

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Influence des aérosols sur la composition à l'équilibre d'un plasma d'air

W. C. Yaguibou, N. Kohio, A. K. Kagoné, Z. Koalaga et F. Zougmore



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee. v4i1.167

Influence des aérosols sur la composition à l'équilibre d'un plasma d'air

Wêpari Charles Yaguibou⁽¹⁾, Nièssan Kohio⁽¹⁾, Abdoul Karim Kagoné⁽¹⁾,

Zacharie Koalaga⁽¹⁾ et François Zougmore⁽¹⁾

⁽¹⁾ LAME, Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, BP 7020, Ouagadougou

BURKINA FASO

weparicharles@gmail.com

Résumé – *La mousson et l'harmattan sont les principales dynamiques atmosphériques qui gouvernent le transport et le dépôt des aérosols en Afrique de l'Ouest. Ces aérosols proviennent du désert et des feux de biomasses et sont essentiellement composés d'oxydes de silicium, de calcium, de fer, d'aluminium et d'éléments carbonés issus de la biomasse. Ainsi, lorsque les disjoncteurs à air doivent fonctionner dans un environnement pollué par ces aérosols, ils peuvent avoir des comportements anormaux et des échecs de coupures. Ce travail porte sur l'influence des aérosols sur la composition chimique de plasma d'air à la pression atmosphérique et à l'équilibre thermodynamique local (E.T.L) dans une gamme de température allant de 4000 K à 20000 K. Nous utilisons la méthode de minimisation de l'énergie libre de Gibbs pour déterminer la composition du plasma. Les résultats obtenus montrent que la densité électronique augmente avec le pourcentage d'aérosols dans le plasma pour une température inférieure à 12000 K. Cela pourrait conduire à une augmentation de la conductivité électrique du plasma à basse température.*

Mots clés : *aérosol, composition, enthalpie, plasma, arc, disjoncteur*

DOI : 10.18145/jitipee.v4i1.167

Introduction

L'Afrique de l'Ouest est dominée par les aérosols désertiques et les feux de biomasses. Ces dernières années elle subit une surexploitation des sols entraînant une diminution du couvert végétal et une augmentation de 30% à 50% des émissions de poussières désertiques.

Les études réalisées dans la sous-région ont montré que la composition chimique des aérosols en Afrique de l'ouest est principalement dominée par les oxydes de silicium, de calcium, d'aluminium et de fer [1-9]. En plus il y a les aérosols carbonés provenant de la biomasse et des activités humaines [10-13]. La détermination de cette composition chimique des aérosols

a été essentiellement effectuée par analyse spectrométrique après leur collecte sur des filtres millipores par aspiration.

Après soulèvement des aérosols et leur injection dans l'atmosphère, les particules de diamètres inférieurs à $20 \mu\text{m}$ sont transportées sur de grandes distances et constituent le corps des tempêtes de sables. En Afrique de l'Ouest, la rencontre entre le flux de mousson et le flux de l'harmattan favorisent leur transport en altitude : comme l'harmattan est moins dense, il passe au-dessus de la mousson et favorise le transport en altitude des aérosols désertiques en saison pluvieuse. Cependant, en saison sèche, l'harmattan est le principal vent qui souffle sur la quasi-totalité de l'Afrique de l'Ouest. Il entraîne de façon continue le déplacement de nuages de poussières [14 - 17].

Les pays de l'Afrique de l'Ouest comme le Burkina Faso ont donc des atmosphères continuellement polluées par les aérosols qui sont principalement déposés selon deux voies : le dépôt sec par sédimentation sous l'action de la gravitation et le dépôt humide par la pluie. Ainsi, les appareils électriques et plus particulièrement les disjoncteurs à air baignent de façon générale dans cette atmosphère poussiéreuse et fonctionnent sans protection spécifique et sans entretien. Par conséquent les aérosols peuvent pénétrer dans le disjoncteur par les trous d'évent, se sédimenter et former une couche plus ou moins épaisse sur les joues gazogènes [18].

Le milieu va donc contenir, en plus de l'air composé essentiellement d'azote et d'oxygène, d'autres éléments chimiques induits par les aérosols qui vont modifier la composition du plasma dans le disjoncteur pendant la coupure du courant électrique. Il peut en résulter un comportement anormal et des échecs de coupures électriques des disjoncteurs à air pendant leur fonctionnement [18].

L'objectif de ce travail est de montrer l'influence des aérosols sur la composition chimique du plasma d'air à l'équilibre thermodynamique local (E.T.L.) et à la pression atmosphérique (1 bar), dans une gamme de température allant de 4000 K à 20000 K. Nous allons décrire la méthode de calcul retenue, présenter les résultats obtenus et faire leur analyse.

1. Méthode de calcul

L'étude est faite à la pression atmosphérique. Pour une première étude, nous avons décidé de prendre seulement en compte la phase gazeuse. Nous prenons donc une gamme de température allant de 4000 K à 20000 K. Cette gamme de température a été considérée par Morel qui explique les agitations se produisant dans une colonne d'arc [19].

Plusieurs méthodes permettent de déterminer la composition d'un plasma. On peut citer la loi d'action de masse, la méthode pseudo-cinétique, la méthode collisionnel radiatif, la minimisation de l'enthalpie libre,...

La loi d'action de masse est basée sur la loi des gaz parfaits, la loi de la neutralité électrique, les lois de Saha-Eggert, les lois de Guldberg et Waage et les équations de proportionnalité des espèces en présence. Le nombre d'équations correspond au nombre de processus chimiques indépendants dans le plasma.

Quant à la méthode pseudo-cinétique, elle est basée sur la conservation des noyaux, la neutralité électrique et la conservation de la pression. Cette méthode nécessite la connaissance et l'utilisation de taux de réactions des différentes espèces présentes dans le mélange [20, 21].

La minimisation de l'énergie libre de Gibbs a été développée par White, Johnson et Dantzig à l'équilibre thermodynamique complet [22]. Elle a été adaptée par S. Cayet et M. Dudeck à un milieu à deux températures [23]. Par la suite, P. André l'a également adapté aux plasmas à multiples températures [24]. Les multiplicateurs de Lagrange sont utilisés pour minimiser l'énergie libre de Gibbs (enthalpie libre) ; ce qui entraîne une convergence très rapide.

Dans le cadre de notre étude, nous utilisons la méthode de minimisation de l'énergie libre de Gibbs. Cette méthode est très efficace et adaptée au type de plasma étudié car elle tient compte seulement de la nature chimique des espèces présentes dans le mélange mais pas du schéma réactionnel pouvant décrire l'évolution du mélange.

1.1. Détermination des mélanges

En Afrique de l'Ouest la période de février à avril, est caractérisée par de grandes émissions de poussières désertiques d'origines saharienne et locale. Cependant, la période humide de juin à septembre et la période de décembre à janvier sont caractérisées par de faibles épisodes de poussières [12]. Les espèces chimiques les plus abondantes dans les aérosols sont les oxydes de silicium, de calcium, de fer et d'aluminium. Les espèces carbonées proviennent des feux de biomasse et des produits fossiles. Le taux d'oxyde de silicium peut atteindre les 60% [1]. Les espèces chimiques les plus abondantes après la silice sont les oxydes d'aluminium (Al_2O_3) et les oxydes ferrique (Fe_2O_3) [6-7].

Pour notre étude nous supposons que les aérosols sont constitués d'oxydes de silicium, de fer, d'aluminium et du monoxyde de carbone. Si nous exprimons la composition chimique de l'aérosol en pourcentage massique, nous prenons pour un gramme d'aérosol : 60% de SiO_2 , 25% de Fe_2O_3 , 10% d' Al_2O_3 et 5% de CO. Le disjoncteur pouvant être amené à fonctionner dans un milieu pollué pendant une longue période, nous estimons que la quantité d'aérosol déposée pourrait atteindre un maximum de 10% de la masse de la chambre de coupure avec le temps. Cela nous permet de considérer plusieurs types de mélanges d'air et d'aérosols.

Le calcul des pourcentages massiques des éléments chimiques de base du plasma A, B, C, D E et F, est fait à l'aide de l'équation suivante :

$$\%A = \%air \cdot \%A_{air} + \%aero \left(\%A_k C_l \left(\frac{k \cdot M_A}{M_{A_k C_l}} \right) + \%A_x D_z \left(\frac{x \cdot M_A}{M_{A_x D_z}} \right) + \%A_\gamma E_\beta \left(\frac{\gamma \cdot M_A}{M_{A_\gamma E_\beta}} \right) + \%A_\nu F_\theta \left(\frac{\nu \cdot M_A}{M_{A_\nu F_\theta}} \right) \right) \quad (1)$$

où $\%A_{air}$ est le pourcentage massique de l'élément chimique de base A dans l'air, $\%air$ est le pourcentage massique de l'air, $A_k C_l$, $A_\nu F_\theta$, $A_\gamma E_\beta$ et $A_x D_z$ les espèces apportées par les

aérosols de pourcentage massique %aero. $M_{A_k C_l}, M_{A_x D_z}, M_{A_\nu F_\theta}, M_{A_\gamma E_\beta}, M_A, M_B, M_C, M_D$ sont les masses molaires des espèces considérées. $k, l, x, z, \theta, \nu, \beta, \gamma$ sont les nombres d'atomes. Par exemple, le pourcentage massique de l'oxygène est donné par :

$$\begin{aligned} \%O = \%air\%O_{air} &+ \%aero \left(\%CO \left(\frac{M_O}{M_{CO}} \right) + \%SiO_2 \left(\frac{2M_O}{M_{SiO_2}} \right) + \%Fe_2O_3 \left(\frac{3M_O}{M_{Fe_2O_3}} \right) \right. \\ &\left. + \%Al_2O_3 \left(\frac{3M_O}{M_{Al_2O_3}} \right) \right) \end{aligned}$$

A partir de l'équation (1) nous obtenons les pourcentages massiques des éléments de base de notre plasma donnés dans le Tableau 1 ci-dessous :

%Air	%aérosol	C	O	N	Si	Al	Fe
100		0	22,2	77,8	0	0	0
99,95	0,05	1,07199E-3	22,2124	77,7611	1,4023E-2	2,6462E-3	8,74281E-3
99	1	2,14399E-2	22,449	77,022	2,804615E-1	5292507E-2	1,74856E-1
95	5	1,071997E-1	23,44158	73,910	1,4023047	2,6462535E-1	8,74282E-1
90	10	2,14399E-1	24,683176	70,020	2,8046	5,292507E-1	1,74856

Tableau 1 : Mélanges considérés en pourcentage massique.

1.2. Calcul de la composition à l'équilibre

Nous supposons que le plasma comporte les espèces chimiques suivantes :

- l'électron : e^- ;
- vingt-quatre espèces monoatomiques (atomes et ions) : C, O, N, Si, Al, Fe, $C^+, O^+, N^+, Si^+, Al^+, Fe^+, C^-, O^-, N^-, Si^-, Al^-, Fe^-, C^{++}, O^{++}, N^{++}, Si^{++}, Al^{++}, Fe^{++}$;
- vingt-trois espèces diatomiques : $C_2, O_2, N_2, Si_2, Al_2, Fe_2, CO, CN, SiC, AlC, NO, SiO, AlO, SiN, FeO, AlN, C_2^+, O_2^+, N_2^+, CO^+, CN^+, NO^+, AlO^+$;
- trois espèces polyatomiques : CO_2, C_3, CO_2^+ .

La détermination de la composition à l'équilibre nécessite au préalable la connaissance des potentiels chimiques spécifiques de l'ensemble des particules peuplant le plasma [25].

Pour les électrons, les espèces atomiques et les molécules, leur potentiel chimique peut être déterminé en utilisant les données de l'enthalpie spécifique et l'entropie spécifique tabulées par NIST, Bonnie, Bendjebbar et les tables de JANAF [26-29]. Nous utilisons essentiellement les données thermodynamiques lissées et tabulées par Bonnie dans le calcul des propriétés thermodynamiques spécifiques. La capacité calorifique spécifique, l'enthalpie spécifique et

l'entropie spécifique sont obtenues en fonction de la température et de la gamme de température par les relations suivantes [28] :

$$\frac{C_p^0(T)}{R} = a_1 T^{-2} + a_2 T^{-1} + a_3 + a_4 T + a_5 T^2 + a_6 T^3 + a_7 T^4 \quad (2)$$

$$\frac{H^0(T)}{RT} = -a_1 T^{-2} + \frac{a_2 \ln(T)}{T} + a_3 + a_4 \frac{T}{2} + a_5 \frac{T^2}{3} + a_6 \frac{T^3}{4} + a_7 \frac{T^4}{5} + \frac{b_1}{T} \quad (3)$$

$$\frac{S^0(T)}{R} = -a_1 \frac{T^{-2}}{2} - \frac{a_2 T^{-1}}{T} + a_3 \ln(T) + a_4 T + a_5 \frac{T^2}{2} + a_6 \frac{T^3}{3} + a_7 \frac{T^4}{4} + b_2 \quad (4)$$

R est la constante des gaz parfaits et T la température en Kelvin. Les coefficients a_i et b_i pour chaque particule sont donnés dans les Tableaux 2 et 3.

Ainsi le potentiel chimique en fonction de la température est donné par la formule suivante :

$$\mu^0 = H^0 - TS^0 \quad (5)$$

Pour les espèces ionisées portant deux charges positives, le potentiel chimique est obtenu à l'aide des fonctions de partitions internes de la particule ionisée, exprimées par l'équation suivante [30-31] :

$$Q = \sum_i g_j \exp\left(-\frac{cE_j}{T}\right) \quad (6)$$

où g_j est les poids statistique du niveau d'énergie E_j et c est une constante qui est égale à 1,438786 cm.K.

Le potentiel chimique d'une particule donnée s'obtient alors par l'équation (7) :

$$\mu^0 = -kT \ln\left(\frac{Q}{N}\right) + Er_f \quad (7)$$

où Er_f est l'enthalpie de formation de l'espèce considérée.

L'enthalpie de formation de M^+ ($M \rightarrow M^+ + e^-$) se détermine par:

$$Er_f(M^+) = Er_f(M) + IE_0 - Er_f(e^-) \quad (8)$$

Suivant le même raisonnement nous établissons que l'enthalpie de formation d'un ion (M^{2+}) portant deux charges positives ($M \rightarrow M^{2+} + 2e^-$ ou $M^+ \rightarrow M^{2+} + e^-$) est donnée par :

$$\begin{cases} Er_f(M^{2+}) = Er_f(M^+) + IE_1 - Er_f(e^-) \\ Er_f(M^{2+}) = Er_f(M) + IE_0 + IE_1 - 2 Er_f(e^-) \end{cases} \quad (9)$$

où IE_0 est l'énergie de première ionisation de M , IE_1 l'énergie de deuxième ionisation M et Er_f son enthalpie de formation.

Particules	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	b ₁	b ₂
e ⁻	0	0	2,5	0	0	0	0	-7,45E+02	-1,17E+01
Al	-2,92E+04	1,17E+02	2,36E+00	7,74E-05	-1,53E-08	-9,97E-13	5,05E-16	3,82E+04	6,60E+00
Al ⁺	-4,18E+03	9,95E+00	2,55E+00	5,88E-05	3,13E-08	-7,75E-12	7,27E-16	1,09E+05	3,49E+00
Al ⁻	6,34E+05	-2,38E+3	5,47E+00	-1,30E-03	2,89E-07	-3,25E-11	1,47E-15	4,78E+04	-1,54E+01
	5,90E+06	-2,30E+3	3,07E+00	-6,89E-05	4,41E-09	-1,45E-13	1,91E-18	5,24E+04	1,45E+00
AlC	1,94E+06	-6,75E+3	1,35E+01	-5,85E-03	1,93E-06	-2,59E-10	1,22E-14	1,23E+05	-6,15E+01
AlN	3,82E+06	-1,07E+4	1,45E+01	-3,73E-03	7,92E-07	-8,09E-11	2,89E-15	1,21E+05	-7,29E+01
AlO	1,57E+04	3,86E+03	-5,93E+0	9,05E-03	-2,93E-06	4,24E-10	-2,28E-14	-1,33E+04	6,83E+01
AlO ⁺	2,71E+04	-7,00E+2	5,79E+00	-6,87E-04	2,08E-07	-2,66E-11	1,28E-15	1,22E+05	-7,05E+00
Al ₂	-2,32E+06	9,22E+03	-9,45E+0	1,00E-02	-3,15E-06	4,36E-10	-2,24E-14	2,90E+03	9,96E+01
C	-1,29E+05	1,72E+02	2,65E+00	-3,35E-04	1,74E-07	-2,90E-11	1,64E-15	8,41E+04	4,13E+00
C ⁺	1,26E+04	-3,41E+1	2,54E+00	-2,81E-05	9,75E-09	-1,74E-12	1,25E-16	2,17E+05	4,06E+00
C ⁻	4,25E+00	5,78E-04	2,50E+00	2,84E-10	-7,33E-14	9,48E-18	-4,83E-22	7,00E+04	4,88E+00
CN	-2,23E+06	5,04E+03	-2,12E-01	1,35E-03	1,33E-07	-6,94E-11	5,49E-15	1,78E+04	3,28E+01
CN ⁺	-7,15E+06	1,86E+04	-1,08E+1	6,11E-03	-1,19E-06	1,18E-10	-4,80E-15	9,24E+04	1,14E+02
CO	4,62E+05	-1,94E+3	5,92E+00	-5,66E-04	1,40E-07	-1,79E-11	9,62E-16	-2,47E+03	-1,39E+01
CO ⁺	2,32E+05	-1,06E+3	4,55E+00	4,50E-04	-2,49E-07	5,27E-11	-3,29E-15	1,56E+05	-3,87E+00
CO ₂	1,18E+05	-1,79E+3	8,29E+00	-9,22E-05	4,86E-09	-1,89E-12	6,33E-16	-3,91E+04	-2,65E+01
CO ₂ ⁺	1,70E+05	-8,07E+2	8,00E+00	-1,58E-04	2,57E-08	-2,40E-12	1,68E-16	1,15E+05	-2,13E+01
C ₂	-9,69E+05	3,56E+03	-5,06E-01	2,95E-03	-7,14E-07	8,67E-11	-4,08E-15	7,68E+04	3,34E+01
C ₂ ⁺	3,84E+06	-6,24E+3	2,78E+00	6,07E-03	-2,45E-06	3,88E-10	-2,19E-14	2,86E+05	7,30E-01
C ₃	4,51E+06	-1,46E+4	2,28E+01	-8,54E-03	2,15E-06	-2,10E-10	6,35E-15	1,91E+05	-1,27E+02
Fe	-1,95E+06	6,74E+03	-5,49E+0	4,38E-03	-1,12E-06	1,54E-10	-8,02E-15	7,14E+03	6,50E+01
Fe ⁺	-8,18E+05	1,93E+03	1,72E+00	3,39E-04	-9,81E-08	2,23E-11	-1,48E-15	1,29E+05	1,50E+01
Fe ⁻	-1,24E+05	8,25E+02	1,91E+00	2,28E-04	-4,94E-08	5,59E-12	-2,57E-16	4,16E+04	1,27E+01
FeO	-1,20E+05	-3,62E+2	5,52E+00	-9,98E-04	4,38E-07	-6,79E-11	3,64E-15	3,04E+04	-3,63E+00
N	8,88E+04	-1,07E+2	2,36E+00	2,92E-04	-1,73E-07	4,01E-11	-2,68E-15	5,70E+04	4,87E+00
N ⁺	2,90E+05	-8,56E+2	3,48E+00	-5,29E-04	1,35E-07	-1,39E-11	5,05E-16	2,31E+05	-1,99E+00
N ⁻	2,40E+03	2,95E-01	2,50E+00	8,31E-08	-1,83E-11	2,10E-15	-9,75E-20	5,62E+04	5,01E+00
NO	2,24E+05	-1,29E+3	5,43E+00	-3,66E-04	9,88E-08	-1,42E-11	9,38E-16	1,75E+04	-8,50E+00
NO ⁺	6,07E+05	-2,28E+3	6,08E+00	-6,07E-04	1,43E-07	-1,75E-11	8,94E-16	1,32E+05	-1,52E+01
N ₂	5,88E+05	-2,24E+3	6,07E+00	-6,14E-04	1,49E-07	-1,92E-11	1,06E-15	1,28E+04	-1,59E+01
N ₂ ⁺	-2,85E+06	7,06E+03	-2,88E+0	3,07E-03	-4,36E-07	2,10E-11	5,41E-16	1,34E+05	5,09E+01
O	2,62E+05	-7,30E+2	3,32E+00	-4,28E-04	1,04E-07	-9,44E-12	2,73E-16	3,39E+04	-6,68E-01
O ⁺	2,17E+05	6,67E+02	1,70E+00	4,71E-04	-1,43E-07	2,02E-11	-9,11E-16	1,84E+05	1,01E+01
O ⁻	9,77E+03	7,16E+00	2,49E+00	1,97E-06	-4,30E-10	4,91E-14	-2,27E-18	1,15E+04	4,84E+00
O ₂	1,04E+06	2,34E+03	1,82E+00	1,27E-03	-2,19E-07	2,05E-11	-8,19E-16	-1,69E+04	1,74E+01
O ₂ ⁺	7,38E+04	-8,46E+2	4,99E+00	-1,61E-04	6,43E-08	-1,50E-11	1,58E-15	1,45E+05	-5,81E+00
Si ⁺	5,92E+04	-4,86E+1	2,56E+00	-3,50E-05	1,19E-08	-2,08E-12	1,47E-16	1,49E+05	5,24E+00
Si ⁻	-6,16E+06	1,88E+04	-1,90E+1	1,11E-02	-2,54E-06	2,70E-10	-1,11E-14	-8,31E+04	1,60E+02
SiC	-6,27E+04	7,21E+02	2,16E+00	2,20E-03	-6,57E-07	9,18E-11	-4,97E-15	8,32E+04	1,60E+01
SiN	-2,93E+06	5,85E+03	1,32E+00	1,26E-03	-3,77E-07	6,89E-11	-4,19E-15	6,53E+03	2,55E+01
SiO	-1,77E+05	-3,20E+1	4,48E+00	4,59E-06	3,56E-08	-1,33E-11	1,61E-15	-1,35E+04	-8,39E-01
Si ₂	1,37E+06	-4,21E+3	9,34E+00	-2,75E-03	9,59E-07	-1,37E-10	6,77E-15	9,51E+04	-3,17E+01
Si	-6,17E+05	2,24E+03	-4,45E-01	1,71E-03	-4,11E-07	4,56E-11	-1,89E-15	3,95E+04	2,68E+01

Tableau 2 : Coefficients des fonctions thermodynamiques des différentes espèces pour une température comprise entre 1000 K et 6000 K.

Particules	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	b ₁	b ₂
e ⁻	0	0	2,5	0	0	0	0	-7,45E+02	-1,17E+01
Al	-5,04E+08	3,80 E+05	-1,08E+2	1,55E-02	-1,07E-06	3,59E-11	-4,70E-16	-2,90E+06	9,49E+02
Al ⁺	-9,08E+08	5,51E+05	-1,28E+2	1,51E-02	-8,93E-07	2,72E-11	-3,37E-16	-4,27E+06	1,14E+03
Al ⁻	5,90E+06	-2,30E+3	3,07E+00	-6,89E-05	4,41E-09	-1,45E-13	1,91E-18	5,24E+04	1,45E+00
AlO	4,17E+07	3,77E+04	1,55E+01	-9,57E-04	2,49E-08	6,69E-14	-9,00E-18	2,96E+05	9,43E+01
C	4,43E+08	-2,89E+5	7,74E+01	-9,72E-03	6,65E-07	-2,23E-11	2,90E-16	2,36E+06	-6,41E+02
C ⁺	5,62E+05	-6,05E+3	5,88E+00	-7,21E-04	6,82E-08	-2,59E-12	-12 3,E-17	2,58E+05	-2,28E+01
C ⁻	1,22E+01	-5,20E-03	2,50E+00	-1,74E-10	1,21E-14	-4,25E-19	5,99E-24	7,00E+04	4,88E+00
CN	-1,79E+08	1,05E+05	-1,73E+1	2,19E-03	-8,51E-08	9,32E-13	6,36E-18	-7,96E+05	1,91E+02
CN ⁺	-2,35E+08	1,43E+05	-2,98E+1	4,28E-03	-2,71E-07	8,18E-12	-9,63E-17	-9,23E+05	2,96E+02
CO	8,87E+08	-7,50E+5	2,50E+02	-3,96E-02	3,30E-06	-1,32E-10	2,00E-15	5,70E+06	-2,06E+03
CO ⁺	-3,04E+08	2,39E+05	-7,03E+1	1,14E-02	-8,32E-07	2,86E-11	-3,80E-16	-1,69E+06	6,29E+02
CO ₂	-1,54E+09	1,02E+06	-2,56E+2	3,37E-02	-2,18E-06	6,99E-11	-8,84E-16	-8,04E+06	2,25E+03
CO ₂ ⁺	-8,37E+07	5,33E+04	-5,62E+0	1,49E-03	-7,55E-08	1,79E-12	-1,63E-17	-3,11E+05	9,67E+01
C ₂	6,32E+06	1,37E+41	-4,0E+00	1, 93E-03	-1,58E-07	5,52E-12	-7,25E-17	9,39E+03	6,61E+01
C ₂ ⁺	4,99E+07	-2,02E+4	6,34E+00	6,37E-04	-1,04E-07	4,94E-12	-7,99E-17	4,12E+05	-2,11E+01
C ₃	1,54E+08	-2,09E+5	7,68E+01	-8,94E-03	5,59E-07	-1,74E-11	2,18E-16	1,65E+06	-6,08E+02
Fe	1,22E+09	-5,83E+5	9,79E+01	-5,37E-03	3,19E-08	6,27E-12	-1,48E-16	4,85E+06	-8,70E+02
Fe ⁺	1,07E+08	-2,88E+4	-2,82E+0	2,71E-03	-3,11E-07	1,54E-11	-2,73E-16	4,14E+05	4,05E+01
Fe ⁻	-1,01E+06	7,64E+02	2,33E+00	1,89E-05	-1,17E-09	3,75E-14	-4,87E-19	4,11E+04	9,68E+00
N	5,48E+08	-3,11E+5	6,92E+01	-6,85E-03	3,83E-07	-1,10E-11	1,28E-16	2,55E+06	-5,85E+02
N ⁺	1,65E+07	-1,11E+4	4,98E+00	-2,01E-04	1,02E-08	-2,69E-13	3,54E-18	3,14E+05	-1,71E+01
N ⁻	1,88E+03	3,91E-01	2,50E+00	9,82E-09	-6,13E-13	1,98E-17	-2,59E-22	5,62E+04	5,01E+00
NO	-9,58E+08	5,91E+05	-1,38E+2	1,69E-02	-1,01E-06	2,91E-11	-3,30E-16	-4,68E+06	1,24E+03
NO ⁺	2,68E+09	-1,83E+6	5,10E+02	-7,11E-02	5,32E-06	-1,96E-10	2,81E-15	1,44E+07	-4,32E+03
N ₂	8,31E+08	-6,42E+5	2,02E+02	-3,07E-02	2,49E-06	-9,71E-11	1,44E-15	4,94E+06	-1,67E+03
N ₂ ⁺	-3,71E+08	3,14E+05	-9,60E+1	1,57E-02	-1,18E-06	4,14E-11	-5,62E-16	-2,22E+06	8,44E+02
O	1,78E+08	-1,08E+5	2,81E+01	-2,98E-03	1,85E-07	-5,80E-12	7,19E-17	8,89E+05	-2,18E+02
O ⁺	-2,14E+08	1,47E+05	-3,68E+1	5,04E-03	-3,09E-07	9,19E-12	-1,07E-16	-9,61E+05	3,43E+02
O ⁻	5,66E+02	7,57E+00	2,50E+00	1,86E-07	-1,15E-11	3,69E-16	-4,79E-21	1,15E+04	4,81E+00
O ₂	4,98E+08	-2,87E+5	6,69E+01	-6,17E-03	3,02E-07	-7,42E-12	7,28E-17	2,29E+06	-5,53E+02
O ₂ ⁺	-1,56E+09	1,16E+06	-3,30E+2	4,71E-02	-3,35E-06	1,17E-10	-1,59E-15	-8,86E+06	2,85E+03
Si ⁺	-4,36E+07	2,43E+04	-2,76E+0	5,92E-04	-4,45E-08	2,51E-12	-5,09E-17	-4,68E+04	5,20E+01
Si ⁻	-5,43E+07	3,30E+04	-2,47E+0	3,97E-04	-1,76E-08	4,12E-13	-3,90E-18	-2,32E+05	5,22E+1
Si	-9,29E+08	5,44E+05	-1,21E+2	1,36E-02	-7,61E-07	2,15E-11	-2,47E-16	-4,29E+06	1,09E+03

Tableau 3 : Coefficients des fonctions thermodynamiques des différentes espèces pour une température comprise entre 6000 K et 20000 K.

Pour déterminer les concentrations des différentes espèces chimiques, nous utilisons la méthode de calcul de minimisation de l'énergie libre de Gibbs [24] [32-38]. Nous déterminons d'abord les nombres de moles et à partir de ces derniers, nous calculons les concentrations.

Ainsi, les nombres de moles y_1, y_2, \dots, y_N doivent satisfaire la neutralité électrique et la conservation du nombre de noyaux dans le plasma. Ces conditions s'obtiennent par :

$$\sum_{i=1}^N a_{ij} y_i = b_j (j = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

Dans cette équation, N est le nombre d'espèces chimiques ; m est le nombre de type de noyaux dans le mélange y compris les électrons ; a_{ij} le nombre de noyau de type j dans la molécule i (les a_{ij} correspondent aux coefficients de la matrice de décomposition des différentes espèces), b_j représente le nombre de noyaux de type j initiale. Nous avons sept types de noyaux différents dans notre plasma (e^- , C, O, N, Si, Al, Fe) donc $m = 7$. $b_1 = 0$ traduit la neutralité électrique dans le plasma d'arc électrique.

En considérant $Y(y_1, y_2, \dots, y_N)$ le point représentant les nombres de moles, l'énergie libre de Gibbs pour des plasmas à plusieurs températures est donnée par l'équation suivante [24,39] :

$$E(Y) = \sum_{i=1}^N y_i (\mu_i^0 + RT_i \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) + RT_i \ln \left(\frac{y_i T_i}{\sum_{k=1}^N y_k T_k} \right)) \quad (11)$$

P_0 est la pression de référence ($P_0 = 10^5$ Pa), P la pression à une température donnée et T_i la température de translation de la particule i .

Une expression simplifiée de l'équation (11) est donnée par

$$E(Y) = \sum_{i=1}^N y_i \left(C_i + RT_i \ln \left(\frac{y_i T_i}{\sum_{k=1}^N y_k T_k} \right) \right) \quad (12)$$

avec $C_i = \mu_i^0 + RT_i \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (13)$

Nous devons rechercher le point $Y(y_1, y_2, \dots, y_N)$ qui minimise la fonction $E(Y)$ et pour lequel les coordonnées y_i satisfont les conditions suivantes :

- les nombres de mole doivent être positives $y_i \geq 0 \forall i$;
- les coordonnées y_i doivent satisfaire la conservation du nombre de noyaux et la neutralité-électrique.

Après un développement en série de Taylor à l'ordre 2 autour du point $Y(y_1, y_2, \dots, y_N)$, à partir de (11) nous obtenons :

$$Q(X) = E(Y) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial E}{\partial x_i} \right)_{X=Y} (x_i - y_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_i \partial x_k} \right)_{X=Y} (x_i - y_i)(x_k - y_k) \quad (14)$$

Ce qui conduit à :

$$Q(X) = E(Y) + \sum_i (x_i - y_i +) (C_i RT_i \ln \left(\frac{y_i T_i}{\sum_{k=1}^N y_k T_k} \right)) \quad (15)$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\sum_i y_i RT_i \left(\frac{x_i - y_i}{y_i} - \frac{\sum_k (x_k - y_k) T_k}{\sum_{k=1}^N y_k T_k} \right) \right)$$

En tenant compte des conditions physiques (équation 10), nous introduisons les multiplicateurs de Lagrange π_i . Ainsi, nous obtenons la fonction $\zeta(X)$.

$$\zeta(X) = Q(X) + \sum_j \pi_j (-\sum a_{ij} x_i + b_j) \quad (16)$$

$E(X)$ est minimum lorsque $\frac{\partial \zeta(X)}{\partial x_i} = 0$ [23].

Ce qui conduit à :

$$\frac{f_i}{y_i} = RT_i \left[\frac{x_i}{y_i} - \frac{\sum_k T_k x_k}{\sum_{k=1}^N T_k y_k} \right] - \sum_{j=1}^m a_{ij} = 0 \quad (17)$$

avec $f_i = y_i \left(C_i + RT_i \ln \left(\frac{y_i T_i}{\sum_{k=1}^N y_k T_k} \right) \right)$ (18)

En utilisant la méthode de Newton-Raphson, on obtient le système d'équations [27, 39, 40] :

$$\begin{pmatrix} \frac{RT_1}{y_1} & \dots & 0 & a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{RT_N a_{N1}}{y_N} & \dots & a_{Nm} \\ a_{11} & \dots & a_{N1} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1m} & \dots & a_{Nm} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_N \\ \Delta \pi_1 \\ \vdots \\ \Delta \pi_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu_1 - RT_1 \ln \left(\frac{T_1 y_1}{\sum_i T_i y_i} \right) - RT_1 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) - \sum_{j=1}^m \pi_j a_{1j} \\ \vdots \\ -\mu_N - RT_N \ln \left(\frac{T_N y_N}{\sum_i T_i y_i} \right) - RT_N \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) - \sum_{j=1}^m \pi_j a_{Nj} \\ -\sum_{i=1}^N y_i a_{i1} + b_1 \\ \vdots \\ -\sum_{i=1}^N y_i a_{im} + b_m \end{pmatrix} \quad (19)$$

Dans le cas de notre étude, nous avons pris en compte cinquante et une (51) espèces chimiques donc $N = 51$. Le système d'équations (19) est donc un système de 58 équations à 58 inconnues, qui sont les nombres de mole des 51 espèces chimiques plus les sept multiplicateurs de Lagrange. Notons que la température du milieu est $T_i = T$ à l'équilibre thermique.

Le principe de cette méthode numérique consiste à affecter initialement et arbitrairement des valeurs aux nombres de mole y_i $i \in \llbracket 1, 51 \rrbracket$ et aux multiplicateurs de Lagrange $\pi_i \in \llbracket 1, 7 \rrbracket$. Les nombres de moles doivent vérifier la condition (10).

Les nouvelles valeurs de nombres de moles (x_i) et les multiplicateurs de Lagrange (π_j) sont obtenus par résolution de l'équation (19). Ce qui conduit au système suivant :

$$\begin{cases} x_i = y_i + \lambda \Delta x_i \quad \forall i \in \llbracket 1, N \rrbracket \\ \pi_j = \pi_j + \lambda \Delta \pi_j \quad \forall j \in \llbracket 1, m \rrbracket \end{cases} \quad (20)$$

Le paramètre $\lambda \in [0, 1]$ est un coefficient de correction. Il permet d'éviter les valeurs négatives des nombres de moles qui peuvent apparaître lorsqu'on s'éloigne de la solution. Il

doit satisfaire la condition $\frac{dE(\lambda)}{d\lambda} < 0$ pour éviter le dépassement du point de convergence. Il correspond à la plus grande valeur comprise entre 0 et 1. Ainsi :

$$x_i = y_i + \lambda \Delta x_i > 0 \forall i \in \llbracket 1, N \rrbracket \quad (21)$$

Les nouvelles valeurs de nombres de moles et de multiplicateurs de Lagrange sont utilisées pour un nouveau cycle de calcul. Le critère d'interruption des itérations est fixé par la condition suivante donnée par Cayet [23] :

$$\frac{(G(x_i) - G(y_i))}{G(x_i)} < 10^{-14} \quad (22)$$

Les densités numériques (n_i) s'obtiennent alors par la loi de Dalton suivante [24] :

$$n_i = x_i \frac{\frac{P - \Delta P}{k}}{T \sum_{i=1}^N x_i} \quad (23)$$

k est la constante de Boltzmann. ΔP est l'abaissement de la pression donné par l'équation :

$$\Delta P = - \frac{kT}{24\pi\lambda_d^3} \quad (24)$$

λ_d la longueur de Debye est donnée par l'équation (25) :

$$\lambda_d = \frac{1}{N_A e} \left(\sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_0 R T}{\chi_e} \right)^{1/2} \quad (25)$$

où ε_0 est la permittivité du vide et χ_e la fraction molaire des électrons ; e la charge élémentaire et N_A le nombre d'Avogadro.

2. Résultats et discussion

Nous présentons dans cette partie, la composition d'un plasma d'air sec d'un disjoncteur à air fonctionnant dans les conditions normales et les compositions des plasmas d'air d'un disjoncteur à air pouvant être contaminé par les aérosols. Les résultats seront donnés à l'équilibre thermodynamique local cependant nous comparons des résultats hors de l'équilibre thermique avec ceux d'autres auteurs afin de valider notre code de calcul.

2.1 Evaluation des écarts

Pour valider notre programme de calcul, nous comparons les concentrations des particules d'un plasma d'hydrogène en déséquilibre thermique θ de 2 pour une température des espèces lourdes de 6000 K qui a été calculé par André [24] aux concentrations données par notre programme. Nous remarquons que les deux résultats sont en accord avec un écart maximal de 27,45% observé pour la molécule H_2 . Nous avons comparé également, nos valeurs de fractions molaires de quelques particules d'un plasma d'air sec avec celles de Koalaga [41] et celles de Abbaoui [42]. Les écarts observés sont donnés dans le Tableau 5. Nous remarquons qu'à 5000 K, nos résultats sont en meilleur accord avec ceux de Abbaoui avec des écarts inférieurs à 10% sauf pour l'ion N^+ pour lequel l'écart vaut 50% par rapport à ceux de

Koalaga les écarts sont légèrement plus élevés ; mais pour l'ion N^+ l'écart est ramené à 27,99%. Il est à noter que l'ion N^+ est l'espèce chimique ayant la plus faible concentration. A haute température (15000 K), la comparaison de nos valeurs avec celles de Koalaga donne des écarts compris entre 0,6% et 15%. Les différents écarts observés peuvent s'expliquer par les données utilisées. De façon générale, nous pouvons dire que notre programme est valide puisque pour les espèces chimiques ayant la plus haute concentration nos résultats sont en très bon accord avec ceux d'autres auteurs [24, 41, 42]

particules	Abbaoui	Koalaga	Nos	Ecarts	Ecarts	Koalaga	Nos	Ecarts
	[42]	[41]	résultats	entre nos résultats et ceux de Abbaoui	entre nos résultats et ceux de Koalaga	[41]	résultats	entre nos résultats et ceux de Koalaga
	5000 K	5000 K	5000 K	%	%	15000 K	15000 K	%
e^-	4,23E-5	3,2E-5	4,16E-5	1,68	1,68	3,43E-1	3,41E-1	0,6
O	3,24E-1	3,25E-1	3,11E-1	4,1	4,5	8,07E-2	7,78E-2	3,7
N	2,66E-2	2,79E-2	2,66E-2	0	4,88	2,34E-1	2,39E-1	2,1
O₂	2,02E-3	1,59E-3	1,97E-3	1,5	19,29	2,9E-8	2,80E-8	3,6
N₂	6,29E-1	6,28E-1	6,43E-1	2,2	3,57	3,51E-6	4,12E-6	14,8
O⁺	7,63E-8	9,93E-8	7,48E-8	2	32,75	5,74E-2	5,40E-2	6,3
N⁺	5,53E-9	4,71E-9	3,68E-9	50,2	27,99	2,85E-1	2,87E-1	0,7
O₂⁺	3,66E-8	2,47E-8	3,32E-8	10,2	25,60	1,08E-7	1,27E-7	15

Tableau 4 : Comparaison de nos résultats avec des données de la littérature.

2.2. Composition d'équilibre

Pour notre étude, nous considérons les plasmas d'air sec, 99,95% d'air sec, 99% d'air sec, 95% d'air sec et 90% d'air sec (en pourcentage massique). Leur composition sont données par les courbes des Figures 1 à 5 qui traduisent l'évolution des densités numériques des différentes espèces chimiques du plasma en fonction de la température des espèces lourdes à la pression atmosphérique.

De manière générale, on constate que les densités numériques des espèces chimiques des différents plasmas évoluent de façon similaire. Dans le cas du plasma à air, l'évolution des différentes espèces présente trois phases :

- la première phase correspond au domaine de température inférieure à 7000 K. Dans ce cas, les espèces chimiques majoritaires sont les molécules : N_2 , O_2 et NO . La neutralité électrique est rigoureusement établie entre les électrons et les ions NO^+ sur cette gamme de température ;
- la deuxième phase concerne la plage de température comprise entre 7000 K et 14400 K. Dans cet intervalle, les espèces chimiques majoritaires sont les particules neutres : N , O , qui proviennent des réactions de dissociations des molécules NO , N_2 , et O_2 . Le processus de dissociation de la molécule N_2 commence autour de 7200 K. Les ions NO^+ disparaissent avec l'augmentation de la température tandis que les ions

O^+ et N^+ apparaissent progressivement. La neutralité électrique est donc progressivement établie entre les électrons et les ions O^+ , N^+ puisque les ions NO^+ disparaissent progressivement ;

- la troisième partie correspond aux températures supérieures à 14400 K. Dans cette phase, les espèces neutres disparaissent progressivement et deviennent négligeables devant les électrons et les ions O^+ , N^+ et l'électro-neutralité est établie entre les électrons et les ions N^+ et O^+ .

Les espèces électronégatives à savoir les anions N^- et O^- ont de façon générale des densités faibles. Néanmoins ces particules pourraient avoir une influence non négligeable sur la conductivité électrique car elles captent les électrons et diminuent ainsi leurs densités numériques.

Dans le cas des plasmas à air dont le taux de contamination en aérosol est compris entre 0,05% à 10%, nous remarquons les mêmes phases d'évolution que dans le cas du plasma d'air. Pour l'ensemble des courbes nous observons :

- A basse température (≤ 7000 K), les espèces chimiques majoritaires sont les molécules N_2 , O_2 , NO , SiO . Les espèces FeO , AlO , Al , Fe et Si apparaissent avec l'augmentation du taux de pollution dans le plasma (ce qui est visible dans le cas du plasma contaminé à 10%). Les espèces SiO , AlO , CO et FeO se dissocient pour des températures inférieures à 4000 K. Les atomes de fer, d'aluminium, et de silicium ont des énergies d'ionisations faibles ($E_{iAl} = 5,986$ eV, $E_{iSi} = 8,151$ eV, $E_{iFe} = 7,902$ eV). Par conséquent, ils vont engendrer à basse température l'apparition des ions Fe^+ , Al^+ , et Si^+ (l'aluminium est l'espèce atomique qui s'ionise le plus vite soit autour de 6000 K ; le fer et le silicium s'ionisent entre 6000 K et 7000 K) ;
- Entre 7000 K et 14400 K, les espèces chimiques majoritaires sont toujours les particules neutres N et O . Cela s'explique par le fait que N et O sont les deux éléments chimiques qui ont les pourcentages massiques les plus élevés dans les différents mélanges ;
- Au-delà de 14400 K, les espèces neutres disparaissent progressivement et deviennent négligeables devant les électrons et les ions O^+ , N^+ , Fe^+ , Al^+ , Si^+ . Pour une température supérieure à 20000 K, les espèces deux fois ionisées pourront être majoritaires ;

La neutralité électrique est établie entre les électrons et l'ion Al^+ pour une température inférieure à 5000 K. Entre 5000 K et 7400 K, on observe la contribution des ions Si^+ , Al^+ , et Fe^+ en plus de NO^+ . Au-delà de 7400 K, la neutralité électrique est assurée par N^+ et O^+ .

Sur l'ensemble des figures on constate que les espèces Fe_2 , Si_2 , Al_2 , C_2 , AlC , C_3 , SiC et AlC n'apparaissent pas car elles ont des densités très faibles ($< 10^{18} m^{-3}$). En effet, l'augmentation de la densité numérique des atomes de fer, du silicium, de l'aluminium et du carbone dans le plasma est due à la dissociation à basse température de ces différentes molécules. Les espèces électronégatives à savoir les anions Si^- , Al^- , Fe^- , C^- ont des densités inférieures à $10^{18} m^{-3}$.

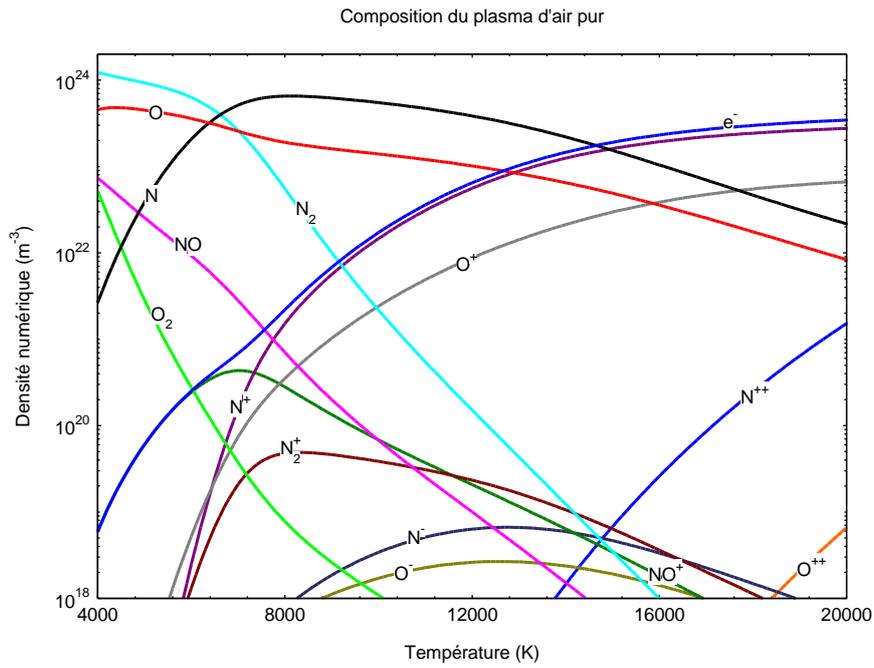


Figure 1 : Composition à l'équilibre d'un plasma à air à la pression atmosphérique

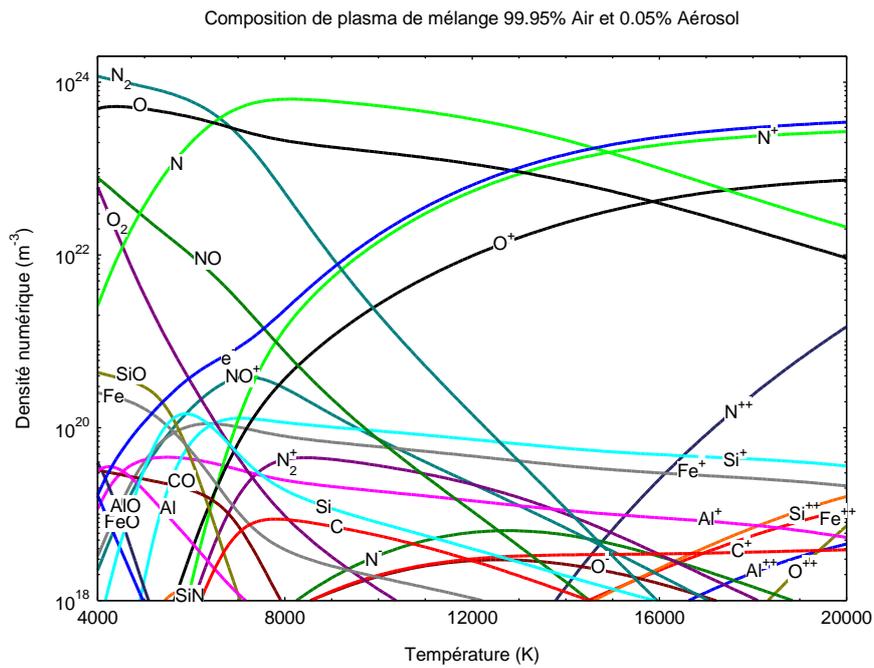


Figure 2 : Composition à l'équilibre d'un plasma à 99,95% d'air et 0,05% d'aérosol à la pression atmosphérique.

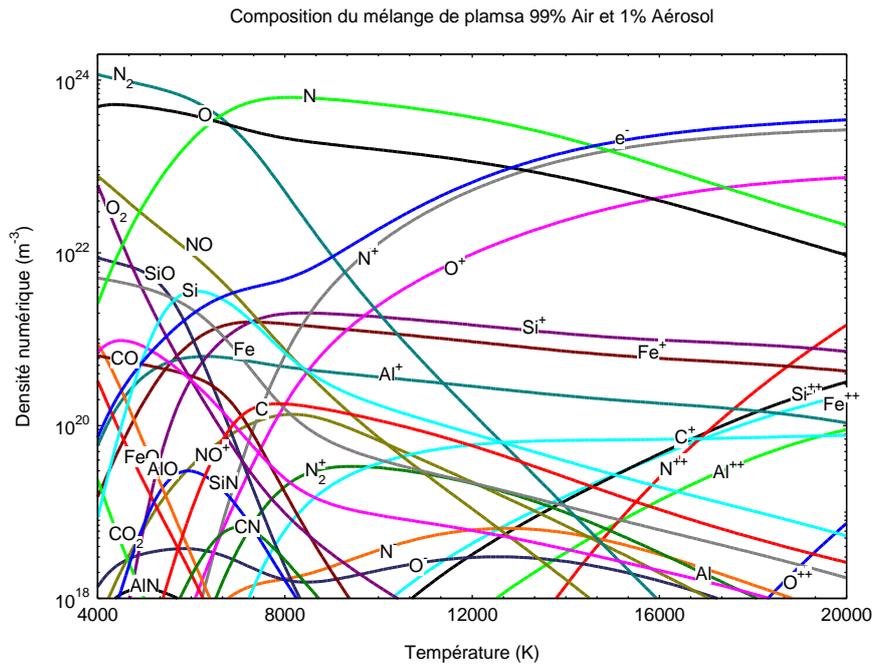


Figure 3 : Composition à l'équilibre d'un plasma à 99% d'air et 1% d'aérosol à la pression atmosphérique.

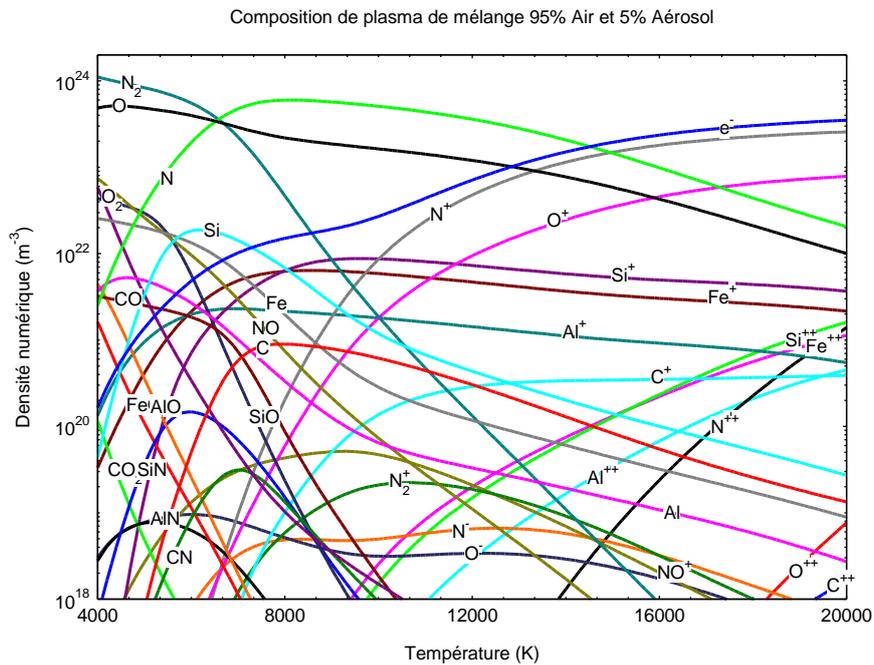


Figure 4 : Composition à l'équilibre d'un plasma à 95% d'air et 5% d'aérosol à la pression atmosphérique.

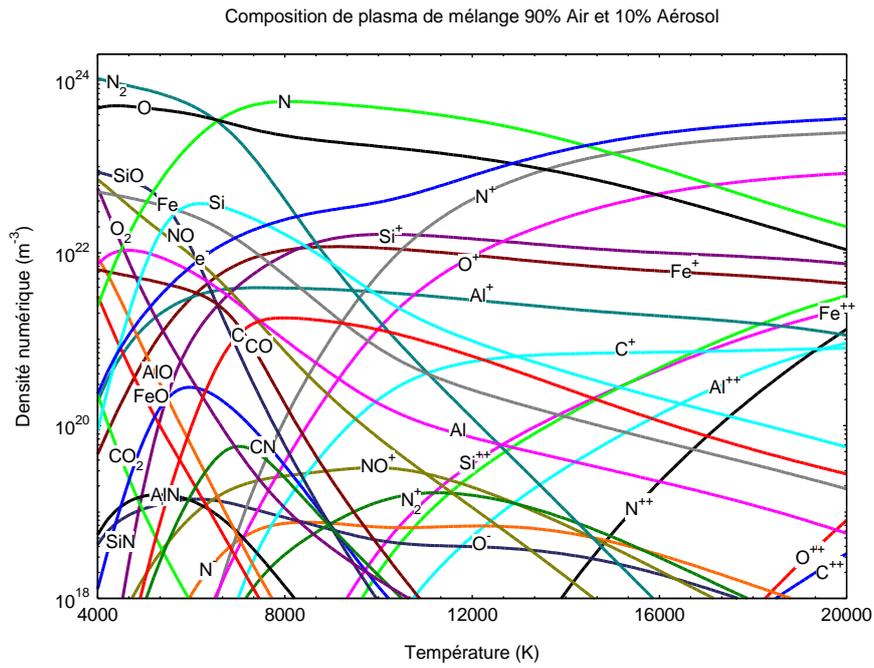


Figure 5 : Composition à l'équilibre d'un plasma à 90% d'air et 10% d'aérosol à la pression atmosphérique.

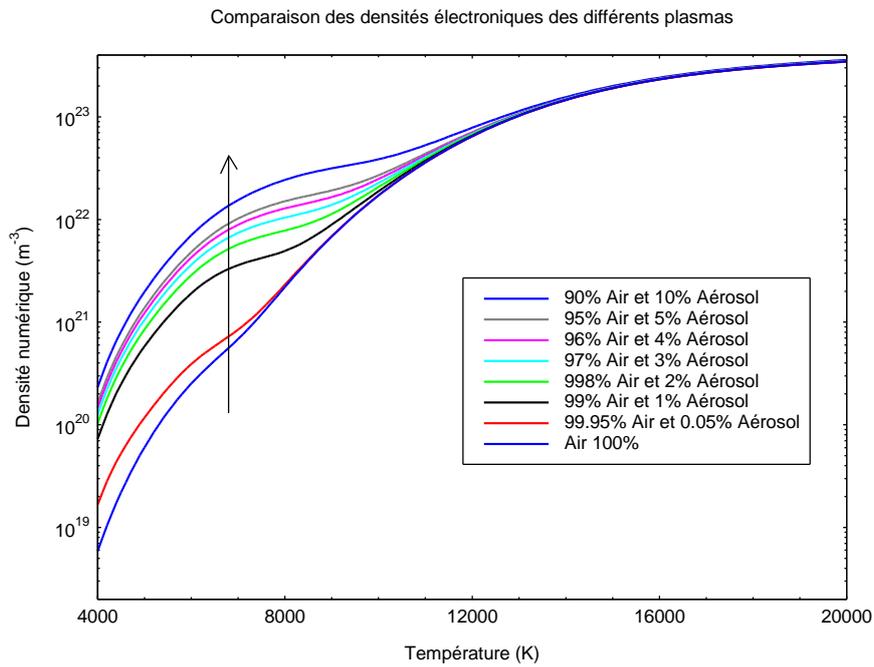


Figure 6 : Comparaison des densités électroniques pour différents mélanges.

2.3 Comparaison des densités électroniques

Pour observer l'influence des aérosols sur la densité électronique du plasma à air, nous comparons les différentes densités électroniques des différents mélanges (voir Figure 6). Nous observons qu'en-dessous de 12000 K, la densité électronique augmente avec le taux d'aérosol du mélange. Cette augmentation se justifie par le fait que les espèces C, Si, Al et Fe s'ionisent à basse température en libérant des électrons. Ce qui contribue à augmenter la densité des électrons. Donc la conductivité électrique pourrait être élevée à basse température, puisqu'elle dépend de la densité électronique. Au-delà de 12000 K, l'influence du pourcentage d'aérosol diminue progressivement avec l'augmentation de la température et la densité des électrons dépend peu de la nature du mélange. Le plasma apparaît moins influencé par les aérosols puisqu'il est totalement ionisé.

Conclusion

La présente étude porte sur la composition chimique des plasmas de mélanges d'air et d'aérosol dans des disjoncteurs à air à l'équilibre thermodynamique local et à la pression atmosphérique, dans une gamme de température allant de 4000 K à 20000 K. La méthode de calcul utilisée est celle de minimisation de l'énergie libre de Gibbs.

Les densités numériques obtenues permettent de montrer l'influence des aérosols sur la composition chimique des plasmas étudiés. Nous remarquons que plus le pourcentage d'aérosol est élevé plus la densité des espèces provenant de ces aérosols augmente dans le plasma. En particulier, pour des températures inférieures à 12000 K la densité électronique augmente avec l'élévation du pourcentage d'aérosols dans le mélange. Cette augmentation de la densité électronique se justifie par le fait que les espèces Si, Al, C et Fe s'ionisent facilement à basse température en libérant des électrons. Elle pourrait conduire à une augmentation de la conductivité électrique du plasma à basse température. Le calcul des coefficients de transport est donc nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

Ainsi, une faible présence de poussière dans la chambre de coupure d'un disjoncteur à air placé dans des atmosphères polluées pourrait modifier complètement son fonctionnement en provoquant notamment le réamorçage de l'arc et l'échauffement des contacts.

Références

- [1] "Note de synthèse relative à la problématique des vents de sable en provenance des déserts", Rapport de l'Institut de Veille Sanitaire (InVS), France, www.invs.sante.fr.
- [2] H. A. Bouh , F. Benyaich, M. Bounakhla, Y. Noack, M. Tahri, F. Zahry, J. Mater (2013), "Variations Saisonnières des particules atmosphériques et ses composants chimiques dans la Ville de Meknès", Environ. JMESCEN 4(1) 49-62; ISSN : 2028-2508.
- [3] G J. Y. Antenne (1985), "Le phénomène des brumes sèches au Sénégal, en 1984-1985", Bulletin n° 7 de l'ORSTOM et du centre de météorologie spatiale, Sénégal.
- [4] C. Tobias et C. Megie (1980-1981), "Les litho-météores au Tchad Premiers résultats concernant la nature, la composition et l'importance des aérosols transportés par voie atmosphérique dans la région de N'Djamena (Tchad) ", Cah. O.R.S.T.O.M, sk. Pbdol., vol. XVIII, no 1, 71-81.

- [5] L. Herrmann, K.E. Bleich, Sterk & K. Stahr, "Dépôt des poussières sur le sol en Afrique de l'Ouest : Propriétés et source des poussières et influence sur les propriétés des sols et sites", Résumé de travaux, Université de Hohenheim, Institut pour la science du sol et Ecologie (310)
- [6] D. Orange, J. Y. Gac et M. I. Diallo (1993), "Constituent composition of Harmattan dust and geochemical balance of atmospheric deposition in continental west Africa", Papers for IAHS proceedings/ IAHS Symposium H₂-Tracers in Hydrology.
- [7] D. Orange, et J. Y. Gac (1990), "Bilan géochimique des apports atmosphériques en domaines sahélienne et soudano-guinéen d'Afrique de l'ouest (bassin s supérieurs du Sénégal et de la Gambie)", Géodynamique 5 : 51-65.
- [8] E.H.T. Doumbia (2012), "Caractérisation physico-chimique de la pollution atmosphérique urbaine en Afrique de l'Ouest et étude de l'impact sur la santé ", Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, France.
- [9] V. Michaud (2009), "Etude des propriétés hygroscopiques des aérosols atmosphériques" ; thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, N° 627, France.
- [10] P. Flament, K. Deboudt, H. Cahier, B. Chatement, X. Meriaux (2011), "Mineral dust and carbonaceous aerosols in West Africa: source assessment and characterization" , Atmospheric Environment 45, 3742-3749.
- [11] El Hadji T Doumbia (2012), "Physico-chemical characterization of urban atmospheric pollution in West Africa and health impact study", Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, France.
- [12] B. Korgo (2014), "Caractérisation optique et microphysique des aérosols atmosphériques en zone urbaine ouest africaine : application aux calculs du forçage radiatif à Ouagadougou", Thèse de doctorat de l'Université de Ouagadougou, Burkina Faso.
- [13] B. Nana (2007), "Etude de la qualité de l'air à Ouagadougou", Rapport de campagne, Laboratoire de Physique chimique et de l'environnement (LPCE), Ouagadougou, Burkina Faso.
- [14] M. Legrand (1990), "Etude des aérosols sahariens au-dessus de l'Afrique à l'aide du canal à 10 microns de METEOSAT: Visualisation, interprétation et modélisation", Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois, France.
- [15] F. Malavelle (2011), "Effets direct et semi-direct des aérosols en Afrique de l'ouest pendant la saison sèche", Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), France.
- [16] O. Pancrati (2003), "Télé-détection de l'aérosol désertique depuis le sol par le radiomètre infrarouge thermique multibande", Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France, (disponible à http://www-loa.univ-lille1.fr/Actualites/THESES/these_ovidiu.pdf).
- [17] C. Lemaître (2011), "Détermination du chauffage radiatif des aérosols désertiques au-dessus de l'Afrique de l'Ouest et de leur impact sur la dynamique atmosphérique à l'aide d'observations satellitaires au cours de la campagne AMMA", Thèse de doctorat des sciences de l'environnement, Université Paris VI, France.
- [18] P. André, M. A. Courty, A. K. Kagoné, Z. Koalaga, N. Kohio, F. Zougmoré (2016), "Calcul de la composition chimique dans un plasma issu de mélanges de PTFE, d'air, de cuivre et de vapeur d'eau dans le cadre d'appareillages de coupure électrique à air" Doi : 10.18145/jitipee.v2i1.128.g70.
- [19] R. Morel (2000), "Techniques de coupure des disjoncteurs BT", Cahier technique n° 154, (disponible à <http://schneider-electric.com>).
- [20] P André, J. Aubreton, M-F Elchinger, P. Fauchais, and A. Lefort, "Plasma concentrations out of equilibrium : N₂ (Kinetic method and mass action law), Ar-CCl₄ and Ar-H₂-CCl₄ (mass action law)", Annals New York Academy of sciences p82-89.

- [21] Anne Aubreton(2002), "Modélisation et étude expérimentale d'un plasma métallique créé par ablation laser", Thèse de l'Université Paul Sabatier, TOULOUSE III, France.
- [22] S. Cayet, M. Dudeck (1996), "Equilibre chimique dans des mélanges gazeux en déséquilibre thermique", *Journal de Physique III*, EDP Sciences, 1996, 6 (3), pp.403-420. <10.1051/jp3:1996130>. <jpa-00249465>
- [23] S. Cayet, M. Dudeck (1996), "Equilibre chimique dans des mélanges gazeux en déséquilibre thermique". *Journal de Physique III*, EDP Sciences, 6 (3), pp.403-420.<10.1051/jp3:1996130>. <jpa-00249465>.
- [24] P. André (1995), "Etude de la composition et des propriétés thermodynamiques des plasmas thermiques à l'équilibre et hors d'équilibre thermodynamique", Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, France.
- [25] N. Kohio (2016), "Etude des propriétés thermodynamiques et des coefficients de transport des plasmas de mélange d'air et de vapeur d'eau en basses températures: application aux disjoncteurs basse et moyenne tensions", Thèse de doctorat de l'Université Ouaga I Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso.
- [26] Malcolm W. Case (1998), "Jr. Nist-janaf Thermochemical Tables", fourth édition part I, Al-Co. *Journal physical chemical reference data. monograph No. 9.*
- [27] F. Bendjebbar, P. André, M. Benbakkar, D. Rochette, S. Flazi, D. Vacher, " Plasma Formed in Argon, Acid Nitric and Water Used in Industrial ICP Torches", *Plasma Science and Technology*, Vol.14, No.8, Aug. 2012 ; Doi : 10.1088/1009-0630/14/8/01.
- [28] J. Bonnie, Mc. Bride, J. Michael, Zeche, and S. Gordon (2002), "Nasa Glenn Coefficients for Calculating thermodynamic properties of Individual Species", Glenn research Center, Cleveland, Ohio.
- [29] Nist: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
- [30] A. V. D. Berg (2007), "Measurement and Calculation of Thermodynamic Properties of Plasma in the Waste Pyrolysis Reactor", *Faculteit Ingenieurswetenschappen Vakgroep Toegepaste Fysica. Universiteit Gent Vakgroep Toegepaste Fysica.*
- [31] P. Krenek (2008), "Thermophysical Properties of H₂O–Ar Plasmas at Temperatures 400–50,000 K and Pressure 0.1 MPa", *Plasma Chem Plasma Process* 28:107–122 Doi : 10.1007/s11090-007-9113-z.
- [32] P André, M. Abbaoui, R. Bessege (1997), "Comparison Between Gibbs Free Energy Minimization and Mass Action Law for Multitemperature Plasma with Application to Nitrogen", *Plasma chemistry and Plasma Processing Vol. 17, No, 2, 207-217.*
- [33] P André (1996),"Composition and thermodynamic properties of ablated vapours of PMMA, PA6-6, PETP, POM and PE", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29, 1963–1972.
- [34] P. André and A. Lefort (1998), "The influence of thermal disequilibrium on a plasma consisting of insulator vapours"*J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.31, 717–729.*
- [35] P André, J Ondet, R Pellet and A Lefort (1997), "The calculation of monatomic spectral lines' intensities and composition in plasma out of thermal equilibrium; evaluation of thermal disequilibrium in ICP torches", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30, 2043–2055.
- [36] P. André, J. Ondet, G. Bouchard and A. Lefort (1999), "Optical emission spectroscopy, thermodynamic and thermal disequilibrium aspects in an inductively coupled plasma torch. Experimental applications to N₂-O₂ mixtures", *J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.32, 920–929.*
- [37] G. Faure, P. André and A. Lefort (1999), "Theoretical calculation of composition, atomic and molecular spectral lines in Ar-SF₆ plasma out of thermal equilibrium", *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol.32, 2376 – 2386.
- [38] P. André and Z. Koalaga (2010), "Composition of a thermal plasma formed from PTFE with copper in non-oxidant atmosphere". *High Temperature Material Processes.*

- [39] N. Kohio, A. K. Kagoné, Z. Koalaga, F. Zougmore (2014), "Composition of Air-Water Vapor Mixtures at Low Temperatures", I.J.A.R.S.E.T, Vol. 1, Issue 5 , ISSN: 2350-0328.
- [40] D. Rochette W. Bussière and P. André (2004), "Composition, Enthalpy and Vaporisation Temperature calculation of Ag-SiO₂ plasmas with air in the temperature range from 1000 to 6000 K and for pressure included between 1 and 50 bar", Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.24, No.3.
- [41] Z. Koalaga (1991), "Contribution à l'étude expérimentale et théorique des plasmas d'arc laminés", Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, France.
- [42] M. Abbaoui (1986), "Etude des caractéristiques du plasma d'un arc électrique contaminé par des vapeurs issues de métaux et d'isolants", Thèse de Doctorat d'Université N°22, Clermont Ferrand.