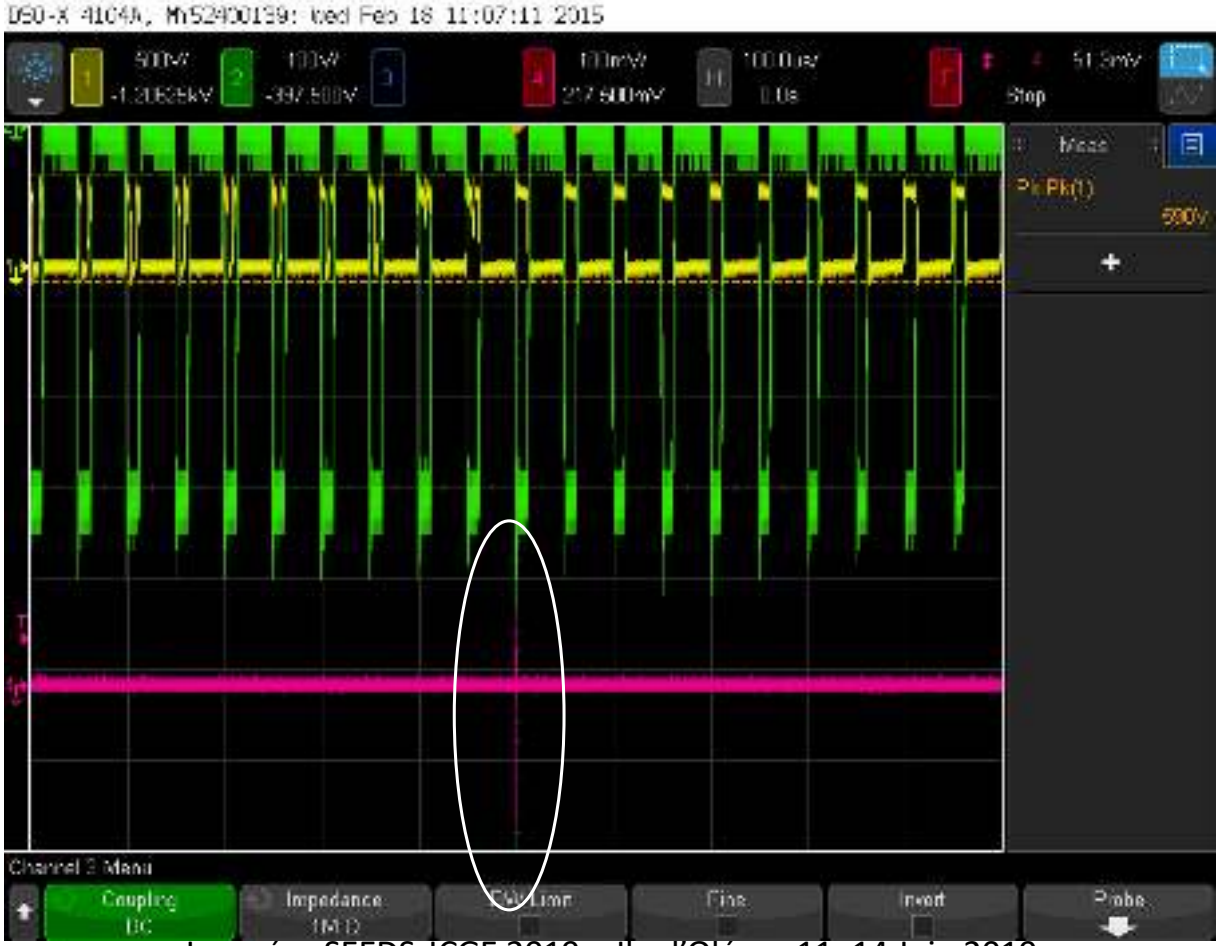
Challenges for Aeronautics

On line PD Detection under PWM ???



Challenges for Aeronautics

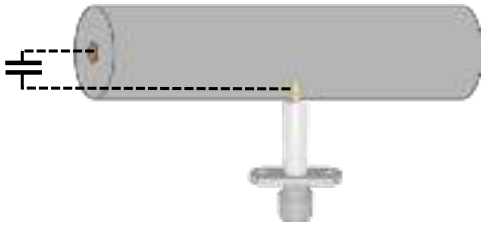
On line PD Detection under PWM ???



Sensor Principle

Observation:

A capacitive coupling is induced between the core of the power cable and the metallic part of the Jack-SMA connector used as a sensor



Phenomenon detected:

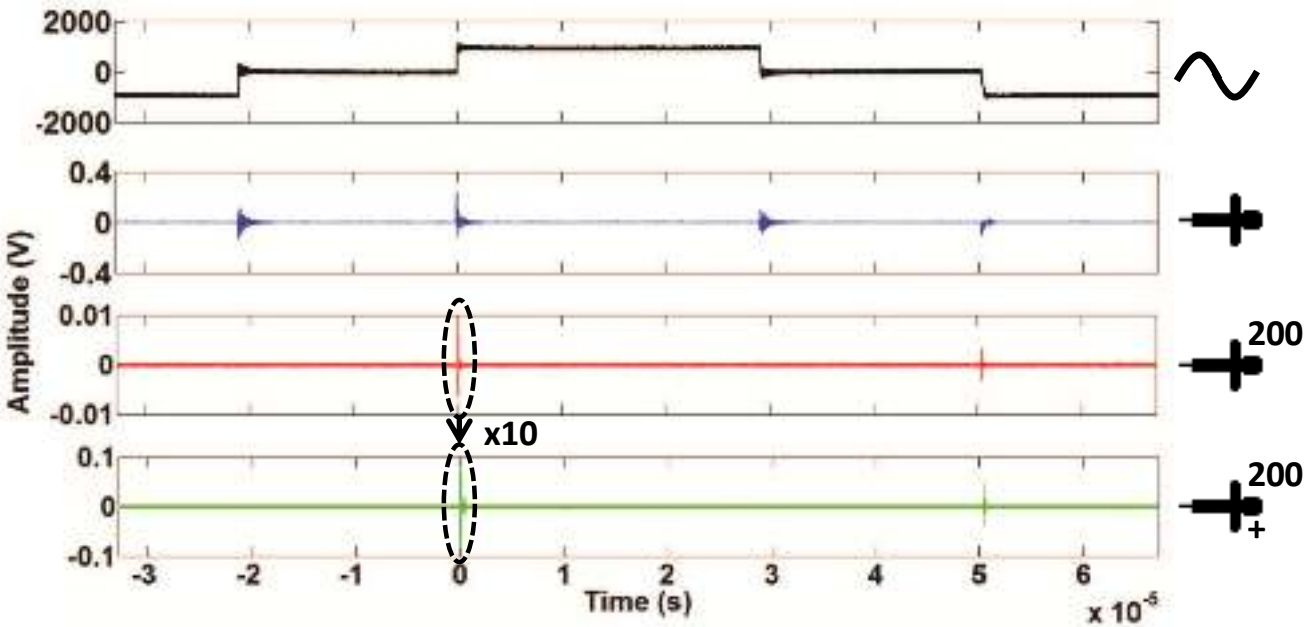
The sensor detects the high frequency currents induced by partial discharges

Sensor Principle

Assumption :

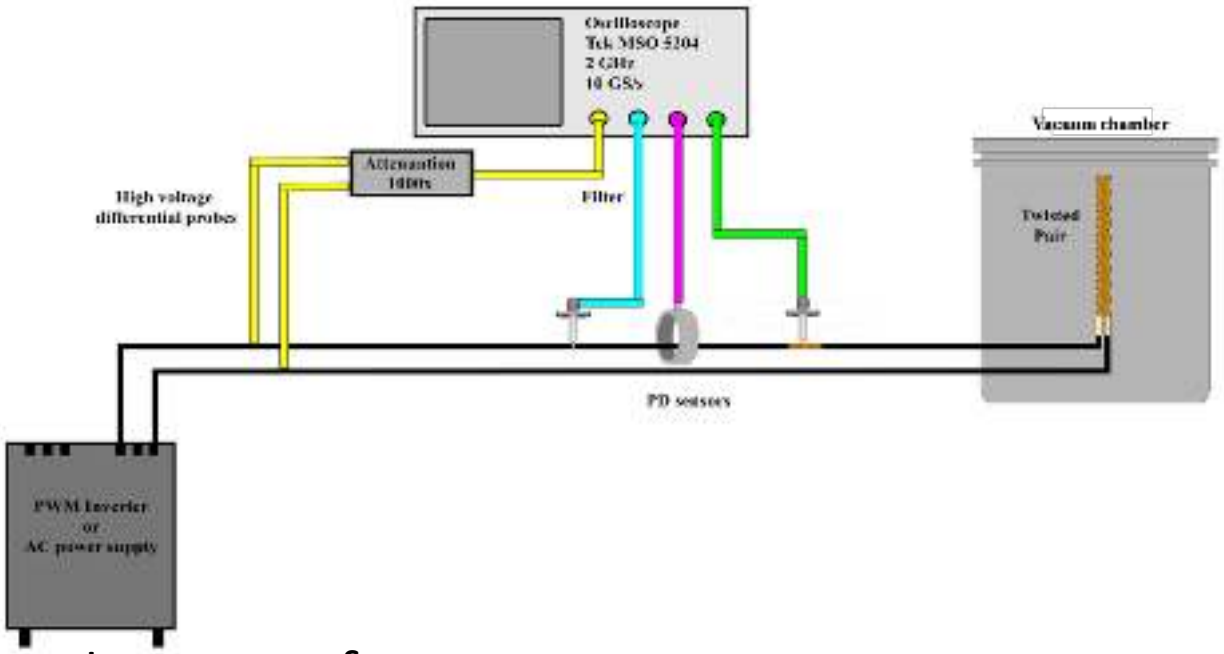
The sensitivity of the sensor can be increased simply by an increase of the coupling capacitance value

Example of acquisition:



The magnitude of sensor signal with additional capacitive effect is 10 times greater

Influence of Pressure



Acquisition system

Oscilloscope : Tektronix MSO5204

- Bandwidth : 2 GHz
- Sampling frequency :10 GS/s

Sensors

- Inductive coupling (Rogowski coil)
- Capacitive coupling (Jack-SMA sensor)

Signal processing

- Numerical or analog high-pass filters

Influence of Pressure

Objectives:

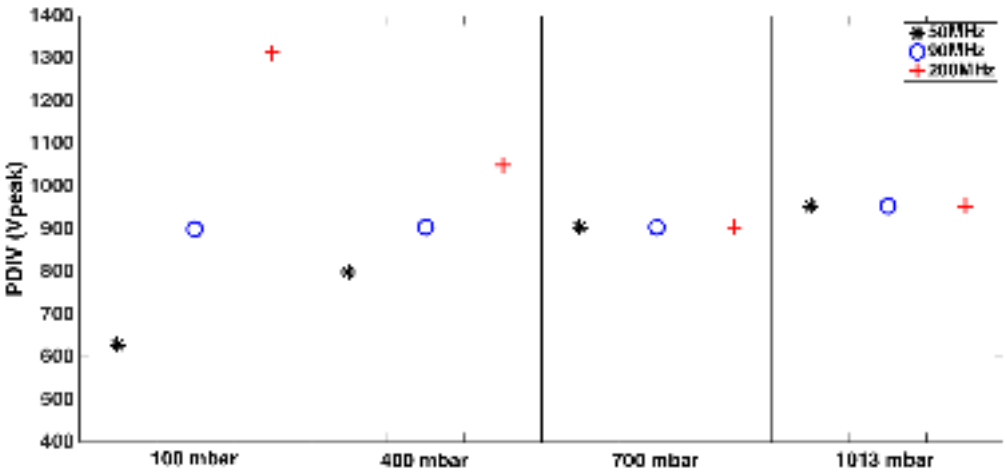
Study the impact of filters at different pressure values

Hypothesis:

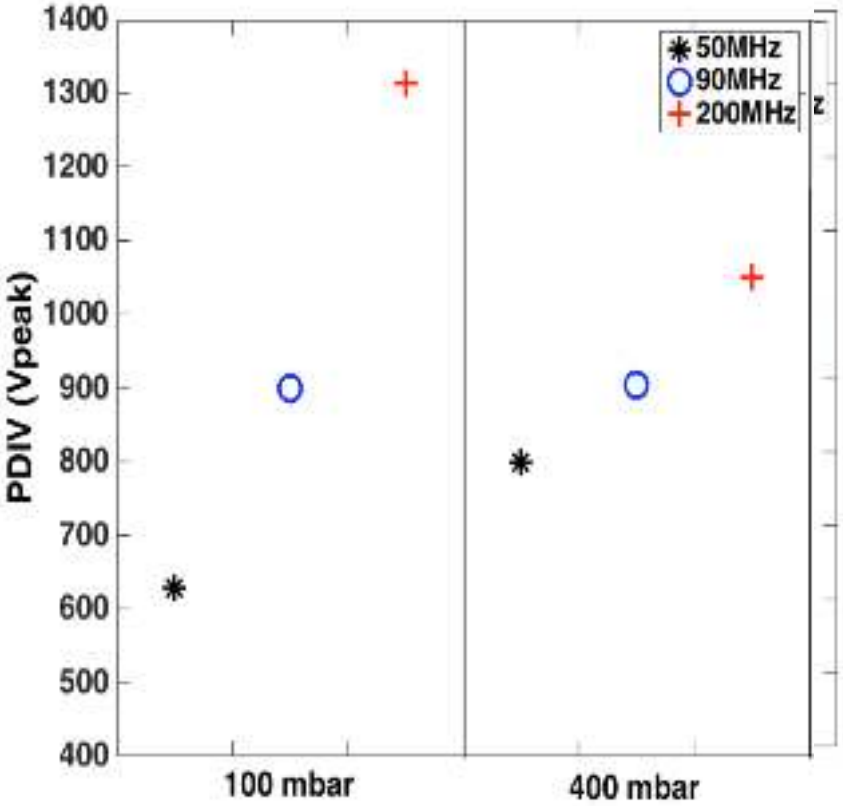
- Change in the nature of the discharge with a decrease of the pressure
- Discharge frequency content modified with a decrease of the pressure

Influence of filtering :

- At 1013 mbar, no influence of cut-off frequency on PDIV
- At 100 mbar, the cut-off frequency induces an error up to 700 V on the measured PDIV

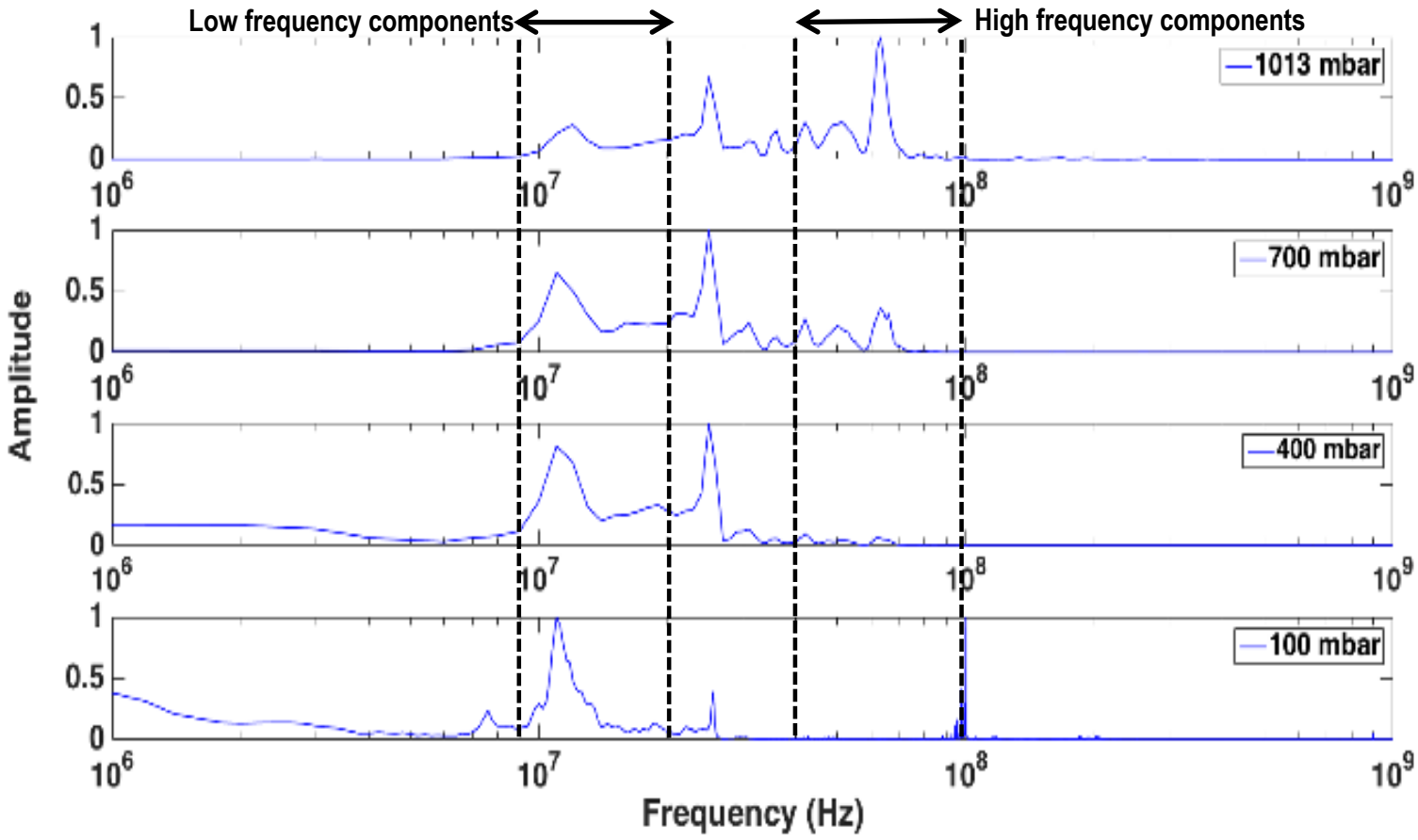


Influence of Pressure



When searching for PD, filtering combined to a decrease of pressure can induce a significant error

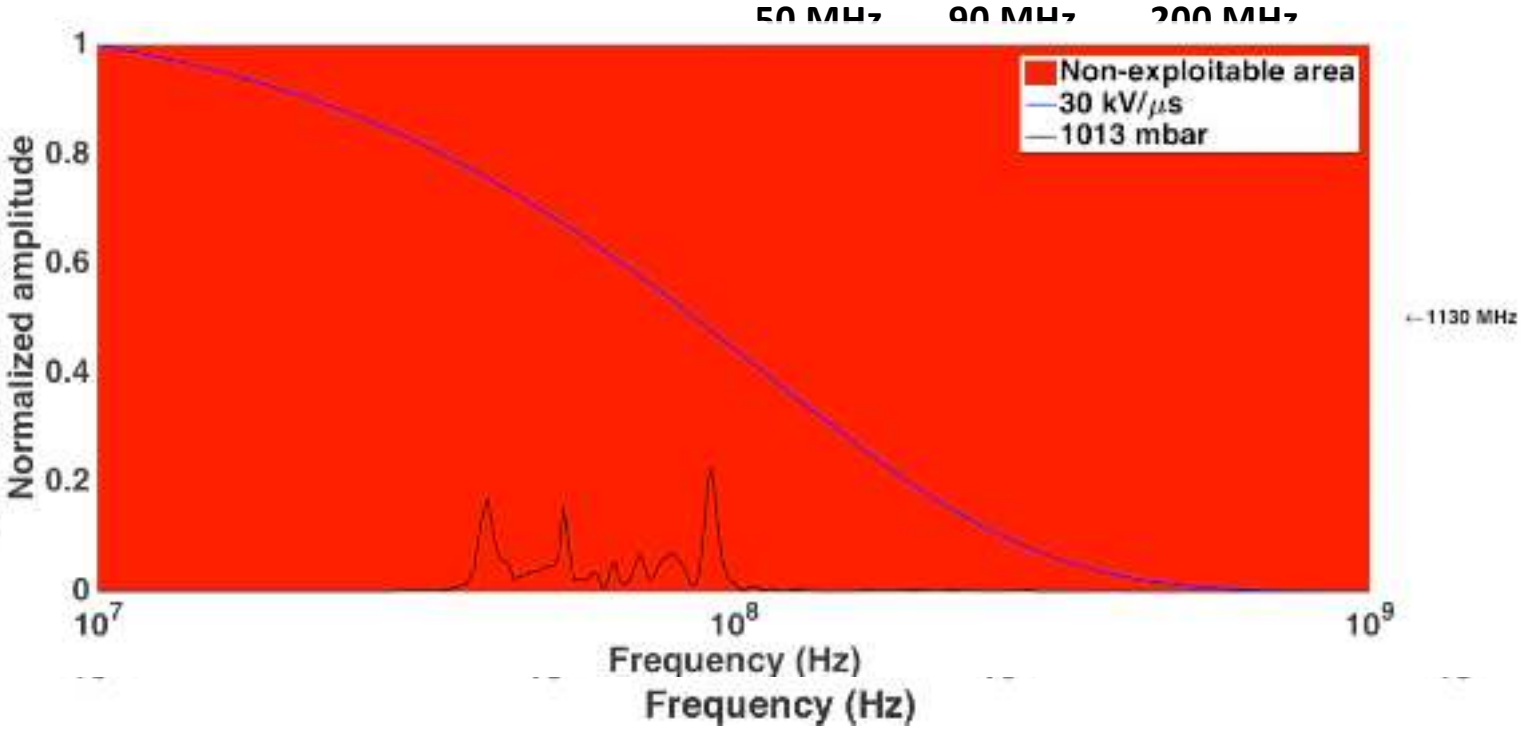
Influence of Pressure



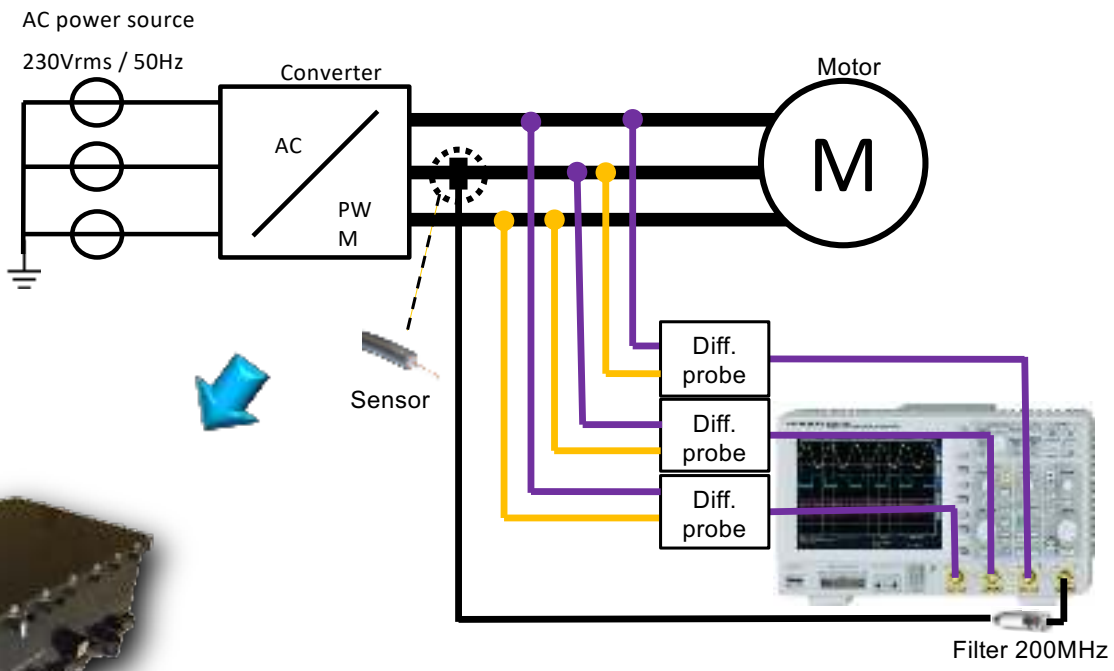
Influence of Pressure

Theoretical influence of pressure on detection under AC:

Hypothesis: No influence of voltage shape on PD spectrum



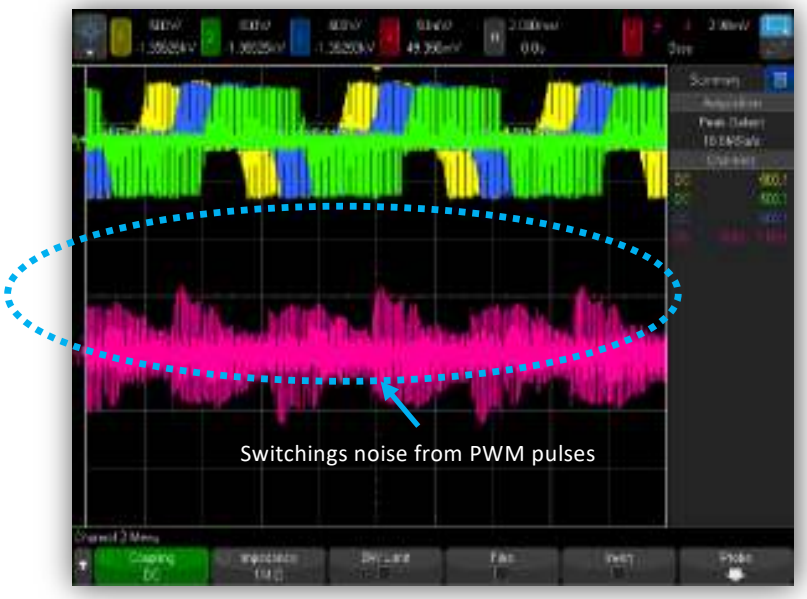
Test of the Power Chain

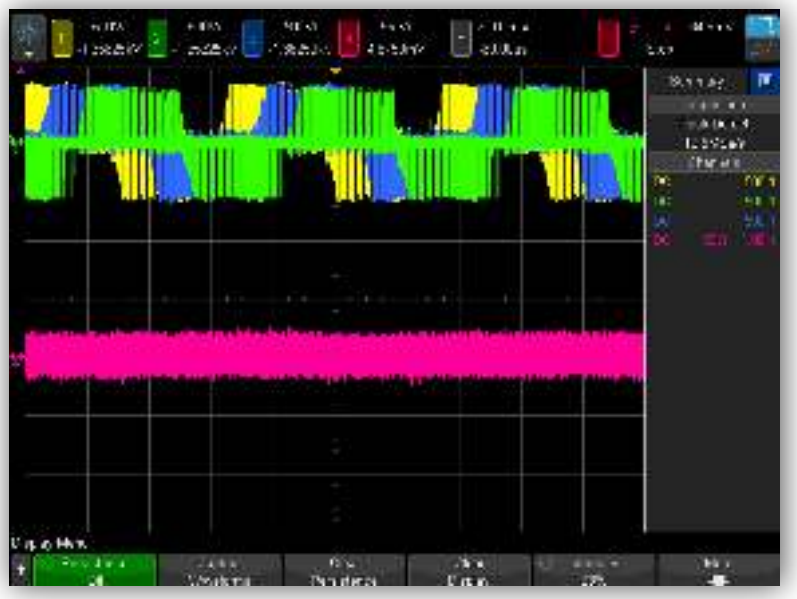


Test of the power chain

Filtering influence

Measurements @ 1000mbar





Without filter

With filter

Filtering influence

Without Filtering

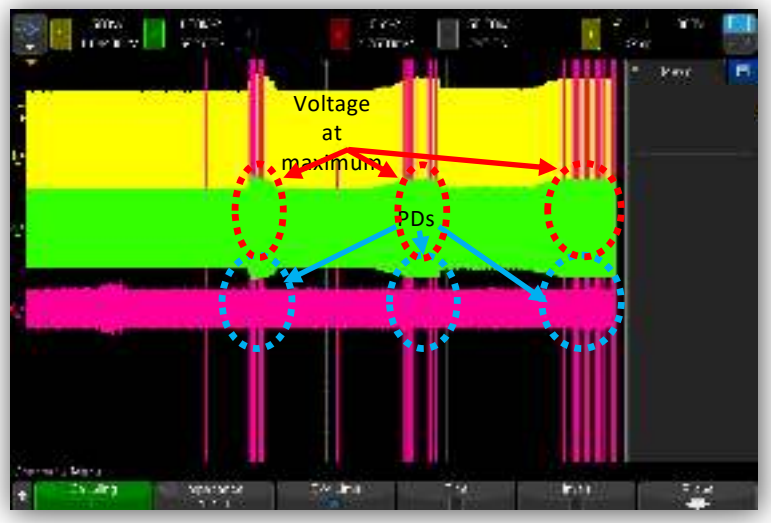
Filtering influence

With Filtering

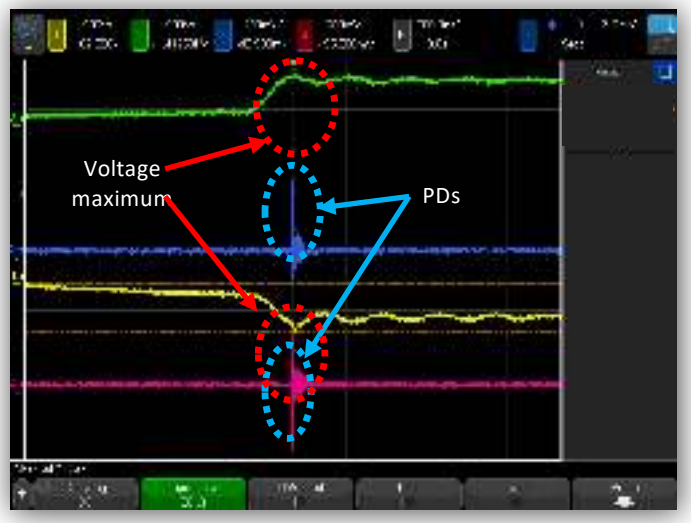
Test of the power chain

Measurements @ 1000mbar

500s



2us



Green curve: Phase A to Phase B voltage
Yellow curve: Phase B to Phase C voltage
Pink curve: Sensor + filter 200MHz

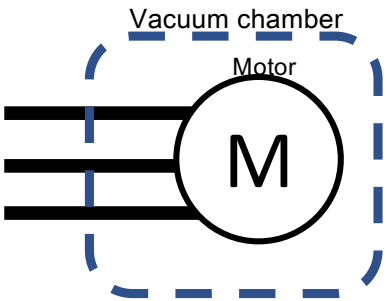
PDIV > 730Vpk

Voltage dependent

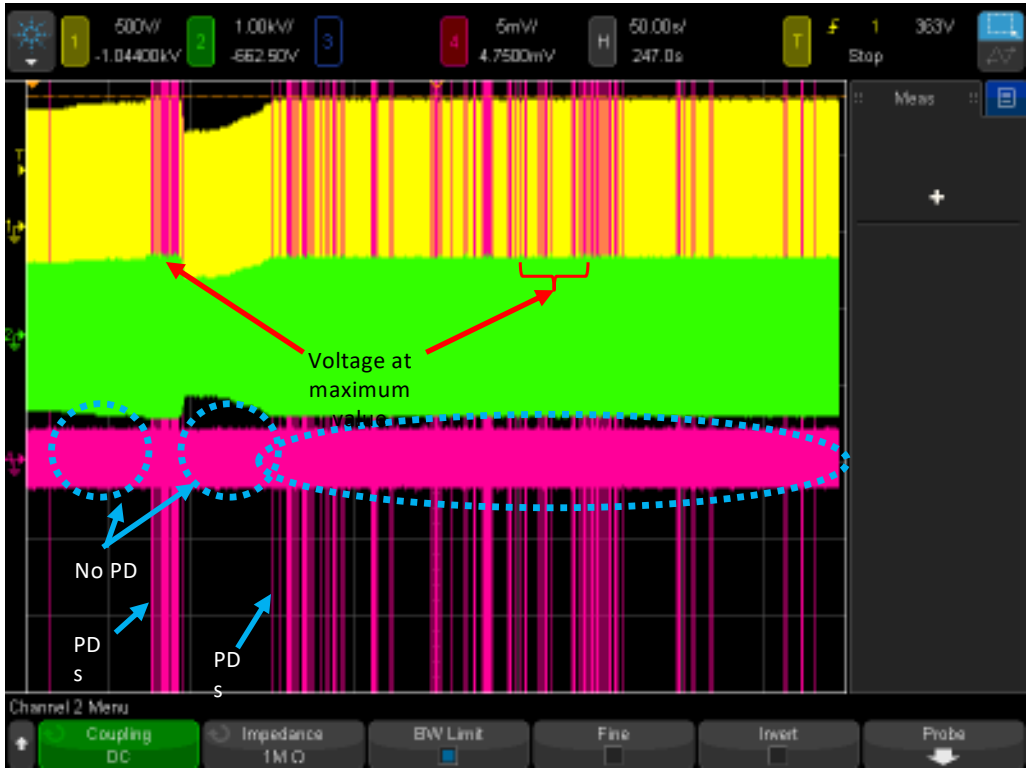
Test of the power chain

Measurements @ 115mbar

Motor at low pressure



PDIV > 730Vpk



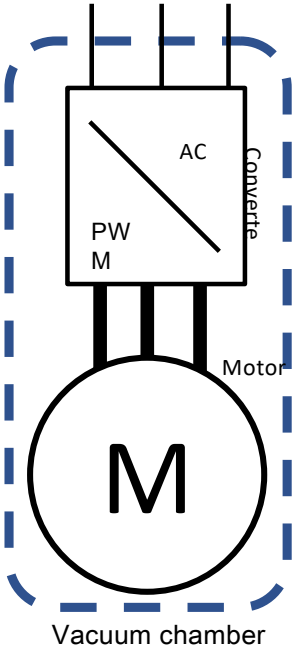
Voltage dependent

Green curve: Phase A to Phase B voltage
Yellow curve: Phase B to Phase C voltage
Pink curve: Sensor + filter 200MHz

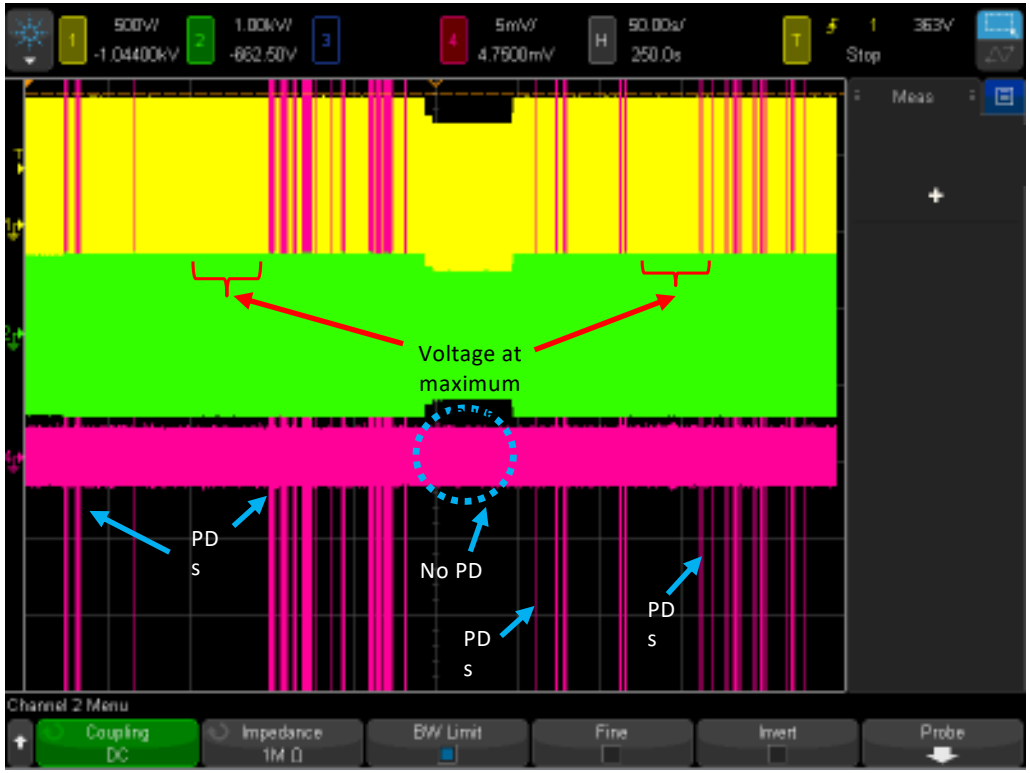
Test of the power chain

Measurements @ 115mbar

Converter + motor at low pressure



PDIV > 730Vpk



Voltage dependent

Green curve: Phase A to Phase B voltage
Yellow curve: Phase B to Phase C voltage
Pink curve: Sensor + filter 200MHz

Test of the power chain

Partial Discharges detected !!

Test of the power chain

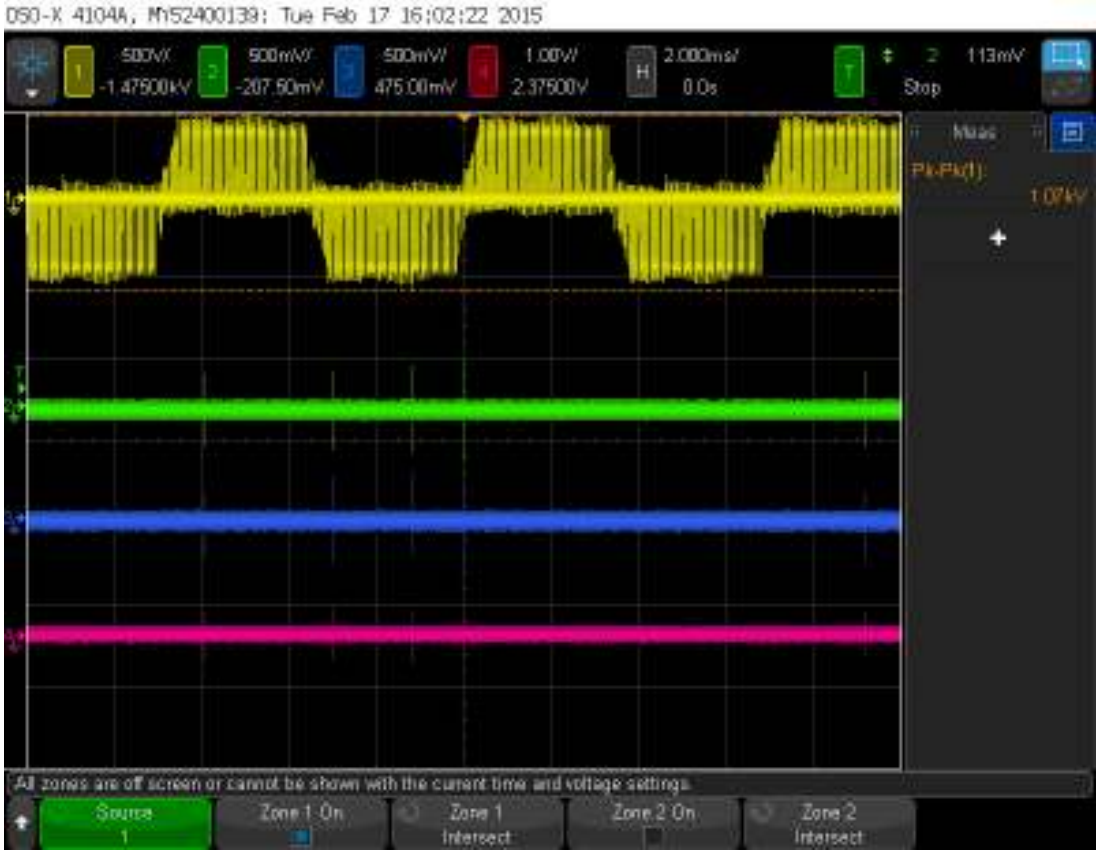
Partial Discharges detected !!

Test of the power chain

Partial Discharges detected : Role of the polarity

Test of the power chain

Partial Discharges detected : Role of the polarity



Test of the power chain

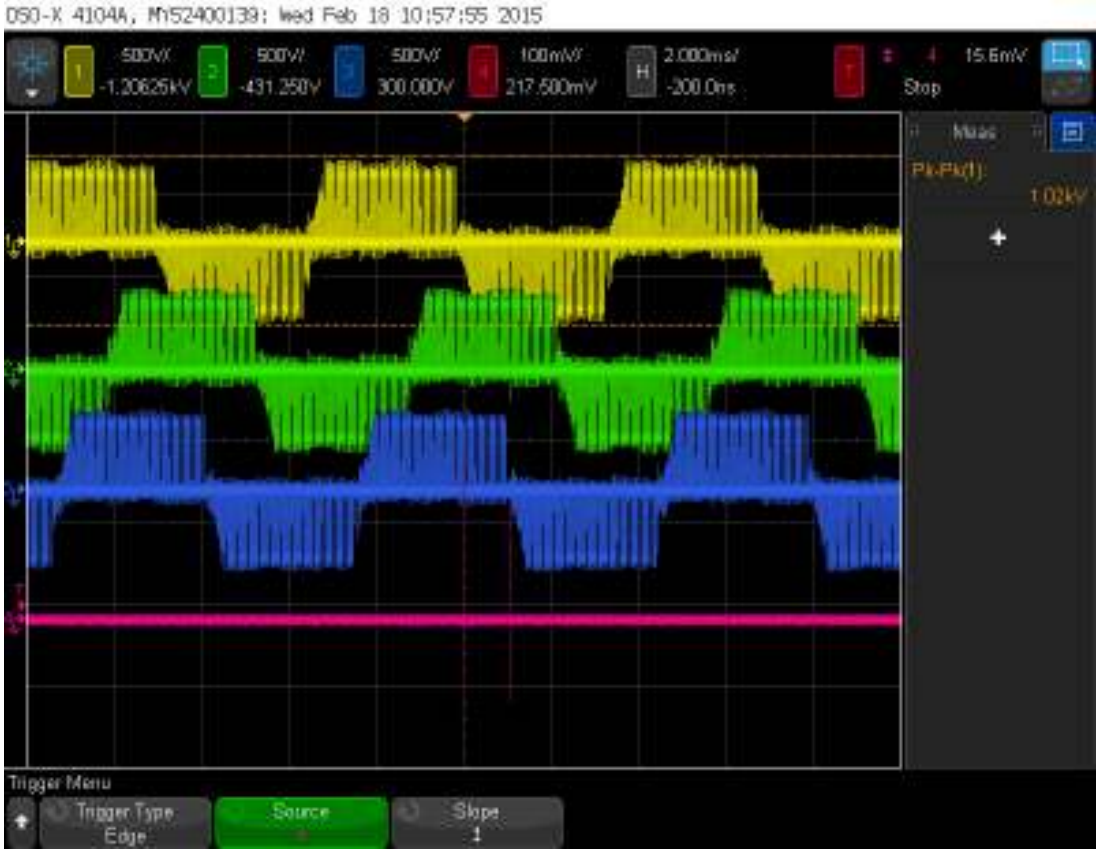
Partial Discharges detected : Phase location

Test of the power chain

Partial Discharges detected : Phase location

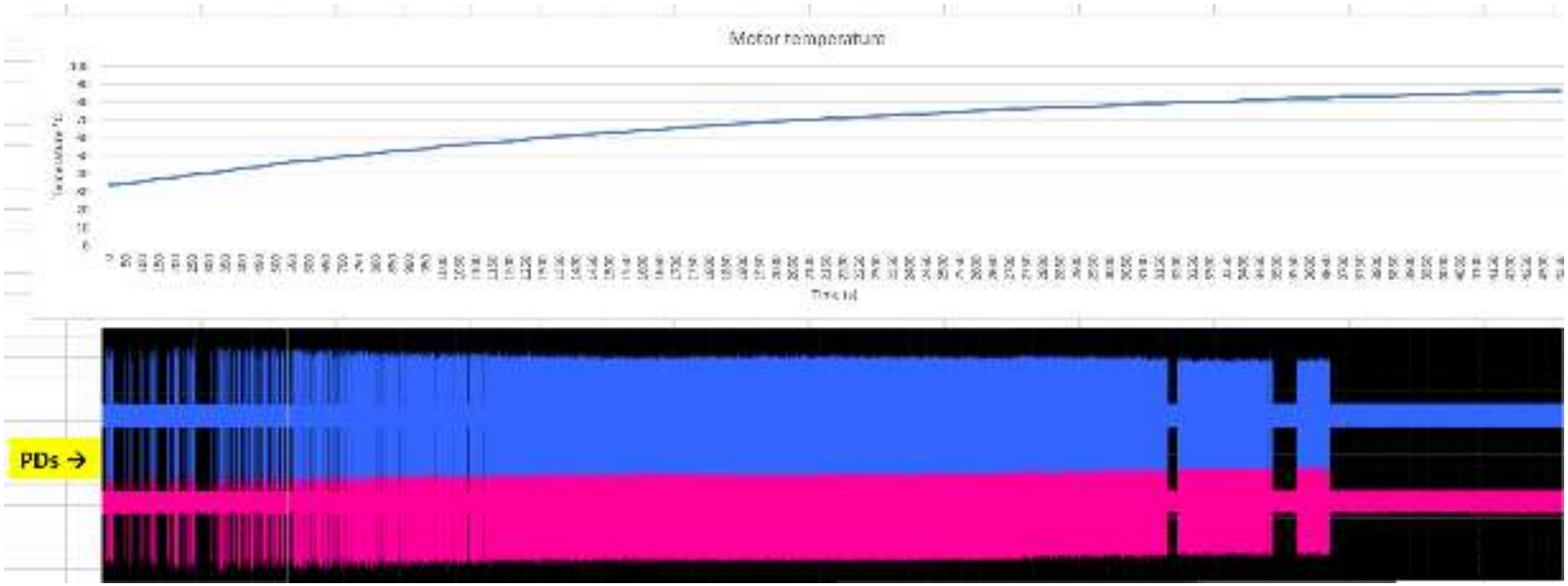
Test of the power chain

Partial Discharges detected : Phase location



Test of the power chain

Partial Discharges detected : Changes vs time



Test of the power chain

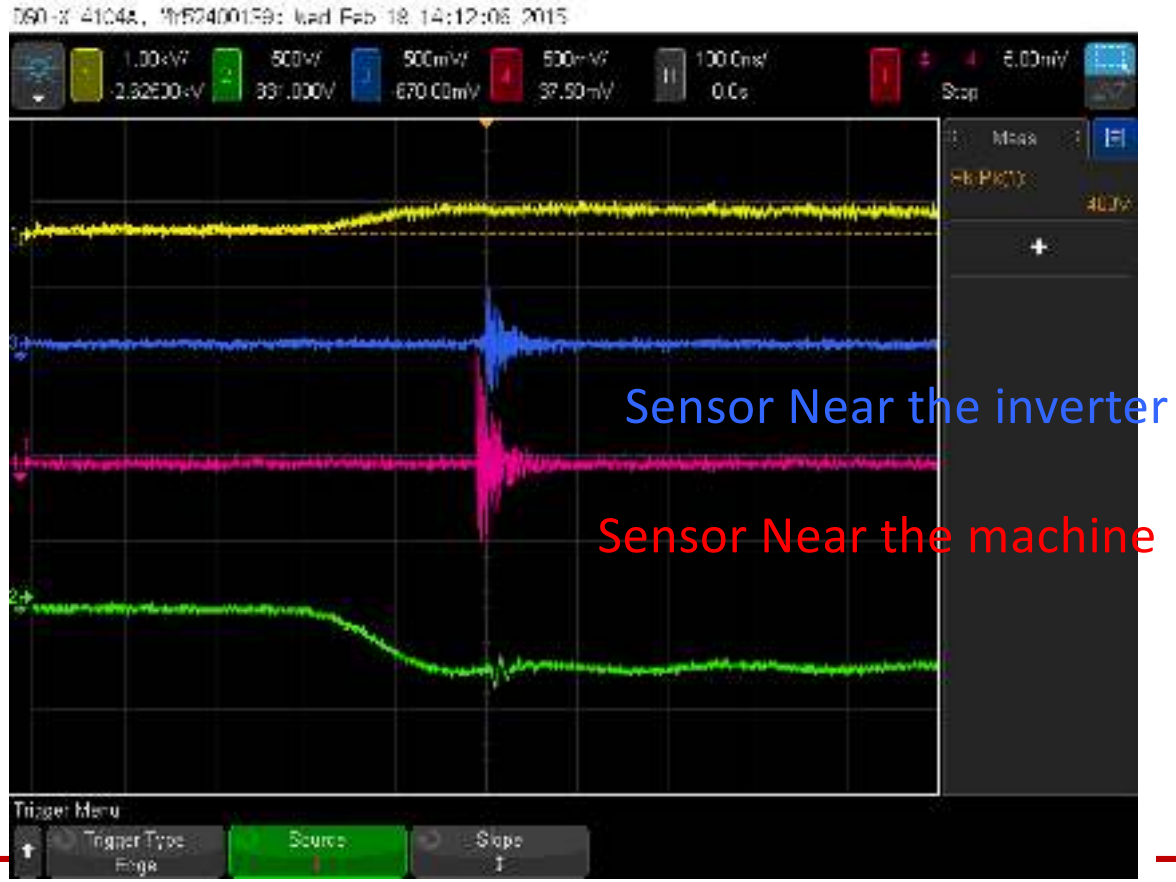
Partial Discharges detected : Identification of the equipment

Sensor Near the inverter

Sensor Near the machine

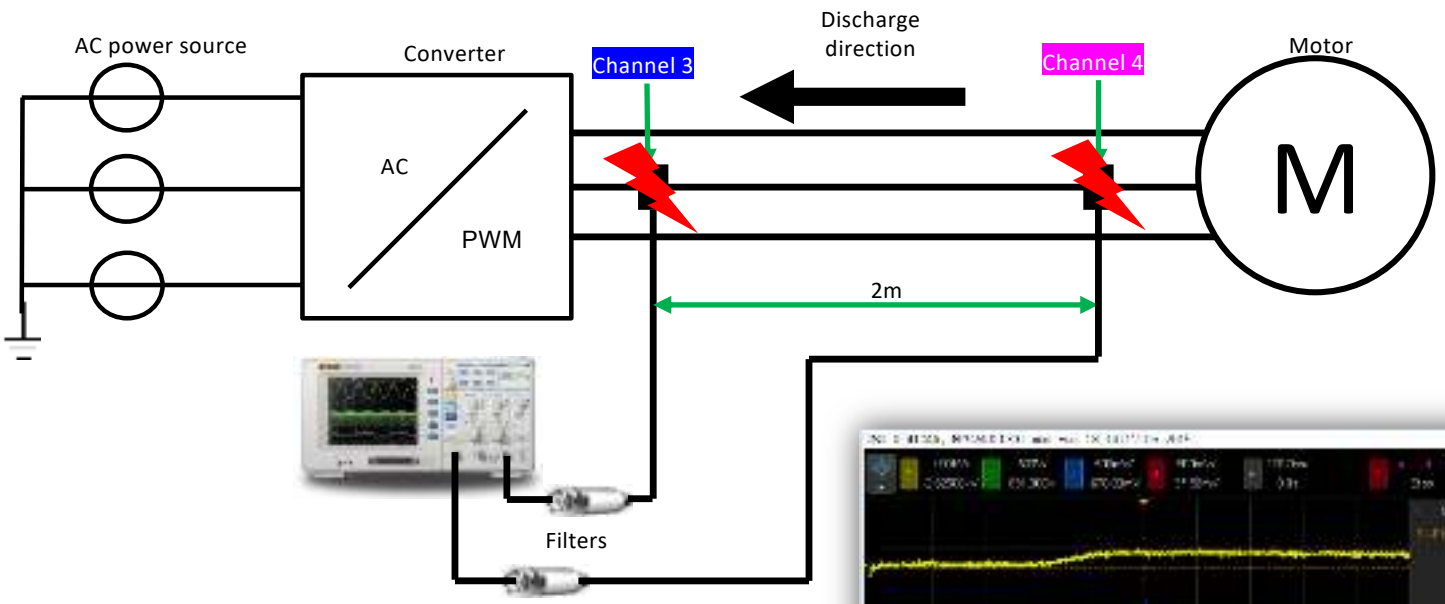
Test of the power chain

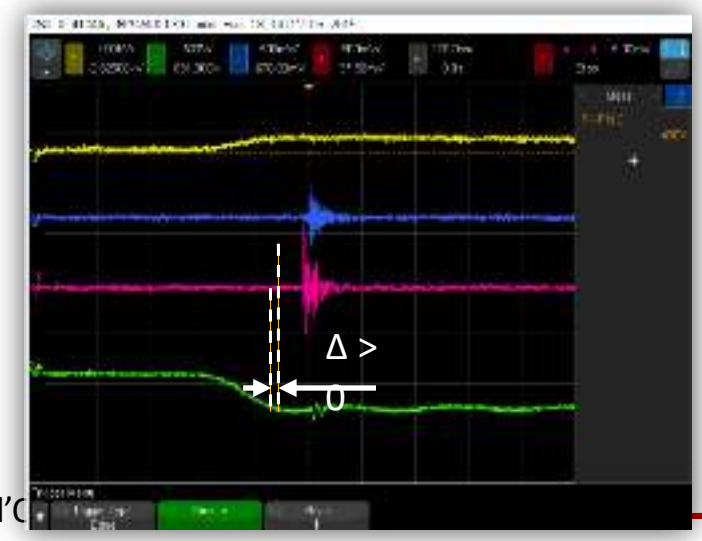
Partial Discharges detected : Identification of the equipment



Test of the power chain

PD localization





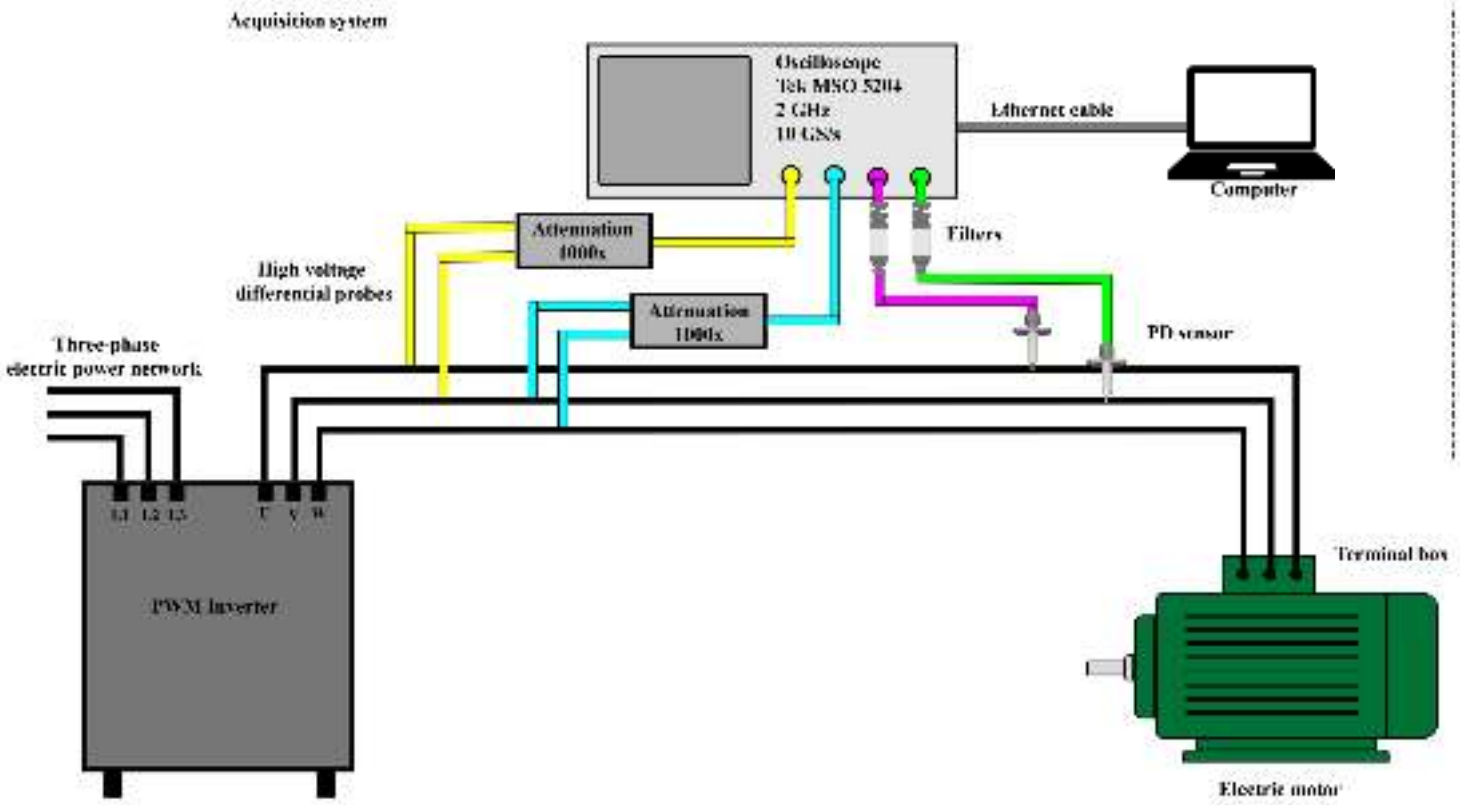
Discharges occurring in the motor

$\Delta > 0$

With $\Delta = t_{CH4} - t_{CH3}$

Experimental set-up

Generic set-up used for measurement



Application to a real case

Abnormal voltage surges

Influence of rotation speed:

Variables:

- AC voltage (one phase) (180 to 260 V)
- Motor rotation speed

Test conditions :

- DC bus voltage of 540 V
- Short cable between actuator and inverter

Observations:

Two surges can be observed:

- no. 1 during the polarity change
- no. 2 corresponding with a change of polarity on one of the other phases

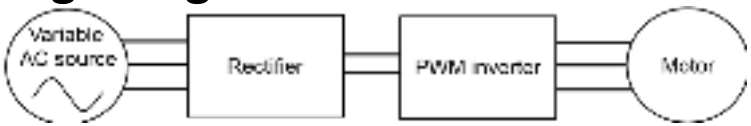
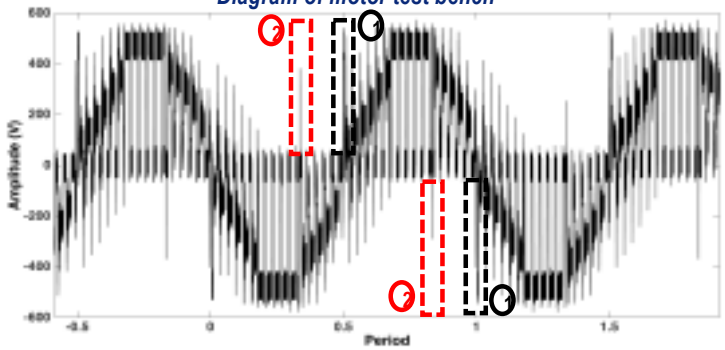
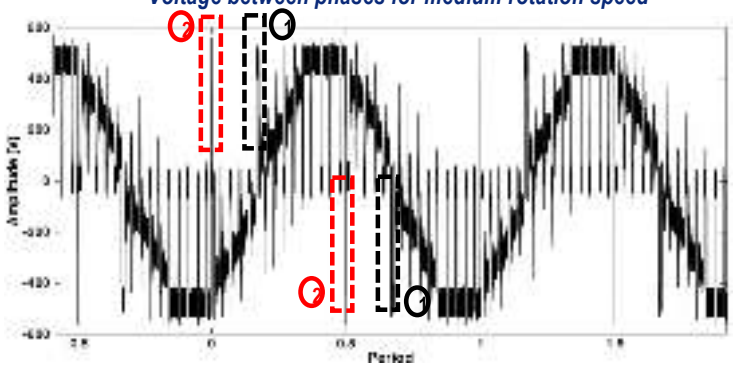


Diagram of motor test bench



Voltage between phases for medium rotation speed



Voltage between phases for fastest rotation speed

The amplitude of surge no. 2 depends of rotation speed (peak to peak voltage ranges between 930 and 1360 V)

Application to a real case

Abnormal voltage surges

Partial discharge detection ?

Test conditions :

- AC voltage of 260 V
- DC bus voltage of 540 V
- Short cable between actuator and inverter
- Filter cutoff frequency of 200 MHz

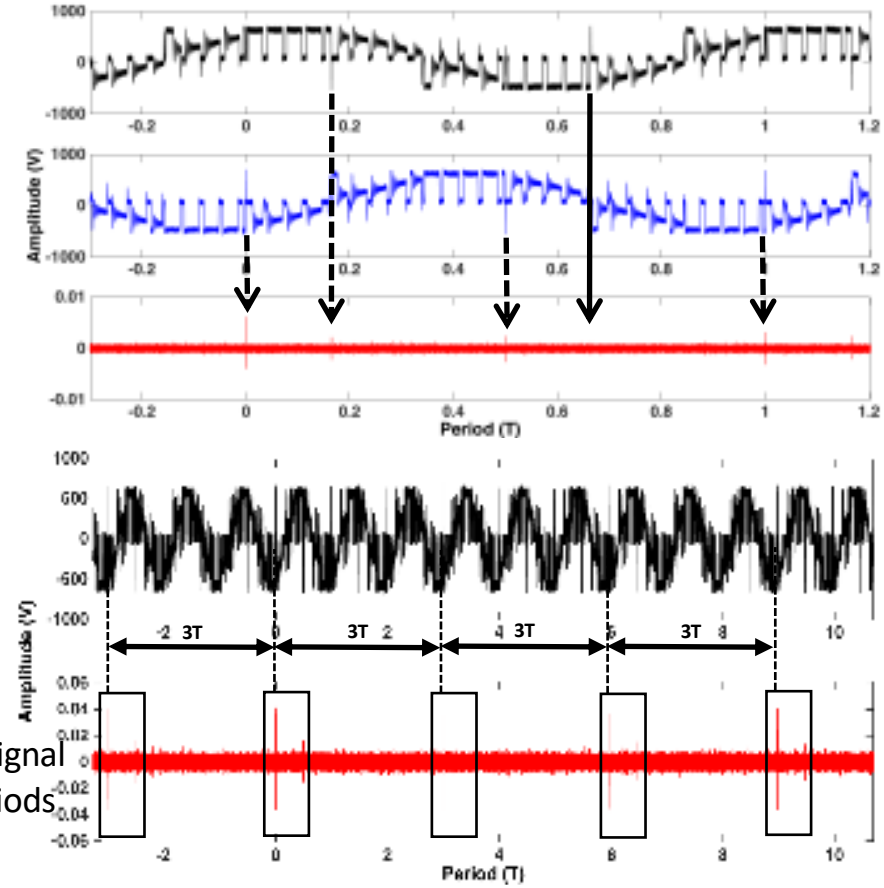
Observations:

Signals looking like PDs:

- Signals correspond temporally with surges
- Amplitude varies

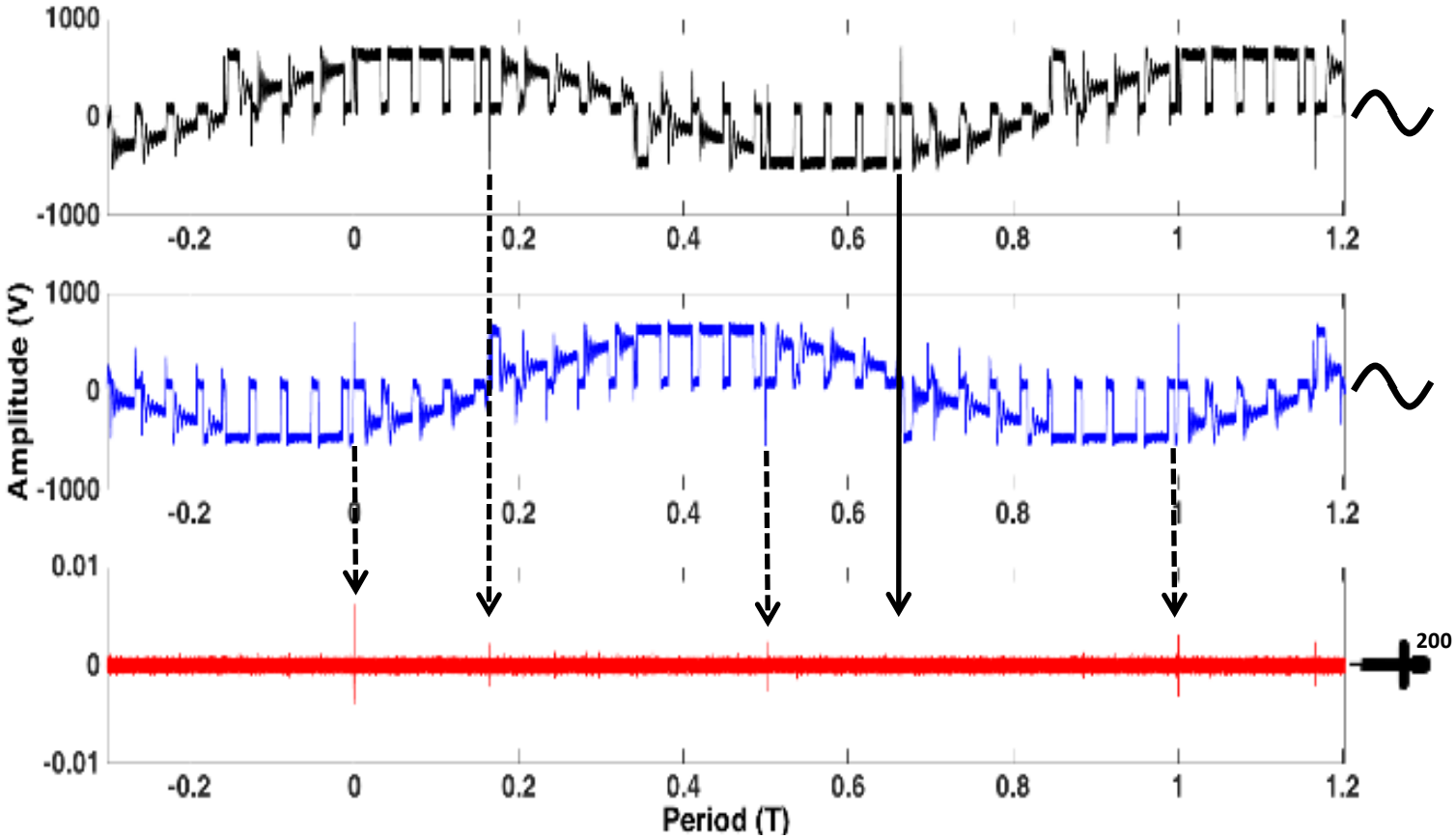
Features not corresponding to PDs

- One overvoltage with no associated signal
- Behavior which recurs in all three periods



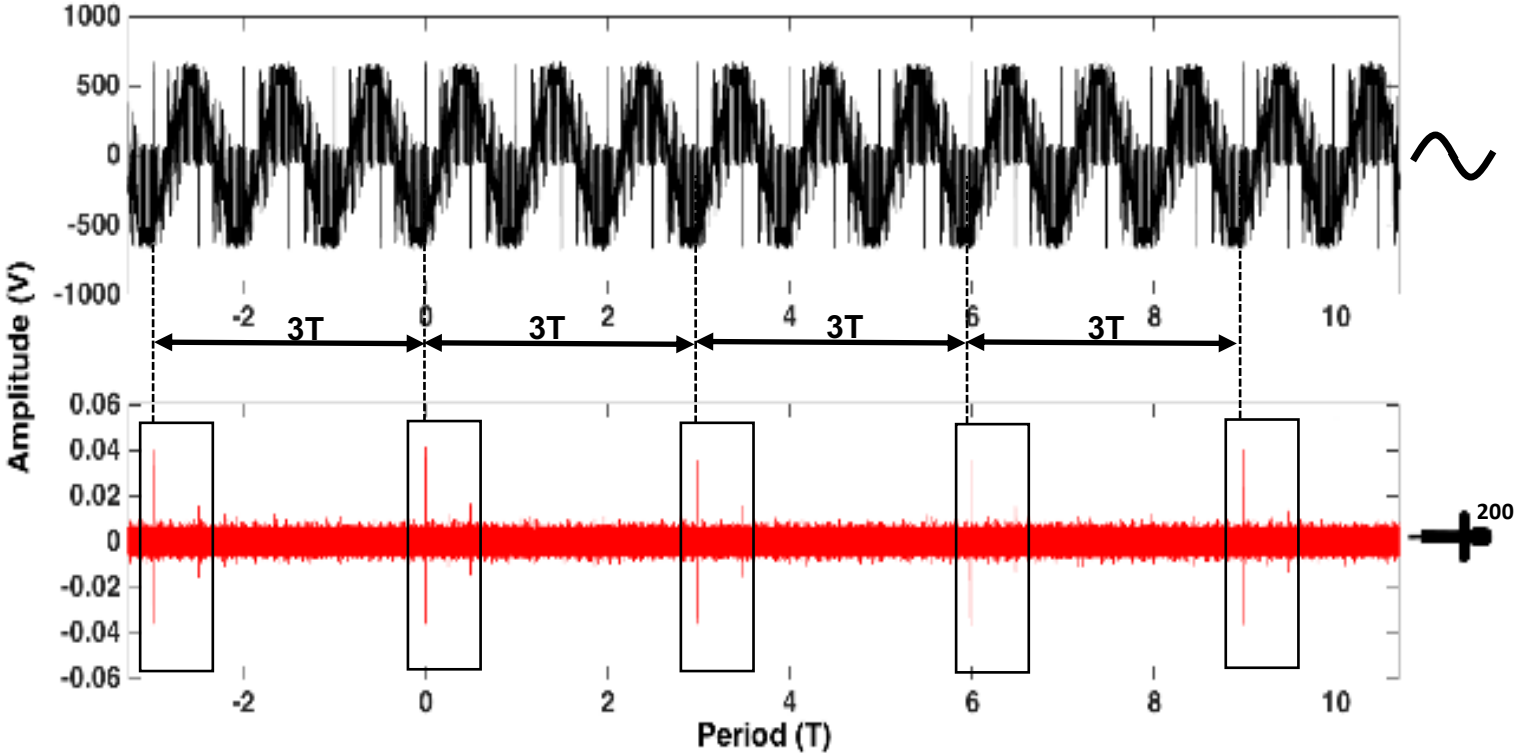
Application to a real case

Abnormal voltage surges



Application to a real case

Abnormal voltage surges



Application to a real case

Motors fed by SiC Inverters

Objective:

Validate the detection method with possible future voltage levels (>1 kV) and power components (SiC)

Test conditions :

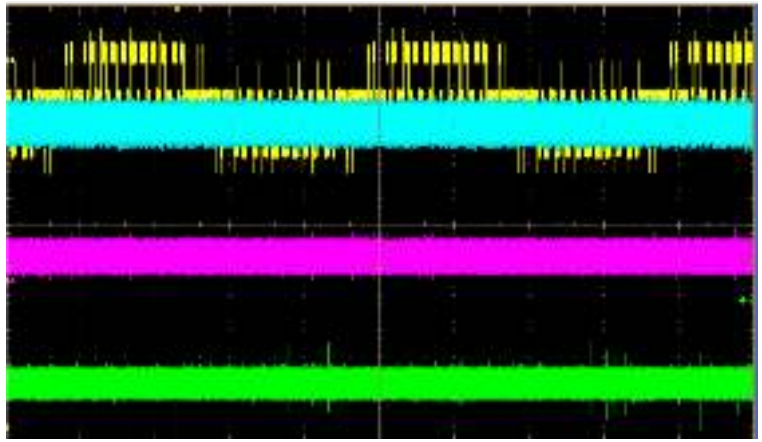
- SiC converter supplied by a DC bus at 750 V
- Cable lengths of ten meters

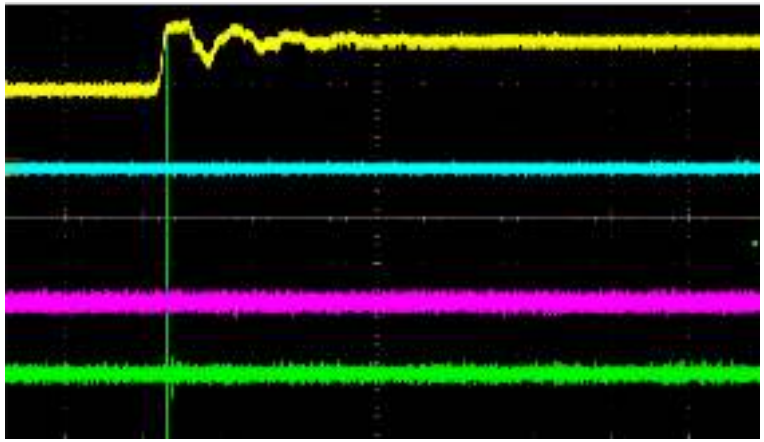
Observations :

- Overvoltages amplitude is about 1100 V
- dV / dt have a value of 10 kV/µs.
- Filters cut-off frequency of 500 MHz necessary
- PDs frequency spectrum spreads higher than under IGBT inverter

Features of partial discharges:

- Low recurrence
- PD signal temporally coinciding with peak voltages





Application to a real case

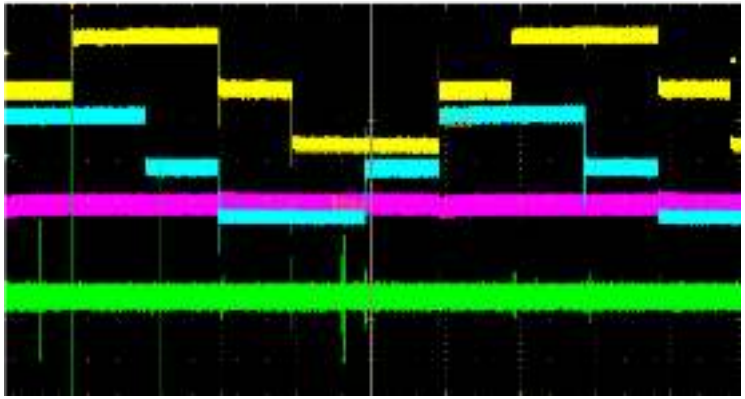
Motors fed by SiC Inverters

Objective:

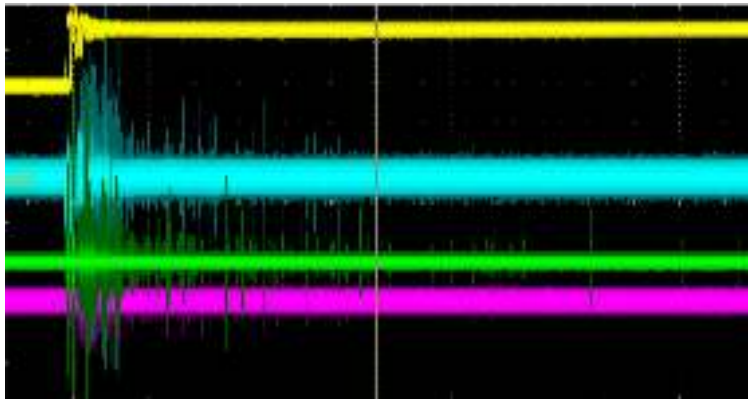
Observation of the temporal position of PDs

Observations :

- PDs during voltage edge
  (behavior of low voltage motors)
- PDs during plateau part
  (behavior oh high voltage motors)



The detection method also works for detecting discharges in motors supplied by SiC inverters and high voltages



Conclusions

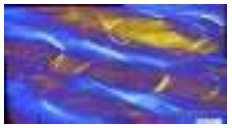
- Fiabilité des systèmes électriques = Elément essentiel dans l'électrification en aéronautique
  - D'autant plus critique avec l'augmentation des puissances en jeu dans les réseaux de bord
  - l'isolation des systèmes est un point critique pour la fiabilité
- Design des réseaux avec démarche contradictoire entre densité de puissance: chasse au kW/kg, dimensionnement thermique et contraintes/risques sur les matériaux d'isolation
- Question ouverte sur le maintien / anticipation de la fiabilité au cours du temps: monitoring?
- Les connaissances et pratiques dans d'autres domaines ne sont pas directement transposables:
  - Contraintes sévères
  - Spécifications très exigeantes sur les matériaux
  - Besoin de nouvelles normes / tests compatibles avec les montées en puissance
  - Besoin de former des Experts avec ces connaissances spécifiques ➔ JCGE!

Phénomènes diélectriques dans l'aéronautique

Problématique Câbles

G. Teyssèdre, Th. Lebey

LAPLACE, Université de Toulouse; CNRS, UPS, INPT; Toulouse, France



Synopsis

1-Evolution des réseaux de bord

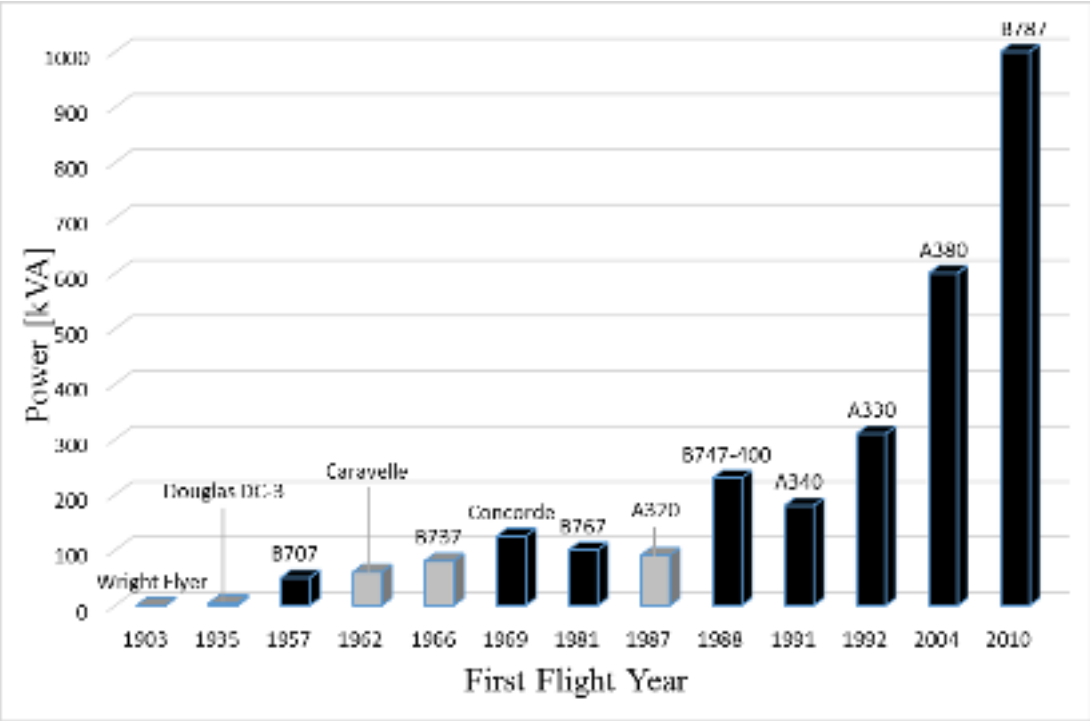
2- Contraintes aéronautiques sur câbles et harnais

3- Matériaux et structure de câbles

4- Problématiques associées à la montée en tension

Evolution des Réseaux de bord

Puissance Embarquée



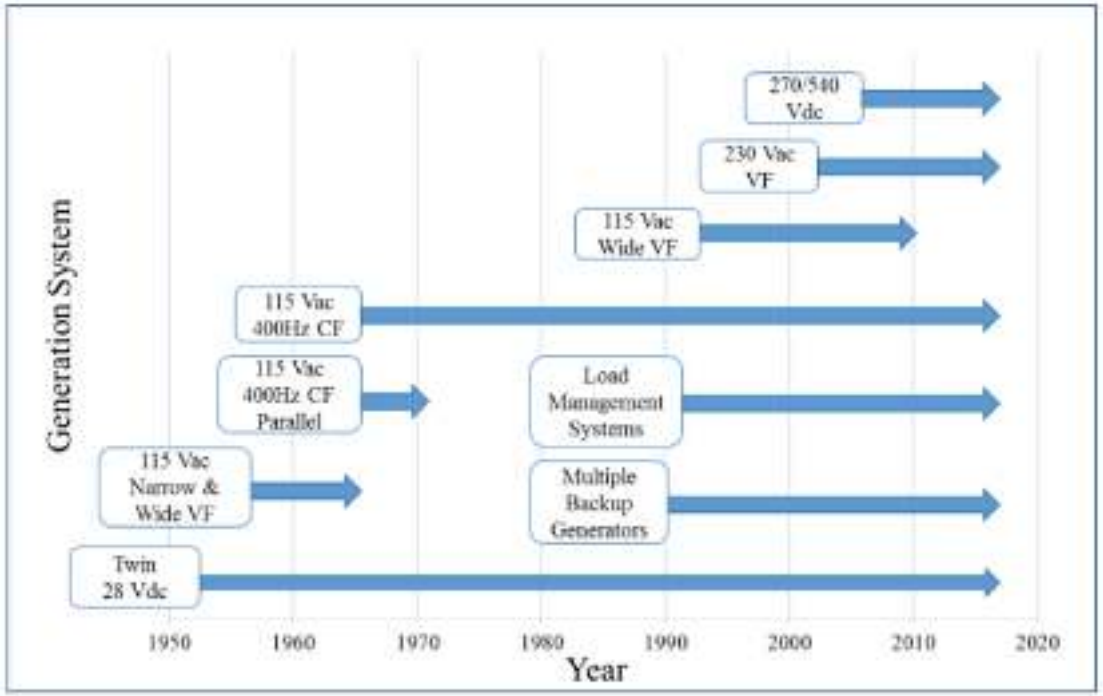
Augmentation conséquente de la puissance générée au cours des 15 dernières années

- **Taille des avions**
- **De plus en plus d'équipements électriques**
- **A380:…Actionneurs, circuits hydrauliques**
- **B787:…Bleed-less (air, dégivrage)**

V. Madonna et al, IEEE Trans. Transportation Electrification 4, 646, 2018

Evolution des Réseaux de bord

Systèmes de génération



CF: Constant Frequency; VF: Variable Frequency

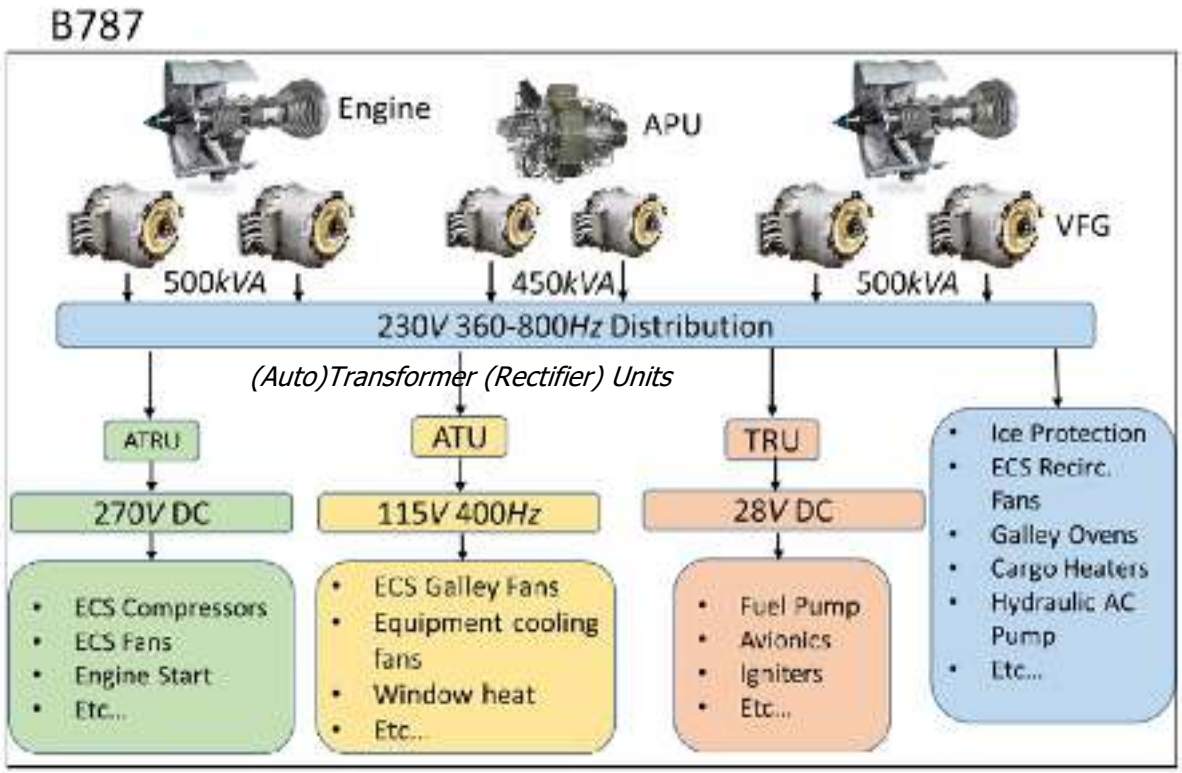
Augmentation conséquente de la puissance nécessaire au cours des 15 dernières années

- **Initialement DC;**
- **Passage au AC: densité de puissance et tensions plus élevées**
- **AC un peu plus compliqué à gérer avec des sources en // (fréquences différentes)**
- **Fréquence 400Hz depuis les années 40 – optimum de densité, matériaux magnétiques**
- **Systèmes à fréquence variable: …800Hz**
- **HVDC (e.g. 270V) chez les militaires**

V. Madonna et al, IEEE Trans. Transportation Electrification 4, 646, 2018

Evolution des Réseaux de bord

Génération et Distribution



Le réseau se diversifie

- **Coexistence de charges DC et AC;**
- **4 génératrices + APU**

A380: 470 km et 5700 kg de câbles

V. Madonna et al, IEEE Trans. Transportation Electrification 4, 646, 2018

Synopsis

1-Evolution des réseaux de bord

2- Contraintes aéronautiques sur câbles et harnais

3- Matériaux et structure de câbles

4- Problématiques associées à la montée en tension

Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

Evolution des contraintes fonctionnelles

Contraintes électriques fonctionnelles

- **HVDC: +/-270.. ➡ +/-540V… au-delà? 3kV?**
- **HVAC: 230V ➡ plusieurs kV ?**
- **Fréquences: au-delà du 1kHz…**
- **Fronts raides issues de l'EP, contraintes non-sinusoidales**
- **Forts courants (plusieurs 100A) ➔ problématiques de connectique**
- **Chocs foudre et tests**

Contraintes thermiques

- **Dimensionnement des conducteurs en courant**

Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

Contraintes environnementales

Zones Hors Cabine

Températures 'ambiantes' au sol de -50 à +50°C

Températures extérieures -50°C en vol

➔ Cyclages thermiques fréquents

→ Contraintes thermomécaniques:

-Vibrations

-Frottement

Milieu dépressurisé

Zones Moteur

Conditions particulièrement sévères

Températures moteur.. 250°C

+ Pollution…

Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

Exigences - dimensionnement

Electrique (isolant)	**Résistance d'isolement (surface, volume)** **Absence de DP (interne, externe)** **Champ électrique interne**
Thermique (conducteur)	**Echauffement – ΔTmax (limite pour l'isolant ou le conducteur)** **Chute de potentiel**
Sécurité	**Résistance au cheminement d'arc – d'autant plus critique que la puissance augmente** **Propriétés feu**
Vieillissement	**Dégradation thermique** **Hydrolyse, UV…**

Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

Quelques exemples de Normes

Spec Cables	Tamb °C	Conducteur	Structure	Tension	Tenue à l'arc	Usage
EN2267-010 (DR) EN4681-03 (AD)	-55/+250 -65/+180	Cu Al ou Al/Cu	Rubané comp.	115Vac (dépress.) 400Vac (pressurisé)	Oui (ADW26 à 14)	Courant
EN2267-012 (DZ) EN4681-05 (AZ)	-65/+260 -65/+180	Cu Al ou Al/cu	"	230Vac	Oui	HT
EN2854-003 (DG)	-55/+260	Cu nickelé	"	115Vac		Puissance
BMS1348	-65/+150	Cu/ Sn Ag ou Ni	Extrudé	600Vrms		Courant
BMS1360	../ 150 à 260 Selon Cond	Al ou Cu + revêtement	Rubané	600Vrms	Oui	Courant
BMS1378	../ 175 ../ 260	Al Cu	Extrudé Rubané	1500Vrms		HT ou Puissance

Pour tous: exigence de résistance aux fluides aéronautiques

Les isolants et conducteurs ont éventuellement leurs propres normes

Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

Critères liés aux matériaux ou à la structure de l'isolant

- ✓ La résistivité
- ✔ **La tenue en température**
- ✓ La permittivité
- ✓ La tenue à l'effet couronne
- ✔ **La résistance à l'arc tracking**
- ✓ La tenue aux fluides
- ✓ La tenue à l'humidité
- ✓ L'auto-extinguibilité
- ✓ La non-toxicité
- ✓ L'opacité des fumées

- ✔ **Le seuil d'apparition des décharges partielles**
- ✓ La tenue au vieillissement accéléré
- ✓ La tenue au rétreint ou à la délamination en extrémité
- ✓ La tenue à l'abrasion
- ✓ La tenue à l'entaille
- ✓ La dénudabilité
- ✓ L'endurance à la flexion
- ✓ La marquabilité

Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

Arc tracking – « cheminement d'arc »

Phénomène d'« arc tracking » : maintien et propagation d'un arc de court-circuit entre deux câbles, plus généralement entre deux parties conductrices

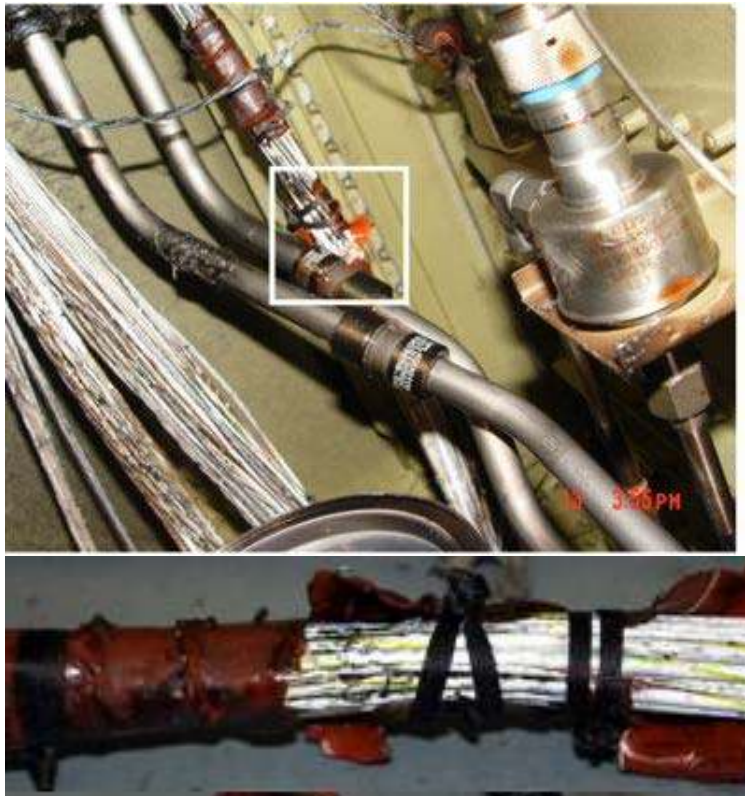
Causes: usure de l'isolant, agression du câble, défaut de positionnement, présence de liquide…

Formation d'un arc si déclenchement des systèmes de protection absent ou trop lent

Conséquences: ablation des câbles (isolation et conducteur), projections métalliques, dégradation des structures avoisinantes qui peuvent être des circuits hydrauliques, un autre câble, la structure de l'avion, incendies…

➔ Critique pour la sécurité

Facteurs aggravants: Forte puissance, HVDC, structures composites, Conducteur Cu ➔ Al



G. A. Slenski et al, 9th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference, 2006

Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

Arc tracking – « cheminement d'arc »

Test du câble dans son intégrité:

-Incision de câbles placés à proximité (bundle 7 câbles);

-Utilisation d'un électrolyte en goutte à goutte pour initier l'arc;

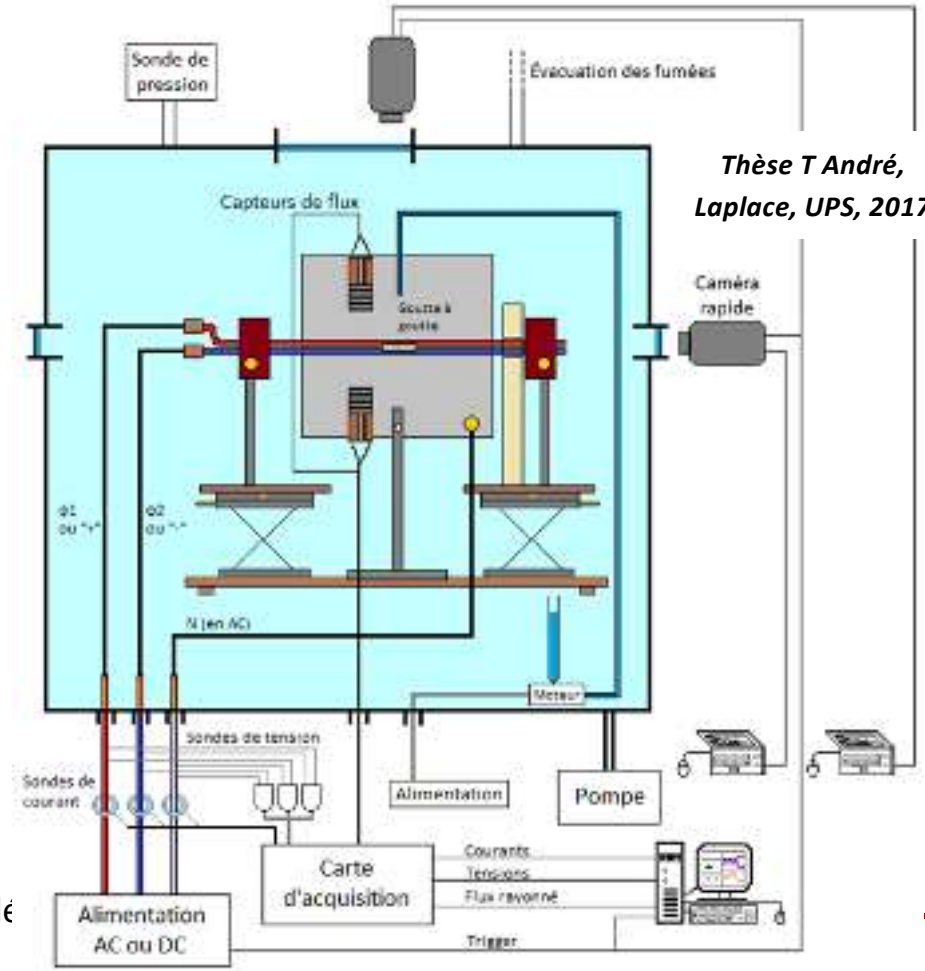
-Suivi du maintien et de la propagation de l'arc et de l'endommagement

La résistance de l'isolant est caractérisée dans ces tests

Le Polyimide apparait un point faible vis-à-vis de la résistance à l'arc (graphitisation). De nombreux incidents lui sont imputés

Proscrit comme matériau de surface

Utilisé en association avec des polymères fluorés qui résistent beaucoup mieux: PTFE, FEP…



Thèse T André, Laplace, UPS, 2017

Synopsis

1-Evolution des réseaux de bord

2- Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

3- Matériaux et structure de câbles

4- Problématiques associées à la montée en tension

Matériaux et structures de câbles

Diamètre des conducteurs: calqué sur la norme américaine AWG

Conducteurs monobrins

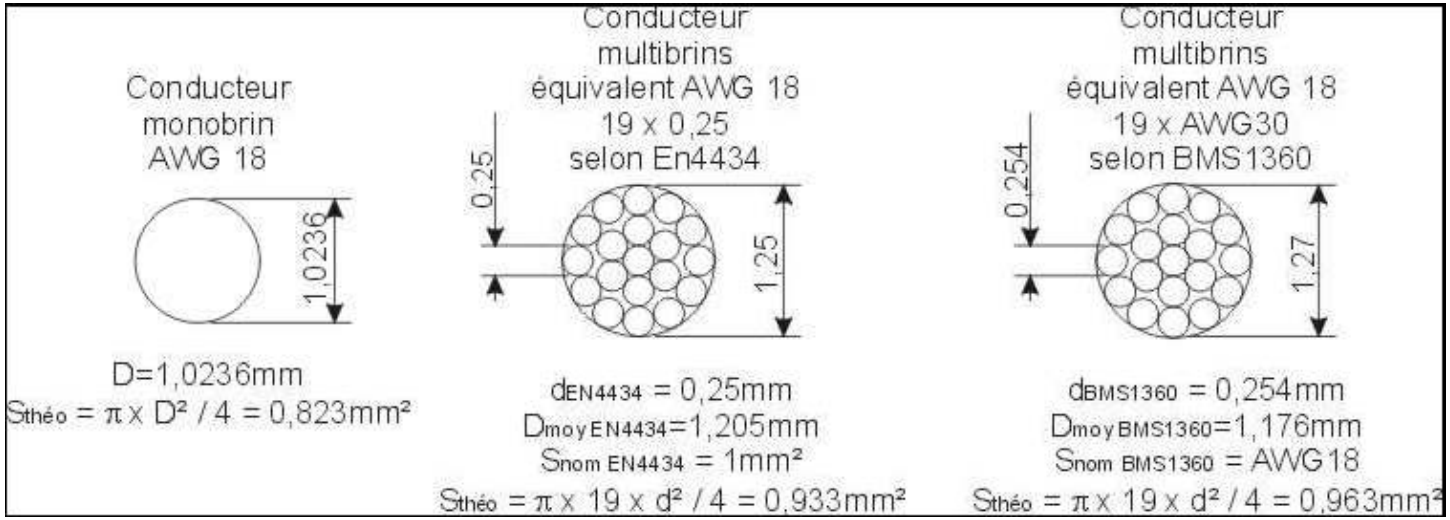
AWG	AWG36	…	AWG1	AWG0	AWG00…	AWG0000
D (inch)	0.005	*× 1.1229*	0.289	0.325		0.46
D (mm)	0.127		7.35	8.25		11.7
S (mm²)	$1.26\ 10^{-2}$	*× 1.26*	42	53		107.5

Conducteurs multibrins

Section 'Equivalence AWG'

=somme des sections de brins.

Valeur approximative: différence entre norme Européenne et US



Matériaux et structures de câbles

Agencement des conducteurs

Tous les câbles aéronautiques sont multibrins

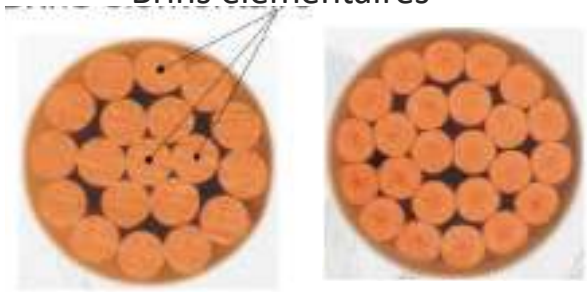
Agencement concentrique (1/6/12/18…) ou semi-concentrique

Torsadage de différente nature

Sélection de brins en fonction de la flexibilité recherchée

Optimisation de la distribution de conducteurs selon application (effet de peau, etc.)

Brins élémentaires



Coupe d'un toron concentrique **2 + 8 + 14 24 brins**

Equilay concentric

Unilay concentric

AWG équiv.	Section *mm²	Rigide	Semi-rigide	Flexible *	Très flexible
24	0,25	1 x AWG24	7 x 0,20	19x 0,12	133 x 0,05
22	0,40	1 x AWG22	7 x 0,25	19 x 0,15	41 x 0,10
20	0,60	1 x AWG20	7 x 0,32	19 x 0,20	42 x 0,13
18	1,00	1 x AWG18	7 x 0,36	19 x 0,25	26 x 0,20
16	1,20	1 x AWG16	7 x 0,45	19 x 0,30	26 x 0,26

* Séries aéronautiques standards

Matériaux et structures de câbles

Structure de l'isolation des câbles aéronautiques

Les structures d'isolants des câbles employés dans le domaine aéronautique sont variées et font appel à plusieurs techniques de mise en œuvre:

Deux grandes familles:

- ➡ **L'extrusion (simple ou double couche)**
- ➡ **L'enrubannage (pas utilisé en simple couche)**

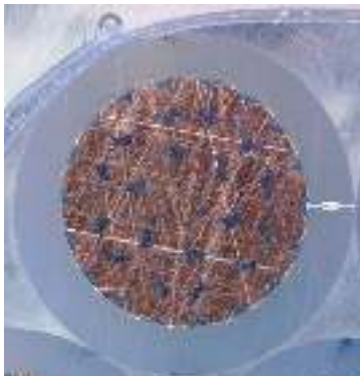
Des variantes

- ➡ **Le tressage (pas utilisé seul)**
- ➡ **L'assemblage composite (beaucoup des câbles modernes)**

Matériaux et structures de câbles

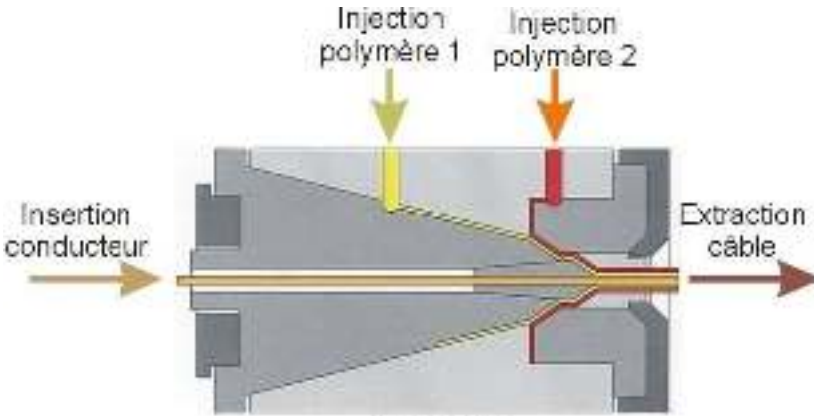
Isolation extrudée

Extrusion : Procédé de fabrication thermomécanique consistant à recouvrir (gainer) un conducteur électrique d'au moins une couche de matériau polymère thermoplastique afin de réaliser une enveloppe isolante autour du conducteur.



Avantages / inconvénients

- ✔ Excellente souplesse selon matière
- ✔ Grandes longueurs possibles
- ✔ Isolant mince difficile à réaliser
- ✔ Concentricité difficile
- ✔ Susceptibilité à l'entaille => double extrusion, 2 couleurs
- ✔ Gros diamètres plus difficile à extruder



Vue en coupe
Tête double extrusion

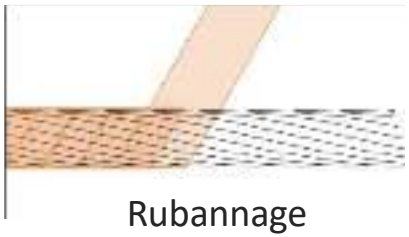
Matériaux et structures de câbles

Isolation rubanée

Enrubannage: Procédé de fabrication thermomécanique consistant à recouvrir un conducteur par guipage (hélicoïdalement) d'un ruban de matériau polymère, avec un recouvrement spécifié. L'assemblage est ensuite cuit au four afin de parvenir au collage des recouvrements du ruban et ainsi réaliser une enveloppe isolante autour du conducteur.

Avantages / inconvénients

- ✔ Convient pour la réalisation d'isolant mince (dépend de l'épaisseur des rubans – qq 10 µm)
- ✔ Excellente concentricité
- ✔ Gain sur diamètre et masse
- ✔ Grandes longueurs possible selon stockage matière
- ✔ Dénudage délicat
- ✔ Maîtrise collage / cuisson ruban difficile
- ✔ Souplesse délicate selon matière



Rubannage recouvrement 50%

Tête d'enrubannage concentrique

Câbles tressés

Tressage: Procédé de fabrication mécanique: insertion d'un tressage de fibres (verre ou textile, généralement imprégnées).
Employé en tant que couche intermédiaire ou finale dans les isolants composites pour renforcer la résistance mécanique de l'isolant composite.

Avantages / inconvénients

- ✔ Bonne résistance mécanique
- ✔ Bonne concentricité
- ✔ Dénudage très délicat
- ✔ Arrêts de tresse difficiles
- ✔ Etanchéité très difficile
- ✔ Procédé onéreux
- ✔ Grande longueur problématique (stockage matière)

Couche externe tressée

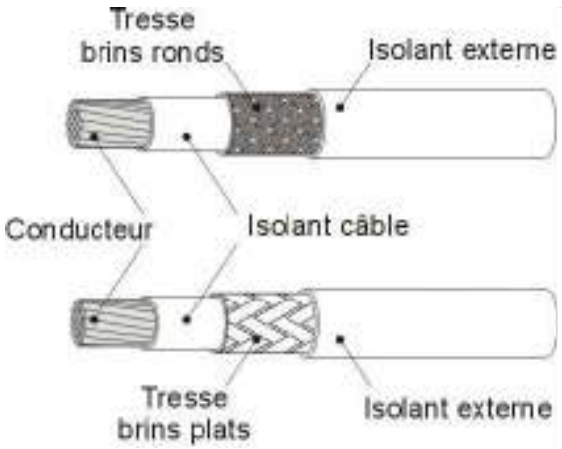
Matériaux et structures de câbles

Câbles blindés dans le domaine aéronautique

Ecran conducteur, le plus souvent métallique, autour du câble, principalement pour des raisons de CEM ou susceptibilité foudre.
Une jaquette isolante recouvre le blindage des câbles: protection et marquage.

Blindage 'Guipé'

- ✔ **Eléments non prisonniers du blindage → connexion plus aisée**
- ✔ **Moins performants (CEM) que les blindages tressés**
- ✔ **Reprise/connexion plus délicate**



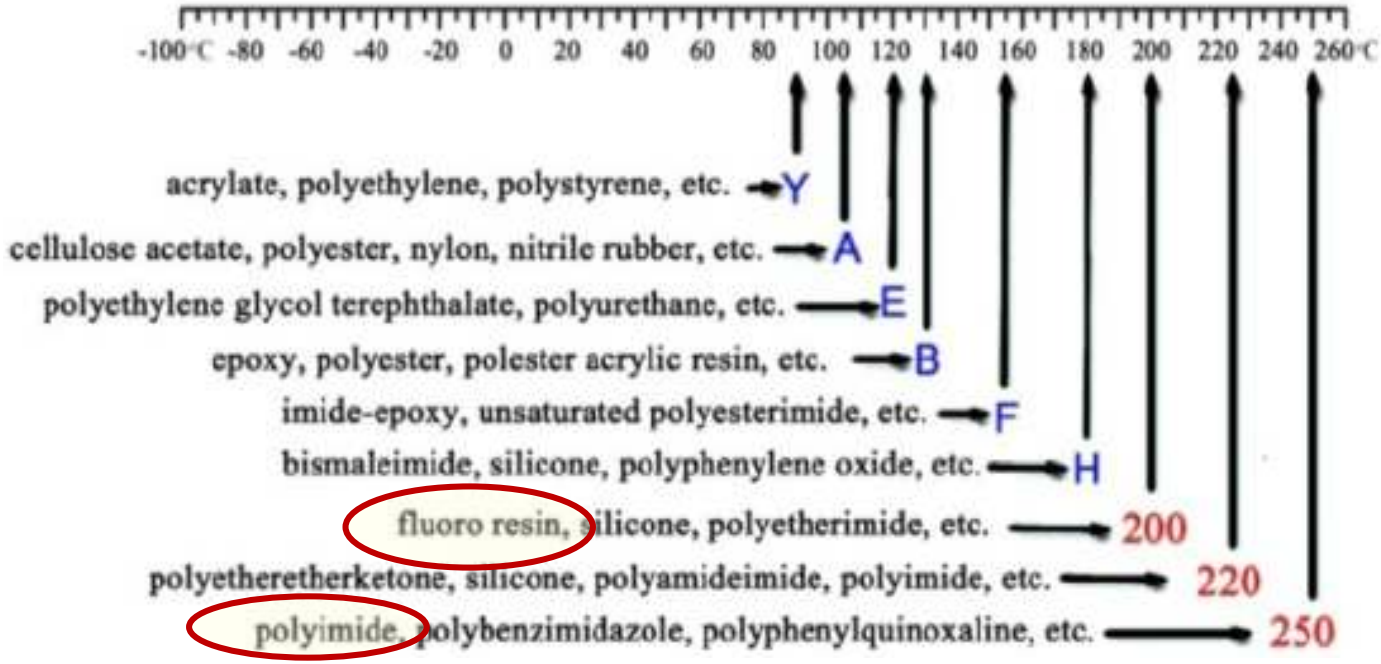
Blindages simple tresse

Min 85% de couverture

Matériaux et structures de câbles

Tenue thermique: choix limité de matériaux

Polymères courants, par classe thermique



X.M. Zhang et al. Rev. Adv. Mater. Sci. 46 (2016) 22-38

Assez peu de candidats avec des tenues thermiques au-delà de 180°C

+ Prise en compte du process (films relativement minces ou extrusion), coût, propriétés mécaniques, feu…

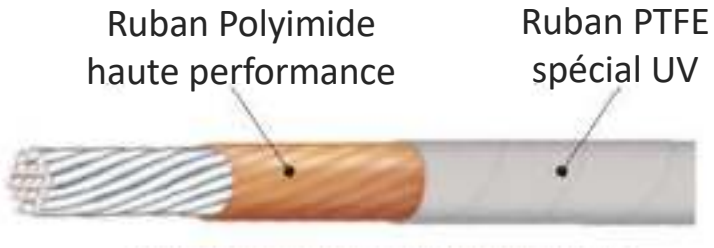
Essentiellement :

- ⇨**Polyimides (tenue diélectrique et thermique)**
- ⇨**Polymères fluorés (tenue thermique, auto-extinguibilité)**

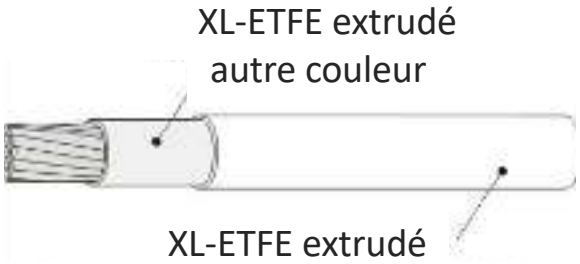
Matériaux et structures de câbles

Exemples de structures de Câbles

Usage Courant

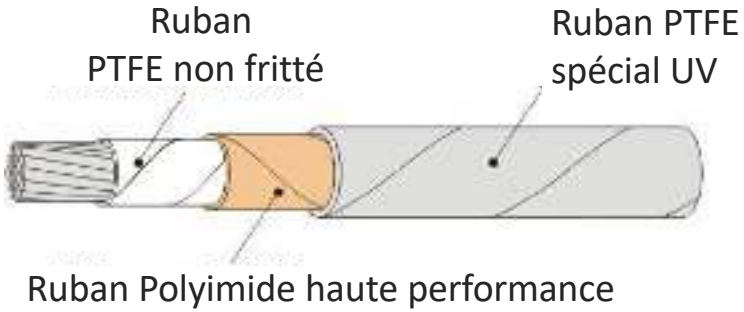


Isolant Câble AD

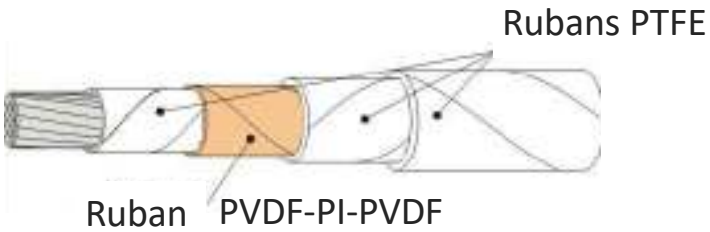


Isolant Câble cuivre BMS1348

HV



Isolant Câble AZ



Isolant Câble cuivre BMS1360

Synopsis

1-Evolution des réseaux de bord

2- Contraintes aéronautiques sur Câbles et Harnais

3- Matériaux et structure de câbles

4- Problématiques associées à la montée en tension

Problématiques associées à la montée en tension

Structure des câbles et susceptibilité aux contraintes électriques

Câbles Haute Tension pour la transmission d'énergie:

-Exigence de s'affranchir des phénomènes de DPs et défauts de toutes sortes

-Utilisation de structures coaxiales avec écran semi-conducteur permettant de lisser le champ électrique et les contraintes mécaniques

-Enormément de progrès ont été faits sur la fiabilité en soignant la qualité des matières premières et du process.

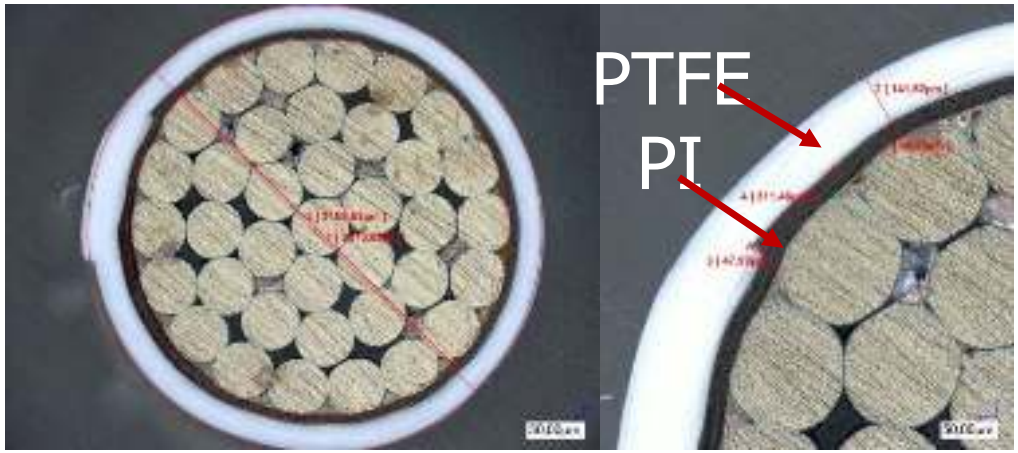
-Prédominance des câbles extrudés pour HVAC: Polyéthylène réticulé (mais limite d'utilisation 90°C)

Problématiques associées à la montée en tension

Structure des câbles et susceptibilité aux contraintes électriques

Câbles Aéronautiques:

- -Conducteurs multibrins
- -Le plus souvent sans écran SC
- -Multicouches liées à l'enrubannage
- -Pas d'écran extérieur
- -Milieu dépressurisé
- -Cyclages thermiques pouvant faire évoluer les structures multicouches



E. Aubert et al., Proc. ICHVE, pp.1-5, 2018

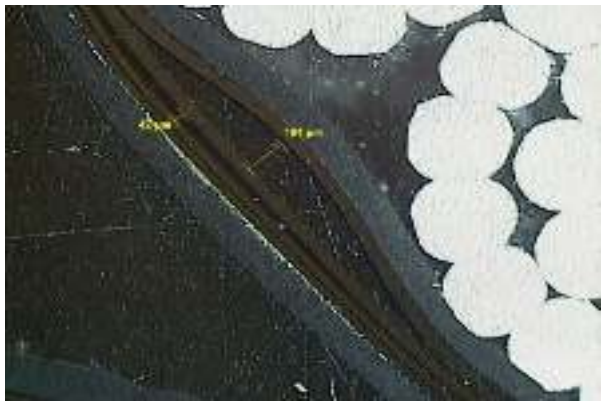
➔ **Ensemble de conditions favorables à l'apparition de DPs**

Problématiques associées à la montée en tension

Structure des câbles et susceptibilité aux contraintes électriques

Cavités au contact du conducteur et dans le rubanage

- ➡ Utilisation d'une couche semi-conductrice;
- ➡ Blindage du câble sur la partie externe



Comm. Nexans

Problématiques associées à la montée en tension

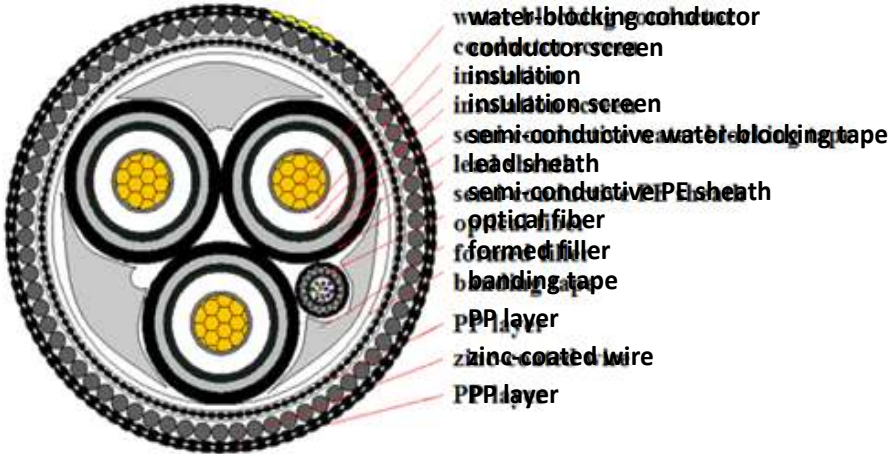
Câbles de transmission d'énergie HVDC vs. HVAC

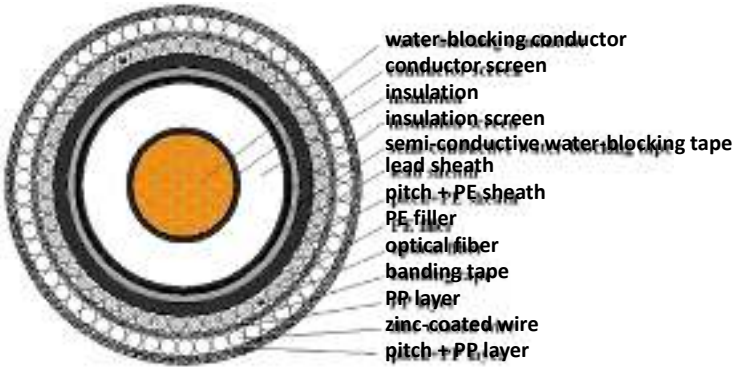
Câbles de transmission HVDC avec papier/polymère/huile pour VSC avec inversion de polarité et UHT

Passage à isolation extrudée (LCC ,tensions moindres)

Gain de volume /poids: Câble sous-marin 200MW

Câble HVAC 3-phases 110kV; Φ_{ext} 193mm ⇔ Câble HVDC 160kV; Φ_{ext} 111mm Poids: -60%



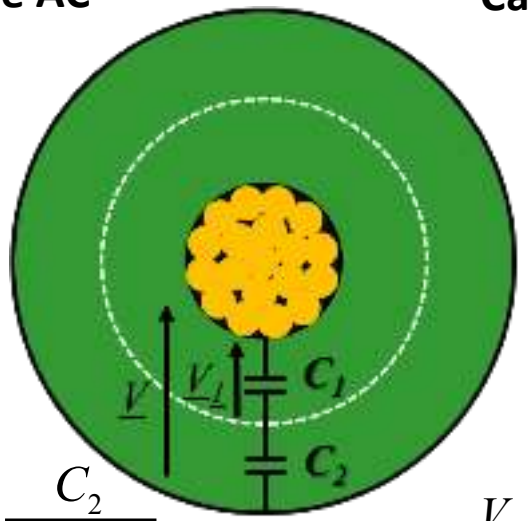


H.L. Zhang et al., J. Engg. 2017, 702, 2017

Problématiques associées à la montée en tension

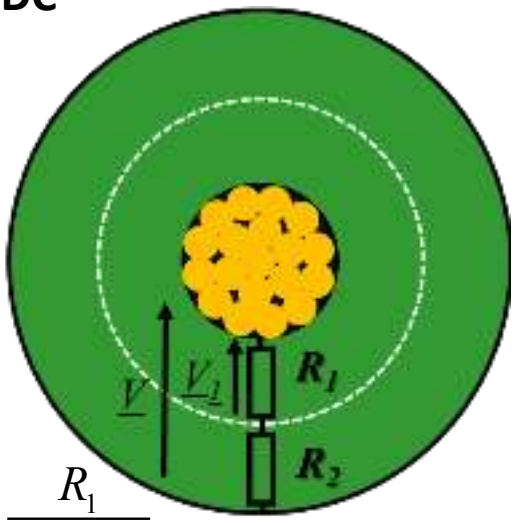
HVDC vs. HVAC

Câble AC



$$V_1 = V\frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

Câble DC



$$V_1 = V\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Potentiel reporté sur l'élément de plus faible capacité

Le champ électrique est contrôlé par la permittivité=f(E,T)

Potentiel reporté sur l'élément de plus forte résistance

Le champ électrique est contrôlé par la résistivité = f(E, T)

Variation importante de la conductivité selon la température et les matériaux

➡ Redistribution du champ électrique en raison:

-des gradients thermiques

-de la superposition de matériaux de nature différente

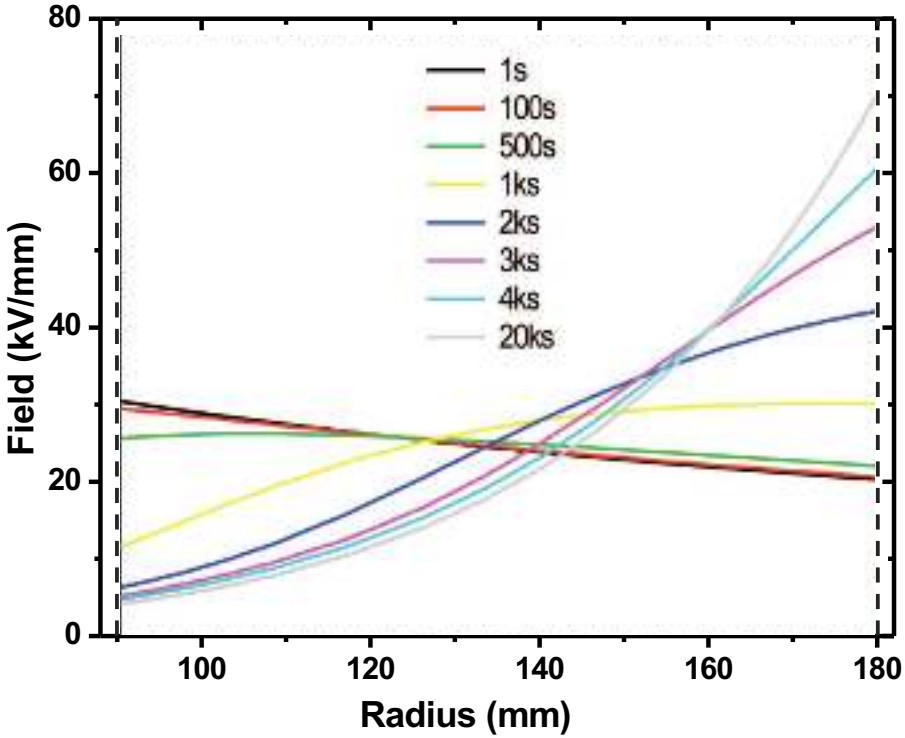
-de la possible accumulation de charges dans l'isolant

$$E = f(\varepsilon, \rho(r))$$

$$divE = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

Problématiques associées à la montée en tension

Câbles HVDC



S. Qin, S. Boggs, IEEE Electr. Insul. Mag. (2012)

Exemple de redistribution du champ dans le temps dans un câble MV sous gradient thermique de 30°C (80°C l'âme).

Conductivité de la forme:

$$\sigma(T,E) = A \cdot exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \cdot sinh(B(T) \cdot E) \cdot E^{\alpha}$$

A=3.7 10^7 S.m/V, E_a=0.98 eV, B=1.1 10^{-7} S.m/V, α =1.

En situation stationnaire

Champ électrique

$$E(r) = E_0 \frac{r_0 \sigma_0}{r\sigma(r)}$$

Charge d'espace

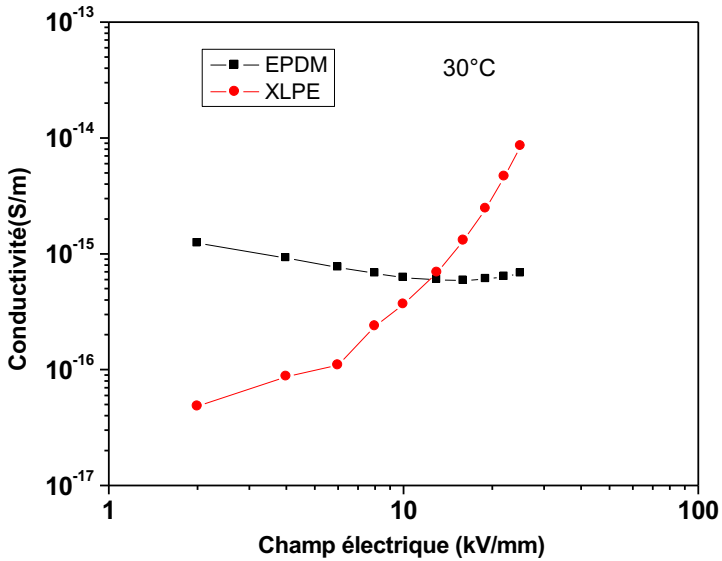
$$\rho_{tg} = -E(r) \frac{\varepsilon}{\sigma(r)} \frac{d\sigma(r)}{dr}$$

Problématiques associées à la montée en tension

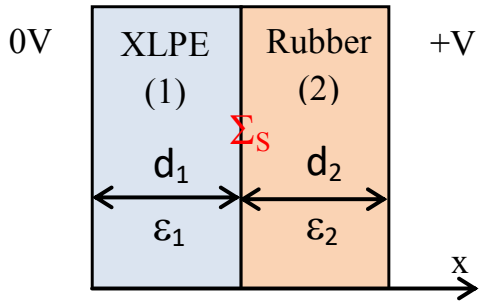
Câbles HVDC

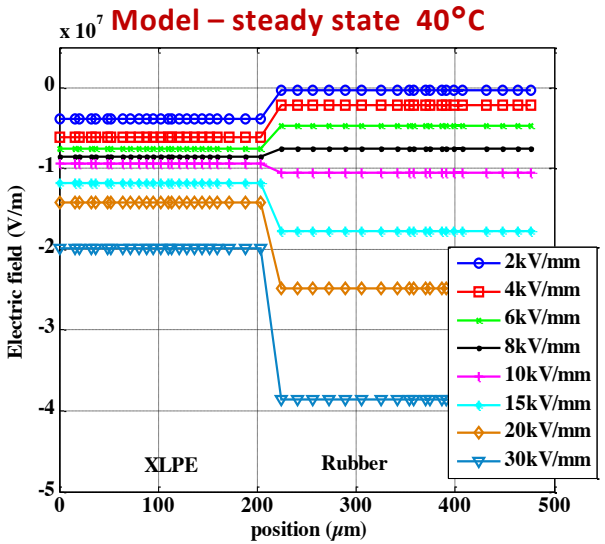
Association d'isolants de différente nature (jonctions)

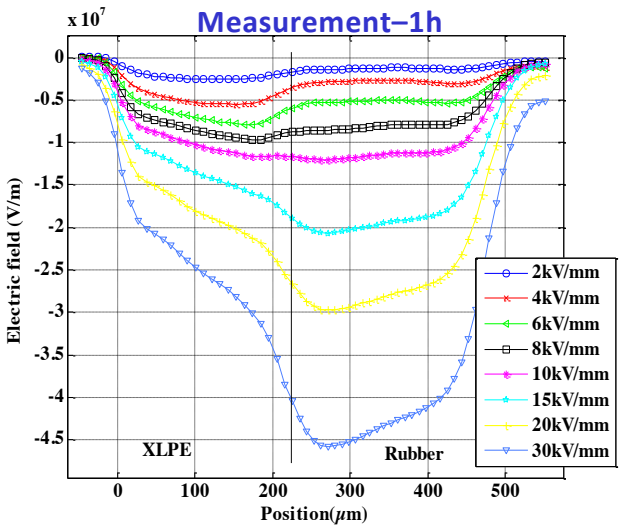
Report du champ sur le matériau de plus grande résistivité



$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 + \Sigma_s$$







T.T.N. Vu et al., IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 22, 117, 2015

Problématiques associées à la montée en tension

Câbles aéronautiques HVDC

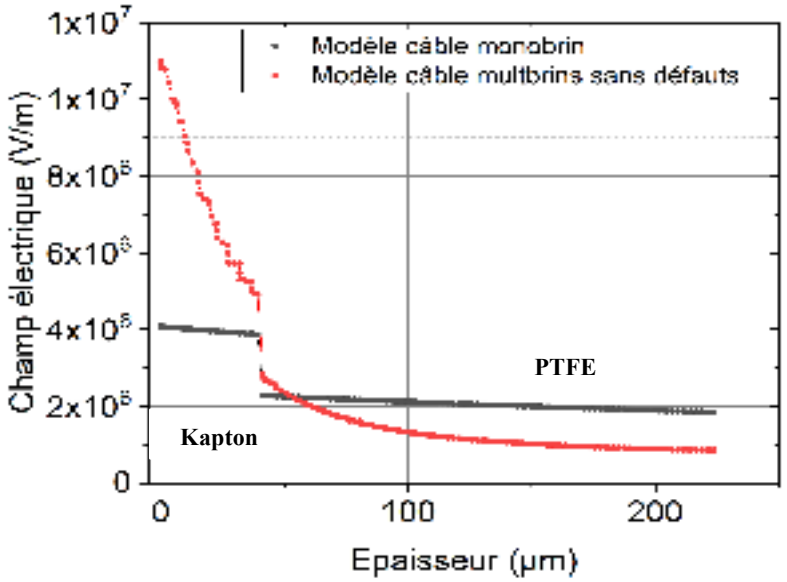
Champ électrique 'a priori' moins élevé (E_{moy}≈ 2kV/mm)

Mais:

- **-Renforcement du champ dû à la géométrie**
- **-Structures multicouches**
- **-Structures multi-plis (rubanées)**
- **-Existence de cavité dans lesquelles la charge peut être générée par ionisation de l'air**
- **-Besoin de données sur les matériaux fonction de la température et du champ**
- **-Comportement de câbles sans électrode extérieure?**

➡ Travail en cours sur la modélisation en DC et la mesure de distribution du champ dans des câbles aéronautiques

Profils de champ électrique DC: modèle monobrin vs. multibrin sous 540Vdc



E.N. Diaw, Thèse Safran/Laplace, en cours

Merci pour votre attention

Merci à Eddy Aubert, Safran, pour son support pour la partie sur les câbles