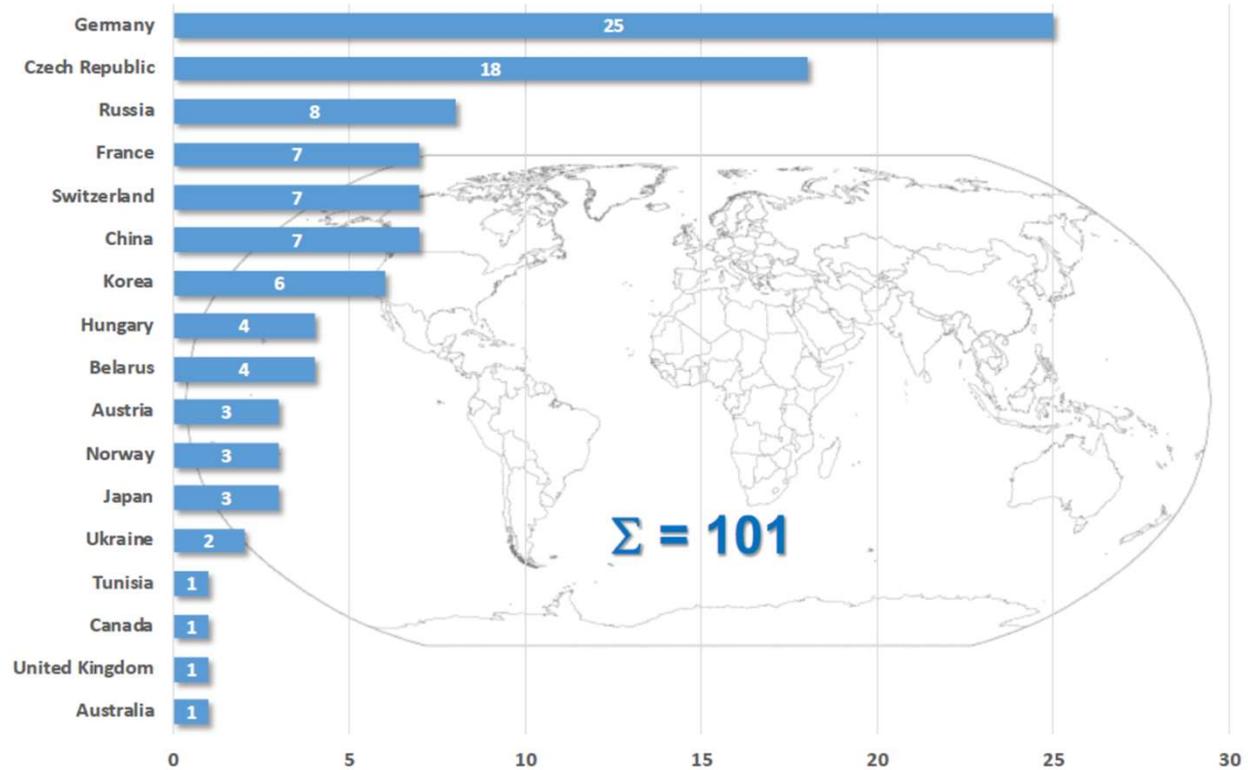


Quelques chiffres



Depuis quelques années un certain nombre de non européens

XXIIIrd Symposium on Physics of Switching Arc
participants



4 grandes thématiques abordées

1. Disjoncteurs basse tension/DC

- Invited lecture :

Ch. Rümpler Arc modeling in industrial applications

Ch. Franck (CH) Advanced switching arc investigations using a flexible pulsed current source

K. Wenzlaff (DE) New Methods for the Detection of High-current Arc Faults in Low voltage Installations

- Lectures : 4

- Posters : 6

2. Disjoncteurs haute tension/moyenne tension

- Invited lecture :

P. Robin-Jouan (Fr) G3, a reliable solution for high voltage insulation: 3 year report

Y. Cressault (Fr) State of art and challenges for the calculation of radiative and transport properties of thermal plasmas in HVCB

- Lectures : 9

- Posters : 8

4 grandes thématiques abordées

3. Disjoncteurs dans le vide

- Invited lecture

N. Wenzel (DE) Vacuum circuit breaker for climate neutral switching of high currents at high voltages

- Lectures : 0

- Posters : 5

4. Physique de l'arc/divers

- Invited lecture

Yi Wu (CN) Switching Arc Behavior and its Erosion on Electrode in Gas Medium

Y. Tanaka (JP) Fundamental study on chemical non-equilibrium phenomena in decaying arcs by numerical simulation and experimental approaches

J.J. Lowke (AU) From Switching Arcs to Ball Lightning to Curing

- Lectures : 5

- Posters : 11 (22 – mais pas accessibles)

4 grandes thématiques abordées

1. Disjoncteurs basse tension/DC

Invited lecture: 4

Lectures : 4

Posters : 6

Quelques éléments d'analyse :

- Apparition de quelques papiers DC mais pas à la mesure de l'enjeu industriel à venir
- Développement de modèles de plus en plus physiques
- Rapprochement dans les modèles de géométries industrielles (mouvement de pièces, séparateurs)
- Problématique des contacts

4 grandes thématiques abordées

2. Disjoncteurs haute tension/moyenne tension

Invited lecture: 8

Lectures : 9

Posters : 8

Quelques éléments d'analyse :

- Problématiques des gaz de remplacement du SF₆ (Plutôt modèle et données de base)
- Problématique des ablations électrodes/nozzle (expé et modèle)
- Approche 2T
- Quelques papiers « black – box » recherche de modèles simplifiés

4 grandes thématiques abordées

3. Disjoncteurs dans le vide

Invited lecture: 1

Lectures : 0

Posters : 5

Quelques éléments d'analyse :

- Effet de Niche, peu de personnes en définitive sur la thématique
- Problématique de remplacement du SF6
- Adaptation pour les HT
- Essentiellement des papiers expérimentaux

4 grandes thématiques abordées

4. Physique de l'arc/divers

Invited lecture: 3

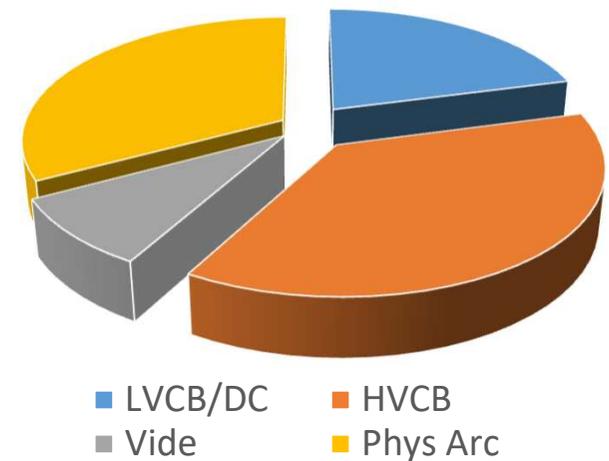
Lectures : 5

Posters : 11 (22)

Quelques éléments d'analyse :

- Problématiques hors équilibre
- Problématique de développement de modèles validés
- Problématique d'érosion des électrodes
- Calcul de rayonnement et de propriétés (CZ)

Répartition FSO 2019



Invited lecture: 4

Lectures : 4

Posters : 6

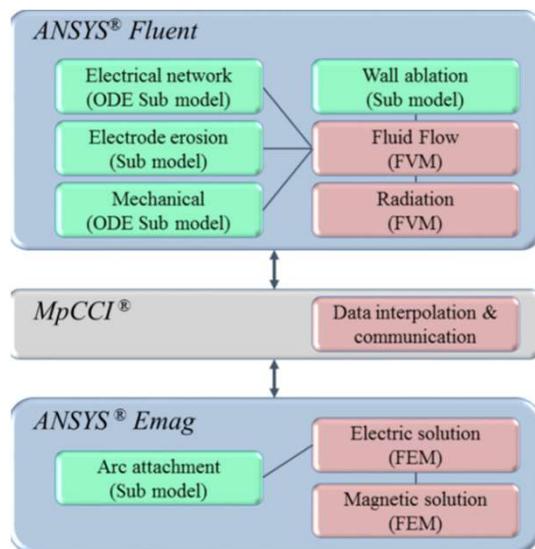
Quelques éléments d'analyse :

- Apparition de quelques papiers DC mais pas à la mesure de l'enjeu industriel à venir
- Développement de modèles de plus en plus physiques
- Rapprochement dans les modèles de géométries industrielles (mouvement de pièces, séparateurs)
- Problématique des contacts

Conférence invité, eaton company, modélisation physique

Points intéressants

- Développement de modèles appliqués LVCB et MCCB
- Utilisation d'Ansys Fluent + Ansys EMAG => **Couplage explicite**



Développement de sub model via UDF:

- Modèle plasma
- Modèles d'érosion (Electrodes, plastique)
- Modèles de rayonnement

Semble intéressant mais rien n'est vraiment décrit

3 applications décrites:

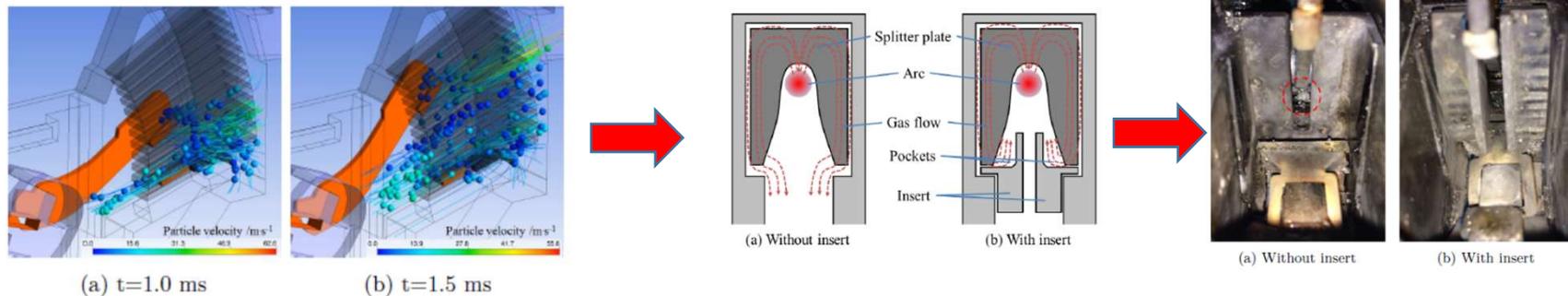
- Prédiction des trajectoires de débris dans LVCB
- Refroidissement des exhausts d'un MCCB
- Surge arrester

Conférence invité, eaton company, modélisation physique

Prédiction des trajectoires de débris dans les LVCB

- Problématique : Des gouttes liquides de métal viennent ensemençer le dispositif

Utilisation des résultats fluides avec un modèle de transport de particules



- Gouttes créées à partir d'un seuil de J
- Modèle de transport malheureusement pas décrit

Self-consistent modeling of electrode motion in a model circuit breaker

R. Fuchs (CH)

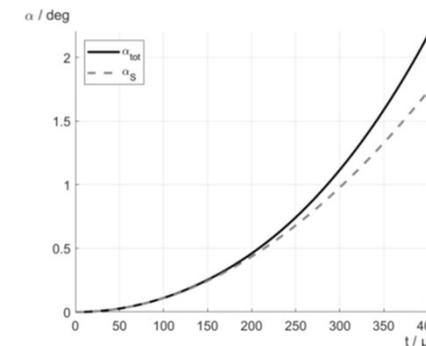
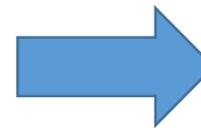
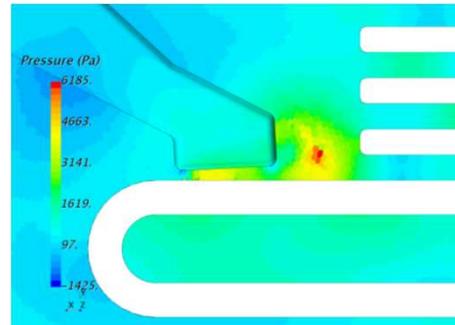
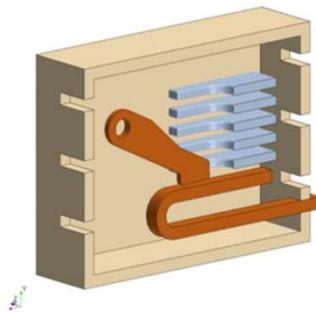
Problématique mouvement pièce: Modélisation des mouvements des contacts

Type: Modèle CFD

Configuration

Présentation d'une modélisation de LVCB, et en particulier d'un sous modèle de mouvement de la pièce

Méthodes, résultats



- Proposition d'un modèle pour le mouvement du contact dépendant d'un modèle mécanique
- Utilise le ressort, la pression plasma et la force de lorentz
- Utilisation **star-CCM+** idem à siemens

Conclusion

Les forces de lorentz viennent corriger l'effet de la force mécanique (ressort) en fin de course

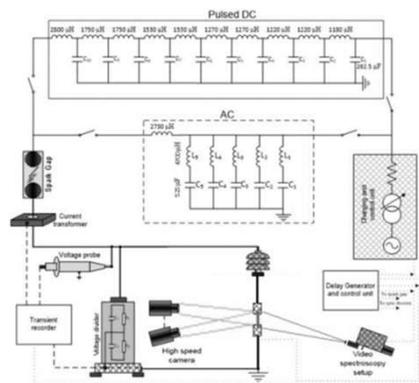
Problématique contact: Ablation du cuivre, comprendre le comportement pour améliorer la surface contre l'érosion

Type: Expérimental

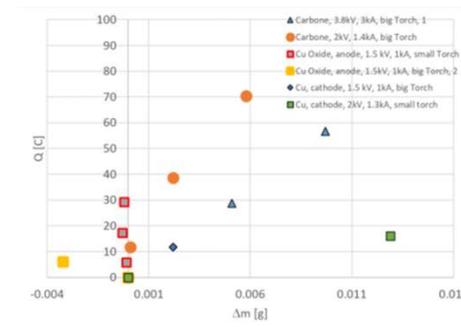
Configuration

Dépôt de CuC (sous argon) ou CuC (sous air), étude des différences en terme d'ablation entre Cu pur et les dépôts

Méthodes, résultats



Résultat de pesée



- Alim maison AC/DC (50Hz, qq kA)
- Imagerie
- Spectro
- Pesage

- Le cuivre s'ablate le plus
- Le CuC déposé dans l'air s'ablate le moins à cause probablement des oxydes
- A chaque fois le dépôt s'en va et le lien avec le support est à améliorer

Invited lecture: 8

Lectures : 9

Posters : 8

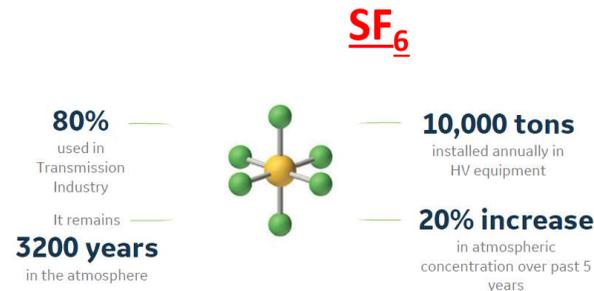
Quelques éléments d'analyse :

- Problématiques des gaz de remplacement du SF₆ (Plutôt modèle et données de base)
- Problématique des ablations électrodes/buses (expé et modèle)
- Approche 2T
- Quelques papiers « black – box » recherche de modèles simplifiés

Conférence invité, gaz de remplacement

Points intéressants

Rappel de la problématique environnementale



Avancées des études sur le G3 (NOVEC 4710 C3F7CN Fluoronitrile) et comparaison avec SF6 sur plusieurs points:

- La tenue diélectrique => Novec pur = 2 fois supérieure au SF₆
- Le point de liquéfaction (-4°C) => Nécessité de mélanger à du CO₂
- La stabilité chimique du gaz (bonne jusqu'à 800°C) => bien
- La présence de poudres de graphite dans du CO₂ pur => Ajout d'oxygène (10%)
 - Oxygène diminue aussi la présence de poudres métalliques « pures » en créant des fluorides

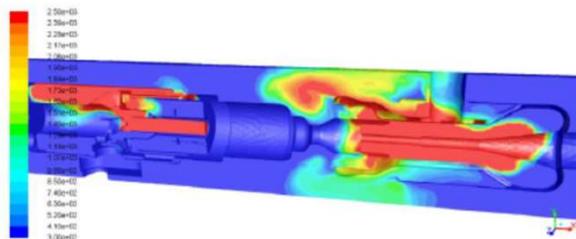
Conférence invité, gaz de remplacement

Points intéressants

Peut on utiliser directement les dispositifs existants?

- Test sur un dispositif à 72kV, 72kV, gap 60mm max => coupure à 22ms SF6; 60 pour CO2 et 34 pour NOVAC (mélange)
- Pas d'adaptation de la partie mécanique
- Adaptation nécessaire de la géométrie au niveau des volumes d'exhausts qui doivent être agrandis

Avec Novec Nécessité de refaire des tables thermo et des tests CFD & des test réels



- Test sur 22 sites (145kV- 420kV)
 - Bon retours mais encore des choses à faire pour monter en tension
- Gros impact environnementale
 - Pour un dispo avec 60kg SF6 empreinte de 1400T eq CO2 contre 17T Novec+CO2

State of art and challenges for the calculation of radiative and transport properties of thermal plasmas in HVCB

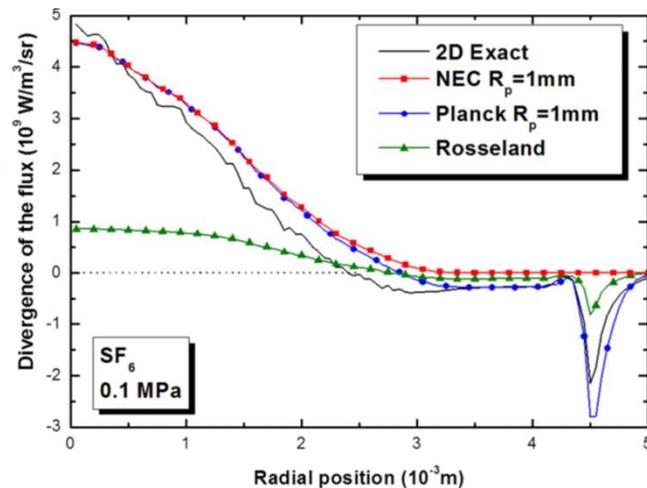
Y. Cressault (FR)

Conférence invité, physique 2T

Points intéressants

Propriétés thermodynamiques, de transport et de rayonnement des plasmas à l'équilibre

- Rappel des méthodes utilisées « classiquement »
- Rappel des différentes moyennes utilisées pour estimer les coefficients d'absorption et leurs effets sur la divergence du flux radiatif



Quelques éléments d'importance

- Techniques bien connues
- Prise en compte des hautes pressions
- 1% vapeur métalliques dans les mélanges change beaucoup les propriétés
- Challenge pour les nouveaux mélanges

State of art and challenges for the calculation of radiative and transport properties of thermal plasmas in HVCB

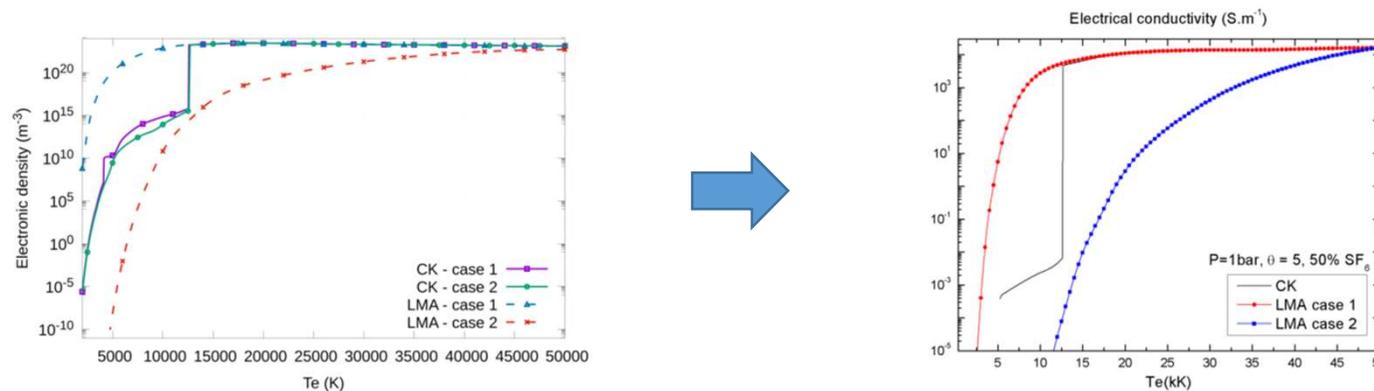
Y. Cressault (FR)

Conférence invité, physique 2T

Points intéressants

Propriétés hors-équilibre chimique et thermique

- Deux approches : Loi d'action de masse, cinétique chimie avec des différences entre les deux



Quelques éléments d'importance

- Quelle théorie choisir?
- Comment faire pour le rayonnement? Les lois de Kirchoff et de Planck sont des approximations à 2T, comment traiter les émissions de raies atomiques à 2T?
- De nouveaux modèles utilisés pour la ré-entrée atmosphérique.

Breakdown in CO₂ and CO₂/C₂F₄ mixtures at elevated temperatures in the range 1000...4000 K

M. Seeger (CH)

Problématique gaz de remplacement: Mesure de champs critiques

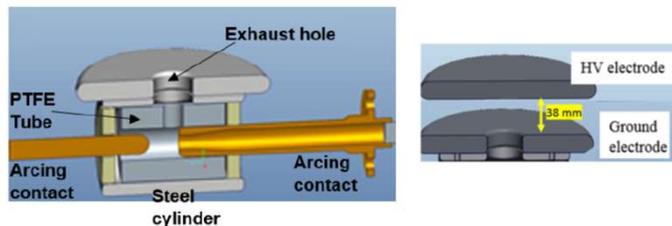
Type: théorique et expérimental

Configuration

Sur-tension perpendiculaire à l'arc

Pic 4/5kA, gap 35mm, 1,2,4,bar arcing time = 25ms, HV jusqu'à 250kV
mesure de la température par celle des suies. Test HV up to 250kV sous

Méthodes & résultats



- Calcul de champ critique par résolution de l'équation de Boltzman (compo LTE + Bolsig + Section efficaces Lx_{cat})
- Mesure du champ de claquage pour différents gaz avec observation du claquage par caméra

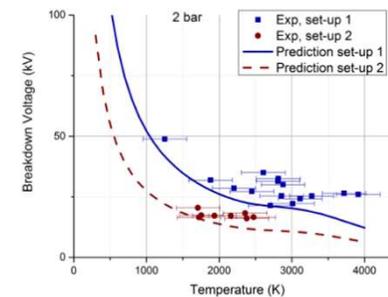


Figure 3. Breakdown voltages in CO₂/O₂ mixture vs temperature at 1 and 2 bar.

Conclusion

- Le champ critique représente la limite inférieure
- Les ordres de grandeurs sont là

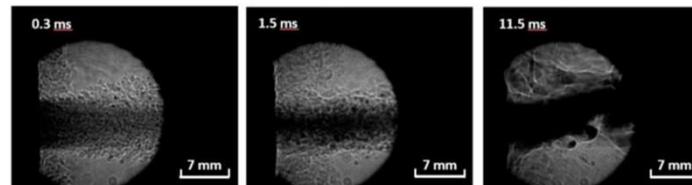
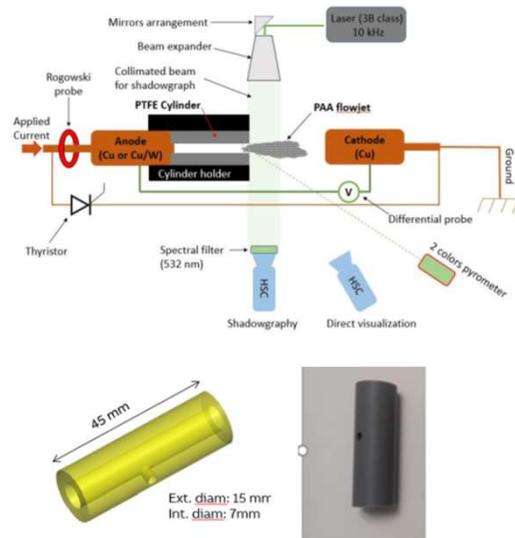
Experimental assessment of PTFE post-arc ablation

Y. Babou (CH)

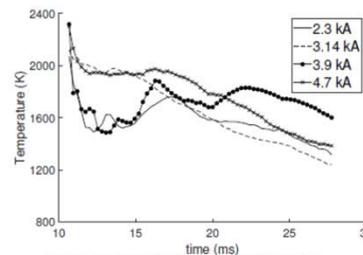
Problématique ablation des buses: ablation post arc (\sim qq ms) du PTFE dans l'air
Type: expérimental, analyse du comportement de l'ablation du PTFE recouvrement diélectrique

Configuration Une tuyère en téflon avec un arc transféré – AC-DC 1.5-3kA
Imagerie, analyse poudre par spectro X, pyrométrie et méthode inverse

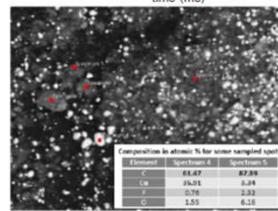
Méthodes & résultats



Enormément de suies de carbone



- Jet de particules entre 1000K et 2400K
- Présence de pas mal de cuivre dans les suies



Prémices d'une caractérisation post arc

3-Influence of copper vapors in SF6 plasma

P. Freton (FR)

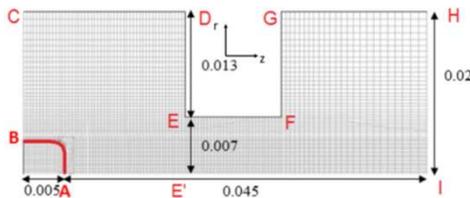
Problématique ablation des électrodes: Ablation des électrodes dans HVCB

Type: Modélisation CFD

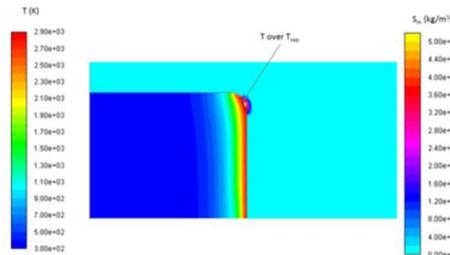
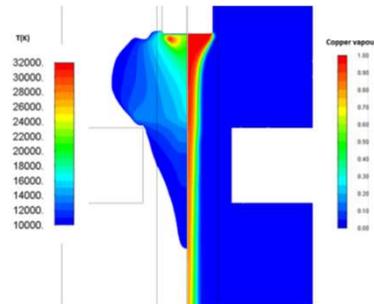
Configuration

Configuration pilote d'un arc dans du SF6, ablation de l'anode
10kA – 50Hz

Méthodes & résultats



- Deux comportements pour l'ensemencement:
 - Diffusion si $T_s < T_{vap}$
 - Ablation si $T_s > T_{vap}$



- Quelques résultats
 - Cuivre ablaté à l'angle
 - Même si peu d'ablation Le plasma brule dans le cuivre
 - Forme du champ de température particulier

Laisse penser qu'il est nécessaire de prendre en compte l'ablation du cuivre dans les modélisations HVCB

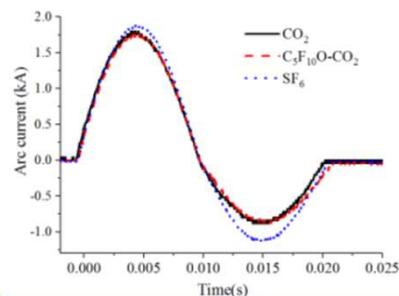
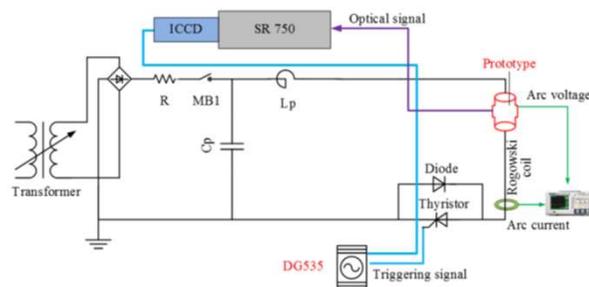
Experimental Investigation on the Arc Characteristics and Arc Quenching Capabilities of C5F10O-CO2 Mixtures

B. Zhang (CN)

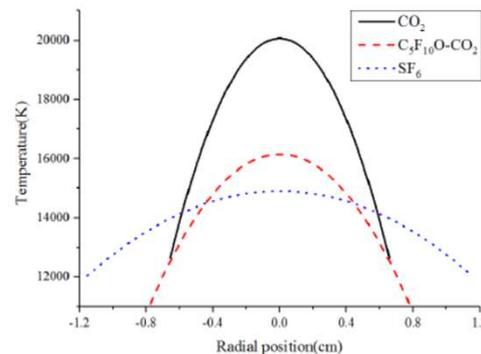
Problématique: Caractérisation de la phase arc dans un mélange 28% fluoroketone 72%CO2
Type: Expérimental, mesure spectro, amorçage fil fusible cuivre

Configuration Arc transféré, courant sinusoïdal ~2kA max
Inversion Abel, mesure Cul et Boltzman

Méthodes & résultats



- Mesures spectros
 - Inversion d'Abel
 - Bonne descriptions des appareils utilisés
 - Obtention de la température du milieu



Conclusion

La présence de Fluoroketone diminue grandement la température de l'arc. Le comportement se rapproche de celui du SF6

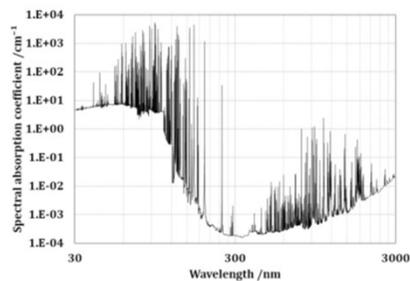
Problématique: Propriétés radiative mélange 90%CO2- 10%fluoronitrile

Type: Calcul de données de base + Modèle CFD

Configuration

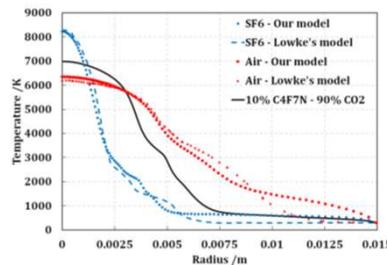
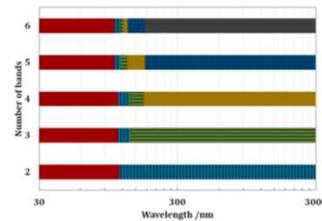
Calcul coefficient d'absorption moyen, comparaison entre différents gaz – Comparaison CFD de différents mélanges sur un arc libre (2cm 10A)

Méthodes & résultats



Absorption à 10kK

Atoms	N, O, C, F
Molecules	N ₂ , O ₂ , O ₃ , NO, C ₂ , C ₃ , C ₄ , CO, CN, CO ₂ , CN ₂ , C ₂ N, C ₂ N ₂ , C ₂ O, C ₃ O ₂ , F ₂ , CF, C ₂ F ₂ , C ₂ F ₄ , C ₂ F ₆ , CF ₂ , CF ₃ , CF ₄ , NF, NOF, NO ₂ F, FNO ₃ , NF ₂ , N ₂ F ₂ , F ₂ O, F ₂ O ₂ , NF ₃ , NOF ₃ , N ₂ F ₄ , NO ₂ , N ₂ O, COF ₂
Electron and ions	e, N ⁺ , N ²⁺ , N ³⁺ , N ₂ ⁺ , O ⁺ , O ²⁺ , O ³⁺ , O ₂ ⁺ , NO ⁺ , C ⁺ , C ²⁺ , C ³⁺ , CO ⁺ , CN ⁺ , F ⁺ , F ²⁺ , F ³⁺



- Calcul de 10^{12} à 10^{16} Hz ; step $2 \cdot 10^{10}$ Hz
- Découpage optimisé (sur le flux et la div du flux (2 à 6 bandes)
 - 2 bandes ~12% erreur; 6 bandes~2.5% erreur
- Calcul CFD avec Ansys (DOM)
- On retrouve les tendances exp du papier précédent

27-Analysis of C2 Swan Bands in Ablation-Dominated Arcs in CO2 Atmosphere

HVBCB

R. Methling (DE)

Problématique: ablation du PTFE en présence de CO2

Type: expérimental, arc transféré

Configuration Arc transféré de qq kA, tuyère en téflon, électrode CuW, l=40mm
Mesure spectro émission et absorption (autour de CZ)

Méthodes & résultats

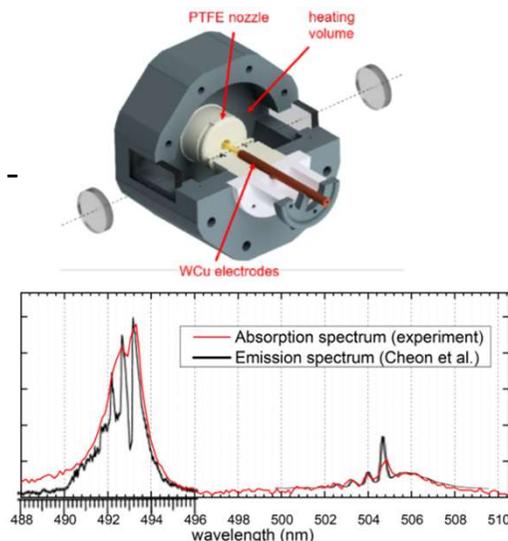


Figure 4. Absorption spectrum around current zero and comparison with emission spectra of CuF molecules from [15].

Les tendances:

- Au départ : Observation de raies atomiques CuI, OI
- Puis quand le courant augmente : FI, C2 swan band à haute température et C2 continuum sur les bords dominant, présence de CII mais pas de Cu? Le gaz est chassé par la montée en pression due à l'ablation du PTFE
- Autour du CZ : absorption pas en accord avec de l'absorption dû à du C2 suspicion d'absorption de la molécule CuF pour laquelle peu de données sont disponibles

Papier basé sur des observations expérimentales difficiles à analyser

Invited lecture: 1

Lectures : 0

Posters : 5

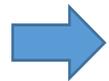
Quelques éléments d'analyse :

- Effet de Niche, peu de personnes en définitive sur la thématique
- Problématique de remplacement du SF6
- Adaptation pour les HT
- Essentiellement des papiers expérimentaux

Conférence invité arcs dans le vide pour la HT

Points intéressants

Problématique : green pour les disjoncteurs HT/MT, stratégie de Siemens d'essayer en explorant les solutions dans le vide



Pas possible de récupérer la présentation, pas de papier mais donne une tendance

- CIGRE 2018 : Le vide est un des bon candidat pour la prochaine génération de HVCB
- Vide plus pour MV et LVCB mais peut monter à 145kV depuis 2018, espère monter à 245kV/>100kA, nouveau design
- Nécessité de contrôler l'arc à la cathode => doit être diffus, la courbe d'ouverture du contact doit être contrôlée ce qui contrôle la TRV
- Nécessité de contrôler la rigidité diélectrique car il y a des claquages dans le tubes mais aussi en dehors
- Le disjoncteur dans le vide produit des Rayons X ce qui est un problème
- => pas De CO2!!

Invited lecture: 3

Lectures : 5

Posters : 11 (22)

Quelques éléments d'analyse :

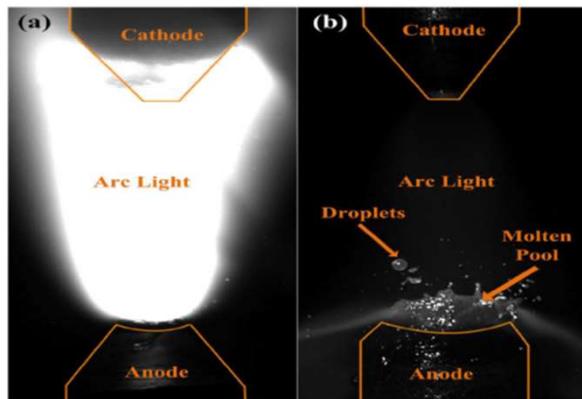
- Problématiques hors équilibre
- Problématique de développement de modèles validés
- Problématique d'érosion des électrodes
- Calcul de rayonnement et de propriétés (CZ)

Conférence invité, Xiaotong University State Key lab, ablation des électrodes

Points intéressants

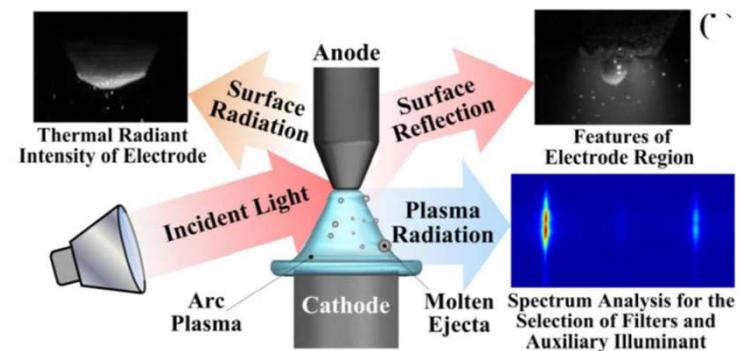
Problématique d'ablation de l'arc :

- Comment l'érosion influence l'arc?
- Prédiction de la durée de vie des contacts
- Propose des hypothèses sur les mécanismes d'érosion



Arc~400A 70ms

Beaucoup de diagnostics utilisés



Mesures imagerie difficile

- Filtres pour observer des phénomènes différents
- Observation de pas mal de gouttes liquides

Switching Arc Behavior and its Erosion on Electrode in Gas Medium

Yi Wu (CN)

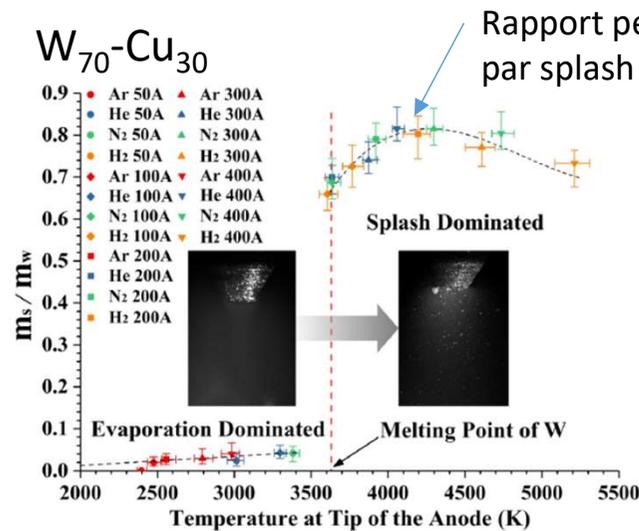
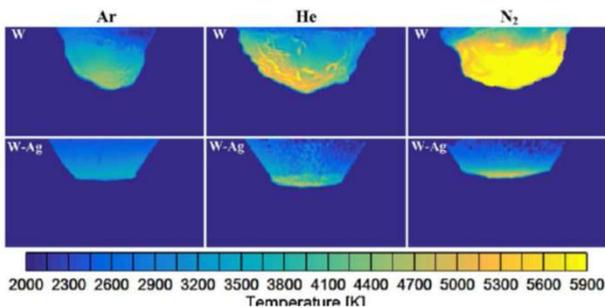
Conférence invité, Xiaotong University State Key lab, ablation des électrodes

Points intéressants

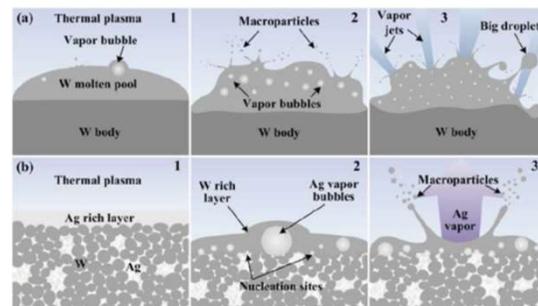
Etude de différents matériaux

- Tungstène-Cuivre
- Tungstène-Cérium
- Tungstène pure
- Tungstène argent

Comparaison W et W/Ag



Observation de deux régimes dont un avec grosses particules liquides Arc~400A 70ms



La formation de gouttes d'argent refroidit l'anode mais réduit aussi le transfert thermique

08-Fundamental study on chemical non-equilibrium phenomena in decaying arcs by numerical simulation and experimental approaches

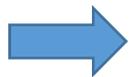
Y. Tanaka (JP)

Conférence invité, experimental et théorique, hors équilibre

Points intéressants

Point de vue de la présentation: nouveaux gaz pour les VCB en gardant les propriétés de coupure
Réponse par son réseau de collaboration modèle & expérience

- Numerical modeling of arc plasmas
- Design and manufacture of a model circuit breaker for experiments
- Experiments: Arc voltage, Interruption probability, TRV application, Dielectric recovery properties, Arc behaviors by a high high-speed video camera
- Electron density measurement by laser Thomson scattering (LTS) method
- #2D measurement of electron density by Shack
- Shack-Hartmann (SH) method



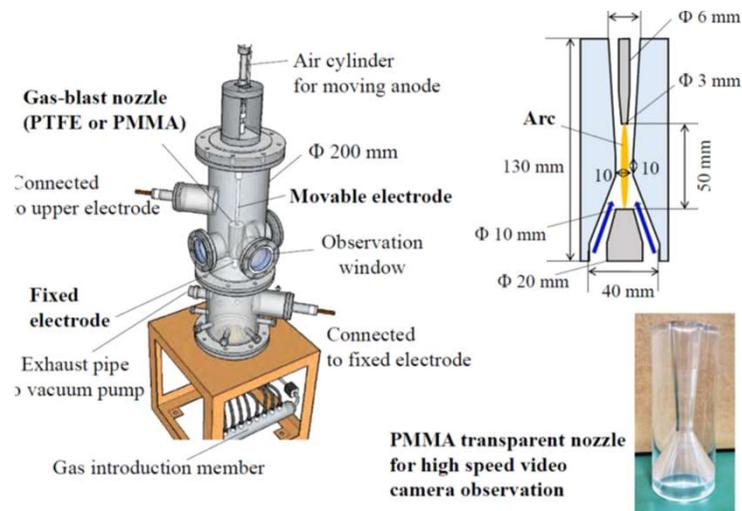
Beaucoup d'informations

08-Fundamental study on chemical non-equilibrium phenomena in decaying arcs by numerical simulation and experimental approaches

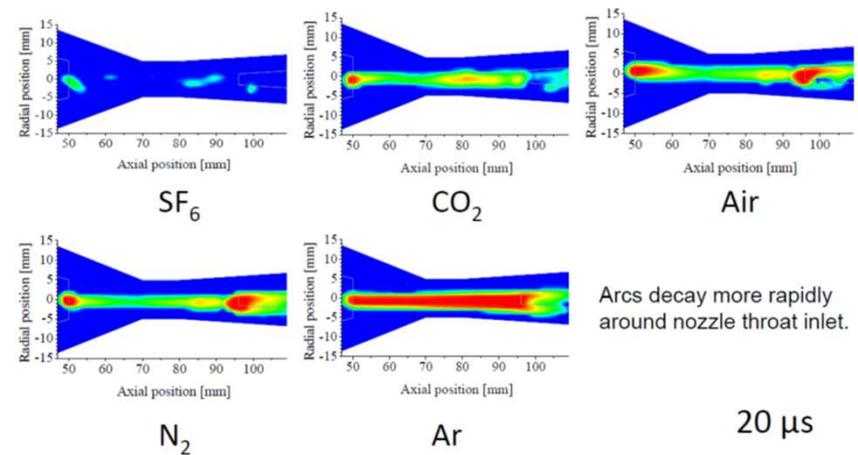
Y. Tanaka (JP)

Conférence invité, experimental et théorique, hors équilibre

- Design and manufacture of a model circuit breaker for experiments



Time variation in visible light emission distribution in different gas-blast arcs under free recovery condition with quasi-TRV application ($dv/dt=2.1$ kV/ μ s, $V_{peak}=900$ V)
 Current: 50 A \rightarrow 0 A, Gas flow rate $Q=100$ L/min, $t_d=20$ μ s



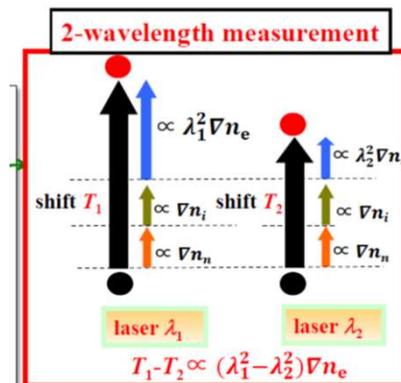
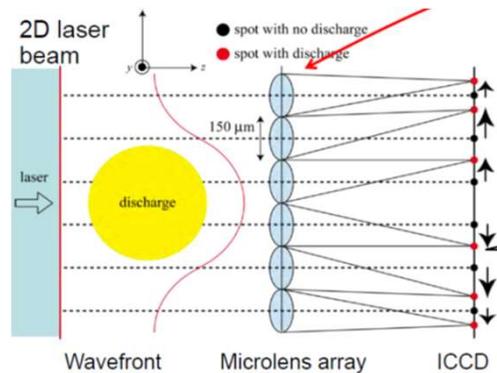
Test ré-amorçage thermique pour différents gaz

08-Fundamental study on chemical non-equilibrium phenomena in decaying arcs by numerical simulation and experimental approaches

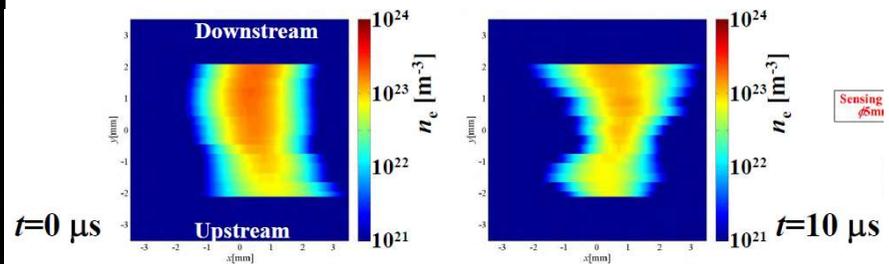
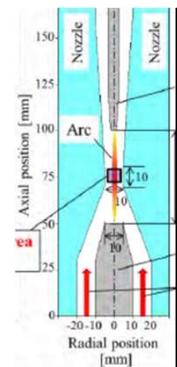
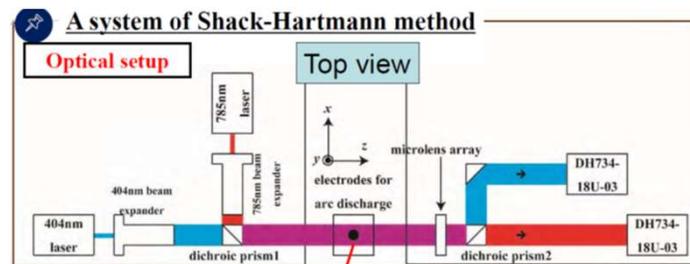
Y. Tanaka (JP)

Conférence invité, experimental et théorique, hors équilibre

- Mesures densité électronique par Thomson scattering & Shack Hartmann method



- Mesures de la déviation sur deux longueurs d'onde
- Seule la part électronique dépend de la longueur d'onde
- Permet d'obtenir une cartographie de la densité électronique
- En un tir permet d'obtenir l'info et sans hypothèse LTE



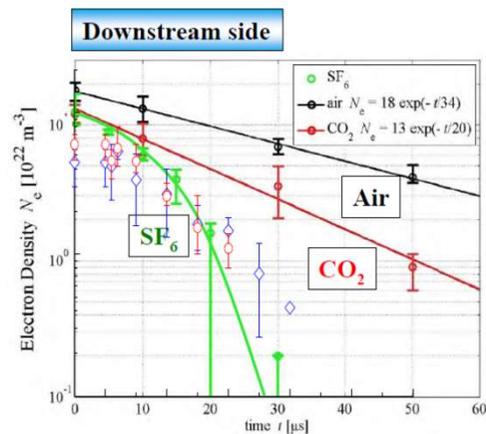
Exemple de champ obtenu

08-Fundamental study on chemical non-equilibrium phenomena in decaying arcs by numerical simulation and experimental approaches

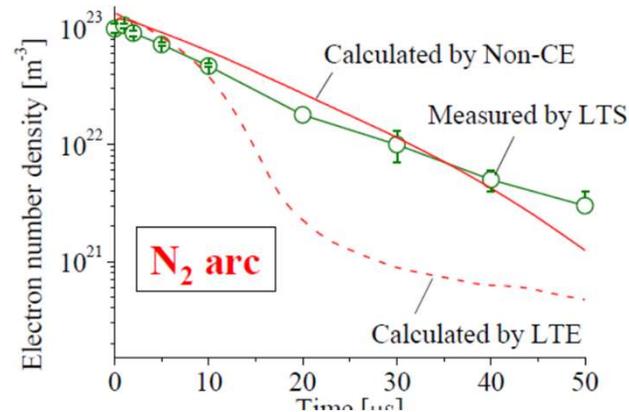
Y. Tanaka (JP)

Conférence invité, experimental et théorique, hors équilibre

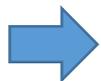
- Utilisation du modèle en non équilibre chimique pour comparer



Mesure par TS



Résultats modèle



Validation du modèle
Présentation très riche et complète, disponible

Problématique: Modélisation cinétique et rayonnement

Type: Modélisation

Configuration

Arc libre dans l'argon, collisionnel radiatif mais non couplé pour l'instant

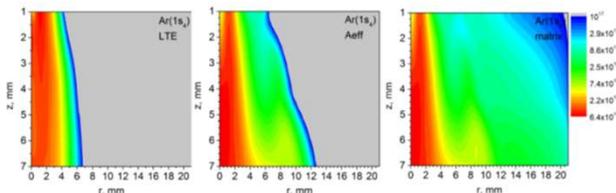
Méthodes & résultats

3 modèles : équilibre, collisionnel radiatif simplifié (utilisation d'un temps effectif de vie des niveaux pour toute la géométrie) et collisionnel radiatif plus complet (avec résolution d'une équation de transport (complexe))

$$AN_r(\vec{r}) - A \int_V N_r(\vec{r}') K(\vec{r}, \vec{r}') d^3r' = Z_r^+(\vec{r}) - Z_r^-(\vec{r}) + W_r(\vec{r}).$$

→ Proba d'émission réabsorption d'un photon résolue spatialement

$$K(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty d\nu \frac{\epsilon_\nu(\vec{r}') \kappa_\nu(\vec{r})}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} e^{-\int_{\vec{r}'}^{\vec{r}} \kappa_\nu(\xi) d\xi},$$



Prédiction du niveau 1s4 de l'argon par les trois modèles

Prémices de modèles plus complexes couplant rayonnement et cinétique