

Journées “coupure électrique : problématiques, solutions et enjeux technologiques”

12-13 Mars 2018

59 participants

(26 industriels, 21 EC, 11 doctorants, 1 enseignant secondaire) – X membres AAE

16 participations orales

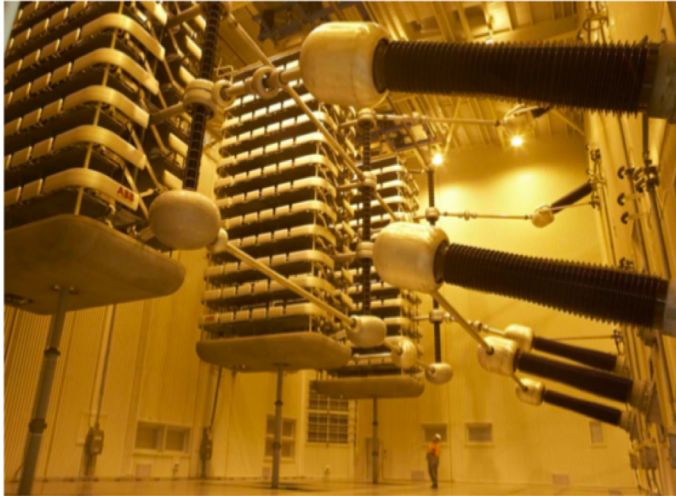
1ère journée sur la coupure DC : 7 presentations

2ème journée sur la coupure AC : 9 presentations



Doctorants
Enseignants
Chercheurs
Industriels
Venez échanger

1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations



Cours - compréhension

Jing Dai - *Bases des réseaux d'énergie HVDC*

GeePs, Centrale Supélec, Gif sur Yvette

Hervé Morel - *Coupure et protection des microréseaux DC – état de l'art et évolution*

Laboratoire AMPERE, Villeurbanne

Recherche

Wolfgang Grieshaber - *Etat de l'art sur la coupure DC en Haute Tension*, Super Grid Institute, Villeurbanne

Roland Caussé - *Le HVDC et l'installation électrique dans les avions*, AIRBUS, Toulouse

Romain Lorenzon - *Nouveaux dispositifs de coupure pyrotechnique DC ou AC pour application aéronautique, automobile, photovoltaïque*, ArianeGroup, Saint-Médard-en-Jalles

Thibaut Chailloux - *Protection contre les surintensités pour les applications LVDC*, MERSEN France, Saint Bonnet de Mure

Eric Guillard - *Contacteurs HVDC Hybrides*, Esterline, Toulouse

1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations

Cours – compréhension

Jing Dai - *Bases des réseaux d'énergie HVDC*

GeePs, Centrale Supélec, Gif sur Yvette

Raisons de développer des liaisons HVDC
Structure, technologies à thyristor (LCC)
Convertisseurs de source de tension (VSC)
Convertisseur modulaire multi-niveau (MMC)

Avantage HVDC

- Plus économique pour transiter de grande puissance à longue distance
 - Coût fixe plus grand: stations de convertisseurs
 - Mais coût variable diminué: moins de câble et moins de pertes (pas de I_{capa} , pas de effet de peau, pas de courant induit dans l'écran du câble)
- Possibilité de relier 2 réseaux asynchrones, même de fréquences différentes
- Maîtrise de flux de puissance



- LCC: Line-Commutated Converter
 - Convertisseurs commutés par les lignes
 - Thyristor
 - Pertes faibles : 0,75 %
 - Application grosse puissance : 7600 MW, 800 kV, 2500 km
- VSC: Voltage Source Converter
 - Convertisseurs en source de tension
 - IGBT
 - Plus réglable et compacte
 - Limité à 1 GW, Éolien offshore, transport sous-terrain

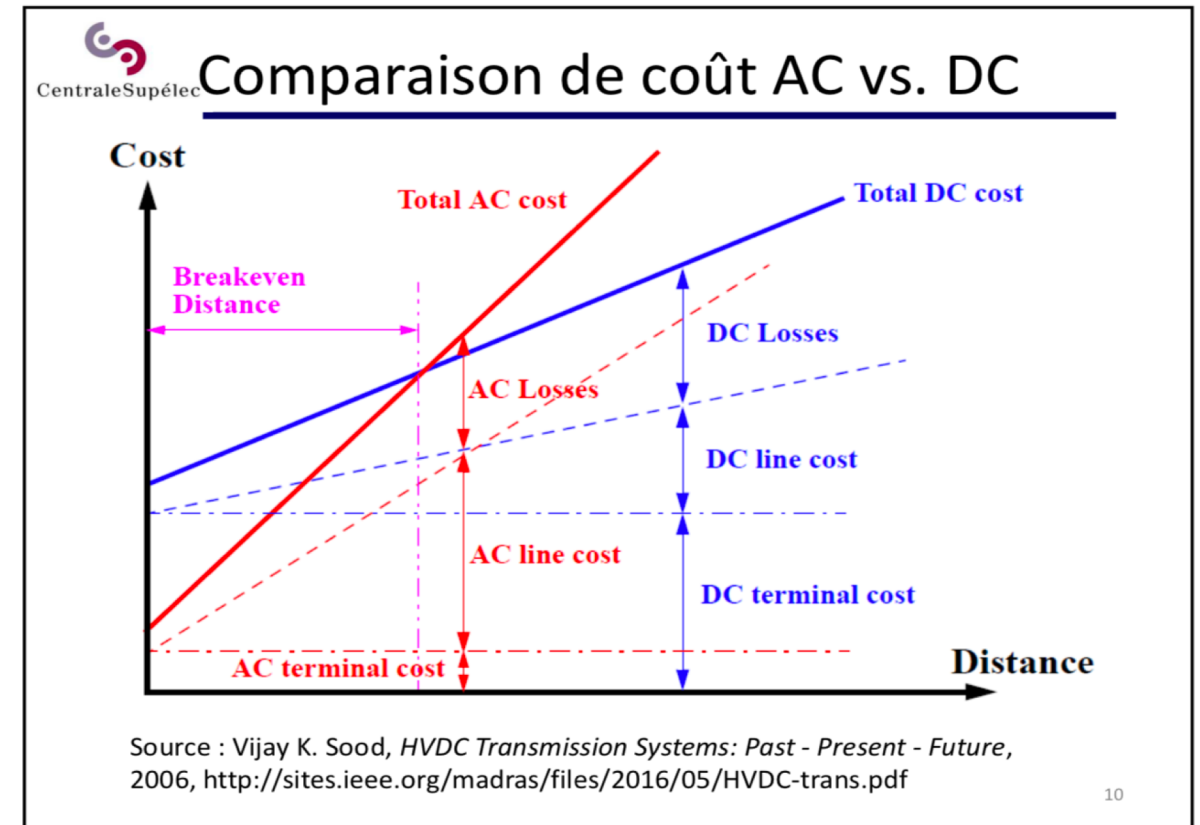
1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations

Cours – compréhension

Jing Dai - Bases des réseaux d'énergie HVDC

GeePs, Centrale Supélec, Gif sur Yvette

- Avantages de VSC
 - Commande indépendante de P et Q
 - Possibilité d'alimenter des réseaux faibles, voire passifs
 - Capacité de redémarrer à froid (black start)
- Inconvénient de VSC :
 - Pertes importantes par commutation :
 - 0,9 -1,75 % pour ceux à 2 niveaux



1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations

Cours - compréhension

Hervé Morel - *Coupure et protection des microréseaux DC – état de l'art et évolution*

Laboratoire AMPERE, Villeurbanne

Applications aéronautiques

Présentation deux technologies

SSCB : Solid-State Circuit Breakers

SIC-MOSFET et Si-IGBT

1200V, 200A, temps réponse 5μs

820g, cube de 1cm de coté

SSPC : Solid-State Power Controller

Avantages du Solid-State devices Vs devices électromécaniques

Plus petit, opération silencieuse, rapide, augmentation du temps vie

Désavantages

Courant de fuite

1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations

Recherche



Wolfgang Grieshaber - *Etat de l'art sur la coupure DC en Haute Tension*, Super Grid Institute, Villeurbanne

Roland Caussé - *Le HVDC et l'installation électrique dans les avions*, AIRBUS, Toulouse

Romain Lorenzon - *Nouveaux dispositifs de coupure pyrotechnique DC ou AC pour application aéronautique, automobile, photovoltaïque*, ArianeGroup, Saint-Médard-en-Jalles

Thibaut Chailloux - *Protection contre les surintensités pour les applications LVDC*, MERSEN France, Saint Bonnet de Mure

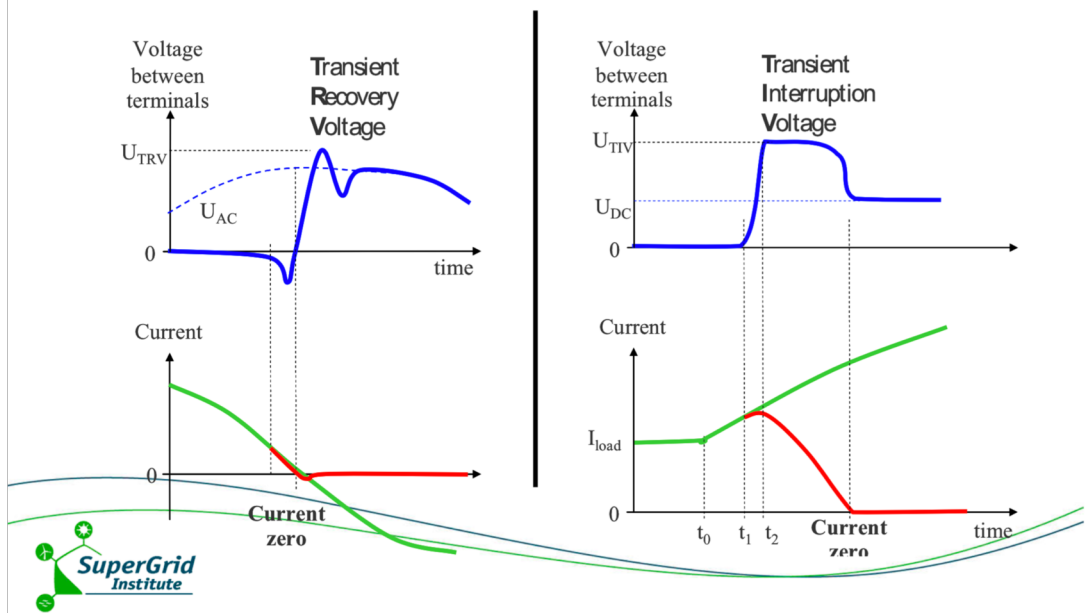
Eric Guillard - *Contacteurs HVDC Hybrides*, Esterline, Toulouse

1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations

Wolfgang Grieshaber - *Etat de l'art sur la coupure DC en Haute Tension*
Super Grid Institute, Villeurbanne

Augmentation de puissance transmise
DC: absence effet de peau
220kVAC \rightarrow ± 380 kVDC
Compensation en DC inutile

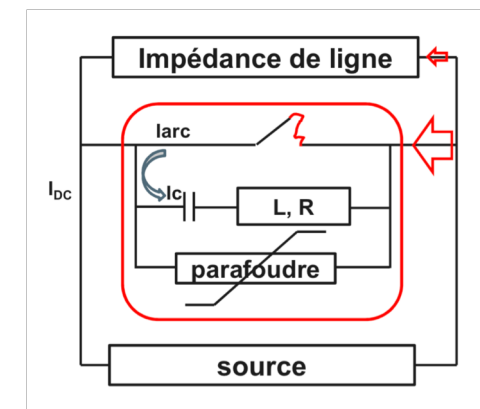
Comparaison de la coupure en alternatif & continu



Défis :

Apparition du défaut - montée de courant

- Energie magnétique dans réseau augmente
- Disjoncteur insère un élément limiteur de surtension & absorbeur d'énergie
- Energie transférée vers capacités du réseau et parafoudre



Continu

Courant de défaut croît

Insérer haute impédance

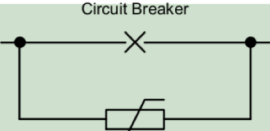
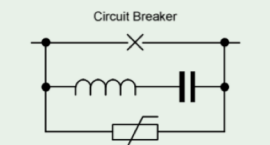
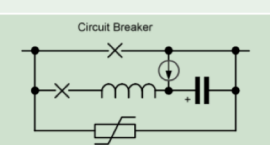
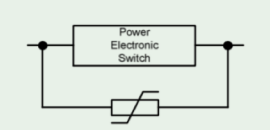
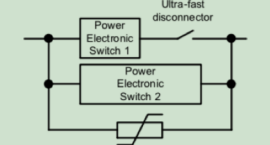
- Valeur crête imposée par disj. DC
- Tenir "TTI" > $U_{réseau}$ (Tension Trans. d'Interruption)
- Fort di/dt durant commutations internes

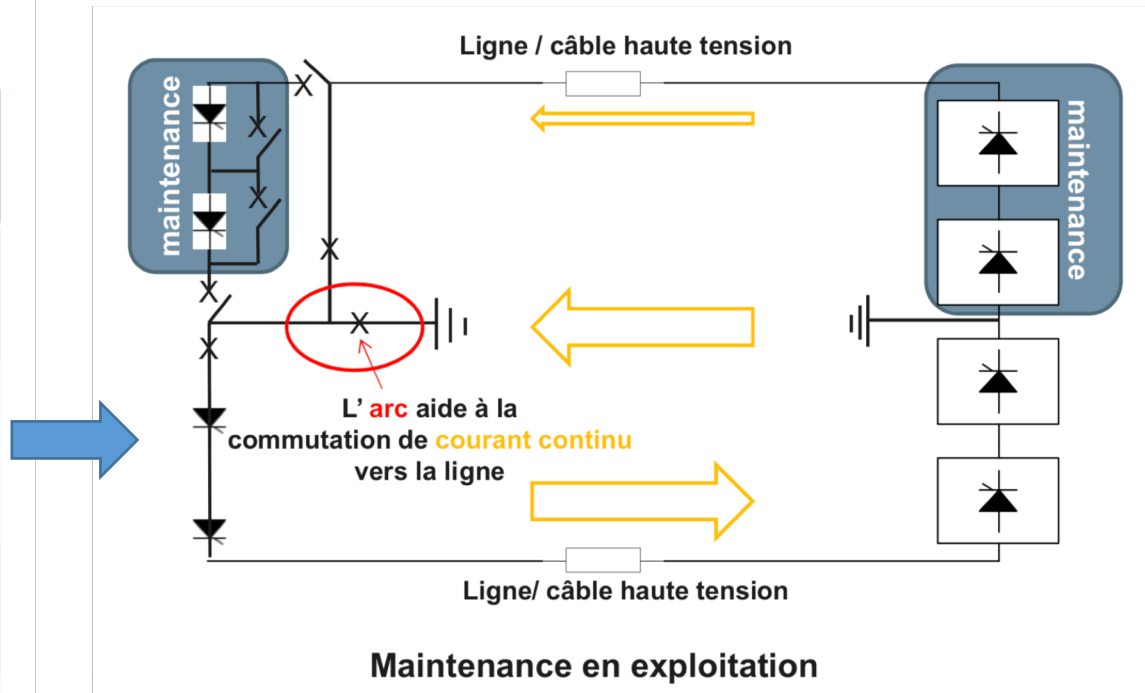
Disj. DC absorbe l'énergie des moyens de transmission
Courant est "interrompu"

1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations

Wolfgang Grieshaber - *Etat de l'art sur la coupure DC en Haute Tension*
Super Grid Institute, Villeurbanne

Options de disjoncteurs DC

Topologie	Illustration	Conclusions
Interruption directe par tension d'arc		Répondu pour $U < 3 \text{ kV}$ (matériel de traction) Impossible pour HVDC
Circuit résonant <u>passif</u>		OK pour commutation de courants de charge Trop lent pour coupure de défaut
Circuit résonant <u>actif</u>		1. Avec disj. standard: Trop lent 2. Avec ampoule à vide: Attention à l'érosion des contacts
Semi-conducteur		Très rapide Pertes très élevées (qq MW)
Hybride		Rapide, faible pertes. Techniquement la meilleure solution, coûteux.

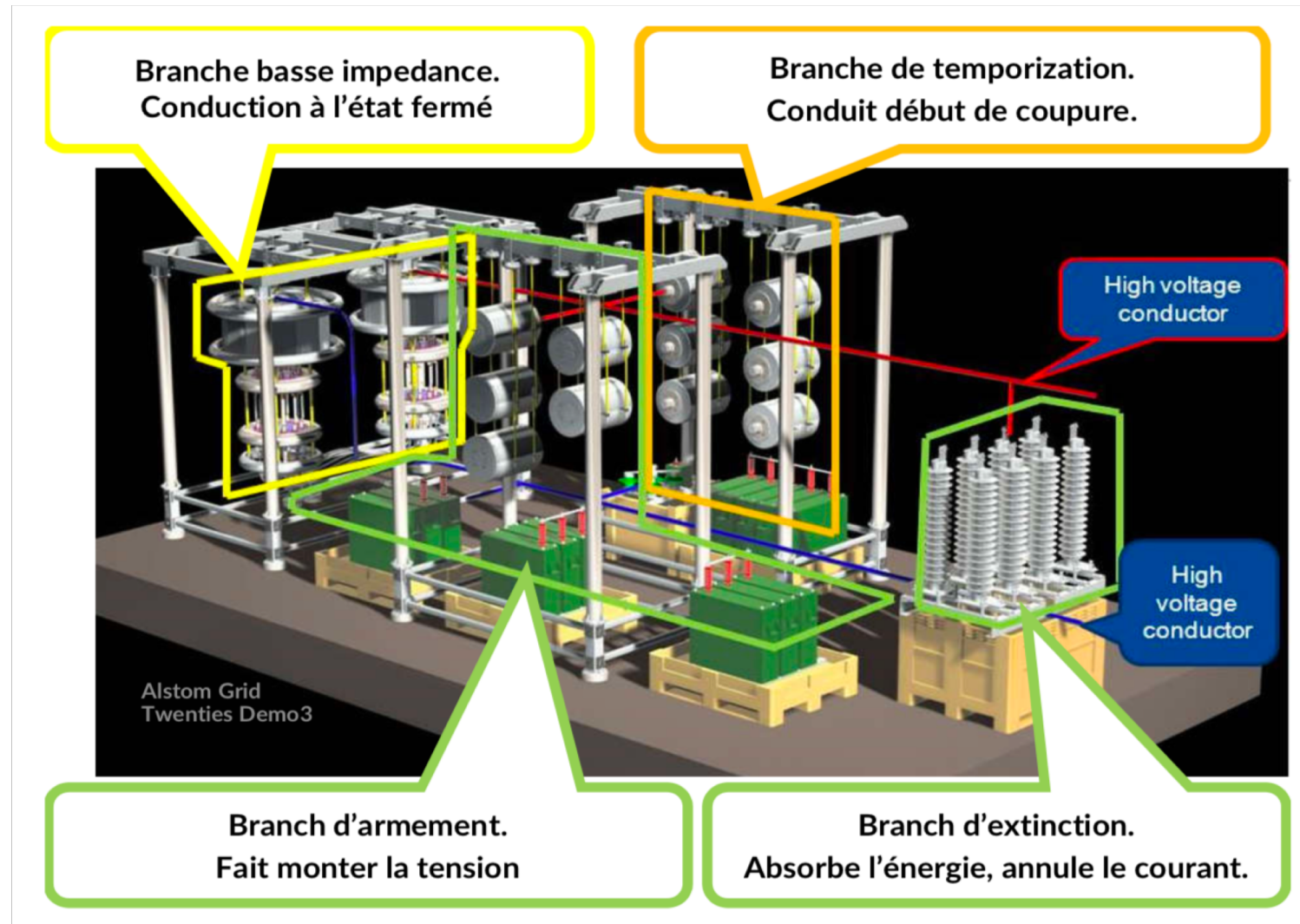


Connaissance de l'arc (essais dédiés)
Difficultés de la commutation DC
La source ne crée pas $I=0$ - insertion contre-FEM (parafoudre)
Nécessité d'éteindre l'arc - ajout d'un circuit oscillant (LC)

1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations

Wolfgang Grieshaber - *Etat de l'art sur la coupure DC en Haute Tension*
Super Grid Institute, Villeurbanne

Disjoncteur hybride HVDC



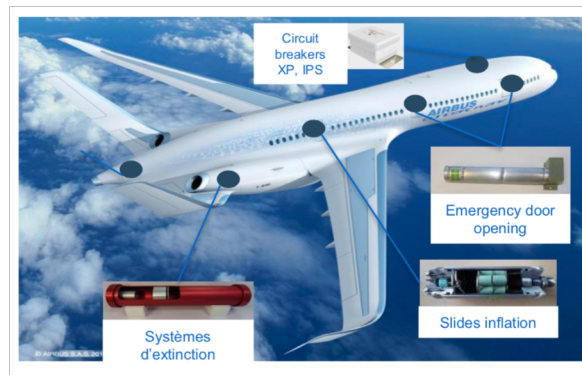
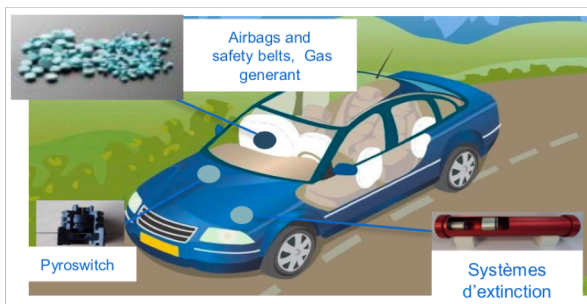
Romain Lorenzon - Nouveaux dispositifs de coupure pyrotechnique DC ou AC pour application aéronautique, automobile, photovoltaïque
ArianeGroup, Saint-Médard-en-Jalles

Objectif : sécurisation des systèmes électriques suite à l'utilisation de matériaux énergétiques

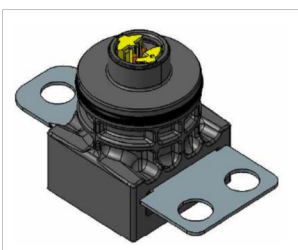
Aéronautiques : disjoncteurs, systèmes d'extinction

Automobile : système d'extinction, pyroswitch

Eolien : système d'extinction, pyroswitch



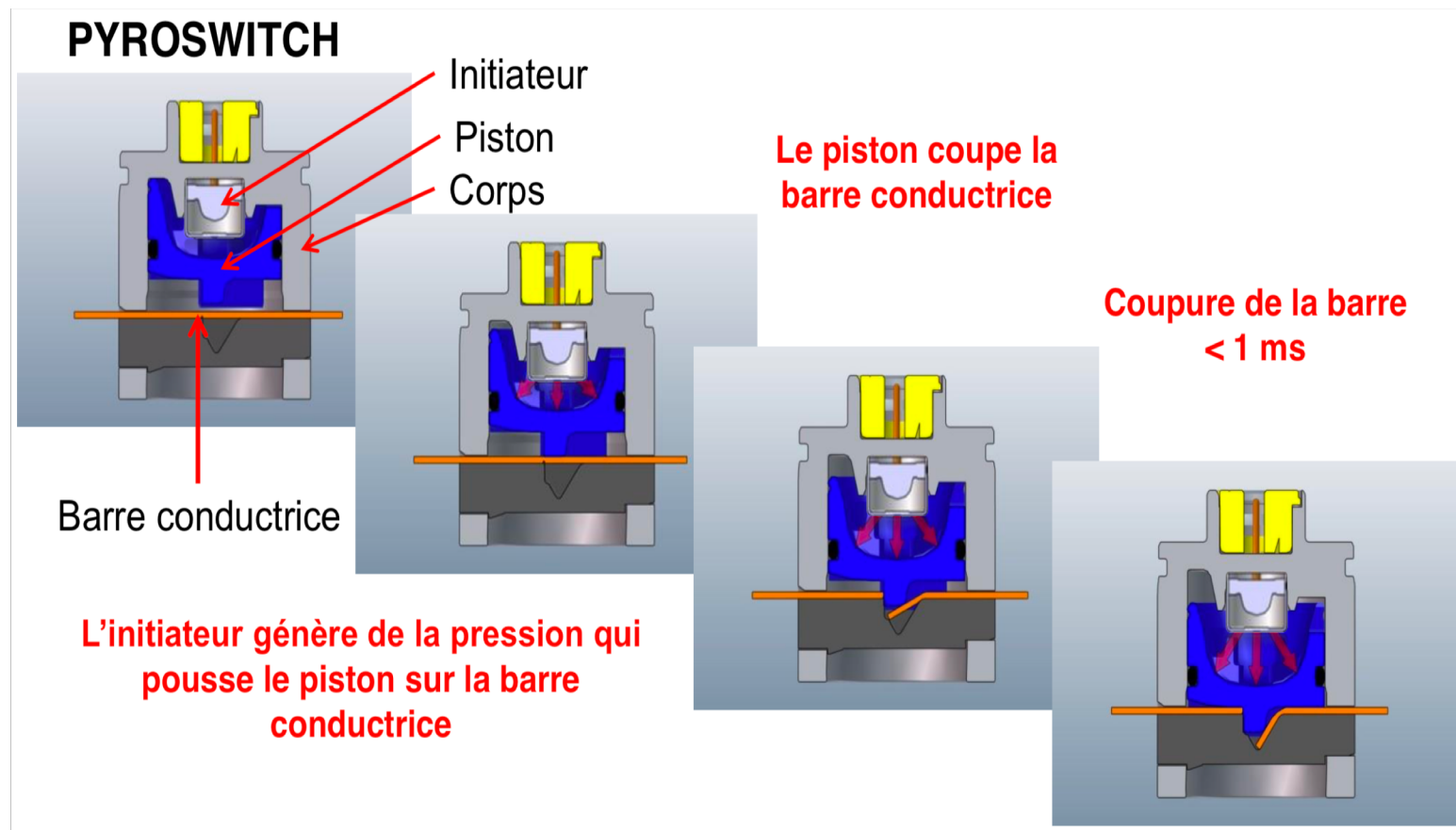
Probleme : augmentations des risques dans les systèmes d'énergie électrique
Augmentation de l'énergie stockée



Moyens : dispositifs de coupure pyrotechniques DC pour véhicules, bus électrique, camions, batteries-stockages, PV, remplacement systèmes hydrauliques, pneumatiques par systèmes électriques

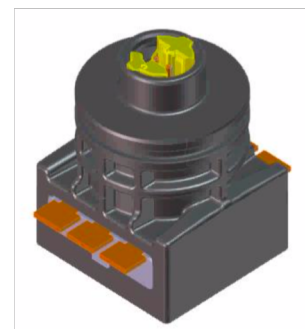
1^{ère} journée sur la coupure DC : 7 presentations

Romain Lorenzon - Nouveaux dispositifs de coupure pyrotechnique DC ou AC pour application aéronautique, automobile, photovoltaïque
ArianeGroup, Saint-Médard-en-Jalles



Pour appli AC

- Courant nominal > 30A/phase
- Temps fonctionnement < 1ms
- Coupe les 3 phases simultanément
- Dispositif Hybrid XP-avec Mersen
- Coupe I < 800A, sous 1000VDC
- Temps < 1ms
- Batteries et véhicules hybrides
- Diminution courant
- Diminution section cables
- Diminution temps charge



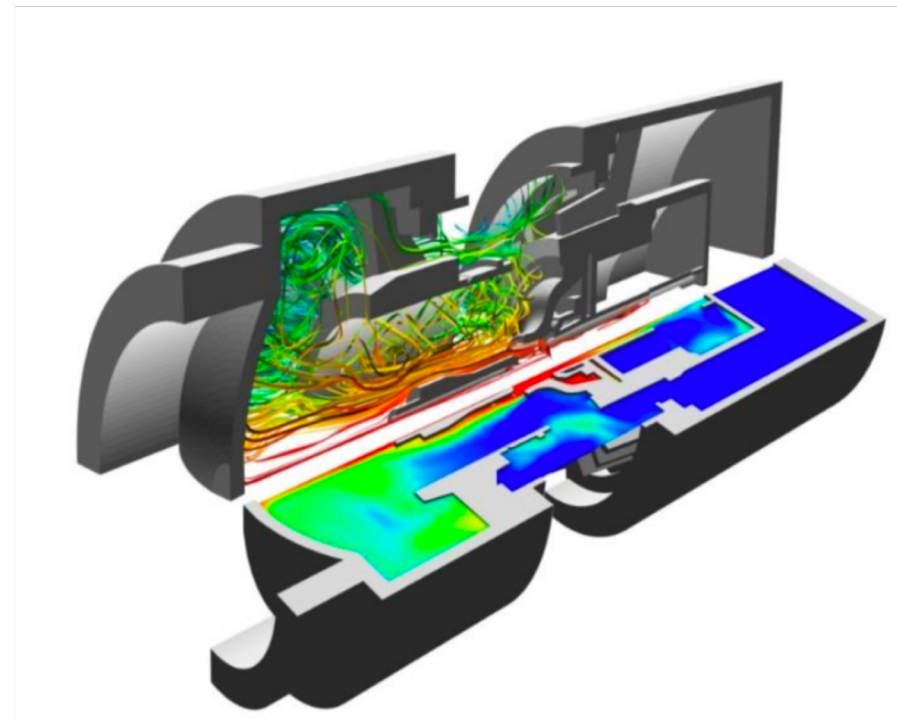
2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Cours

Dunpin Hong - *La spectroscopie optique appliquée au diagnostic des arcs de coupure*, Laboratoire GREMI, Orléans

Jean-Marc Bauchire - *La coupure AC, technologies et principes fondamentaux*, GREMI, Orléans

Pascal Tixador - *Limitation des courants de défaut par supraconducteurs*, Univ. Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble-INP, G2Elab, I. Néel



Recherche

Aurore Risacher - *La problématique de la haute tension dans l'aéronautique : application aux arcs de défaut,, IRT Saint Exupéry, Toulouse*

Wolfgang Grieshaber - *Disjoncteurs haute tension AC : enjeux et moyens d'essais*, Super Grid Institute, Villeurbanne

Patrice Joyeux - *Coupure basse tension et moyen d'essai*, HAGER, Obernai

Philippe Robin-Jouan - *Statut des développements et techniques de la coupure AC pour les disjoncteurs haute tension chez General Electric*, Villeurbanne

Olivier Eichwald - *Claquage dynamique dans l'air*, Laboratoire Laplace, Toulouse

Yann Cressault - *Propriétés thermiques des plasmas d'arc dans les disjoncteurs HT*, Laboratoire Laplace, Toulouse

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Jean-Marc Bauchire - *La coupure AC, technologies et principes fondamentaux*
GREMI, Orléans

**Qu'est-ce qu'un disjoncteur ?
Quel est son fonctionnement ?
Pourquoi des recherches sur ces disjoncteurs ?
Quelles recherches, quel avenir ?**

Un constat : le disjoncteur est un dispositif ancien au développement empirique

La R&D chez les fabricants et ses partenaires : améliorer les performances, réduction de la taille, optimisation de la géométrie, réduction du temps de coupure, augmentation des courants de court-circuit supportés, limitations des phénomènes parasites (pollution...), réduire les couts, augmenter la fiabilité, **Créer** des outils de développement et de prédiction, diagnostic, simulation, **Innover** et tester de nouvelles solutions, de nouveaux procédés..., **Garantir** une compétence internationale, une expertise, meilleure **compréhension/caractérisation/quantification/maitrise** des phénomènes physico-chimiques de l'arc et de son environnement.

Simulation + utilisation de méthodes électriques, imagerie rapide, imagerie avec filtres interférentiels, spectroscopie d'émission, d'absorption, dispositifs magnétiques + thermographie infrarouge, méthodes inverses, strioscopie, radiographie X

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Jean-Marc Bauchire - *La coupure AC, technologies et principes fondamentaux*
GREMI, Orléans

Le disjoncteur basse tension domestique est déjà bien abouti technologiquement, fiable et peu cher

Il peut être amélioré :

- Optimisation de la taille et de la géométrie
- Nature des matériaux moins polluants
- Matériaux de contact plus efficace

La poursuite de la recherche :

- Pour l'amélioration des modèles et de la **simulation numérique**
- Innover dans les moyens de **diagnostic**
- **Procédés de fabrication des matériaux** de contact (frittage, collage...)
- Le développement de disjoncteurs BT de puissance

La coupure du courant en basse tension ne passe pas nécessairement par la coupure par arc et la séparation de contacts. Les **semi-conducteurs** (IGBT) ont une place mais leur coût et les problèmes techniques (dissipation thermique) ne les rendent pas encore compétitifs

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Dunpin Hong - *La spectroscopie optique appliquée au diagnostic des arcs de coupure*
GREMI, Orléans

Introduction

- Mise en évidence de la présence d'une (des) espèce(s)
- Détermination de la température électronique (T_e)
- Détermination de la densité électronique (N_e)
- Détermination de la densité d'une espèce (Spectroscopie d'absorption)
- Conclusion

Relativement facile à mettre en œuvre
(et mesure à distance possible)
Technique non intrusive
Résolution temporelle et/ou spatiale

La spectroscopie optique permet :

- mise en évidence de la présence des espèces
- mesure de la densité électronique
- mesure de la température électronique
- mesure de la densité de certains atomes et molécules

Utile pour les études des phénomènes physiques :

- arc (plasma thermique)
- interaction arc – électrodes
- interaction arc – parois
- gaz chaud entourant l'arc
- problème du réamorçage de l'arc

Spectres d'émission - Emission spontanée (atomique)

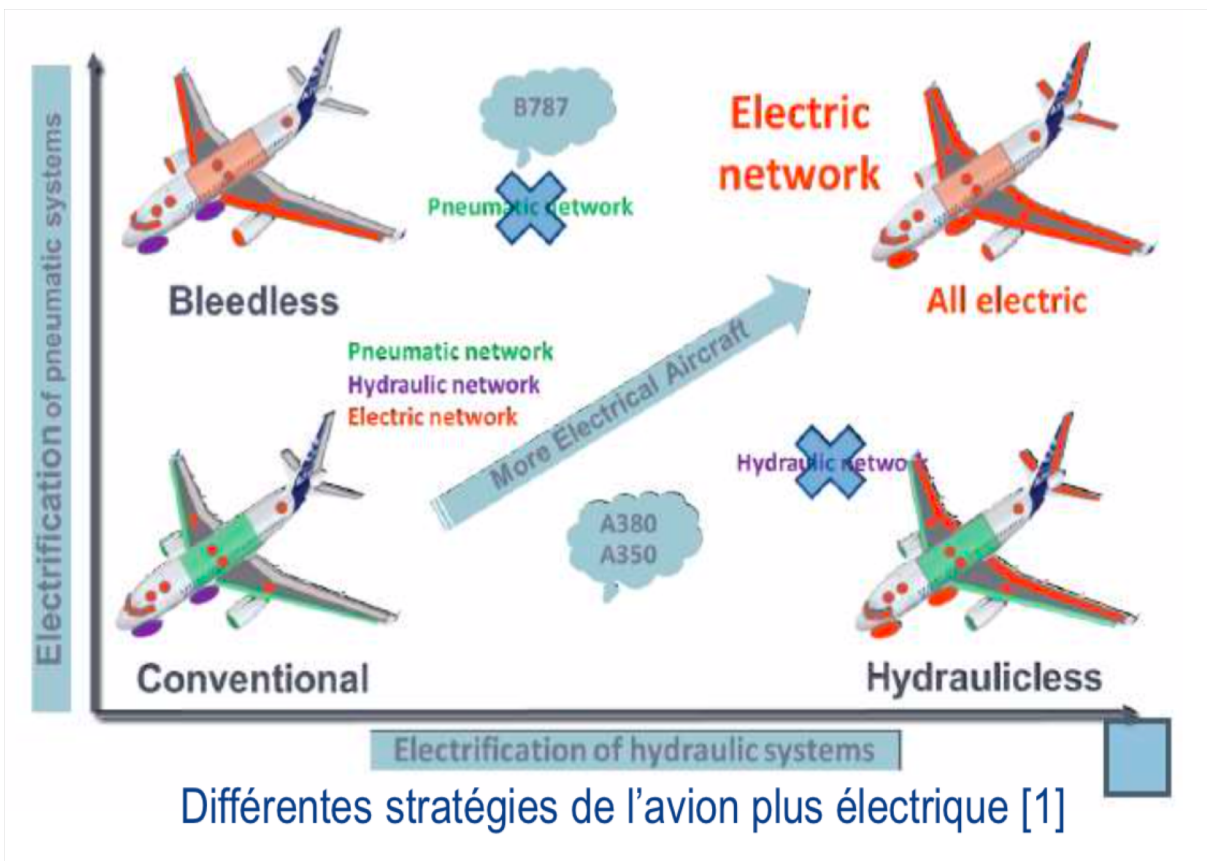
Photographie avec filtre interférentiel : localisation des zones d'émission des différentes espèces du plasma

Mesure de températures électroniques - Equilibre Thermodynamique Local (ETL)

Spectroscopie d'absorption atomique (densité des atomes), absorption moléculaire (densité des molécules)

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Aurore Risacher - *La problématique de la haute tension dans l'aéronautique : application aux arcs de défaut*
IRT Saint Exupery, Toulouse



Avion plus électrique :

- Augmentation de la puissance électrique (> MW)
- Augmentation de la tension électrique dans les futurs avions : systèmes d'isolation de plus en plus stressés

Augmentation des risques d'apparition d'arc électrique

Projets :

FIABILITE
HIGHVOLT

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Aurore Risacher - *La problématique de la haute tension dans l'aéronautique : application aux arcs de défaut*
IRT Saint Exupery, Toulouse

Etude de la signature électrique de l'arc

Fournir aux membres les signatures d'arcs identifiés par l'algorithme pour les aider lors de la conception de leurs outils de détection

Inter- corrélation dynamique

Seuillage de la dérivée du courant

Cartographie harmonique du courant et de la tension

Représentation temps- fréquence

L'augmentation de la fréquence d'alimentation réduit la probabilité d'extinction de l'arc

Les temps d'arc sont plus faibles avec un isolant en Nylon

Les temps d'arc sont plus long avec un conducteur en aluminium – faible fréquence, plus de cuivre et de nylon

Recouvrement diélectrique des gaz

Fournir des préconisations de conception aux membres pour leurs dispositifs exposés aux risques d'arc électrique

Moyens de caractérisation

- Mesures de tension
- Mesures de courant
- Imagerie par caméra rapide

- la fréquence
- la nature du matériaux de l'isolant (nylon, époxy...)
- la nature du matériaux conducteur (cuivre, alu...)
- Epaisseur du matériau 'isolant (100-200µm)
- Epaisseur du matériau 'conducteur (3-6µm)

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Wolfgang Grieshaber - *Disjoncteurs haute tension AC : enjeux et moyens d'essais*
Super Grid Institute, Villeurbanne

Fonction de l'appareillage dans le réseau

Fonctionnel

Endurance mécanique
Sismique & efforts statiques
Étanchéité, haute & basse Température

Conduction du courant

Echauffement
Surintensité
Isolation
Phase-terre
Entrée-sortie si appareil ouvert
Perturbation radioélectrique

Changement d'état

Etablissement
Coupure

Objectifs

Garantir 2k ou 10k cycles
Dérive limitée des temps de fonctionnement
Dispersion limitée des temps de fonctionnement
Dérivée limitée de la résistance de contacts
Démontage & inspection



Étanchéité dans la durée avec et sans manœuvres

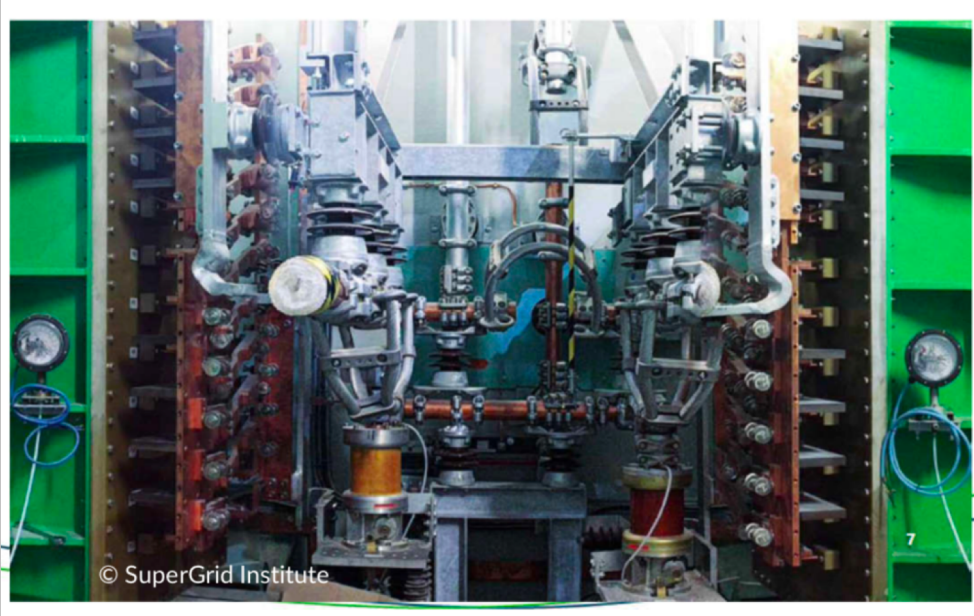
Température: -60°C à +60°C

Humidité: 20% - 95%

Essais sous glace

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Wolfgang Grieshaber - *Disjoncteurs haute tension AC : enjeux et moyens d'essais*
Super Grid Institute, Villeurbanne



Capacité du labo

50 000A pour disjoncteur d'alternateurs
sans alternateur : 80kA – 3s ; 160kA crête

Isolation

Tenue diélectrique entrée-sortie & phase - terre

Application des tensions les plus hautes

Générateur de choc 2.5 MV

50Hz: 1MV

DC: 1MV

Répartition de tension entre chambres avec anneaux / capas



2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Wolfgang Grieshaber - *Disjoncteurs haute tension AC : enjeux et moyens d'essais*
Super Grid Institute, Villeurbanne

Etablissement & coupure
Sur Courant capacitif

Etablissement & coupure
Défaut aux bornes

Etablissement & coupure
Défaut proche en ligne

Etablissement & coupure
Circuit d'essai direct

Source de courant 2 x 2500 MVA

Puissance maximale: 145kV, ~30kA, monoph.

Mais performances d'appareils sont bien supérieures ! □420kV, 63kA



Etablissement & coupure

Circuit d'essai synthétique (injection de courant)

Source de courant 80kA (eff), 11kV (eff), 50Hz

Source de tension ~900kV (crête), 20kA (crête), 500Hz

~0.3ms avant zéro de courant d'alternateur

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Patrice Joyeux - Coupure basse tension et moyen d'essai
HAGER, Obernai

1.01- La coupure AC basse tension

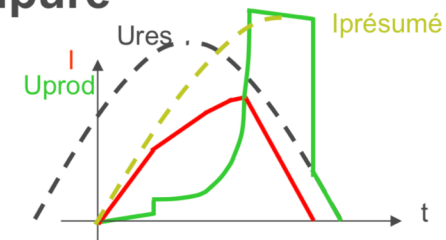
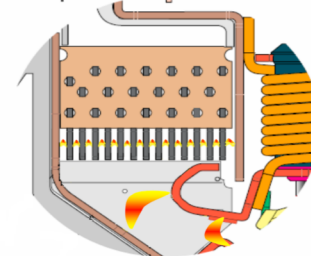
- Le disjoncteur
- Les courants de court-circuit
- Les produits limiteurs
- Les phases et les défauts d'une coupure

2.02- Les moyens de diagnostics

- Les mesures électriques
- Les mesures optiques
- La cameéa magnétique

Les phases et les défauts d'une coupure

Une coupure parfaite

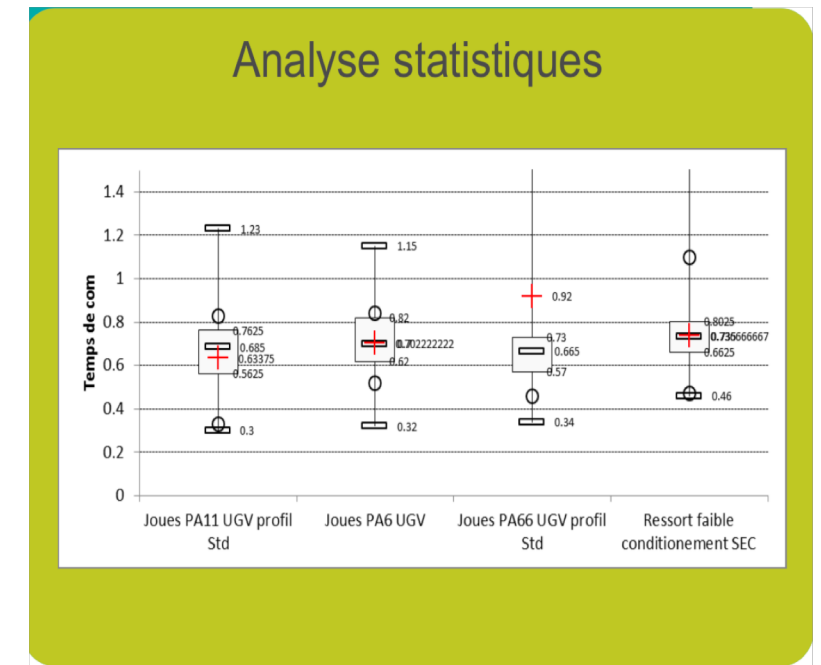
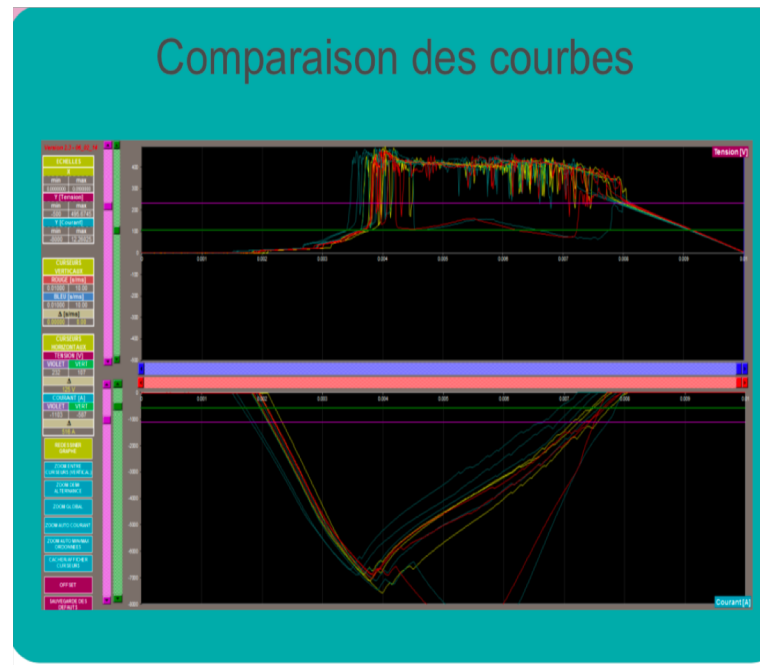
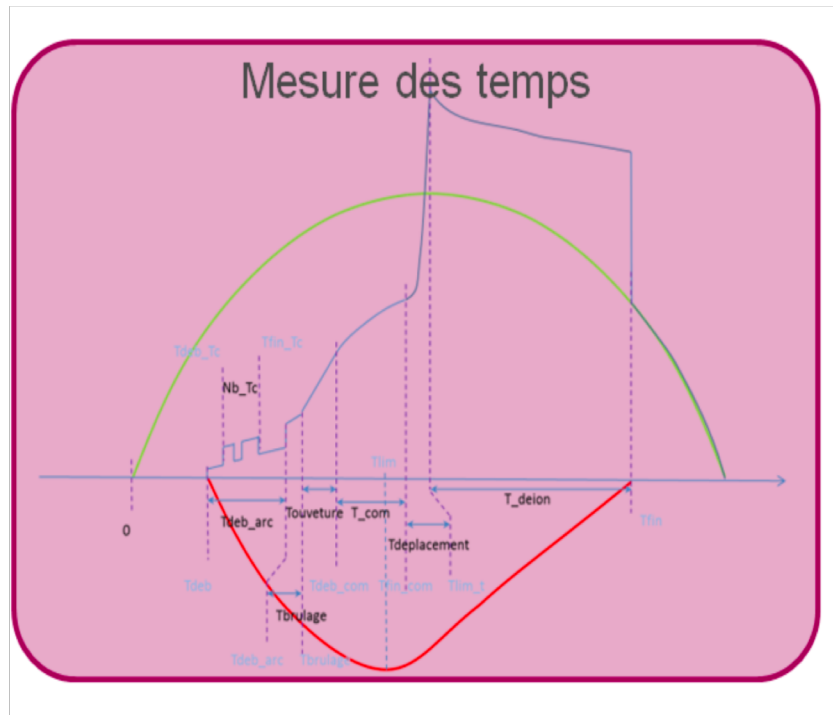


Problématique : ré-allumage - non départ de l'arc

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Patrice Joyeux - Coupure basse tension et moyen d'essai
HAGER, Obernai

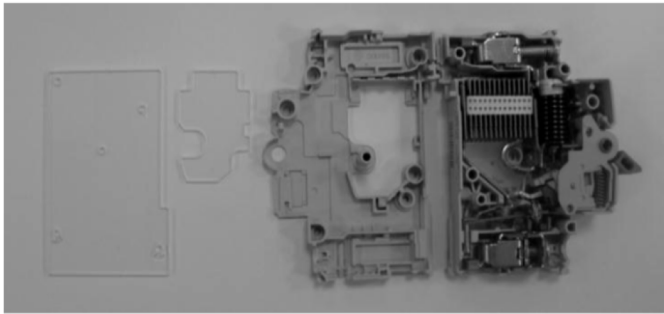
Les moyens de diagnostics Les mesures électriques



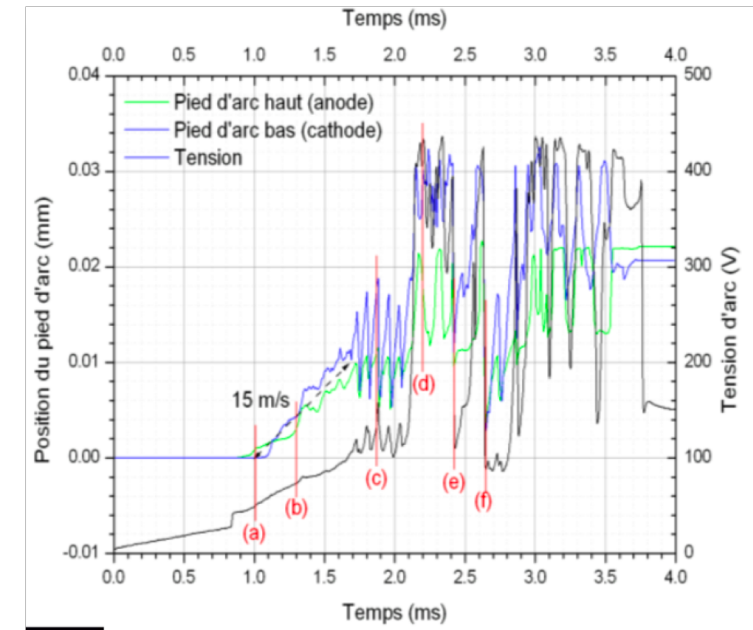
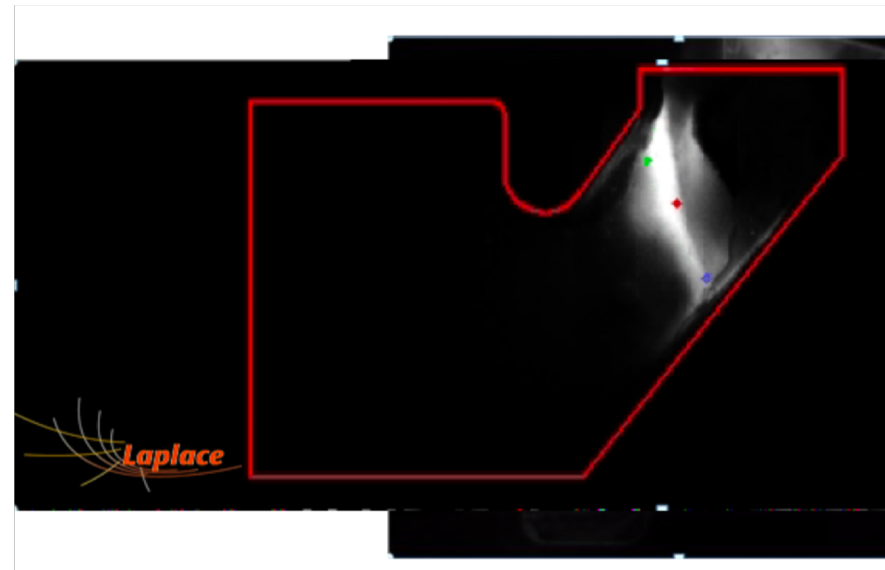
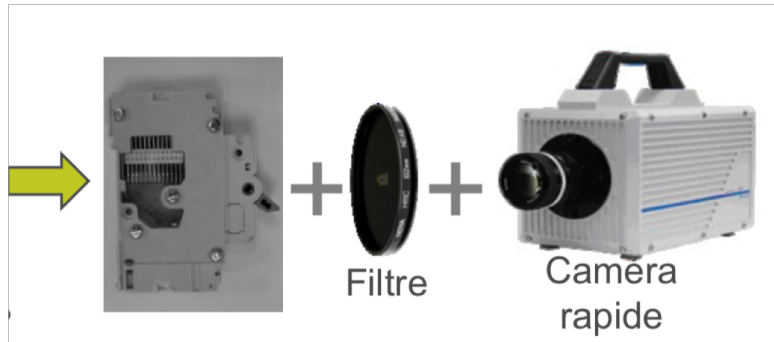
2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Patrice Joyeux - Coupure basse tension et moyen d'essai
HAGER, Obernai

Les moyens de diagnostics Les mesures optiques



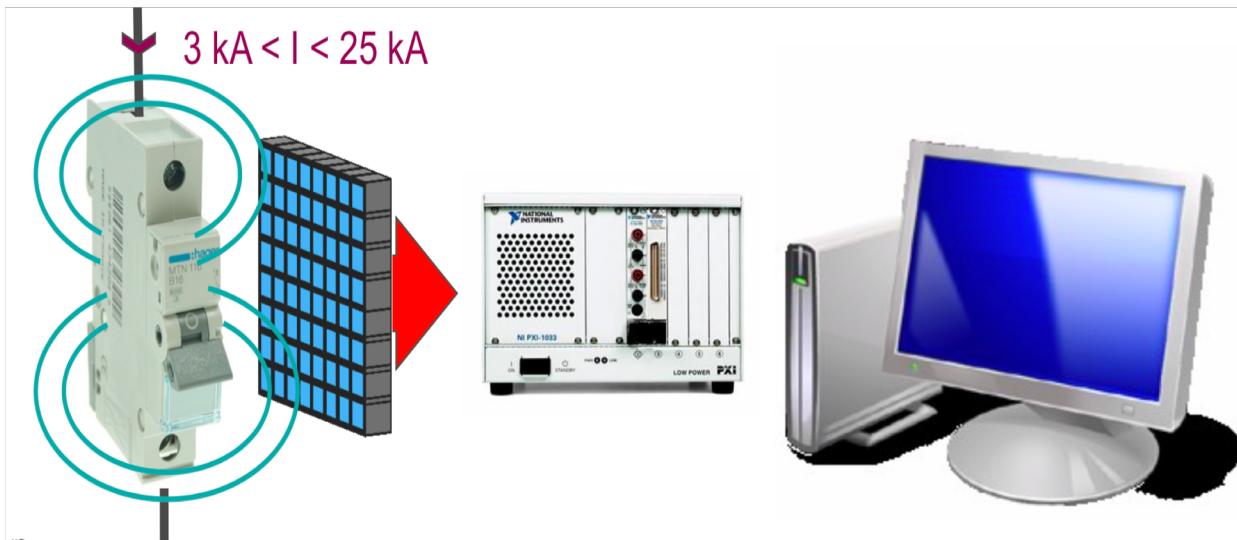
Short circuit test : 6kA 45°



2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Patrice Joyeux - Coupure basse tension et moyen d'essai
HAGER, Obernai

Les moyens de diagnostics La caméra magnétique (méthode inverse)



Jusqu'à 2 millions d'images par seconde
208 bobines
216 voies différentielles synchrone en 16bits

**Nous pouvons suivre le déplacement de
l'arc et du contact mobile**

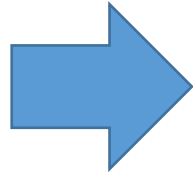


2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Philippe Robin-Jouan - Statut des développements et techniques de la coupure AC pour les disjoncteurs haute tension chez General Electric, Villeurbanne

Enjeux environnementaux

- Remplacement SF₆
- G₃ (C₃F₇CN ou C₄F₇N)



NovecTM 4710 +CO₂ : réduction significative du potentiel d'échauffement global du gaz tout en présentant de très bonnes propriétés diélectriques équivalentes à celle du SF₆ pour des températures allant jusqu'à -25°C.

Les derniers projets g₃ (145kV 40kA) réussissent l'ensemble des essais de coupure.

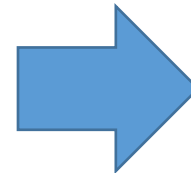
Nouveaux projets en cours (50kA, 63kA)

La solution g₃ est donc une solution de remplacement démontrée fiable.

Enjeux technologiques

L'évolution actuelle de la technologie est marquée par:

- une technologie confirmée de la coupure par auto-soufflage
- la réduction des énergies de manœuvre (double mouvement)
- la réduction du nombre de chambres de coupure par pôle
- l'introduction de l'électronique pour des fonctions d'autodiagnostic.



Usage important de la simulation numérique pour le design des chambres de coupure:

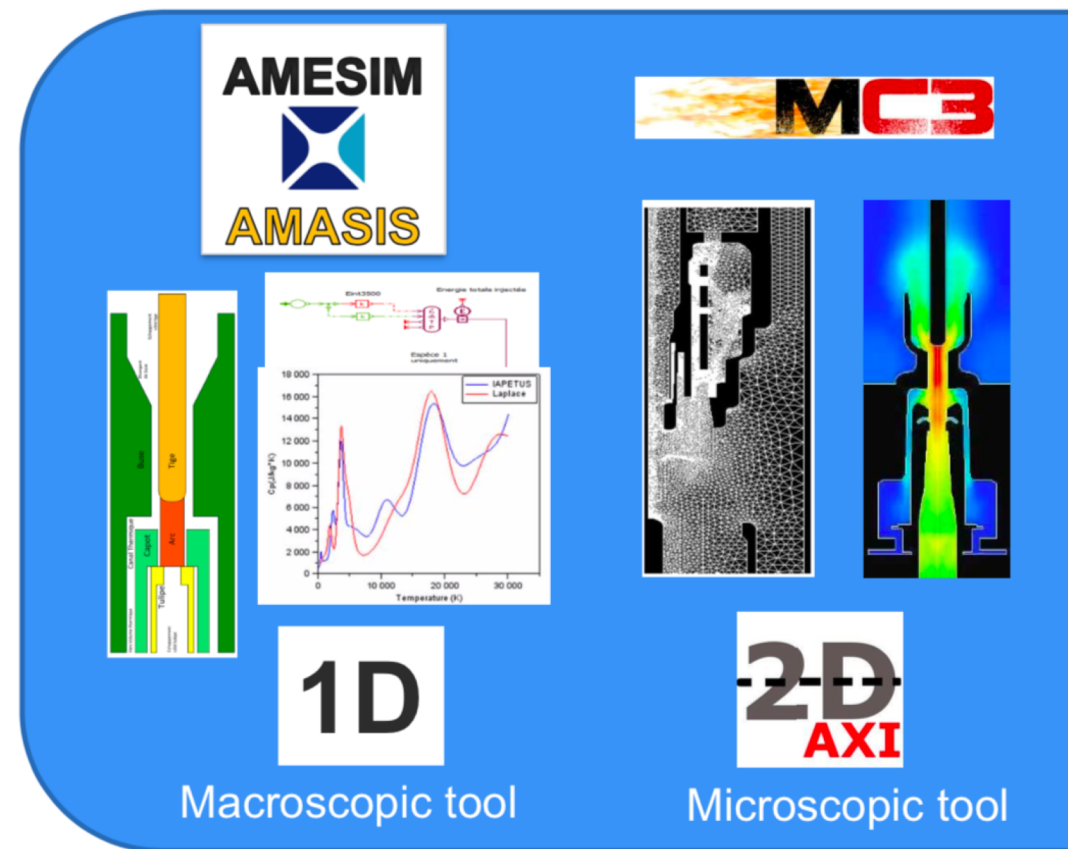
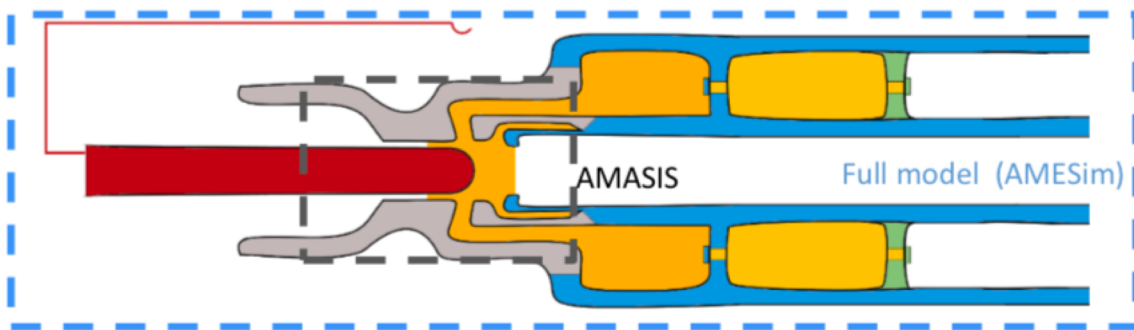
2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Philippe Robin-Jouan - Statut des développements et techniques de la coupure AC pour les disjoncteurs haute tension chez General Electric, Villeurbanne

Approche 0D: AMASIS

Arc Model for AMESim Interrupting Simulation

- Simulation Macroscopique (1D) de l'arc
- Couplage fort avec les modèles mécaniques (AMESim)
- Interconnexion avec la simulation numérique FEM



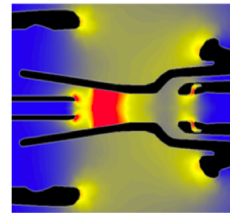
Simulation hybride

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

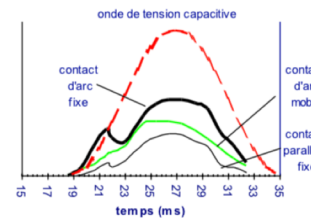
Philippe Robin-Jouan - Statut des développements et techniques de la coupure AC pour les disjoncteurs haute tension chez General Electric, Villeurbanne



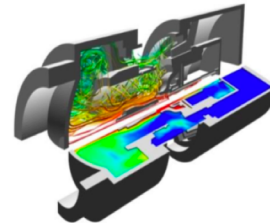
Critère dielectrique fiable E/n



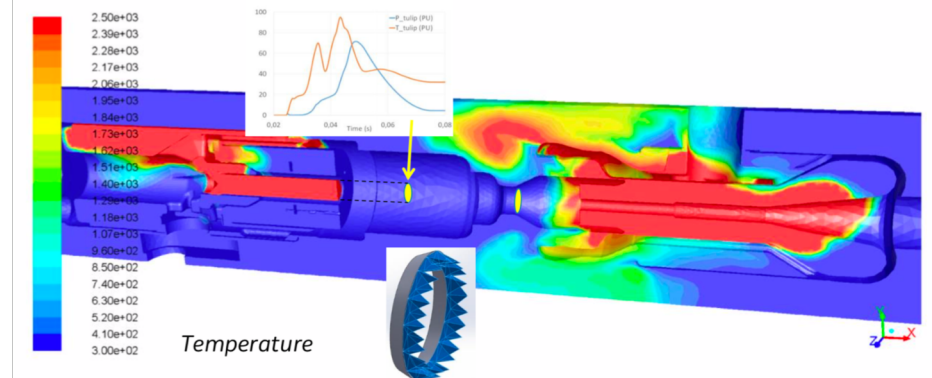
Ecart non négligeable avec les résultats d'essais



Critère dielectrique fiable E/n
(théorie leader-streamer theory)



LT 145kV 40kA

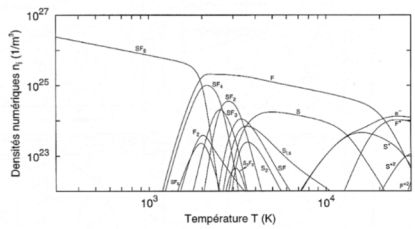


2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Philippe Robin-Jouan - Statut des développements et techniques de la coupure AC pour les disjoncteurs haute tension chez General Electric, Villeurbanne

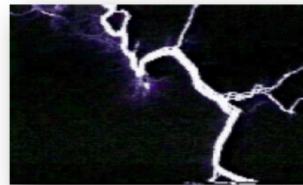
Enjeux de demain

Propriétés des Gaz (g3)



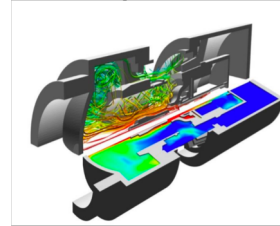
Données fondamentales
peu de validation

Critères de tenue



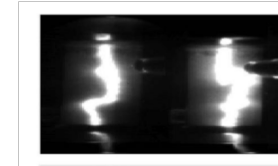
Limitation théorique
pas de réel diagnostic

3D + Temps de résolution



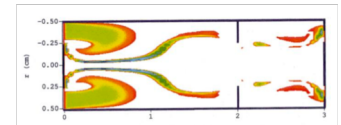
3D prohibitif
optimisation requise
configuration 3D fréquente
et nécessaire

Turbulence



Fort impact
pas de modèles adaptés
pas de diagnostic

Déséquilibre

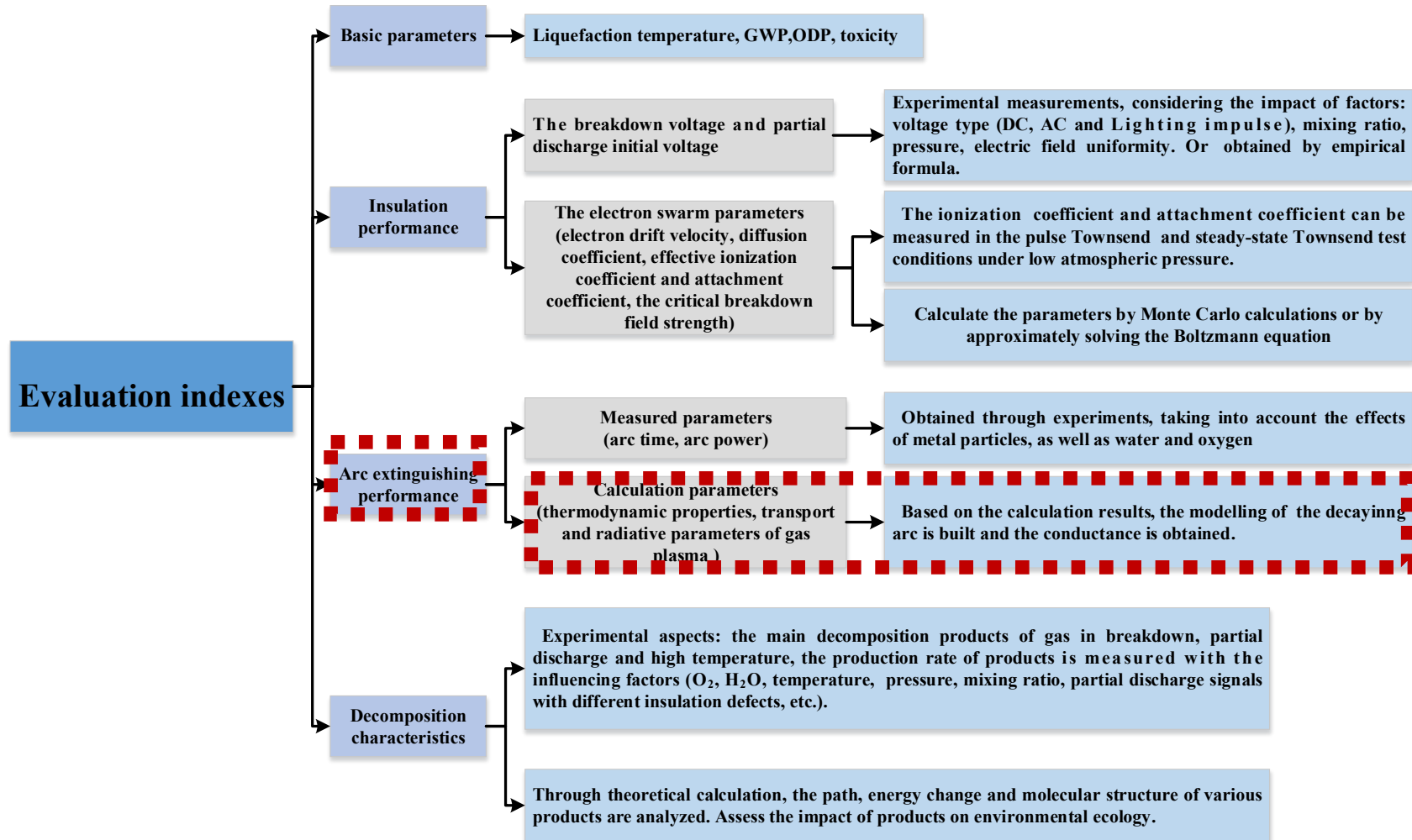


Modèles complexes
pas d'application réelle
influence confirmée

2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Yann Cressault - *Propriétés thermiques des plasmas d'arc dans les disjoncteurs HT*
Laboratoire Laplace, Toulouse

Comparaison propriétés SF6 avec celles de gaz alternatifs



2^{ème} journée sur la coupure AC : 9 presentations

Yann Cressault - Propriétés thermiques des plasmas d'arc dans les disjoncteurs HT
Laboratoire Laplace, Toulouse

Comparaison propriétés SF6 avec celles de gaz alternatifs

Gaz	Boiling temperature	GWP/ODP	Insulation	Interruption	Decomposition	Application
SF ₆	good	Not good	Very good	Very good	Not good	GIS/GIL/GCB/GIT
N ₂	G	G	NG	NG	--	C-GIS
air	G	G	NG	NG	--	C-GIS
CO ₂	G	G	NG	NG	--	C-GIS
SF ₆ +N ₂	G	G	E	NG	G	GIL/C-GIS
SF ₆ +CO ₂	G	G	E	NG	G	--
SF ₆ +CF ₄ / +C ₂ F ₄	G	G	E	E	G	GCB
c-C ₄ F ₈ mixtures	NG	G	E	NG	NG	--
C ₃ F ₈ mixtures	NG	G	E	NG	--	--
C ₂ F ₆ mixtures	NG	G	NG	NG	--	--
CF ₄	NG	G	NG	NG	--	--
CF ₃ I mixtures	NG	G	E	NG	NG	--
C ₃ F ₇ CN+CO ₂	NG	G	E	E	G	GIL/GIS
C ₅ F ₁₀ O +air	NG	G	E	E	G	MV GIS
C ₆ F ₁₂ O mixtures	NG	G	E	--	G	--

G signifie « propriétés supérieures » au SF₆, **E** signifie « propriétés équivalentes » au SF₆, **NG** signifie « propriétés inférieures » au SF₆

A renouveler en 2020 ou 2021



Merci à l'AAE