



Channel arc model (CAM) d'un plasma d'hydrogène à courant continu: influence du rayonnement de l'arc et de la très haute pression

P. GUEYE¹, Y. CRESSAULT², V. ROHANI¹, L. FULCHER¹

¹ MINES ParisTech, PSL Research University PERSEE

² Université de Toulouse, UPS, INPT, LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'énergie)

□ Contexte

- Design d'une torche plasma
- Dimensionner une source électrique adéquate
- Estimer les contraintes thermiques + flux aux parois → choix des matériaux

□ Objectifs

- Mieux calculer le rayonnement
- Effet de la pression (@1 et @20 bar) et du confinement
- Déterminer la caractéristique électrique

- ❑ Modèle de colonne d'arc stabilisé par paroi
 - Phénomènes aux électrodes non considérées
 - Faible coût de calcul et bon accord avec les résultats expérimentaux⁽¹⁾

- ❑ Equilibre thermodynamique local (ETL)
 - Flux radiaux diffusifs supposés moindres malgré le confinement

- ❑ Courant continu faible
 - Loi d'Ohm simplifiée
 - Force de Lorentz négligée → pas d'effet Maecker (auto-pompage)

- ❑ Arc non soufflé → absence de convection

(1) Stine et al. (1962), The theoretical enthalpy distribution of air in steady flow along the axis of a direct current, NASA Technical Note D-1331

- ❑ Puissance dissipée par effet joule P_J
 - Uniformité du champ électrique + Loi d'Ohm
- ❑ Puissance dissipée par conduction P_{cond}
 - Loi de Fourier
- ❑ Puissance rayonnée P_{rad}
 - Calcul du CEN pour une géométrie sphérique ⁽¹⁾
 - 10% de différence avec une géométrie cylindrique ⁽²⁾

- ❑ Equation d'Elenbaas-Heller

$$\sigma E^2 + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \kappa \frac{dT}{dr} \right) - 4\pi \epsilon_N = 0$$

P_J → σE^2 ← $r \kappa \frac{dT}{dr}$ → P_{cond} ← $4\pi \epsilon_N$ → P_{rad}

- ❑ Conditions limites

$$T = T_R \quad \text{à la paroi et} \quad \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0$$

(1) Lowke, J.J , (1970) Journal of applied physics, 41 2588

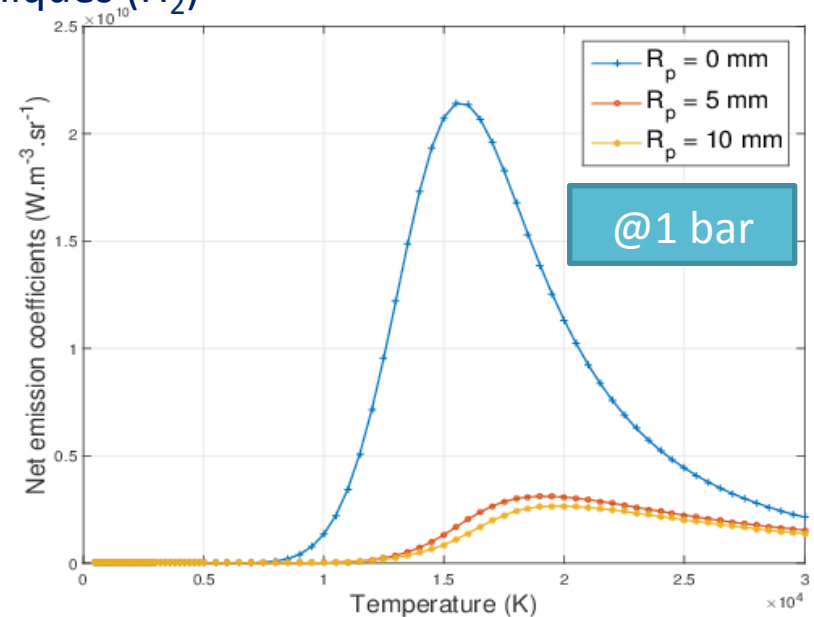
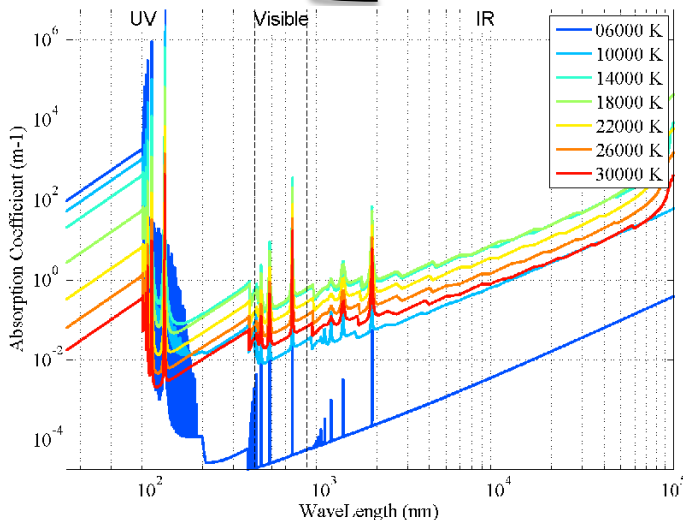
(2) Lieberman, R.W and Lowke, J.J (1969) J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 9 207

- CEN pour une sphère isotherme et homogène R_p

$$\varepsilon_N(T, R_p) = \int_0^\infty I_v^0(T) k'_v(T) \exp(-k'_v(T) R_p) dv$$

- $I_v^0(T)$ fonction de Planck
- $k'_v(T)$ coefficient d'absorption avec émission induite⁽¹⁾

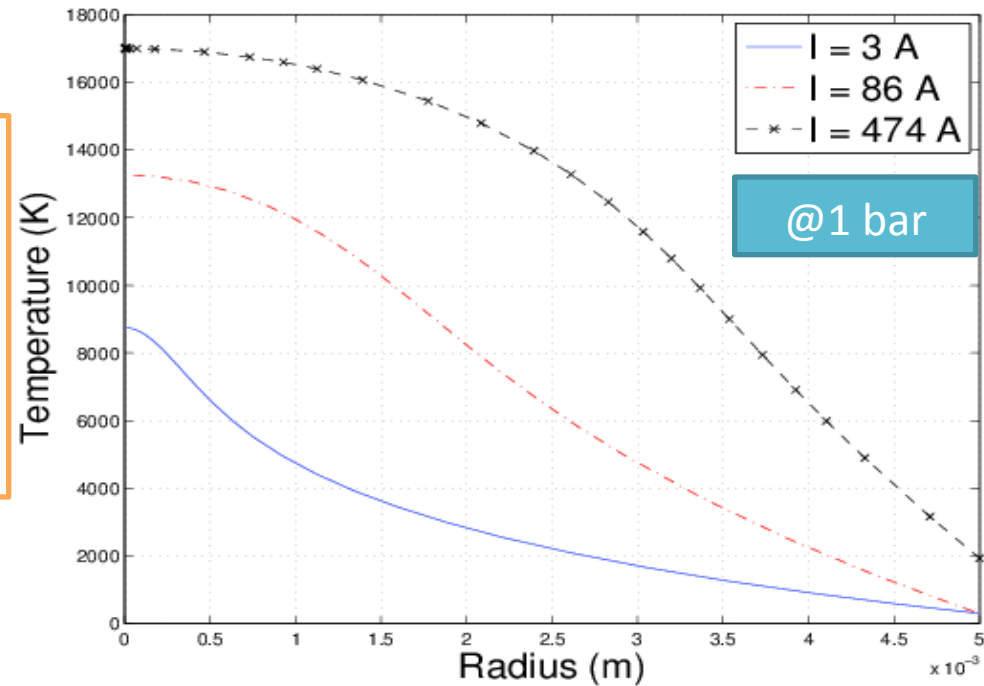
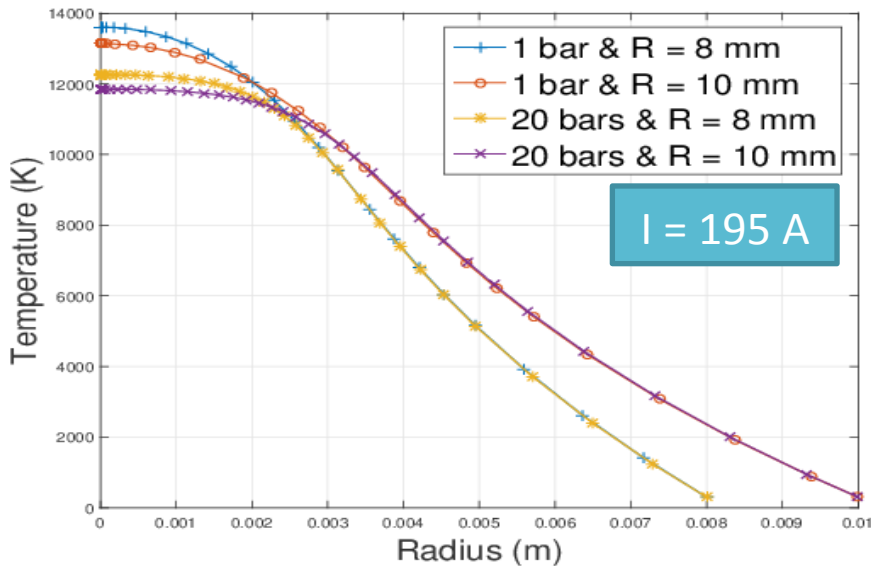
Continuum moléculaire (H_2), atomique (H , H^- , H^+)
 Bandes moléculaires diatomiques (H_2)
 74 raies atomiques d' H



(1) Billoux, T., (2013) Elaboration d'une base de données radiatives pour des plasmas de type $CwHxOyNz$ et application au transfert radiatif pour des mélanges air, CO_2 et $CO-H_2$

Profils de température

- À faible courant: arc en constriction
 - Fort gradient de T
 - Résolution analytique par Maecker ⁽¹⁾
- Distribution avec un plateau de T à courant fort et/ou @20 bar
- À R fixé: Limite en courant (Eq. 2) pour satisfaire T maximale sur l'axe



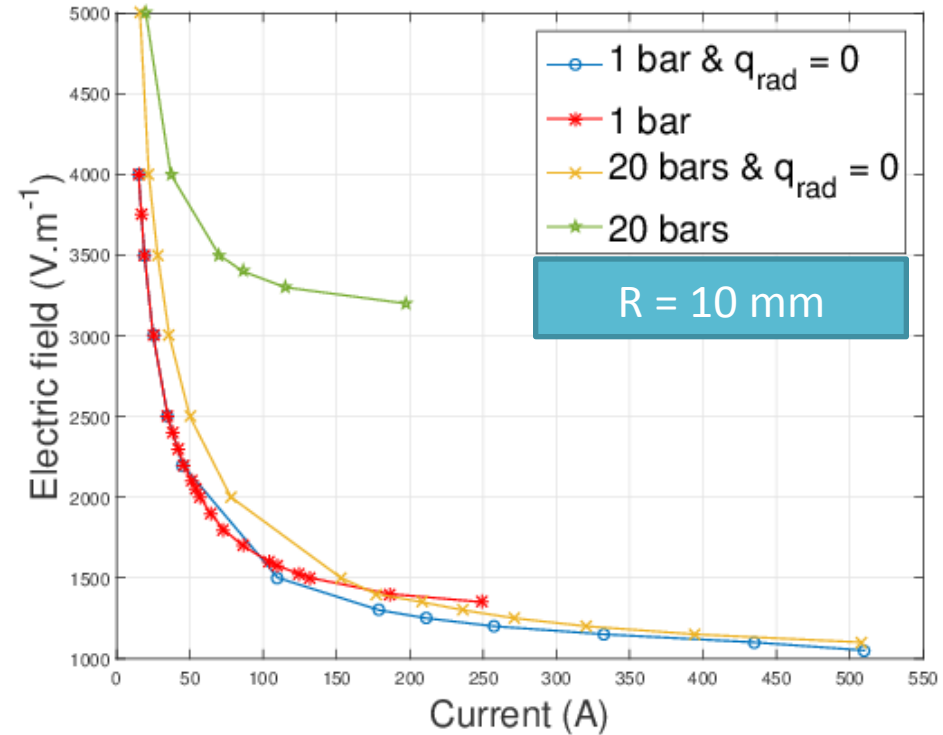
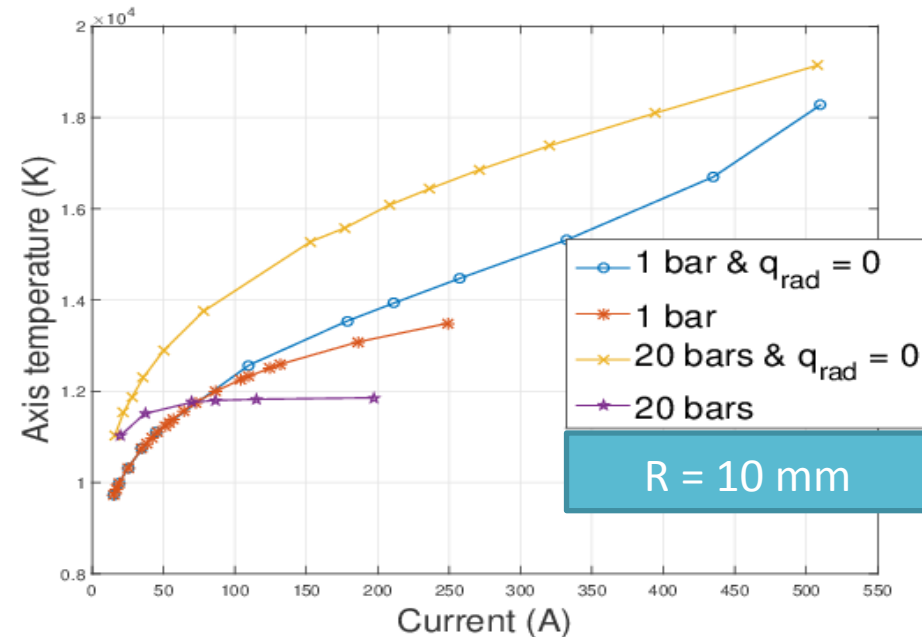
$$-2\kappa \frac{d^2T}{dr^2} \Big|_{r=0} = \sigma_0 E^2 - q_{rad_0} \quad \text{Eq.1}$$

$$E^2 > q_{rad_0} / \sigma_0 \quad \text{Eq.2}$$

(1) Maecker, (1959) Zeitschrift für Physik, Volume 157

Caractéristique électrique

- $W=EI$ presque constante
- Rayonnement \rightarrow refroidissement de la colonne d'arc

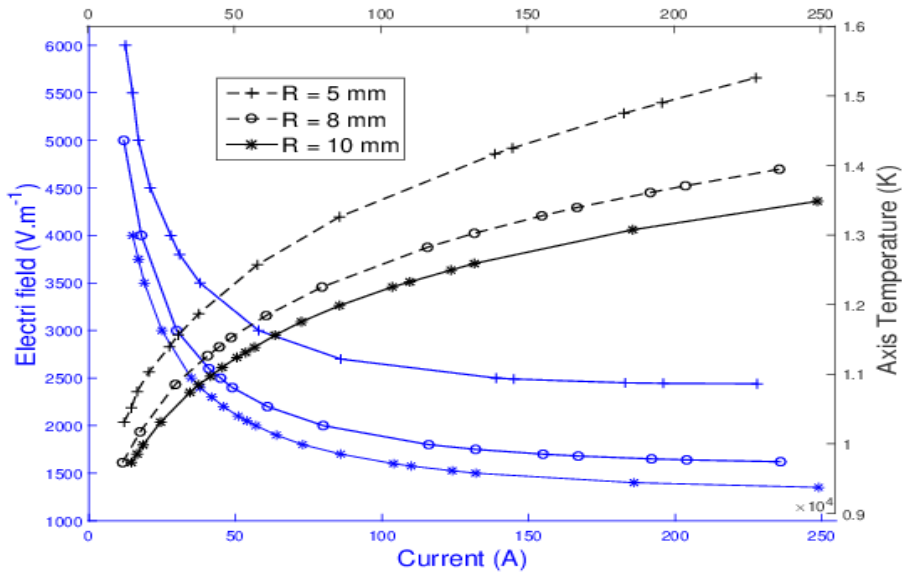


- @1 bar: rayonnement faible jusqu'à $I \approx 100 \text{ A}$
- @20 bar:
 - Rayonnement prépondérant même à I faible
 - E multiplié par un facteur ≈ 2
 - Facteur ≈ 3 pour des arcs de H_2 soufflés ^{(1) (2)}

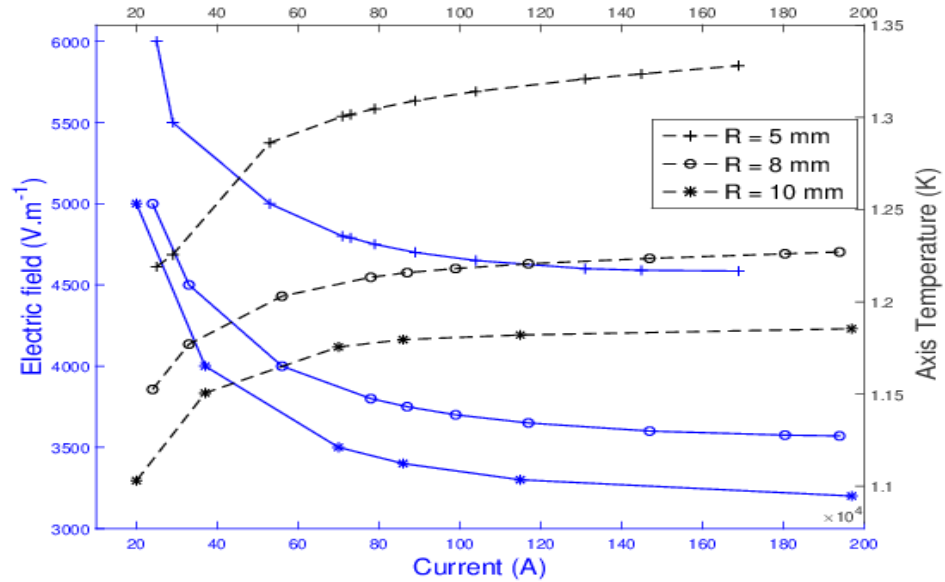
(1) Zhukov, M.F., (1975) Thermal plasma torches, CISP, pp. 230-241

(2) Philips R. et al., (1964), Three-phase AC arc-heater, ARL 64-29, Aerospace research laboratories, US Air Force

Effet du confinement



@1 bar



@20 bar

- Moins de confinement
 - Refroidissement de l'arc
 - Arc de + en + de constriction
 - E diminue

- ❑ Formulation simpliste du modèle de colonne d'arc mais
 - Simulant les principaux phénomènes de la colonne d'arc
 - Résultats en accord avec la littérature sur la caractéristique électrique d'arc de H₂

- ❑ @20 bar
 - Effet considérable du rayonnement
 - Forte augmentation du champ électrique

- ❑ Perspectives
 - Magnéto-Hydro-Dynamique MHD 3D
 - Equations de Maxwell pour simuler les phénomènes aux électrodes
 - Code Saturne par exemple
 - AC