



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Frères Mentouri, Constantine 1  
Faculté des Sciences de la Technologie  
Département de Génie Mécanique



N° de série : 111/DS/2021

N° d'ordre : 06/GM/2021

**THÈSE**

Présentée pour l'obtention du Diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Énergétique

**Intitulée**

**Modélisation et optimisation d'une installation solaire hybride**

**Présentée par :**

Anis IMAKHLAF

Soutenue le : **15 Décembre 2021**

**Devant les Membres du Jury :**

|                           |      |              |   |
|---------------------------|------|--------------|---|
| <b>BOUCHOUCHA Ali</b>     | Prof | Président    | Université Frères Mentouri, Constantine 1 |
| <b>BEGHIDJA Abdelhadi</b> | Prof | Rapporteur   | Université Frères Mentouri, Constantine 1 |
| <b>BELHAMRI Azzedine</b>  | Prof | Examineur    | Université Frères Mentouri, Constantine 1 |
| <b>IHADDADEN Nabila</b>   | Prof | Examinatrice | Université Mohamed Boudiaf, M'sila        |
| <b>BENDERADJI Razik</b>   | MCA  | Examineur    | Université Mohamed Boudiaf, M'sila        |

**Année universitaire 2020/2021**

## Remerciements

---

Louange à Allah le tout Puissant le plus miséricordieux,

*Je remercie Dieu le tout Puissant qui m'a donné courage, persévérance et détermination pour achever à bien et à mener à terme cette modeste thèse doctorale ;*

*Une reconnaissance distinguée doit être formulée à l'égard de mon directeur de thèse Abdelhadi BEGHIDJA, pour son aide, son support et ses conseils qui m'ont permis la réalisation de ce travail de thèse ;*

*Je suis sensible à l'honneur que me font Dame, Messieurs les membres du jury en acceptant d'évaluer et d'examiner ce modeste travail ;*

*Je tiens également à remercier le personnel administratif du département de génie mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie, de l'université de Constantine 1, pour le bon déroulement de toutes mes affaires administratives en tant que thésard ;  
Je ne peux terminer sans exprimer ma gratitude à mes chers parents, sans eux, je n'en serai pas à ce stade sans leur aide précieuse ;*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma femme, pour sa patience, ses encouragements, et son soutien indéfectible de tous les instants ; à ma famille et à mes amis pour les encouragements qu'ils m'ont prodigués et leur appui inconditionnel à chaque étape de ma vie et un vibrant hommage aux enseignants auxquels j'ai appris durant tout mon parcours du primaire à l'universitaire ;*

*Je souhaite enfin, remercier, tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué au bon déroulement de ce travail de thèse.*

## DEDICACES

---

À mes parents que Dieu les bénisse et garde parmi ses fidèles, pour leur soutien  
inconditionnel tout au long de ma vie.

À ma tendre épouse pour son amour et son dévouement.

À ma petite fille qui illumine mon existence

À titre posthume, A ma grande mère que Dieu ait son âme dans son vaste paradis

À mes chers sœurs et frères, à mes beaux-parents et leur enfant, à mes tantes et  
oncles,

À tous mes amis

## **Résumé ( Modélisation et optimisation d'une installation solaire hybride)**

Le travail entrepris dans cette thèse a pour but d'établir de nouvelles approches d'optimisation et de modélisations des installations solaires hybrides (centrales thermodynamiques). Aussi, on a mené des modélisations sur les principaux organes fonctionnels de ce type d'installation tels que : le groupe turbogénérateur, les capteurs cylindro-paraboliques, capteur Fresnel, chambre de combustion, suivi d'une optimisation. Aussi, on a traité les configurations numériquement en basant sur l'environnement Matlab en recouvrant deux grands axes de recherche, l'optimisation du flux énergétique et la modélisation du procès de combustion.

**Mot clé :** optimisation, gradient conjugué, équivalent ratio, constante d'équilibre, combustion sans flamme

## **Abstract (Modelling and optimization of an hybrid solar power plant)**

The work undertaken in this thesis aims to establish new optimization and modeling approaches for hybrid solar installations (thermodynamic plants). Also, modeling was carried out on the main functional organs of this type of installation such as: the turbo-generator group, parabolic cylinders, Fresnel sensor, and combustion chamber, followed by optimization. Also, We treated the configurations numerically based on the Matlab environment covering two main areas of research, optimization of the energy flow and the modeling of the combustion process..

**Keywords:** Optimization, conjugate gradient, equivalence ratio, equilibrium constant, flameless combustion

## **ملخص**

يهدف العمل المنجز في هذه الأطروحة إلى إنشاء مناهج تحسين ونمذجة جديدة للتركيبات الشمسية الهجينة (محطات الطاقة الديناميكية الحرارية) أيضاً، تم تنفيذ نماذج على الأعضاء الوظيفية الرئيسية من هذا النوع للتثبيت مثل: مجموعة التوربينات ، الأسطوانات المكافئة ، مستعر فرينل ، غرفة الاحتراق ، متبوعاً بالتحسين. أيضاً ، قمنا بمعالجة التكوينات عددياً بناءً على البيئة Matlab من خلال تغطية مجالين رئيسيين من البحث ، وهما تحسين تدفق الطاقة ونمذجة عملية الاحتراق

**كلمات المفتاح:** التحسين ، طريقة التدرج المتقارن ، النسبة المكافئة ، ثابت الاعتدال الكيميائي ، احتراق دون شعلة

## **Table des Matière**

### **Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire**

|  |    |
|--|----|
| I.1. Introduction .....                                      | 1  |
| I.2. Gisement Solaire .....                                  | 1  |
| I.2.1 Caractéristiques générales .....                       | 1  |
| I.2.2 Energie solaire .....                                  | 2  |
| a. Constante d'illumination.....                             | 4  |
| I.2.3 Paramètres astronomiques .....                         | 6  |
| a.coordonnées équatoriales .....                             | 6  |
| b.coordonnées horizontales.....                              | 7  |
| I.2.4 Paramètres géographiques .....                         | 7  |
| I.2.5 Nomenclature des différents instruments de mesure..... | 8  |
| I.3 Technique de captage de l'énergie solaire .....          | 8  |
| I.3.1 Le thermique solaire .....                             | 8  |
| a. L'énergie solaire passive.....                            | 9  |
| b. L'énergie solaire active.....                             | 9  |
| I.3.2 Le collecteur .....                                    | 13 |
| I.3.3 Miroirs de Fresnel.....                                | 14 |
| I.3.4 Fluide caloporteur et récepteur solaire .....          | 14 |
| a. La conversion photovoltaïque.....                         | 16 |
| b. Mécanisme de la conversion photovoltaïque.....            | 16 |
| I.3.6 Photopile à Silicium .....                             | 19 |
| I.4 Géothermie .....   | 19 |
| I.4.1 La production d'eau chaude .....                       | 20 |

### **Chapitre II: Développement analytique et numérique du problème inverse d'estimation du flux de chaleur**

|  |    |
|--|----|
| II.1.Cas d'un écoulement dans une conduite cylindrique ( Type cylindroparabolique) ..... | 24 |
| II.1.1. Equation gouvernantes .....  | 24 |
| II.1.2. Adimensionnement des équations gouvernantes .....                                | 26 |
| II.2. Développement numérique .....  | 28 |
| II.2.1. Principe du calcul numérique par différences finies.....                         | 28 |
| II.3. Application au cas d'une conduite à plaques parallèles de type FRESNEL .....       | 31 |
| II.4. Application au cas d'une conduite cylindrique.....                                 | 36 |

### **Chapitre III: Optimisation de paramètres par la méthode du gradient conjugué et validation du modèle proposé**

|   |    |
|---|----|
| III.1. Introduction.....                                      | 42 |
| III.2. Problème inverse de la configuration plane .....       | 43 |
| III.2.1. La fonctionnelle J.....                              | 43 |
| III.2.2. Le problème sensitif.....                            | 43 |
| III.2.3. Problème adjoint et équations du gradient .....      | 44 |
| III.3. Problème inverse de la configuration cylindrique ..... | 46 |
| III.3.1. Problème sensitif.....                               | 47 |

|   |    |
|---|----|
| III.3.2. Problème adjoint et équations du gradient .....                          | 47 |
| III.3.3. Application de la méthode du gradient conjugué pour la minimisation..... | 49 |
| III.4. Critère d'arrêt.....   | 50 |
| III.5. Résultats:.....  | 51 |
| III.6. Conclusion .....   | 58 |

## **Chapitre IV: Modélisation et simulation de la chambre de combustion**

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 60 |
| IV.1. Température adiabatique de la flamme et composition à l'équilibre .....            | 60 |
| IV.2. Equation de combustion pour un équivalent ratio supérieur à un .....               | 69 |
| IV.3. Equation de combustion générale pour différentes valeur de l'équivalent ratio..... | 82 |
| IV.4. Conclusion .....   | 94 |

## **Chapitre V: Modélisation et mise en équations du modèle de combustion sans flamme**

|  |     |
|--|-----|
| V.1. Le modèle de combustion sans flamme ..... | 96  |
| V.2. Mise en équation .....                    | 97  |
| Conclusion générale.....                       | 106 |
| Références bibliographiques.....               | 108 |
| Annexe I.....                                  | 114 |
| Annexe II.....                                 | 125 |
| Annexe III.....                                | 150 |

## Liste des Tableaux

|   |     |
|---|-----|
| Table I-1: Les différents constituant du soleil.....  | 1   |
| Table IV-1 : Variation de la température de la flamme adiabatique en fonction de l'équivalent ratio $\phi$ .....  | 67  |
| Table IV- 2 : variation de la constante d'équilibre en fonction de la température .....   | 70  |
| Table IV-3 : Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p T = 1000 = 0,69$ .....   | 164 |
| Table IV-4: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p T = 1100 = 1,0069$ .....  | 165 |
| Table IV-5: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p T = 1200 = 1,3646$ .....  | 166 |
| Table IV-6: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p T = 1300 = 1,7498$ .....  | 167 |
| Table IV-7: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p T = 1400 = 2,1528$ .....  | 168 |
| Table IV-8: Distribution de la fraction molaire à 1500K ou sous $K_p^{T=1500} = 2,5645$ .....   | 169 |
| Table IV- 9: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=1600} = 2,9785$ .....   | 170 |
| Table IV-10: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=2000} = 4,5289$ .....   | 174 |
| Table IV-11: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=1000} = 0,69$ et $K_{p_1}^{T=1000} = 6.10^{-11}$ .....          | 175 |
| Table IV-12: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=1100} = 1.0069$ et $K_{p_1}^{T=1100} = 1.32*10^{-9}$ .....      | 177 |
| Table IV-13: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=1400} = 2.1528$ et $K_{p_1}^{T=1400} = 9.68 * 10^{-7}$ ..... | 209 |
| Table IV-14: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=1700} = 3.3884$ et $K_{p_1}^{T=1700} = 6.77 * 10^{-5}$ ..... | 216 |
| Table IV-15: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=1800} = 3.8548$ et $K_{p_1}^{T=1800} = 2.03 * 10^{-4}$ ..... | 218 |
| Table IV-16: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=1900} = 4.1591$ et $K_{p_1}^{T=1900} = 5.41 * 10^{-4}$ ..... | 220 |
| Table IV-17: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous $K_p^{T=2000} = 4.5289$ et $K_{p_1}^{T=2000} = 1.31 * 10^{-3}$ ..... | 223 |
| Table V-18 : Variation de la température adiabatique en fonction de l'équivalent ratio dans la combustion sans flamme.....  | 101 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure I-2: Principe de la fusion nucléaire   | 3  |
| Figure I-3: Illustration de la structure solaire.   | 3  |
| Figure I-4: Constante solaire ( $1367 \text{ W/m}^2$ )  | 4  |
| Figure I-5: variation de la masse air en fonction de la hauteur solaire h                                   | 5  |
| Figure I-6: Répartition du gisement solaire mondiale (irradiation solaire)                                  | 5  |
| Figure I-7: Décomposition du rayonnement solaire  | 6  |
| Figure I-8: Mouvement de la terre autour du soleil  | 6  |
| Figure I-9: Coordonnées solaires selon le repère horizontal   | 7  |
| Figure I-10: Angle horaire, hauteur et Azimut du soleil par rapport à un plan                               | 7  |
| Figure I-11: latitude et longitude  | 8  |
| Figure I-12: Solaire thermique active domestique.   | 10 |
| Figure I -13: Schéma d'une centrale thermique solaire.  | 10 |
| Figure I-14: Capteur parabolique  | 11 |
| Figure I-15: Concentrateur solaire à ébullition directe à Almeria   | 11 |
| Figure I-16: Configuration typique d'un système de tour solaire à sels fondus                               | 12 |
| Figure I-17: Solar II central receiver plant in Barstow, California   | 12 |
| Figure I-18: centrale à effet cheminée  | 13 |
| Figure I-19: centrale cylindroparabolique   | 13 |
| Figure I-20: Tube collecteur  | 14 |
| Figure I-21: Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel  | 15 |
| Figure I-22: Schéma d'une installation photovoltaïque   | 16 |
| Figure I-23: Mécanismes fondamentaux de l'effet photovoltaïque  | 19 |
| Figure I-24: Composition du panneau solaire et du générateur photovoltaïque                                 | 19 |
| Figure I-25: Conversion direct de l'énergie   | 21 |
| Figure I-26: Schéma d'une centrale géothermique utilisant le cycle de Kalina                                | 1  |
| Figure II-2: Configuration du problème  | 26 |
| Figure 0-2: Elément de maillage du domaine de calcul en (i, j).   | 33 |
| Figure III-3: Flux estimé pour $\sigma = 0.005$ Configuration Sinusoïdale.                                  | 56 |
| Figure III-4: Flux estimé pour différentes valeur de $\sigma$ à la 40 itération (Configuration Sinusoïdale) | 56 |
| Figure III-3: Flux estimé pour $\sigma = 0.006$ à différentes itérations ( Configuration spatiotemporelle)  | 57 |
| Figure III-4: flux estimé pour différentes valeurs de $\sigma$ à la 40ème itération                         | 57 |
| Figure III-5: Diffusion du flux de chaleur à travers les parois du receveur solaire                         | 58 |
| Figure III-6: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour $\sigma=0,0008$              | 58 |
| Figure 0-7: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour $\sigma=0,002$ .               | 59 |
| Figure 0-8: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour $\sigma = 0.005$               | 59 |
| Figure 0-9: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour $\sigma=0.008$ .               | 60 |

|  |    |
|--|----|
| Figure III-10: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour $\sigma=0,0008$ .                              | 60 |
| Figure III-11: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour $\sigma = 0.002$                               | 61 |
| Figure III-12: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour $\sigma = 0.005$                               | 61 |
| Figure III-13: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour $\sigma=0.008$ .                               | 62 |
| Figure IV-5: Température de la flamme adiabatique en fonction de l'équivalent ratio pour différents hydrocarbures (carburants) | 67 |
| Figure IV-6: Distribution de la température en fonction de l'enthalpie pour un équivalent ratio $\phi = 1$                     | 71 |
| Figure IV-7: Méthane en fonction de l'équivalent ratio inférieur à 1   | 74 |
| Figure IV- 4 : Distribution du nombre de moles de produits à 1000K ou bien à $K_p=0,69$  | 78 |
| Figure IV-5: Distribution de la fraction molaire de produits sous 1000K ou bien $K_p= 0,69$                                    | 79 |
| Figure IV-6: Distribution de la fraction molaire des produits sous 1100K ou $K_p= 1,0069$                                      | 80 |
| Figure IV-7: Distribution de la fraction molaire des produits sous 1200K ou $K_p=1,3646$                                       | 82 |
| Figure IV-8:Distribution de la fraction molaire des produits sous 1300K ou $K_p= 1,7498$                                       | 83 |
| Figure IV-9:Distribution de la fraction molaire des produits sous 1400K ou $K_p=2,1528$  | 85 |
| Figure IV-10: Distribution de la fraction molaire des produits à 1500K ou $K_p= 2,5645$  | 86 |
| Figure IV-11: Distribution de la fraction molaire sous 1600K ou $K_p=2,9785$   | 88 |
| Figure IV-12: Distribution de la fraction molaire sous 1700K ou $K_p=3,3884$   | 89 |
| Figure IV- 13: Distribution de la fraction molaire des produits sous 1800K ou $K_p=3,8548$                                     | 91 |
| Figure IV-14: Distribution de la fraction molaire des produits sous 1900K ou $K_p=4,1591$                                      | 92 |
| Figure IV-15:Distribution de la fraction molaire des produits sous 2000K ou $K_p= 4,5289$                                      | 94 |
| Figure IV-16: Variation de la fraction molaire de $CO_2$ en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                     | 94 |
| Figure IV-17: Variation de la fraction molaire de $H_2$ en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                      | 95 |
| Figure IV-8:Variation de la fraction molaire de CO en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                           | 95 |
| Figure IV-19:Variation de la fraction molaire de $H_2O$ en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                      | 96 |
| Figure IV-20:Variation de la pression de CO en fonction de l'équivalent ratio  | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| pour différentes valeur de la constante d'équilibre $K_p$  |     |
| Figure IV-21: Variation de la pression de $H_2$ en fonction de l'équivalent ratio pour différentes valeur de la constante d'équilibre $K_p$  | 98  |
| Figure IV-23: Variation de la pression de $CO_2$ en fonction de l'équivalent ratio pour différentes valeur de la constante d'équilibre $K_p$ | 99  |
| Figure IV-24: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1000K   | 154 |
| Figure IV-25: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1100K   | 155 |
| Figure IV-26: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1200K   | 155 |
| Figure IV-27: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1300K   | 156 |
| Figure IV-28: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1400K   | 156 |
| Figure IV-29: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1500K   | 157 |
| Figure IV-30: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1600K   | 157 |
| Figure IV-31: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1700K   | 158 |
| Figure IV-32: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1800K   | 158 |
| Figure IV-33: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1900K   | 159 |
| Figure IV-34: Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 2000K   | 159 |
| Figure IV-35: Variation de la fraction molaire de $CO_2$ en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                                   | 160 |
| Figure IV-36: Variation de la fraction molaire de $CO$ en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                                     | 160 |
| Figure IV-37: Variation de la fraction molaire de $H_2O$ en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                                   | 161 |
| Figure IV-38: Variation de la fraction molaire de $H_2$ en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                                    | 161 |
| Figure IV-39: Variation de la fraction molaire de $O_2$ en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K                                    | 162 |
| Figure V-1: Chambre de combustion en mode flameless combustion   | 164 |
| Figure V-2: Variation de la fraction molaire de produits de combustion en fonction de l'équivalent ratio                                     | 170 |
| Figure V-3: Température adiabatique de la combustion sans flamme du méthane en fonction de l'équivalent ratio                                | 170 |

## **Nomenclature**

A: diffusivité thermique adimensionnelle

A,b,c,d,e: fractions molaires des produits

$c_p$  : chaleur spécifique (J/kg K)

d: direction de la descente

J: fonction objectif

h: enthalpie (KJ/kg)

H: largeur du canal ou conduite (m)

K: conductivité thermique adimensionnelle

k: conductivité thermique (W/m K)

Pe: nombre de Peclet

q: flux de chaleur

Re: nombre de Reynolds

t: temps (s)

T: température (K)

$T_0$ : température initiale (K)

U: vitesse adimensionnelle

u: vitesse (m/s)

X Y: coordonnées cartésiennes sans dimension

Z: temperature mesurée adimensionnelle

## **Symboles Grecs**

$\alpha$  diffusivité thermique ( $m^2s^{-1}$ );

$\beta$  pas de la descente;

$\delta$  épaisseur de la plaque (m) ;

$\rho$  densité ( $kg/m^3$ )

$\varepsilon$  très petit nombre positif

$\gamma$  coefficient conjugué

$\lambda$  coefficient de Lagrange

$\theta$  température adimensionnelle

$\sigma$  écart-type

$\omega$  épaisseur de la plaque adimensionnelle

$\tau$  temps adimensionnel

$\phi$ : equivalent ratio

$K_p$ : constante d'équilibre chimique

## **Susscript**

n nombre d'itération

## **Sousscripts**

s solide

f fluide

## **Introduction Générale**

Nous tentons d'apporter une part de solution à la problématique énergétique actuelle que traversent la plupart des pays en voie de développement, entre autres notre pays. La clef est de mener l'économie nationale vers une échappatoire énergétique, où nous basons plus sur les aléas du prix de pétrole. Ce dernier, a connu des hauts et des bas dans ces vingt dernières années. Ainsi, cette stratégie passe nécessairement par la maîtrise des techniques du captage solaire photovoltaïque et thermodynamique. Ces dernières, offrent un moyen incontestable dans la roue socioéconomique du pays afin de booster toutes les filières d'engineering, et mettre une nouvelle dynamique industrielle afin d'avoir un nouveau moyen de contribution de l'argent public. Ces pratiques mènent vers une liesse énergétique et éviter le joug des prédateurs énergétiques mondiaux qui guettent sur notre économie.

L'électricité représente en effet de nos jours une ressource essentielle et vitale pour l'homme. Dans tous les secteurs, elle est impliquée dans l'approvisionnement en nourriture et en eau, la climatisation, l'éclairage, la santé, les communications, l'informatique, etc... Ainsi, l'accès à l'énergie électrique est sans doute un facteur clé du développement socio-économique local, régional, et national. En raison d'une demande mondiale d'énergie croissante, notamment dans le domaine du bâtiment, les ressources d'énergies fossiles, voire fissiles, se réduisent progressivement. Ce qui se répercute inversement sur les gisements de pétrole brut et de gaz naturel. Ces derniers, seront pratiquement épuisés à plus ou moins long terme. De plus, la forte utilisation de combustibles fossiles et du bois est la cause de graves dommages environnementaux et d'un réchauffement climatique à l'échelle mondiale.

Les conséquences économiques du choc pétrolier des années 1970, ont attiré l'attention sur ces problèmes, et sur les solutions pouvant être apportées. De plus, elles ont lancé, bien que faiblement le développement de la technologie solaire avec ses filières : photovoltaïque et photothermique. Avec surtout le solaire thermodynamique qui est principalement adjoint avec les centrales traditionnelles en incorporant la technique du chauffage (concentration solaire) à partir du rayonnement solaire direct, afin d'avoir un apport d'appoint vis-à-vis le carburant utilisé dans la combustion, et afin de récupérer la chaleur. C'est pourquoi, l'énergie solaire étant une source inépuisable d'approvisionnement en énergie.

Ces dernières années, plusieurs pays ont intensifié leurs mesures en faveur de l'utilisation de l'énergie solaire. Ces pays ont notamment institué des taxes environnementales, des programmes de subventions et d'autres incitations en faveur des systèmes liés aux énergies renouvelables. En voyant fidèlement et potentiellement les pays de la rive du sud de la méditerranée et surtout l'Algérie, elle dispose d'énormes potentialités en gisement solaire c'est pourquoi c'est de notre devoir de retracer le chemin afin d'y prendre part dans l'épanouissement énergétique de nos citoyens et du pays dans sa globalité.

De telles stratégies, ont vu le jour dès l'augmentation brutale du prix du pétrole survenu en 1973, qui ont conduit pour une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergies renouvelables au premier rang desquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile.

On s'est vite aperçu que l'énergie solaire, contrairement à une idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite. Son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergie conventionnelles.

Toutefois, sans être totalement gratuite, l'énergie solaire présente des coûts de fonctionnement réduits et offre dans certains cas une alternative économiquement rentable par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.

Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminuent), mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement. Elle conduit à la minimisation de rejets polluants (Control sévère des rejets de fumées contenant du CO<sub>2</sub> et des NO<sub>x</sub> par les centrales thermiques), pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires), possibilité de limitation de l'emploi des CFC (production de froid solaire par adsorption).

la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, rendent urgent la maîtrise et la rationalisation des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme, mais aussi, dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple).

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire, mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certaine courante : énergie hydraulique...) Et la Terre (géothermie profonde...).

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : la quantité d'énergie libérée par le soleil et captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an.

Une partie de ce rayonnement, peut être exploitée pour produire directement de l'électricité (solaire photovoltaïque) ou de la chaleur : c'est l'énergie solaire thermique.

Dans notre étude, on a divisé notre travail en cinq chapitres. Le premier sur les généralités sur l'énergie solaire, le deuxième est consacré pour la modélisation du système pris, le troisième est une application directe du programme méthode des

moindres carrés afin d'avoir des minimums d'énergie et estimé la quantité d'énergie mise en jeux réellement, le quatrième est une étude détaillée vouée à la chambre de combustion, où une modélisation profonde est faite afin de trouver le lien entre la température et l'équivalent ratio, et enfin le dernier est dédié à une autre méthode de combustion, dite sans flamme. Dans certaines conditions, le mélange s'auto-enflamme tout seul sans la présence de flamme ce qui diminue la quantité des gaz à effet de serre rejetés vers la nature.

## **Chapitre I : Introduction au gisement solaire**

## I.1. Introduction

Actuellement, les énergies renouvelables sont d'actualité et très favorisées du fait qu'elles sont abondantes et non polluantes. Parmi elles, celle qui est la plus développée, la plus populaire et la plus répandue est l'énergie solaire. C'est une énergie qui est très abondante, inépuisable et durable, car elle peut être employée dans différents secteurs : l'agriculture, l'habitat, les centrales électriques ; et pour différents domaines : chauffage, électricité, chauffe-eau, dessalement des eaux salines. De plus, nous avons le choix entre différentes installations pour optimiser son rendement selon son utilisation ainsi on trouve la filière photovoltaïque où la conversion se fait directement avec le module solaire qu'est fabriqué par des matériaux qu'on appelle semi-conducteurs comme le silicium, le germanium et autre, et on trouve la filière photothermique où le flux solaire est converti en chaleur afin de l'utiliser pour le chauffage du fluide caloporteur et économiser en terme d'utilisation des ressources fossiles comme le pétrole et le gaz et atténuer les émissions du gaz à effet de serre. [1]

## I.2. Gisement Solaire

### I.2.1 Caractéristiques générales

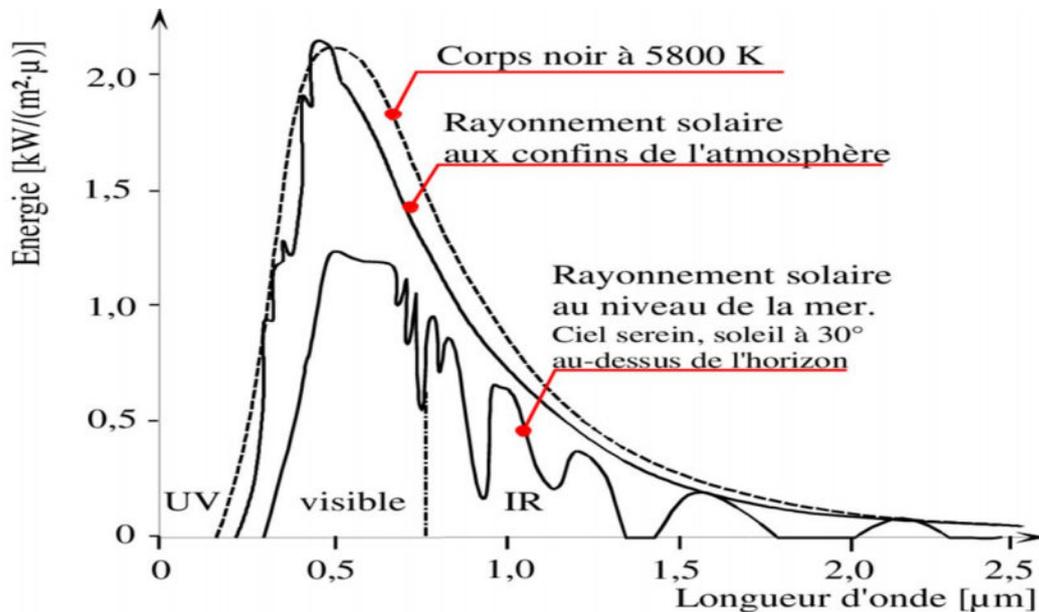
Le Soleil (**Sol** en latin, **Helios** ou **Ἥλιος** en grec) est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à 150 millions km de nous (*périhélie* : 147,1 millions de km et *aphélie* : 152,1 millions de km). Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. N'oublions pas qu'elle voyage à la vitesse de 300 000 km/s, c'est-à-dire qu'elle fait 7 fois le tour de la Terre en 1 seconde. Quant à son volume, il pourrait contenir 1 300 000 Terres. Avec une densité de 1,41 g/cm<sup>3</sup> (contre 5,5 pour la Terre), sa masse est de 330 000 fois celle de la Terre (1,99.10<sup>30</sup> kg ou 2 milliards de milliards de milliards de tonnes). Il représente 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil.

**Table 0-1:** Les différents constituant du soleil

| Composition de la photosphère | pourcentage en masse |
|-------------------------------|----------------------|
| Hydrogène                     | 73,46 %              |
| Hélium                        | 24,85 %              |
| Oxygène                       | 00,77 %              |
| Carbone                       | 00,29 %              |
| Fer                           | 00,16 %              |
| Néon                          | 00,12 %              |
| Azote                         | 00,09 %              |
| Silicium                      | 00,07 %              |
| Magnésium                     | 00,05 %              |
| Soufre                        | 00,04 %              |

# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

Il n'a pas de surface à proprement parler, mais la température de radiation, si on assimile le Soleil à un corps noir, Figure I.1, est de 5 800 K selon la loi de Stephan (0 Kelvin = - 273,15 °C, c'est le zéro absolu ; l'agitation moléculaire est stoppée). La couleur est en relation directe avec la longueur d'onde, laquelle est liée à la température. Ainsi, en analysant la couleur, nous pouvons obtenir facilement sa température de radiation. Au centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grandes que la pression atmosphérique de notre Terre qui est de 1033 hectopascals au niveau de la mer, entraînant une température de 15 millions K, et plusieurs 35 millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère (> 10 000 km à plusieurs millions de km). [2]

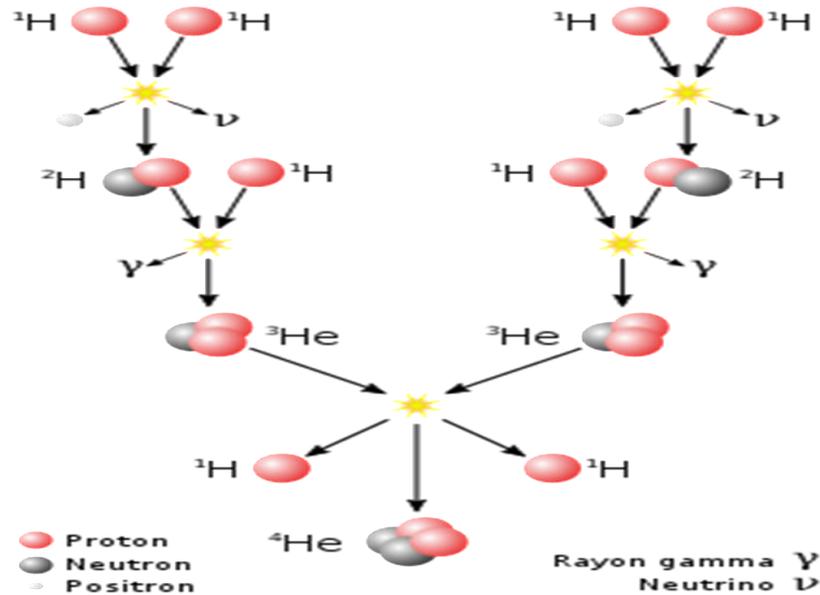


**Figure I-1:** Spectre du rayonnement solaire

## I.2.2 Energie solaire

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable : 3,82. 10<sup>26</sup> Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène converti en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque cm<sup>2</sup> de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes (5.10<sup>-9</sup>) de cette puissance.

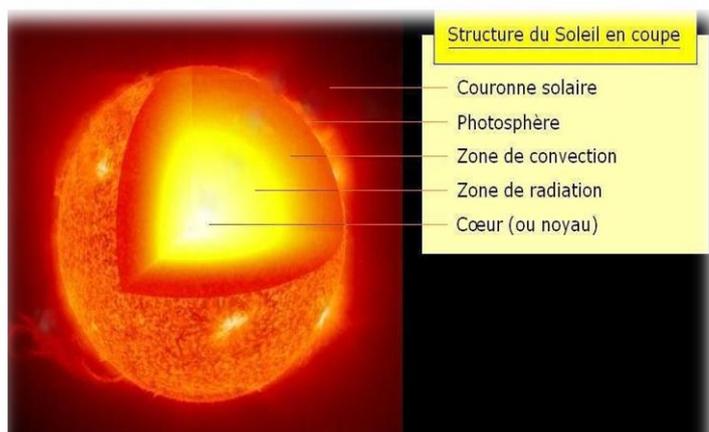
Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent, Figure I-2, pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25 000 mégawatts par gramme et par seconde.



**Figure I-2:** Principe de la fusion nucléaire

Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Il ne faut pas confondre la fusion avec la fission, qui casse les noyaux dans une bombe atomique. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour faire augmenter un gramme d'eau d'un degré. Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère **Figure I.3**, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection.

Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil, tandis qu'il leur faut 8 minutes pour arriver sur Terre. Quant aux neutrinos, fabriqués en même temps, ils sortent instantanément. Absolument rien, n'est capable de les arrêter. Par conséquent, il est très difficile de les étudier. Ainsi, la recherche des neutrinos nous renseigne sur la lumière qui sortira dans 2 millions d'années du Soleil. Aujourd'hui, le taux est inférieur à ce que l'on attendait. Cela peut signifier que dans 2 millions d'années, la température sera plus basse avec des conséquences très importantes sur l'environnement terrestre.[3]

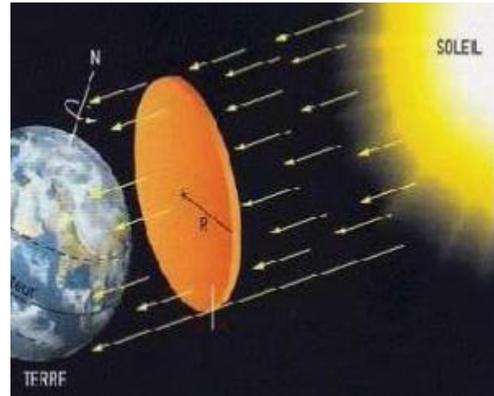


**Figure I-3:** Illustration de la structure solaire

# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

## a. Constante d'illumination

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 millions km, c'est ce que l'on appelle **la constante solaire** (égale à **1367W/m<sup>2</sup>** ). **Figure I-4.**



**Figure I-4:** Constante solaire (1367 W/m<sup>2</sup>)

Le rayonnement, est un phénomène de transfert d'énergie via des ondes électromagnétiques.

L'énergie solaire apporte plus de 99.9 % de l'énergie totale utilisée par le climat. Ainsi la quantité de rayonnement solaire (RS) interceptée à l'extérieur de l'atmosphère par le disque planétaire s'appelle la constante solaire ou bien constante d'illumination. [4]

## b. Masse air

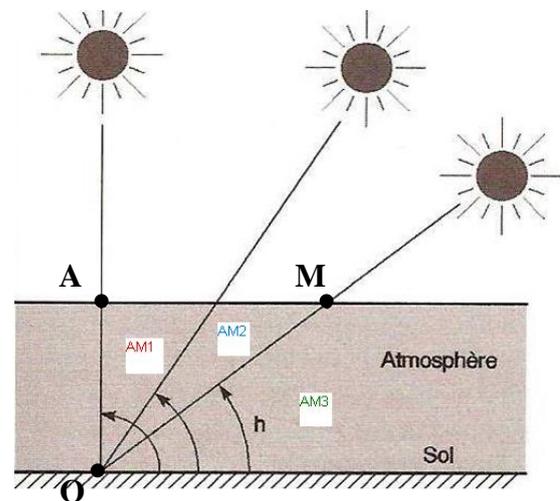
La part d'énergie reçue sur la surface de la Terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m<sup>2</sup> et il est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1) **Figure I-5.**

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m<sup>2</sup>.

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : *AM1.5G* ou *AM1.5D*.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).[5]



**Figure I-5:** variation de la masse air en fonction de la hauteur solaire h

On a :

$$OM = OA / \sin h$$

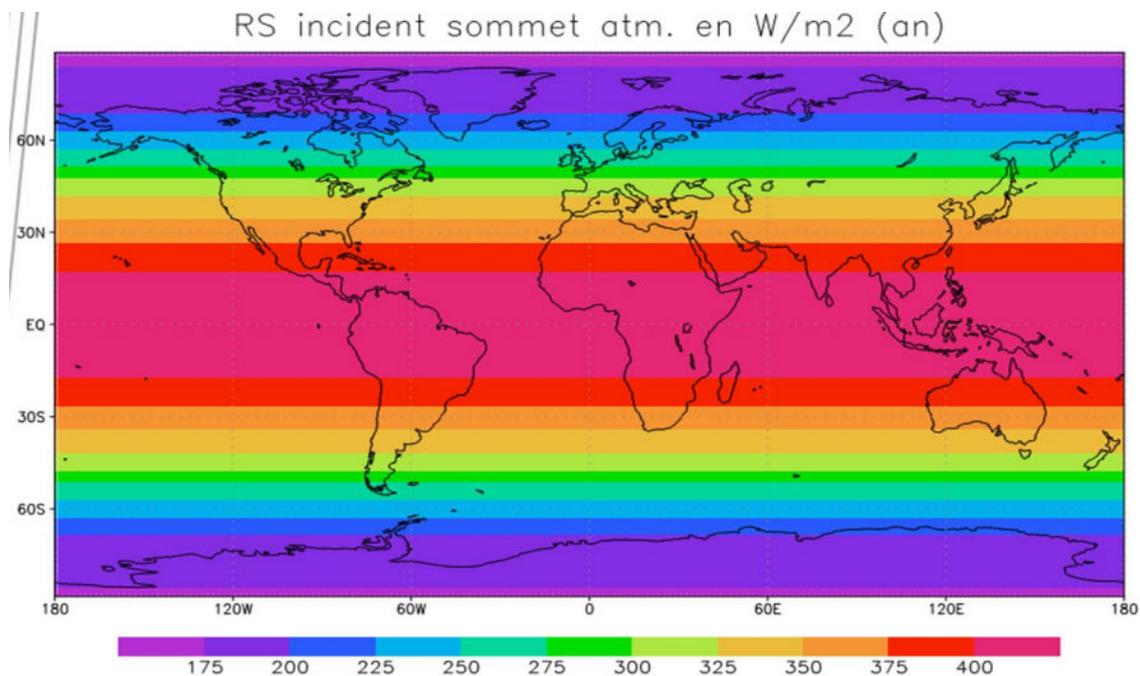
Si  $OA = 1$  on parle de nombre d'air masse

ou masse atmosphérique et on désigne par masse atmosphérique ou nombre d'air masse  $M = 1 / \sin h$ . (AM0). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct

# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct. Signalons que, *outre l'incidence de l'atmosphère*, l'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- de la latitude du lieu et son degré de pollution,
- de la période de l'année,
- de l'instant considéré dans la journée,
- de la nature des couches nuageuses.



**Figure I-6:** Répartition du gisement solaire mondiale (irradiation solaire)

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière. Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année. [6]

## c. Rayonnement diffus et le rayonnement direct

### ❖ Rayonnement direct

C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol, dont le trajet est « linéaire » (il y a, en fait, de légères déviations) et unique à un instant donné.

### ❖ Rayonnement diffus

Il provient de la voûte céleste et (ou) des nuages ; il est toujours présent, en plus ou moins grande quantité. Ainsi, par ciel serein, il constitue 20 % de l'énergie globale. Par ciel couvert, il correspond à la totalité de l'énergie reçue au sol.

### ❖ Rayonnement global

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus.

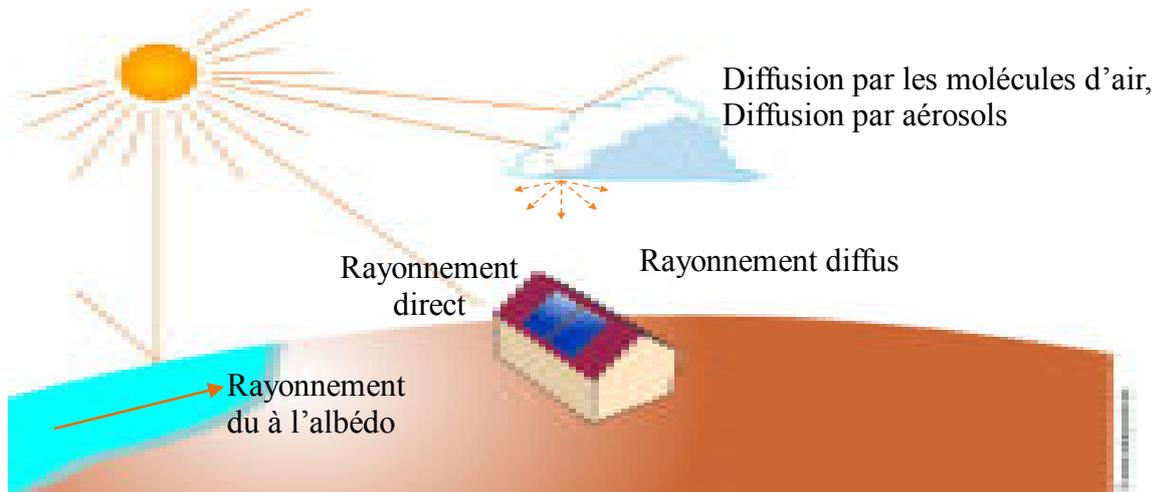


Figure I-7: Décomposition du rayonnement solaire

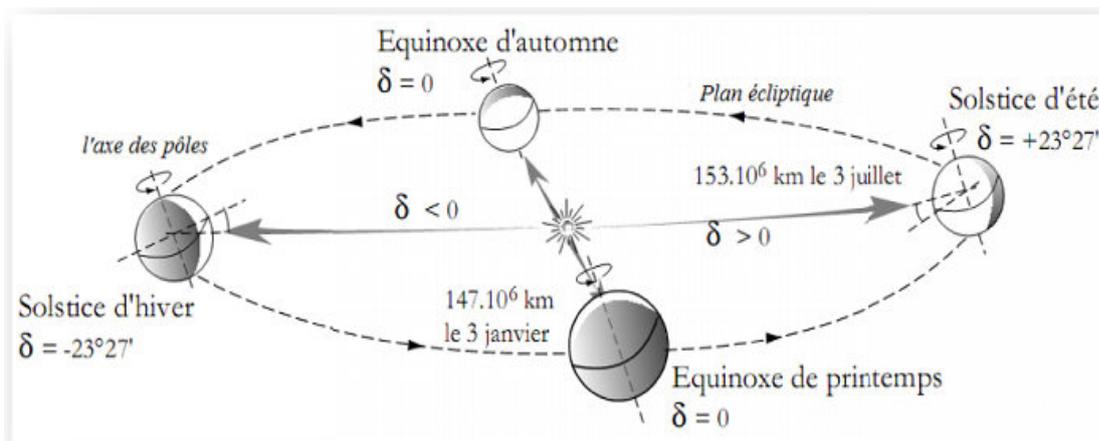


Figure I-8: Mouvement de la terre autour du soleil

## I.2.3 Paramètres astronomiques

### a. Coordonnées équatoriales

#### ✚ La déclinaison $\delta$

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial (figure I-8). La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver ( $-23^\circ, 27'$ ) et au solstice d'été ( $+23^\circ, 27'$ ). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{360}{365}(nj + 284)\right)$$

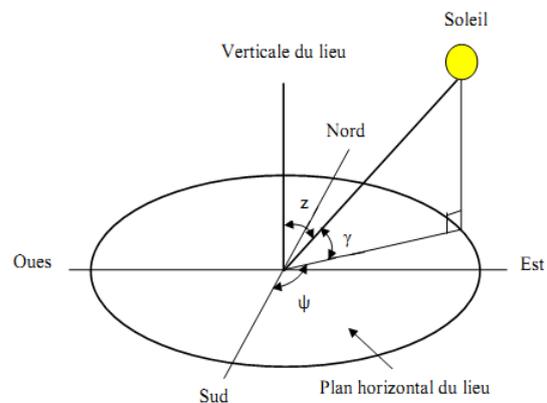


Figure I-9 : Coordonnées solaires selon le repère horizontal

# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

## ✚ L'angle horaire $\omega$ (ah)

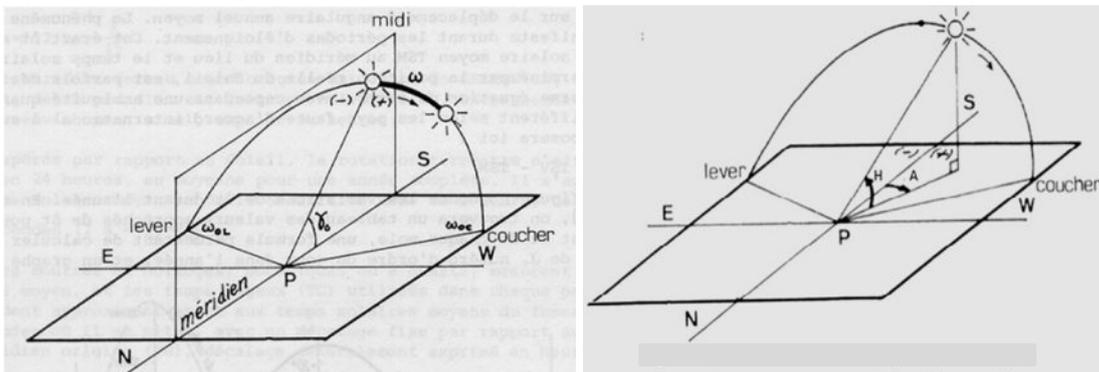
L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante :  $\omega = 15 (\text{TSV}-12)$ , où TSV est le temps solaire vrai (Figure I-10).

## b. coordonnées horizontales

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

## ✚ L'azimut $\psi$

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud. Il se compte de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne l'azimut est donnée par :  $\cos \psi = (\sin \gamma \sin \theta - \sin \delta) / \cos \gamma \cos \theta$



**Figure I-10:** Angle horaire, hauteur et Azimut du soleil par rapport à un plan

## ✚ L'angle de la hauteur solaire $\gamma$ (ou bien $h_s$ )

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal.  $\gamma$  varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  vers le zénith et de  $0^\circ$  vers  $-90^\circ$  vers le nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par :

$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega$$

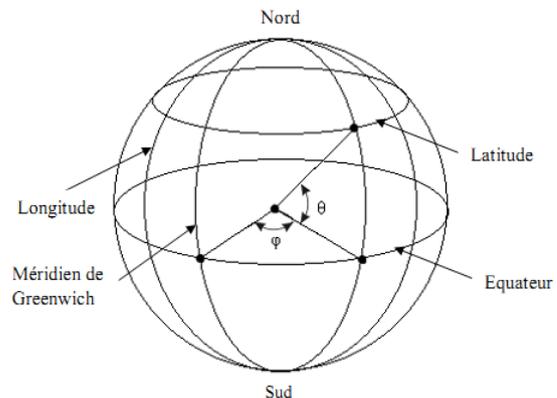
## ✚ La distance zénithale $z$

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle  $z$  est complémentaire de  $\gamma$ .

$$\cos z = \sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta \cos \omega$$

## I.2.4 Paramètres géographiques

Afin de repérer un site sur la surface terrestre, on doit définir des grandeurs géométriques :



**Figure I-11:** latitude et longitude

# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

---

- **La latitude  $\theta$**  : elle est définie comme étant l'angle que fait la verticale du lieu par rapport au plan équatorial, en plus s'elle est positive, le lieu en question se trouve dans l'hémisphère nord sinon du sud.
- **La longitude  $\phi$**  : définit comme étant l'angle compris entre le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré, elle est comprise entre  $-180^\circ$  et  $180^\circ$ , et du fait que la terre prend 24 heures pour compléter une rotation autour d'elle-même, aussi chaque heure correspond à  $15^\circ$  d'écart de longitude, ainsi chaque degré de longitude représente 4minutes
- **L'Altitude** : c'est la distance verticale exprimée qui sépare le point considéré du niveau de la mer pris comme origine (zéro mètre) ou bien surface de référence.

## I.2.5 Nomenclature des différents instruments de mesure

### ❖ **Pyrradiomètre :**

Instrument de mesure du rayonnement total, il sert principalement à la mesure du rayonnement total descendant  $Q\downarrow$ .

### ❖ **Pyranomètre :**

Instrument destiné à mesurer *le rayonnement global  $G$* , lorsque l'appareil est muni d'un dispositif pare-soleil, il peut mesurer le rayonnement diffus  $D$ .  $G$  et  $D$  concernant les rayonnements mesurés au sol.

### ❖ **Pyrhéliomètre :**

Instrument mesurant le *rayonnement solaire direct  $I$* , l'appareil est orientable de façon que sa surface réceptrice soit normale aux rayons solaires ;

### ❖ **Pyrradiomètre différentiel ou bilanmètre :**

Mesure *le bilan du rayonnement total*, différence entre le rayonnement total descendant  $Q\downarrow$  et le rayonnement total ascendant (rayonnements solaire et atmosphérique renvoyés vers l'espace)  $Q\uparrow$  :  $Q = Q\downarrow - Q\uparrow$ . [7]

## I.3 Technique de captage de l'énergie solaire

Les techniques pour capter directement une partie de l'énergie solaire sont disponibles et sont constamment améliorées. À cet effet, on distingue les techniques qui exploitent le thermique solaire, en favorisant l'effet photothermique avec la mise en place des systèmes appropriés (les concentrateurs solaires), de ceux qui font intervenir l'effet photo-électrique ou bien photovoltaïque qui transforme le rayonnement solaire directement en électricité.

### I.3.1 Le thermique solaire

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation est utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plus tôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes solaires comme les cellules photovoltaïques. Cependant, il faut différencier entre le solaire thermique passif, et le solaire thermique actif.

# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

## a. L'énergie solaire passive

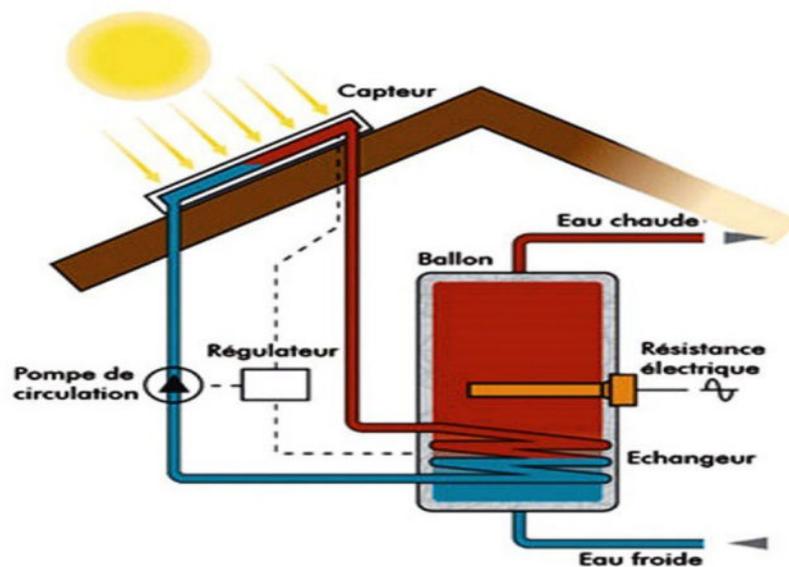
La plus ancienne et certainement la plus importante, quoique discrète, utilisation de l'énergie solaire consiste à bénéficier de l'apport direct du rayonnement solaire. Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du Soleil, on doit tenir compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, orientation vers le Sud, surfaces vitrées, etc.). L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment.

## b. L'énergie solaire active

Contrairement au premier cas décrit ci-dessus, le thermique actif consiste à l'utilisation d'un concentrateur thermique, qui va exploiter la chaleur du rayonnement solaire, en débitant ainsi, des flux de chaleur très importants, transportées ensuite par le fluide caloporteur. Selon le besoin, cette technique décline de différentes façons, à savoir :

### ❖ Domestique

C'est l'usage direct de la chaleur du soleil : chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires. Le fluide caloporteur est chauffé dans des panneaux exposés au soleil. Ce fluide transmet sa chaleur à l'eau à usage domestique dans des échangeurs. **Figure I-12.**



**Figure I-12 :** Solaire thermique actif domestique

### ❖ Solaire thermodynamique

C'est une technique qui utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité, sur le même principe qu'une centrale électrique classique (production de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée), ou éventuellement directement du travail mécanique (le terme solaire mécanique est alors employé) **Figure I-13.**

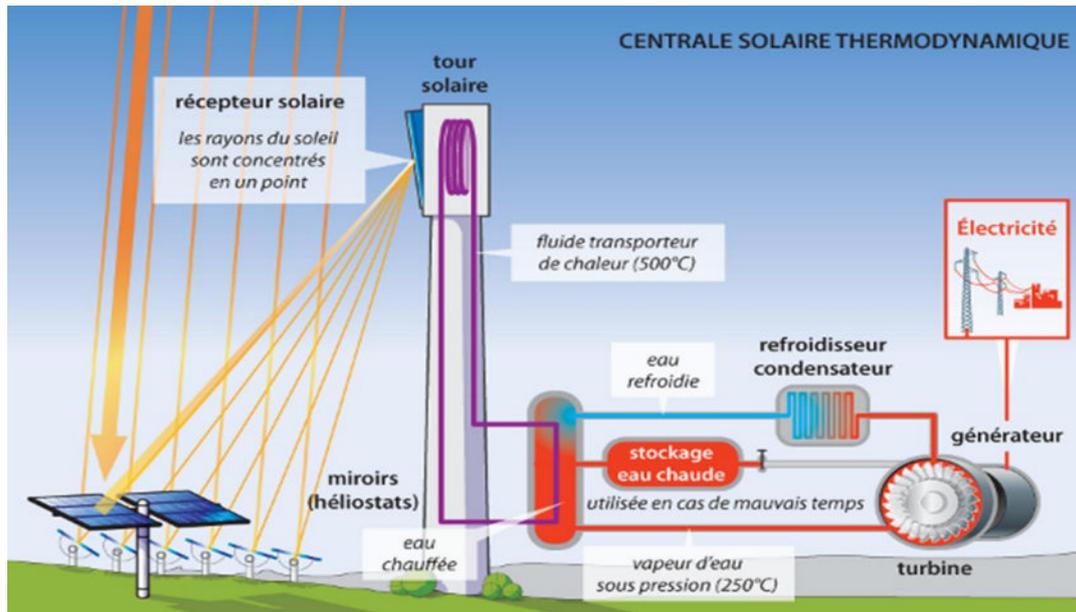


Figure I -13: Schéma d'une centrale thermodynamique solaire.

On cite ci-dessous les quatre grandes familles de centrales thermodynamiques :

## a. Les centrales à capteurs paraboliques

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C. De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaires-électricité (29.4%)

### Figure I-14.

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du Sud



Figure I-14: Capteur parabolique

## b. Les centrales aux capteurs cylindroparaboliques

La technologie des capteurs cylindroparaboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. De nombreuses installations ont déjà été testées et commercialisées, dont certaines dans les années 80.

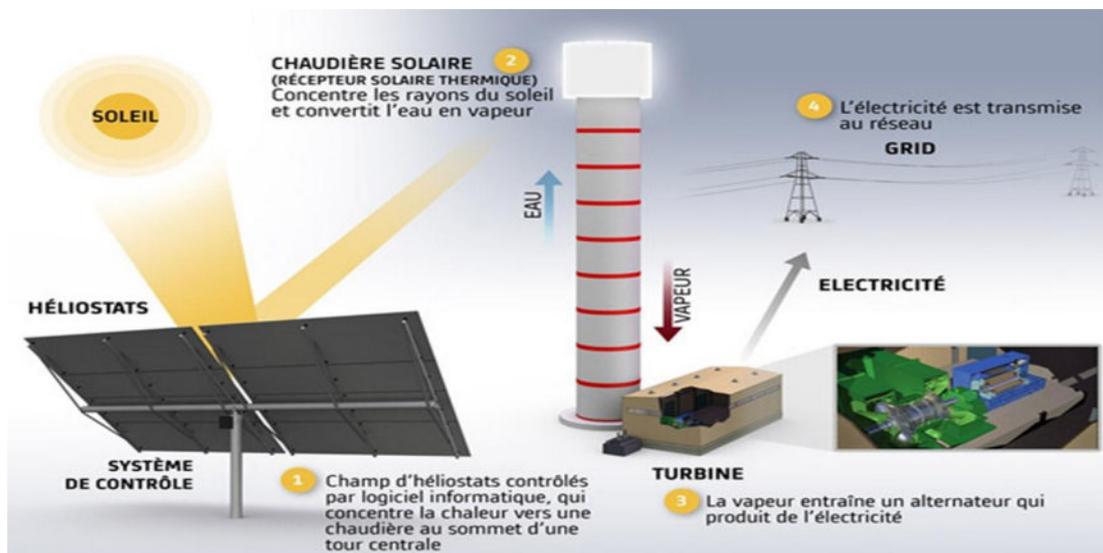


**Figure I-15:** Concentrateur solaire à ébullition directe à Almeria

L'énergie thermique reçue au collecteur est absorbée par un tuyau métallique à l'intérieur d'un tube en verre sous vide. Le fluide (huile synthétique) qui circule à l'intérieur du tuyau est chauffé à une température d'environ 400 °C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs conventionnels afin de produire des vapeurs surchauffées qui font fonctionner une turbine/générateur électrique. [8]

### c. Les centrales à tour

Ce type de centrales est constitué de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures, car la surface exposée est limitée.



**Figure I-16:** Configuration typique d'une centrale solaire à tour

Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un receveur au sommet de la tour solaire. Le

## Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 °C à 1000 °C.

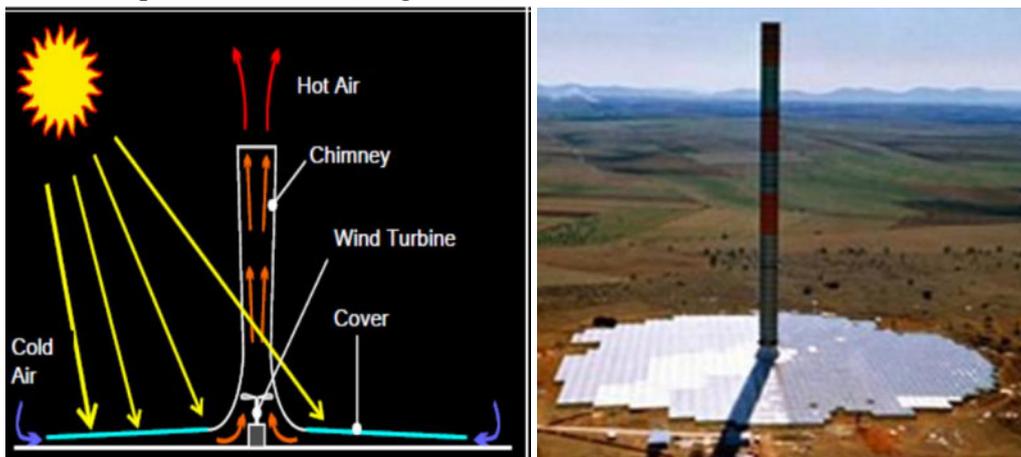


**Figure I-17:** Receveur central solaire Barstow, California

Si l'ouverture du récepteur est située dans le plan focal de l'optique, on peut obtenir par ce moyen des concentrations de l'ordre de 700 (cas de Thémis par exemple à 42,5 ° de latitude). Cette dernière condition n'est pas facilement remplie dans le cas de champs circulaires (la tour est située au milieu du champ d'héliostats et non au Sud comme à Thémis). Dans ce cas, les concentrations atteintes sont plus faibles, mais la formule a d'autres avantages (essentiellement, une hauteur de tour diminuée pour une taille de champ donné) qui peuvent être déterminants aux basses latitudes. C'est la solution mise en œuvre à BARSTOW ou à NIO pour des latitudes proches de 35 °, mais également à SHCHELKINO implantée plus haut que Thémis en latitude (à 45 °) ce qui montre bien que les optima recherchés ne sont pas souvent déterminés avec une rigueur mathématique.

### d. Les centrales à effets cheminées

**Le Principe :** la centrale aérothermique expérimentale en forme de venturi a un diamètre de base de 300 m, un diamètre au col du venturi de 30 m et génère, (pour une différence de température de 30 °C, entre les hautes couches de l'atmosphère et la base de la colonne), une puissance électrique de 200 MW (mégawatts) environ.



**Figure I-18:** centrale à effet cheminée

L'air, dans la serre chauffée par le soleil, devient plus léger et monte vers la cheminée. Le tirage thermique ou « effet de cheminée » induit une dépression et aspire l'air de l'extérieur à travers la surface de captage. La vitesse du mouvement de l'air est déterminée par la différence de température entre la partie basse et la partie haute de la cheminée et par sa hauteur. L'effet de cheminée peut fonctionner 24 heures sur 24, grâce à la chaleur dans la serre due au rayonnement solaire pendant la journée, mais aussi avec la chaleur emmagasinée dans le sol pendant la nuit.

### I.3.2 Le collecteur

Le collecteur est le composant de base du champ solaire. Il est composé d'un réflecteur parabolique (miroir), d'une structure métallique, d'un tube récepteur et du système de poursuite solaire.

Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmission atteint 98 %. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un

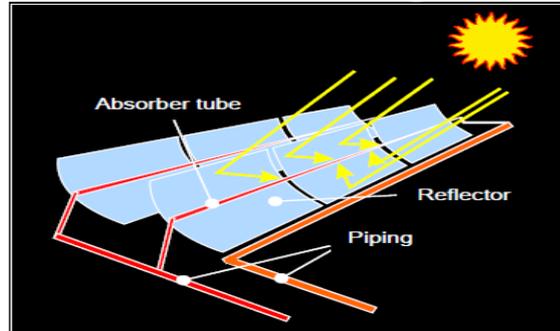


Figure I-19: centrale cylindro-parabolique

enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97 % du rayonnement incident. Le facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est d'approximativement 80.

Le rôle du *mécanisme de poursuite* est d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur. De cette manière, la radiation est réfléchi au foyer de la parabole et concentrée sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur.

La structure métallique doit être suffisamment solide afin de résister aux importantes contraintes mécaniques liées au vent. Elle doit de plus être munie d'extrémités assurant la compatibilité entre les dilatations thermiques inégales de l'acier et du verre.[9]

Le tube collecteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être aussi élevé que possible afin d'éviter toute réflexion du rayonnement incident.
- Pertes thermiques limitées : La température du tube dépassant généralement 400 °C, les pertes par échanges convectifs et radiatifs sont très importantes. Afin de les limiter, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide.



**Figure I-20:** Tube collecteur

### I.3.3 Miroirs de Fresnel

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindroparaboliques est la mise à forme du verre pour obtenir la forme parabolique requise. Afin de diminuer ce coût, plusieurs groupes de recherche travaillent sur des prototypes de collecteurs de Fresnel à focalisation linéaire. L'idée est d'approcher la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans, comme indiqué sur la **figure I-21**



**Figure I-21:** Principe de fonctionnement des miroirs de Fresnel

Un premier étage de réflecteur est installé sur le sol. Le rayonnement est réfléchi au foyer de la parabole approchée par le jeu de miroirs. Un deuxième étage de réflecteurs redirige le rayonnement vers le tube récepteur. Ce second étage de réflecteurs, en plus de réfléchir le rayonnement, joue aussi le rôle d'isolant pour le tube récepteur. Il est en effet recouvert d'une importante couche d'isolation en sa partie supérieure. La partie inférieure est quant à elle isolée par une vitre. Les principaux avantages de cette technologie par rapport aux concentrateurs traditionnels sont :

- Coût inférieur des miroirs
- Pas de vide à l'intérieur du tube récepteur, ce qui facilite sa conception et sa durabilité.
- Les contraintes mécaniques dues à la poussée du vent sont réduites par la disposition plane des miroirs.

### I.3.4 Fluide caloporteur et récepteur solaire

Les trois fluides caloporteurs les plus utilisés sont la vapeur d'eau, l'air et les sels fondus.

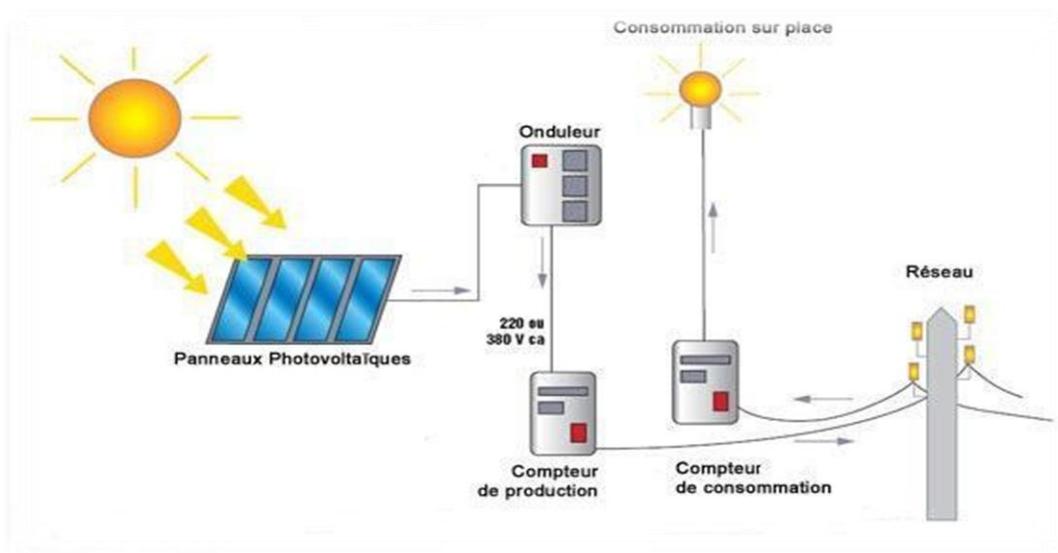
# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

L'installation pilote de Barstow en Californie a utilisé de la vapeur d'eau comme fluide caloporteur de 1982 à 1988. La vapeur d'eau a ensuite été remplacée par des sels fondus, qui ont l'avantage d'être également un moyen de stockage de l'énergie calorifique.

Les premières approches utilisent des faisceaux de tubes en acier au sommet de la tour pour absorber la radiation solaire. Ce concept a bien fonctionné sur l'installation de Barstow avec les sels fondus, mais a montré ses limites sur d'autres installations européennes lorsque l'air est utilisé comme fluide caloporteur. Des surchauffes locales des tubes en acier ont en effet été constatées, ainsi que des transferts de chaleurs inadéquats. Un nouveau concept de récepteur à air a alors été mis au point dans le cadre du projet allemand PHOEBUS : le récepteur volumétrique. Ce récepteur utilise un maillage de fils métalliques, directement exposé à la radiation solaire incidente. Le bon fonctionnement de ce système a été validé sur une installation pilote de 2.5 MW à Almeria, mais n'est pas encore disponible commercialement. Les températures atteintes sont de 800 °C, mais des températures supérieures pourraient être atteintes avec des structures poreuses de SiC ou de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> actuellement en développement. [10]

## I.3.5 Le photovoltaïque solaire

L'énergie solaire photovoltaïque (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque. L'installation solaire peut alimenter un besoin sur place (en association avec un moyen de stockage) ou être injectée, après transformation en courant alternatif, dans un réseau de distribution électrique (le stockage n'étant alors pas nécessaire). **Figure I-22.**



**Figure I-22:** Schéma d'une installation photovoltaïque

# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

---

## a. La conversion photovoltaïque

### Définition

Le mot photovoltaïque vient du Grec « Photos » qui signifie « lumière », et de Volta du nom du physicien Italien Alessandro VOLTA qui, en 1800, découvrit la pile électrique, de ce fait, le photovoltaïque n'est que de l'électricité à partir de la lumière.

Historiquement, l'effet photovoltaïque fut découvert pour la première fois en 1839 par Edmund Antoine BECQUEREL, autrefois baptisée l'effet photo-électrique. Il constata que certains matériaux pouvaient produire de petites quantités d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert EINSTEIN se pencha sur ce travail. En 1905, il publie un papier sur le potentiel de production d'électricité à partir de la lumière du soleil. Ce document explore l'effet photovoltaïque, technologie sur laquelle est fondé le panneau solaire. C'est en 1913 que William COBLENTZ a posé le premier brevet pour une cellule solaire, mais il ne pourra jamais la faire fonctionner.

Il faut attendre jusqu'au 1916 où, Robert MILLIKAN a été le premier à produire de l'électricité avec une cellule solaire. Pendant les quarante années suivantes, personne ne fit beaucoup de progrès en énergie solaire, car les cellules photovoltaïques avaient un trop mauvais rendement pour transformer la lumière du soleil en énergie. Le premier panneau solaire a été construit en 1954 par les laboratoires Bell. Il a été appelé batterie solaire, mais c'était juste un effet d'annonce, car il était trop coûteux à produire. Ce sont les satellites qui ont réellement fait avancer l'énergie solaire dans les années 1960 lors de la course à l'espace. C'était la première utilisation importante de la technologie solaire.

Grâce à l'espace, les panneaux solaires ont prouvé leur fiabilité. Le coût de production des cellules solaires a également diminué. L'énergie solaire a eu un second élan, au cours de la crise de l'énergie dans les années 1970. Quand le prix du pétrole a augmenté de façon spectaculaire, les panneaux solaires photovoltaïques ont commencé à être utilisés pour la première fois dans les maisons. Depuis les panneaux solaires se sont développés lentement. Pendant longtemps, ils ont été considérés comme des sources d'énergie alternatives.

La conversion photovoltaïque se définit par la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable. Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges, constituent un processus important non seulement pour les mesures et la détection de lumière (photodétecteurs), mais aussi pour la conversion de la lumière en énergie chimique (photosynthèse) et en énergie électrique (cellules solaires). [11]

La cellule photovoltaïque (PV) est un composant optoélectronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium ( $\text{CuIn}(\text{Se})_2$  ou  $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$ ) tellure de cadmium ( $\text{CdTe}$ ), etc.

## Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

---

Trois grandes avancées technologiques, ont permis l'augmentation du rendement des cellules PV. Il s'agit de la texturation de surface, de l'usage d'une couche antireflet ainsi que celle d'un champ de surface arrière (Back Surface Field BSF). Lorsqu'on expose la surface d'une cellule solaire à la lumière, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner comme étant un générateur de l'énergie, en délivrant un courant électrique continu. En effet, ce comportement électrique de la cellule n'est d'autres que celui d'une diode sous éclairnement. Ainsi, le régime électrique d'une photopile constitué d'une jonction pn.

### **b. Mécanisme de la conversion photovoltaïque**

Les mécanismes fondamentaux intervenant lors d'une conversion photovoltaïque peuvent être englobés sous les trois aspects suivants :

- L'absorption de l'énergie lumineuse (photons) incidente à la cellule ;
- La transformation de l'énergie absorbée en énergie électrique, via la création des paires électrons-trous ;
- La collecte de ces charges puis les cheminées dans un circuit électrique extérieur.

L'optimisation de la conversion photovoltaïque, exige que l'absorption soit maximale, ainsi une collection sans perte. Pour assurer une conversion optimale, les cellules solaires doivent être fabriquées, à partir d'un matériau absorbant dans la bande optique du spectre solaire, possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie, transformant l'énergie lumineuse sous forme potentielle et non thermique, et d'une structure de collecte de faible résistance électrique [6]. Afin qu'on puisse décrire les différents mécanismes relatifs à l'effet photovoltaïque, cités ci-dessus, on considère la Jonction PN.

Quand une cellule solaire est illuminée, essentiellement par les radiations solaires, l'énergie lumineuse sera Absorbée, c'est le mécanisme d'absorption. Physiquement, les photons absorbés interagissent avec les électrons, en leurs communiquant leurs énergies cinétiques, et donc les excités de la bande de valence vers la bande de conduction, créant ainsi les paires électron-trou, dans ce cas-là on parle du mécanisme du transfert de l'énergie aux porteurs de charges. Ensuite, les électrons de la région p diffusent vers la région n, tandis que les trous vont diffuser vers la région p, sous l'action du champ électrique interne, il en résulte le mécanisme de la collection. Ce dernier n'est d'autre qu'une séparation de charge, ce qui mène à une différence de potentielle entre les deux régions de la jonction, dont un courant électrique sera délivré, à travers un circuit électrique extérieur, on parle ici de l'acheminement de porteurs de charges.

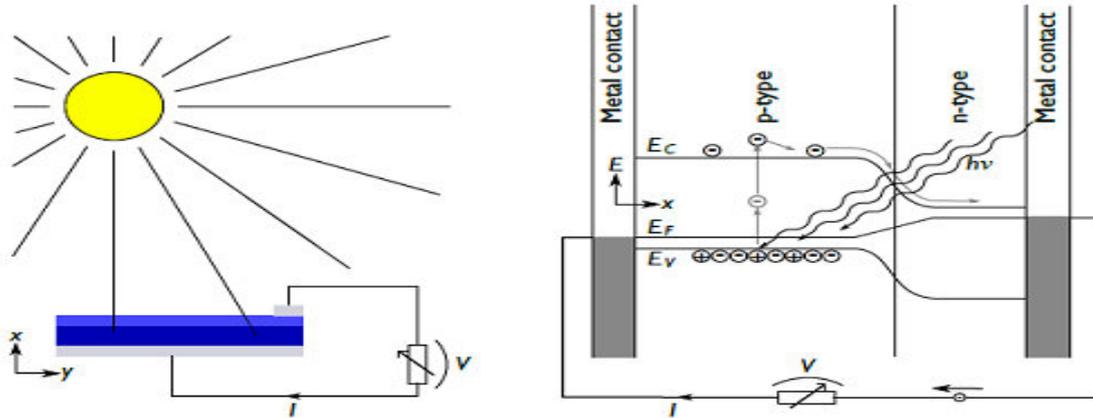


Figure I-23: Mécanismes fondamentaux de l'effet photovoltaïque

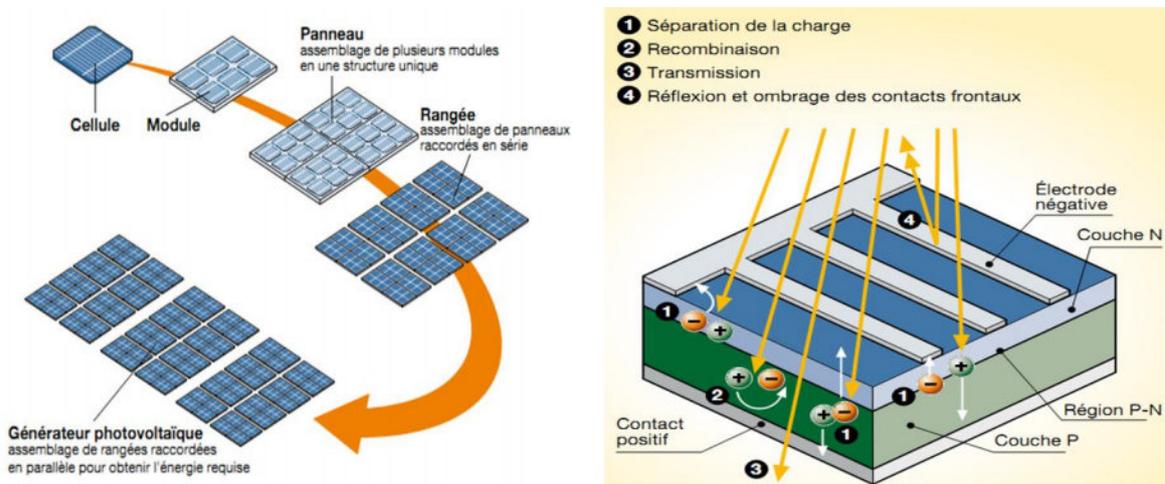


Figure I-24: Composition du panneau solaire et du générateur photovoltaïque

Sur les **100%** de l'énergie incidente, cette dernière se répartit de la façon suivante:

- ❖ 23 % de photons ayant une grande longueur d'onde et donc une énergie minimale pour faire libérer les électrons
- ❖ 32 % de photon ayant de courtes longueurs d'onde d'où le phénomène de transmission
- ❖ 20 % de gradient électrique dans la cellule
- ❖ 8.5 % de recombinaison des porteurs de charges
- ❖ 3 % de perte par réflexion et l'effet d'ombrage des contacts frontaux
- ❖ 0.5 % perte en résistance série (perte par conduction)
- ❖ 13 % d'énergie électrique utilisable (rendement d'un panneau solaire) [9]

## I.3.6 Photopile à Silicium

Pour créer un courant électrique dans un semi-conducteur, il faut lui fournir une énergie qui permet d'extraire des électrons de la bande de valence pour les transférer dans la bande de conduction, soit une énergie supérieure au gap de la bande interdite. La lumière dont les photons transportent une énergie :  $E = h\nu$ , Permet d'atteindre cet effet : c'est l'effet photovoltaïque. La lumière pénétrant dans un semi-conducteur permet donc, si son énergie est supérieure au gap de faire passer le semi-conducteur de l'état isolant à l'état conducteur, ce phénomène augmentant lorsque la température du semi-conducteur s'élève. Lorsqu'un électron est extrait de la bande de valence pour passer dans la bande de conduction, il laisse derrière lui une vacance ou un trou à sa place : alors, un autre électron proche de la bande de valence peut combler ce trou et laisser derrière lui à son tour un trou, on aura ainsi établi un courant de trous. Les deux types de courant ne seront pas différenciés, on parlera simplement de courant, qu'il s'agisse d'électrons ou de trous. De même, on dit que l'absorption de l'énergie des photons par le semi-conducteur crée des paires de porteurs électron-trou.

Pour transformer le semi-conducteur photosensible de composant passif en composant actif, il faut pouvoir générer un courant de porteurs, donc apporter une force qui obligera les électrons et les trous à s'écouler dans deux directions opposées. Cette force sera réalisée par un champ électrique interne provenant du dopage du semi-conducteur.

## I.4 Géothermie

La géothermie, du Grec, géo (la terre) et thermos (la chaleur) sont un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Elle se caractérise par sa durabilité : inépuisable à l'échelle humaine, disponibilité : 24 heures par jour et 365 jours par an, propreté : pas de déchets et ni d'émission de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>), Universalité : utilisable dans tous les pays et sous tous les climats, Variété : large gamme de températures (10 — 350 °C) et de profondeurs (50 - 5'000 m), Discrétion : installations compactes, qui n'occupent que peu de surface de terrain, Sécurité : pas de transport ni de stockage de

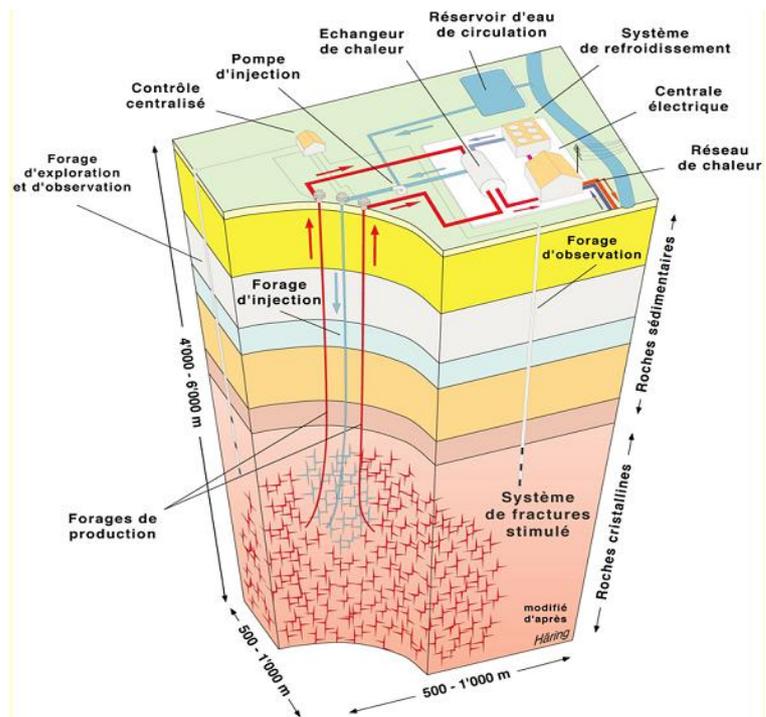


Figure I-25: Conversion direct de l'énergie

# Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

---

substances polluantes ou dangereuses, Économie : parmi les plus rentables des énergies renouvelables et Innovation : stimule les nouvelles technologies et crée des places de travail.

Afin d'exploiter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité (Figure I-25.).

## I.4.1 La production d'eau chaude

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie) a l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne). Elle peut quand même contribuer à un réchauffement.

On distingue classiquement trois types de géothermie selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

**la géothermie à haute énergie** qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Elle est surtout utilisée pour produire de l'électricité.

Elle est parfois subdivisée en deux sous-catégories:

**la géothermie haute énergie** (aux températures supérieures à 150 °C) qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.

**La géothermie moyenne-énergie** (aux températures comprises entre 100 °C et 150 °C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire.

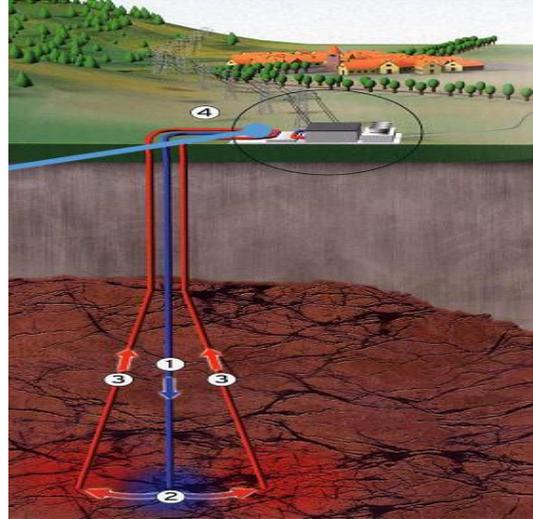
**La géothermie de basse énergie** : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 °C et 100 °C principales utilisations : les réseaux de chauffage urbain.

**la géothermie de très basse énergie** : Géothermie des faibles profondeurs au niveau de température comprise entre 10 °C et 30 °C principales utilisations : le chauffage et la climatisation individuelle par dispositifs thermodynamiques généralement fonctionnant à l'électricité, d'où le terme électrothermodynamique, appelé plus communément « pompes à chaleurs aérothermiques » (puisant dans l'air extérieur) et « pompe à chaleur géothermique ».

## Chapitre I : Généralités sur le gisement solaire

On voit sur la figure ci-contre deux forages d'exploitation et de contrôle écoute, deux forages de production et un forage d'injection afin d'exploiter les ressources souterraines en terme d'eau chaude pour en utiliser soit pour le chauffage ou bien pour la production d'électricité, ce cycle combiné existe sous le nom du cycle de Kalina qu'on donne ci-dessous son schéma fonctionnel afin de mieux positionner le lecteur correctement pour l'importe quelle centrale thermique ou bien thermodynamique.

Le cycle dit de Kalina est pour la production simultanée de la chaleur et d'électricité. La figure de face illustre bien son mode opératoire [2]



**Figure I-26:** Schéma d'une centrale géothermique utilisant le cycle de Kalina

## Chapitre II

# **Développement analytique et numérique du problème inverse d'estimation du flux de chaleur**

Dans ce deuxième chapitre, on s'intéresse aux développements mathématique et numérique du problème direct dans les deux types de conduite. La première est dite de type Fresnel où la conduite est quasi plate, où, on peut la considérée comme à plaque parallèle, la seconde et pour le type cylindroparabolique qui a une forme classique (cylindrique), on va exposer les deux cas. Le système est constitué d'un fluide en écoulement dans une conduite à paroi solide soumise à un flux de chaleur variable appliqué sur ses parois.

### Introduction

Plusieurs procès thermodynamiques sont pris dans l'optimisation et la modélisation des centrales dites hybrides. Ils utilisent à la fois, du fuel et de la technique de la concentration solaire. Le but est de chauffer les fluides moteurs ou/et caloporteurs, qui vont acheminés vers la chambre de combustion. Cette dernière reste inéluctablement, l'une des pièces clef dans la production d'énergie. Aussi, on va se concentrer sur la modélisation des centrales solaires, pour cela, nous cherchons à optimiser le flux de chaleur en tant input du système, mais également, de modéliser au mieux de la partie solaire en commençant par le récepteur volumétrique où se trouve le flux de chaleur (puissance thermique) entre l'intérieur de la cavité du récepteur et l'air sous pression (simulé au mieux) pour prendre en compte certaines considérations qui affectent les rendements et efficacités.

Ainsi dans notre étude, nous nous intéressons à estimer la quantité du flux solaire (irradiation solaire). Il varie selon des paramètres astronomiques tels que la déclinaison, l'angle horaire et l'azimut et les valeurs géométriques qui s'associent en incrémentant la méthode du gradient conjugué, et voir ses performances en conséquence par les comparer avec le vrai DNI. Cette méthode est insérée afin de donner et approcher au mieux les quantités d'énergie absorbées par le récepteur.

On focalise l'étude dans le Sud-ouest Algérien, par prise de deux considérations, la première pour un flux en coordonnées spatiales et l'autre en coordonnées spatiotemporelles, afin d'approcher au mieux le phénomène réel. C'est un chemin inverse où on démarre dans les calculs sur les températures finales en remontant vers les initiales, afin de voir la quantité d'énergie initialement absorbée.

La consommation d'hydrocarbures et d'énergie nucléaire au cours de ces dernières décennies s'est intensifiée, et elle a établi un record élevé, de sorte que la plupart des recherches scientifiques essaient de trouver un nouveau point de repère en utilisant la voie des énergies renouvelables, ce qui a généré divers axes de recherche qui essaient de limiter les proportions des gaz à effet de serre. Ces derniers, ont refaçonné la nature telle qu'elle est avant et ont contribué au réchauffement climatique qu'on assiste tristement à l'heure actuelle.

Afin d'assurer une utilisation optimale de ressources énergétiques, qui impliquent la rationalisation dans la consommation, dans ce contexte, on a focalisé l'étude sur l'optimisation de l'énergie récupérée et absorbée dans le récepteur sous forme d'un flux de chaleur.

D'une grande importance, les centrales thermodynamiques offrent une nouvelle feuille de route entre les mains des chercheurs, voire un instrument d'efficacité énergétique, où la plupart des pays s'émergent afin d'y trouver un bon ratio exploitation/faisabilité/économie.

## Chapitre II : Développement analytique et numérique du problème inverse d'estimation du flux de chaleur

---

les travaux entrepris dans cette présentation, visent à établir de nouvelles approches d'optimisation et de modélisation des centrales solaires hybrides (centrales thermodynamiques). Afin de vérifier leur faisabilité et leurs coûts de construction, on a essayé de réaliser des études sur les principaux éléments fonctionnels de ce type d'installation tels que fluide moteur, chambre de combustion, capteurs cylindroparaboliques et similaires afin de les optimiser.

Récemment, nombreuses études sont penchées sur les analyses inverses dans le transfert de chaleur, qui modélisent des phénomènes de conduction et/ou convection. Ces derniers, ont eu lieu dans les systèmes thermiques [12 ; 13 ; 14 ; 15]. Les problèmes inverses, interviennent dans la modélisation des problèmes thermiques, médicaux, géophysiques et sismographiques [16 ; 17 ; 18 ; 19] et réduisent les activités expérimentales. Ils offrent des résultats proches de ceux exacts, et en moins de temps, mais les complexités sont souvent rencontrés en pratique pour ce mode de transfert, et c'est l'un des nombreux cas qui ont limité ces études dans les domaines suscités [20 ; 21] et c'est pourquoi, on a accordé une certaine attention à l'optimisation de processus de transfert de chaleur conjugué.

Les voies de concentration de l'énergie solaire ouvrent de nouvelles voies pour réduire la dépendance aux hydrocarbures et des combustibles en général. Pour cela, nous avons investi du temps pour faire des études approfondies de ces centrales en optimisant le flux de chaleur récupéré par l'absorbeur et pour la nature de fluide utilisé dans ce processus comme mentionné par MJ Santos et all. [22], impliquant avec une brève considération pour la chambre de combustion avancée utilisant des gaz de combustion à haute température pour faire la combustion, tout cela pour considérer moins de consommation de carburant et réduire les émissions comme (CO, CO<sub>2</sub>...) cité par Seyed Ehsan Hosseini et all [23].

La quantification précise des propriétés se concentre sur une méthode inverse variée, et les paramètres de processus spécifiques de l'emplacement des centrales électriques sont essentiels pour la conception et le développement de la centrale électrique [24], T.E. Boukelia et All, ont étudié la conception et l'optimisation d'une centrale solaire Plante utilisant un réseau de neurones artificiels (ANN) avec l'un des objectifs de leur étude est d'étudier l'algorithme d'apprentissage par rétro propagation avec rétroaction avec gradient conjugué (CGP) [25 ; 26], Zhichun Liu et all [27], ont utilisé la méthode du gradient conjugué pour optimiser la géométrie des générateurs thermoélectriques à deux étages et développer une approche pour intégrer l'analyse assistée par ordinateur avec une méthode d'optimisation qui pourrait être appliquée à la conception et à l'optimisation [27], A. Ramos et F Ramos ont mis en œuvre une méthode pour optimiser une centrale électrique solaire thermique à récepteur central en paramétrant la conception de la centrale en fonction de plusieurs variables de conception et en réduisant le problème, afin de trouver des conceptions optimales au problème numérique de trouver le minimum d'une fonction de plusieurs variables (de l'objectif) [28].

Dans cette idée d'optimisation et de modélisation, nous concentrons notre étude sur l'estimation du flux thermique dans le récepteur de la tour en utilisant un algorithme de gradient conjugué et en essayant de donner une équation polynomiale pour la température de combustion adiabatique comme une fonction d'équivalent ratio qui est définie entre le mélange de carburant pauvre et le mélange de carburant

### II.1. Cas d'un écoulement dans une conduite cylindrique

On considère le problème de transfert de chaleur schématisé dans la Figure 2, décrivant la géométrie d'un écoulement laminaire dans une conduite cylindrique dont la longueur est  $L$ , de rayon «  $R$  » et l'épaisseur «  $E$  ». La température initiale du système (parois solides et fluides) est  $T_0$ . Supposons que le fluide est soudainement soumis à un processus de chauffage en appliquant un flux thermique variable en espace et temps sur la région de la paroi  $x$ , tandis que le reste de la paroi externe de la conduite reste dans des conditions adiabatiques. La chaleur est alors conduite de la paroi extérieure vers la paroi intérieure de la conduite où la chaleur est transférée au fluide froid par transfert de chaleur conjugué. Elle est par la suite portée en aval par la convection forcée.

#### II.1.1. Equation gouvernantes

La formulation mathématique de ce problème de transfert de chaleur, couvrant les domaines solides et fluides, peut être exprimée comme suit :

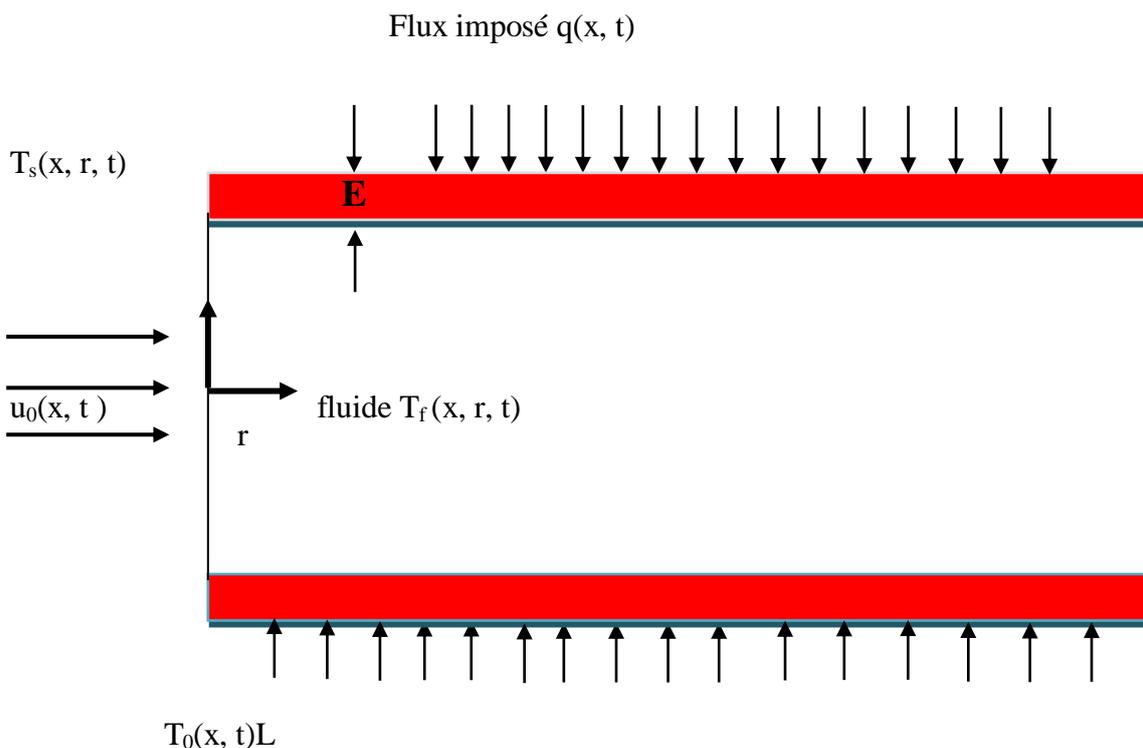


Figure II-1: Configuration du problème

**Partie fluide**

L'équation prend la forme suivante

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + U_x \frac{\partial T_f}{\partial x} = \alpha_f \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \right) \quad (\text{II} - 1)$$

**Partie solide**

L'équation s'écrit

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \right) \quad (\text{II} - 2)$$

Ainsi le système d'équation s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\partial T_f}{\partial t} + U_x \frac{\partial T_f}{\partial x} = \alpha_f \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \right) \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} = \alpha_s \left( \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \right) \end{cases}$$

Avec

$\alpha_s$  : diffusivité thermique du solide ;

$\alpha_f$  : diffusivité thermique du fluide ;

$T_f$  : température du fluide ;

$T_s$  : température du solide.

Avec les conditions suivantes

**condition initiale**

à  $t=0$  :  $T_s = T_f = T_0$  ;

**Conditions aux limites géométriques**

à  $x = 0$  :  $T_s = T_f = T_0$  ;

à  $x = L$  et  $0 < r < R$  :  $\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{\partial T_f}{\partial x}$

à  $r = 0$  et  $0 < x < L$  :  $\frac{\partial T_f}{\partial r} = 0$  ;

$$\text{à } r = R \text{ et } 0 < x < L : T_s = T_f ;$$

$$\text{à } r = R \text{ et } 0 < x < L : K_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = K_f \frac{\partial T_f}{\partial r} ;$$

$$\text{à } r = R + E \text{ et } 0 < x < L : -K_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = q(x, t) ;$$

Avec  $q(x, t)$  le flux thermique appliqué à la surface indiquée dans le schéma,  $K$  est la conductivité thermique,  $U_x = 2U_{\text{moy}} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$

Nous référons aussi les lettres « s » et « f » pour le solide et le fluide respectivement, le problème direct considéré dans notre cas concerne à trouver la distribution de la température en connaissant les propriétés thermiques ainsi que le flux de chaleur appliqué.

### II.1.2. Adimensionnement des équations gouvernantes

Le système d'équations précédent peut être réécrit sous forme adimensionnelle en considérant les valeurs suivantes : [29 ; 30 ; 31]

$$X = \frac{x}{L}, \quad \hat{r} = \frac{r}{R}, \quad \tau = \frac{\alpha_f t}{R^2}, \quad \theta = \frac{k(T - T_0)}{Rq_{\text{réf}}}, \quad U = \frac{U_x}{U_{\text{moy}}}, \\ Q = \frac{q(x, t)}{q_{\text{réf}}}, \quad K = \frac{K_s}{K_f}, \quad \lambda = \frac{E}{R}, \quad A = \frac{\alpha_s}{\alpha_f}$$

Ce qui donne :

$x = X.L$  ; Avec  $L$  : longueur de la conduite

$r = \hat{r}.R$  ; Avec  $R$  : rayon de la conduite.

$$t = \frac{\tau R^2}{\alpha_f} ;$$

$$T = \frac{\theta R q_{\text{réf}}}{K} + T_0 ;$$

$$U_x = U U_{\text{moy}} ;$$

$$q(x, t) = Q q_{\text{réf}}.$$

Le système d'équations ainsi que les conditions aux limites prennent la forme suivante :

Pour le fluide

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + \frac{U_{\text{moy}} R^2}{\alpha_f L} \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \quad (\text{II} - 3)$$

## Chapitre II : Développement analytique et numérique du problème inverse d'estimation du flux de chaleur

---

Et on sait que :

$$\alpha_f = \frac{k_f}{\rho c_p};$$

Alors l'équation peut s'écrire :

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + \frac{U_{moy} R^2 \rho c_p}{k_f L} \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \Leftrightarrow$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + \frac{U_{moy} R^2 \rho c_p}{k_f L} \frac{\mu}{\mu} \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2}$$

Sachant que

$$Re = \frac{U_{moy} R \rho}{\mu}; Pr = \frac{c_p \mu}{k_f}$$

L'équation finale s'écrit ainsi :

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + Re Pr \frac{R}{L} \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \quad (II - 4)$$

Pour le solide

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = A \left[ \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \right] \quad (II - 5)$$

avec

$$A = \frac{\alpha_s}{\alpha_f}$$

Ainsi, le système d'équations s'écrit :

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + Re Pr \frac{R}{L} \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \\ \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = A \left[ \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \right] \end{cases}$$

Les conditions aux limites adimensionnelles sont définies comme suit

Condition initiale

$$\text{à } t=0 \text{ on a } \tau = 0; \quad T_s = T_f = T_0 \Rightarrow \theta_s = \theta_f = 0$$

Conditions aux limites

$$\text{à } x=0 \text{ on a } X=0: \quad T_s = T_f = T_0 \Rightarrow \theta_s = \theta_f = 0;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{à } x = L, \text{ on a } X = 1, \text{ et} \\ \text{à } 0 < r < R + E \text{ on a } : 0 < \hat{r} < 1 + \lambda : \frac{\partial \theta_s}{\partial X} = \frac{\partial \theta_f}{\partial X} ; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{à } r = 0 \text{ on a } \hat{r} = 0, \text{ et} \\ \text{à } 0 < x < L, \text{ on a } 0 < X < 1 : \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} = 0 ; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{à } r = R \text{ on a } \hat{r} = 1, \text{ et} \\ \text{à } 0 < x < L, \text{ on a } 0 < X < 1 : \theta_s = \theta_f ; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{à } r = R \text{ on a } \hat{r} = 1, \text{ et} \\ \text{à } 0 < x < L, \text{ on a } 0 < X < 1 : k_s \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} = k_f \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} ; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{à } r = R + E \text{ on a } \hat{r} = 1 + \lambda, \text{ et} \\ \text{à } 0 < x < L \text{ on a } 0 < X < 1 : -\frac{k_s}{k_f} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} = Q ; \end{array} \right.$$

## II.2. Développement numérique

### II.2.1. Principe du calcul numérique par différences finies

À part dans quelques cas très particuliers, il est impossible de calculer explicitement des solutions des différents problèmes de la thermique. Il est donc nécessaire d'avoir recours au calcul numérique sur ordinateur pour estimer qualitativement et quantitativement ces solutions. Le principe de toutes les méthodes de résolution numérique des équations aux dérivées partielles est d'obtenir des valeurs numériques discrètes (c'est-à-dire en mode fini) qui approchent (en un sens convenable à préciser) la solution exacte. Dans ce procédé il faut bien être conscient de deux points fondamentaux : on discrétise le problème en représentant des fonctions par un nombre fini de valeurs, c'est-à-dire que l'on passe du continu au discret. [32 ; 33 ; 34], puis on monte les équations discrétisées dans un algorithme de résolution.

Pour discrétiser le continuum spatio-temporel, on introduit deux **pas d'espace**  $\Delta x > 0$ ,  $\Delta y > 0$  et un **pas de temps**  $\Delta t > 0$  qui seront les plus petites échelles représentées par la méthode numérique. On définit un maillage ou des coordonnées discrètes de l'espace et du temps

$$(t_n, x_i, y_j) = (n\Delta t, i\Delta x, j\Delta y).$$

On note  $T_{i,j}^n$  la valeur d'une solution discrète approchée au point  $(t_n, x_i, y_j)$  et  $T(t, x, y)$  la solution exacte (inconnue).

## Chapitre II : Développement analytique et numérique du problème inverse d'estimation du flux de chaleur

---

Le principe de la méthode des différences finies est de remplacer les dérivées par des différences finies en utilisant des formules de Taylor dans lesquelles on néglige les restes. Par exemple, on approche la dérivée seconde en espaces par :

$\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = \frac{\theta_{i,j+1}^{n+1} - 2\theta_{i,j}^{n+1} + \theta_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta Y^2}$ , et encore, on a le choix dans la formule de différences finies : soit centrée, soit décentré

### La différence finie centrée

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}(t_n, x_i, y_j) \approx \frac{\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n-1}}{2\Delta \tau} \dots \dots (a)$$

Conduit au schéma complètement symétrique par rapport à n, i et j, appelé schéma centré ou schéma de **Richardson**

### La différence finie décentrée amont(ou à gauche)

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}(t_n, x_i, y_j) \approx \frac{\theta_{i,j}^n - \theta_{i,j}^{n-1}}{\Delta \tau} \dots \dots (b)$$

Appelé aussi schéma d'Euler rétrograde (on remonte dans le temps)

### La différence finie décentrée aval(ou à droite)

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}(t_n, x_i, y_j) \approx \frac{\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^n}{\Delta \tau} \dots \dots (c)$$

Appelée aussi schéma d'Euler progressif (on avance dans le temps)

La différence principale entre ces deux derniers schémas est que **(b) est dit implicite**, car il faut résoudre un système d'équations linéaires pour calculer les valeurs  $(\theta_{i,j}^n)$  en fonction des valeurs précédentes  $(\theta_{i,j}^{n-1})$ , tandis que **(c) est dit explicite** puisqu'il donne immédiatement les valeurs  $(\theta_{i,j}^{n+1})$  en fonction des  $(\theta_{i,j}^n)$

### Méthode des directions alternées

Pour chaque pas de temps la méthode A.D.I (Alternating Direction Implicite) donne lieu à un système matriciel tridiagonal à résoudre, l'un résultant de la discrétisation implicite suivant X et l'autre de la discrétisation suivant Y. cette méthode divise le pas de temps en deux parties égales, dans le premier demi-pas de temps le système est résolu implicitement en X, mais explicitement en Y. Dans le deuxième demi-pas de

## Chapitre II : Développement analytique et numérique du problème inverse d'estimation du flux de chaleur

---

temps, la procédure est inversée. Notons que cette méthode est inconditionnellement stable. Pour chaque étape de temps, la résolution est obtenue en balayant le domaine de calcul dans la direction de X puis dans celle des Y [32 ; 35].

Cette méthode se base sur un schéma à pas fractionnaire, aux directions alternées, implicite et explicite. En effet, il s'agit de considérer un demi pas de temps intermédiaire entre  $\tau$  et  $\tau + \Delta\tau$ , à savoir  $\tau + \frac{\Delta\tau}{2}$ . [29 ; 30]

La méthode implicite des directions alternées (A.D.I) est séparée en deux demi-étapes ; dans chacune, un système tridiagonal est à résoudre (l'algorithme de Thomas pouvant être utilisé). Dans la première demi-étape, la discrétisation est implicite en une direction et explicite dans l'autre [36]. Par exemple, dans l'équation de la convection ci-dessus cela donne :

$$\frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i,j}^n}{\frac{\Delta\tau}{2}} + U \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta X} = \frac{\theta_{i,j+1}^n - 2\theta_{i,j}^n - \theta_{i,j-1}^n}{(\Delta Y)^2} \quad (\text{II} - 6)$$

Suivi de :

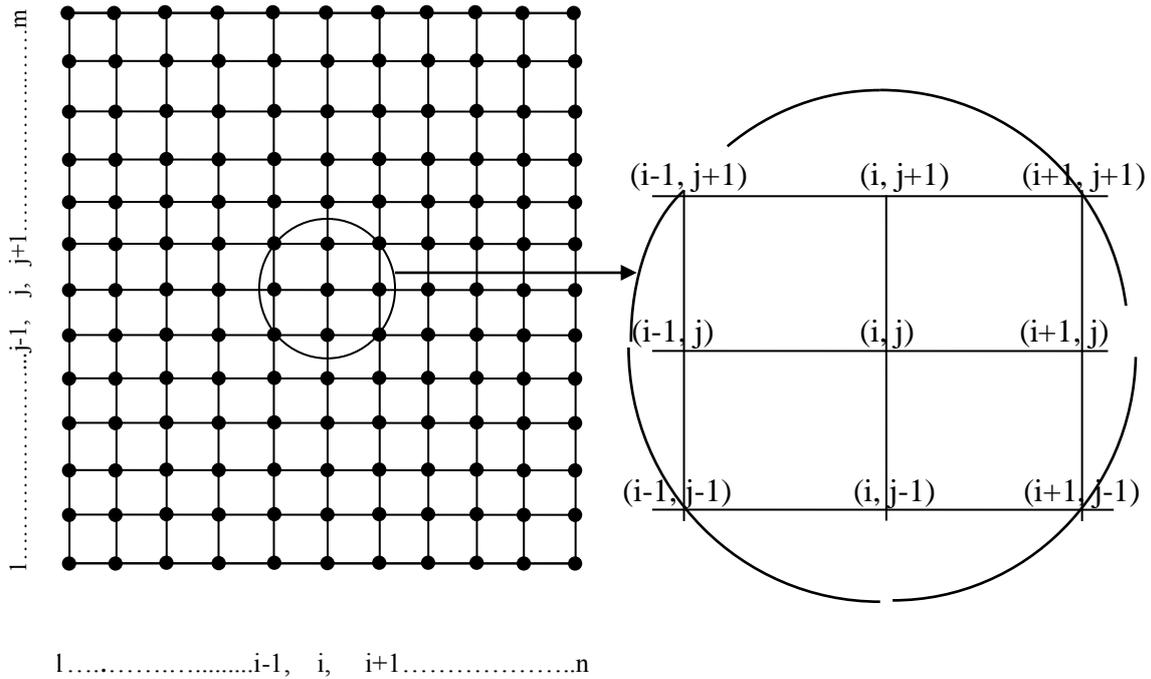
$$\frac{\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta\tau}{2}} - U \frac{\theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta X} = \frac{\theta_{i,j+1}^{n+1} - 2\theta_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j-1}^{n+1}}{(\Delta Y)^2} \quad (\text{II} - 7)$$

Ci- dessus, le premier demi pas, est implicite dans la direction horizontale et explicite dans la direction verticale, par contre le deuxième demi pas est explicite dans la direction horizontale et implicite dans la direction verticale.

**Schéma explicite :** à chaque instant, la température en tout point est calculable en fonction de la répartition de température à l'instant précédent.

**Schéma implicite :** dans ce cas, la température à l'instant  $t+\Delta t$  n'est plus explicitement calculable en fonction des températures à l'instant  $t$ .

La discrétisation des équations adimensionnelles, consiste à appliquer de la méthode des différences, en développant chaque terme selon la série de Taylor pour chaque nœud du maillage adopté **Fig3**.



**Figure II-2:** Elément de maillage du domaine de calcul en  $(i, j)$ .

En réalité, l'application des différences finies va nous permettre de remplacer le système d'équations différentielles aux dérivées partielles par un autre, dont ces équations sont algébriques, ce qui rend sa résolution mathématique plus simple, par une des méthodes numériques connues.

### II.3. Application au cas d'une conduite à plaques parallèles de type FRESNEL

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial Y^2} \quad (\text{II} - 8)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = A \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Y^2} \quad (\text{II} - 9)$$

Avec la condition initiale et les conditions aux limites :

$$\text{à } \tau = 0: \theta_f(X, Y, 0) = \theta_s(X, Y, 0) = 0 ;$$

$$\text{à } X = 0: \theta_f(0, Y, \tau) = 0 ;$$

$$\text{à } Y = \lambda: \frac{\partial \theta_s(X, -\lambda, \tau)}{\partial Y} = 0$$

$$\text{à } Y = 0: K \frac{\partial \theta_s(X, 0, \tau)}{\partial Y} = \frac{\partial \theta_f(X, 0, \tau)}{\partial Y}$$

$$\text{à } Y = 1: K \frac{\partial \theta_s(X, 1, \tau)}{\partial Y} = \frac{\partial \theta_f(X, 1, \tau)}{\partial Y}$$

$$\text{à } Y = 1 + \lambda: K \frac{\partial \theta_s(X, 1 + \lambda, \tau)}{\partial Y} = Q(X, \tau)$$

Le développement en série de Taylor des termes du système donne :

**Premier pas de temps** : de  $\tau \rightarrow \tau + \frac{\Delta\tau}{2}$ , implicite suivant la direction X et explicite suivant la direction Y

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} = \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j}^n}{\frac{\Delta\tau}{2}}; \quad \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \frac{(\theta_s)_{i,j}^{n+1} - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta\tau}$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta X}; \quad \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial Y^2} = \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^n - 2(\theta_f)_{i,j}^n + (\theta_f)_{i,j-1}^n}{(\Delta Y)^2};$$

$$\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Y^2} = \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{(\Delta Y)^2}, U = U_j, \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\theta_{i,j}^{n+1} + \theta_{i,j}^n}{2}$$

Le système prend ainsi la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j}^n}{\frac{\Delta\tau}{2}} + U_j^n \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta X} = \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^n - 2(\theta_f)_{i,j}^n + (\theta_f)_{i,j-1}^n}{(\Delta Y)^2} \\ \frac{(\theta_s)_{i,j}^{n+1} - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta\tau} = A \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{(\Delta Y)^2} \end{array} \right.$$

**Avec :**

$$(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+1} + (\theta_f)_{i+1,j}^n}{2}, \quad (\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{(\theta_f)_{i-1,j}^{n+1} + (\theta_f)_{i-1,j}^n}{2}$$

$$(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + (\theta_f)_{i,j}^n}{2}, \quad (\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{(\theta_s)_{i,j}^{n+1} + (\theta_s)_{i,j}^n}{2}$$

Le système s'écrit alors :

**Première équation**

$$\begin{aligned} (\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j}^n + \frac{\Delta\tau}{4\Delta X} U_j \left( (\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \\ = \frac{\Delta\tau}{2(\Delta Y)^2} [(\theta_f)_{i,j+1}^n - 2(\theta_f)_{i,j}^n + (\theta_f)_{i,j-1}^n] \end{aligned} \quad (\text{II} - 10)$$

On pose :

$$\frac{\Delta\tau}{4\Delta X} U_j = \pi_1(j); \quad \frac{\Delta\tau}{2(\Delta Y)^2} = \pi_2$$

Ainsi on obtient :

$$\begin{aligned} (\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \pi_1(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \pi_1(\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \\ = \pi_2(\theta_f)_{i,j+1}^n + (1 - 2\pi_2)(\theta_f)_{i,j}^n + \pi_2(\theta_f)_{i,j-1}^n \end{aligned} \quad (\text{II} - 11)$$

Ainsi l'équation peut s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{A}(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{B}(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{D}(\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{C}$$

**Deuxième équation**

$$\frac{(\theta_s)_{i,j}^{n+1} - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta\tau} = A \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{(\Delta Y)^2} \quad (\text{II} - 12)$$

Ce qui donne :

$$(\theta_s)_{i,j}^{n+1} - (\theta_s)_{i,j}^n = \frac{A\Delta\tau}{(\Delta Y)^2} \left[ (\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} \right]$$

Avec

$$\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\theta_{i,j}^{n+1} + \theta_{i,j}^n}{2}$$

On pose :

$$\frac{A\Delta\tau}{2(\Delta Y)^2} = \pi_3$$

## Chapitre II : Développement analytique et numérique du problème inverse d'estimation du flux de chaleur

---

En réarrangeant les termes on trouve :

$$\begin{aligned} (1 + 2\pi_3) (\theta_s)_{i,j}^{n+1} - \pi_3 (\theta_s)_{i,j+1}^{n+1} - \pi_3 (\theta_s)_{i,j-1}^{n+1} \\ = (1 - 2\pi_3) (\theta_s)_{i,j}^n + \pi_3 (\theta_s)_{i,j+1}^n + \pi_3 (\theta_s)_{i,j-1}^n \end{aligned} \quad (\text{II} - 13)$$

**Deuxième pas de temps** :  $\text{det} + \frac{\Delta\tau}{2} \rightarrow \tau + \Delta\tau$ , explicite suivant la direction X et implicite suivant la direction Y

C'est un schéma aux différences centrées, au temps  $(n + \frac{1}{2})$  pour les dérivées en X et au temps  $(n+1)$  pour les dérivées en Y. La discrétisation des dérivées partielles est donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} &= \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta\tau}{2}}; \quad \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta X} \\ \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial Y^2} &= \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+1} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + (\theta_f)_{i,j-1}^{n+1}}{(\Delta Y)^2}; \quad U = U_j, \quad \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\theta_{i,j}^{n+1} + \theta_{i,j}^n}{2} \end{aligned}$$

Le système d'équations prend ainsi la forme :

### **Première équation**

$$\begin{aligned} \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta\tau}{2}} + U_j^n \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta X} &= \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+1} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + (\theta_f)_{i,j-1}^{n+1}}{(\Delta Y)^2} \\ (\theta_f)_{i,j}^{n+1} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta\tau U_j^n}{4\Delta X} \left[ (\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right] \\ &= \frac{\Delta\tau}{2(\Delta Y)^2} [(\theta_f)_{i,j+1}^{n+1} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + (\theta_f)_{i,j-1}^{n+1}] \end{aligned} \quad (\text{II} - 14)$$

Avec :

$$\frac{\Delta\tau}{4\Delta X} U_j^n = \pi_1; \quad \frac{\Delta\tau}{2(\Delta Y)^2} = \pi_2$$

Ce qui donne :

$$(1 + 2\pi_2)(\theta_f)_{i,j}^{n+1} - \pi_2(\theta_f)_{i,j+1}^{n+1} - \pi_2(\theta_f)_{i,j-1}^{n+1} = \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \pi_1(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + \pi_1(\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}$$

Sous la forme :

$$\hat{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\theta}_f)_{i,j+1}^{n+1} + \hat{\mathbf{B}}(\boldsymbol{\theta}_f)_{i,j}^{n+1} + \hat{\mathbf{D}}(\boldsymbol{\theta}_f)_{i,j-1}^{n+1} = \hat{\mathbf{C}}$$

**Discrétisation des conditions aux limites**

$$(\theta_f)_{i,j}^1 = (\theta_s)_{i,j}^1; (\theta_f)_{1,j}^n = 0;$$

$$\left. \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^n - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta Y} \right|_{j=1} = 0; K \left. \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^n - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta Y} \right|_{j=m1} = \left. \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^n - (\theta_f)_{i,j}^n}{\Delta Y} \right|_{j=m1} ;$$

$$K \left. \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^n - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta Y} \right|_{j=m2} = \left. \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^n - (\theta_f)_{i,j}^n}{\Delta Y} \right|_{m2} ; K \left. \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^n - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta Y} \right|_{j=m} = Q_i^n$$

Ainsi, le système avec les conditions aux limites sous sa forme discrétisée s'écrit

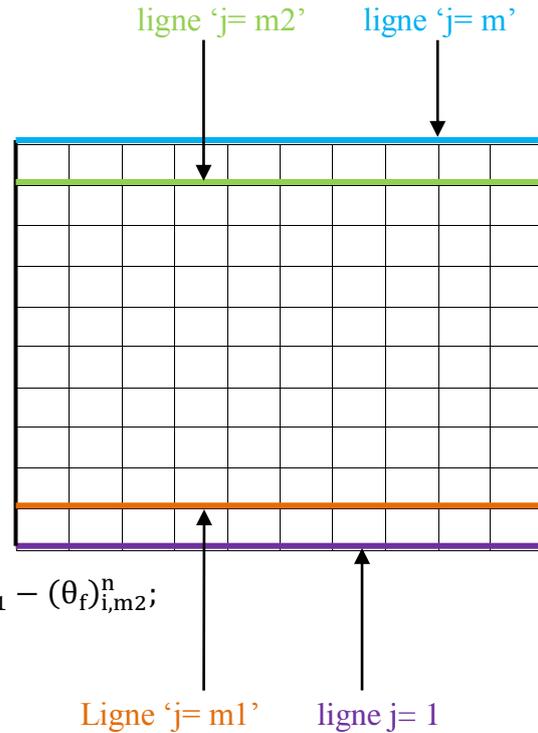
$$\left\{ \begin{array}{l} (\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \pi_1(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \pi_1(\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = \pi_2(\theta_f)_{i,j+1}^n + (1 - 2\pi_2)(\theta_f)_{i,j}^n + \pi_2(\theta_f)_{i,j-1}^n \\ \text{Suivi de} \\ (1 + 2\pi_2)(\theta_f)_{i,j}^{n+1} - \pi_2(\theta_f)_{i,j+1}^{n+1} - \pi_2(\theta_f)_{i,j-1}^{n+1} = (\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \pi_1(\theta_f)_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + \pi_1(\theta_f)_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} \end{array} \right.$$

Et

$$(1 + 2\pi_3)(\theta_s)_{i,j}^{n+1} - \pi_3(\theta_s)_{i,j+1}^{n+1} - \pi_3(\theta_s)_{i,j-1}^{n+1} = (1 - 2\pi_3)(\theta_s)_{i,j}^n + \pi_3(\theta_s)_{i,j+1}^n + \pi_3(\theta_s)_{i,j-1}^n$$

Avec

- ❖  $(\theta_f)_{i,j}^1 = (\theta_s)_{i,j}^1 = 0;$
- ❖  $(\theta_f)_{1,j}^n = 0;$
- ❖  $(\theta_s)_{i,2}^n = (\theta_s)_{i,1}^n$
- ❖  $K [(\theta_s)_{i,m1+1}^n - (\theta_s)_{i,m1}^n] = (\theta_f)_{i,m1+1}^n - (\theta_f)_{i,m1}^n ;$
- ❖  $K [(\theta_s)_{i,m2+1}^n - (\theta_s)_{i,m2}^n] = (\theta_f)_{i,m2+1}^n - (\theta_f)_{i,m2}^n ;$
- ❖  $(\theta_s)_{i,m}^n - (\theta_s)_{i,m-1}^n = \frac{\Delta Y Q_i^n}{K}$



#### II.4. Application au cas d'une conduite cylindrique

Le deuxième système est décrit par les équations suivantes :

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + \text{RePr} \frac{R}{L} \frac{\partial \theta_f}{\partial X} = \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \quad (\text{II} - 15)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = A \left[ \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} + \left( \frac{R}{L} \right)^2 \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \right] \quad (\text{II} - 16)$$

Avec la condition initiale et aux limites

$$\text{à } \tau = 0 \text{ on a } \theta = 0 ;$$

$$\text{à } X = 0 \text{ on a } \theta = 0 ;$$

$$\text{à } X = 1 \text{ et } 0 < \hat{r} < 1 + \lambda \text{ on a } \frac{\partial \theta_s}{\partial X} = \frac{\partial \theta_f}{\partial X} ;$$

$$\text{à } \hat{r} = 0 \text{ et } 0 < X < 1 \text{ on a } \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} = 0$$

$$\text{à } \hat{r} = 1 \text{ et } 0 < X < 1 \text{ on a } \theta_s = \theta_f ;$$

$$\text{à } \hat{r} = 1 \text{ et } 0 < X < 1 \text{ on a } K \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} = \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} ;$$

$$\text{à } \hat{r} = 1 + \lambda \text{ et } 0 < X < 1 \text{ on a } -K \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} = Q(X, \tau)$$

De la même manière, on suit le même schéma utilisé ci-dessus (ADI) :

##### Premier pas de temps

$\text{de } \tau \rightarrow \tau + \frac{\Delta \tau}{2}$ , implicite suivant la direction X et explicite suivant la direction du rayon  $\hat{r}$

##### Equation fluide

$$\left. \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} \right|_{i,j} \approx \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta \hat{r}^2}; \quad \left. \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \right|_{i,j} = \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^n - 2(\theta_f)_{i,j}^n + (\theta_f)_{i-1,j}^n}{\Delta X^2}$$

$$\left. \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} \right|_{i,j} \approx \frac{1}{\hat{r}} \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta \hat{r}}; \quad \left. \frac{\partial \theta_f}{\partial X} \right|_{i,j} \approx \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^n - (\theta_f)_{i-1,j}^n}{2\Delta X}; \quad \frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} \approx \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j}^n}{\frac{\Delta \tau}{2}}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned}
 & \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j}^n}{\frac{\Delta\tau}{2}} + \text{RePr} \frac{R}{L} \left[ \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^n - (\theta_f)_{i-1,j}^n}{2\Delta X} \right] \\
 & = \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta\hat{r}^2} + \\
 & \frac{1}{\hat{r}} \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta\hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^n - 2(\theta_f)_{i,j}^n + (\theta_f)_{i-1,j}^n}{\Delta X^2}
 \end{aligned} \tag{II - 17}$$

En réarrangeant tous ces termes on trouve :

$$\mathbf{A}_f(\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{B}_f(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{C}_f(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{D}_f$$

Avec :

$$\mathbf{A}_f = \frac{1}{2\hat{r}\Delta\hat{r}} - \frac{1}{\Delta\hat{r}^2}; \quad \mathbf{B}_f = \frac{2}{\Delta\tau} + \frac{2}{\Delta\hat{r}^2}; \quad \mathbf{C}_f = -\frac{1}{2\hat{r}\Delta\hat{r}} - \frac{1}{\Delta\hat{r}^2}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D}_f = & \left[ \frac{\text{RePr}R}{2L\Delta X} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{1}{\Delta X^2} \right] (\theta_f)_{i-1,j}^n + \left[ \frac{2}{\Delta\tau} - \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{2}{\Delta X^2} \right] (\theta_f)_{i,j}^n \\
 & + \left[ \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{1}{\Delta X^2} - \frac{\text{RePr}R}{2L\Delta X} \right] (\theta_f)_{i+1,j}^n
 \end{aligned}$$

### Equation solide

$$\left. \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \hat{r}^2} \right|_{i,j} \approx \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta\hat{r}^2}; \quad \left. \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \right|_{i,j} \approx \frac{(\theta_s)_{i+1,j}^n - 2(\theta_s)_{i,j}^n + (\theta_s)_{i-1,j}^n}{\Delta X^2}$$

$$\left. \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} \right|_{i,j} \approx \frac{1}{\hat{r}} \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta\hat{r}}; \quad \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} \approx \frac{(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_s)_{i,j}^n}{\frac{\Delta\tau}{2}}$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = A \left[ \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} \right]$$

$$\begin{aligned}
 \frac{(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_s)_{i,j}^n}{\frac{\Delta\tau}{2}} = & A \left[ \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta\hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta\hat{r}} \right] \\
 & + A \left[ \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{(\theta_s)_{i+1,j}^n - 2(\theta_s)_{i,j}^n + (\theta_s)_{i-1,j}^n}{\Delta X^2} \right]
 \end{aligned} \tag{II - 18}$$

Chapitre II : Développement analytique et numérique du problème  
inverse d'estimation du flux de chaleur

---

On trouve

$$\mathbf{A}_s(\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{B}_s(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{C}_s(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{D}_s$$

Avec :

$$\mathbf{A}_s = \frac{A}{2\hat{r}\Delta\hat{r}} - \frac{A}{\Delta\hat{r}^2}; \quad \mathbf{B}_s = \frac{2}{\Delta\tau} + \frac{2A}{\Delta\hat{r}^2}; \quad \mathbf{C}_s = -\frac{A}{\Delta\hat{r}^2} - \frac{A}{2\hat{r}\Delta\hat{r}}$$

$$\mathbf{D}_s = \left[ \frac{A}{\Delta X^2} \left( \frac{R}{L} \right)^2 \right] (\theta_s)_{i-1,j}^n + \left[ \frac{2}{\Delta\tau} - \frac{2A}{\Delta X^2} \left( \frac{R}{L} \right)^2 \right] (\theta_s)_{i,j}^n + \left[ \frac{A}{\Delta X^2} \left( \frac{R}{L} \right)^2 \right] (\theta_s)_{i+1,j}^n$$

**Deuxième pas de temps** : Schéma explicite en  $\hat{r}$  et implicite en X.

C'est un schéma aux différences centrées, au temps  $(n + 1/2)$  pour les dérivées en  $\hat{r}$  et au temps  $(n+1)$  pour les dérivées en X. La discrétisation des dérivées partielles est donnée par:

**Equation fluide**

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \hat{r}^2} \Big|_{i,j} &\approx \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta\hat{r}^2}; \quad \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial X^2} \Big|_{i,j} = \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+1} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + (\theta_f)_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta X^2} \\ \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} \Big|_{i,j} &\approx \frac{1}{\hat{r}} \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta\hat{r}}; \quad \frac{\partial \theta_f}{\partial X} \Big|_{i,j} \approx \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+1} - (\theta_f)_{i-1,j}^{n+1}}{2\Delta X}; \quad \frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} \\ &\approx \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+1} - (\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta\tau}{2}} \end{aligned}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \frac{(\theta_f)_{i,j}^{n+1} - (\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta\tau}{2}} + \frac{\text{RePrR}}{L} \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+1} - (\theta_f)_{i-1,j}^{n+1}}{2\Delta X} \\ = \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta\hat{r}^2} + \\ \frac{1}{\hat{r}} \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta\hat{r}} + \left( \frac{d}{L} \right)^2 \frac{(\theta_f)_{i+1,j}^{n+1} - 2(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + (\theta_f)_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta X^2} \end{aligned} \quad (\text{II} - 19)$$

Sous la forme :

$$\mathbf{A}_f(\theta_f)_{i-1,j}^{n+1} + \mathbf{B}_f(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + \mathbf{C}_f(\theta_f)_{i+1,j}^{n+1} = \mathbf{D}_f$$

Chapitre II : Développement analytique et numérique du problème  
inverse d'estimation du flux de chaleur

---

Avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_f &= -\frac{\text{RePrR}}{2L\Delta X} - \frac{1}{\Delta X^2} \left(\frac{R}{L}\right)^2; & \mathbf{B}_f &= \frac{2}{\Delta\tau} + \frac{2}{\Delta X^2} \left(\frac{R}{L}\right)^2; & \mathbf{C}_f \\ &= \frac{\text{RePrR}}{2L\Delta X} - \frac{1}{\Delta X^2} \left(\frac{R}{L}\right)^2 \end{aligned}$$

$$\mathbf{D}_f = \left[ \frac{1}{\Delta\hat{r}^2} - \frac{1}{2\hat{r}\Delta\hat{r}} \right] (\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + \left[ \frac{2}{\Delta\tau} - \frac{2}{\Delta\hat{r}^2} \right] (\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \left[ \frac{1}{\Delta\hat{r}^2} + \frac{1}{2\hat{r}\Delta\hat{r}} \right] (\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}}$$

**Equation solide**

$$\frac{\partial\theta_s}{\partial\tau} = A \left[ \frac{\partial^2\theta_s}{\partial\hat{r}^2} + \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial\theta_s}{\partial\hat{r}} + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial^2\theta_s}{\partial X^2} \right]$$

$$\left. \frac{\partial^2\theta_s}{\partial\hat{r}^2} \right|_{i,j} \approx \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta\hat{r}^2}; \quad \left. \frac{\partial^2\theta_f}{\partial X^2} \right|_{i,j} = \frac{(\theta_s)_{i+1,j}^{n+1} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+1} + (\theta_s)_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta X^2}$$

$$\left. \frac{1}{\hat{r}} \frac{\partial\theta_s}{\partial\hat{r}} \right|_{i,j} \approx \frac{1}{\hat{r}} \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta\hat{r}}; \quad \frac{\partial\theta_s}{\partial\tau} \approx \frac{(\theta_s)_{i,j}^{n+1} - (\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta\tau}{2}}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} & \frac{(\theta_s)_{i,j}^{n+1} - (\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta\tau}{2}} \\ &= A \left[ \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta\hat{r}^2} \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{\hat{r}} \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta\hat{r}} \right] \\ & \quad + A \left[ \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{(\theta_s)_{i+1,j}^{n+1} - 2(\theta_s)_{i,j}^{n+1} + (\theta_s)_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta X^2} \right] \end{aligned} \tag{II - 20}$$

Qui est sous la forme suivante :

$$\mathbf{A}_s(\theta_s)_{i-1,j}^{n+1} + \mathbf{B}_s(\theta_s)_{i,j}^{n+1} + \mathbf{C}_s(\theta_s)_{i+1,j}^{n+1} = \mathbf{D}_s$$

Avec :

$$\mathbf{A}_s = \frac{A}{\Delta X^2} \left(\frac{R}{L}\right)^2; \quad \mathbf{B}_s = \frac{2}{\Delta\tau} + \frac{2A}{\Delta X^2}; \quad \mathbf{C}_s = \frac{A}{\Delta X^2} \left(\frac{R}{L}\right)^2$$

$$\mathbf{D}_s = \left[ \frac{A}{\Delta\hat{r}^2} - \frac{A}{2\hat{r}\Delta\hat{r}} \right] (\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + \left[ \frac{2}{\Delta\tau} - \frac{2A}{\Delta\hat{r}^2} \right] (\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \left[ \frac{A}{\Delta\hat{r}^2} + \frac{A}{2\hat{r}\Delta\hat{r}} \right] (\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}}$$

Le système d'équations s'écrit alors :

$$\begin{cases} \mathbf{A}_f(\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{B}_f(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{C}_f(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{D}_f \\ \text{Suivi de} \\ \mathbf{A}'_f(\theta_f)_{i-1,j}^{n+1} + \mathbf{B}'_f(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + \mathbf{C}'_f(\theta_f)_{i+1,j}^{n+1} = \mathbf{D}'_f \end{cases}$$

pour l'équation fluide

Et

$$\begin{cases} \mathbf{A}_s(\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{B}_s(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{C}_s(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{D}_s \\ \text{Suivi de} \\ \mathbf{A}'_s(\theta_s)_{i-1,j}^{n+1} + \mathbf{B}'_s(\theta_s)_{i,j}^{n+1} + \mathbf{C}'_s(\theta_s)_{i+1,j}^{n+1} = \mathbf{D}'_s \end{cases}$$

pour l'équation solide

### Discretisation des conditions aux limites

$$\text{à } \tau = 0 \text{ on a } : \theta_s = \theta_f = 0 ; \Rightarrow (\theta_s)_{i,j}^n \Big|_{n=0} = (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{n=0}$$

$$\text{à } X = 0 \text{ on a } : \theta_s = \theta_f = 0 ; \Rightarrow (\theta_s)_{i,j}^n \Big|_{i=1} = (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{i=1}$$

$$\begin{aligned} \text{à } X = 1 \text{ et } 0 < \hat{r} < 1 + \lambda \text{ on a } : \frac{\partial \theta_s}{\partial X} = \frac{\partial \theta_f}{\partial X} ; \Rightarrow (\theta_s)_{i+1,j}^n - (\theta_s)_{i,j}^n \Big|_{i=mx} \\ = (\theta_f)_{i+1,j}^n - (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{i=mx} \end{aligned}$$

$$\text{à } \hat{r} = 0 \text{ et } 0 < X < 1 \text{ on a } : \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} = 0 \Rightarrow (\theta_f)_{i,j+1}^n \Big|_{j=\frac{mr}{2}+1} = (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{j=\frac{mr}{2}}$$

$$\text{à } \hat{r} = 1 \text{ et } 0 < X < 1 \text{ on a } : \theta_s = \theta_f ; \Rightarrow (\theta_s)_{i,j}^n \Big|_{j=mr-1} = (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{j=mr-1}$$

$$\begin{aligned} \text{à } \hat{r} = 1 \text{ et } 0 < X < 1 \text{ on a } : K \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} = \frac{\partial \theta_f}{\partial \hat{r}} ; \Rightarrow K \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^n - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta\hat{r}} \Big|_{j=mr-1} \\ = \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^n - (\theta_f)_{i,j}^n}{\Delta\hat{r}} \Big|_{j=mr-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{à : } \hat{r} = 1 + \lambda \text{ et } 0 < X < 1 \text{ on a : } & -K \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}} \\ & = Q(X, \tau); \Rightarrow -K \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^n - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta \hat{r}} \Bigg|_{\substack{j=mr \\ mx1 < i < mx2}} = Q_i^n \end{aligned}$$

Ainsi, le système d'équations aux dérivées partielles avec les conditions aux limites géométriques de la deuxième configuration s'écrit :

$$\begin{cases} \mathbf{A}_f(\theta_f)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{B}_f(\theta_f)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{C}_f(\theta_f)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{D}_f \\ \text{Suivi de} \\ \mathbf{A}'_f(\theta_f)_{i,j-1}^{n+1} + \mathbf{B}'_f(\theta_f)_{i,j}^{n+1} + \mathbf{C}'_f(\theta_f)_{i,j+1}^{n+1} = \mathbf{D}'_f \end{cases}$$

pour l'équation fluide, et

$$\begin{cases} \mathbf{A}_s(\theta_s)_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{B}_s(\theta_s)_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \mathbf{C}_s(\theta_s)_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{D}_s \\ \text{Suivi de} \\ \mathbf{A}'_s(\theta_s)_{i,j-1}^{n+1} + \mathbf{B}'_s(\theta_s)_{i,j}^{n+1} + \mathbf{C}'_s(\theta_s)_{i,j+1}^{n+1} = \mathbf{D}'_s \end{cases}$$

pour l'équation solide

Suivi de condition initiale et de conditions aux limites suivantes :

- ❖  $\hat{a} : \tau = 0$  on a :  $(\theta_s)_{i,j}^n \Big|_{n=0} = (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{n=0}$
- ❖  $\hat{a} : X = 0$  on a :  $(\theta_s)_{i,j}^n \Big|_{i=0} = (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{i=0}$
- ❖  $\hat{a} : X = 1$  et  $0 < \hat{r} < 1 + \lambda$  on a :  $(\theta_s)_{i+1,j}^n - (\theta_s)_{i,j}^n \Big|_{i=mx} = (\theta_f)_{i+1,j}^n - (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{i=mx}$
- ❖  $\hat{a} : \hat{r} = 0$  et  $0 < X < 1$  on a :  $(\theta_f)_{i,j+1}^n \Big|_{j=\frac{mr}{2}+1} = (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{j=\frac{mr}{2}}$
- ❖  $\hat{a} : \hat{r} = 1$  et  $0 < X < 1$  on a :  $(\theta_s)_{i,j}^n \Big|_{j=mr-1} = (\theta_f)_{i,j}^n \Big|_{j=mr-1}$
- ❖  $\hat{a} : \hat{r} = 1$  et  $0 < X < 1$  on a :  $K \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^n - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta \hat{r}} \Big|_{j=mr-1} = \frac{(\theta_f)_{i,j+1}^n - (\theta_f)_{i,j}^n}{\Delta \hat{r}} \Big|_{j=mr-1}$
- ❖  $\hat{a} : \hat{r} = 1 + \lambda$  et  $0 < X < 1$  on a :  $\Rightarrow -K \frac{(\theta_s)_{i,j+1}^n - (\theta_s)_{i,j}^n}{\Delta \hat{r}} \Big|_{\substack{j=mr \\ mx1 < i < mx2}} = Q_i^n$

## Chapitre III:

# **Optimisation de paramètres par la méthode du gradient conjugué et validation du modèle proposé**

Dans ce troisième chapitre, on a considéré deux différentes fonctions du flux pour démontrer la validité de la méthode du gradient conjugué.

### III.1. Introduction

L'optimisation est un sujet très ancien, il connaît un nouvel essor depuis l'apparition des ordinateurs et dont les méthodes s'appliquent dans de très nombreux domaines : économie, gestion, planification, logistique, automatique, robotique, conception optimale, sciences de l'ingénieur, traitement de signal, etc. L'optimisation est aussi un sujet très vaste qui touche aussi bien au calcul des variations, qu'à la recherche opérationnelle (domaine de l'optimisation des processus de gestion ou de décision), en passant par le contrôle optimal [12-19].

D'une certaine manière, l'optimisation peut être vue comme une discipline indépendante de l'analyse numérique des équations aux dérivées partielles que nous avons étudiées dans le chapitre précédent. Cependant, les interactions entre ces deux disciplines sont extrêmement nombreuses et fécondes [20-27] après l'étape de modélisation d'un phénomène physique ou d'un système industriel (éventuellement à l'aide d'équations aux dérivées partielles), et après l'étape de simulation numérique sur ce modèle, la démarche du mathématicien appliqué (qu'il soit ingénieur ou chercheur) ne s'arrête pas là : il lui faut souvent agir sur le phénomène ou le système afin d'en améliorer certaines performances. Cette troisième étape est celle de l'optimisation, c'est-à-dire celle de la minimisation (ou de la maximisation) d'une fonction qui dépend de la solution du modèle [28 ; 29 ; 30 ; 37]

Dans le cas le plus simple, le modèle sera une simple équation algébrique et il s'agira simplement d'optimiser une fonction définie sur un simple espace de dimension finie ( $\mathbb{R}^n$ ). Typiquement, c'est la situation la plus fréquente en recherche opérationnelle.

La deuxième catégorie de problèmes correspond au cas où la fonction à optimiser dépend de la solution d'une équation différentielle ordinaire (autrement dit, cette fonction est définie sur un espace de dimension infinie). On parle ici de *commande optimale*, et les applications sont très nombreuses en automatique et robotique.

La troisième et dernière catégorie correspond à l'optimisation de fonction d'une solution d'une équation aux dérivées partielles. Il s'agit ici de la théorie du *contrôle optimal* où s'inscrit notre étude.

Dans le problème direct, la distribution de vitesse (profil), les conditions initiales et les conditions aux limites sont données pour ainsi trouver la distribution de température dans le domaine étudié ; dans le problème inverse on tient compte de la température mesurée ou simulée à l'intérieur de l'écoulement ou bien entre le fluide et la paroi solide. La connaissance du flux adimensionnel à partir de température mesurées est un problème inverse et son estimation peut être construite à partir d'un problème de minimisation de la fonction objectif définie par [38-40] :

$$J = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N (\theta_{f,i,k} - Z_{i,k})^2, \quad \text{(III-1)}$$

Ou

$$J[q(x, t)] = \int_{t=0}^{t_f} \sum_{m=1}^M [T_s(x_m, r_m, t) - Y(x_m, r_m, t)]^2 dt, \quad [38; 40] \quad (\text{III-2})$$

Et puisqu'il s'agit d'un problème de minimisation, on parlera de la notion d'optimisation en sens général et les problèmes d'optimisation (maximisation et minimisation).

### III.2. Problème inverse de la configuration plane

Dans le problème direct, la distribution de vitesse, les conditions initiales et les conditions aux limites sont connues pour trouver la distribution de température dans le domaine.

Dans le problème inverse on mesure la température à l'intérieur du fluide ou à l'interface entre le solide et le fluide pour estimer le flux de chaleur. La connaissance du flux de chaleur à partir de la mesure de la température peut être construite comme un problème de minimisation de la fonction objective décrite comme suit :

#### III.2.1. La fonctionnelle J

ou bien la fonction objective :

$$J = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N (\theta_{f,i,k} - Z_{i,k})^2,$$

Avec  $\theta_{f,i,k} = \theta_f(X_i, Y_1, \tau_k)$  est la température calculée du problème direct pour un flux de chaleur connu et  $Z_{i,k} = Z(X_i, Y_1, \tau_k)$  est la température mesurée ou exacte.

#### III.2.2. Le problème sensitif

Le problème sensitif est obtenu en dérivant la fonction de température du problème direct par rapport au flux (perturbation du flux seulement) :

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{\partial \theta_f}{\partial Q_{m,n}} \right) + U \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial \theta_f}{\partial Q_{m,n}} \right) = \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left( \frac{\partial \theta_f}{\partial Q_{m,n}} \right), \quad (\text{III-3})$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{\partial \theta_s}{\partial Q_{m,n}} \right) = A \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left( \frac{\partial \theta_s}{\partial Q_{m,n}} \right), \quad (\text{III-4})$$

$$\frac{\partial \theta_f(X, Y, 0)}{\partial Q_{m,n}} = \frac{\partial \theta_s(X, Y, 0)}{\partial Q_{m,n}} = 0$$

$$\frac{\partial \theta_f(0, Y, \tau)}{\partial Q_{m,n}} = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial \theta_s(X, 0, \tau)}{\partial Q_{m,n}} \right) = 0,$$

$$K \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial \theta_s(X, \lambda, \tau)}{\partial Q_{m,n}} \right) = \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial \theta_f(X, \lambda, \tau)}{\partial Q_{m,n}} \right),$$

$$K \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial \theta_s(X, 1 + \lambda, \tau)}{\partial Q_{m,n}} \right) = \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial \theta_f(X, 1 + \lambda, \tau)}{\partial Q_{m,n}} \right),$$

$$K \frac{\partial}{\partial Y} \left( \frac{\partial \theta_s(X, 1 + 2\lambda, \tau)}{\partial Q_{m,n}} \right) = \hat{u}(X - X_m, \tau - \tau_n)$$

Avec :

$$\hat{u}(X - X_m, \tau - \tau_n) = \begin{cases} 1 & \text{si } X = X_m, \tau - \tau_n \\ 0 & \end{cases}$$

### III.2.3. Problème adjoint et équations du gradient

Pour obtenir le problème de l'état adjoint, on intègre les équations du domaine solide et fluide sur leurs contours respectifs qui dépend du temps, puis, on les multiples respectivement par les coefficients de l'état adjoint dont la dénomination est respectivement  $\lambda_s(X, Y, \tau)$  et  $\lambda_f(X, Y, \tau)$ . La quantité obtenue est ajoutée à la partie droite de la fonctionnelle  $J$  :

$$\begin{aligned} J[Q_{m,n}] = & \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N ((\theta_f)_{i,k} - Z_{i,k})^2 \\ & + \int_0^{\tau_f} \int_0^{1+2\lambda} \int_0^1 \lambda_f \left[ \frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta_f}{\partial X} - \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial Y^2} \right] dXdYd\tau \\ & + \int_0^{\tau_f} \int_0^{1+2\lambda} \int_0^1 \lambda_s \left[ \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} - A \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Y^2} \right] dXdYd\tau \end{aligned} \quad \text{(III-5)}$$

Maintenant il faut trouver la formulation de  $\hat{J}$ .

Ici le terme  $\frac{\partial J}{\partial Q_{m,n}}$  est le gradient de la fonction objectif  $\hat{J}[Q_{m,n}] = \frac{\partial J}{\partial Q_{m,n}}$

Et pour cela on doit d'abord calculer le  $\Delta J(Q(X, \tau))$

Ainsi :

Chapitre III : Optimisation de paramètres par la méthode du gradient  
conjugué et validation du modèle proposé

$$\begin{aligned}
 \Delta J(Q_{m,n}) = & 2 \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N [(\theta_f)_{i,k} - Z_{i,k}] \frac{\partial \theta_f}{\partial Q} \cdot \hat{u}(X - X_m, \tau - \tau_n) \\
 & + \int_0^{\tau_f} \int_0^{1+2\lambda} \int_0^1 \lambda_f \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{\partial \theta_f}{\partial Q} \right) + U \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{\partial \theta_f}{\partial Q} \right) \right. \\
 & \left. - \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left( \frac{\partial \theta_f}{\partial Q} \right) \right] dX dY d\tau \\
 & + \int_0^{\tau_f} \int_0^{1+2\lambda} \int_0^1 \lambda_s \left[ \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{\partial \theta_s}{\partial Q} \right) \right. \\
 & \left. - A \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left( \frac{\partial \theta_s}{\partial Q} \right) \right] dX dY d\tau
 \end{aligned} \tag{III-6}$$

Le terme  $\frac{\partial \theta_{f,i,k}}{\partial Q_{m,n}}$  est le coefficient sensitif.

Tenant compte des conditions aux limites il en reste :

$$\hat{J}[Q_{m,n}] = \frac{\partial J}{\partial Q_{m,n}} = 2 \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N [(\theta_f)_{i,k} - Z_{i,k}] \frac{\partial \theta_f}{\partial Q} \tag{III-7}$$

Dans la démarche qui suit, on a utilisé la méthode du gradient conjugué pour estimer la flux de chaleur appliqué à la paroi en minimisant la fonction objective,  $J$ .

Le processus itératif est le suivant :

$$Q_{m,n}^{p+1} = Q_{m,n}^p - \beta^p d_{m,n}^p$$

Où :

$$Q_{m,n} = Q(X_m, \tau_n),$$

$\beta^p$  : le pas

$d_{m,n}^p$  : la direction de la descente qui est déterminée comme suit :

$$d_{m,n}^p = \left( \frac{\partial J}{\partial Q_{m,n}} \right)^2 + \gamma^p d_{m,n}^{p-1}$$

Avec :

$\gamma^p$  : est le coefficient conjugué qui est donné par la formule :

$$\gamma^p = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[ \left( \frac{\partial J}{\partial Q_{m,n}} \right)^p \right]^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left[ \left( \frac{\partial J}{\partial Q_{m,n}} \right)^{p-1} \right]^2}$$

Avec  $\gamma^0 = 0$

Le pas  $\beta^p$  est déterminé comme suit :

## Chapitre III : Optimisation de paramètres par la méthode du gradient conjugué et validation du modèle proposé

$$\beta^p = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N (\theta_{f,i,k}^p - Z_{i,k}) \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{\partial \theta_{f,i,k}}{\partial Q_{m,n}} \right)^p d_{m,n}^p}{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left( \frac{\partial \theta_{f,i,k}}{\partial Q_{m,n}} \right)^p d_{m,n}^p \right]^2}$$

La condition  $J(Q_{m,n}^p) < \varphi$  peut être utilisée pour déterminer le processus itératif où  $\varphi$  est un nombre positif très petit.

Comme critère d'arrêt, on choisit  $\varphi = MN\sigma^2$  ainsi on aura :

$J(Q_{m,n}^p) < MN\sigma^2$  où :  $\sigma$  est la déviation standard des erreurs de mesure.

Ainsi, la procédure numérique utilisée pour la résolution de problème inverse est résumée de la façon suivante :

- **Étape 1** : résoudre le problème sensitif afin de calculer le coefficient sensitif  $\frac{\partial \theta_{f,i,k}}{\partial Q_{m,n}}$
- **Étape 2** : choisir un flux initial  $Q_{m,n}^0$
- **Étape 3** : résoudre le problème direct pour obtenir les  $\theta_{f,i,k}$
- **Étape 4** : calcul de la fonction objectif. Finir le processus itératif si le critère d'arrêt est satisfait sinon aller à l'étape 5.
- **Étape 5** : connaissant  $\frac{\partial \theta_{f,i,k}}{\partial Q_{m,n}}$ ,  $\theta_{f,i,k}$  et  $Z_{i,k}$  on calcul le gradient de la fonction objectif  $\frac{\partial J}{\partial Q_{m,n}}$ .
- **Étape 6** : connaissant  $\frac{\partial J}{\partial Q_{m,n}}$  on procède au calcul de  $\gamma^p$  et  $d_{m,n}^p$ .
- **Étape 7** : connaissant  $\frac{\partial \theta_{f,i,k}}{\partial Q_{m,n}}$ ,  $\theta_{f,i,k}$ ,  $Z_{i,k}$  et  $d_{m,n}^p$  on calcule  $\beta^p$ .
- **Étape 8** : connaissant  $\beta^p$  et  $d_{m,n}^p$  on calcule  $Q_{m,n}^{p+1}$ .

On met  $p = p + 1$  puis on recommence de l'étape 3.

Le flux initial est pris zéro ( $Q_{m,n}^0 = 0$ ).

### III.3. Problème inverse de la configuration cylindrique

Dans le problème inverse, on cherche à trouver l'inconnu  $q(x, t)$  tout en admettant que toutes les inconnues du problème direct soient connues.

La solution du présent problème inverse est obtenue tout en minimisant la fonction objective :

$$J[q(x, t)] = \int_{t=0}^{t_f} \sum_{m=1}^M [T_s(x_m, r_m, t) - Y(x_m, r_m, t)]^2 dt, \quad \text{(III-8)}$$

Ici,  $T_s(x_m, r_m, t)$  représente la température calculée dans le problème direct au point de coordonnées  $(x_m, r_m)$  en utilisant un flux  $\tilde{q}^K(x, t)$  qui représente la quantité estimée à la  $K^{\text{ème}}$  itération.  $t_f$  représente le temps final de mesure.

## Chapitre III : Optimisation de paramètres par la méthode du gradient conjugué et validation du modèle proposé

### III.3.1. Problème sensitif

Le problème sensitif est construit du problème direct en perturbant le flux  $q(x, t)$  par  $\Delta q(x, t)$ ,  $T(x, r, t)$  par  $\Delta T(x, r, t)$ , puis en remplaçant respectivement  $q$  par  $\Delta q$  et  $T$  par  $\Delta T$  puis on soustrait le problème direct du problème qu'on trouvera et on néglige les termes du second ordre, le problème sensitif prend la forme suivante :

$$\frac{\partial \Delta T_f}{\partial t} + U_x \frac{\partial \Delta T_f}{\partial x} = \alpha_f \left( \frac{\partial^2 \Delta T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_f}{\partial x^2} \right) \quad (\text{III-9})$$

$$\frac{\partial \Delta T_s}{\partial t} = \alpha_s \left( \frac{\partial^2 \Delta T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_s}{\partial x^2} \right) \quad (\text{III-10})$$

$$\text{à } x = 0 : \quad \Delta T_s = \Delta T_f = 0 ;$$

$$\text{à } x = L \text{ et } 0 < r < R+E : \quad \frac{\partial \Delta T_s}{\partial x} = \frac{\partial \Delta T_f}{\partial x} ;$$

$$\text{à } r = 0 \text{ et } 0 < x < L : \quad \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} = 0 ;$$

$$\text{à } r = R \text{ et } 0 < x < L : \quad \Delta T_s = \Delta T_f ;$$

$$\text{à } r = R \text{ et } 0 < x < L : \quad K_s \frac{\partial \Delta T_s}{\partial r} = K_f \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} ;$$

$$\text{à } r = R+E \text{ et } 0 < x < L : \quad -K_s \frac{\partial \Delta T_s}{\partial r} = \Delta q_s$$

$$\text{à } r = R+E \text{ et } 0 < x < L : \quad \frac{\partial \Delta T_s}{\partial r} = 0.$$

Le problème sensitif peut être résolu comme le problème direct.

### III.3.2. Problème adjoint et équations du gradient

$$\begin{aligned} J[q(x, t)] = & \int_{t=0}^{t_f} \sum_{m=1}^M [T_s(x_m, r_m, t) - Y(x_m, r_m, t)]^2 dt \\ & + \int_0^{t_f} \int_{r=R}^{R+E} \int_{x=0}^L r \cdot \lambda_s \left[ \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \right. \\ & \left. - \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} \right] dx dr dt \quad (\text{III-11}) \\ & + \int_0^{t_f} \int_{r=0}^R \int_{x=0}^L r \cdot \lambda_f \left[ \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - U_x \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial T_f}{\partial x} \right. \\ & \left. - \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} \right] dx dr dt, \end{aligned}$$

La variation  $\Delta J$ , est obtenue en perturbant "q" par " $\Delta q$ " et "T" par " $\Delta T$ " dans l'équation précédente, puis on soustrait l'équation précédente de celle résultante en négligeant les termes de second ordre, on trouve :

Chapitre III : Optimisation de paramètres par la méthode du gradient  
conjugué et validation du modèle proposé

$$\begin{aligned}
 \Delta J[q(x, t)] = & \int_0^{t_f} \int_{r=R}^{R+E} \int_{x=0}^L 2 [T_s(x, r, t) - Y(x, r, t)] \Delta T_s \cdot \delta(r \\
 & - r_m) \cdot \delta(x - x_m) dx dr dt \\
 & + \int_0^{t_f} \int_{r=R}^{R+E} \int_{x=0}^L r \cdot \lambda_s \left[ \frac{\partial^2 \Delta T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_s}{\partial x^2} \right. \\
 & \left. - \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \Delta T_s}{\partial t} \right] dx dr dt \quad \text{(III-12)} \\
 & + \int_0^{t_f} \int_{r=0}^R \int_{x=0}^L r \cdot \lambda_f \left[ \frac{\partial^2 \Delta T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_f}{\partial x^2} \right. \\
 & \left. - U_x \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial \Delta T_f}{\partial x} - \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial \Delta T_f}{\partial t} \right] dx dr dt
 \end{aligned}$$

Où  $\delta$  est la fonction de Dirac, on peut intégrer la deuxième et la troisième par partie, puis en utilisant les conditions initiales et aux limites et on fait le  $\Delta J$  tendre vers zéro. Les intégrales contenant le  $\Delta T$  étant nulles ce qui permet de déterminer les valeurs de  $\lambda_s(x, r, t)$  et  $\lambda_f(x, r, t)$ , ainsi on trouve :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \lambda_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \lambda_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 \lambda_s}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \lambda_s}{\partial t} \\
 + \frac{2T_s(x, r, t) - Y(x, r, t)}{r} \delta(r - r_m) \cdot \delta(x - x_m) = 0 \quad \text{(III-13)}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 \lambda_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \lambda_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 \lambda_f}{\partial x^2} + U_x \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial \lambda_f}{\partial x} + \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial \lambda_f}{\partial t} = 0 \quad \text{(III-14)}$$

$$\lambda_s = \lambda_f = 0 \text{ à } x=0$$

$$\frac{\partial \lambda_s}{\partial x} = 0 \text{ à } x = L, R < r < R + E$$

$$\frac{\partial \lambda_f}{\partial x} + \frac{U_x}{\alpha_f} \lambda_f = 0, \text{ à } x = L, 0 < r < R$$

$$\frac{\partial \lambda_f}{\partial r} = 0, \text{ à } r = 0, 0 < x < L$$

$$K_f \lambda_s = K_s \lambda_f, \text{ à } r = 0, 0 < x < L$$

$$\frac{\partial \lambda_s}{\partial r} = \frac{\partial \lambda_f}{\partial r}, \text{ à } r = 0, 0 < x < L$$

$$\frac{\partial \lambda_s}{\partial r} = 0, \text{ à } r = R, 0 < x < L$$

$$\lambda_s = \lambda_f = 0, \text{ à } t = t_f$$

Le problème de l'état adjoint est différent du problème standard d'état initial dans la condition finale de temps à :  $t = t_f$ , qui est spécifiée en outre de celle de l'état initial. Toutefois le problème de l'état adjoint peut être transformé en un problème de l'état initial, en posant  $\tau = t_f - t$ , ainsi, le problème de l'état adjoint peut être résolu comme le problème direct.

L'intégrale précédente prend la forme suivante :

$$\Delta J = \int_0^{t_f} \int_{x=D_1}^{x=D_2} - \frac{(R + E) \cdot \lambda_s(x, R + E, t)}{k_s} \cdot \Delta q(x, t) dx dt$$

## Chapitre III : Optimisation de paramètres par la méthode du gradient conjugué et validation du modèle proposé

Et de la définition utilisée dans [63] on a :

$$\Delta J = \int_0^{t_f} \int_{x=D_1}^{x=D_2} J'(x, t) \cdot \Delta q(x, t) dx dt$$

Où,  $J'(x, t)$  est le gradient de la fonctionnelle  $J[q(x, t)]$ , on trouve par comparaison :

$$J'(x, t) = -(R + E) \cdot \lambda_s(x, R + E, t) / k_s.$$

### III.3.3. Application de la méthode du gradient conjugué pour la minimisation

On assume que  $T(x, r, t)$ ,  $\Delta T(x, r, t)$ ,  $\lambda(x, r, t)$  et  $J'(x, t)$  sont disponible à la  $k^{\text{ème}}$  itération, le processus itératif de la méthode du gradient conjugué est utilisé pour estimer le flux de chaleur  $q(x, t)$ , et ça en minimisant la fonctionnelle  $J[q(x, t)]$ .

La fonction (flux de chaleur  $q(x, t)$ ) peut être évaluée à la  $k^{\text{ème}}+1$  itération comme suit :

$$\tilde{q}^{k+1}(x, t) = \tilde{q}^k(x, t) - \beta^k p^k(x, t) \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Avec :

$\beta^k$  : le pas

$p^k$  : la direction de la descente qui est déterminée comme suit :

$$p^k(x, t) = J'^k(x, t) + \gamma^k p^{k-1}(x, t)$$

$\gamma^k$  : est le coefficient conjugué qui est donné par la formule :

$$\gamma^k = \frac{\int_0^{t_f} \int_{x=D_1}^{x=D_2} [J'^k(x, t)]^2 dx dt}{\int_0^{t_f} \int_{x=D_1}^{x=D_2} [J'^{k-1}(x, t)]^2 dx dt} \quad \text{avec } \gamma^0 = 0$$

Pour calculer le  $\tilde{q}^{k+1}(x, t)$  et vérifier ainsi le processus itératif, on doit calculer ( $\beta^k$ ) et le gradient de la fonctionnelle ( $J'^k(x, t)$ ).

La fonctionnelle  $J[\tilde{q}^{k+1}(x, t)]$  à l'itération  $k + 1$  est obtenue en réécrivant l'équation (III-8)

$$J[\tilde{q}^{k+1}(x, t)] = \int_0^{t_f} \sum_{m=1}^M [T_s(\tilde{q}^k - \beta^k p^k) - Y(x_m, r_m, t)]^2 dt, \quad \text{(III-15)}$$

$T_s(\tilde{q}^k - \beta^k p^k) = T_s(\tilde{q}^k) - \beta^k \Delta T_s(p^k)$  (Linéarisation par la série de Tylor [30])

ainsi,

$$J[\tilde{q}^{k+1}(x, t)] = \int_0^{t_f} \sum_{m=1}^M [T_s(\tilde{q}^k) - \beta^k \Delta T_s(p^k) - Y(x_m, r_m, t)]^2 dt,$$

Où,  $T_s(\tilde{q}^k)$  est la solution du problème direct,  $\Delta T_s(p^k)$  est prise comme solution du problème sensitif,  $\beta^k$  est déterminée en minimisant la fonctionnelle  $J$ , il est donné comme suit :

$$\beta^k = \frac{\int_0^{t_f} \sum_{m=1}^M \Delta T_s(p^k) [T_s(\tilde{q}^k) - Y(x_m, r_m, t)] dt}{\int_0^{t_f} \sum_{m=1}^M [\Delta T_s(p^k)]^2 dt}$$

### III.4. Critère d'arrêt

Si le problème ne contient pas d'erreurs de mesure, la condition de minimisation du critère est :  $J(\tilde{q}^{k+1}) < \eta$ ,

Où,  $\eta$  dépend de l'exactitude de la solution du problème direct.

Pour des mesures de températures  $Y$ , perturbées par des petites variations (erreurs relatives avec la déviation standard  $\sigma$ , ainsi, on pose :  $\eta = \sigma^2 t_f$

Ainsi, la procédure numérique utilisée pour la résolution de problème inverse est résumée de la façon suivante :

- **Étape 1** : résoudre le problème direct et déterminer  $T_s(x, r, t)$  et  $T_f(x, r, t)$ , respectivement.
- **Étape 2** : vérifier le critère d'arrêt, sinon on continue ;
- **Étape 3** : résoudre le problème d'état adjoint pour trouver  $\lambda_s(x, r, t)$  et  $\lambda_f(x, r, t)$  ;
- **Étape 4** : calculer le gradient de la fonctionnelle ( $J'$ )
- **Étape 5** : calculer le coefficient conjugué  $\gamma^k$  et la direction de la descente  $p^k$  respectivement ;
- **Étape 6** : mettons  $\Delta q(x, t) = p^k(x, t)$  et résoudre le problème sensitif pour trouver  $\Delta T_s(x, r, t)$  et  $\Delta T_f(x, r, t)$ , respectivement ;
- **Étape 7** : calculer la pas  $\beta^k$
- **Étape 8** : calculer la nouvelle estimation  $\tilde{q}^{k+1}(x, t)$  et retourner à l'étape 1

Pour prouver la pertinence de la méthode proposée, l'estimation du flux de chaleur appliqué sur la paroi supérieure à partir de températures simulées, erreur de mesure, et l'épaisseur des plaques (données géométriques et résultats du problème direct) sont investies.

La température mesurée  $Z$  est simulée en ajoutant une erreur aléatoire à la valeur de la température du problème direct ainsi

$$Z = \theta + \sigma \zeta,$$

Où,  $\sigma$  est la déviation standard

$\zeta$  est l'erreur aléatoire elle est prise entre  $-2.576 < \zeta < 2.576$  [14]

### Chapitre III : Optimisation de paramètres par la méthode du gradient conjugué et validation du modèle proposé

---

Dans le reste du travail, on a pris deux configurations du flux thermique (fonction triangulaire et une fonction sinusoïdale dépendante du temps).

On a défini l'erreur absolue moyenne somme étant :

$$\varepsilon = \frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} |f - f_0|,$$

Ces profils ont été comparés à la solution exacte du flux thermique, et c'est très clair que pour un  $\sigma = 0$  les profils se coïncident, pour  $\sigma$  égal à 0.03 ou 0.06, les profils sont proches de la solution exacte est ça pour une valeur de  $\lambda = 0$ .

Pour ces résultats suscités, on peut conclure que la méthode du gradient conjugué est précise et aussi stable dans l'estimation du flux de chaleur. Il en est de même pour le deuxième cas de flux de chaleur (fonction sinusoïdale).

#### III.5. Résultats:

Pour les calculs, nous avons pris les données suivantes

$$k_s = 17 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}, k_f = 0.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1},$$

$$\alpha_s = 4.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}, \alpha_f = 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

$$T_0 = 0^\circ\text{C},$$

Deux configurations du flux de chaleur sont proposées dans la région du sud d'Algérie:

1-  $Q(\tau) = 20\sin(\pi\tau)$

2-  $Q(\tau, X) = 20X\sin(\pi\tau)$

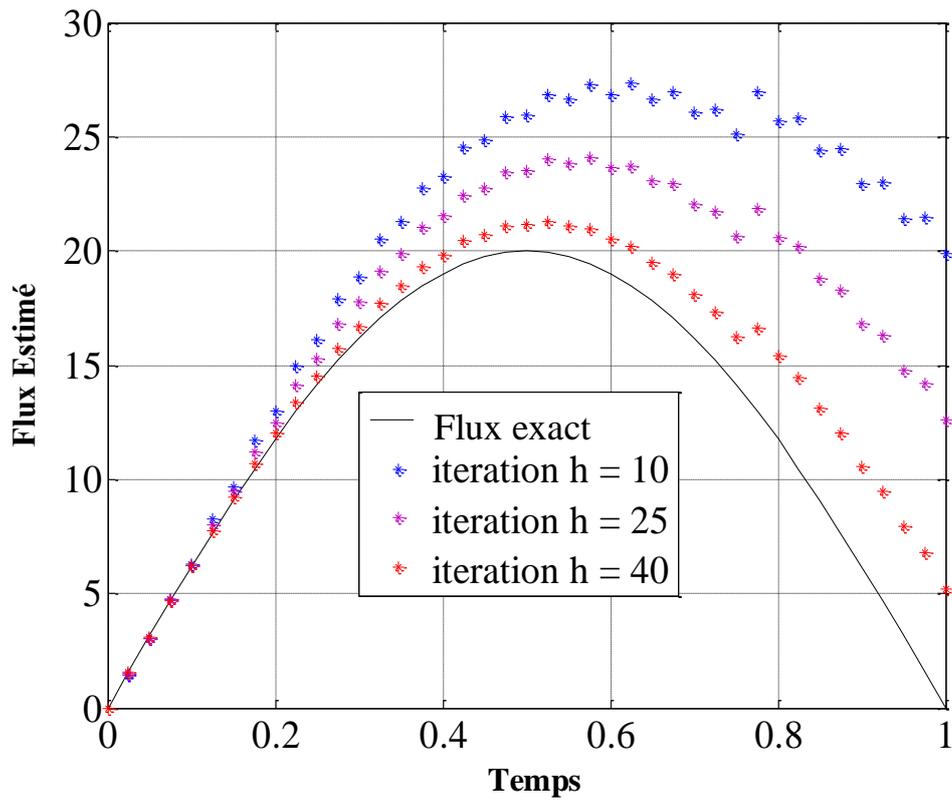


Figure III-1: Flux estimé pour  $\sigma = 0.005$  Configuration Sinusoïdale.

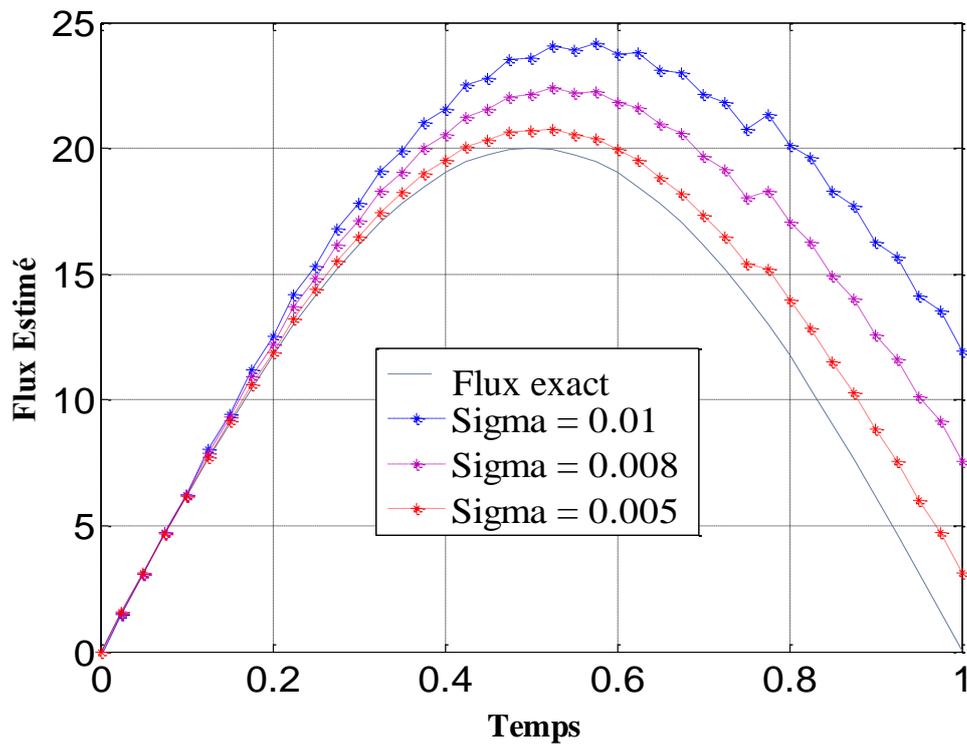


Figure III-2: Flux estimé pour différentes valeur de  $\sigma$  à la 40 itération (Configuration Sinusoïdale)

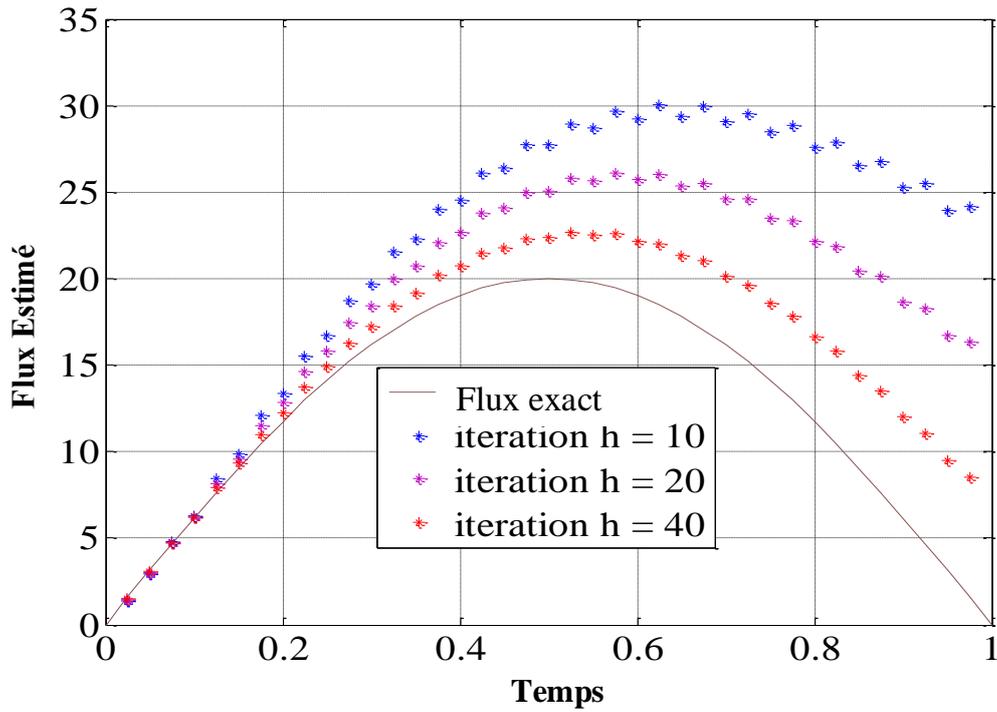


Figure III-3: Flux estimé pour  $\sigma = 0.006$  à différentes itérations ( Configuration spatiotemporelle)

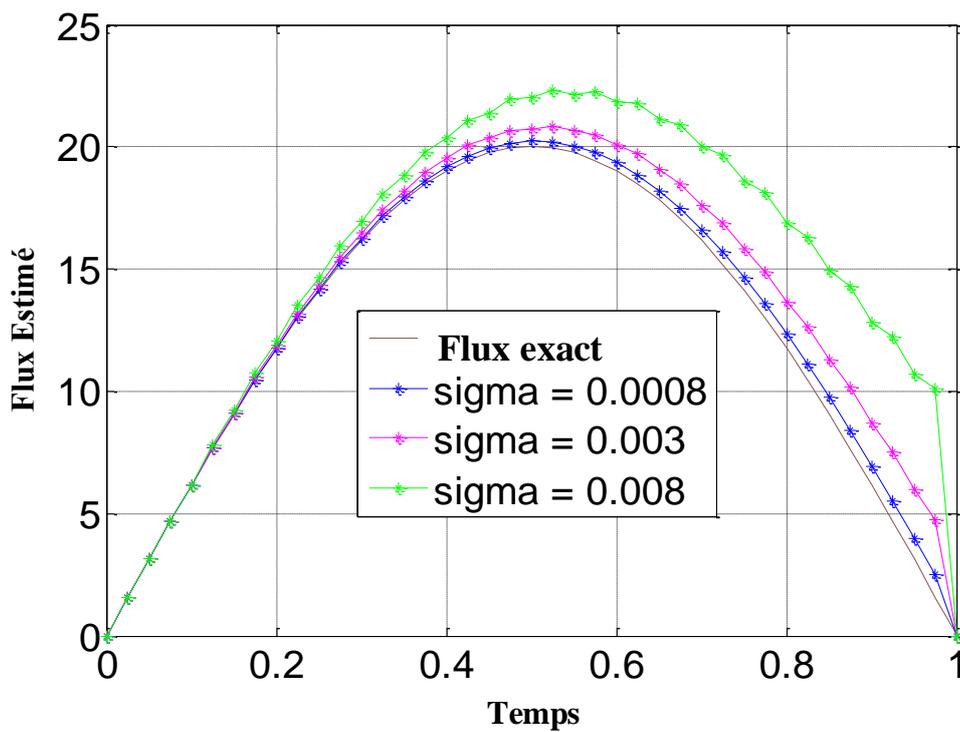


Figure III-4: flux estimé pour différentes valeurs de  $\sigma$  à la 40ème itération

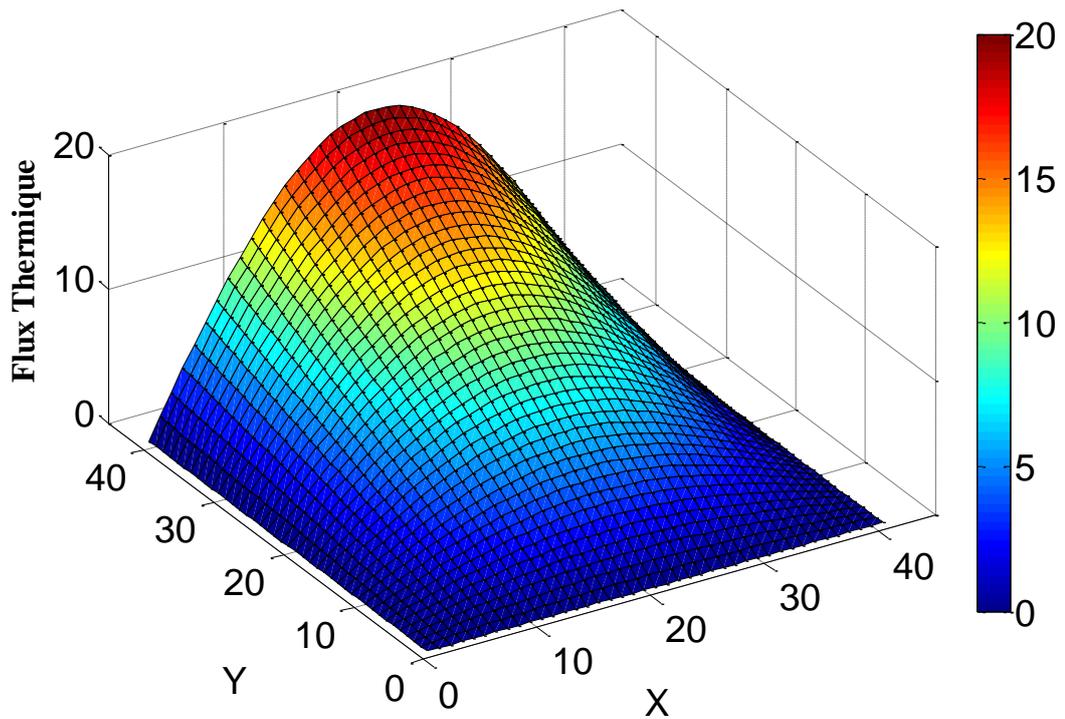


Figure III-5: Diffusion du flux de chaleur à travers les parois du receveur solaire

**Effet de la déviation standard ( Ecart-type) sur la pertinence de la méthode**

**1- Configuration Spatiotemporelle**

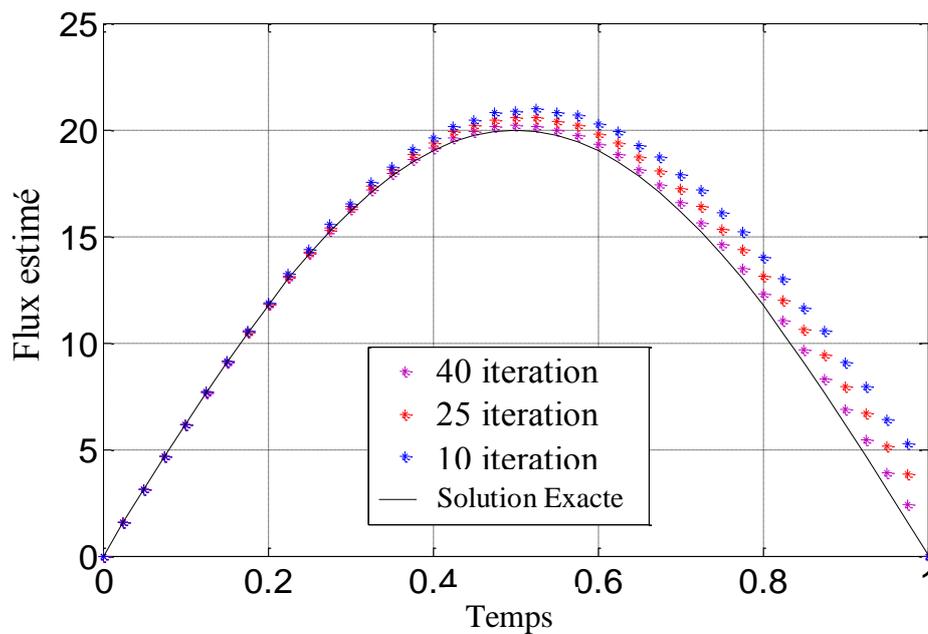


Figure III-6: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour  $\sigma=0,0008$

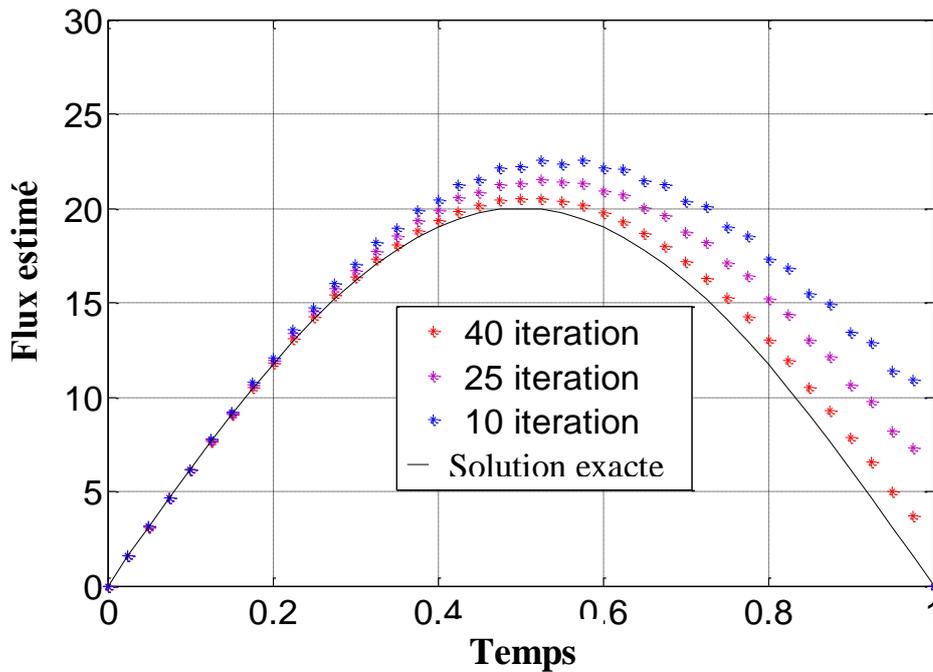


Figure III-7: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour  $\sigma=0,002$ .

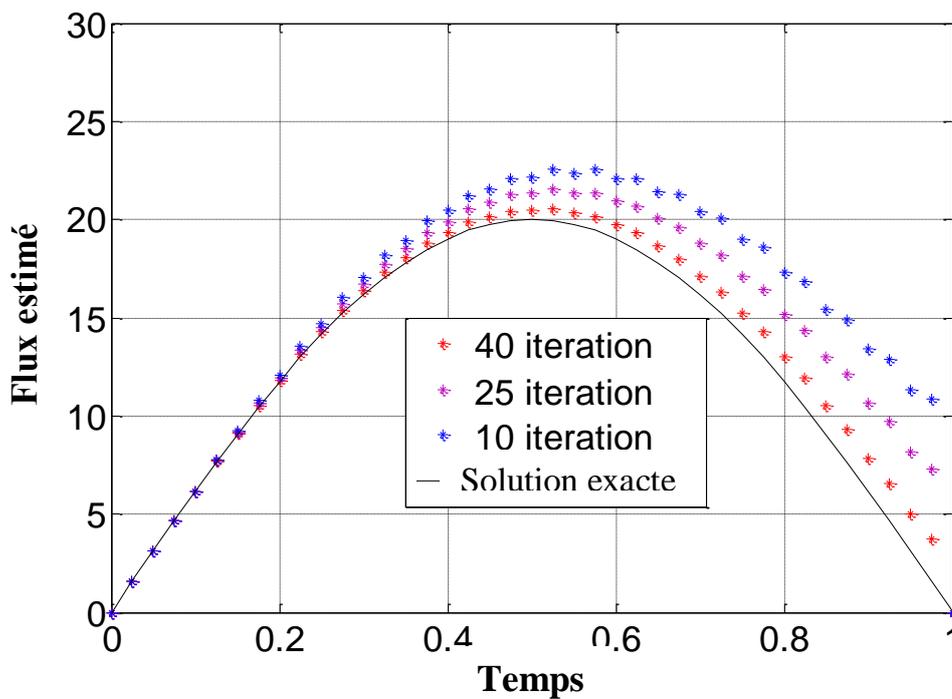


Figure III-8: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour  $\sigma = 0.005$ .

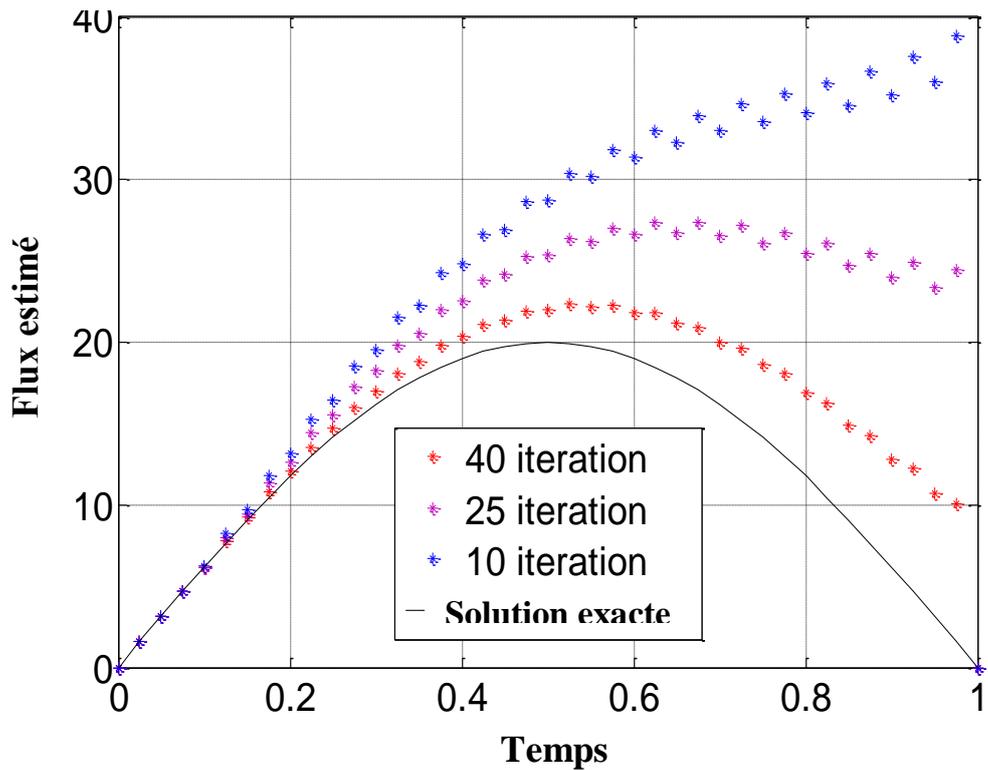


Figure III-9: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour  $\sigma=0.008$ .

2- Configuration temporelle:

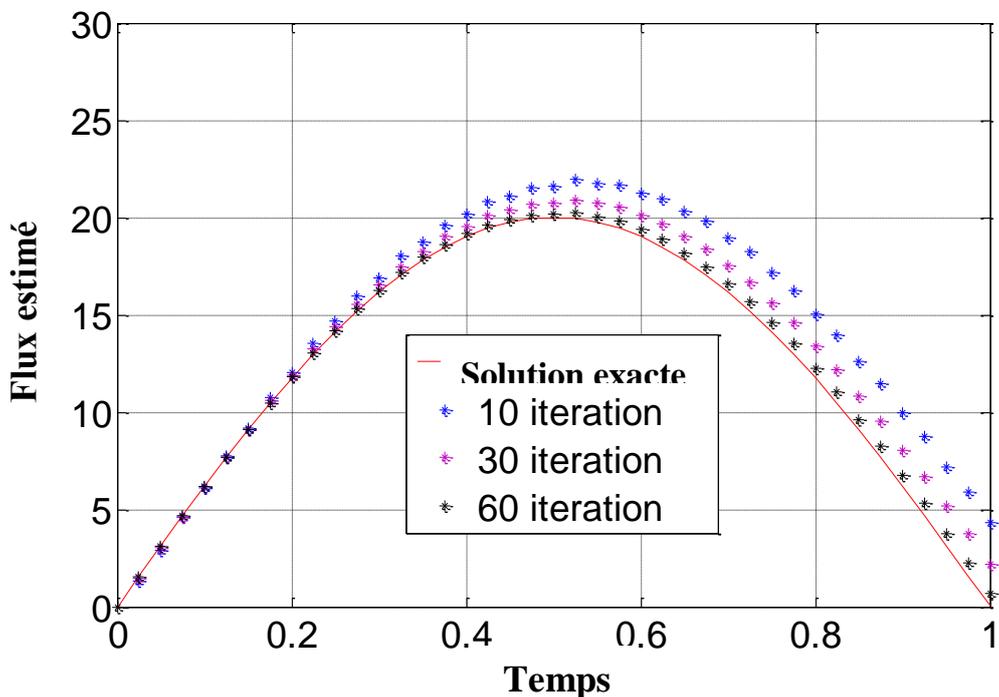


Figure III-10: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour  $\sigma=0.0008$ .

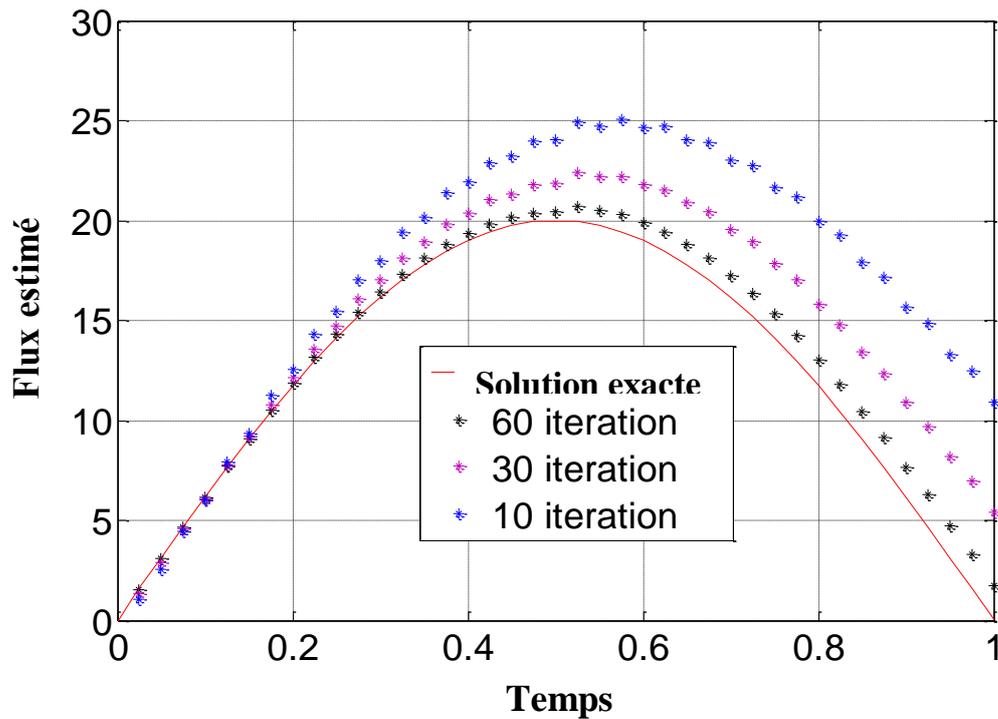


Figure III-11: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour  $\sigma = 0.002$

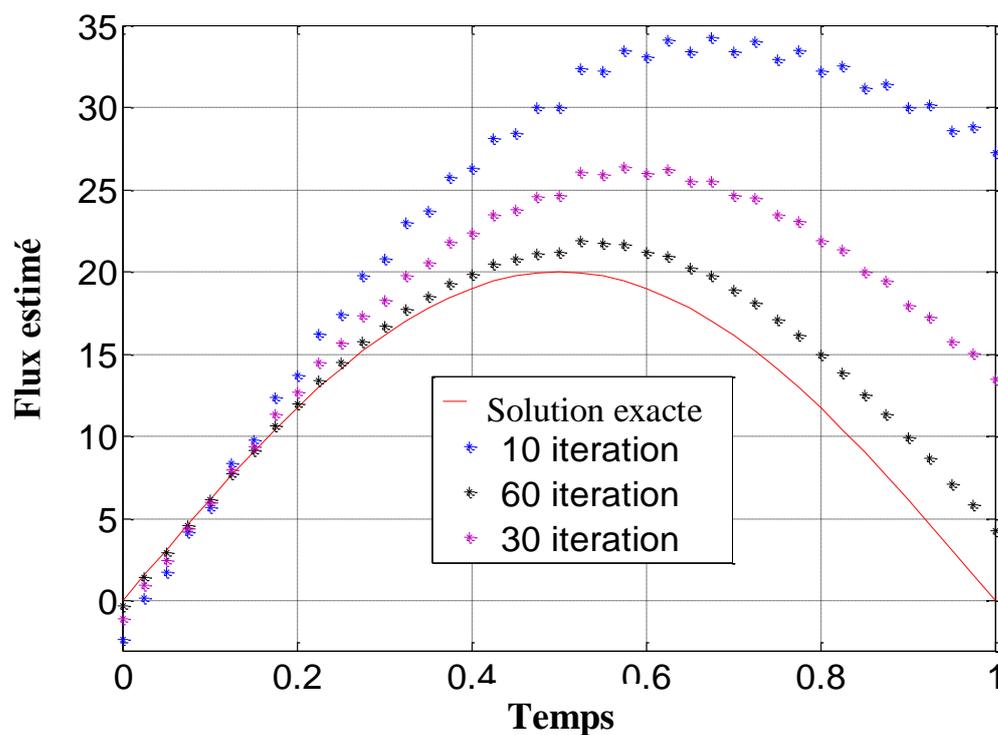


Figure III-12: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour  $\sigma = 0.005$

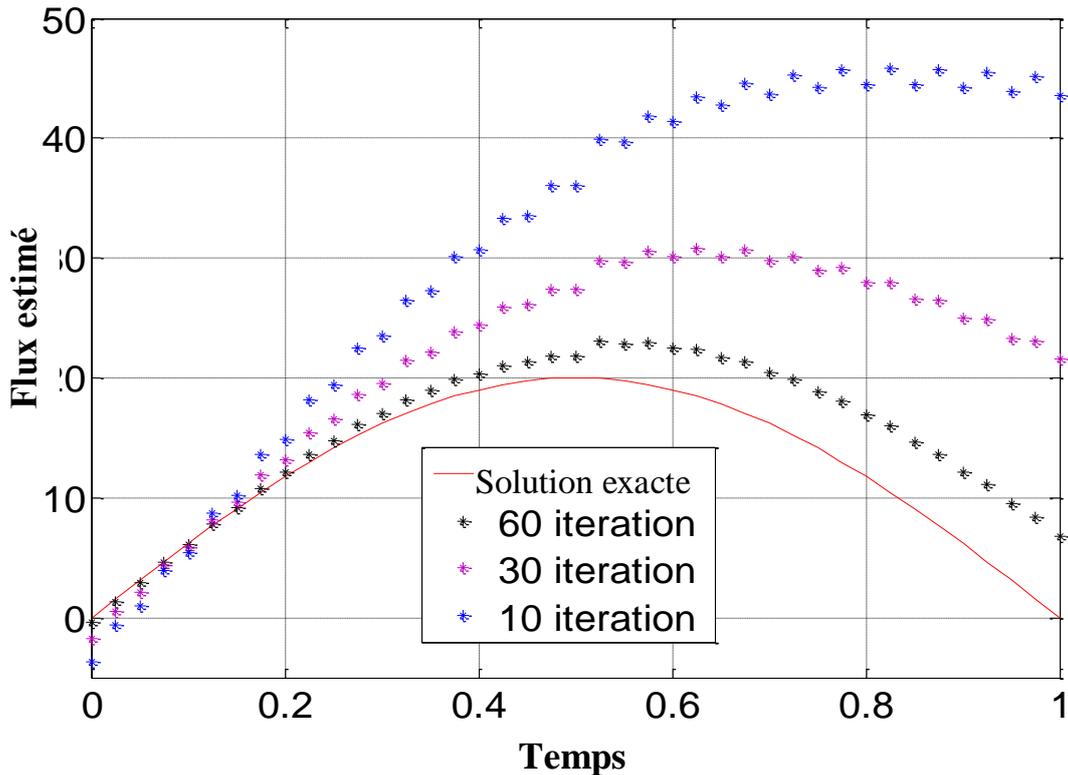


Figure III-13: Variation du flux estimé en fonction de nombre d'itérations pour  $\sigma=0.008$ .

### III.6. Conclusion

Dans les figures ci-dessus, nous commençons par discuter les résultats quant aux nombres d'itérations comme premier facteur de convergence. Pour les deux configurations, on a obtenu des résultats plus raffinés et qui s'approchent du cas réel en augmentant le nombre d'itérations.

Le second facteur est le standard déviation ou bien l'écart type. Plus il est petit, meilleur est le résultat. Ce qu'on peut voir clairement quand on l'augmente, et on voit bien que le résultat dévie considérablement du résultat exact. On essaie de limiter la valeur de la standard déviation dans les équations du problème sensitif afin d'avoir de bons résultats.

Ainsi, plus l'écart type est petit, plus le résultat s'approche et converge vers le flux exact. Il en est de même pour le nombre d'itérations, qui donne une meilleure approximation en augmentant le nombre de boucles.

### Chapitre III : Optimisation de paramètres par la méthode du gradient conjugué et validation du modèle proposé

---

Nous avons ainsi proposé de développer le modèle d'équation avec un code Matlab, en introduisant un système sensitif, et un problème adjoint au système d'équations du problème direct. Ce dernier, démarre d'un flux reçu comme input et récupère un champ de température comme output. Aussi, le système d'équations est résolu itérativement.

Les résultats sont hypothéqués par l'écart type et le nombre d'itérations à utiliser. Dans notre problème une bonne convergence exige et dicte que le nombre d'itération ( $n > 40$  et  $\sigma < 0.008$ ) pour avoir un optimum.

Aussi, Nous avons choisi avec soin la fonction objective, celle-ci est définie comme une forme quadratique. Afin de raffiner et simplifier la résolution du problème, la méthode du gradient conjugué est introduite pour résoudre trois problèmes en une itération sous la même boucle, utilisant l'algorithme de Thomas afin d'optimiser la quantité d'énergie ainsi absorbée, traduite comme un flux de chaleur thermique.

# **CHAPITRE IV : Modélisation et simulation de la chambre de combustion**



Laissons-nous élaborer l'équation de l'enthalpie en fonction de la température.

Pour les réactifs, nous avons :

$$\mathbf{H}_R = \Delta h_f^0(\text{CH}_4) + 2\Delta h_f^0(\text{O}_2) + 7,52\Delta h_f^0(\text{N}_2) = \Delta h_f^0(\text{CH}_4)$$

Avec  $\Delta h_f^0(\text{CH}_4) = -74,92 \text{ kJ/mol}$  [12]

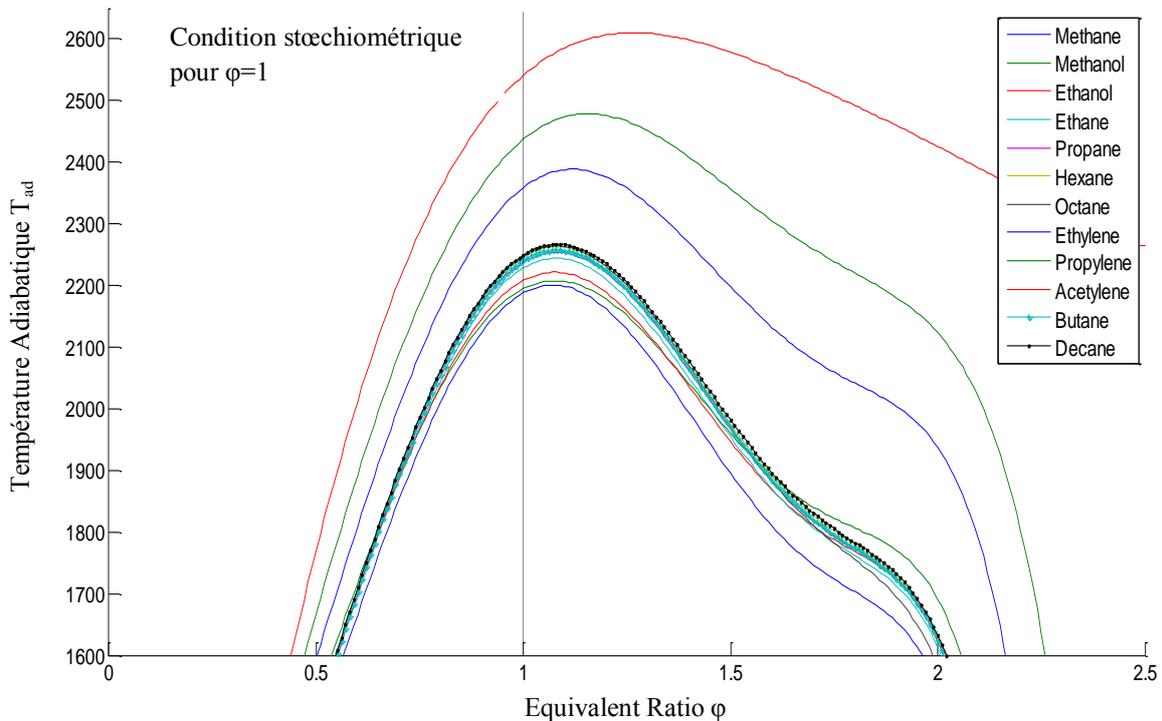
Et pour les produits

$$\mathbf{H}_P^T = \mathbf{H}_{\text{CO}_2}^T + 2\mathbf{H}_{\text{H}_2\text{O}}^T + 7,52\mathbf{H}_{\text{N}_2}^T \quad \text{avec}$$

$$\mathbf{H}_{\text{CO}_2}^T = \Delta h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{T_0}^T c_p dT$$

Ainsi, pour trouver la température de la flamme adiabatique, nous commençons par égaliser l'enthalpie de réactifs avec celui des produits  $\mathbf{H}_R = \mathbf{H}_P$ , et on commence le calcul par une valeur initiale de température. On continue le travail jusqu'à ce qu'on retrouve un intervalle où  $H_R$  est comprise dedans [48, 63].

Le travail de calcul est basé sur un programme itératif, ce dernier répète les mêmes instructions jusqu'à insertion de l'enthalpie des réactifs entre deux valeurs, puis on fait une interpolation entre deux ou trois points afin d'approcher à bien la température de la flamme adiabatique [29, 64, 65]



**Figure IV-1:** Température de la flamme adiabatique en fonction de l'équivalent ratio pour différents hydrocarbures (carburants)

Initions le calcul pour 1400K

✚ Valeur initiale:  $T=1400\text{K}$

$$h_f^{1400}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 55,918 \\ = -337,604 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1400}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 43,454 \\ = -198,373 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1400}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 34,949 = 34,949 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$H_p^{1400} = H_{\text{CO}_2}^T + 2H_{\text{H}_2\text{O}}^T + 7,52H_{\text{N}_2}^T \Rightarrow$$

$$H_p^{1400} = -337,604 + 2 * -198,373 + 7,52 * 34,949$$

$$\boxed{H_p^{1400} = -471,5335 < H_R^0}$$

Pour cette valeur, on doit monter en plus la température jusqu'à obtention d'une place où l'enthalpie des réactifs sera comprise dedans, aussi nous passons pour une température supérieure à 1400

✚  $T=1500\text{K}$

$$h_f^{1500}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{1500} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 61,732 = -331,79 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1500}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{1500} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 48,108 = -193,719 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1500}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{1500} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 38,419 = 38,419 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$H_p^{1500} = H_{\text{CO}_2}^T + 2H_{\text{H}_2\text{O}}^T + 7,52H_{\text{N}_2}^T \Rightarrow$$

$$H_p^{1500} = -331,79 + 2 * -193,719 + 7,52 * 38,419 = -236,59812$$

$$\boxed{H_p^{1500} = -429,25912 < H_R^0}$$

✚  $T=1800\text{K}$

$$h_f^{1800}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{1800} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 79,462 = -314,06 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1800}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{1800} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 62,707 = -179,12 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1800}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{1800} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 49 = 49 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$H_p^{1800} = H_{\text{CO}_2}^T + 2H_{\text{H}_2\text{O}}^T + 7,52H_{\text{N}_2}^T \Rightarrow$$

$$H_p^{1800} = -314,06 + 2 * -179,12 + 7,52 * 49 = -124,7$$

$$\boxed{H_p^{1800} = -303,82 < H_R^0}$$

✚ T=1900 K

$$h_f^{1900}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{1900} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 85,451 = -308,071 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1900}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{1900} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 67,625 = -174,202 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1900}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{1900} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 52,57 = 52,57 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$\boxed{H_p^{1900} = -261,9006 < H_R^0}$$

✚ T=2000 K

$$h_f^{2000}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{2000} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 91,474 = -302,048 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2000}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{2000} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 72,711 = -169,116 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2000}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{2000} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 56,161 = 56,161 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$\boxed{H_p^{2000} = -217,94928 < H_R^0}$$

✚ T=2100 K

$$h_f^{2100}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{2100} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 97,526 = -295,996 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2100}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{2100} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 77,851 = -163,976 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2100}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{2100} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 59,765 = 59,765 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$\boxed{H_p^{2100} = -174,5152 < H_R^0}$$

✚ T=2200 K

$$h_f^{2200}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{2200} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 103,604 = -289,918 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2200}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{2200} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 83,053 = -158,774 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2200}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{2200} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 63,39 = 63,39 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$\boxed{H_p^{2200} = -130,7732 < H_R^0}$$

$T=2300 \text{ K}$

$$h_f^{2300}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{2300} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 109,786 = -283,736 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2300}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{2300} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 88,319 = -153,508 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2300}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{2300} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 67,023 = 67,023 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$\boxed{H_p^{2300} = -86,739 < H_R^0}$$

$T=2400 \text{ K}$

$$h_f^{2400}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{2400} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 115,821 = -277,701 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2400}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{2400} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 93,634 = -148,193 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{2400}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{2400} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 70,692 = 70,692 \text{ kJ/mol}$$

Ainsi, nous aurons :

$$\boxed{H_p^{2400} = -42,48316 > H_R^0}$$

Pour les calculs de dessus, on a borné la valeur de l'enthalpie entre deux valeurs juste supérieure et juste inférieure, de sorte qu'on puisse faire l'interpolation entre deux, voire trois points afin de retrouver la valeur de la température de la flamme adiabatique du méthane.

$$H_p^{2200} < H_p^{2300} < H_R^0 < H_p^{2400}$$

L'intérêt est d'exprimer l'enthalpie comme une fonction de la température et vice-versa

$$H(T) = aT^2 + bT + c$$

Pour cela, on assume un polynôme d'ordre trois afin d'interpréter la variation de la température du méthane dans les conditions stœchiométriques, ainsi, on aura un système d'équations à résoudre sous la forme :

$$\begin{cases} 2200^2 a + 2200 b + c = -130,7732 \\ 2300^2 a + 2300 b + c = -86,739 \\ 2400^2 a + 2400 b + c = -42,48316 \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} 2200^2 & 2200 & 1 \\ 2300^2 & 2300 & 1 \\ 2400^2 & 2400 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -130,7732 \\ -86,739 \\ -42,48316 \end{pmatrix}$$

Qui constitue un système matriciel à résoudre

$$a = 1,1082 \cdot 10^{-5}, b = 0,3905 \text{ and } c = -1043,5$$

L'équation sera écrite ainsi :

$$\boxed{H(T) = 1,1082 \cdot 10^{-5} T^2 + 0,3905 T - 1043,5}$$

Ou bien,

$$T(H) = aH^2 + bH + c$$

Aussi, le système peut être inversé. Afin de trouver les coefficients de la matrice des enthalpies, on considère le système

$$\begin{cases} (-130,7732^2) a + (-130,7732) b + c = 2200 \\ (-86,739^2) a + (-86,739) b + c = 2300 \\ (-42,48316^2) a + (-42,48316) b + c = 2400 \end{cases}$$

Aussi,

$$\begin{pmatrix} -130,7732^2 & -130,7732 & 1 \\ -86,739^2 & -86,739 & 1 \\ -42,48316^2 & -42,48316 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = (2200 \quad 2300 \quad 2400)$$

Après, résolution, on retrouve les coefficients a,b etc

$$a = 4,1617 \cdot 10^{-5}, b = 2,2619, c = 2496,5$$

L'équation finale est écrite ainsi:

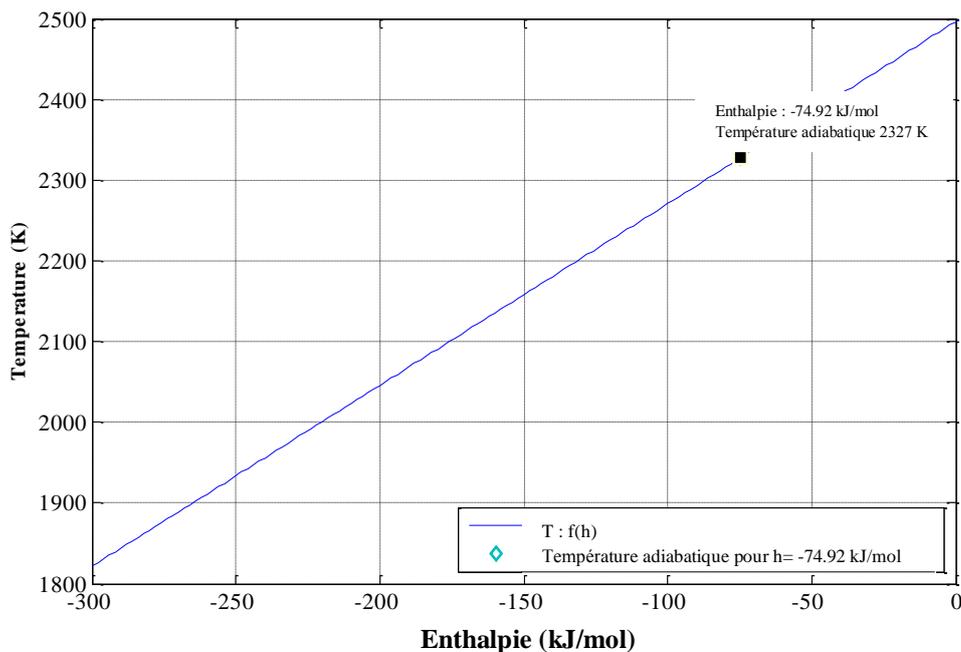
$$T(H) = 4,1617 \cdot 10^{-5} H^2 + 2,2619 H + 2496,5$$

Pour l'enthalpie donnée précédemment, la valeur de la température d'après le modèle construit donne :

$$H_R = H_p^T = \Delta h_f^0(\text{CH}_4) = -74,92 \text{ kJ/mol aussi:}$$

$$T = 2329,4\text{K}$$

Pour cela, on a dressé le graphe de dessous, qui symbolise cette variation presque linéaire autour des données prises dans le modèle précédent :

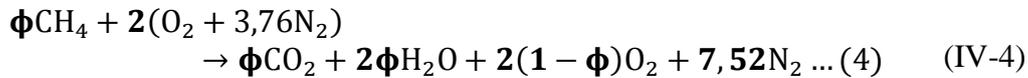


**Figure IV-2:** Distribution de la température en fonction de l'enthalpie pour un équivalent ratio  $\phi = 1$

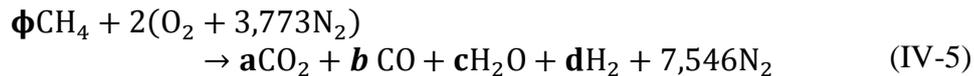
Pour ceci, nous avons développé un code de calcul par MATLAB qui calcule ces variations en fonction de l'équivalent ratio pris en considération dans la mixture de

carburant faible (fuel lean mixture en Anglais) et dans la mixture de carburant riche (fuel rich mixture en Anglais).

Dans la disposition de mixture faible de carburant, on assume que tous les atomes du carbone ont été épuisés afin de former le dioxyde de carbone, et les atomes de l'hydrogène sont aussi consommés pour former l'eau, avec l'excès d'oxygène présent comme O<sub>2</sub>, la réaction peut être écrite :



Dans le cas de la mixture riche en carburant, nous avons un épuisement de l'oxygène et présence de monoxyde de carbone ainsi que du gaz d'hydrogène comme espèces majoritaires, la réaction prend ainsi la forme



Pour les températures de la flamme adiabatique de la mixture pauvre en carburant (lean mixture), sous les conditions standard de pression et température, leurs valeurs précises ont été calculées par l'aide de la méthode des équilibres chimiques. Les résultats sont dressés dans la figure III-2, température en fonction de l'équivalent ratio.

Une tentative de programmation, basée sur les résultats obtenus, est élaborée, afin de prédire la température de la flamme adiabatique à n'importe quelle valeur de l'équivalent ratio  $\phi$ , c'est-à-dire, par la méthode des moindres carrés.

On Commence par la première équation, aussi :

$$H_R = \phi\Delta h_f^0(\text{CH}_4) + 2\Delta h_f^0(\text{O}_2) + 7,52\Delta h_f^0(\text{N}_2) = \phi\Delta h_f^0(\text{CH}_4)$$

$$\text{Avec } \Delta h_f^0(\text{CH}_4) = -74,92 \text{ kJ/mol} \quad [12]$$

$$\Rightarrow \boxed{H_R = -\phi 74,92 \text{ kJ/mol}}$$

Et pour les produits:

$$H_p^T = \phi H_{\text{CO}_2}^T + 2\phi H_{\text{H}_2\text{O}}^T + 2(1 - \phi)H_{\text{O}_2}^T + 7,52H_{\text{N}_2}^T \text{ avec}$$

$$H_{\text{CO}_2}^T = \Delta h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{T_0}^T C_p dT$$

🚦 Valeur initiale: T=1400K

$$h_f^{1400}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 55,918 = -337,604 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1400}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 43,454 = -198,373 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1400}(\text{O}_2) = h_f^0(\text{O}_2) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{O}_2) = 0 + 36,975 = 36,975 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1400}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 34,949 = 34,949 \text{ kJ/mol}$$

Puis , nous aurons ainsi:

$$H_p^{1400} = \phi * (-337,604) + 2\phi * (-198,373) + 2(1 - \phi) * 36,975 + 7,52 * 34,949 \Rightarrow$$

$$H_p^{1400} = -337,604\phi - 396,746\phi - 73,75\phi + 73,75 + 262,8165$$

$$H_p^{1400} = -337,604\phi - 396,746\phi - 73,75\phi + 73,75 + 336,5665$$

$$= -805,1\phi + 336,5665$$

$$H_p^{1400} = -805,1\phi + 336,5665 < H_R^0 \dots \dots \dots$$

Aussi, comme une récapitulation, pour la mixture de faible carburant, la variation de la température en fonction de l'équivalent ratio est donnée dans le tableau de dessous.

**Table IV-1** : Variation de la température de la flamme adiabatique en fonction de l'équivalent ratio  $\phi$

| Nombre de points | Equivalent Ratio | Température Adiabatique |
|------------------|------------------|-------------------------|
| 1                | 0.1              | <b>576,1977</b>         |
| 2                | 0.2              | <b>831,95808</b>        |
| 3                | 0.3              | <b>1064,635</b>         |
| 4                | 0.4              | <b>1279,879824</b>      |
| 5                | 0.5              | <b>1492,781186</b>      |
| 6                | 0.6              | <b>1660,6523264</b>     |
| 7                | 0.7              | <b>1857,796462</b>      |
| 8                | 0.8              | <b>2015,3340768</b>     |
| 9                | 0.9              | <b>2174,823048</b>      |
| 10               | 0.99             | <b>2311,20136184</b>    |

L'interpolation polynomiale consiste à approcher deux ou plusieurs séries de mesures par un polynôme, les points optimaux du polynôme sont ceux pour lesquels ils minimisent la variance de l'erreur d'interpolation, connue sous le nom des moindres carrés.

Après interpolation, le polynôme peut être écrit sous la forme

$$T(\phi) = -9,904 \cdot 10^6 \cdot \phi^9 + 4,86 \cdot 10^7 \cdot \phi^8 - 1,0202 \cdot 10^8 \cdot \phi^7 +$$

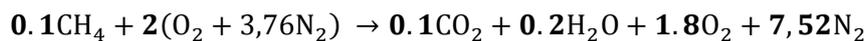
$$1,197 \cdot 10^8 \cdot \phi^6 - 8,6041 \cdot 10^7 \cdot \phi^5 +$$

$$3,9034 \cdot 10^7 \cdot \phi^4 - 1,1087 \cdot 10^7 \cdot \phi^3 + 1,8809 \cdot 10^6 \cdot \phi^2$$

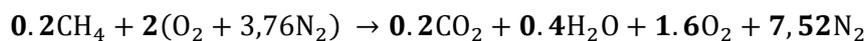
$$-1,6806 \cdot 10^5 \cdot \phi^1 + 6506,9 \dots \dots \dots (6) \quad (IV-6)$$

Ici ci-dessous, nous donnons les fractions des espèces après combustion de  $H_2O$  et  $CO_2$  sous la variation de l'équivalent ratio  $\phi$

Pour  $\phi = 0.1$



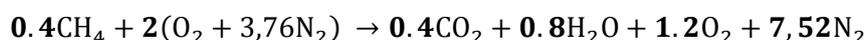
Pour  $\phi = 0.2$



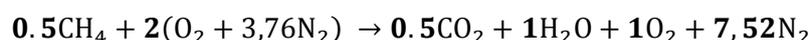
Pour  $\phi = 0.3$



Pour  $\phi = 0.4$



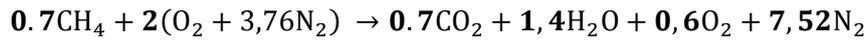
Pour  $\phi = 0.5$



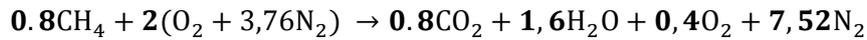
Pour  $\phi = 0.6$



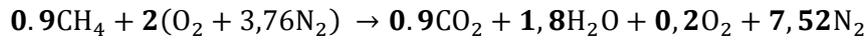
Pour  $\phi = 0.7$



Pour  $\phi = 0.8$



Pour  $\phi = 0.9$



Pour  $\phi = 0.99$



Pour un équivalent ratio proche de 1, on peut voir clairement que les températures atteignent des valeurs maximales, physiquement parlant, on essaie de limiter les températures à 1600k ou 1700K pour des raisons métallurgiques.

Aussi, et pour palier à ce problème, nous avons le choix entre un dosage qui est fait avec une masse d'air égale au double de la valeur théorique au bien par réduction de la valeur de l'équivalent ratio.

L'air et le méthane sont pris à l'état de référence au début de la combustion,

Nous dressons ci-dessous la température en fonction de l'équivalent ratio pour des valeurs inférieures à 1, en comparant avec les travaux déjà fait. [66-67]

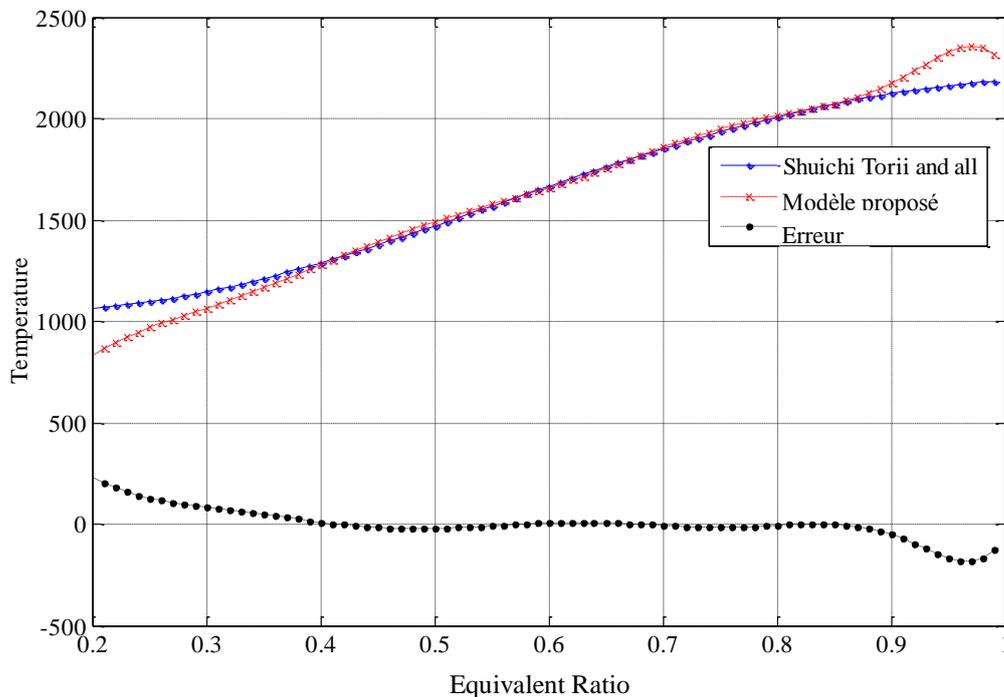
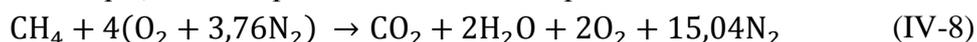


Figure IV-3: Méthane en fonction de l'équivalent ratio inférieur à 1

On peut voir après un équivalent ratio  $\phi > 0.4$  l'erreur est presque égale à zéro.

Nous recommandons de travailler avec une masse d'air égale au double de la valeur stœchiométrique, aussi l'équation de combustion prend la forme



✚ Pour : T=1400K

$$h_f^{1400}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 55,918 = -337,604 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1400}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 43,454 = -198,373 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1400}(\text{O}_2) = h_f^0(\text{O}_2) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{O}_2) = 0 + 36,975 = 36,975 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1400}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{1400} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 34,949 = 34,949 \text{ kJ/mol}$$

Aussi, nous aurons :

$$H_p^{1400} = -134,767 \text{ kJ/mol} < H_R = -74,92 \text{ kJ/mol}$$

✚ Pour : T=1500K

$$h_f^{1500}(\text{CO}_2) = h_f^0(\text{CO}_2) + \int_{298}^{1500} C_p dT(\text{CO}_2) = -393,522 + 61,732 = -331,79 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1500}(\text{H}_2\text{O}) = h_f^0(\text{H}_2\text{O}) + \int_{298}^{1500} C_p dT(\text{H}_2\text{O}) = -241,827 + 48,108 = -193,719 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1500}(\text{O}_2) = h_f^0(\text{O}_2) + \int_{298}^{1500} C_p dT(\text{O}_2) = 0 + 40,62 = 40,62 \text{ kJ/mol}$$

$$h_f^{1500}(\text{N}_2) = h_f^0(\text{N}_2) + \int_{298}^{1500} C_p dT(\text{N}_2) = 0 + 38,419 = 38,419 \text{ kJ/mol}$$

Aussi, nous aurons:

$$H_p^{1500} = -60,16624 \text{ kJ/mol} > H_R = -74,92 \text{ kJ/mol}$$

$$H_p^{1400} = -134,767 \text{ kJ/mol} < H_R = -74,92 \text{ kJ/mol} < H_p^{1500} \\ = -60,16624 \text{ kJ/mol}$$

ce qui donne à écrire

$$T = a * h + b$$

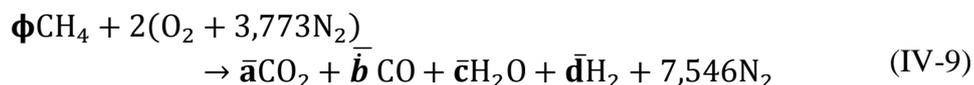
$$\begin{cases} 1400 = a * (-134,767) + b \\ 1500 = a * (-60,16624) + b \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} -134,767 & 1 \\ -60,16624 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1400 \\ 1500 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{cases} a = 1,3405 \\ b = 1580,7 \end{cases}$$

Finalement, l'équation prend la forme:

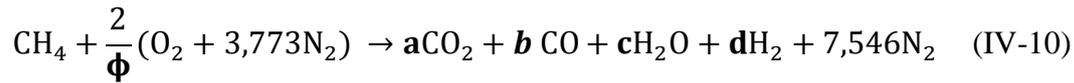
$$T = 1,3405 * h + 1580,7$$

Ainsi pour  $H = -74,92 \text{ kJ/mol}$ ,  $\boxed{T = 1480,27 \text{ K}}$

## II- Equation de combustion pour un équivalent ratio supérieur à un



Sous une autre écriture



Afin de résoudre ce type d'équation de la mixture riche de carburant, c'est-à-dire  $\phi \geq 1$ , l'équilibre entre les espèces  $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}$  et  $\text{H}_2$  est toujours pris en considération pour pouvoir déterminer la composition des gaz brûlés, pour cela, nous ajoutons une autre équation qui les relie tous, souvent appelée équation de l'eau gaz (water gaz reaction), elle est donnée comme suit [60]



À partir du journal américain, où nous avons accès aux valeurs des logarithmes décimales des espèces présentes dans les produits, on pourra calculer aisément la valeur de la constante d'équilibre  $K_p^T$ , aussi, nous aurons :

$$\log_{10} K_p(T) = \log_{10}(K_{p,\text{CO}}) + \log_{10}(K_{p,\text{H}_2\text{O}}) - \log_{10}(K_{p,\text{CO}_2}) - \log_{10}(K_{p,\text{H}_2}) \quad (\text{IV-12})$$

**Table IV- 1** : variation de la constante d'équilibre en fonction de la température

| $K_p$ Pour différentes valeurs de température | Valeur |
|---|--------|
| $K_p^{T=1000}$                                | 0,69   |
| $K_p^{T=1100}$                                | 1,0069 |
| $K_p^{T=1200}$                                | 1,3646 |
| $K_p^{T=1300}$                                | 1,7498 |
| $K_p^{T=1400}$                                | 2,1528 |
| $K_p^{T=1500}$                                | 2,5645 |
| $K_p^{T=1600}$                                | 2,9785 |
| $K_p^{T=1700}$                                | 3,3884 |
| $K_p^{T=1800}$                                | 3,8548 |
| $K_p^{T=1900}$                                | 4,1591 |
| $K_p^{T=2000}$                                | 4,5289 |

La balance du Carbone donne:

$$a + b = 1$$

La balance de l'hydrogène donne:

$$2c + 2d = 4$$

La balance de l'oxygène donne:

$$2a + b + c = \frac{4}{\phi}$$

L'équation d'équilibre présentée par  $K_p^T$  donne :

$$K_p^T = \frac{c \cdot b}{a \cdot d}$$

Ces quatre équations forment une équation de deuxième ordre qu'on pourra résoudre facilement

$$(K_p^T - 1)c^2 - \left[ K_p^T \left( 1 + \frac{4}{\phi} \right) + 2 \left( 1 - \frac{2}{\phi} \right) \right] c - K_p^T \left( 2 - \frac{8}{\phi} \right) = 0 \quad (\text{IV-13})$$

Pour des valeurs bien précises de l'équivalent ratio et de la température, nous essayons de calculer la valeur du coefficient 'c' dans l'équation de dessus, aussi, nous choisissons un intervalle de 1 à 2 avec un pas de 0.1 pour l'équivalent ratio et fixons la température.

Aussi et pour pouvoir résoudre cette équation, nous fixons la constante d'équilibre et nous variions l'équivalent ratio pour tirer les valeurs des fractions molaires des produits.

Après implémentation d'un code de calcul sous MATLAB, lesdites fractions molaires sont récapitulées dans les tableaux de l'Annexe I.

Ci-dessous, on dresse les différentes figures de la variation du nombre de mole en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K

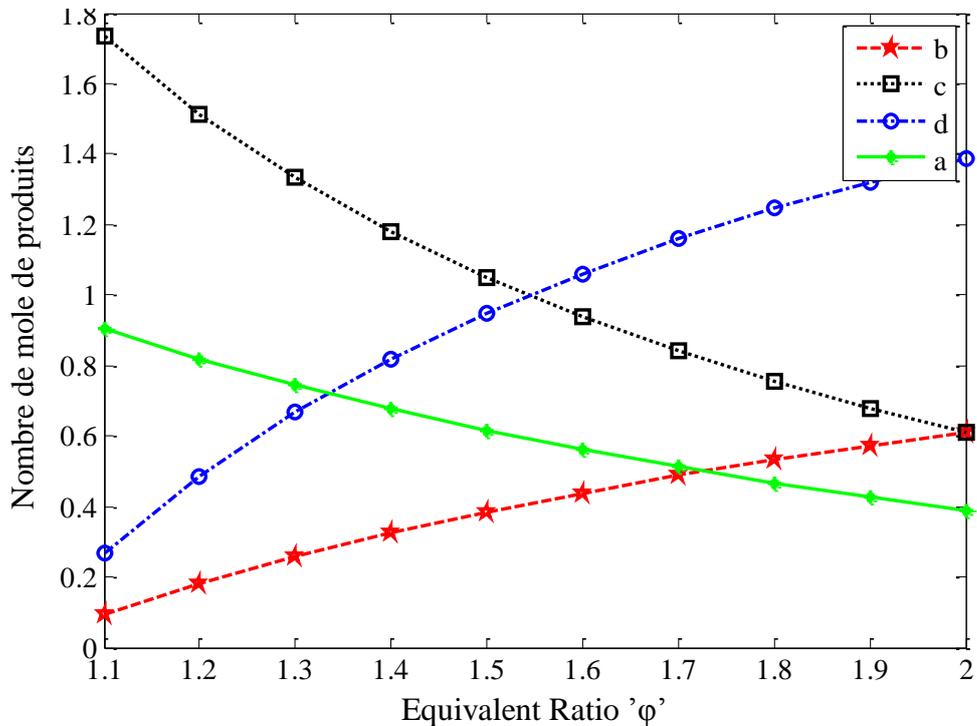


Figure IV-4 : Distribution du nombre de moles de produits à 1000K ou bien à  $K_p=0,69$

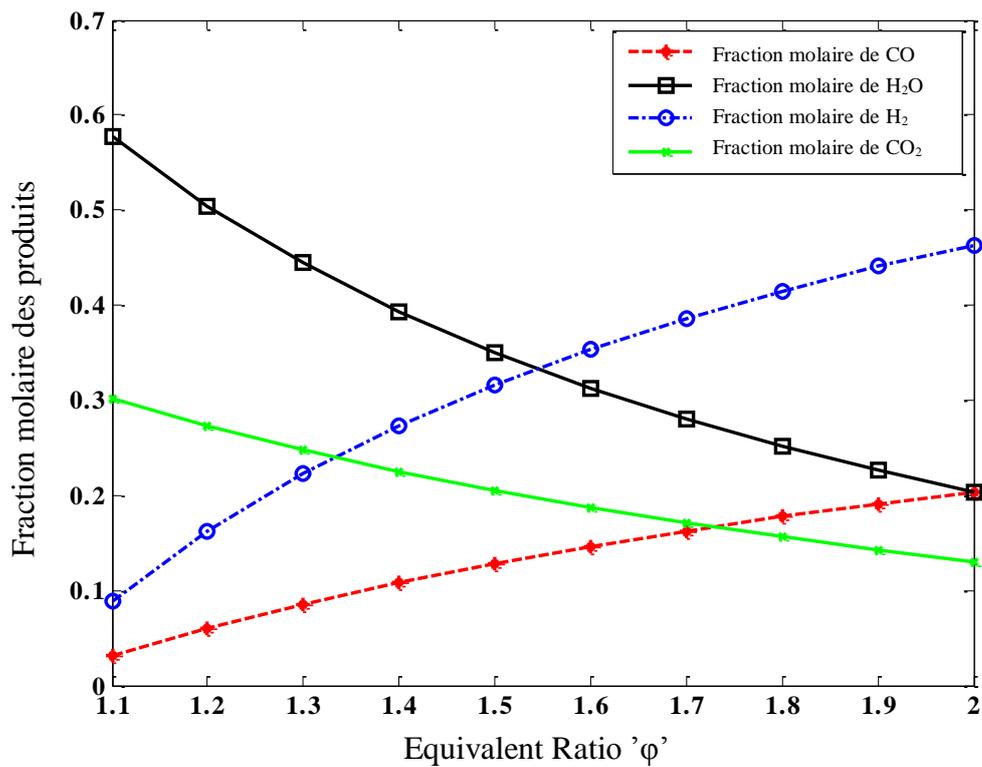


Figure IV-5: Distribution de la fraction molaire de produits sous 1000K ou bien  $K_p=0,69$

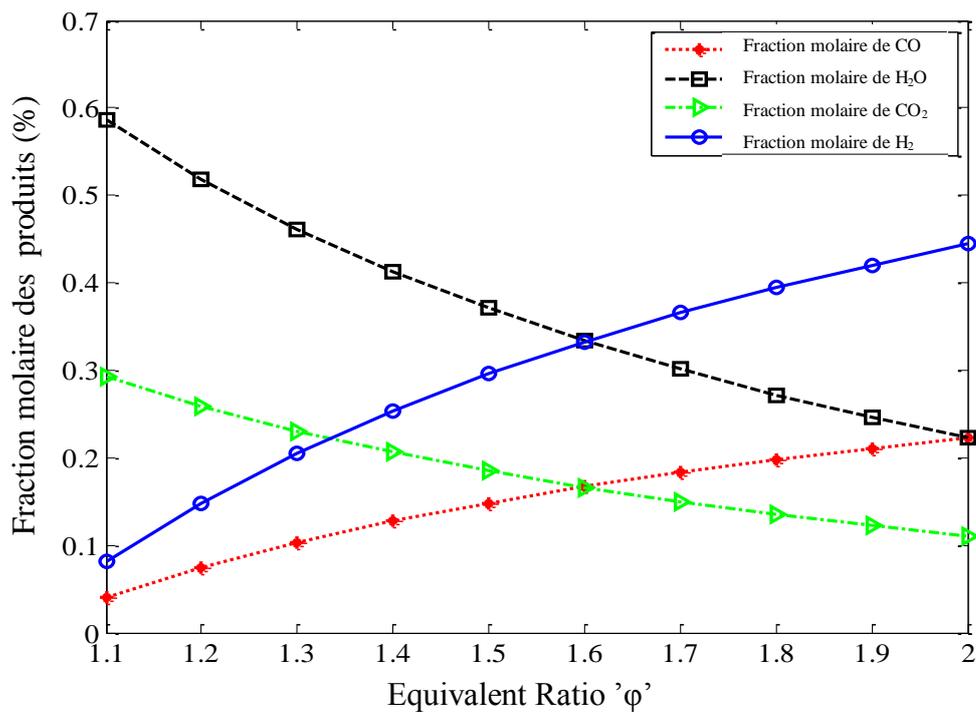
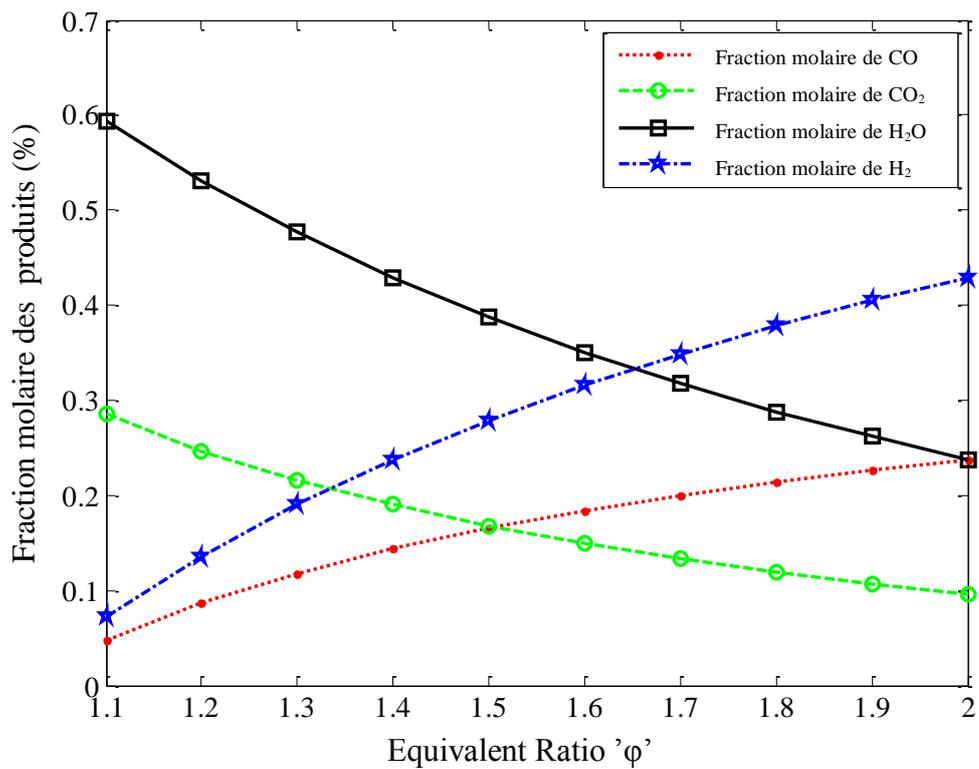
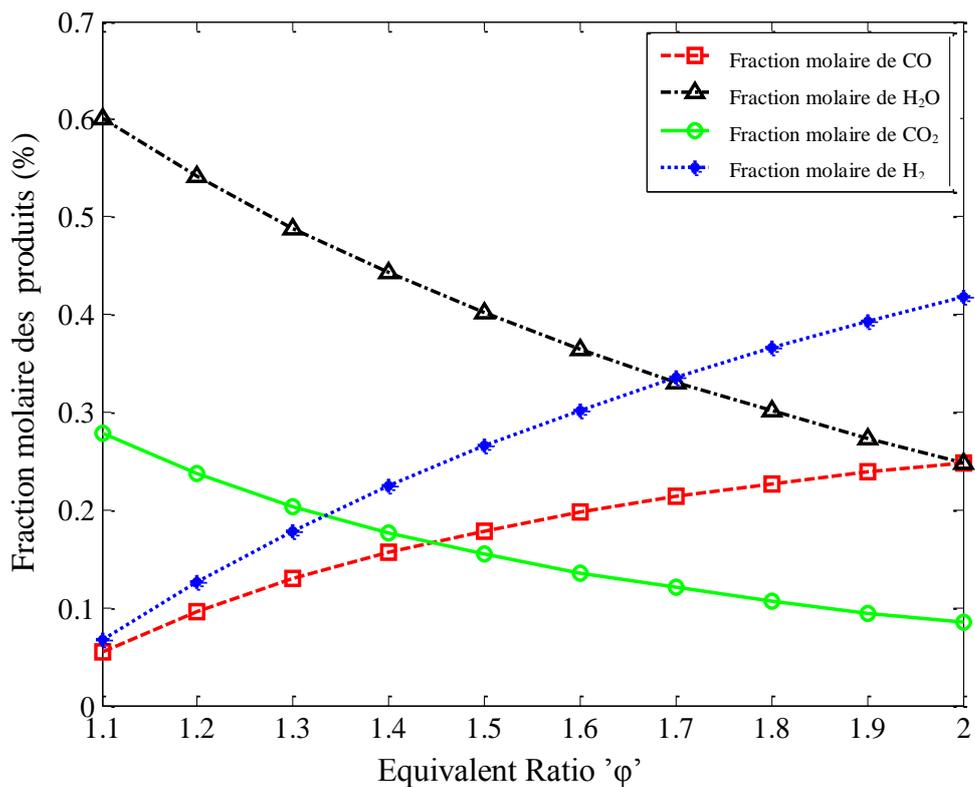


Figure IV-6: Distribution de la fraction molaire des produits sous 1100K ou  $K_p= 1,0069$



**Figure IV-7:** Distribution de la fraction molaire des produits sous 1200K ou  $K_p=1,3646$



**Figure IV-8:** Distribution de la fraction molaire des produits sous 1300K ou  $K_p= 1,7498$

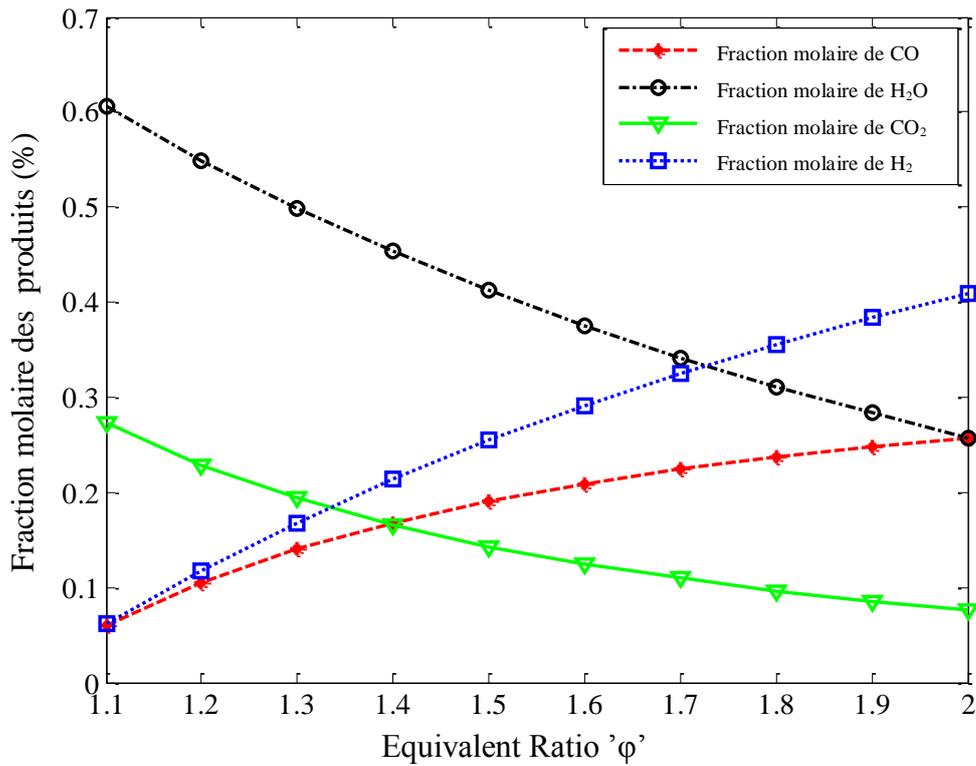


Figure IV-9: Distribution de la fraction molaire des produits sous 1400K ou  $K_p=2,1528$

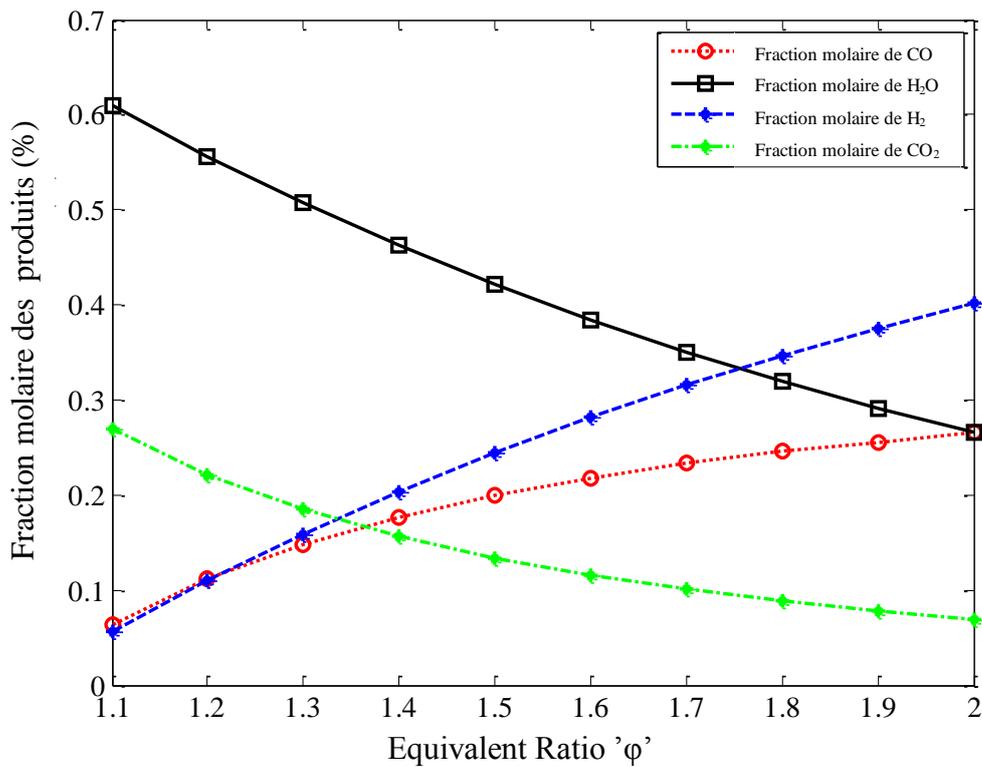


Figure IV-10: Distribution de la fraction molaire des produits à 1500K ou  $K_p= 2,5645$

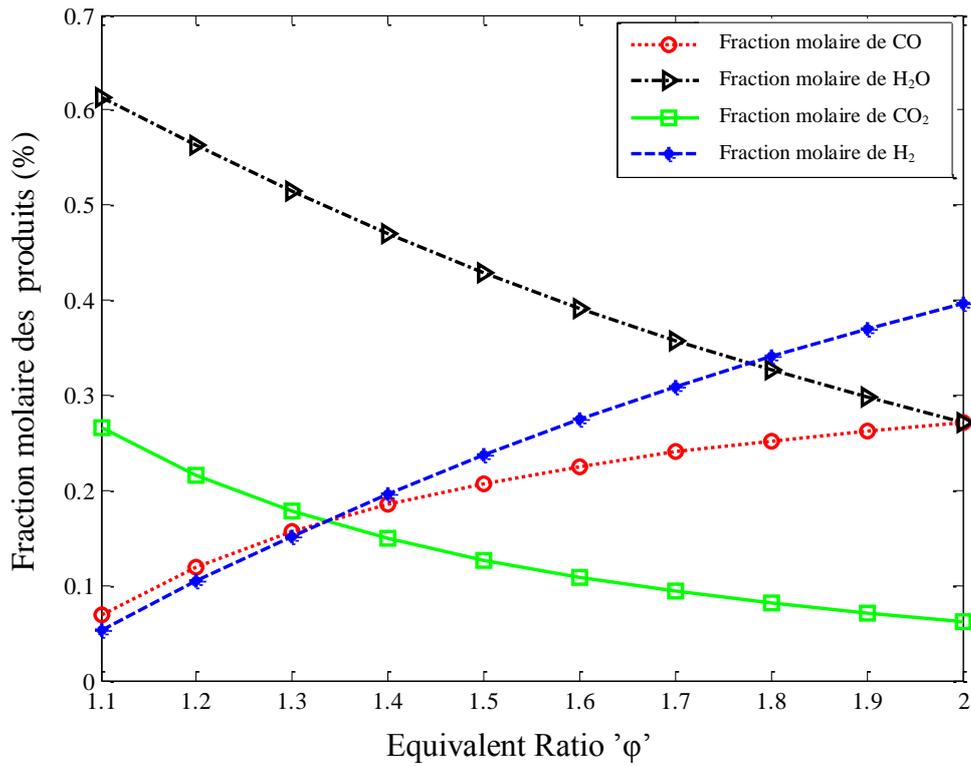


Figure IV-11: Distribution de la fraction molaire sous 1600K ou  $K_p=2,9785$

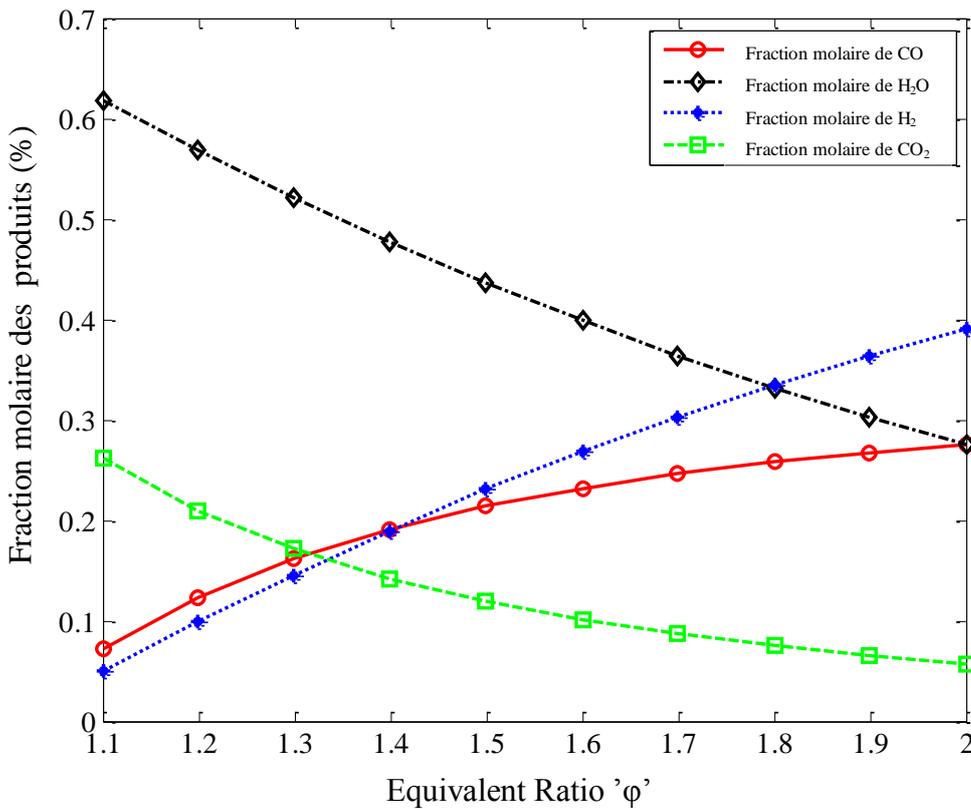
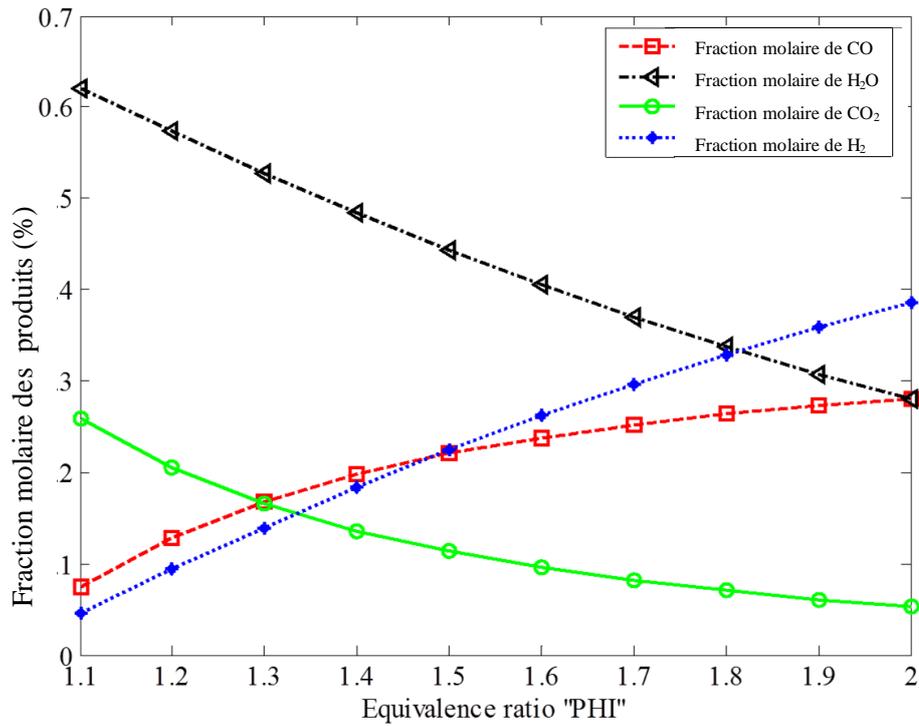
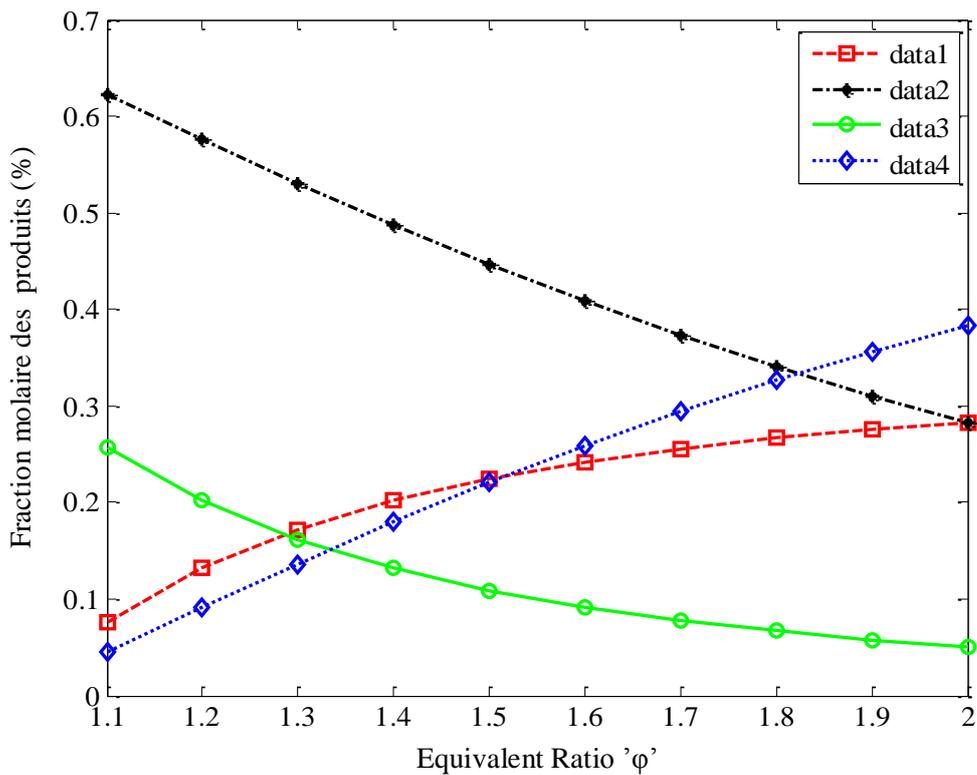


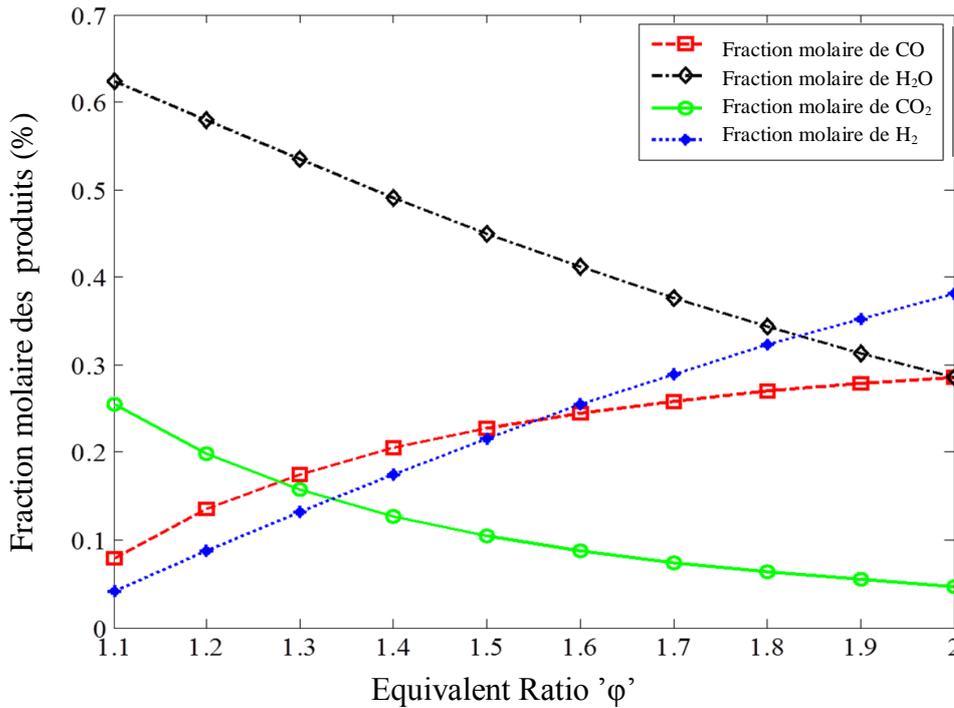
Figure IV-12: Distribution de la fraction molaire sous 1700K ou  $K_p=3,3884$



**Figure IV- 13:** Distribution de la fraction molaire des produits sous 1800K ou  $K_p=3,8548$

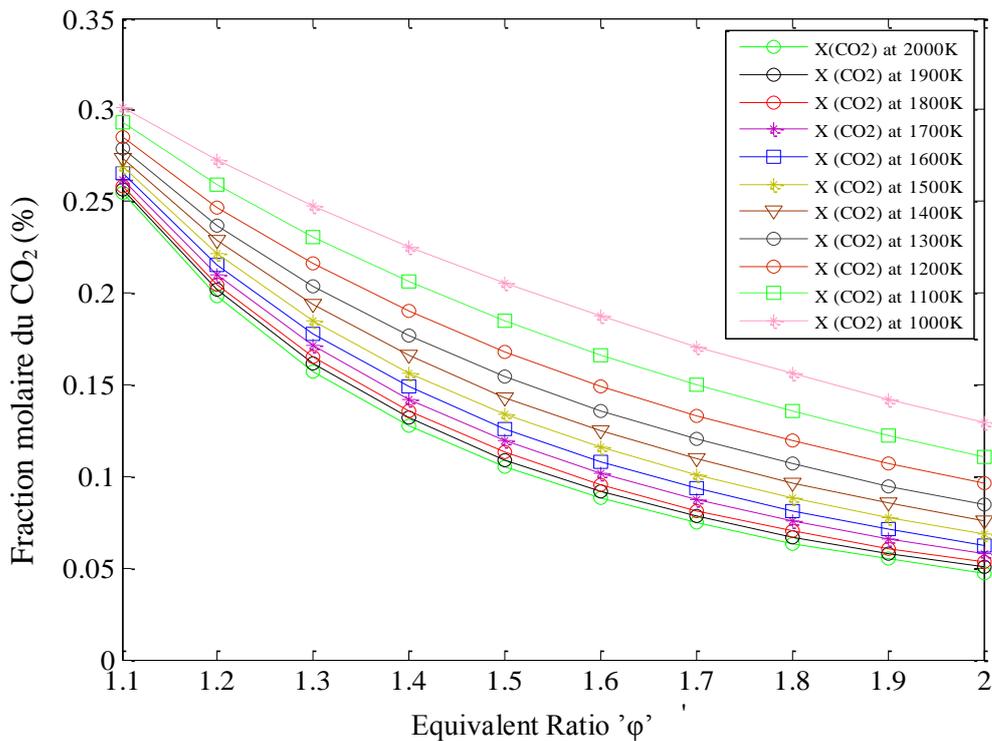


**Figure IV-14:** Distribution de la fraction molaire des produits sous 1900K ou  $K_p=4,1591$



**Figure IV-15:** Distribution de la fraction molaire des produits sous 2000K ou  $K_p = 4,5289$

Aussi, la variation de la fraction molaire de chaque produit est dressée séparément dans les figures suivantes de 1000K jusqu'à 2000K



**Figure IV-16:** Variation de la fraction molaire de CO<sub>2</sub> en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K

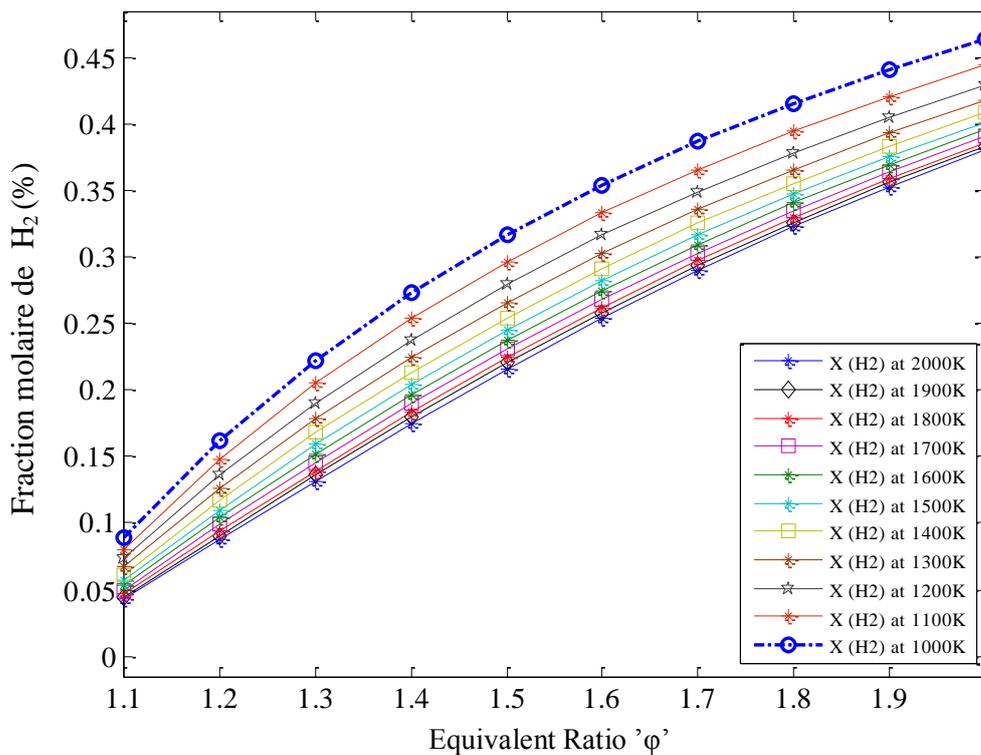


Figure IV-17: Variation de la fraction molaire de H<sub>2</sub> en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K

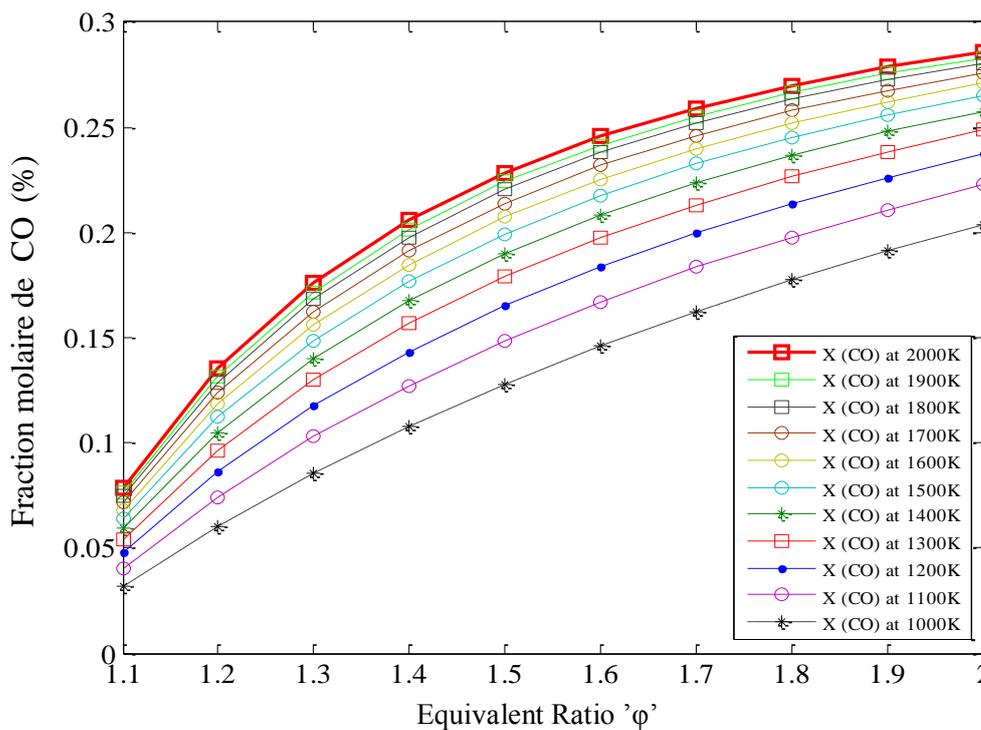
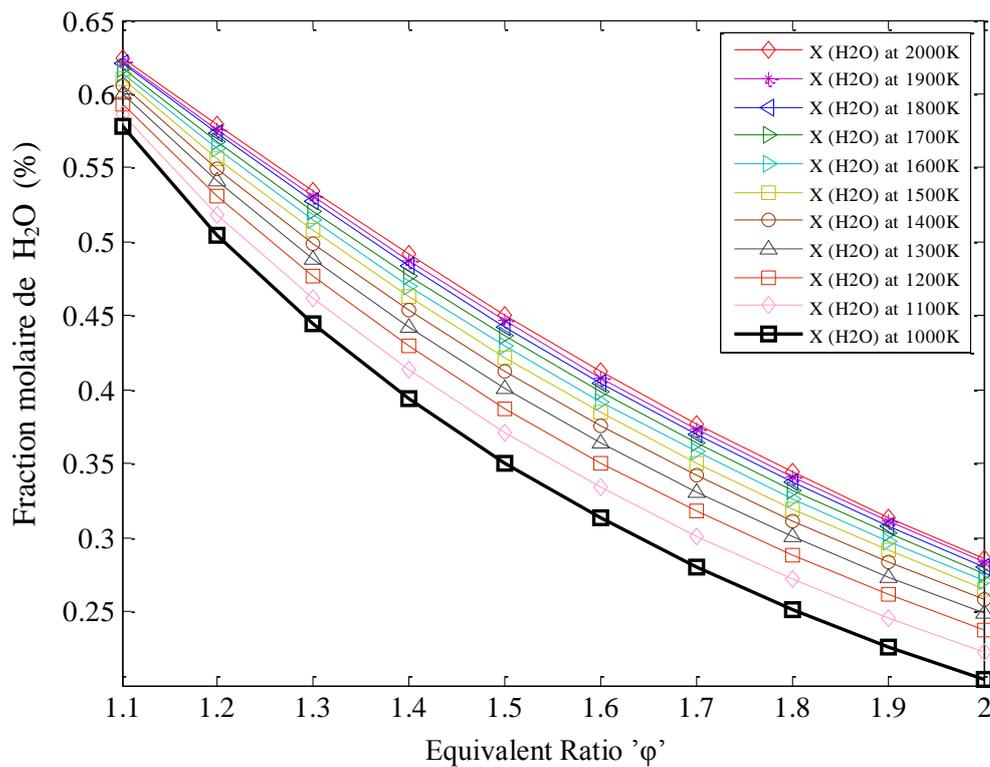


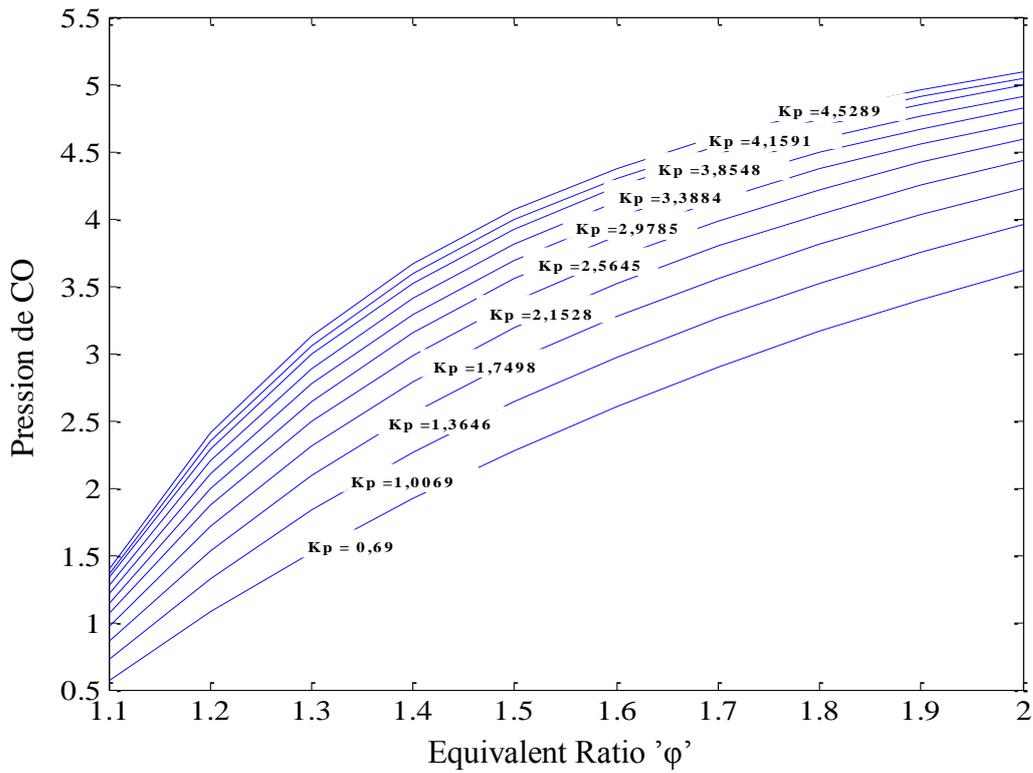
Figure IV-8: Variation de la fraction molaire de CO en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K



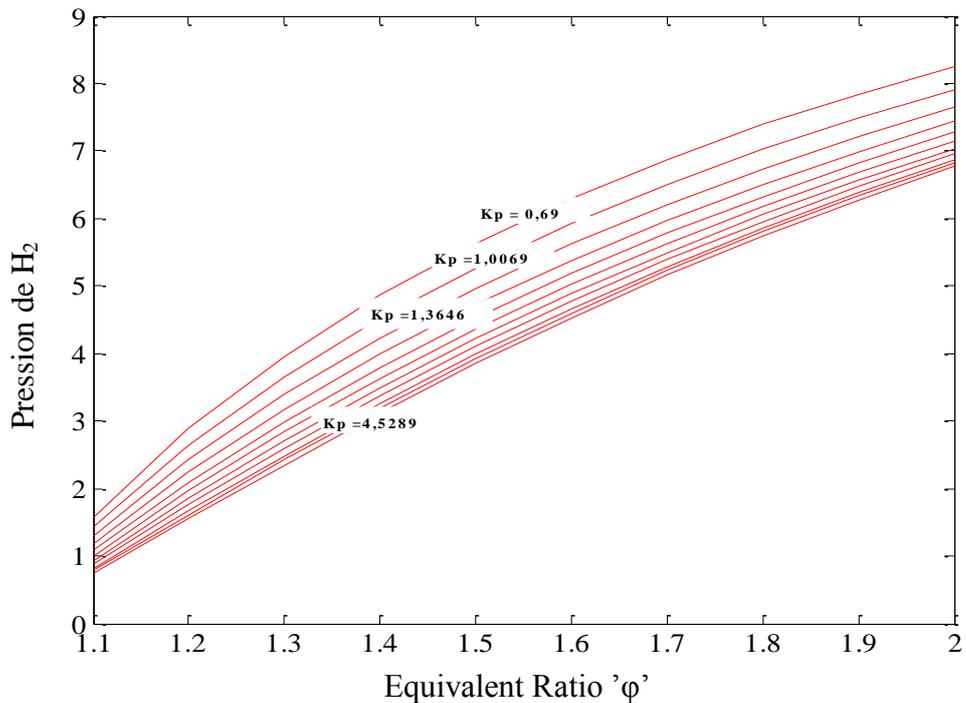
**Figure IV-19:** Variation de la fraction molaire de H<sub>2</sub>O en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K

Pour des grandes valeurs de la température,  $K_p$  augmente aussi avec l'élévation, et nous remarquons plus de CO et de H<sub>2</sub>O qui sont produit contrairement aux molécules de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub> qui sont consommées ou bien diminuées avec la montée de la température ( hautes températures), ainsi, les atomes de l'hydrogène issus du gaz d'hydrogène H<sub>2</sub> partent à la formation de plus des molécules de H<sub>2</sub>O, le même pour les molécules de CO<sub>2</sub> qui libèrent plus d'atomes d'oxygène afin de donner naissance au plus de molécules de CO aux hautes températures.

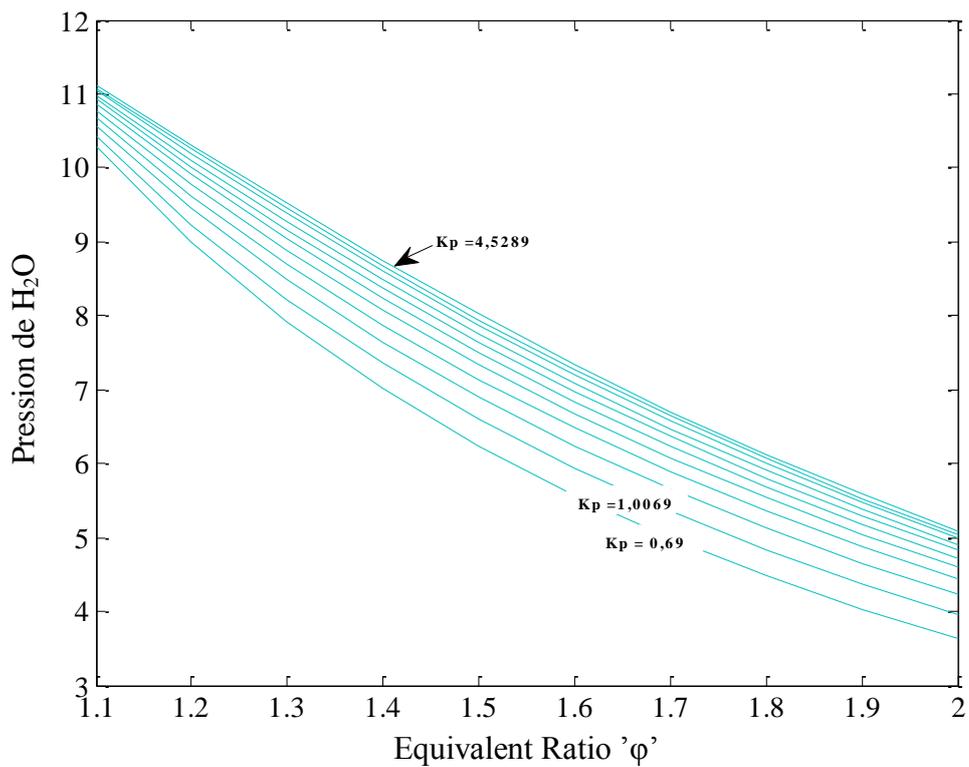
Nous dressons ci-dessous, la variation de la pression partielle des molécules issues de produits de la combustion en fonction de l'équivalent ratio à des différentes températures pour une pression totale à l'intérieur de la chambre de combustion égale à 17.8 bar (Turbine)



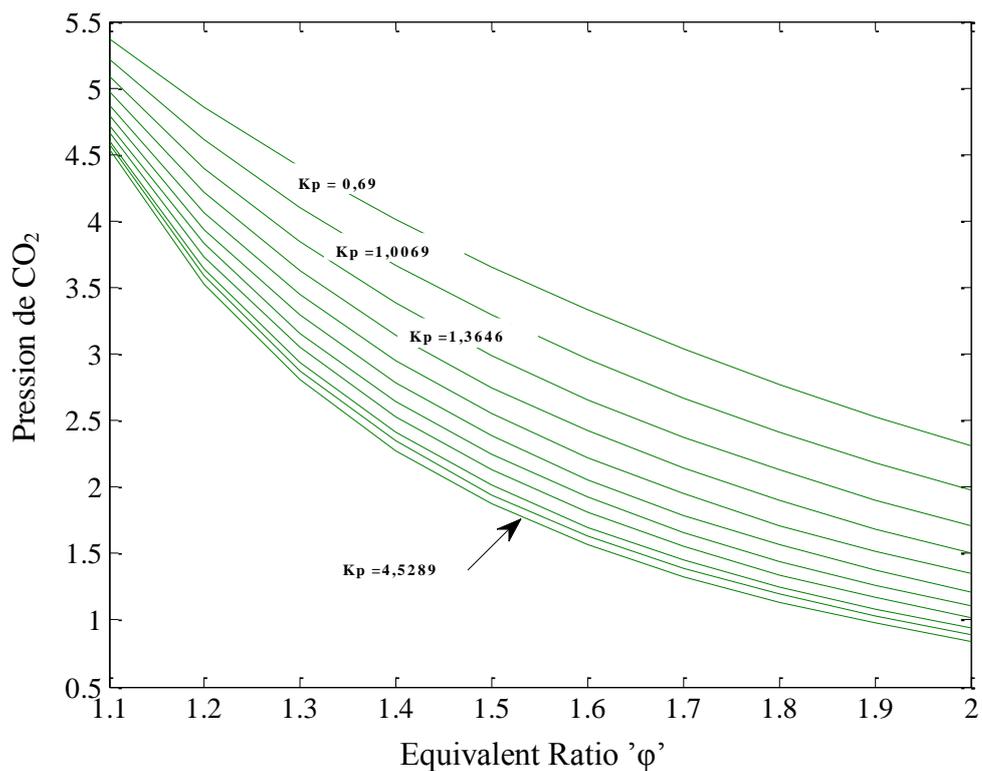
**Figure IV-20:** Variation de la pression de CO en fonction de l'équivalent ratio pour différentes valeur de la constante d'équilibre  $K_p$



**Figure IV-21:** Variation de la pression de  $H_2$  en fonction de l'équivalent ratio pour différentes valeur de la constante d'équilibre  $K_p$



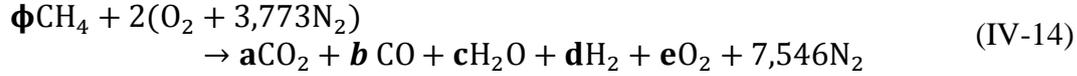
**Figure IV-22:** Variation de la pression de H<sub>2</sub>O en fonction de l'équivalent ratio pour différentes valeur de la constante d'équilibre  $K_p$



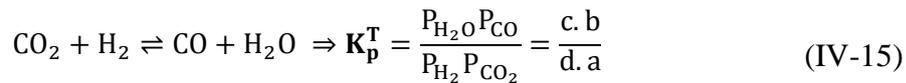
**Figure IV-23:** Variation de la pression de CO<sub>2</sub> en fonction de l'équivalent ratio pour différentes valeur de la constante d'équilibre  $K_p$

### III- Equation de combustion générale pour différentes valeurs de l'équivalent ratio

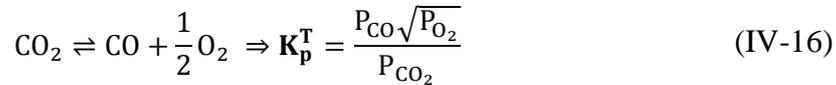
L'écriture en bonne et due forme de l'équation de combustion exige l'écriture de toutes les espèces probablement présentes dans les produits, c'est pourquoi, on va arranger l'équation de combustion en ajoutant des termes qu'on pourra retrouver comme produits finaux au bien naissant au cours de processus de combustion puis disparaître, aussi, l'écriture sera ainsi :



Pour résoudre cette réaction chimique, non seulement l'équation dite water-gas est prise en compte, mais aussi d'éventuelles réactions de dissociation qui peuvent naître au cours du procès de combustion et surtout dans les hautes températures qui sont :



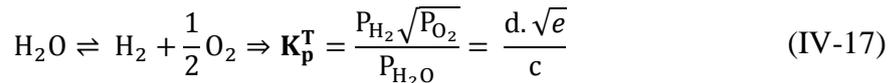
Et



$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{CO}} = \chi_{\text{CO}} * P_{\text{product}} \\ P_{\text{O}_2} = \chi_{\text{O}_2} * P_{\text{product}} \\ P_{\text{CO}_2} = \chi_{\text{CO}_2} * P_{\text{product}} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{CO}} = \frac{b}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}} \\ P_{\text{O}_2} = \frac{e}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}} \\ P_{\text{CO}_2} = \frac{a}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{\frac{b}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}} \sqrt{\frac{e}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}}}}{\frac{a}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}}} = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{P_{\text{product}}}{a+b+c+d+e}} \sqrt{e}$$

$$\Rightarrow K_{p1}^T = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{P_{\text{product}}}{a+b+c+d+e}} \sqrt{e}$$



$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{H}_2} = \chi_{\text{H}_2} * P_{\text{product}} \\ P_{\text{O}_2} = \chi_{\text{O}_2} * P_{\text{product}} \\ P_{\text{H}_2\text{O}} = \chi_{\text{H}_2\text{O}} * P_{\text{product}} \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_{\text{H}_2} = \frac{d}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}} \\ P_{\text{O}_2} = \frac{e}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}} \\ P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{c}{a+b+c+d+e} * P_{\text{product}} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow K_{p2}^T = \frac{d}{c} \sqrt{\frac{P_{\text{product}}}{a + b + c + d + e}} \sqrt{e}$$

À partir de la balance des éléments, nous aurons trois équation à résoudre avec cinq inconnus en total, ce qui oblige à prendre deux autres équations, soit celles de la constante d'équilibre de l'équation water-gas et l'une des équation de dissociation de CO<sub>2</sub> ou de H<sub>2</sub>O, ou bien les deux équations de dissociation directement et résoudre ainsi le problème avec cinq inconnues ("a", "b", "c", "d" et "e" ,nombre de mole des produits)

A partir de la balance des éléments nous avons les trois équations :

La balance de carbone C donne :

$$a + b = \phi$$

La balance de l'hydrogène donne:

$$2c + 2d = 4\phi$$

La balance de l'oxygène donne:

$$2a + b + c + 2e = 4$$

La première équation d'équilibre donne :

$$K_p^T = \frac{c \cdot b}{a \cdot d}$$

La deuxième équation d'équilibre donne :

$$K_{p1}^T = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{P_{\text{product}}}{a + b + c + d + e}} \sqrt{e}$$

La troisième équation d'équilibre donne :

$$K_{p2}^T = \frac{d}{c} \sqrt{\frac{P_{\text{product}}}{a + b + c + d + e}} \sqrt{e}$$

Cinq de ces six équations, suffit pour résoudre le système à cinq paramètres des produits.

A partir de la table du journal Américain log<sub>10</sub> K<sub>p</sub> de formation de ces espèces est calculé pour différentes valeurs de températures, aussi :

$$\begin{aligned} \log_{10} K_p(T) &= \log_{10}(K_{p,CO}) + \log_{10}(K_{p,H_2O}) \\ &- \log_{10}(K_{p,CO_2}) - \log_{10}(K_{p,H_2}) \end{aligned} \quad (IV-18)$$

Et

$$\log_{10} K_{p1}(T) = \log_{10}(K_{p,CO}) + \sqrt{\log_{10}(K_{p,O_2}) - \log_{10}(K_{p,CO_2})} \quad (IV-19)$$

Et

$$\log_{10} K_p(T) = \log_{10}(K_{p,H_2}) + \sqrt{\log_{10}(K_{p,O_2}) - \log_{10}(K_{p,H_2O})} \quad (IV-20)$$

Pour cela, nous construisons un système d'équations dans le but de retrouver le paramètre (nombre de moles de l'eau dans les produits de combustion) avec lequel tous les autres paramètres sont écrits, aussi les cinq équations ont comme expression :

$$\left\{ \begin{array}{l} a + b = \phi \\ 2c + 2d = 4\phi \\ 2a + b + c + 2e = 4 \\ K_p^T = \frac{c \cdot b}{a \cdot d} \\ K_{p1}^T = \frac{b \cdot \sqrt{e}}{a} \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} a = \phi - b \\ d = 2\phi - c \\ 2e = 4 - 2(\phi - b) - b - c \Rightarrow 2e = b + 4 - c - 2\phi \\ K_p^T = \frac{c \cdot b}{a \cdot d} \\ K_{p1}^T = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{P_{\text{product}}}{a + b + c + d + e}} \sqrt{e} \end{array} \right.$$

Pour résoudre le système d'équations, nous avons utilisé l'Algorithme de Newton-Raphson afin de calculer les paramètres, aussi, toutes les valeurs sont dressées dans le tableau ci-dessous

L'algorithme de Newton-Raphson peut est écrit comme :

$$\boxed{\mathbf{X}^{i+1} = \mathbf{X}^i - [\mathbf{J}^i]^{-1} \cdot \mathbf{f}^i}$$

avec J est le jacobien des équations qui forme une matrice

$$\begin{aligned} K_p^T = \frac{c \cdot b}{a \cdot d} &\Rightarrow c \cdot b = a \cdot d \cdot K_p^T \Rightarrow K_p^T (2\phi - c)(\phi - b) = c \cdot b \\ &\Rightarrow K_p^T (2\phi^2 - 2\phi b - \phi c + bc) - cb = 0 \\ &\Rightarrow 2K_p^T \phi^2 - 2K_p^T \phi b - K_p^T \phi c + K_p^T bc - bc = 0 \\ &\Rightarrow 2K_p^T \phi^2 - 2K_p^T \phi b - K_p^T \phi c + \mathbf{bc}(K_p^T - 1) \\ &\Rightarrow 2K_p^T \phi^2 + \mathbf{b}[c(K_p^T - 1) - 2K_p^T \phi] - K_p^T \phi c = 0 \end{aligned}$$

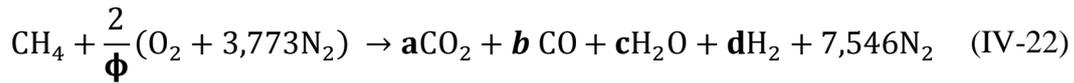
$$\Rightarrow \boxed{\mathbf{b} = \frac{K_p^T \phi c - 2K_p^T \phi^2}{c(K_p^T - 1) - 2K_p^T \phi}}$$

Pour ceci, nous remplaçons les paramètres a, b, d et e par leurs valeurs respectives en fonction de c, et on trouve une équation d'ordre 4 à résoudre, les valeurs sont dressées dans les tableaux de l'Annexe II

De même, on dresse les figures respectives de 1000 à 2000K pour des valeurs comprises entre 0.1 jusqu'au 2 de l'équivalent ratio

$$\text{Avec: } \log_{10} K_{p1}(T) = \log_{10}(K_{p,CO}) + \sqrt{\log_{10}(K_{p,O_2}) - \log_{10}(K_{p,CO_2})} \quad (\text{IV-21})$$

Après avoir constaté que la solution converge, une finale vérification est ipso facto faite, dans nos calculs nous avons assumé que l'oxygène existe bel et bien, aussi dans la solution finale, on remarque des valeurs négatives dans sa fraction molaire, ce qui est rejeté physiquement, aussi, on peut constater que l'oxygène dans de telles conditions prises, n'existe plus. C'est pourquoi, et dans ces circonstances, on refait le calcul avec juste les proportions positives, ce qui retourne à résoudre l'équation :



Nous prenons ainsi le calcul précédent en soustrayant les valeurs négatives et lancer le programme de calcul une autre fois

Les valeurs sont dressées dans l'**annexe III**

**Table IV-25:** Variation de  $K_p$  en fonction de la température

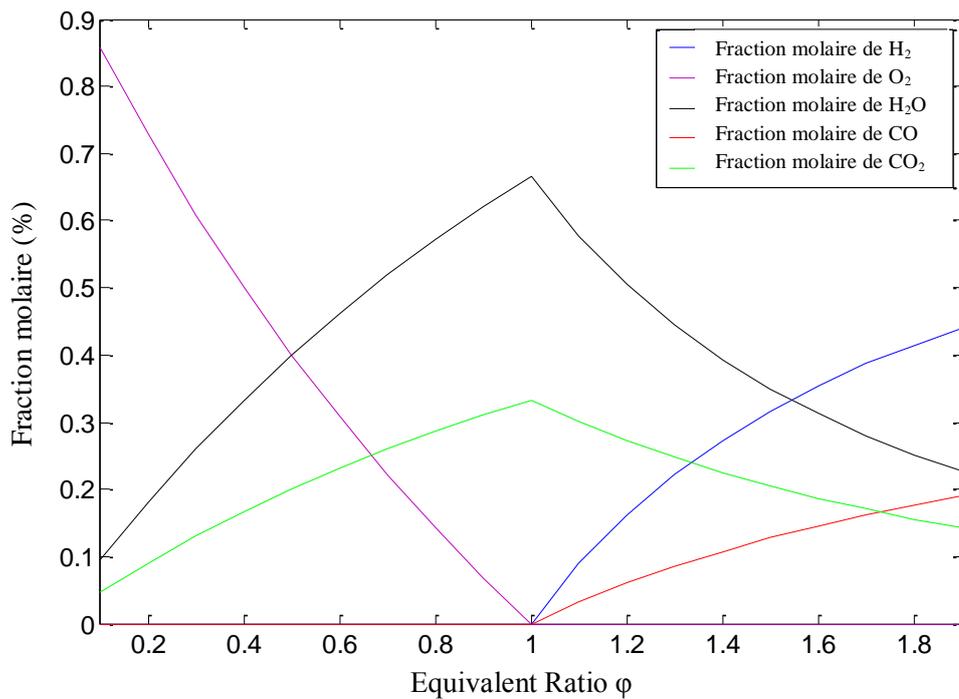
| $K_p$ for different values of temperature | value  |
|---|--------|
| $K_p^{T=1000}$                            | 0,69   |
| $K_p^{T=1100}$                            | 1,0069 |
| $K_p^{T=1200}$                            | 1,3646 |
| $K_p^{T=1300}$                            | 1,7498 |
| $K_p^{T=1400}$                            | 2,1528 |
| $K_p^{T=1500}$                            | 2,5645 |
| $K_p^{T=1600}$                            | 2,9785 |
| $K_p^{T=1700}$                            | 3,3884 |
| $K_p^{T=1800}$                            | 3,8548 |
| $K_p^{T=1900}$                            | 4,1591 |
| $K_p^{T=2000}$                            | 4,5289 |

**Table IV-26:** Variation de  $K_{p1}$  en fonction de la température

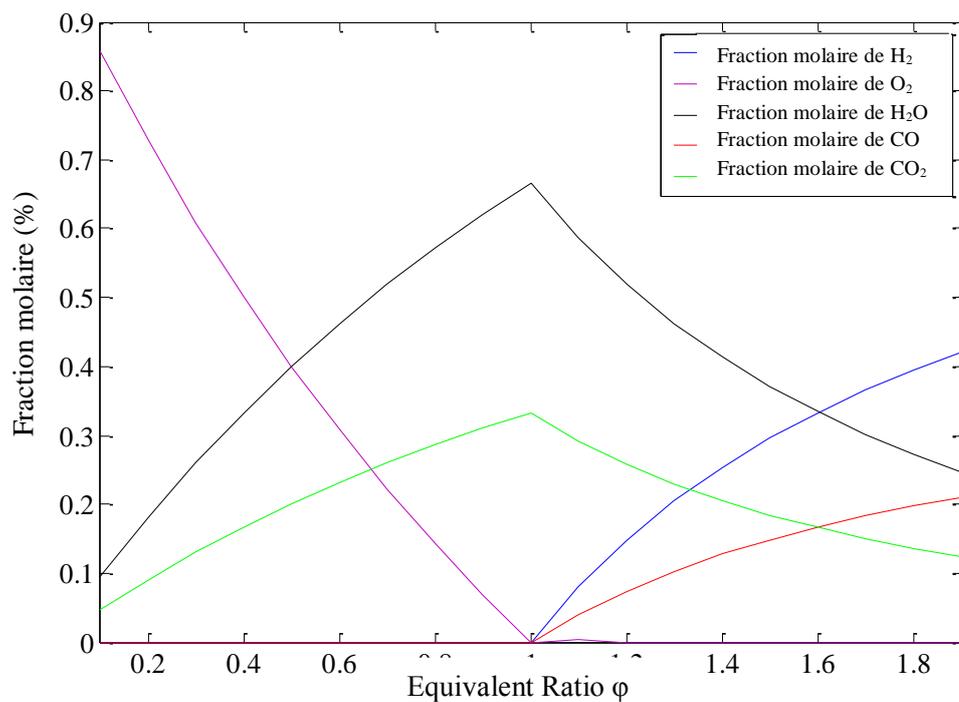
| $K_{p1}$ for different values of temperature | value              |
|--|--------------------|
| $K_{p1}^{T=1000}$                            | $6.011 * 10^{-11}$ |
| $K_{p1}^{T=1100}$                            | $1.32 * 10^{-9}$   |
| $K_{p1}^{T=1200}$                            | $1.72 * 10^{-8}$   |
| $K_{p1}^{T=1300}$                            | $1.51 * 10^{-7}$   |
| $K_{p1}^{T=1400}$                            | $9.68 * 10^{-7}$   |
| $K_{p1}^{T=1500}$                            | $4.83 * 10^{-6}$   |
| $K_{p1}^{T=1600}$                            | $1.97 * 10^{-5}$   |
| $K_{p1}^{T=1700}$                            | $6.77 * 10^{-5}$   |
| $K_{p1}^{T=1800}$                            | $2.03 * 10^{-4}$   |
| $K_{p1}^{T=1900}$                            | $5.41 * 10^{-4}$   |
| $K_{p1}^{T=2000}$                            | $1.31 * 10^{-3}$   |

A ce stade, nous proposons de changer les valeurs négatives trouvées pour l'oxygène, ce qui est **expliqué** par l'épuisement de tout l'oxygène **présent** au début de combustion et aucune trace comme produit, dans ce cas, on se réfère à l'équation avec un équivalent ratio supérieur à un (la mixture riche en carburant) afin d'incorporer les vraies valeurs des autres produits présents, aussi le nombre de moles et la fraction molaire auront comme valeurs celles dressées dans les tableaux de l'Annexe III

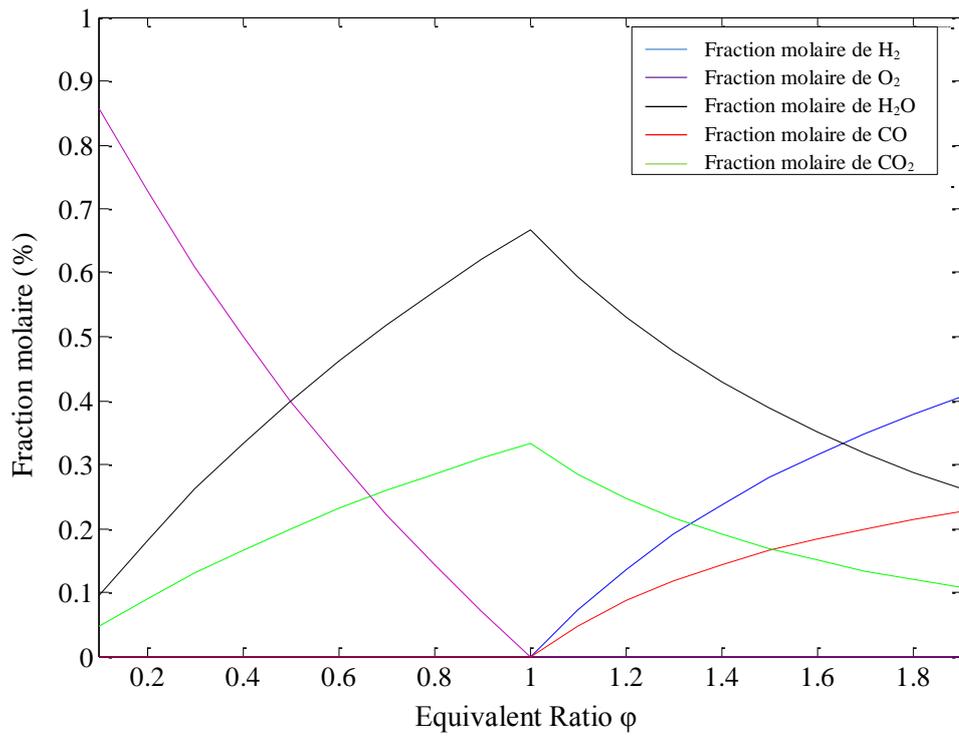
Après avoir fait la correction sur les proportions molaires ainsi que le nombre de mole exact retenu comme produit de combustion, nous dressons ci-dessous les figures de chaque configuration (pour chaque palier de température commençons par 1000K) des produits à l'équilibre



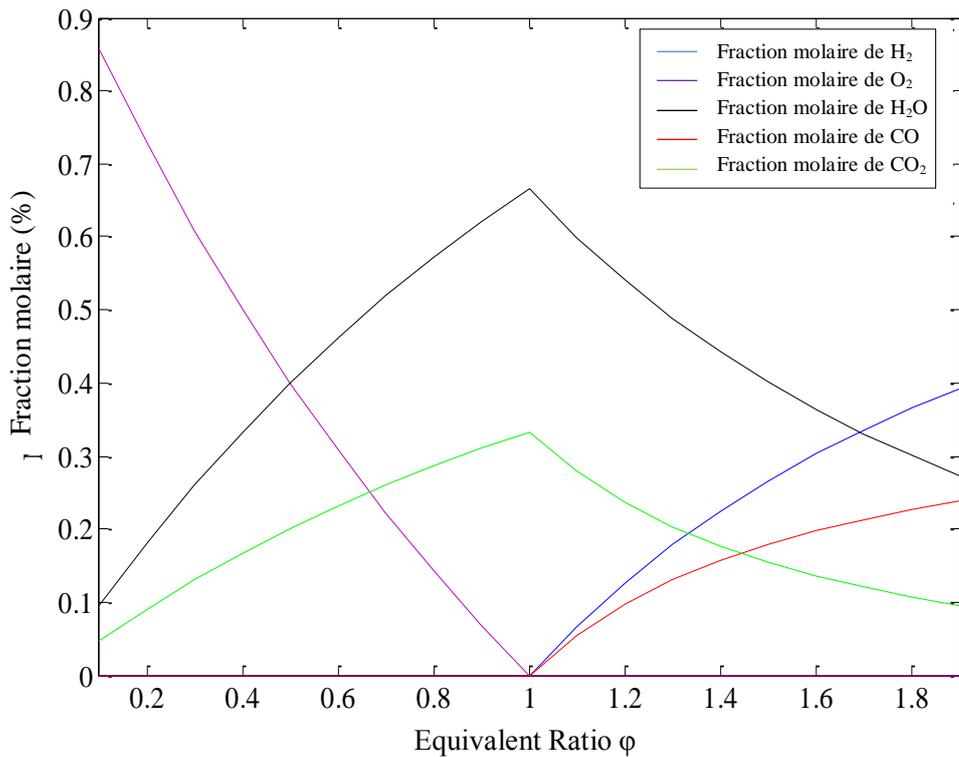
**Figure IV-24:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1000K



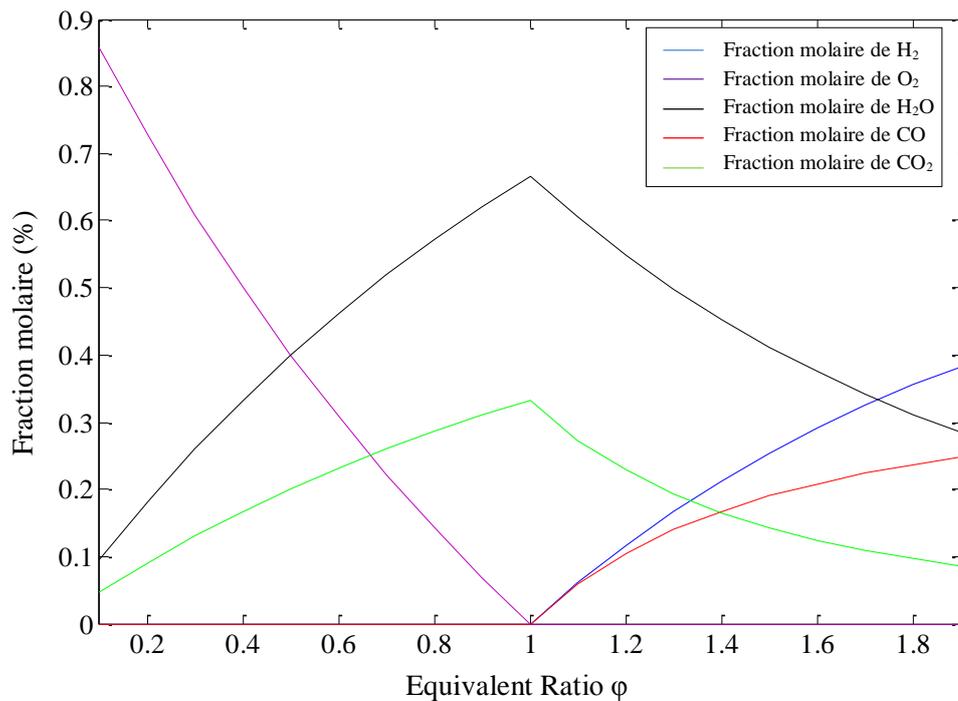
**Figure IV-25:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1100K



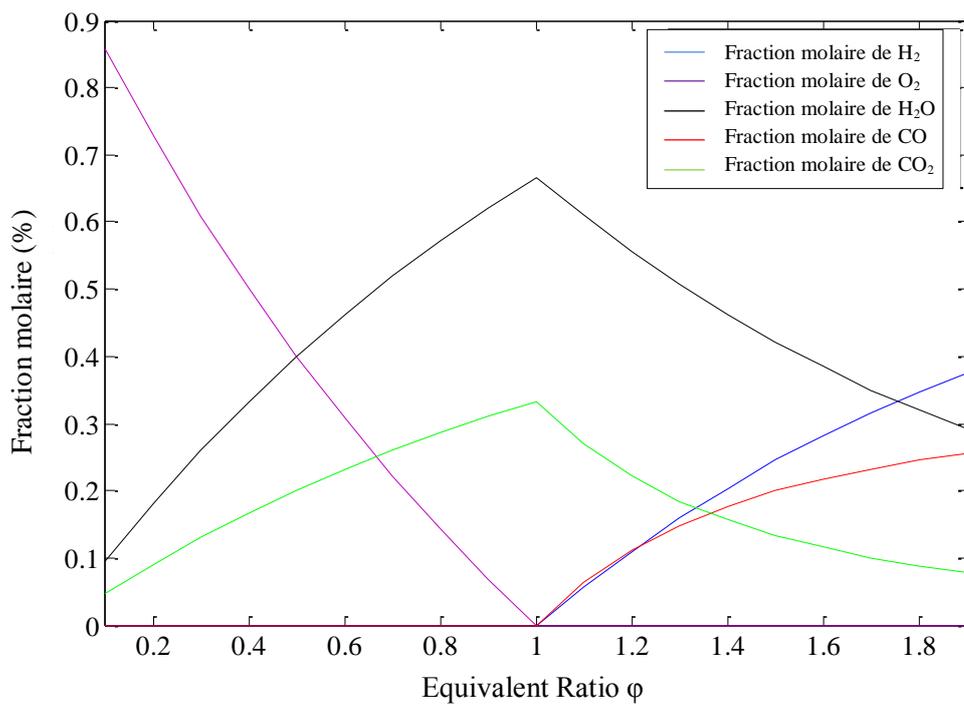
**Figure IV-26:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1200K



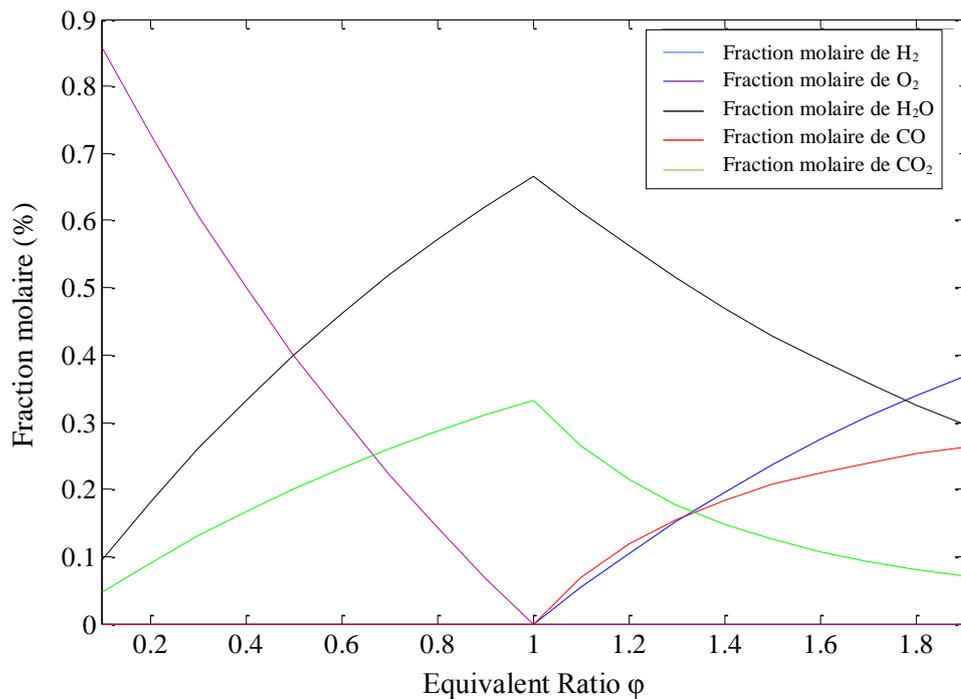
**Figure IV-27:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1300K



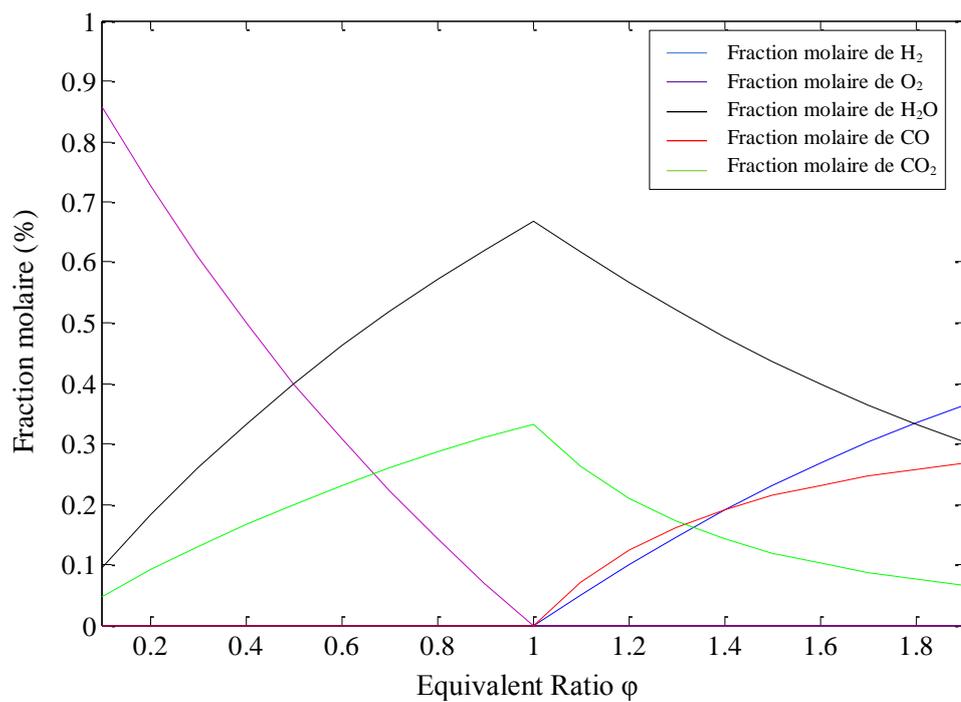
**Figure IV-28:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1400K



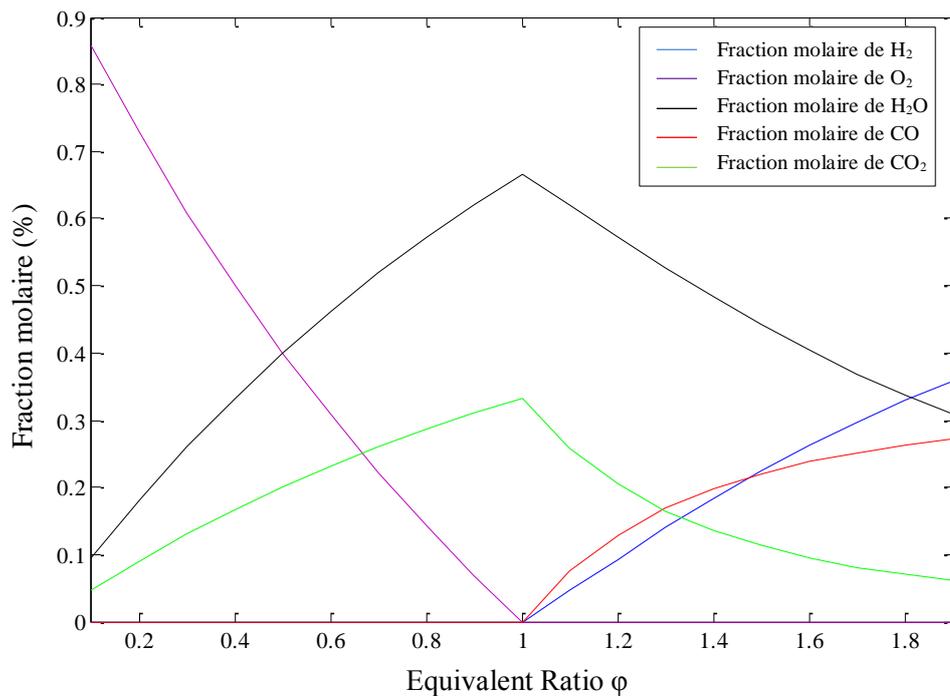
**Figure IV-29:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1500K



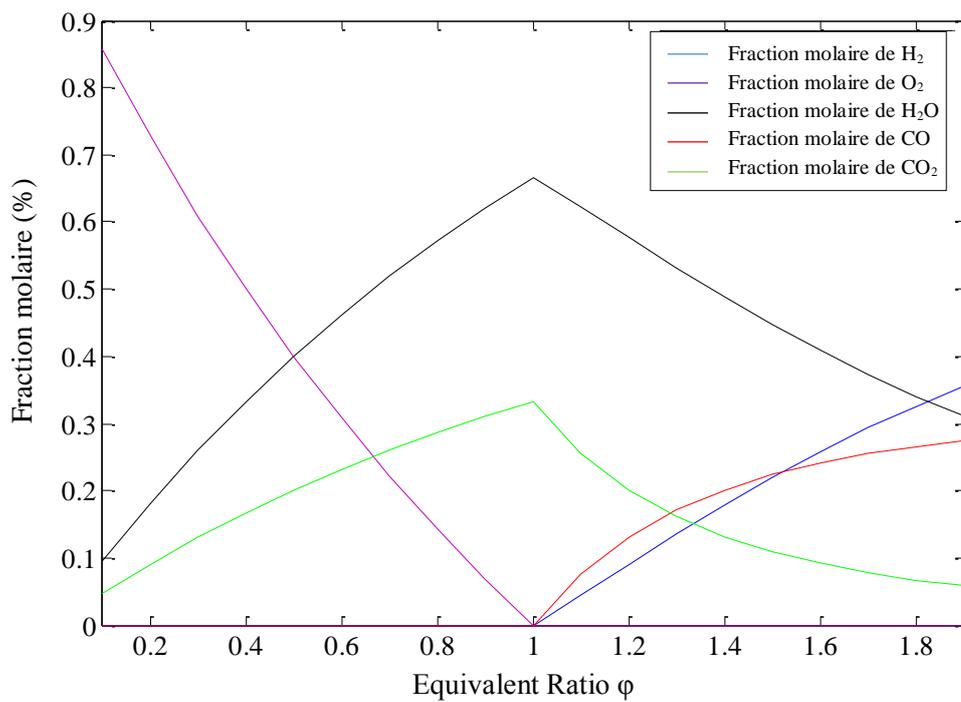
**Figure IV-30:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1600K



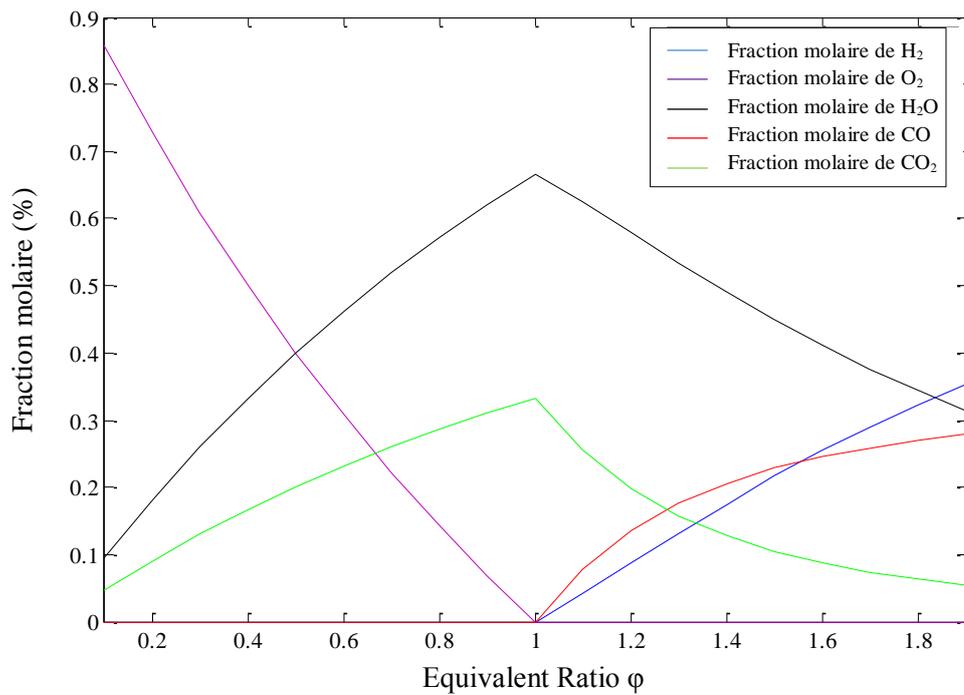
**Figure IV-31:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1700K



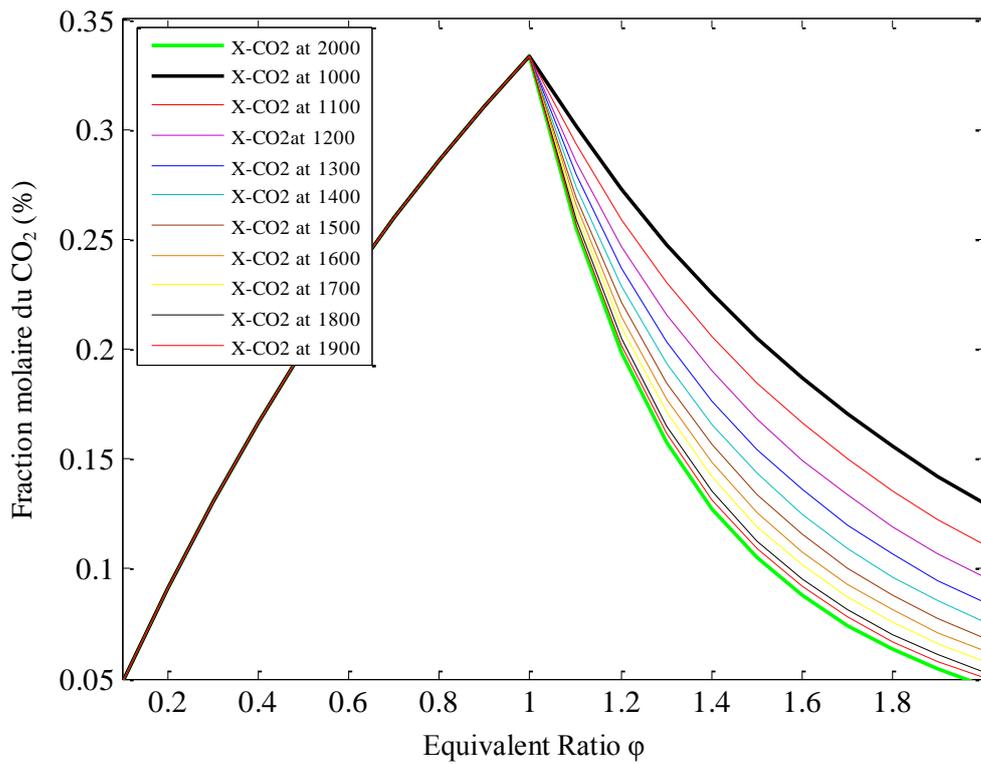
**Figure IV-32:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1800K



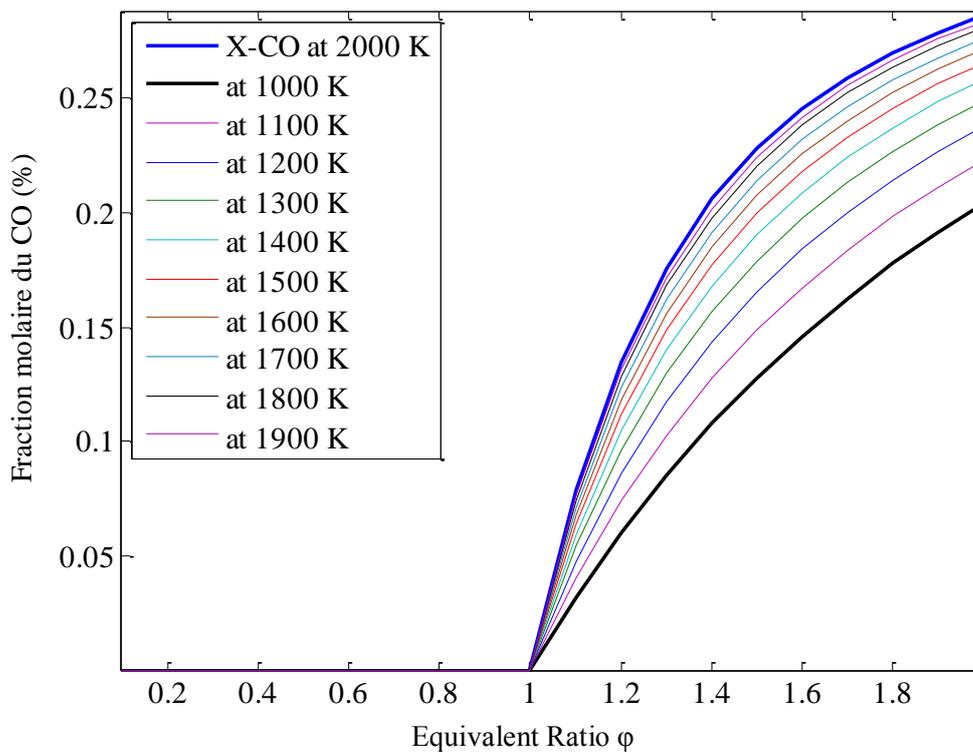
**Figure IV-33:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 1900K



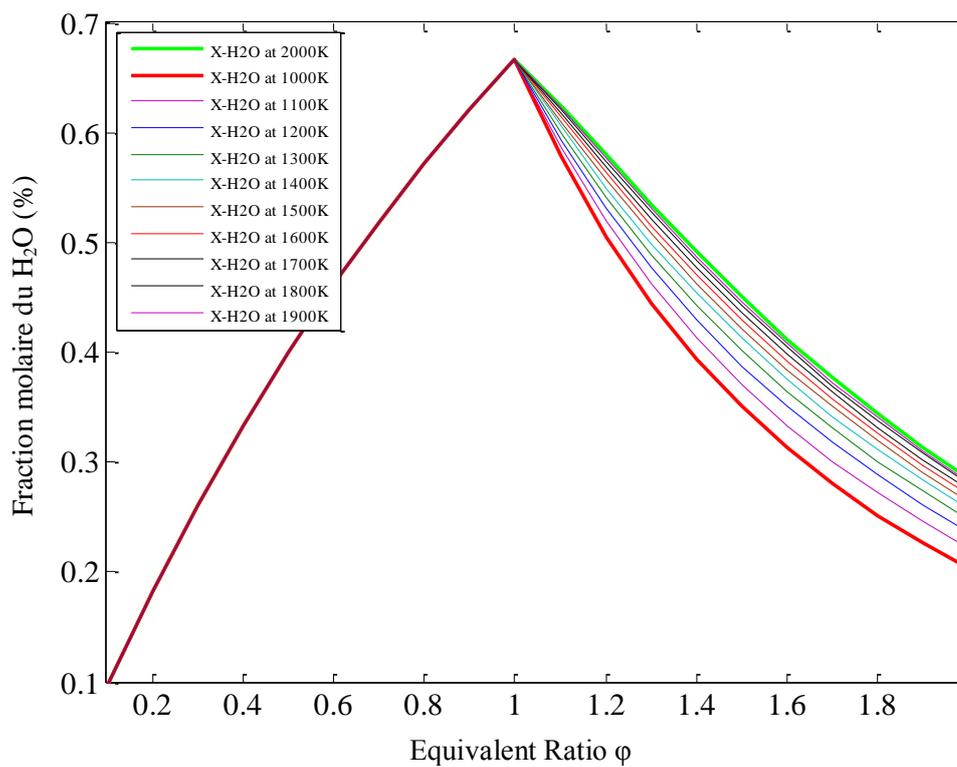
**Figure IV-34:** Variation de la fraction molaire de produits en fonction de l'équivalent ratio à 2000K



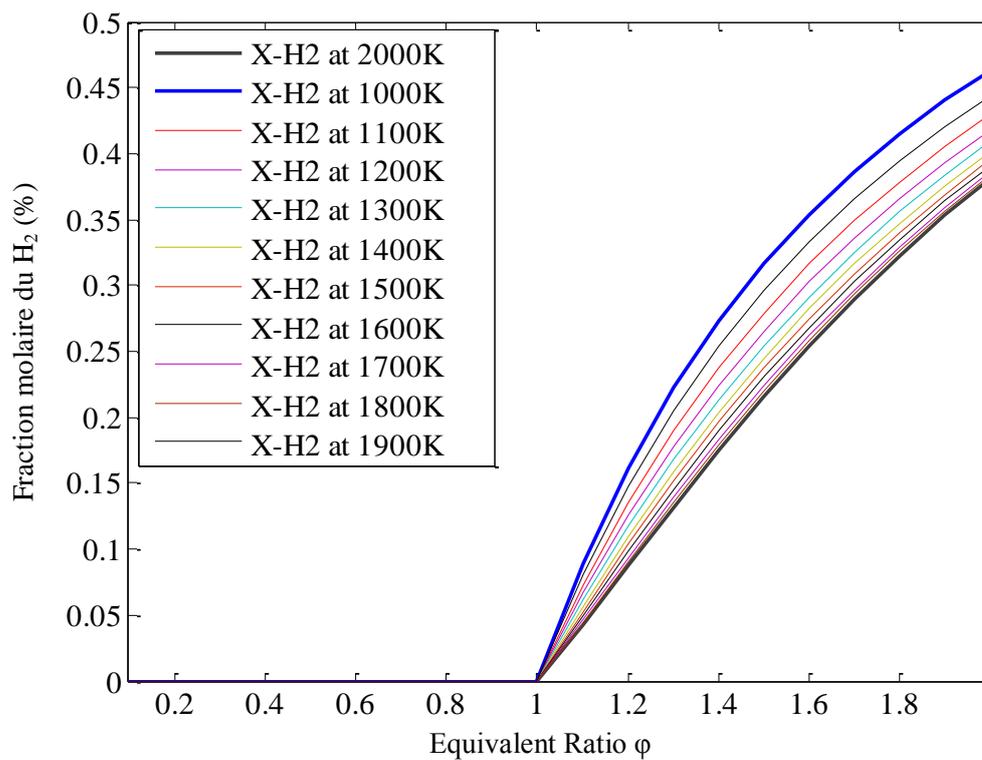
**Figure IV-35:** Variation de la fraction molaire de  $CO_2$  en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K



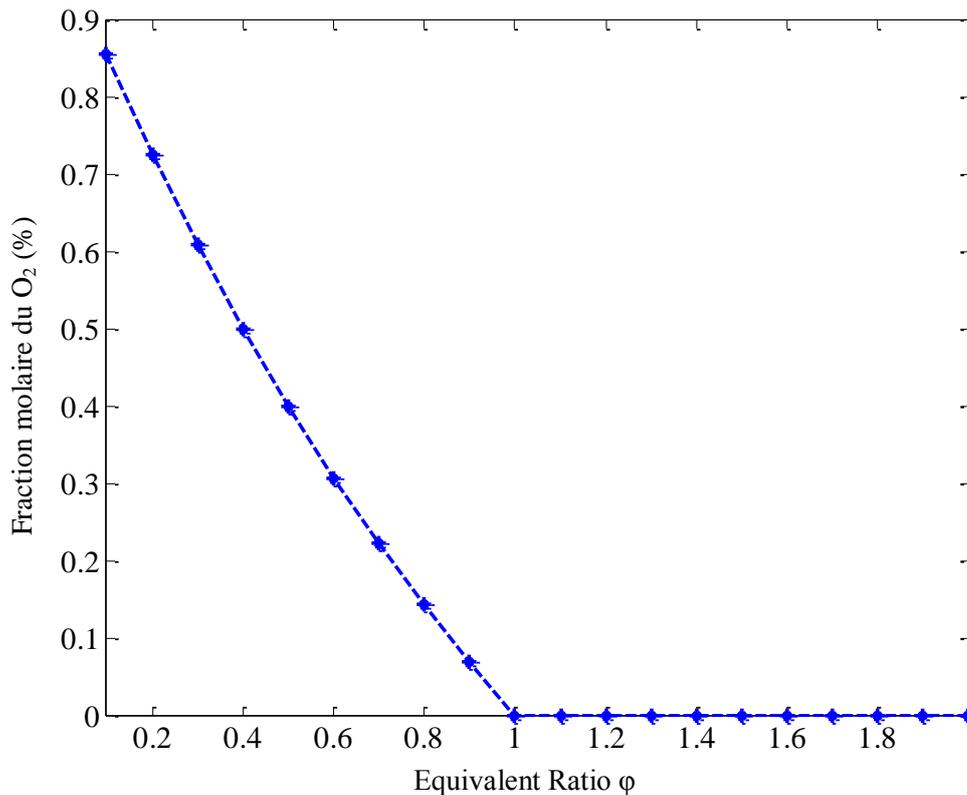
**Figure IV-36:** Variation de la fraction molaire de CO en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K



**Figure IV-37:** Variation de la fraction molaire de H<sub>2</sub>O en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K



**Figure IV-38:** Variation de la fraction molaire de H<sub>2</sub> en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K



**Figure IV-39:** Variation de la fraction molaire de O<sub>2</sub> en fonction de l'équivalent ratio de 1000 à 2000K

### IV- Conclusion

Pour commencer, on a pris trois configurations possibles de l'équation de combustion, la première est lorsque la valeur de l'équivalent ratio est inférieure à un, appelée généralement mélange pauvre en carburant ou bien en anglais (fuel lean mixture), la seconde et lorsqu'il est supérieur à un (fuel rich mixture), et le cas général où l'on a un équivalent ratio varie entre 0,1 et 2, et qui englobe la plupart des cas possibles de combustion, bien que l'intervalle le plus pratique généralement soit compris entre 0,5 et 1,4.

Dans la première partie, où l'équivalent ratio est inférieur à un ( $\phi < 1$ ), on a pris l'équation de combustion avec comme produit le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), l'oxygène ( $\text{O}_2$ ) et l'azote ( $\text{N}_2$ ), ce dernier ne participe pas à la combustion pour des valeurs inférieures à 1900 K (bien que la dissociation de l'azote à haute température n'est pas exclue), pour cela, on voit la distribution de différents produits pour différentes températures, le couple ( $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CO}_2$ ) augmente avec la montée de la température et l'équivalent ratio contrairement à l'oxygène qui s'épuise progressivement avec l'augmentation de la température et de l'équivalent ratio.

Pour un équivalent ratio compris entre 0,1 et 2, pratiquement la plage fonctionnelle est comprise entre 0,5 et 1,4. Au-dessus ou en dessous de ces valeurs, il n'est pas pratique de l'utiliser, donc, on peut noter tout d'abord, que l'oxygène, ne varie pas en fonction de la température et ça finit progressivement jusqu'à la valeur de 1 de l'équivalent ratio, contrairement au CO qui augmente avec la température et bien sûr avec l'augmentation de l'équivalent ratio qui est dû à la décomposition du  $\text{CO}_2$  et qui donne plus d'atomes qui favorise la formation du CO.

On voit ainsi la présence de  $\text{CO}_2$  qui diminue avec l'augmentation de la température, ce qui confirme que la dissociation du  $\text{CO}_2$  offre un nouvel atome de carbone et d'oxygène. Ces derniers, favorisent la naissance d'une autre molécules CO et la formation d' $\text{H}_2\text{O}$  à partir de  $\text{H}_2$ , ce qui réduit la présence de  $\text{H}_2$  davantage plus que la température et le l'équivalent ratio augmentent.

Notez que pour  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CO}_2$ , ils augmentent avec les températures pour les valeurs inférieures à un de l'équivalent ratio. Supérieur à un, l' $\text{H}_2\text{O}$ , continue sa progression, contrairement au  $\text{CO}_2$ , qui diminue de plus en plus que l'équivalent ratio et la température augmente (fraction molaire), ce qui confirme la dissociation du  $\text{CO}_2$  et la génération de plus de molécules de CO et d'oxygène.

Les atomes d'oxygène ainsi libérés de cette dissociation couplent avec le gaz d'hydrogène  $\text{H}_2$  pour former plus de  $\text{H}_2\text{O}$ .

De la même manière, lorsque l'oxygène est pris en considération comme produit de la combustion, en réalité, on ne trouve pas de trace pour des valeurs supérieures à un de l'équivalent ratio, et sa présence est une hypothèque pour les valeurs inférieures à un seulement de l'équivalent ratio. Donc, pour les valeurs supérieures ou égales à un, les valeurs sont convergentes pour les deux types d'équations.

Dans le schéma pris pour la valeur de l'équivalent ratio inférieur à un (Fuel Lean Mixtures) et l'équation générale que nous avons prise, les valeurs sont les mêmes et sont adéquates, pour les valeurs supérieures à un, on a trouvé des valeurs négatives dans les calculs, ce qui explique pourquoi cet élément n'apparaît pas comme un produit de combustion,

Si on revient au deuxième cas pris  $\phi > 1$ , qui est pour des valeurs supérieures à un, l'oxygène n'apparaît pas comme un produit et on a eu recours pour résoudre 4 équations de 4 inconnues, ainsi, on peut conclure que le troisième modèle, où on a proposé le modèle avec l'oxygène comme produit (ce qui reste des réactifs) est exclu, car l'oxygène peut provenir de la dissociation d' $\text{H}_2\text{O}$  seulement et qu'il est possible que pour des valeurs très élevées de la température qui atteignent 2000K, c'est pour cette raison que dans la chambre de combustion on essaie surtout de ne pas atteindre cette plage de températures élevées pour des raisons métallurgiques.

Chapitre V : Modélisation et mise en équations du  
modèle de combustion sans flamme  
( Flameless combustion)

### V.1. Le modèle de combustion sans flamme

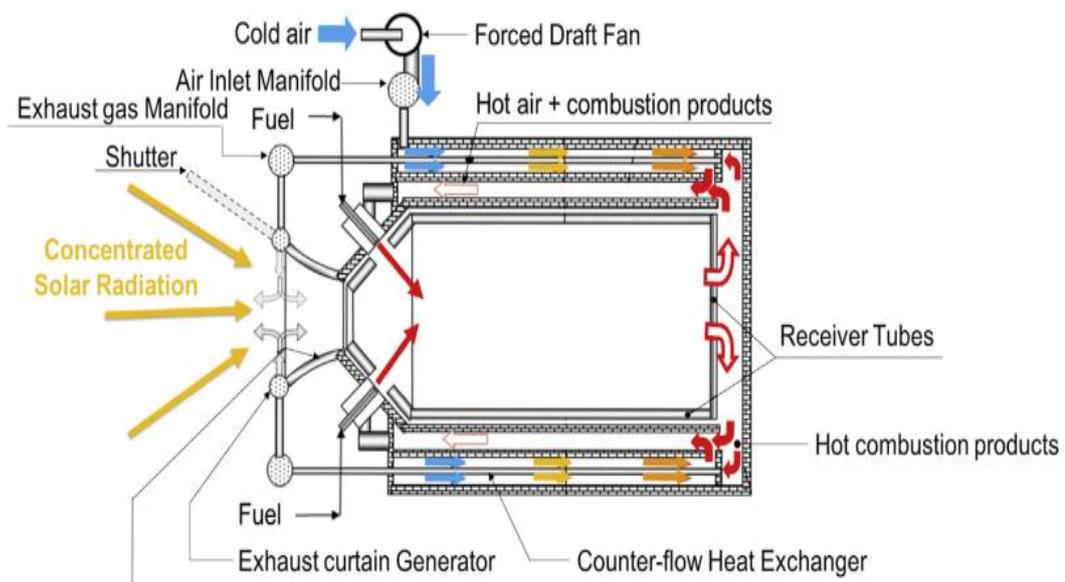
#### Introduction

Ces dernières années, la consommation mondiale d'énergie a continué d'augmenter, non seulement en pays développés, mais aussi dans les pays en développement, principalement en raison de l'industrialisation rapide et de l'amélioration du niveau de vie.

Cette augmentation de la consommation d'énergie a entraîné une augmentation des émissions de dioxyde de carbone et d'oxyde d'azote dans l'environnement.

Parce que les questions énergétiques et environnementales sont devenues une préoccupation majeure, il est désormais urgent de traiter de la préservation de l'environnement à l'échelle mondiale et sur une plus longue durée. Dans ces circonstances, la technologie de combustion utilisant de l'air préchauffé à plus de 1000 ° C a attiré une attention accrue dans de nombreux domaines d'application. Cette technologie de combustion permet de contribuer fortement à la réduction simultanée des émissions de dioxyde de carbone et d'oxydes d'azote.

Cette combustion à haute température de l'air (High Temperature Air Combustion) ou bien combustion sans flamme (Flameless combustion) a atteint environ 30 % de réduction d'énergie (et donc également d'émission de dioxyde de carbone) et 25 % de réduction de la taille physique des installations par rapport au type de four traditionnel. De plus, la technologie HiTAC a démontré des niveaux d'émissions d'oxyde nitrique extrêmement faibles, bien en deçà des normes réglementaires actuelles. Cet ouvrage décrit le développement de cette séduisante et innovante technologie HiTAC et ses applications pratiques à différents types de fours pour de nombreuses industries. (62; 69)

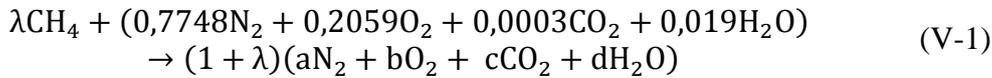


**Figure V-1:** Chambre de combustion en mode flameless combustion

## Chapitre V : Modélisation de la combustion sans flamme

Pour pouvoir faire l'optimisation, nous proposons de modéliser un autre mode de combustion appelé combustion sans flamme (flameless combustion) et examinant son équation donnée par [70, 71] :

### V.2. Mise en équation



En balançant l'équation, on retrouve

- Pour le carbone

$$\lambda + 0,0003 = (1 + \lambda).c \Rightarrow \mathbf{c = \frac{\lambda + 0,0003}{(1 + \lambda)}}$$

- Pour l'hydrogène

$$4\lambda + 2 \times 0,019 = 2 \times (1 + \lambda)d \Rightarrow \mathbf{d = \frac{2\lambda + 0,019}{(1 + \lambda)}}$$

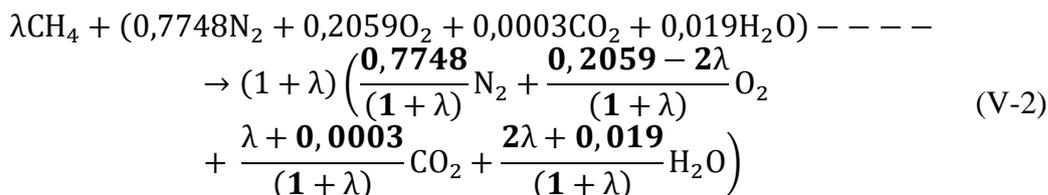
- Pour l'oxygène

$$\begin{aligned} 2 \times (0,2059 + 0,0003) + 0,019 &= (1 + \lambda)(2b + 2c + d) \\ \Rightarrow b &= \frac{1}{2} \left[ \frac{2 \times 0,2059 + 2 \times 0,0003 + 0,019}{(1 + \lambda)} - 2c - d \right] \\ \Rightarrow b &= \frac{1}{2} \left[ \frac{2 \times 0,2059 + 2 \times 0,0003 + 0,019}{(1 + \lambda)} - 2 \frac{\lambda + 0,0003}{(1 + \lambda)} - \frac{2\lambda + 0,019}{(1 + \lambda)} \right] \\ \Rightarrow b &= \frac{1}{2} \left[ \frac{2 \times 0,2059 + 2 \times 0,0003 + 0,019 - 2\lambda - 2 \times 0,0003 - 2\lambda - 0,019}{(1 + \lambda)} \right] \\ \Rightarrow b &= \frac{1}{2} \left[ \frac{2 \times 0,2059 - 4\lambda}{(1 + \lambda)} \right] \Rightarrow \mathbf{b = \frac{0,2059 - 2\lambda}{(1 + \lambda)}} \end{aligned}$$

- Pour l'azote

$$0,7748 = (1 + \lambda)a \Rightarrow \mathbf{a = \frac{0,7748}{(1 + \lambda)}}$$

Aussi,



Avec  $\lambda$ : est le rapport Air/Carburant appelé en anglais fuel/air Ratio (raisonnement massique ou molaire), qui est calculé par :

$$\lambda_{\text{molaire}} = \frac{n_f}{n_a} (\text{raisonnement molaire}) = \frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_a} \left[ \frac{\frac{\text{kmol fuel}}{s}}{\frac{\text{kmol Air}}{s}} \right]$$

## Chapitre V : Modélisation de la combustion sans flamme

$$\lambda_{massique} = \frac{m_{fuel}}{m_{air}} = \frac{n_f * M_{fuel}}{n_a * M_{Air}} \text{ (raisonnement massique)}$$

$$= \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \left[ \frac{kg \text{ fuel}}{s} \right] \left[ \frac{s}{kg \text{ Air}} \right]$$

Ainsi, on pourra déduire la relation entre le  $\lambda_{molaire}$  et le débit massique qui entre dans la chambre de combustion comme ceci :

$$\lambda_{molaire} = \frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_a} = \frac{\frac{\dot{m}_f}{M_{fuel}}}{\frac{\dot{m}_a}{M_{Air}}} \Rightarrow \lambda_{molaire} = \frac{\dot{m}_f}{M_{fuel}} \frac{M_{Air}}{\dot{m}_a} \Rightarrow \boxed{\dot{m}_f = \lambda_{molaire} \frac{M_{fuel}}{M_{Air}} \dot{m}_a}$$

Comme nous le savons, le débit massique conserve sa valeur de l'entrée jusqu'à sa sortie du système considéré (chambre de combustion) aussi:

$$m_{fuel} + m_{air} = m_{produit} \Rightarrow \dot{m}_p = \dot{m}_a + \lambda_{molar} \frac{M_{fuel}}{M_{Air}} \dot{m}_a$$

$$\Rightarrow \boxed{\dot{m}_p = \dot{m}_a \left( 1 + \lambda \frac{M_{fuel}}{M_{Air}} \right)}$$

La relation qui le lie avec l'équivalent ratio est prise de l'expression de dessous, ainsi elle est donnée comme suivant :

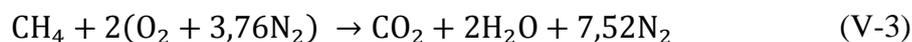
Par définition nous avons :

$$\phi = \frac{\left( \frac{m_f}{m_a} \right)_{real}}{\left( \frac{m_f}{m_a} \right)_{Stoic}}, \text{ with: } \frac{m_f}{m_a} = \frac{n_f \cdot M_f}{n_a \cdot M_a} \Rightarrow \phi = \frac{\left( \frac{n_f \cdot M_f}{n_a \cdot M_a} \right)_{real}}{\left( \frac{n_f \cdot M_f}{n_a \cdot M_a} \right)_{Stoic}} = \frac{\left( \frac{n_f}{n_a} \right)_{real}}{\left( \frac{n_f}{n_a} \right)_{Stoic}}$$

Aussi:

$$\phi = \frac{(\lambda)_{real}}{(\lambda)_{Stoic}} \Rightarrow \boxed{(\lambda)_{real} = \phi (\lambda)_{Stoichiometric}}$$

$\lambda_{stoichiometric}$  peut être calculé aisément à partir de l'équation stœchiométrique du méthane aussi:



$$\lambda_{stoichiometric} = \frac{1}{9,52} \approx 0,10504$$

C'est pourquoi;

$$\boxed{(\lambda)_{real} = \frac{1}{9,52} \phi}$$

Pour ainsi écrire l'équation en fonction de l'équivalent ratio, on insère l'expression de  $(\lambda)_{real}$  en fonction de l'équivalent ratio prise au-dessus

## Chapitre V : Modélisation de la combustion sans flamme

$$\begin{aligned}
 & \frac{\phi}{9.52} \text{CH}_4 + (0,7748\text{N}_2 + 0,2059\text{O}_2 + 0,0003\text{CO}_2 + 0,019\text{H}_2\text{O}) - - \\
 & \rightarrow \left(1 + \frac{\phi}{9.52}\right) \left( \frac{0,7748}{\left(1 + \frac{\phi}{9.52}\right)} \text{N}_2 + \frac{0,2059 - 2 \frac{\phi}{9.52}}{\left(1 + \frac{\phi}{9.52}\right)} \text{O}_2 \right. \\
 & \left. + \frac{\frac{\phi}{9.52} + 0,0003}{\left(1 + \frac{\phi}{9.52}\right)} \text{CO}_2 + \frac{2 \frac{\phi}{9.52} + 0,019}{\left(1 + \frac{\phi}{9.52}\right)} \text{H}_2\text{O} \right) \quad (\text{V-4})
 \end{aligned}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned}
 & \frac{\phi}{9.52} \text{CH}_4 + (0,7748\text{N}_2 + 0,2059\text{O}_2 + 0,0003\text{CO}_2 + 0,019\text{H}_2\text{O}) - - \\
 & \rightarrow \left(\frac{9.52 + \phi}{9.52}\right) \left( \frac{0,7748}{\left(\frac{9.52 + \phi}{9.52}\right)} \text{N}_2 + \frac{\frac{1.960168 - 2\phi}{9.52}}{\left(\frac{9.52 + \phi}{9.52}\right)} \text{O}_2 \right. \\
 & \left. + \frac{\frac{\phi + 0.002856}{9.52}}{\left(\frac{9.52 + \phi}{9.52}\right)} \text{CO}_2 + \frac{\frac{2\phi + 0.18088}{9.52}}{\left(\frac{9.52 + \phi}{9.52}\right)} \text{H}_2\text{O} \right) \quad (\text{V-5})
 \end{aligned}$$

En d'autres termes :

$$\begin{aligned}
 & \frac{\phi}{9.52} \text{CH}_4 + (0,7748\text{N}_2 + 0,2059\text{O}_2 + 0,0003\text{CO}_2 + 0,019\text{H}_2\text{O}) - - \\
 & \rightarrow \left(\frac{9.52 + \phi}{9.52}\right) \left( \frac{7.376096}{9.52 + \phi} \text{N}_2 + \frac{1.960168 - 2\phi}{9.52 + \phi} \text{O}_2 \right. \\
 & \left. + \frac{\phi + 0.002856}{9.52 + \phi} \text{CO}_2 + \frac{2\phi + 0.18088}{9.52 + \phi} \text{H}_2\text{O} \right) \quad (\text{V-6})
 \end{aligned}$$

En multipliant toute l'équation par 9.52, nous retrouvons l'équation finale écrite ainsi :

$$\begin{aligned}
 & \phi \text{CH}_4 + (0,7748\text{N}_2 + 0,2059\text{O}_2 + 0,0003\text{CO}_2 + 0,019\text{H}_2\text{O}) - - \\
 & \rightarrow (9.52 + \phi) \left[ \left( \frac{7.376096}{9.52 + \phi} \right) \text{N}_2 + \left( \frac{1.960168 - 2\phi}{9.52 + \phi} \right) \text{O}_2 \right. \\
 & \left. + \left( \frac{\phi + 0.002856}{9.52 + \phi} \right) \text{CO}_2 + \left( \frac{2\phi + 0.18088}{9.52 + \phi} \right) \text{H}_2\text{O} \right] \quad (\text{V-7})
 \end{aligned}$$

Qui prend sa forme finale ainsi :

$$\begin{aligned}
 & \text{CH}_4 + (0,7748\text{N}_2 + 0,2059\text{O}_2 + 0,0003\text{CO}_2 + 0,019\text{H}_2\text{O}) - - - - \\
 & \rightarrow \left[ \frac{7.376096}{\phi} \text{N}_2 + \left( \frac{1.960168 - 2\phi}{\phi} \right) \text{O}_2 \right. \\
 & \left. + \left( \frac{\phi + 0.002856}{\phi} \right) \text{CO}_2 + \left( \frac{2\phi + 0.18088}{\phi} \right) \text{H}_2\text{O} \right] \quad (\text{V-8})
 \end{aligned}$$

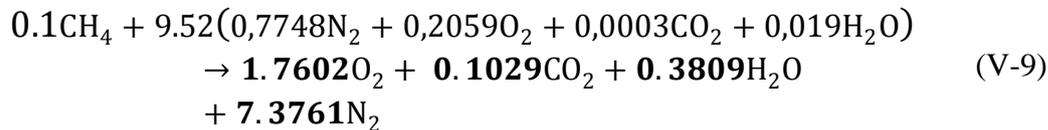
## Chapitre V : Modélisation de la combustion sans flamme

---

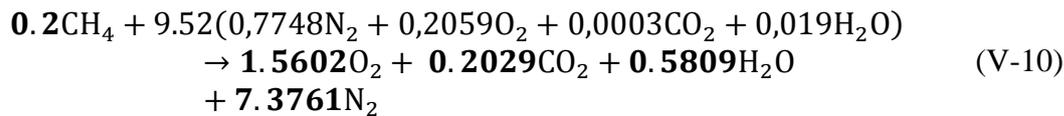
Pour respecter l'équation du mélange pauvre en carburant (fuel lean mixture) qui suppose que la disparition de l'oxygène est atteinte lorsque  $\phi=1$ , on peut constater que pour ce type d'équation modèle, l'oxygène se termine pour une valeur qui avoisine 0,98 qui semblerait acceptable en termes de modélisation.

Nous fixons des valeurs pour l'équivalent ratio et faisons les équations pour voir comment la température adiabatique change:

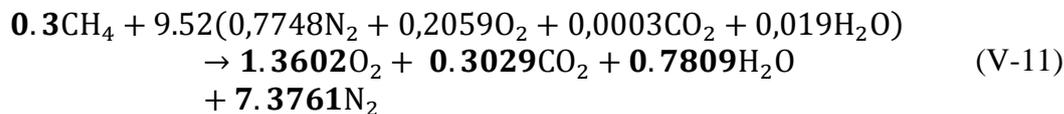
Pour  $\phi = 0.1$



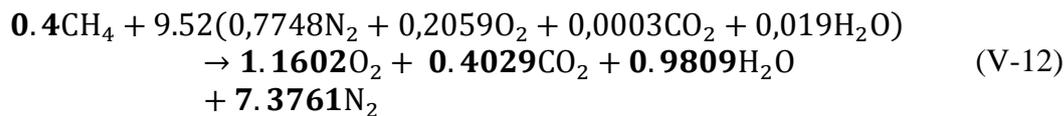
Pour  $\phi = 0.2$



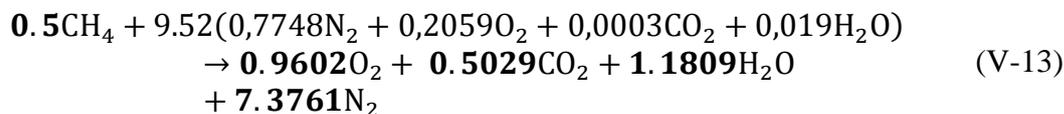
Pour  $\phi = 0.3$



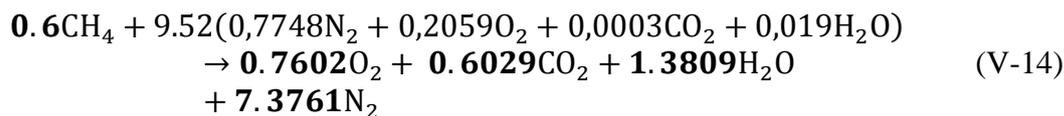
Pour  $\phi = 0.4$



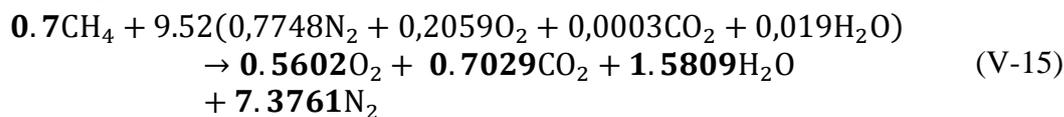
Pour  $\phi = 0.5$



Pour  $\phi = 0.6$

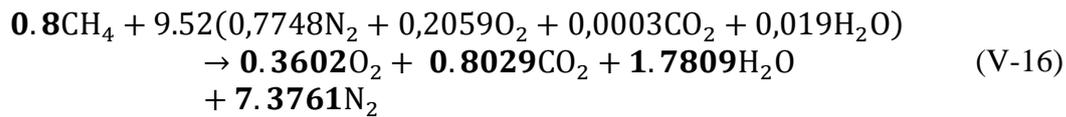


Pour  $\phi = 0.7$

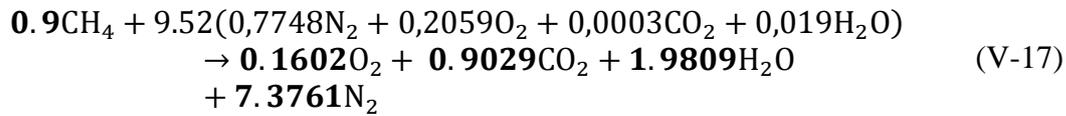


## Chapitre V : Modélisation de la combustion sans flamme

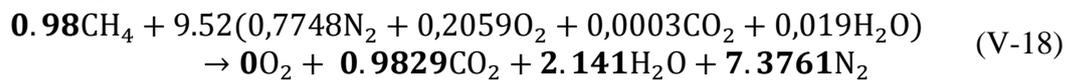
Pour  $\phi = 0.8$



Pour  $\phi = 0.9$



Pour  $\phi = 0.980084$



Exactement, c'est à la valeur de  $\phi = 0.980084$ , que l'oxygène de figure plus comme produit dans l'équation de combustion, ci-dessous, les valeurs des températures pour différentes valeurs de l'équivalent ratio

**Table V-1** : Variation de la température adiabatique en fonction de l'équivalent ratio dans la combustion sans flamme

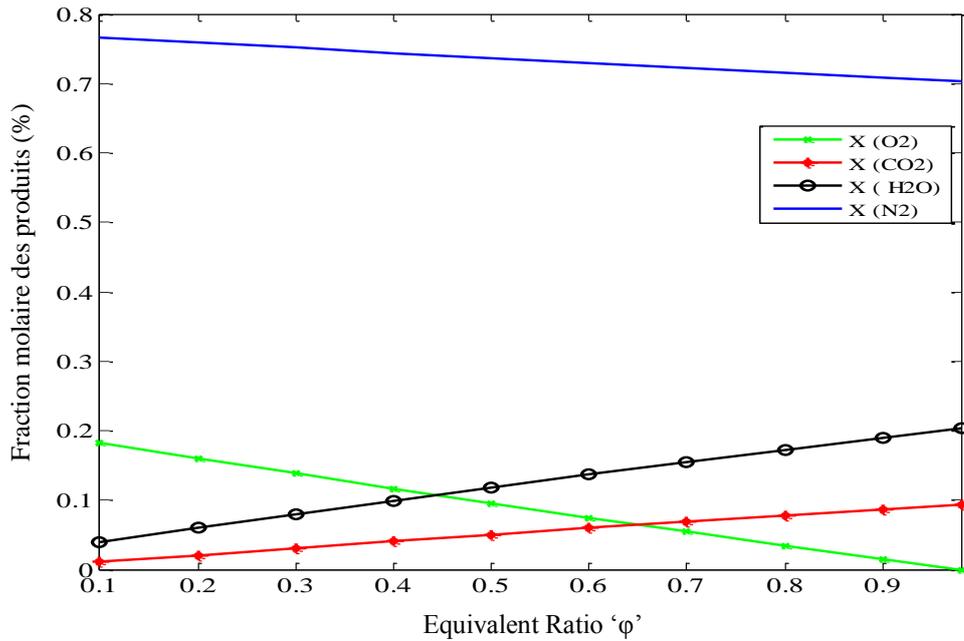
| Nombre de point | Equivalent Ratio | Température de la flamme adiabatique |
|-----------------|------------------|--------------------------------------|
| 1               | 0.1              | <b>574.6165</b>                      |
| 2               | 0.2              | <b>830.1361</b>                      |
| 3               | 0.3              | <b>1061.8866</b>                     |
| 4               | 0.4              | <b>1276.32</b>                       |
| 5               | 0.5              | <b>1491.697</b>                      |
| 6               | 0.6              | <b>1658.44</b>                       |
| 7               | 0.7              | <b>1823.53</b>                       |
| 8               | 0.8              | <b>2004.85</b>                       |
| 9               | 0.9              | <b>2167.3</b>                        |
| 10              | 0.98             | <b>2288.3</b>                        |

Aussi, on retrace pour créer un polynôme de degré "n" ainsi approcher la courbe de  $T = f(\phi)$ ; Aussi, le polynôme peut être écrit comme :

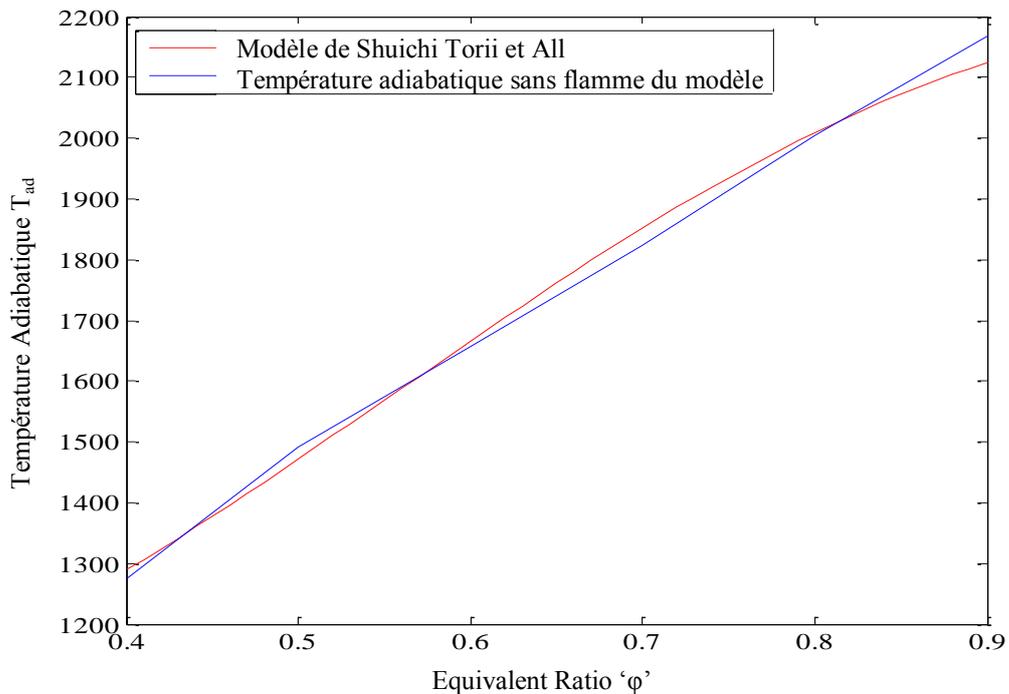
$$T(\phi) = -0.3660 \cdot 10^7 \cdot \phi^9 + 1.8767 \cdot 10^7 \cdot \phi^8 - 4.1171 \cdot 10^7 \cdot \phi^7 + 5.0434 \cdot 10^7 \cdot \phi^6$$

$$- 3.7766 \cdot 10^7 \cdot \phi^5 + 1.7788 \cdot 10^7 \cdot \phi^4 - 0.5221 \cdot 10^7 \cdot \phi^3 + 0.0910 \cdot 10^7 \cdot \phi^2$$

$$- 0.0082 \cdot 10^7 \cdot \phi^1 + 0.0003 \cdot 10^7 \dots \dots \dots \quad (\text{V. 19})$$



**Figure V-2:** Variation de la fraction molaire de produits de combustion en fonction de l'équivalent ratio



**Figure V-3:** Température adiabatique de la combustion sans flamme du méthane en fonction de l'équivalent ratio

La quantité de chaleur ainsi produite par le fuel est écrite sous la forme :

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f * LHV_{CH_4}$$

Où:  $LHV_{CH_4}$  est le Pouvoir calorifique inférieur du méthane

## Chapitre V : Modélisation de la combustion sans flamme

La balance énergétique entre les entrées et les sortie du système thermodynamique (chambre de combustion )s'écrit :

$$\dot{Q}_{cl} - \dot{W}_{cc} + \dot{n}_{air}h_{air} + \dot{n}_{fuel}h_{fuel} - \dot{n}_{pr}h_{pr} = 0 \quad (V-20)$$

$\dot{Q}_{cl}$ : Perte thermique dans la chambre de combustion

$\dot{W}_{cc}$ : travail dans la chmbre de combustion; égale à zéro

$\dot{n}_a$ : débit volumique molaire de l'air;  $h_a$ : enthalpie de l'air

$\dot{n}_f$ : débit volumique molaire du fuel;  $h_f$ : enthalpie du fuel

$\dot{n}_p$ : débit volumique molaire des produits;  $h_p$ : enthalpie de products

Pour ce qui est des pertes dans la chambre de combustion, elles sont estimées à l'ordre de 3% du LHV [19]

$$\dot{Q}_{cl} = -0.03 * \dot{n}_{fuel} * LHV = -0.03 * \dot{n}_{air} * \lambda * LHV$$

Avec:  $\dot{W}_{cc} = 0$ ,

$$\lambda = \frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_a} \Rightarrow \boxed{\dot{n}_f = \lambda \dot{n}_a}$$

et  $\dot{n}_p = \dot{n}_a + \dot{n}_f = \dot{n}_a + \lambda \dot{n}_a \Rightarrow \boxed{\dot{n}_p = \dot{n}_a(1 + \lambda)}$

Aussi, on remplace les expressions de différents débits volumiques en fonction du débit volumique molaire de l'air, on retrouve comme expression

$$-0.03\dot{n}_a\lambda LHV + \dot{n}_a h_a + \lambda \dot{n}_a h_f - \dot{n}_a(1 + \lambda)h_p = 0$$

Ou bien

$$\boxed{-0.03\lambda LHV + h_a + \lambda h_f - (1 + \lambda)h_p = 0}$$

Où:

$$\boxed{h_a = 0,7748\Delta h_{N_2} + 0,2059\Delta h_{O_2} + 0,0003 (h_f^\circ + \Delta h)_{CO_2} + 0,019 (h_f^\circ + \Delta h)_{H_2O}}$$

Si les entrées (air et carburant) entrent dans les conditions standards ( 25°C et 1atm) la formule précédente revient à :

$$h_a = 0,7748\Delta h_{N_2} + 0,2059\Delta h_{O_2} + 0,0003 h_{f_{CO_2}}^\circ + 0,019 h_{f_{H_2O}}^\circ$$

Avec :  $h_{f_{N_2}}^\circ = h_{f_{O_2}}^\circ = 0$

$$\begin{aligned} & \lambda CH_4 + (0,7748N_2 + 0,2059O_2 + 0,0003CO_2 + 0,019H_2O) \\ & \rightarrow \left[ \frac{0,7748}{(1 + \lambda)} N_2 + \frac{0,2059 - 2\lambda}{(1 + \lambda)} O_2 + \frac{\lambda + 0,0003}{(1 + \lambda)} CO_2 \right. \\ & \left. + \frac{2\lambda + 0,019}{(1 + \lambda)} H_2O \right] \quad (V-21) \end{aligned}$$

Aussi,

$$\begin{aligned} (1 + \lambda)h_p^{T_3} &= 0,7748(h^T)_{N_2} + (0,2059 - 2\lambda)(h^T)_{O_2} + (\lambda + 0,0003)(h^T)_{CO_2} \\ &+ (2\lambda + 0,019)(h^T)_{H_2O} \end{aligned}$$

Avec  $(h^T)_{N_2} = (h_f^\circ + \Delta h)_{N_2}$

## Chapitre V : Modélisation de la combustion sans flamme

$$\begin{aligned}
 (1 + \lambda)h_p^{T_3} &= \\
 0.7748\Delta h_{N_2} + (0,2059 - 2\lambda)\Delta h_{O_2} + (\lambda + 0,0003)(h_f^\circ + \Delta h)_{CO_2} (1 + \lambda)h_p^{T_3} \\
 &\quad + (2\lambda + 0,019)(h_f^\circ + \Delta h)_{H_2O} \\
 &= 0.7748\Delta h_{N_2} + 0,2059\Delta h_{O_2} - 2\lambda\Delta h_{O_2} + 0,0003(h_f^\circ + \Delta h)_{CO_2} \\
 &\quad + \lambda(h_f^\circ + \Delta h)_{CO_2} + 0,019(h_f^\circ + \Delta h)_{H_2O} + 2\lambda(h_f^\circ + \Delta h)_{H_2O}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (1 + \lambda)h_p^{T_3} &= 0.7748(\Delta h)_{N_2} + 0,2059(\Delta h)_{O_2} - 2\lambda(\Delta h)_{O_2} \\
 &\quad + 0,0003(h_f^\circ)_{CO_2} + 0,0003(\Delta h)_{CO_2} + \lambda(h_f^\circ)_{CO_2} + \lambda(\Delta h)_{CO_2} \\
 &\quad + 0,019(h_f^\circ)_{H_2O} + 0,019(\Delta h)_{H_2O} + 2\lambda(h_f^\circ)_{H_2O} + 2\lambda(\Delta h)_{H_2O}
 \end{aligned}$$

En d'autres termes

$$-0.03\dot{n}_a\lambda LHV + \dot{n}_a h_a + \lambda n_a h_f - n_a (1 + \lambda)h_p = 0$$

$$-0.03\dot{n}_a\lambda LHV + \dot{n}_a h_a + \dot{n}_a \lambda h_f - \dot{n}_a h_p = 0$$

$$(1 + \lambda)h_p - h_a = \lambda h_f - 0.03\lambda LHV$$

$$\begin{aligned}
 (1 + \lambda)h_p - h_a & \\
 \Rightarrow 0.7748(\Delta h)_{N_2} + 0,2059(\Delta h)_{O_2} - 2\lambda(\Delta h)_{O_2} + 0,0003(h_f^\circ)_{CO_2} \\
 &\quad + 0,0003(\Delta h)_{CO_2} + \lambda(h_f^\circ)_{CO_2} + \lambda(\Delta h)_{CO_2} + 0,019(h_f^\circ)_{H_2O} \\
 &\quad + 0,019(\Delta h)_{H_2O} + 2\lambda(h_f^\circ)_{H_2O} + 2\lambda(\Delta h)_{H_2O} - 0,7748h_{fN_2}^\circ \\
 &\quad - 0,2059h_{fO_2}^\circ - 0,0003h_{fCO_2}^\circ - 0,019h_{fH_2O}^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (1 + \lambda)h_p - h_a & \\
 = 0.7748(\Delta h)_{N_2} + 0,2059(\Delta h)_{O_2} - 2\lambda(\Delta h)_{O_2} + 0,0003(\Delta h)_{CO_2} \\
 &\quad + \lambda(h_f^\circ)_{CO_2} + \lambda(\Delta h)_{CO_2} + 0,019(\Delta h)_{H_2O} + 2\lambda(h_f^\circ)_{H_2O} + 2\lambda(\Delta h)_{H_2O}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (1 + \lambda)h_p - h_a & \\
 = 0,7748(\Delta h)_{N_2} + 0,2059(\Delta h)_{O_2} + 0,0003(\Delta h)_{CO_2} \\
 &\quad + 0,019(\Delta h)_{H_2O} - 2\lambda(\Delta h)_{O_2} + \lambda(h_f^\circ)_{CO_2} + \lambda(\Delta h)_{CO_2} + 2\lambda(h_f^\circ)_{H_2O} \\
 &\quad + 2\lambda(\Delta h)_{H_2O}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Rightarrow 0,7748(\Delta h)_{N_2} + 0,2059(\Delta h)_{O_2} + 0,0003(\Delta h)_{CO_2} + 0,019(\Delta h)_{H_2O} - 2\lambda(\Delta h)_{O_2} \\
 + \lambda(h_f^\circ)_{CO_2} + \lambda(\Delta h)_{CO_2} + 2\lambda(h_f^\circ)_{H_2O} + 2\lambda(\Delta h)_{H_2O} = \lambda h_f - 0.03\lambda LHV
 \end{aligned}$$

## Chapitre V : Modélisation de la combustion sans flamme

---

$$\begin{aligned} \Rightarrow & \mathbf{0.7748}(\Delta h)_{N_2} + \mathbf{0.2059}(\Delta h)_{O_2} + \mathbf{0.0003}(\Delta h)_{CO_2} + \mathbf{0.019}(\Delta h)_{H_2O} \\ & = \lambda h_f - 0.03\lambda LHV - (-2\lambda(\Delta h)_{O_2} + \lambda(h_f^\circ)_{CO_2} + \lambda(\Delta h)_{CO_2} \\ & \quad + 2\lambda(h_f^\circ)_{H_2O} + 2\lambda(\Delta h)_{H_2O}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & \mathbf{0.7748}(\Delta h)_{N_2} + \mathbf{0.2059}(\Delta h)_{O_2} + \mathbf{0.0003}(\Delta h)_{CO_2} + \mathbf{0.019}(\Delta h)_{H_2O} \\ & = \lambda h_f - 0.03\lambda LHV - \left( -2\lambda(h_f^T)_{O_2} + \lambda(h_f^T)_{CO_2} + 2\lambda(h_f^T)_{H_2O} \right) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{\mathbf{0.7748}(\Delta h)_{N_2} + \mathbf{0.2059}(\Delta h)_{O_2} + \mathbf{0.0003}(\Delta h)_{CO_2} + \mathbf{0.019}(\Delta h)_{H_2O}}{h_f - 0.03LHV - \left( -2(h_f^T)_{O_2} + (h_f^T)_{CO_2} + 2(h_f^T)_{H_2O} \right)}$$

Aussi, le ratio Air/fuel, qui est intimement lié à l'équivalent ratio est paramétré comme on peut le voir dans l'expression de dessus.

Comme une petite conclusion sur ce modèle de combustion sans flamme, c'est une post-combustion, qui contribue à limiter les gaz à effet de serre d'une manière considérée, et elle s'opère aux basses températures par rapport à la combustion classique.

## Conclusion générale

À travers l'étude menée dans cette thèse, on peut conclure et tirer d'une manière non exhaustive, plusieurs points pertinents qui touchent à l'optimisation d'une manière générale et potentiellement aux centrales thermodynamiques dites hybrides.

Dans le premier chapitre, nous avons rassemblé plusieurs données relatives au soleil en général et les techniques du captage du rayonnement solaire des différentes centrales hybrides actuelles qui font un élan énergétique (Maroc, Espagne...).

Elles utilisent conjointement, du fuel et de la concentration solaire communément appelée solaire thermodynamique. C'est pourquoi nous avons eu l'idée de scinder le travail sur deux grands volets. Le premier, touche le rayonnement solaire sous une forme de flux thermique et l'autre elle balaye la combustion.

Le second et troisième chapitre, nous les avons dédiés à la modélisation des équations qui gouvernent le mouvement du fluide à l'intérieur des conduites.

la démarche par la méthode d'estimation de flux de chaleur fonctionne sous l'algorithme de la méthode du gradient conjugué. Pour cela, nous avons pris deux configurations majeures, à savoir, une conduite plate et une cylindrique. la technique du gradient conjugué a été utilisée en démarrant du résultat final passant par une construction inverse et itérative à la fois, technique biaisé par deux grand paramètres qui décrivent et cadrent la pertinence de cette méthode.

le premier c'est l'écart type, ou standard déviation, qui est conjecturé avec une fonctionnelle (fonction objective) basée sur la méthode des moindres carrés, et le nombre d'itérations à utiliser. Ainsi, à partir de 0.0008 de la valeur de l'écart type, le résultat commence à diverger et surtout avec un nombre minimal des itérations utilisées.

L'écart type donne des résultats fructueux pour des valeurs au-dessous de 0.001, ce qui est vu pour les valeurs de 0.0005 et 0.0008 où les courbent se rapprochent davantage de la courbe du résultat exact.

Il est de même pour les itérations qui affichent de bonnes approximations au-dessus de 40 itérations. Avec cette méthode utilisée, nous sommes remontés en étape arrière afin de retrouver la quantité quasi exacte de l'énergie absorbée par le fluide.

Cette technique est construite par un ensemble de trois systèmes d'équations puis montée dans l'algorithme du gradient conjugué qui fonctionne itérativement jusqu'au trouvé l'optimum.

Le quatrième chapitre est consacré intégralement à la chambre de combustion où divers procès énergétiques aient lieu. Ainsi, le méthane comme gaz de combustion (hydrocarbure) fréquemment utilisé dans ces centrales, est modélisé.

Nous avons essayé de trouver la température de combustion adiabatique, qui a un intérêt inestimable dans la combustion, à partir de l'équation stœchiométrique et de celles qui affichent plus et moins de carburant avec leurs compositions respectives.

Elle est de l'ordre de 2300 K. Mais vu que ces températures ont une contrainte métallurgique, nous avons essayé de fouiller entre les deux autres mixtures. Tout cela a été soldé par paramétrer la température comme fonction de l'équivalent ratio, où nous avons donné avec une précision avancée, l'équation qui les lie. Elle est de l'ordre de neuf.

Un autre paramètre que nous avons suivi sont les gaz de combustion, surtout le  $CO$  et  $CO_2$ . Ces proportions sont relatives et sensibles avec l'équivalent ratio qui tarade l'équation de combustion en général. Ainsi, pour ses valeurs inférieures à un, la fraction molaire de l'oxygène ne cesse de diminuer jusqu'à anéantissement total pour un équivalent ratio égal à un  $\phi = 1$ . Quant à celles des  $H_2O$  et  $CO_2$ , elles augmentent au fur et à mesure que  $\phi$  augmente, les molécules de  $CO$  ne figurent pas dans ce mode de combustion, car étant que la mixture est diluée (fuel lean mixture) qui n'a que trois comme produits de combustion à savoir  $O_2$ ,  $CO_2$  et  $H_2O$ .

La combustion commence à être complexe, à partir d'un équivalent ratio supérieur à un. Dans cas de figure, de nouvelles espèces apparaissent, le  $CO$  et  $H_2$  participent comme produits de combustion et de nouvelles proportions vont être occupées par les autres produits déjà figurant dans la mixture fine (où  $\phi < 1$ ). leur fraction molaire affiche des courbes croissantes, ce qui justifie que l'oxygène provient de la dissociation de molécules de  $CO_2$  et  $H_2O$  à la fois et qui contribuent ensemble à créer de nouvelles espèces de  $CO$  et  $H_2$ . Notant que dans les hautes températures, d'autres réactions parasites peuvent apparaître. Le  $N_2$  commence à faire de liaisons avec l'oxygène libéré par les molécules  $CO_2$  et  $H_2O$  et forme de dangereuses espèces comme le  $NO$  ou le  $NO_2$ . ils contribuent massivement au réchauffement climatique. Chose qu'on constate réellement ces dernières années.

Dans le dernier chapitre, une proposition d'utiliser un autre mode de combustion (post-combustion) afin de réduire les gaz toxiques et à effet de serre a été modélisée. Cette nouvelle méthode appuie sur l'auto-inflammation du carburant, ainsi sous les conditions de température et d'enthalpie correspondante, on arrive à faire une combustion sans flamme, ce qui réduit considérablement les émissions des gaz à effet de serre et les  $NOx$

Comme perspective, et pour approfondir cette étude, nous pouvons canaliser les efforts de chercheurs qui peuvent venir, à ajouter le mode de rayonnement comme mode de transfert dans l'étude de l'optimisation, car nous avons travaillé seulement sur la convection forcée du fluide. Ceci permet de faire une étude complète. Dans le mode de combustion sans flamme, nous souhaitons voir la consommation du carburant dans les deux cas, chose que nous n'avons pas atteint à couvrir dans notre étude.

## Références Bibliographiques

1. **Meunier, F.** *Domestiquer l'effet de serre : Énergies et développement durable*. Paris : Dunod, 2005. p. 171. 2 10 048754 X.
2. **Bobin, J.L., Huffer, E., Nifenecker, H.,** *l'énergie de demain: technique environnement économie*. Grenoble : EDP sciences, 2005. 2-86883-771-9.
3. **Meunier, F.** *thermodynamique de l'ingénieur Énergétique. Environnement*. Paris : Dunod, 2004. p. 359. 2 10 007154 8.
4. **Adnane Labeled, Moummi Nouredine, Kamel Aoues, Miloud Zellouf, Abdelhafid Moummi.** Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle. *Revue des énergies renouvelable*. 2009, Vol. 12, 04, pp. 551-561.
5. **Benderradji A., Ben Moussa H., Ameghchouche M.** Simulation et Prédiction des Pertes Thermiques pour l'Absorbeur d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique. *Revue des Energies Renouvelables*. 11 Journée Internationale de Thermique, 2003, pp. 67-72.
6. **Benkhelifa, A.** Optimisation d'un Capteur Solaire Plan. [éd.] Centre de Développement des Energies Renouvelables. *Revue des Energies Renouvelables*. 1998, pp. 13-18.
7. **Jean Taine, Jean-Pierre Petit.** *Transferts thermiques: Applications*. Paris : Dunod, 1991. 2-10-000112-4.
8. **Guillot, E.** DishStirling à Odeillo : EuroDish, 8ème rencontre du réseau des mécaniciens. 2007.
9. **Pierre GARCIA, Alain FERRIERE, Stéphane PLAYS, Jean-Jacques BEZIAN.** Modélisation de centrales solaires thermodynamiques. *Congrès Français de Thermique*. 2007.
10. *Etude d'un concentrateur solaire linéique fixe intégré en toiture de bâtiment.* **Truyols Llorenç Sureda, Jean-Jacques Bézian.** Tanger, Maroc : s.n., 2005. 12èmes Journées internationales de thermique, JITH 2005. pp. 49-52.
11. **W. Chekirou\*, N. Boukheit et T. Kerbache.** Différents modes de transfert de chaleur dans un absorbeur. *Revue des Energies Renouvelables*. 2007, pp. 21-28.
12. **Chen, W.L., Yang, Y.C.** An inverse problem in determining the heat transfer rate around two in line cylinders placed in a cross stream., *Energy conversion and management*, Mars 2007, Vol. 48, pp. 1996-2005.
13. **Chen, W.L., Yang, Y.C., Chang, W.J., Lee, H.L.** Inverse problem of estimating transient heat transfer rate on external wall of forced convection pipe. *Energy Conversion and Management*, Avril 2008, Vol. 49, pp. 2117-2123.
14. **David T.W. LIN., Yan, W.M., Li, H.Y.** Inverse problem of unsteady conjugated forced convection in parallel plate channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Août 2008, Vol. 51, pp. 993-1002.

15. **Lin, S., Chu, H.S.** Application of inverse problem algorithm for temperature uniformity in rapid thermal processing. *Thin Solid Film*, Septembre 2001, Vol. 402, pp. 280-289.
16. **Jaluria, Y.** Simulation-based optimization of thermal systems. *Applied Thermal Engineering*, Janvier 2008, Vol. 29, pp. 1346-1355.
17. **Alifanov, O.M.** Solution of an inverse problem of heat conduction by iteration method. 04, *J. Eng. Phy*, 1974, Vol. 26, pp. 471-476.
18. **M.N. Ozisik, H.R.B. Orlande.** *Inverse heat transfer*. New York : Taylor and Francis, 2000.
19. **David T.W. LIN., Yang, C.Y.** The estimation of the strength of the heat source in the heat conduction problems. *Applied Mathematical Modelling*, Décembre 2006, Vol. 31, pp. 2696-2710.
20. **Y Favennec, Yassine Rouizi, D Petit.** On the use of reduced models obtained through identification for feedback optimal control problems in a heat convection–diffusion problem. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 01 Mars 2010, Vol. 199, pp. 1193-1201.
21. **Yun, K.H., Seung, W.B.** Inverse analysis for estimating the unsteady inlet temperature distribution for two-phase laminar flow in a channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Octobre 2005, Vol. 49, pp. 1137-1147.
22. **Santos MJ, Miguel-Barbero C, Merchan RP, Medina A, Calvo Hernandez A.** Roads to improve the performance of hybrid thermosolar gas turbine power plants: working fluids and multi-stage configurations. *Energy Convers Manag*, 2018, Vol. 165, pp. 578–192.
23. **Hosseini SE, Barzegaravval H, Bruce C, Wahid MA.** Hybrid solar flameless combustion system: modeling and thermodynamic analysis. *Energy Convers Manag*, 2018, Vol. 166, pp. 146–55.
24. **A.S. Vaka, P.Talukdar.** Novel inverse heat transfer technique for estimation of properties and location-specific process parameters of roof-mounted solar PV plants. *Thermal science and engineering progress*, 2020, Vol. 19, pp. 1-15.
25. **TE Boukelia, O Arslan, MS Mecibah.** ANN-based optimization of a parabolic trough solar thermal power plant. *Applied Thermal Engineering*, 2015, Vol. 107, pp. 1210–1218.
26. **TE Boukelia, O Arslan, MS Mecibah.** Potential assessment of a parabolic trough solar thermal powerplant considering hourly analysis: ANN-based approach. *Renewable Energy*, 2017, Vol. 105, pp. 324-333.
27. **Zhichun Liu, Shiping Zhu, Ya Ge, Feng Shan, Lingping Zeng, Wei Liu.** Geometry optimization of two-stage thermoelectric generators using simplified conjugate-gradient method. *Applied Energy*, 15 Mars 2017, Vol. 190, pp. 540-552.
28. **A. Ramos, F.Ramos.** Strategies in tower solar power plant optimization. *Solar Energy*, Septembre 2012, Vol. 86, pp. 2536-2548.

29. **Anderson, D.A., Tannehil, J.C., Pletcher, R.H.** *Series in computational methods in mechanics and thermal sciences:Computational fluid mechanics and heat transfer.* Washington : McGraw-Hill book company, 1984. p. 591. 0-07-050328-1.
30. **PATANKAR, S.V.** *Series in computational and physical processes in mechanics and thermal sciences: Numerical heat transfer and fluid flow.* s.l. : Hemisphere Publishing Corporation-Taylor & Francis, USA, 1980. p. 195. 0-07-048740-5.
31. **J.P.Holman.** *Heat Transfer.* [éd.] Sixième édition. s.l. : McGraw-Hill Book Company, 1986. p. 667. 0-07-029620-0.
32. **Allaire, G.** *Analyse numérique et optimisation:Une introduction à la modélisation mathématique et à la simulation numérique.* Deuxième édition. s.l. : Les éditions de l'école Polytechnique , 2014. p. 461.
33. **Jannot, Yves.** *Transferts thermiques :Cours Transferts thermiques.* s.l. : Ecole des Mines Nancy, 2009. p. 158.
34. **Scheid, J.F.** *Méthode numérique pour la dynamique des fluides .* Lorraine : Université de Lorraine, 2012. p. 181.
35. **Ionut, D., Pascal, J., Sidi Mahmoud, K., Marie, P.** *Introduction au calcul scientifique par la pratique: 12 projets résolus avec MATLAB.* Paris : Dunod, 2005. p. 287. 2 10 0048709 4.
36. **Eric Goncalvès, Da Silva.** *Méthodes et Analyse Numériques.* s.l. : Institut Polytechnique de Grenoble, 2005.
37. **Lin, S., Chu, H.S.** Application of inverse problem algorithm for temperature uniformity In rapid thermal processing. *Thin Solid Film*, Septembre 2001,Vol. 402, pp. 280-289.
38. **Chen, W.L., Yang, Y.C.** An inverse problem in determining the heat transfer rate around two in line cylinders placed in a cross stream. *Energy conservations and management*, Mars 2007, Vol. 48, pp. 1996-2005
39. **Alifanov, O.M., Artyukhin, E. A.** Regularized numerical solution of nonlinear inverse heat-conduction problem. *Journal of Engineering Physics*, 1975,Vol. 29, pp. 934-938.
40. **Rachid Saim, Said Abboudi, Boumediene Benyoucef, Ahmed Azzi.** *Analyse numérique de la convection forcée turbulente dans les tubes munis des chicanes transversales.* Albi : s.n., 13èmes Journées Internationales de Thermique. 30 Août 2007,
41. **Michel Robichaud, J.-Claude Methot, Marc Dupuis, Edgar Dervedde.** Simulation bidimensionnelle de phénomènes de convection naturelle et forcée en formulation primitive. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Août 1987,Vol. 65, pp. 550-558.
42. **Zhong Wan, ZhanLu Yang , YaLin Wang.** New spectral PRP conjugate gradient method for unconstrained optimization. *Applied Mathematics Letters*, 2011, Vol.24, pp.16-22.
43. **Osuna R, Fernandez V, Romero MBlanco M, Blanco M.** *PS10: a 10 MW solar thermal power plant for southern Spain.* [éd.] Sydney, Australia *Proceedings of 10th Solar PACES conference.* Sydney, Australia : s.n., 2000. pp. 37–78.

44. **Solúcar, Inabensa, Fichtner, Ciemat, DLR.** *Final technical progress report: 10 MW solar thermal power plant for Southern Spain.* 2006.
45. **M. Mustafa, S. Abdelhady et A. Elweteedy.** Analytical Study of an Innovated Solar Power Tower (PS10) in Aswan. *International Journal of Energy Engineering*, June 2012, Vol. 2, pp. 273–278.
46. **Merchan RP, Santos MJ, Medina A, Calvo Hernandez A.** Thermodynamic model of a hybrid thermosolar plant. *Renewable Energy*, Décembre 2018, Vol. 128, pp. 473–483.
47. **Olivenza-Leon D, Medina A, Calvo Hernandez A.** Thermodynamic modeling of an hybrid solar gas- turbine power plant. *Energy Conversion and Managment*, 2015, Vol. 93, pp. 435–447.
48. **Santos MJ, Merchan RP, Medina A, Calvo Hernandez A.** Seasonal thermodynamic prediction of the performance of a hybridsolar gas-turbine power plant. *Energy Conversion Managment*, 2016, Vol. 115, pp. 89–102.
49. **Meriche IE, Baghidja A, Boukelia TE.** Design and performance evaluation of solar gas turbine power plant in South Western Algeria. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2014, Vol. 04, pp. 224–232.
50. **John A. Duffie, William A. Beckman.** *Solar engineering of thermal processes.* 4ème édition. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2004. p. 928. 978-0-470-87366-3.
51. **Merchan RP, Santos MJ, Reyes-Ramirez I, Medina A, Calvo Hernandez A.** Modeling hybrid solar gas-turbine power plants: thermodynamic projection of annual performance and emission. *Energy Convers Manag*, 2017, Vol. 134, pp. 314–326.
52. **Pitz-Paal R, Bayer Botero N, Steinfeld A.** Heliostat field layout optimization for high temperature solar thermochemical processing. *Solar Energy*, 2011, Vol. 85, pp. 334–343.
53. **Michael J. Moran, Howard N. Shapiro.** *Fundamentals of Engineering thermodynamics.* [éd.] Fifth édition. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, 2006. p. 825. 13 978-0-470-03037-0.
54. **Noureddine Yamani, Abdallah Khellaf , Kamal Mohammedi , Omar Behar.** Assessment of solar thermal tower technology under Algerian climate. *Energy*, 2017, Vol. 126, pp. 444–460.
55. **Ting Yue, Noam Lior.** Thermodynamic analysis of hybrid Rankine cycles using multiple heat sources of different temperatures. *Applied Energy*, 2018, Vol. 222, pp. 564–583.
56. **TORII Shuichi, YANO Toshiaki, TSUNODA Yukio.** *Adiabatic Flame Temperature and Specific Heat of Combustion Gases.* Kagoshima University Faculty of Engineering. Japan : s.n. p. 17. Research Report.
57. **Chao Li ID, Rongrong Zhai, Yongping Yang.** Optimization of a Heliostat Field Layout on Annual Basis Using a Hybrid Algorithm Combining Particle Swarm Optimization Algorithm and Genetic Algorithm. *Energies*, Novembre 2017, Vol. 10, pp. 1–15.
58. **Xiudong Wei, Zhenwu Lu.** A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant. *Renewable Energy*, 2010, Vol. 35, pp. 1970–1975.

59. **Wei X.D, Lu Z.W, Lin Z.** Optimization procedure for design of heliostat field layout of a 1MWe solar tower thermal power plant. *Proceedings of the SPIE*, 2007, Vol. 6841, pp. 1-10.
60. **Abraham Kribus, H Ries, W Spirkel.** Inherent limitations of volumetric solar receivers. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1996, Vol. 05, pp. 118-151.
61. **S. Sukumaran, K. Sudhakar.** Performance analysis of solar powered airport based on energy and exergy analysis. *Energy*, 2018, Vol. 149, pp. 1000-1009.
62. **Law, Chung K.** *Combustion physics*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2006. p. 716. 978-0-511-24584-8.
63. **B.LHeywood, John.** *Internal combustion engine fundamentals*. [éd.] McGraw-Hill Education. First edition. United States of America : s.n., 1988. p. 917. 0-07-028637-X.
64. **H. Tsuji, A. K.Gupta, T. Hasegawa, M. Katsuki, K.Kishimoto, M. Morita.** *High Temperature Air Combustion: From Energy conservation to pollution reduction*. Japan : CRC Press, 2003. p. 387. 0-8493-1036-9.
65. **Behar, O.** Solar thermal power plants – A review of configurations and Performance comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 92, pp. 608–627.
66. **LI PengFei, MI JianChun, DALLY B B & all.** Progress and recent trend in MILD Combustion. *SCIENCE CHINA. Technological Sciences*, Vol. 54, pp. 255-269.
67. **André A. V. Perpignan, Mathijs G. Talboom, Yeshayahou Levy, Arvind Gangoli Rao.** Emission Modeling of an interturbine burner based on Flameless combustion. *Energy & fuel*, 2018, Vol. 32, pp. 822-838.
68. **Seyed Ehsan Hosseini, Ghobad Bagheri, Mazlan Abdul Wahid.** *Numerical investigation of biogas flameless combustion*. *Energy Conversion and Management*, September 2014, Vol. 81, pp. 41-50.
69. **Noor M.M, Andrew P.Wandel, Talal Yusaf.** The simulation of biogas combustion in a Mild burner. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2014, Vol. 6, pp. 995-1013.
70. **R.Soltani, P.Mohammadzadeh Keleshtery, M.Vahdati, M.H.Khoshgoftar Manesh, M.A.Rosen, M.Amidpour.** Multi-objective optimization of a solar-hybrid cogeneration cycle: Application to CGAM problem. *Energy conversion and Management*, 2014, Vol. 81, pp. 60-71.
71. **H, Köten.** Comparison of various combustion models within a multidimensional framework applied to heavy duty CI engine [MSc thesis]. *thèse doctorale, Marmara Üniversitesi*. Turkey : s.n., 2009.
72. **H, Köten.** Advanced numerical and experimental studies on ci engine emissions. *Journal of Thermal Engineering*, 2018, Vol. 4, pp. 2234–2247.
73. **Unal F, Temir G, Koten H.** Energy, exergy and exergoeconomic analysis of solar-assisted vertical ground source heat pump system for heating season. *J Mech Sci Technol*, 2018, Vol. 32, pp. 3929–3942.

74. **Lin, S., Chu, H.S.** Application of inverse problem algorithm for temperature uniformity In rapid thermal processing. *Thin Solid Film*, Septembre 2001, Vol. 402, pp. 280-289.
75. **Chen, W.L., Yang, Y.C.** An inverse problem in determining the heat transfer rate around two in line cylinders placed in a cross stream. *Energy conservations and management*, Mars 2007, Vol. 48, pp. 1996-2005.
76. **S. Nikbakht Naserabad, A. Mehrpanahi, G. Ahmadi.** Multi-objective optimization of HRSG configurations on the steam power plant repowering specifications. *Energy*, 2018, Vol. 159, pp. 277-293.

## Annexe I

✚ **Pour T=1000K**

Table IV-1 : Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1000} = 0,69$

| Constante d'équilibre | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-----------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1000} = 0,69$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.0962$<br>$Y_{CO_2} = 0.9038$<br>$Y_{H_2} = 0.2674$<br>$Y_{H_2O} = 1.7326$ | $X_{CO} = 0.0321$<br>$X_{CO_2} = 0.3013$<br>$X_{H_2} = 0.0891$<br>$X_{H_2O} = 0.5775$ |
|                       | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.1811$<br>$Y_{CO_2} = 0.8189$<br>$Y_{H_2} = 0.4855$<br>$Y_{H_2O} = 1.5145$ | $X_{CO} = 0.0604$<br>$X_{CO_2} = 0.2730$<br>$X_{H_2} = 0.1618$<br>$X_{H_2O} = 0.5048$ |
|                       | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.2565$<br>$Y_{CO_2} = 0.7435$<br>$Y_{H_2} = 0.6666$<br>$Y_{H_2O} = 1.3334$ | $X_{CO} = 0.0855$<br>$X_{CO_2} = 0.2478$<br>$X_{H_2} = 0.2222$<br>$X_{H_2O} = 0.4445$ |
|                       | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.3237$<br>$Y_{CO_2} = 0.6763$<br>$Y_{H_2} = 0.8191$<br>$Y_{H_2O} = 1.1809$ | $X_{CO} = 0.1079$<br>$X_{CO_2} = 0.2254$<br>$X_{H_2} = 0.2730$<br>$X_{H_2O} = 0.3936$ |
|                       | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.384$<br>$Y_{CO_2} = 0.616$<br>$Y_{H_2} = 0.9493$<br>$Y_{H_2O} = 1.0507$   | $X_{CO} = 0.1280$<br>$X_{CO_2} = 0.2053$<br>$X_{H_2} = 0.3164$<br>$X_{H_2O} = 0.3502$ |
|                       | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.4384$<br>$Y_{CO_2} = 0.5616$<br>$Y_{H_2} = 1.0616$<br>$Y_{H_2O} = 0.9384$ | $X_{CO} = 0.1461$<br>$X_{CO_2} = 0.1872$<br>$X_{H_2} = 0.3539$<br>$X_{H_2O} = 0.3128$ |
|                       | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.4876$<br>$Y_{CO_2} = 0.5124$<br>$Y_{H_2} = 1.1594$<br>$Y_{H_2O} = 0.8406$ | $X_{CO} = 0.1625$<br>$X_{CO_2} = 0.1708$<br>$X_{H_2} = 0.3865$<br>$X_{H_2O} = 0.2802$ |
|                       | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.5324$<br>$Y_{CO_2} = 0.4676$<br>$Y_{H_2} = 1.2454$<br>$Y_{H_2O} = 0.7546$ | $X_{CO} = 0.1775$<br>$X_{CO_2} = 0.1559$<br>$X_{H_2} = 0.4151$<br>$X_{H_2O} = 0.2515$ |
|                       | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.5733$<br>$Y_{CO_2} = 0.4267$<br>$Y_{H_2} = 1.3214$<br>$Y_{H_2O} = 0.6786$ | $X_{CO} = 0.1911$<br>$X_{CO_2} = 0.1422$<br>$X_{H_2} = 0.4405$<br>$X_{H_2O} = 0.2262$ |
|                       | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.61$<br>$Y_{CO_2} = 0.3892$<br>$Y_{H_2} = 1.3892$<br>$Y_{H_2O} = 0.6108$   | $X_{CO} = 0.2034$<br>$X_{CO_2} = 0.1298$<br>$X_{H_2} = 0.4632$<br>$X_{H_2O} = 0.2037$ |

**✚ Pour T=1100K**

Table IV-2: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1100} = 1,0069$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1100} = 1.0069$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.1217$<br>$Y_{CO_2} = 0.8783$<br>$Y_{H_2} = 0.2419$<br>$Y_{H_2O} = 1.7581$ | $X_{CO} = 0.0406$<br>$X_{CO_2} = 0.2928$<br>$X_{H_2} = 0.0806$<br>$X_{H_2O} = 0.5860$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.223$<br>$Y_{CO_2} = 0.777$<br>$Y_{H_2} = 0.4437$<br>$Y_{H_2O} = 1.5563$   | $X_{CO} = 0.0743$<br>$X_{CO_2} = 0.2590$<br>$X_{H_2} = 0.1479$<br>$X_{H_2O} = 0.5188$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.3087$<br>$Y_{CO_2} = 0.6913$<br>$Y_{H_2} = 0.6144$<br>$Y_{H_2O} = 1.3856$ | $X_{CO} = 0.1029$<br>$X_{CO_2} = 0.2304$<br>$X_{H_2} = 0.2048$<br>$X_{H_2O} = 0.4619$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.382$<br>$Y_{CO_2} = 0.618$<br>$Y_{H_2} = 0.7608$<br>$Y_{H_2O} = 1.2392$   | $X_{CO} = 0.1273$<br>$X_{CO_2} = 0.2060$<br>$X_{H_2} = 0.2536$<br>$X_{H_2O} = 0.4131$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.4456$<br>$Y_{CO_2} = 0.5544$<br>$Y_{H_2} = 0.8878$<br>$Y_{H_2O} = 1.1122$ | $X_{CO} = 0.1485$<br>$X_{CO_2} = 0.1848$<br>$X_{H_2} = 0.2959$<br>$X_{H_2O} = 0.3707$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.5011$<br>$Y_{CO_2} = 0.4989$<br>$Y_{H_2} = 0.9989$<br>$Y_{H_2O} = 1.0011$ | $X_{CO} = 0.1670$<br>$X_{CO_2} = 0.1663$<br>$X_{H_2} = 0.3330$<br>$X_{H_2O} = 0.3337$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.5502$<br>$Y_{CO_2} = 0.4498$<br>$Y_{H_2} = 1.0969$<br>$Y_{H_2O} = 0.9031$ | $X_{CO} = 0.1834$<br>$X_{CO_2} = 0.1499$<br>$X_{H_2} = 0.3656$<br>$X_{H_2O} = 0.3010$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.5937$<br>$Y_{CO_2} = 0.4063$<br>$Y_{H_2} = 1.1841$<br>$Y_{H_2O} = 0.8159$ | $X_{CO} = 0.1979$<br>$X_{CO_2} = 0.1354$<br>$X_{H_2} = 0.3947$<br>$X_{H_2O} = 0.2720$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.6326$<br>$Y_{CO_2} = 0.3674$<br>$Y_{H_2} = 1.2621$<br>$Y_{H_2O} = 0.7379$ | $X_{CO} = 0.2109$<br>$X_{CO_2} = 0.1225$<br>$X_{H_2} = 0.4207$<br>$X_{H_2O} = 0.2460$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.6677$<br>$Y_{CO_2} = 0.3323$<br>$Y_{H_2} = 1.3323$<br>$Y_{H_2O} = 0.6677$ | $X_{CO} = 0.2226$<br>$X_{CO_2} = 0.1108$<br>$X_{H_2} = 0.4441$<br>$X_{H_2O} = 0.2226$ |

**✚ Pour T=1200K**

Table IV-3: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1200} = 1,3646$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1200} = 1.3646$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.1441$<br>$Y_{CO_2} = 0.8559$<br>$Y_{H_2} = 0.2196$<br>$Y_{H_2O} = 1.7804$ | $X_{CO} = 0.0480$<br>$X_{CO_2} = 0.2853$<br>$X_{H_2} = 0.0732$<br>$X_{H_2O} = 0.5935$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.2589$<br>$Y_{CO_2} = 0.7411$<br>$Y_{H_2} = 0.4077$<br>$Y_{H_2O} = 1.5923$ | $X_{CO} = 0.0863$<br>$X_{CO_2} = 0.2470$<br>$X_{H_2} = 0.1359$<br>$X_{H_2O} = 0.5308$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.3526$<br>$Y_{CO_2} = 0.6474$<br>$Y_{H_2} = 0.5705$<br>$Y_{H_2O} = 1.4295$ | $X_{CO} = 0.1175$<br>$X_{CO_2} = 0.2158$<br>$X_{H_2} = 0.1902$<br>$X_{H_2O} = 0.4765$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.4303$<br>$Y_{CO_2} = 0.5697$<br>$Y_{H_2} = 0.7126$<br>$Y_{H_2O} = 1.2874$ | $X_{CO} = 0.1434$<br>$X_{CO_2} = 0.1899$<br>$X_{H_2} = 0.2375$<br>$X_{H_2O} = 0.4291$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.4958$<br>$Y_{CO_2} = 0.5042$<br>$Y_{H_2} = 0.8376$<br>$Y_{H_2O} = 1.1624$ | $X_{CO} = 0.1653$<br>$X_{CO_2} = 0.1681$<br>$X_{H_2} = 0.2792$<br>$X_{H_2O} = 0.3875$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.5517$<br>$Y_{CO_2} = 0.4483$<br>$Y_{H_2} = 0.9483$<br>$Y_{H_2O} = 1.0517$ | $X_{CO} = 0.1839$<br>$X_{CO_2} = 0.1494$<br>$X_{H_2} = 0.3161$<br>$X_{H_2O} = 0.3506$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.5999$<br>$Y_{CO_2} = 0.4001$<br>$Y_{H_2} = 1.0471$<br>$Y_{H_2O} = 0.9529$ | $X_{CO} = 0.2000$<br>$X_{CO_2} = 0.1334$<br>$X_{H_2} = 0.3490$<br>$X_{H_2O} = 0.3176$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.642$<br>$Y_{CO_2} = 0.358$<br>$Y_{H_2} = 1.1358$<br>$Y_{H_2O} = 0.8642$   | $X_{CO} = 0.2140$<br>$X_{CO_2} = 0.1193$<br>$X_{H_2} = 0.3786$<br>$X_{H_2O} = 0.2881$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.679$<br>$Y_{CO_2} = 0.321$<br>$Y_{H_2} = 1.2157$<br>$Y_{H_2O} = 0.7843$   | $X_{CO} = 0.2263$<br>$X_{CO_2} = 0.1070$<br>$X_{H_2} = 0.4052$<br>$X_{H_2O} = 0.2614$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.7118$<br>$Y_{CO_2} = 0.2882$<br>$Y_{H_2} = 1.2882$<br>$Y_{H_2O} = 0.7118$ | $X_{CO} = 0.2373$<br>$X_{CO_2} = 0.0961$<br>$X_{H_2} = 0.4294$<br>$X_{H_2O} = 0.2373$ |

✚ **Pour T=1300K**

Table IV-4: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1300} = 1,7498$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1300} = 1.7498$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.1631$<br>$Y_{CO_2} = 0.8369$<br>$Y_{H_2} = 0.2005$<br>$Y_{H_2O} = 1.7995$ | $X_{CO} = 0.0544$<br>$X_{CO_2} = 0.2790$<br>$X_{H_2} = 0.0668$<br>$X_{H_2O} = 0.5998$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.2893$<br>$Y_{CO_2} = 0.7107$<br>$Y_{H_2} = 0.3774$<br>$Y_{H_2O} = 1.6226$ | $X_{CO} = 0.0964$<br>$X_{CO_2} = 0.2369$<br>$X_{H_2} = 0.1258$<br>$X_{H_2O} = 0.5409$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.3892$<br>$Y_{CO_2} = 0.6108$<br>$Y_{H_2} = 0.5339$<br>$Y_{H_2O} = 1.4661$ | $X_{CO} = 0.1297$<br>$X_{CO_2} = 0.2036$<br>$X_{H_2} = 0.1780$<br>$X_{H_2O} = 0.4887$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.4701$<br>$Y_{CO_2} = 0.5299$<br>$Y_{H_2} = 0.6728$<br>$Y_{H_2O} = 1.3272$ | $X_{CO} = 0.1567$<br>$X_{CO_2} = 0.1766$<br>$X_{H_2} = 0.2243$<br>$X_{H_2O} = 0.4424$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.5367$<br>$Y_{CO_2} = 0.4633$<br>$Y_{H_2} = 0.7966$<br>$Y_{H_2O} = 1.2034$ | $X_{CO} = 0.1789$<br>$X_{CO_2} = 0.1544$<br>$X_{H_2} = 0.2655$<br>$X_{H_2O} = 0.4011$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.5924$<br>$Y_{CO_2} = 0.4076$<br>$Y_{H_2} = 0.9076$<br>$Y_{H_2O} = 1.0924$ | $X_{CO} = 0.1975$<br>$X_{CO_2} = 0.1359$<br>$X_{H_2} = 0.3025$<br>$X_{H_2O} = 0.3641$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.6397$<br>$Y_{CO_2} = 0.3603$<br>$Y_{H_2} = 1.0073$<br>$Y_{H_2O} = 0.9927$ | $X_{CO} = 0.2132$<br>$X_{CO_2} = 0.1201$<br>$X_{H_2} = 0.3358$<br>$X_{H_2O} = 0.3309$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.6803$<br>$Y_{CO_2} = 0.3197$<br>$Y_{H_2} = 1.0975$<br>$Y_{H_2O} = 0.9025$ | $X_{CO} = 0.2268$<br>$X_{CO_2} = 0.1066$<br>$X_{H_2} = 0.3658$<br>$X_{H_2O} = 0.3008$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.7154$<br>$Y_{CO_2} = 0.2846$<br>$Y_{H_2} = 1.1793$<br>$Y_{H_2O} = 0.8207$ | $X_{CO} = 0.2385$<br>$X_{CO_2} = 0.0949$<br>$X_{H_2} = 0.3931$<br>$X_{H_2O} = 0.2736$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.7462$<br>$Y_{CO_2} = 0.2538$<br>$Y_{H_2} = 1.2538$<br>$Y_{H_2O} = 0.7462$ | $X_{CO} = 0.2487$<br>$X_{CO_2} = 0.0846$<br>$X_{H_2} = 0.4179$<br>$X_{H_2O} = 0.2487$ |

 **Pour T=1400K**

Table IV-5: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1400} = 2,1528$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1400} = 2.1528$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.1793$<br>$Y_{CO_2} = 0.8207$<br>$Y_{H_2} = 0.1843$<br>$Y_{H_2O} = 1.8157$ | $X_{CO} = 0.0598$<br>$X_{CO_2} = 0.2736$<br>$X_{H_2} = 0.0614$<br>$X_{H_2O} = 0.6052$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.3148$<br>$Y_{CO_2} = 0.6852$<br>$Y_{H_2} = 0.3518$<br>$Y_{H_2O} = 1.6482$ | $X_{CO} = 0.1049$<br>$X_{CO_2} = 0.2284$<br>$X_{H_2} = 0.1173$<br>$X_{H_2O} = 0.5494$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.4199$<br>$Y_{CO_2} = 0.5801$<br>$Y_{H_2} = 0.5032$<br>$Y_{H_2O} = 1.4968$ | $X_{CO} = 0.1400$<br>$X_{CO_2} = 0.1934$<br>$X_{H_2} = 0.1677$<br>$X_{H_2O} = 0.4989$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.5031$<br>$Y_{CO_2} = 0.4969$<br>$Y_{H_2} = 0.6398$<br>$Y_{H_2O} = 1.3602$ | $X_{CO} = 0.1677$<br>$X_{CO_2} = 0.1656$<br>$X_{H_2} = 0.2133$<br>$X_{H_2O} = 0.4534$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.5704$<br>$Y_{CO_2} = 0.4296$<br>$Y_{H_2} = 0.7629$<br>$Y_{H_2O} = 1.2371$ | $X_{CO} = 0.1901$<br>$X_{CO_2} = 0.1432$<br>$X_{H_2} = 0.2543$<br>$X_{H_2O} = 0.4124$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.6257$<br>$Y_{CO_2} = 0.3743$<br>$Y_{H_2} = 0.8743$<br>$Y_{H_2O} = 1.1257$ | $X_{CO} = 0.2086$<br>$X_{CO_2} = 0.1248$<br>$X_{H_2} = 0.2914$<br>$X_{H_2O} = 0.3752$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.6719$<br>$Y_{CO_2} = 0.3281$<br>$Y_{H_2} = 0.9751$<br>$Y_{H_2O} = 1.0249$ | $X_{CO} = 0.2240$<br>$X_{CO_2} = 0.1094$<br>$X_{H_2} = 0.3250$<br>$X_{H_2O} = 0.3416$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.711$<br>$Y_{CO_2} = 0.289$<br>$Y_{H_2} = 1.0667$<br>$Y_{H_2O} = 0.9333$   | $X_{CO} = 0.2370$<br>$X_{CO_2} = 0.0963$<br>$X_{H_2} = 0.3556$<br>$X_{H_2O} = 0.3111$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.7445$<br>$Y_{CO_2} = 0.2555$<br>$Y_{H_2} = 1.1502$<br>$Y_{H_2O} = 0.8498$ | $X_{CO} = 0.2482$<br>$X_{CO_2} = 0.0852$<br>$X_{H_2} = 0.3834$<br>$X_{H_2O} = 0.2833$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.7734$<br>$Y_{CO_2} = 0.2266$<br>$Y_{H_2} = 1.2266$<br>$Y_{H_2O} = 0.7734$ | $X_{CO} = 0.2578$<br>$X_{CO_2} = 0.0755$<br>$X_{H_2} = 0.4089$<br>$X_{H_2O} = 0.2578$ |

✚ Pour T=1500K

Table IV-6: Distribution de la fraction molaire à 1500K ou sous  $K_p^{T=1500} = 2,5645$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1500} = 2.5645$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.193$<br>$Y_{CO_2} = 0.807$<br>$Y_{H_2} = 0.1706$<br>$Y_{H_2O} = 1.8294$   | $X_{CO} = 0.0643$<br>$X_{CO_2} = 0.2690$<br>$X_{H_2} = 0.0569$<br>$X_{H_2O} = 0.6098$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.3365$<br>$Y_{CO_2} = 0.6635$<br>$Y_{H_2} = 0.3302$<br>$Y_{H_2O} = 1.6698$ | $X_{CO} = 0.1122$<br>$X_{CO_2} = 0.2212$<br>$X_{H_2} = 0.1101$<br>$X_{H_2O} = 0.5566$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.4457$<br>$Y_{CO_2} = 0.5543$<br>$Y_{H_2} = 0.4774$<br>$Y_{H_2O} = 1.5226$ | $X_{CO} = 0.1486$<br>$X_{CO_2} = 0.1848$<br>$X_{H_2} = 0.1591$<br>$X_{H_2O} = 0.5075$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.5307$<br>$Y_{CO_2} = 0.4693$<br>$Y_{H_2} = 0.6121$<br>$Y_{H_2O} = 1.3879$ | $X_{CO} = 0.1769$<br>$X_{CO_2} = 0.1564$<br>$X_{H_2} = 0.2040$<br>$X_{H_2O} = 0.4626$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.5984$<br>$Y_{CO_2} = 0.4016$<br>$Y_{H_2} = 0.735$<br>$Y_{H_2O} = 1.265$   | $X_{CO} = 0.1995$<br>$X_{CO_2} = 0.1339$<br>$X_{H_2} = 0.2450$<br>$X_{H_2O} = 0.4217$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.6532$<br>$Y_{CO_2} = 0.3468$<br>$Y_{H_2} = 0.8468$<br>$Y_{H_2O} = 1.1532$ | $X_{CO} = 0.2177$<br>$X_{CO_2} = 0.1156$<br>$X_{H_2} = 0.2823$<br>$X_{H_2O} = 0.3844$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.6983$<br>$Y_{CO_2} = 0.3017$<br>$Y_{H_2} = 0.9488$<br>$Y_{H_2O} = 1.0512$ | $X_{CO} = 0.2328$<br>$X_{CO_2} = 0.1006$<br>$X_{H_2} = 0.3163$<br>$X_{H_2O} = 0.3504$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.736$<br>$Y_{CO_2} = 0.264$<br>$Y_{H_2} = 1.0418$<br>$Y_{H_2O} = 0.9582$   | $X_{CO} = 0.2453$<br>$X_{CO_2} = 0.0880$<br>$X_{H_2} = 0.3473$<br>$X_{H_2O} = 0.3194$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.7679$<br>$Y_{CO_2} = 0.2321$<br>$Y_{H_2} = 1.1268$<br>$Y_{H_2O} = 0.8732$ | $X_{CO} = 0.2560$<br>$X_{CO_2} = 0.0774$<br>$X_{H_2} = 0.3756$<br>$X_{H_2O} = 0.2911$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.7953$<br>$Y_{CO_2} = 0.2047$<br>$Y_{H_2} = 1.2047$<br>$Y_{H_2O} = 0.7953$ | $X_{CO} = 0.2651$<br>$X_{CO_2} = 0.0682$<br>$X_{H_2} = 0.4016$<br>$X_{H_2O} = 0.2651$ |

✚ Pour  $T=1600K$

Table IV- 7: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1600} = 2,9785$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1600} = 2.9785$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.2046$<br>$Y_{CO_2} = 0.7954$<br>$Y_{H_2} = 0.159$<br>$Y_{H_2O} = 1.841$   | $X_{CO} = 0.0682$<br>$X_{CO_2} = 0.2651$<br>$X_{H_2} = 0.0530$<br>$X_{H_2O} = 0.6137$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.3549$<br>$Y_{CO_2} = 0.6451$<br>$Y_{H_2} = 0.3118$<br>$Y_{H_2O} = 1.6882$ | $X_{CO} = 0.1183$<br>$X_{CO_2} = 0.2150$<br>$X_{H_2} = 0.1039$<br>$X_{H_2O} = 0.5627$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.4676$<br>$Y_{CO_2} = 0.5324$<br>$Y_{H_2} = 0.4555$<br>$Y_{H_2O} = 1.5445$ | $X_{CO} = 0.1559$<br>$X_{CO_2} = 0.1775$<br>$X_{H_2} = 0.1518$<br>$X_{H_2O} = 0.5148$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.5541$<br>$Y_{CO_2} = 0.4459$<br>$Y_{H_2} = 0.5888$<br>$Y_{H_2O} = 1.4112$ | $X_{CO} = 0.1847$<br>$X_{CO_2} = 0.1486$<br>$X_{H_2} = 0.1963$<br>$X_{H_2O} = 0.4704$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.6219$<br>$Y_{CO_2} = 0.3781$<br>$Y_{H_2} = 0.7115$<br>$Y_{H_2O} = 1.2885$ | $X_{CO} = 0.2073$<br>$X_{CO_2} = 0.1260$<br>$X_{H_2} = 0.2372$<br>$X_{H_2O} = 0.4295$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.676$<br>$Y_{CO_2} = 0.324$<br>$Y_{H_2} = 0.824$<br>$Y_{H_2O} = 1.176$     | $X_{CO} = 0.2253$<br>$X_{CO_2} = 0.1080$<br>$X_{H_2} = 0.2747$<br>$X_{H_2O} = 0.3920$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.7201$<br>$Y_{CO_2} = 0.2799$<br>$Y_{H_2} = 0.9269$<br>$Y_{H_2O} = 1.9785$ | $X_{CO} = 0.2400$<br>$X_{CO_2} = 0.0933$<br>$X_{H_2} = 0.3090$<br>$X_{H_2O} = 0.3577$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.7566$<br>$Y_{CO_2} = 0.2434$<br>$Y_{H_2} = 1.0212$<br>$Y_{H_2O} = 0.9788$ | $X_{CO} = 0.2522$<br>$X_{CO_2} = 0.0811$<br>$X_{H_2} = 0.3404$<br>$X_{H_2O} = 0.3263$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.7871$<br>$Y_{CO_2} = 0.2129$<br>$Y_{H_2} = 1.1076$<br>$Y_{H_2O} = 0.8924$ | $X_{CO} = 0.2624$<br>$X_{CO_2} = 0.0710$<br>$X_{H_2} = 0.3692$<br>$X_{H_2O} = 0.2975$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.813$<br>$Y_{CO_2} = 0.187$<br>$Y_{H_2} = 1.187$<br>$Y_{H_2O} = 0.813$     | $X_{CO} = 0.2710$<br>$X_{CO_2} = 0.0623$<br>$X_{H_2} = 0.3957$<br>$X_{H_2O} = 0.2710$ |

✚ Pour  $T=1700K$

Table IV-10: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1700} = 3,3884$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1700} = 3.3884$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.2145$<br>$Y_{CO_2} = 0.7855$<br>$Y_{H_2} = 0.1491$<br>$Y_{H_2O} = 1.8509$ | $X_{CO} = 0.0715$<br>$X_{CO_2} = 0.2618$<br>$X_{H_2} = 0.0497$<br>$X_{H_2O} = 0.6170$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.3706$<br>$Y_{CO_2} = 0.6294$<br>$Y_{H_2} = 0.2961$<br>$Y_{H_2O} = 1.7039$ | $X_{CO} = 0.1235$<br>$X_{CO_2} = 0.2098$<br>$X_{H_2} = 0.0987$<br>$X_{H_2O} = 0.5680$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.4863$<br>$Y_{CO_2} = 0.5137$<br>$Y_{H_2} = 0.4368$<br>$Y_{H_2O} = 1.5632$ | $X_{CO} = 0.1621$<br>$X_{CO_2} = 0.1712$<br>$X_{H_2} = 0.1456$<br>$X_{H_2O} = 0.5211$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.5739$<br>$Y_{CO_2} = 0.4261$<br>$Y_{H_2} = 0.5689$<br>$Y_{H_2O} = 1.4311$ | $X_{CO} = 0.1913$<br>$X_{CO_2} = 0.1420$<br>$X_{H_2} = 0.1896$<br>$X_{H_2O} = 0.4770$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.6417$<br>$Y_{CO_2} = 0.3583$<br>$Y_{H_2} = 0.6916$<br>$Y_{H_2O} = 1.3084$ | $X_{CO} = 0.2139$<br>$X_{CO_2} = 0.1194$<br>$X_{H_2} = 0.2305$<br>$X_{H_2O} = 0.4361$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.6952$<br>$Y_{CO_2} = 0.3048$<br>$Y_{H_2} = 0.8048$<br>$Y_{H_2O} = 1.1952$ | $X_{CO} = 0.2317$<br>$X_{CO_2} = 0.1016$<br>$X_{H_2} = 0.2683$<br>$X_{H_2O} = 0.3984$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.7383$<br>$Y_{CO_2} = 0.2617$<br>$Y_{H_2} = 0.9087$<br>$Y_{H_2O} = 1.0913$ | $X_{CO} = 0.2461$<br>$X_{CO_2} = 0.0872$<br>$X_{H_2} = 0.3029$<br>$X_{H_2O} = 0.3638$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.7736$<br>$Y_{CO_2} = 0.2264$<br>$Y_{H_2} = 1.0042$<br>$Y_{H_2O} = 0.9958$ | $X_{CO} = 0.2579$<br>$X_{CO_2} = 0.0755$<br>$X_{H_2} = 0.3347$<br>$X_{H_2O} = 0.3319$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.8029$<br>$Y_{CO_2} = 0.1971$<br>$Y_{H_2} = 1.0918$<br>$Y_{H_2O} = 0.9082$ | $X_{CO} = 0.2676$<br>$X_{CO_2} = 0.0657$<br>$X_{H_2} = 0.3639$<br>$X_{H_2O} = 0.3027$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.8276$<br>$Y_{CO_2} = 0.1724$<br>$Y_{H_2} = 1.1724$<br>$Y_{H_2O} = 0.8276$ | $X_{CO} = 0.2759$<br>$X_{CO_2} = 0.0575$<br>$X_{H_2} = 0.3908$<br>$X_{H_2O} = 0.2759$ |

✚ Pour T=1800K

Table IV-11: Distribution de la fraction molaire à 1800K ou sous  $K_p^{T=1800} = 3,8548$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1800} = 3.8548$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.2242$<br>$Y_{CO_2} = 0.7758$<br>$Y_{H_2} = 0.1395$<br>$Y_{H_2O} = 1.8605$ | $X_{CO} = 0.0747$<br>$X_{CO_2} = 0.2586$<br>$X_{H_2} = 0.0465$<br>$X_{H_2O} = 0.6202$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.3861$<br>$Y_{CO_2} = 0.6139$<br>$Y_{H_2} = 0.2806$<br>$Y_{H_2O} = 1.7194$ | $X_{CO} = 0.1287$<br>$X_{CO_2} = 0.2046$<br>$X_{H_2} = 0.0935$<br>$X_{H_2O} = 0.5731$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.5048$<br>$Y_{CO_2} = 0.4952$<br>$Y_{H_2} = 0.4183$<br>$Y_{H_2O} = 1.5817$ | $X_{CO} = 0.1683$<br>$X_{CO_2} = 0.1651$<br>$X_{H_2} = 0.1394$<br>$X_{H_2O} = 0.5272$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.5935$<br>$Y_{CO_2} = 0.4065$<br>$Y_{H_2} = 0.5494$<br>$Y_{H_2O} = 1.4506$ | $X_{CO} = 0.1978$<br>$X_{CO_2} = 0.1355$<br>$X_{H_2} = 0.1831$<br>$X_{H_2O} = 0.4835$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.6612$<br>$Y_{CO_2} = 0.3388$<br>$Y_{H_2} = 0.6722$<br>$Y_{H_2O} = 1.3278$ | $X_{CO} = 0.2204$<br>$X_{CO_2} = 0.1129$<br>$X_{H_2} = 0.2241$<br>$X_{H_2O} = 0.4426$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.7140$<br>$Y_{CO_2} = 0.2860$<br>$Y_{H_2} = 0.7860$<br>$Y_{H_2O} = 1.2140$ | $X_{CO} = 0.2380$<br>$X_{CO_2} = 0.0953$<br>$X_{H_2} = 0.2620$<br>$X_{H_2O} = 0.4047$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.7560$<br>$Y_{CO_2} = 0.2440$<br>$Y_{H_2} = 0.8911$<br>$Y_{H_2O} = 1.1089$ | $X_{CO} = 0.2520$<br>$X_{CO_2} = 0.0813$<br>$X_{H_2} = 0.2970$<br>$X_{H_2O} = 0.3696$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.7900$<br>$Y_{CO_2} = 0.2100$<br>$Y_{H_2} = 0.9878$<br>$Y_{H_2O} = 1.0122$ | $X_{CO} = 0.2633$<br>$X_{CO_2} = 0.0700$<br>$X_{H_2} = 0.3293$<br>$X_{H_2O} = 0.3374$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.8180$<br>$Y_{CO_2} = 0.1820$<br>$Y_{H_2} = 1.0767$<br>$Y_{H_2O} = 0.9233$ | $X_{CO} = 0.2727$<br>$X_{CO_2} = 0.0607$<br>$X_{H_2} = 0.3589$<br>$X_{H_2O} = 0.3078$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.8415$<br>$Y_{CO_2} = 0.1585$<br>$Y_{H_2} = 1.1585$<br>$Y_{H_2O} = 0.8415$ | $X_{CO} = 0.2805$<br>$X_{CO_2} = 0.0528$<br>$X_{H_2} = 0.3862$<br>$X_{H_2O} = 0.2805$ |

✚ Pour T=1900K

Table IV-12: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1900} = 4, 1591$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion  | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1900} = 4.1591$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.2298$<br>$Y_{CO_2} = 0.7702$<br>$Y_{H_2} = 0.1339$<br>$Y_{H_2O} = 1.8661$ | $X_{CO} = 0.0766$<br>$X_{CO_2} = 0.2567$<br>$X_{H_2} = 0.0446$<br>$X_{H_2O} = 0.6220$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.3952$<br>$Y_{CO_2} = 0.6048$<br>$Y_{H_2} = 0.2715$<br>$Y_{H_2O} = 1.7285$ | $X_{CO} = 0.1317$<br>$X_{CO_2} = 0.2016$<br>$X_{H_2} = 0.0905$<br>$X_{H_2O} = 0.5762$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.5156$<br>$Y_{CO_2} = 0.4844$<br>$Y_{H_2} = 0.4075$<br>$Y_{H_2O} = 1.5925$ | $X_{CO} = 0.1719$<br>$X_{CO_2} = 0.1615$<br>$X_{H_2} = 0.1358$<br>$X_{H_2O} = 0.5308$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.6048$<br>$Y_{CO_2} = 0.3952$<br>$Y_{H_2} = 0.5380$<br>$Y_{H_2O} = 1.4620$ | $X_{CO} = 0.2016$<br>$X_{CO_2} = 0.1317$<br>$X_{H_2} = 0.1793$<br>$X_{H_2O} = 0.4873$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.6724$<br>$Y_{CO_2} = 0.3276$<br>$Y_{H_2} = 0.6609$<br>$Y_{H_2O} = 1.3391$ | $X_{CO} = 0.2241$<br>$X_{CO_2} = 0.1092$<br>$X_{H_2} = 0.2203$<br>$X_{H_2O} = 0.4464$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.7247$<br>$Y_{CO_2} = 0.2753$<br>$Y_{H_2} = 0.7753$<br>$Y_{H_2O} = 1.2247$ | $X_{CO} = 0.2416$<br>$X_{CO_2} = 0.0918$<br>$X_{H_2} = 0.2584$<br>$X_{H_2O} = 0.4082$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.7661$<br>$Y_{CO_2} = 0.2339$<br>$Y_{H_2} = 0.8810$<br>$Y_{H_2O} = 1.1190$ | $X_{CO} = 0.2554$<br>$X_{CO_2} = 0.0780$<br>$X_{H_2} = 0.2937$<br>$X_{H_2O} = 0.3730$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.7993$<br>$Y_{CO_2} = 0.2007$<br>$Y_{H_2} = 0.9784$<br>$Y_{H_2O} = 1.0216$ | $X_{CO} = 0.2664$<br>$X_{CO_2} = 0.0669$<br>$X_{H_2} = 0.3261$<br>$X_{H_2O} = 0.3405$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.8266$<br>$Y_{CO_2} = 0.1734$<br>$Y_{H_2} = 1.0681$<br>$Y_{H_2O} = 0.9319$ | $X_{CO} = 0.2755$<br>$X_{CO_2} = 0.0578$<br>$X_{H_2} = 0.3560$<br>$X_{H_2O} = 0.3106$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.8493$<br>$Y_{CO_2} = 0.1507$<br>$Y_{H_2} = 1.1507$<br>$Y_{H_2O} = 0.8493$ | $X_{CO} = 0.2831$<br>$X_{CO_2} = 0.0502$<br>$X_{H_2} = 0.3836$<br>$X_{H_2O} = 0.2831$ |

Pour  $T=2000K$

Table IV-8: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=2000} = 4,5289$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion   | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|--|---|
| $K_p^{T=2000} = 4.5289$ | $\phi = 1.1$      | $Y_{CO} = 0.2360$<br>$Y_{CO_2} = 0.7640$<br>$Y_{H_2} = 0.1277$<br>$Y_{H_2O} = 1.8723$  | $X_{CO} = 0.0787$<br>$X_{CO_2} = 0.2547$<br>$X_{H_2} = 0.0426$<br>$X_{H_2O} = 0.6241$ |
|                         | $\phi = 1.2$      | $Y_{CO} = 0.4052$<br>$Y_{CO_2} = 0.5948$<br>$Y_{H_2} = 0.2615$<br>$Y_{H_2O} = 1.7385$  | $X_{CO} = 0.1351$<br>$X_{CO_2} = 0.1983$<br>$X_{H_2} = 0.0872$<br>$X_{H_2O} = 0.5795$ |
|                         | $\phi = 1.3$      | $Y_{CO} = 0.5275$<br>$Y_{CO_2} = 0.4725$<br>$Y_{H_2} = 0.3955$<br>$Y_{H_2O} = 1.6045$  | $X_{CO} = 0.1758$<br>$X_{CO_2} = 0.1575$<br>$X_{H_2} = 0.1318$<br>$X_{H_2O} = 0.5348$ |
|                         | $\phi = 1.4$      | $Y_{CO} = 0.6174$<br>$Y_{CO_2} = 0.3826$<br>$Y_{H_2} = 0.5254$<br>$Y_{H_2O} = 1.4746$  | $X_{CO} = 0.2058$<br>$X_{CO_2} = 0.1275$<br>$X_{H_2} = 0.1751$<br>$X_{H_2O} = 0.4915$ |
|                         | $\phi = 1.5$      | $Y_{CO} = 0.6848$<br>$Y_{CO_2} = 0.3152$<br>$Y_{H_2} = 0.64857$<br>$Y_{H_2O} = 1.3515$ | $X_{CO} = 0.2283$<br>$X_{CO_2} = 0.1051$<br>$X_{H_2} = 0.2162$<br>$X_{H_2O} = 0.4505$ |
|                         | $\phi = 1.6$      | $Y_{CO} = 0.7366$<br>$Y_{CO_2} = 0.2634$<br>$Y_{H_2} = 0.7634$<br>$Y_{H_2O} = 1.2366$  | $X_{CO} = 0.2455$<br>$X_{CO_2} = 0.0878$<br>$X_{H_2} = 0.2545$<br>$X_{H_2O} = 0.4122$ |
|                         | $\phi = 1.7$      | $Y_{CO} = 0.7771$<br>$Y_{CO_2} = 0.2229$<br>$Y_{H_2} = 0.8699$<br>$Y_{H_2O} = 1.1301$  | $X_{CO} = 0.2590$<br>$X_{CO_2} = 0.0743$<br>$X_{H_2} = 0.2900$<br>$X_{H_2O} = 0.3767$ |
|                         | $\phi = 1.8$      | $Y_{CO} = 0.8095$<br>$Y_{CO_2} = 0.1905$<br>$Y_{H_2} = 0.9682$<br>$Y_{H_2O} = 1.0318$  | $X_{CO} = 0.2698$<br>$X_{CO_2} = 0.0635$<br>$X_{H_2} = 0.3227$<br>$X_{H_2O} = 0.3439$ |
|                         | $\phi = 1.9$      | $Y_{CO} = 0.8359$<br>$Y_{CO_2} = 0.1641$<br>$Y_{H_2} = 1.0588$<br>$Y_{H_2O} = 0.9412$  | $X_{CO} = 0.2786$<br>$X_{CO_2} = 0.0547$<br>$X_{H_2} = 0.3529$<br>$X_{H_2O} = 0.3137$ |
|                         | $\phi = 2$        | $Y_{CO} = 0.8578$<br>$Y_{CO_2} = 0.1422$<br>$Y_{H_2} = 1.1422$<br>$Y_{H_2O} = 0.8578$  | $X_{CO} = 0.2859$<br>$X_{CO_2} = 0.0474$<br>$X_{H_2} = 0.3807$<br>$X_{H_2O} = 0.2859$ |

## Annexe II

 **T=1000K**

Table IV-1: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1000} = 0,69$  et  $K_{p1}^{T=1000} = 6.10^{-11}$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|---|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1000} = 0.69$<br><br><b>And</b><br><br>$K_{p1}^{T=1000} = 6.10^{-11}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|   | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|   | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|   | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|   | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|   | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|   | $\phi = 0.7$      | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$ | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|   | $\phi = 0.8$      | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$              | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$  |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $e = 0.4$   | $X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$  |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$            |
|  | $\phi = 1$   | $a = 1$<br>$b = 0$<br>$c = 2$<br>$d = 0$<br>$e = 0$                           | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6667$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0$                 |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.9886$<br>$b = 0.1114$<br>$c = 1.8909$<br>$d = 0.3091$<br>$e = 0.0103$  | $X_{CO_2} = 0.2986$<br>$X_{CO} = 0.0337$<br>$X_{H_2O} = 0.5712$<br>$X_{H_2} = 0.0934$<br>$X_{O_2} = 0.0031$  |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.9918$<br>$b = 0.2082$<br>$c = 1.8399$<br>$d = 0.5601$<br>$e = -0.0159$ | $X_{CO_2} = 0.2767$<br>$X_{CO} = 0.0581$<br>$X_{H_2O} = 0.5133$<br>$X_{H_2} = 0.1563$<br>$X_{O_2} = -0.0044$ |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.9812$<br>$b = 0.3188$<br>$c = 1.7670$<br>$d = 0.8330$<br>$e = -0.0241$ | $X_{CO_2} = 0.2532$<br>$X_{CO} = 0.0822$<br>$X_{H_2O} = 0.4559$<br>$X_{H_2} = 0.2149$<br>$X_{O_2} = -0.0062$ |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.9664$<br>$b = 0.4336$<br>$c = 1.6956$<br>$d = 1.1044$<br>$e = -0.0310$ | $X_{CO_2} = 0.2318$<br>$X_{CO} = 0.1040$<br>$X_{H_2O} = 0.4067$<br>$X_{H_2} = 0.2649$<br>$X_{O_2} = -0.0074$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.9183$<br>$b = 0.5817$<br>$c = 1.5640$<br>$d = 1.4360$<br>$e = 0.0089$  | $X_{CO_2} = 0.2037$<br>$X_{CO} = 0.1290$<br>$X_{H_2O} = 0.3469$<br>$X_{H_2} = 0.3185$<br>$X_{O_2} = 0.0020$  |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.8629$<br>$b = 0.7371$<br>$c = 1.4277$<br>$d = 1.7723$<br>$e = 0.0547$  | $X_{CO_2} = 0.1777$<br>$X_{CO} = 0.1518$<br>$X_{H_2O} = 0.2941$<br>$X_{H_2} = 0.3651$<br>$X_{O_2} = 0.0113$  |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.8309$<br>$b = 0.8691$<br>$c = 1.3490$<br>$d = 2.0510$<br>$e = 0.0601$  | $X_{CO_2} = 0.1610$<br>$X_{CO} = 0.1684$<br>$X_{H_2O} = 0.2614$<br>$X_{H_2} = 0.3975$<br>$X_{O_2} = 0.0116$  |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.8840$<br>$b = 0.9160$<br>$c = 1.4357$<br>$d = 2.1643$<br>$e = -0.0598$ | $X_{CO_2} = 0.1655$<br>$X_{CO} = 0.1715$<br>$X_{H_2O} = 0.2688$<br>$X_{H_2} = 0.4053$<br>$X_{O_2} = -0.0112$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.8595$<br>$b = 1.0405$<br>$c = 1.3756$<br>$d = 2.4244$<br>$e = -0.0675$ | $X_{CO_2} = 0.1526$<br>$X_{CO} = 0.1847$<br>$X_{H_2O} = 0.2442$<br>$X_{H_2} = 0.4304$<br>$X_{O_2} = -0.0120$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.8347$<br>$b = 1.1653$<br>$c = 1.3182$<br>$d = 2.6818$<br>$e = -0.0764$ | $X_{CO_2} = 0.1409$<br>$X_{CO} = 0.1967$<br>$X_{H_2O} = 0.2225$<br>$X_{H_2} = 0.4527$<br>$X_{O_2} = -0.0129$ |

✚ **Pour T=1100K**

Table IV-2: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1100} = 1.0069$  et  $K_{p1}^{T=1100} = 1.32 * 10^{-9}$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|---|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1100} = 1,0069$<br><br><b>And</b><br><br>$K_{p1}^{T=1100} = 1.32 * 10^{(-9)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|   | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|   | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|   | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|   | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|   | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$                                      | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$   |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$   | $X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$   |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                     | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$            |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                     | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$            |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$            |
|  | $\phi = 1$   | $a = 1$<br>$b = 0$<br>$c = 2$<br>$d = 0$<br>$e = 0$                           | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6667$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0$                 |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.9599$<br>$b = 0.1401$<br>$c = 1.9216$<br>$d = 0.2784$<br>$e = 0.0093$  | $X_{CO_2} = 0.2901$<br>$X_{CO} = 0.0423$<br>$X_{H_2O} = 0.5807$<br>$X_{H_2} = 0.0841$<br>$X_{O_2} = 0.0028$  |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.9440$<br>$b = 0.2560$<br>$c = 1.8908$<br>$d = 0.5092$<br>$e = -0.0174$ | $X_{CO_2} = 0.2635$<br>$X_{CO} = 0.0715$<br>$X_{H_2O} = 0.5278$<br>$X_{H_2} = 0.1421$<br>$X_{O_2} = -0.0049$ |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.9162$<br>$b = 0.3838$<br>$c = 1.8360$<br>$d = 0.7640$<br>$e = -0.0261$ | $X_{CO_2} = 0.2365$<br>$X_{CO} = 0.0991$<br>$X_{H_2O} = 0.4740$<br>$X_{H_2} = 0.1972$<br>$X_{O_2} = -0.0067$ |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.8827$<br>$b = 0.5173$<br>$c = 1.7699$<br>$d = 1.0301$<br>$e = -0.0263$ | $X_{CO_2} = 0.2115$<br>$X_{CO} = 0.1239$<br>$X_{H_2O} = 0.4241$<br>$X_{H_2} = 0.2468$<br>$X_{O_2} = -0.0063$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.7980$<br>$b = 0.7020$<br>$c = 1.6011$<br>$d = 1.3989$<br>$e = 0.0505$  | $X_{CO_2} = 0.1754$<br>$X_{CO} = 0.1543$<br>$X_{H_2O} = 0.3518$<br>$X_{H_2} = 0.3074$<br>$X_{O_2} = 0.0111$  |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  | $\phi = 1.6$ | a = 0.7570<br>b = 0.8430<br>c = 1.5196<br>d = 1.6804<br>e = 0.0617  | $X_{CO_2} = 0.1557$<br>$X_{CO} = 0.1734$<br>$X_{H_2O} = 0.3126$<br>$X_{H_2} = 0.3456$<br>$X_{O_2} = 0.0127$  |
|  | $\phi = 1.7$ | a = 0.7924<br>b = 0.9076<br>c = 1.5907<br>d = 1.8093<br>e = -0.0416 | $X_{CO_2} = 0.1567$<br>$X_{CO} = 0.1794$<br>$X_{H_2O} = 0.3145$<br>$X_{H_2} = 0.3577$<br>$X_{O_2} = -0.0082$ |
|  | $\phi = 1.8$ | a = 0.7767<br>b = 1.0233<br>c = 1.5595<br>d = 2.0405<br>e = -0.0681 | $X_{CO_2} = 0.1457$<br>$X_{CO} = 0.1919$<br>$X_{H_2O} = 0.2925$<br>$X_{H_2} = 0.3827$<br>$X_{O_2} = -0.0128$ |
|  | $\phi = 1.9$ | a = 0.6607<br>b = 1.2393<br>c = 1.3274<br>d = 2.4726<br>e = 0.0560  | $X_{CO_2} = 0.1148$<br>$X_{CO} = 0.2153$<br>$X_{H_2O} = 0.2306$<br>$X_{H_2} = 0.4296$<br>$X_{O_2} = 0.0097$  |
|  | $\phi = 2$   | a = 2<br>b = 0<br>c = 4<br>d = 0<br>e = -2                          | $X_{CO_2} = 0.5000$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$                   |

✚ **Pour T = 1200K**

Table IV-16: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1200} = 1,3646$  et  $K_{p1}^{T=1200} = 1,72 \cdot 10^{-8}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion          | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| <b><math>K_p^{T=1200} = 1,3646</math></b><br><br><b>et</b><br><b><math>K_{p1}^{T=1200} = 1,72 \cdot 10^{(-8)}</math></b> | $\phi = 0.1$      | a = 0.1<br>b = 0<br>c = 0.2<br>d = 0<br>e = 1.8 | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | a = 0.2<br>b = 0<br>c = 0.4<br>d = 0<br>e = 1.6 | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | a = 0.3<br>b = 0<br>c = 0.6<br>d = 0<br>e = 1.4 | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$      | a = 0.4<br>b = 0                                | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$   |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$   | $X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$  |
|  | $\phi = 0.5$ | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$                         | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$                     |
|  | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                     | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$            |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                     | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$            |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                     | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$            |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$            |
|  | $\phi = 1$   | $a = 1$<br>$b = 0$<br>$c = 2$<br>$d = 0$<br>$e = 0$                           | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6667$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0$                 |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.9440$<br>$b = 0.1560$<br>$c = 1.9623$<br>$d = 0.2377$<br>$e = -0.0031$ | $X_{CO_2} = 0.2863$<br>$X_{CO} = 0.0473$<br>$X_{H_2O} = 0.5952$<br>$X_{H_2} = 0.0721$<br>$X_{O_2} = 0$       |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.9026$<br>$b = 0.2974$<br>$c = 1.9336$<br>$d = 0.4664$<br>$e = -0.0181$ | $X_{CO_2} = 0.2520$<br>$X_{CO} = 0.0830$<br>$X_{H_2O} = 0.5398$<br>$X_{H_2} = 0.1302$<br>$X_{O_2} = -0.0050$ |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.8612$<br>$b = 0.4388$<br>$c = 1.8939$<br>$d = 0.7061$<br>$e = -0.0276$ | $X_{CO_2} = 0.2224$<br>$X_{CO} = 0.1133$<br>$X_{H_2O} = 0.4891$<br>$X_{H_2} = 0.1823$<br>$X_{O_2} = -0.0071$ |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.7787$<br>$b = 0.6213$<br>$c = 1.7673$<br>$d = 1.0327$<br>$e = 0.0270$  | $X_{CO_2} = 0.1842$<br>$X_{CO} = 0.1470$<br>$X_{H_2O} = 0.4181$<br>$X_{H_2} = 0.2443$<br>$X_{O_2} = 0.0064$  |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.7170$<br>$b = 0.7830$<br>$c = 1.6685$<br>$d = 1.3315$<br>$e = 0.0573$  | $X_{CO_2} = 0.1573$<br>$X_{CO} = 0.1718$<br>$X_{H_2O} = 0.3661$<br>$X_{H_2} = 0.2922$<br>$X_{O_2} = 0.0126$  |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.6808$<br>$b = 0.9192$<br>$c = 1.6102$<br>$d = 1.5898$<br>$e = 0.0545$  | $X_{CO_2} = 0.1402$<br>$X_{CO} = 0.1894$<br>$X_{H_2O} = 0.3317$<br>$X_{H_2} = 0.3275$<br>$X_{O_2} = 0.0112$  |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.6943$<br>$b = 1.0057$<br>$c = 1.6496$<br>$d = 1.7504$<br>$e = -0.0219$ | $X_{CO_2} = 0.1367$<br>$X_{CO} = 0.1981$<br>$X_{H_2O} = 0.3248$<br>$X_{H_2} = 0.3447$<br>$X_{O_2} = -0.0043$ |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 1.8$<br>$b = 0$<br>$c = 3.6$<br>$d = 0$<br>$e = -1.6$                    | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$           |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 1.9$<br>$b = 0$<br>$c = 3.8$<br>$d = 0$<br>$e = -1.8$                    | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$           |
|  | $\phi = 2$   | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$<br>$e = -2$                          | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$                      |

 **Pour T=1300K**

Table IV-17: variation des fractions molaires des produits en fonction

$$K_p^{T=1300} = 1.7498 \text{ et } K_{p1}^{T=1300} = 1.51 * 10^{-7}$$

| Constante d'équilibre                     | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|---|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1300} = 1,7498$<br><br><b>And</b> | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|   | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$   | $X_{CO_2} = 0.0909$   |

|   |              |  |   |
|---|--------------|--|---|
| $K_{p1}^{T=1300}$<br>$= 1.51 * 10^{(-7)}$ |              | $b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$                 | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$                        |
|   | $\phi = 0.3$ | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$    | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|   | $\phi = 0.4$ | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$    | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|   | $\phi = 0.5$ | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$        | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|   | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$    | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|   | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$    | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|   | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$    | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$ |
|   | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$    | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$ |
|   | $\phi = 1$   | $a = 1$<br>$b = 0$<br>$c = 2$<br>$d = 0$<br>$e = 0$          | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6667$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|   | $\phi = 1.1$ | $a = 0.9277$<br>$b = 0.1723$<br>$c = 1.9891$<br>$d = 0.2109$ | $X_{CO_2} = 0.2819$<br>$X_{CO} = 0.0523$<br>$X_{H_2O} = 0.6043$<br>$X_{H_2} = 0.0641$             |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $e = -0.0084$   | $X_{O_2} = -0.0026$  |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.8676$<br>$b = 0.3324$<br>$c = 1.9696$<br>$d = 0.4304$<br>$e = -0.0186$ | $X_{CO_2} = 0.2422$<br>$X_{CO} = 0.0928$<br>$X_{H_2O} = 0.5499$<br>$X_{H_2} = 0.1202$<br>$X_{O_2} = -0.0052$ |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.8147$<br>$b = 0.4853$<br>$c = 1.9412$<br>$d = 0.6588$<br>$e = -0.0280$ | $X_{CO_2} = 0.2104$<br>$X_{CO} = 0.1253$<br>$X_{H_2O} = 0.5013$<br>$X_{H_2} = 0.1701$<br>$X_{O_2} = -0.0072$ |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.7088$<br>$b = 0.6912$<br>$c = 1.8005$<br>$d = 0.9995$<br>$e = 0.0453$  | $X_{CO_2} = 0.1670$<br>$X_{CO} = 0.1628$<br>$X_{H_2O} = 0.4241$<br>$X_{H_2} = 0.2354$<br>$X_{O_2} = 0.0107$  |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.6523$<br>$b = 0.8477$<br>$c = 1.7257$<br>$d = 1.2743$<br>$e = 0.0610$  | $X_{CO_2} = 0.1430$<br>$X_{CO} = 0.1859$<br>$X_{H_2O} = 0.3784$<br>$X_{H_2} = 0.2794$<br>$X_{O_2} = 0.0134$  |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.6187$<br>$b = 0.9813$<br>$c = 1.6814$<br>$d = 1.5186$<br>$e = 0.0499$  | $X_{CO_2} = 0.1276$<br>$X_{CO} = 0.2023$<br>$X_{H_2O} = 0.3467$<br>$X_{H_2} = 0.3131$<br>$X_{O_2} = 0.0103$  |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 1.7$<br>$b = 0$<br>$c = 3.4$<br>$d = 0$<br>$e = -1.4$                    | $X_{CO_2} = 0.4595$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9189$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3784$           |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 1.8$<br>$b = 0$<br>$c = 3.6$<br>$d = 0$<br>$e = -1.6$                    | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$           |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 1.9$<br>$b = 0$<br>$c = 3.8$<br>$d = 0$<br>$e = -1.8$                    | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$           |
|  | $\phi = 2$   | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$                                      | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$  |

|  |  |          |                  |
|--|--|----------|------------------|
|  |  | $e = -2$ | $X_{O_2} = -0.5$ |
|--|--|----------|------------------|

**✚ Pour T=1400K**

Table IV-18: Variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1400} = 2,1528$  et  $K_{p1}^{T=1400} = 9,68 \cdot 10^{-7}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1400} = 2.1528$<br><br><b>et</b><br><br>$K_{p1}^{T=1400} = 9.68 * 10^{(-7)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|  | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|  | $\phi = 0.7$      | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$ | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|  | $\phi = 0.8$      | $a = 0.8$<br>$b = 0$                                      | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$   |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$   | $X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$   |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$              |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9999$<br>$b = 0.0001$<br>$c = 1.9999$<br>$d = 0.0001$<br>$e = 0.0001$  | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} \approx 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6666$<br>$X_{H_2} \approx 0$<br>$X_{O_2} \approx 0$ |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.9111$<br>$b = 0.1889$<br>$c = 2.0070$<br>$d = 0.1930$<br>$e = -0.0091$ | $X_{CO_2} = 0.2769$<br>$X_{CO} = 0.0574$<br>$X_{H_2O} = 0.6098$<br>$X_{H_2} = 0.0587$<br>$X_{O_2} = -0.0028$   |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.8381$<br>$b = 0.3619$<br>$c = 2.0000$<br>$d = 0.4000$<br>$e = -0.0190$ | $X_{CO_2} = 0.2340$<br>$X_{CO} = 0.1011$<br>$X_{H_2O} = 0.5585$<br>$X_{H_2} = 0.1117$<br>$X_{O_2} = -0.0053$   |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.7736$<br>$b = 0.5264$<br>$c = 1.9771$<br>$d = 0.6229$<br>$e = -0.0254$ | $X_{CO_2} = 0.1997$<br>$X_{CO} = 0.1359$<br>$X_{H_2O} = 0.5103$<br>$X_{H_2} = 0.1608$<br>$X_{O_2} = -0.0065$   |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.6581$<br>$b = 0.7419$<br>$c = 1.8418$<br>$d = 0.9582$<br>$e = 0.0501$  | $X_{CO_2} = 0.1548$<br>$X_{CO} = 0.1746$<br>$X_{H_2O} = 0.4333$<br>$X_{H_2} = 0.2255$<br>$X_{O_2} = 0.0118$    |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.5995$<br>$b = 0.9005$<br>$c = 1.7735$<br>$d = 1.2265$<br>$e = 0.0635$  | $X_{CO_2} = 0.1314$<br>$X_{CO} = 0.1973$<br>$X_{H_2O} = 0.3886$<br>$X_{H_2} = 0.2688$<br>$X_{O_2} = 0.0139$    |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 1.6$<br>$b = 0$<br>$c = 3.2$<br>$d = 0$<br>$e = -1.2$                    | $X_{CO_2} = 0.4444$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8889$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3333$             |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 1.7$<br>$b = 0$<br>$c = 3.4$<br>$d = 0$<br>$e = -1.4$                    | $X_{CO_2} = 0.4595$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9189$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3784$             |

|  |              |  |  |
|--|--------------|--|--|
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 1.8$<br>$b = 0$<br>$c = 3.6$<br>$d = 0$<br>$e = -1.6$ | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 1.9$<br>$b = 0$<br>$c = 3.8$<br>$d = 0$<br>$e = -1.8$ | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$<br>$e = -2$       | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$            |

 **Pour T=1500K**

Table IV-19: variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1500} = 2.5645$  et  $K_{p1}^{T=1500} = 4.83 * 10^{-6}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1500} = 2.5645$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1500} = 4.83 * 10^{(-6)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|  | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$   | $X_{CO_2} = 0.2308$   |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                                  | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$                                     |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                     | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$              |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                     | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$              |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$              |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9997$<br>$b = 0.0003$<br>$c = 1.9998$<br>$d = 0.0002$<br>$e = 0.0003$  | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} \approx 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6666$<br>$X_{H_2} \approx 0$<br>$X_{O_2} \approx 0$ |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.8968$<br>$b = 0.2032$<br>$c = 2.0216$<br>$d = 0.1784$<br>$e = -0.0092$ | $X_{CO_2} = 0.2725$<br>$X_{CO} = 0.0618$<br>$X_{H_2O} = 0.6143$<br>$X_{H_2} = 0.0542$<br>$X_{O_2} = -0.0028$   |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.8132$<br>$b = 0.3868$<br>$c = 2.0257$<br>$d = 0.3743$<br>$e = -0.0194$ | $X_{CO_2} = 0.2271$<br>$X_{CO} = 0.1080$<br>$X_{H_2O} = 0.5657$<br>$X_{H_2} = 0.1045$<br>$X_{O_2} = -0.0054$   |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.7312$<br>$b = 0.5688$<br>$c = 1.9953$<br>$d = 0.6047$<br>$e = -0.0132$ | $X_{CO_2} = 0.1881$<br>$X_{CO} = 0.1464$<br>$X_{H_2O} = 0.5134$<br>$X_{H_2} = 0.1556$<br>$X_{O_2} = -0.0034$   |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.6165$<br>$b = 0.7835$<br>$c = 1.8780$<br>$d = 0.9220$<br>$e = 0.0528$  | $X_{CO_2} = 0.1450$<br>$X_{CO} = 0.1842$<br>$X_{H_2O} = 0.4416$<br>$X_{H_2} = 0.2168$<br>$X_{O_2} = 0.0124$    |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.5567$<br>$b = 0.9433$<br>$c = 1.8147$<br>$d = 1.1853$                  | $X_{CO_2} = 0.1220$<br>$X_{CO} = 0.2067$<br>$X_{H_2O} = 0.3976$<br>$X_{H_2} = 0.2597$                          |

|  |              |  |  |
|--|--------------|--|--|
|  |              | $e = 0.0643$   | $X_{O_2} = 0.0141$   |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 1.6$<br>$b = 0$<br>$c = 3.2$<br>$d = 0$<br>$e = -1.2$ | $X_{CO_2} = 0.4444$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8889$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3333$ |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 1.7$<br>$b = 0$<br>$c = 3.4$<br>$d = 0$<br>$e = -1.4$ | $X_{CO_2} = 0.4595$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9189$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3784$ |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 1.8$<br>$b = 0$<br>$c = 3.6$<br>$d = 0$<br>$e = -1.6$ | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 1.9$<br>$b = 0$<br>$c = 3.8$<br>$d = 0$<br>$e = -1.8$ | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$<br>$e = -2$       | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$            |

✚ **Pour T=1600K**

Table IV-20: variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1600} = 2.9785$  et  $K_{p1}^{T=1600} = 1.97 * 10^{-5}$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|-------------------------|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1600} = 2.9785$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|                         | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|                         | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$                                      | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$   |

|   |              |   |  |
|---|--------------|---|--|
| <p style="text-align: center;"><b>And</b></p> <p><b><math>K_{p1}^{T=1600}</math></b><br/> <math>= 1.97 * 10^{(-5)}</math></p> |              | $c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$   | $X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$   |
|   | $\phi = 0.4$ | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$                     | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$                 |
|   | $\phi = 0.5$ | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$                         | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$                       |
|   | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                     | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$              |
|   | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                     | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$              |
|   | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                     | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$              |
|   | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$              |
|   | $\phi = 1$   | $a = 0.9999$<br>$b = 0.0001$<br>$c = 1.9999$<br>$d = 0.0001$<br>$e = 0.0001$  | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} \approx 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6666$<br>$X_{H_2} \approx 0$<br>$X_{O_2} \approx 0$ |
|   | $\phi = 1.1$ | $a = 0.8844$<br>$b = 0.2156$<br>$c = 2.0338$<br>$d = 0.1662$<br>$e = -0.0091$ | $X_{CO_2} = 0.2687$<br>$X_{CO} = 0.0655$<br>$X_{H_2O} = 0.6180$<br>$X_{H_2} = 0.0505$<br>$X_{O_2} = -0.0028$   |
|   | $\phi = 1.2$ | $a = 0.7920$<br>$b = 0.4080$<br>$c = 2.0474$<br>$d = 0.3526$<br>$e = -0.0197$ | $X_{CO_2} = 0.2212$<br>$X_{CO} = 0.1140$<br>$X_{H_2O} = 0.5719$<br>$X_{H_2} = 0.0985$<br>$X_{O_2} = -0.0055$   |

|  |              |  |   |
|--|--------------|--|---|
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.6835$<br>$b = 0.6165$<br>$c = 1.9959$<br>$d = 0.6041$<br>$e = 0.0103$ | $X_{CO_2} = 0.1748$<br>$X_{CO} = 0.1577$<br>$X_{H_2O} = 0.5104$<br>$X_{H_2} = 0.1545$<br>$X_{O_2} = 0.0026$ |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.5816$<br>$b = 0.8184$<br>$c = 1.9089$<br>$d = 0.8911$<br>$e = 0.0547$ | $X_{CO_2} = 0.1367$<br>$X_{CO} = 0.1923$<br>$X_{H_2O} = 0.4487$<br>$X_{H_2} = 0.2094$<br>$X_{O_2} = 0.0129$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 1.5$<br>$b = 0$<br>$c = 3$<br>$d = 0$<br>$e = -1$                       | $X_{CO_2} = 0.4286$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8571$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.2857$          |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 1.6$<br>$b = 0$<br>$c = 3.2$<br>$d = 0$<br>$e = -1.2$                   | $X_{CO_2} = 0.4444$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8889$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3333$          |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 1.7$<br>$b = 0$<br>$c = 3.4$<br>$d = 0$<br>$e = -1.4$                   | $X_{CO_2} = 0.4595$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9189$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3784$          |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 1.8$<br>$b = 0$<br>$c = 3.6$<br>$d = 0$<br>$e = -1.6$                   | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$          |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 1.9$<br>$b = 0$<br>$c = 3.8$<br>$d = 0$<br>$e = -1.8$                   | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$          |
|  | $\phi = 2$   | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$<br>$e = -2$                         | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$                     |

 **Pour T=1700K**

Table IV-21: variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1700} = 3.3884$  et  $K_{p1}^{T=1700} = 6.77 * 10^{-5}$

| Constante d'équilibre | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion | Fraction molaire (%) |
|-----------------------|-------------------|--|----------------------|
|-----------------------|-------------------|--|----------------------|

|  |              |   |   |
|--|--------------|---|---|
| $K_p^{T=1700} = 3.3884$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1700} = 6.77 * 10^{(-5)}$ | $\phi = 0.1$ | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$ | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$ | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$ | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$ | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|  | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$ | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$ | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$ |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$ | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$ |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9982$<br>$b = 0.0018$<br>$c = 1.9989$              | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} \approx 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6666$                                  |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | d = 0.0011<br>e = 0.0014  | $X_{H_2} \approx 0$<br>$X_{O_2} \approx 0$   |
|  | $\phi = 1.1$ | a = 0.8735<br>b = 0.2265<br>c = 2.0439<br>d = 0.1561<br>e = -0.0087 | $X_{CO_2} = 0.2654$<br>$X_{CO} = 0.0688$<br>$X_{H_2O} = 0.6210$<br>$X_{H_2} = 0.0474$<br>$X_{O_2} = -0.0026$ |
|  | $\phi = 1.2$ | a = 0.7737<br>b = 0.4263<br>c = 2.0658<br>d = 0.3342<br>e = -0.0197 | $X_{CO_2} = 0.2161$<br>$X_{CO} = 0.1191$<br>$X_{H_2O} = 0.5770$<br>$X_{H_2} = 0.0934$<br>$X_{O_2} = -0.0055$ |
|  | $\phi = 1.3$ | a = 0.6453<br>b = 0.6547<br>c = 2.0028<br>d = 0.5972<br>e = 0.0259  | $X_{CO_2} = 0.1644$<br>$X_{CO} = 0.1668$<br>$X_{H_2O} = 0.5101$<br>$X_{H_2} = 0.1521$<br>$X_{O_2} = 0.0066$  |
|  | $\phi = 1.4$ | a = 0.5521<br>b = 0.8479<br>c = 1.9354<br>d = 0.8646<br>e = 0.0562  | $X_{CO_2} = 0.1297$<br>$X_{CO} = 0.1992$<br>$X_{H_2O} = 0.4547$<br>$X_{H_2} = 0.2031$<br>$X_{O_2} = 0.0132$  |
|  | $\phi = 1.5$ | a = 1.5<br>b = 0<br>c = 3<br>d = 0<br>e = -1                        | $X_{CO_2} = 0.4286$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8571$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.2857$           |
|  | $\phi = 1.6$ | a = 1.6<br>b = 0<br>c = 3.2<br>d = 0<br>e = -1.2                    | $X_{CO_2} = 0.4444$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8889$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3333$           |
|  | $\phi = 1.7$ | a = 1.7<br>b = 0<br>c = 3.4<br>d = 0<br>e = -1.4                    | $X_{CO_2} = 0.4595$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9189$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3784$           |
|  | $\phi = 1.8$ | a = 1.8<br>b = 0<br>c = 3.6<br>d = 0<br>e = -1.6                    | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$           |
|  | $\phi = 1.9$ | a = 1.9<br>b = 0<br>c = 3.8<br>d = 0<br>e = -1.8                    | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$           |

|  |            |  |   |
|--|------------|--|---|
|  | $\phi = 2$ | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$<br>$e = -2$ | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$ |
|--|------------|--|---|

✚ **Pour T=1800K**

Table IV-22: variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1800} = 3.8548$  et  $K_{p1}^{T=1800} = 2.03 * 10^{-4}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1800} = 3.8548$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1800} = 2.03 * 10^{(-4)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|  | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|  | $\phi = 0.7$      | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$ | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|  | $\phi = 0.8$      | $a = 0.8$   | $X_{CO_2} = 0.2857$   |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                                  | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$                                   |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$            |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9962$<br>$b = 0.0038$<br>$c = 1.9980$<br>$d = 0.0020$<br>$e = 0.0029$  | $X_{CO_2} = 0.3318$<br>$X_{CO} = 0.0013$<br>$X_{H_2O} = 0.6654$<br>$X_{H_2} = 0.0006$<br>$X_{O_2} = 0.0009$  |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.8618$<br>$b = 0.2382$<br>$c = 2.0530$<br>$d = 0.1470$<br>$e = -0.0074$ | $X_{CO_2} = 0.2617$<br>$X_{CO} = 0.0723$<br>$X_{H_2O} = 0.6235$<br>$X_{H_2} = 0.0446$<br>$X_{O_2} = -0.0023$ |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.7551$<br>$b = 0.4449$<br>$c = 2.0834$<br>$d = 0.3166$<br>$e = -0.0192$ | $X_{CO_2} = 0.2109$<br>$X_{CO} = 0.1242$<br>$X_{H_2O} = 0.5818$<br>$X_{H_2} = 0.0884$<br>$X_{O_2} = -0.0054$ |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.6145$<br>$b = 0.6855$<br>$c = 2.0199$<br>$d = 0.5801$<br>$e = 0.0328$  | $X_{CO_2} = 0.1563$<br>$X_{CO} = 0.1743$<br>$X_{H_2O} = 0.5136$<br>$X_{H_2} = 0.1475$<br>$X_{O_2} = 0.0083$  |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.5230$<br>$b = 0.8770$<br>$c = 1.9616$<br>$d = 0.8384$<br>$e = 0.0577$  | $X_{CO_2} = 0.1228$<br>$X_{CO} = 0.2060$<br>$X_{H_2O} = 0.4607$<br>$X_{H_2} = 0.1969$<br>$X_{O_2} = 0.0136$  |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 1.5$<br>$b = 0$<br>$c = 3$<br>$d = 0$<br>$e = -1$                        | $X_{CO_2} = 0.4286$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8571$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.2857$           |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 1.6$<br>$b = 0$<br>$c = 3.2$<br>$d = 0$<br>$e = -1.2$                    | $X_{CO_2} = 0.4444$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8889$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3333$           |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 1.7$<br>$b = 0$<br>$c = 3.4$<br>$d = 0$                                  | $X_{CO_2} = 0.4595$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9189$<br>$X_{H_2} = 0$                                  |

|  |              |  |  |
|--|--------------|--|--|
|  |              | $e = -1.4$   | $X_{O_2} = -0.3784$  |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 1.8$<br>$b = 0$<br>$c = 3.6$<br>$d = 0$<br>$e = -1.6$ | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 1.9$<br>$b = 0$<br>$c = 3.8$<br>$d = 0$<br>$e = -1.8$ | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$<br>$e = -2$       | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$            |

 **Pour T=1900K**

Table IV-23: variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1900} = 4.1591$  et  $K_{p1}^{T=1900} = 5.41 * 10^{-4}$

| Constante d'équilibre  | Equivalent Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|--|------------------|---|---|
| $K_p^{T=1900} = 4.1591$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1900} = 5.41 * 10^{(-4)}$ | $\phi = 0.1$     | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$     | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$     | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$     | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$     | $a = 0.5$<br>$b = 0$                                      | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$  |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$   | $X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$   |
|  | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                     | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$            |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                     | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$            |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                     | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$            |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$            |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9927$<br>$b = 0.0073$<br>$c = 1.9965$<br>$d = 0.0035$<br>$e = 0.0054$  | $X_{CO_2} = 0.3303$<br>$X_{CO} = 0.0024$<br>$X_{H_2O} = 0.6643$<br>$X_{H_2} = 0.0012$<br>$X_{O_2} = 0.0018$  |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.8526$<br>$b = 0.2474$<br>$c = 2.0566$<br>$d = 0.1434$<br>$e = -0.0046$ | $X_{CO_2} = 0.2587$<br>$X_{CO} = 0.0751$<br>$X_{H_2O} = 0.6241$<br>$X_{H_2} = 0.0435$<br>$X_{O_2} = -0.0014$ |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.7430$<br>$b = 0.4570$<br>$c = 2.0922$<br>$d = 0.3078$<br>$e = -0.0176$ | $X_{CO_2} = 0.2074$<br>$X_{CO} = 0.1276$<br>$X_{H_2O} = 0.5840$<br>$X_{H_2} = 0.0859$<br>$X_{O_2} = -0.0049$ |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.5998$<br>$b = 0.7002$<br>$c = 2.0338$<br>$d = 0.5662$<br>$e = 0.0332$  | $X_{CO_2} = 0.1525$<br>$X_{CO} = 0.1780$<br>$X_{H_2O} = 0.5171$<br>$X_{H_2} = 0.1439$<br>$X_{O_2} = 0.0084$  |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.5070$<br>$b = 0.8930$<br>$c = 1.9780$<br>$d = 0.8220$<br>$e = 0.0575$  | $X_{CO_2} = 0.1191$<br>$X_{CO} = 0.2098$<br>$X_{H_2O} = 0.4646$<br>$X_{H_2} = 0.1931$<br>$X_{O_2} = 0.0135$  |

|  |              |  |  |
|--|--------------|--|--|
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 1.5$<br>$b = 0$<br>$c = 3$<br>$d = 0$<br>$e = -1$     | $X_{CO_2} = 0.4286$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8571$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.2857$ |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 1.6$<br>$b = 0$<br>$c = 3.2$<br>$d = 0$<br>$e = -1.2$ | $X_{CO_2} = 0.4444$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8889$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3333$ |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 1.7$<br>$b = 0$<br>$c = 3.4$<br>$d = 0$<br>$e = -1.4$ | $X_{CO_2} = 0.4595$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9189$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3784$ |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 1.8$<br>$b = 0$<br>$c = 3.6$<br>$d = 0$<br>$e = -1.6$ | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 1.9$<br>$b = 0$<br>$c = 3.8$<br>$d = 0$<br>$e = -1.8$ | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$<br>$e = -2$       | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$            |

 **Pour T=2000K**

Table IV-24: variation des fractions molaires des produits en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=2000} = 4.5289$  et  $K_{p1}^{T=2000} = 1.31 * 10^{-3}$

| Constante d'équilibre | Equivalent Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|-----------------------|------------------|---|---|
|                       | $\phi = 0.1$     | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|                       | $\phi = 0.2$     | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|                       | $\phi = 0.3$     | $a = 0.3$   | $X_{CO_2} = 0.1304$   |

|   |              |   |  |
|---|--------------|---|--|
| $K_p^{T=2000} = 4.5289$<br><br><b>And</b><br><br>$K_{p1}^{T=2000} = 1.31 * 10^{(-3)}$ |              | $b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$                                  | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$                                   |
|   | $\phi = 0.4$ | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$                     | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$               |
|   | $\phi = 0.5$ | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$                         | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$                     |
|   | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                     | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$            |
|   | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                     | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$            |
|   | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                     | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$            |
|   | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                     | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$            |
|   | $\phi = 1$   | $a = 0.9868$<br>$b = 0.0132$<br>$c = 1.9941$<br>$d = 0.0059$<br>$e = 0.0096$  | $X_{CO_2} = 0.3279$<br>$X_{CO} = 0.0044$<br>$X_{H_2O} = 0.6626$<br>$X_{H_2} = 0.0020$<br>$X_{O_2} = 0.0032$  |
|   | $\phi = 1.1$ | $a = 0.8408$<br>$b = 0.2592$<br>$c = 2.0598$<br>$d = 0.1402$<br>$e = -0.0003$ | $X_{CO_2} = 0.2548$<br>$X_{CO} = 0.0786$<br>$X_{H_2O} = 0.6242$<br>$X_{H_2} = 0.0425$<br>$X_{O_2} \approx 0$ |
|   | $\phi = 1.2$ | $a = 0.7277$<br>$b = 0.4723$<br>$c = 2.1000$<br>$d = 0.3000$                  | $X_{CO_2} = 0.2029$<br>$X_{CO} = 0.1317$<br>$X_{H_2O} = 0.5856$<br>$X_{H_2} = 0.0837$                        |

|  |              |   |   |
|--|--------------|---|---|
|  |              | $e = -0.0138$   | $X_{O_2} = -0.0039$   |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.5862$<br>$b = 0.7138$<br>$c = 2.0338$<br>$d = 2.0524$<br>$e = 0.307$ | $X_{CO_2} = 0.1491$<br>$X_{CO} = 0.1816$<br>$X_{H_2O} = 0.5221$<br>$X_{H_2} = 0.1393$<br>$X_{O_2} = 0.0078$ |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 1.4$<br>$b = 0$<br>$c = 2.8$<br>$d = 0$<br>$e = -0.8$                  | $X_{CO_2} = 0.4118$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8235$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.2353$          |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 1.5$<br>$b = 0$<br>$c = 3$<br>$d = 0$<br>$e = -1$                      | $X_{CO_2} = 0.4286$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8571$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.2857$          |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 1.6$<br>$b = 0$<br>$c = 3.2$<br>$d = 0$<br>$e = -1.2$                  | $X_{CO_2} = 0.4444$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.8889$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3333$          |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 1.7$<br>$b = 0$<br>$c = 3.4$<br>$d = 0$<br>$e = -1.4$                  | $X_{CO_2} = 0.4595$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9189$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.3784$          |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 1.8$<br>$b = 0$<br>$c = 3.6$<br>$d = 0$<br>$e = -1.6$                  | $X_{CO_2} = 0.4737$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9474$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4211$          |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 1.9$<br>$b = 0$<br>$c = 3.8$<br>$d = 0$<br>$e = -1.8$                  | $X_{CO_2} = 0.4872$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.9744$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.4615$          |
|  | $\phi = 2$   | $a = 2$<br>$b = 0$<br>$c = 4$<br>$d = 0$<br>$e = -2$                        | $X_{CO_2} = 0.5$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 1$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = -0.5$                     |

## Annexe III

✚ **Pour T=1000K**

Table IV-27: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1000} = 1,3646$  et  $K_{p1}^{T=1000} = 6.10^{-11}$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|---|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1000} = 0.69$<br><br><b>And</b><br><br>$K_{p1}^{T=1000} = 6.10^{-11}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|   | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|   | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|   | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|   | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|   | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|   | $\phi = 0.7$      | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$ | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|   | $\phi = 0.8$      | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$              | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$  |

|  |              |   |   |
|--|--------------|---|---|
|  |              | $e = 0.4$   | $X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$   |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                             | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$           |
|  | $\phi = 1$   | $a = 1$<br>$b = 0$<br>$c = 2$<br>$d = 0$<br>$e = 0$                                   | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6667$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0$                |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.9886$<br>$b = 0.1114$<br>$c = 1.8909$<br>$d = 0.3091$<br>$e = \mathbf{0.0103}$ | $X_{CO_2} = 0.2986$<br>$X_{CO} = 0.0337$<br>$X_{H_2O} = 0.5712$<br>$X_{H_2} = 0.0934$<br>$X_{O_2} = 0.0031$ |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.8189$<br>$b = 0.1811$<br>$c = 1.5145$<br>$d = 0.4855$<br>$e = \mathbf{0}$      | $X_{CO_2} = 0.2730$<br>$X_{CO} = 0.0604$<br>$X_{H_2O} = 0.5048$<br>$X_{H_2} = 0.1618$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.7435$<br>$b = 0.2565$<br>$c = 1.3334$<br>$d = 0.6666$<br>$e = 0$               | $X_{CO_2} = 0.2478$<br>$X_{CO} = 0.0855$<br>$X_{H_2O} = 0.4445$<br>$X_{H_2} = 0.2222$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.6763$<br>$b = 0.3237$<br>$c = 1.1809$<br>$d = 0.8191$<br>$e = \mathbf{0}$      | $X_{CO_2} = 0.2254$<br>$X_{CO} = 0.1079$<br>$X_{H_2O} = 0.3936$<br>$X_{H_2} = 0.2730$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.9183$<br>$b = 0.5817$<br>$c = 1.5640$<br>$d = 1.4360$<br>$e = \mathbf{0.0089}$ | $X_{CO_2} = 0.2037$<br>$X_{CO} = 0.1290$<br>$X_{H_2O} = 0.3469$<br>$X_{H_2} = 0.3185$<br>$X_{O_2} = 0.0020$ |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.8629$<br>$b = 0.7371$<br>$c = 1.4277$<br>$d = 1.7723$<br>$e = 0.0547$          | $X_{CO_2} = 0.1777$<br>$X_{CO} = 0.1518$<br>$X_{H_2O} = 0.2941$<br>$X_{H_2} = 0.3651$<br>$X_{O_2} = 0.0113$ |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.8309$<br>$b = 0.8691$<br>$c = 1.3490$<br>$d = 2.0510$<br>$e = 0.0601$          | $X_{CO_2} = 0.1610$<br>$X_{CO} = 0.1684$<br>$X_{H_2O} = 0.2614$<br>$X_{H_2} = 0.3975$<br>$X_{O_2} = 0.0116$ |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.4676$<br>$b = 0.5324$<br>$c = 0.7546$<br>$d = 1.2454$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.1559$<br>$X_{CO} = 0.1775$<br>$X_{H_2O} = 0.2515$<br>$X_{H_2} = 0.4151$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.4267$<br>$b = 0.5733$<br>$c = 0.6786$<br>$d = 1.3214$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.1422$<br>$X_{CO} = 0.1911$<br>$X_{H_2O} = 0.2262$<br>$X_{H_2} = 0.4405$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.3892$<br>$b = 0.61$<br>$c = 0.6108$<br>$d = 1.3892$<br>$e = 0$   | $X_{CO_2} = 0.1298$<br>$X_{CO} = 0.2034$<br>$X_{H_2O} = 0.2037$<br>$X_{H_2} = 0.4632$<br>$X_{O_2} = 0$ |

$$\log_{10} K_{p1}(T) = \log_{10}(K_{p,CO}) + \sqrt{\log_{10}(K_{p,O_2}) - \log_{10}(K_{p,CO_2})} \quad (IV-23)$$

✚ Pour T=1100K

Table IV-28: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1100} = 1,0069$  et  $K_{p1}^{T=1100} = 1,32 \cdot 10^{-9}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1100} = 1,0069$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1100} = 1,32 * 10^{(-9)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$                             |

|  |              |  |   |
|--|--------------|--|---|
|  |              |  | $X_{O_2} = 0.4$   |
|  | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                    | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$           |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                    | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$           |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                    | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$           |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                    | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$           |
|  | $\phi = 1$   | $a = 1$<br>$b = 0$<br>$c = 2$<br>$d = 0$<br>$e = 0$                          | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6667$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0$                |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.9599$<br>$b = 0.1401$<br>$c = 1.9216$<br>$d = 0.2784$<br>$e = 0.0093$ | $X_{CO_2} = 0.2901$<br>$X_{CO} = 0.0423$<br>$X_{H_2O} = 0.5807$<br>$X_{H_2} = 0.0841$<br>$X_{O_2} = 0.0028$ |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.777$<br>$b = 0.223$<br>$c = 1.5563$<br>$d = 0.4437$<br>$e = 0$        | $X_{CO_2} = 0.2590$<br>$X_{CO} = 0.0743$<br>$X_{H_2O} = 0.5188$<br>$X_{H_2} = 0.1479$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.6913$<br>$b = 0.3087$<br>$c = 1.3856$<br>$d = 0.6144$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2304$<br>$X_{CO} = 0.1029$<br>$X_{H_2O} = 0.4619$<br>$X_{H_2} = 0.2048$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.618$<br>$b = 0.382$<br>$c = 1.2392$<br>$d = 0.7608$<br>$e = 0$        | $X_{CO_2} = 0.2060$<br>$X_{CO} = 0.1273$<br>$X_{H_2O} = 0.4131$<br>$X_{H_2} = 0.2536$<br>$X_{O_2} = 0$      |

|  |              |  |   |
|--|--------------|--|---|
|  | $\phi = 1.5$ | a = 0.7980<br>b = 0.7020<br>c = 1.6011<br>d = 1.3989<br>e = 0.0505 | $X_{CO_2} = 0.1754$<br>$X_{CO} = 0.1543$<br>$X_{H_2O} = 0.3518$<br>$X_{H_2} = 0.3074$<br>$X_{O_2} = 0.0111$ |
|  | $\phi = 1.6$ | a = 0.7570<br>b = 0.8430<br>c = 1.5196<br>d = 1.6804<br>e = 0.0617 | $X_{CO_2} = 0.1557$<br>$X_{CO} = 0.1734$<br>$X_{H_2O} = 0.3126$<br>$X_{H_2} = 0.3456$<br>$X_{O_2} = 0.0127$ |
|  | $\phi = 1.7$ | a = 0.4498<br>b = 0.5502<br>c = 0.9031<br>d = 1.0969<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.1499$<br>$X_{CO} = 0.1834$<br>$X_{H_2O} = 0.3010$<br>$X_{H_2} = 0.3656$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.8$ | a = 0.4063<br>b = 0.5937<br>c = 0.8159<br>d = 1.1841<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.1354$<br>$X_{CO} = 0.1979$<br>$X_{H_2O} = 0.2720$<br>$X_{H_2} = 0.3947$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.9$ | a = 0.6607<br>b = 1.2393<br>c = 1.3274<br>d = 2.4726<br>e = 0.0560 | $X_{CO_2} = 0.1148$<br>$X_{CO} = 0.2153$<br>$X_{H_2O} = 0.2306$<br>$X_{H_2} = 0.4296$<br>$X_{O_2} = 0.0097$ |
|  | $\phi = 2$   | a = 0.3323<br>b = 0.6677<br>c = 0.6677<br>d = 1.3323<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.1108$<br>$X_{CO} = 0.2226$<br>$X_{H_2O} = 0.2226$<br>$X_{H_2} = 0.4441$<br>$X_{O_2} = 0$      |

✚ Pour T=1200K

Table IV-29: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1200} = 1,3646$  et  $K_{p1}^{T=1200} = 1,72 \cdot 10^{-8}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion          | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1200} = 1,3646$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1200} = 1,72 \cdot 10^{(-8)}$ | $\phi = 0.1$      | a = 0.1<br>b = 0<br>c = 0.2<br>d = 0<br>e = 1.8 | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | a = 0.2<br>b = 0<br>c = 0.4<br>d = 0<br>e = 1.6 | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | a = 0.3   | $X_{CO_2} = 0.1304$   |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$                            | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$                             |
|  | $\phi = 0.4$ | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$               | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$         |
|  | $\phi = 0.5$ | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$                   | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$               |
|  | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$               | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$      |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$               | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$      |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$               | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$      |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$               | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$      |
|  | $\phi = 1$   | $a = 1$<br>$b = 0$<br>$c = 2$<br>$d = 0$<br>$e = 0$                     | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6667$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0$           |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.8559$<br>$b = 0.1441$<br>$c = 1.7804$<br>$d = 0.2196$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.2853$<br>$X_{CO} = 0.0480$<br>$X_{H_2O} = 0.5935$<br>$X_{H_2} = 0.0732$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.7411$<br>$b = 0.2589$<br>$c = 1.5923$<br>$d = 0.4077$            | $X_{CO_2} = 0.2470$<br>$X_{CO} = 0.0863$<br>$X_{H_2O} = 0.5308$<br>$X_{H_2} = 0.1359$                  |

|  |              | $e = 0$  | $X_{O_2} = 0$   |
|--|--------------|--|---|
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.6474$<br>$b = 0.3526$<br>$c = 1.4295$<br>$d = 0.5705$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2158$<br>$X_{CO} = 0.1175$<br>$X_{H_2O} = 0.4765$<br>$X_{H_2} = 0.1902$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.7787$<br>$b = 0.6213$<br>$c = 1.7673$<br>$d = 1.0327$<br>$e = 0.0270$ | $X_{CO_2} = 0.1842$<br>$X_{CO} = 0.1470$<br>$X_{H_2O} = 0.4181$<br>$X_{H_2} = 0.2443$<br>$X_{O_2} = 0.0064$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.7170$<br>$b = 0.7830$<br>$c = 1.6685$<br>$d = 1.3315$<br>$e = 0.0573$ | $X_{CO_2} = 0.1573$<br>$X_{CO} = 0.1718$<br>$X_{H_2O} = 0.3661$<br>$X_{H_2} = 0.2922$<br>$X_{O_2} = 0.0126$ |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.6808$<br>$b = 0.9192$<br>$c = 1.6102$<br>$d = 1.5898$<br>$e = 0.0545$ | $X_{CO_2} = 0.1402$<br>$X_{CO} = 0.1894$<br>$X_{H_2O} = 0.3317$<br>$X_{H_2} = 0.3275$<br>$X_{O_2} = 0.0112$ |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.4001$<br>$b = 0.5999$<br>$c = 0.9529$<br>$d = 1.0471$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1334$<br>$X_{CO} = 0.2000$<br>$X_{H_2O} = 0.3176$<br>$X_{H_2} = 0.3490$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.358$<br>$b = 0.642$<br>$c = 0.8642$<br>$d = 1.1358$<br>$e = 0$        | $X_{CO_2} = 0.1193$<br>$X_{CO} = 0.2140$<br>$X_{H_2O} = 0.2881$<br>$X_{H_2} = 0.3786$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.321$<br>$b = 0.679$<br>$c = 0.7843$<br>$d = 1.2157$<br>$e = 0$        | $X_{CO_2} = 0.1070$<br>$X_{CO} = 0.2263$<br>$X_{H_2O} = 0.2614$<br>$X_{H_2} = 0.4052$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.2882$<br>$b = 0.7118$<br>$c = 0.7118$<br>$d = 1.2882$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0961$<br>$X_{CO} = 0.2373$<br>$X_{H_2O} = 0.2373$<br>$X_{H_2} = 0.4294$<br>$X_{O_2} = 0$      |

 **Pour  $T=1300K$**

Table IV-30: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1300} = 1.7498$  et  $K_{p1}^{T=1300} = 1.51 * 10^{-7}$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|---|-------------------|---|---|
| <p><math>K_p^{T=1300} = 1,7498</math></p> <p>And</p> <p><math>K_{p1}^{T=1300} = 1.51 * 10^{(-7)}</math></p> | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|   | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|   | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|   | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|   | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|   | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|   | $\phi = 0.7$      | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$ | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|   | $\phi = 0.8$      | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$ | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$ |
|   | $\phi = 0.9$      | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$ | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$ |

|  |              |  |   |
|--|--------------|--|---|
|  | $\phi = 1$   | $a = 1$<br>$b = 0$<br>$c = 2$<br>$d = 0$<br>$e = 0$                          | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6667$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0$                |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.8369$<br>$b = 0.1631$<br>$c = 1.7995$<br>$d = 0.2005$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2790$<br>$X_{CO} = 0.0544$<br>$X_{H_2O} = 0.5998$<br>$X_{H_2} = 0.0668$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.7107$<br>$b = 0.2893$<br>$c = 1.6226$<br>$d = 0.3774$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2369$<br>$X_{CO} = 0.0964$<br>$X_{H_2O} = 0.5409$<br>$X_{H_2} = 0.1258$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.6108$<br>$b = 0.3892$<br>$c = 1.4661$<br>$d = 0.5339$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2036$<br>$X_{CO} = 0.1297$<br>$X_{H_2O} = 0.4887$<br>$X_{H_2} = 0.1780$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.7088$<br>$b = 0.6912$<br>$c = 1.8005$<br>$d = 0.9995$<br>$e = 0.0453$ | $X_{CO_2} = 0.1670$<br>$X_{CO} = 0.1628$<br>$X_{H_2O} = 0.4241$<br>$X_{H_2} = 0.2354$<br>$X_{O_2} = 0.0107$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.6523$<br>$b = 0.8477$<br>$c = 1.7257$<br>$d = 1.2743$<br>$e = 0.0610$ | $X_{CO_2} = 0.1430$<br>$X_{CO} = 0.1859$<br>$X_{H_2O} = 0.3784$<br>$X_{H_2} = 0.2794$<br>$X_{O_2} = 0.0134$ |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.6187$<br>$b = 0.9813$<br>$c = 1.6814$<br>$d = 1.5186$<br>$e = 0.0499$ | $X_{CO_2} = 0.1276$<br>$X_{CO} = 0.2023$<br>$X_{H_2O} = 0.3467$<br>$X_{H_2} = 0.3131$<br>$X_{O_2} = 0.0103$ |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.3603$<br>$b = 0.6397$<br>$c = 0.9927$<br>$d = 1.0073$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1201$<br>$X_{CO} = 0.2132$<br>$X_{H_2O} = 0.3309$<br>$X_{H_2} = 0.3358$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.3197$<br>$b = 0.6803$<br>$c = 0.9025$<br>$d = 1.0975$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1066$<br>$X_{CO} = 0.2268$<br>$X_{H_2O} = 0.3008$<br>$X_{H_2} = 0.3658$<br>$X_{O_2} = 0$      |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.2846$<br>$b = 0.7154$<br>$c = 0.8207$<br>$d = 1.1793$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0949$<br>$X_{CO} = 0.2385$<br>$X_{H_2O} = 0.2736$<br>$X_{H_2} = 0.3931$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.2538$<br>$b = 0.7462$<br>$c = 0.7462$<br>$d = 1.2538$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0846$<br>$X_{CO} = 0.2487$<br>$X_{H_2O} = 0.2487$<br>$X_{H_2} = 0.4179$<br>$X_{O_2} = 0$ |

✚ Pour T=1400K

Table IV-1: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1400} = 2.1528$  et  $K_{p1}^{T=1400} = 9.68 * 10^{-7}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1400} = 2.1528$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1400} = 9.68 * 10^{(-7)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|  | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|  | $\phi = 0.7$      | $a = 0.7$   | $X_{CO_2} = 0.2593$   |

|  |              |  |  |
|--|--------------|--|--|
|  |              | $b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                                 | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$                                     |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                    | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$              |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                    | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$              |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9999$<br>$b = 0.0001$<br>$c = 1.9999$<br>$d = 0.0001$<br>$e = 0.0001$ | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} \approx 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6666$<br>$X_{H_2} \approx 0$<br>$X_{O_2} \approx 0$ |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.8207$<br>$b = 0.1793$<br>$c = 1.8157$<br>$d = 0.1843$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2736$<br>$X_{CO} = 0.0598$<br>$X_{H_2O} = 0.6052$<br>$X_{H_2} = 0.0614$<br>$X_{O_2} = 0$         |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.6852$<br>$b = 0.3148$<br>$c = 1.6482$<br>$d = 0.3518$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2284$<br>$X_{CO} = 0.1049$<br>$X_{H_2O} = 0.5494$<br>$X_{H_2} = 0.1173$<br>$X_{O_2} = 0$         |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.5801$<br>$b = 0.4199$<br>$c = 1.4968$<br>$d = 0.5032$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1934$<br>$X_{CO} = 0.1400$<br>$X_{H_2O} = 0.4989$<br>$X_{H_2} = 0.1677$<br>$X_{O_2} = 0$         |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.6581$<br>$b = 0.7419$<br>$c = 1.8418$<br>$d = 0.9582$<br>$e = 0.0501$ | $X_{CO_2} = 0.1548$<br>$X_{CO} = 0.1746$<br>$X_{H_2O} = 0.4333$<br>$X_{H_2} = 0.2255$<br>$X_{O_2} = 0.0118$    |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.5995$<br>$b = 0.9005$<br>$c = 1.7735$<br>$d = 1.2265$<br>$e = 0.0635$ | $X_{CO_2} = 0.1314$<br>$X_{CO} = 0.1973$<br>$X_{H_2O} = 0.3886$<br>$X_{H_2} = 0.2688$<br>$X_{O_2} = 0.0139$    |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.3743$<br>$b = 0.6257$<br>$c = 1.1257$<br>$d = 0.8743$                 | $X_{CO_2} = 0.1248$<br>$X_{CO} = 0.2086$<br>$X_{H_2O} = 0.3752$<br>$X_{H_2} = 0.2914$                          |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $e = 0$   | $X_{O_2} = 0$  |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.3281$<br>$b = 0.6719$<br>$c = 1.0249$<br>$d = 0.9751$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.1094$<br>$X_{CO} = 0.2240$<br>$X_{H_2O} = 0.3416$<br>$X_{H_2} = 0.3250$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.289$<br>$b = 0.711$<br>$c = 0.9333$<br>$d = 1.0667$<br>$e = 0$   | $X_{CO_2} = 0.0963$<br>$X_{CO} = 0.2370$<br>$X_{H_2O} = 0.3111$<br>$X_{H_2} = 0.3556$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.2555$<br>$b = 0.7445$<br>$c = 0.8498$<br>$d = 1.1502$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0852$<br>$X_{CO} = 0.2482$<br>$X_{H_2O} = 0.2833$<br>$X_{H_2} = 0.3834$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.7734$<br>$b = 0.2266$<br>$c = 0.7734$<br>$d = 1.2266$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.2578$<br>$X_{CO} = 0.0755$<br>$X_{H_2O} = 0.2578$<br>$X_{H_2} = 0.4089$<br>$X_{O_2} = 0$ |

✚ **Pour T=1500K**

Table IV-32: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1500} = 2.5645$  et  $K_{p1}^{T=1500} = 4.83 * 10^{-6}$

| Constante d'équilibre                     | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|---|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1500} = 2.5645$<br><br><b>And</b> | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|   | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|   | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|   | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$                                      | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$   |

|   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| $K_{p1}^{T=1500}$<br>$= 4.83 * 10^{(-6)}$ |   | $c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$  | $X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$  |
|   | $\phi = 0.5$  | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$  | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$                       |
|   | $\phi = 0.6$  | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$  | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$              |
|   | $\phi = 0.7$  | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$  | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$              |
|   | $\phi = 0.8$  | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$  | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$              |
|   | $\phi = 0.9$  | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$  | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$              |
|   | $\phi = 1$  | $a = 0.9997$<br>$b = 0.0003$<br>$c = 1.9998$<br>$d = 0.0002$<br>$e = 0.0003$                           | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} \approx 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6666$<br>$X_{H_2} \approx 0$<br>$X_{O_2} \approx 0$ |
|   | $\phi = 1.1$  | $a = 0.807$<br>$b = 0.193$<br>$c = 1.8294$<br>$d = 0.1706$<br>$e = 0$                                  | $X_{CO_2} = 0.2690$<br>$X_{CO} = 0.0643$<br>$X_{H_2O} = 0.6098$<br>$X_{H_2} = 0.0569$<br>$X_{O_2} = 0$         |
|   | $\phi = 1.2$  | $a = 0.6635$<br>$b = 0.3365$<br>$c = 1.6698$<br>$d = 0.3302$<br>$e = 0$                                | $X_{CO_2} = 0.2212$<br>$X_{CO} = 0.1122$<br>$X_{H_2O} = 0.5566$<br>$X_{H_2} = 0.1101$<br>$X_{O_2} = 0$         |
| $\phi = 1.3$                              | $a = 0.5543$<br>$b = 0.4457$<br>$c = 1.5226$<br>$d = 0.4774$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.1848$<br>$X_{CO} = 0.1486$<br>$X_{H_2O} = 0.5075$<br>$X_{H_2} = 0.1591$<br>$X_{O_2} = 0$ |  |

|  |              |  |   |
|--|--------------|--|---|
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.6165$<br>$b = 0.7835$<br>$c = 1.8780$<br>$d = 0.9220$<br>$e = 0.0528$ | $X_{CO_2} = 0.1450$<br>$X_{CO} = 0.1842$<br>$X_{H_2O} = 0.4416$<br>$X_{H_2} = 0.2168$<br>$X_{O_2} = 0.0124$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.5567$<br>$b = 0.9433$<br>$c = 1.8147$<br>$d = 1.1853$<br>$e = 0.0643$ | $X_{CO_2} = 0.1220$<br>$X_{CO} = 0.2067$<br>$X_{H_2O} = 0.3976$<br>$X_{H_2} = 0.2597$<br>$X_{O_2} = 0.0141$ |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.3468$<br>$b = 0.6532$<br>$c = 1.1532$<br>$d = 0.8468$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1156$<br>$X_{CO} = 0.2177$<br>$X_{H_2O} = 0.3844$<br>$X_{H_2} = 0.2823$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.3017$<br>$b = 0.6983$<br>$c = 1.0512$<br>$d = 0.9488$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1006$<br>$X_{CO} = 0.2328$<br>$X_{H_2O} = 0.3504$<br>$X_{H_2} = 0.3163$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.264$<br>$b = 0.736$<br>$c = 0.9582$<br>$d = 1.0418$<br>$e = 0$        | $X_{CO_2} = 0.0880$<br>$X_{CO} = 0.2453$<br>$X_{H_2O} = 0.3194$<br>$X_{H_2} = 0.3473$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.2321$<br>$b = 0.7679$<br>$c = 0.8732$<br>$d = 1.1268$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0774$<br>$X_{CO} = 0.2560$<br>$X_{H_2O} = 0.2911$<br>$X_{H_2} = 0.3756$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.2047$<br>$b = 0.7953$<br>$c = 0.7953$<br>$d = 1.2047$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0682$<br>$X_{CO} = 0.2651$<br>$X_{H_2O} = 0.2651$<br>$X_{H_2} = 0.4016$<br>$X_{O_2} = 0$      |

**✚ Pour T=1600K**

Table IV-33: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1600} = 2.9785$  et  $K_{p1}^{T=1600} = 1.97 * 10^{-5}$

| Constante d'équilibre | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|-----------------------|-------------------|---|---|
|                       | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|                       | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$   | $X_{CO_2} = 0.0909$   |

|   |              |  |  |
|---|--------------|--|--|
| <p><math>K_p^{T=1600} = 2.9785</math></p> <p>And</p> <p><math>K_{p1}^{T=1600} = 1.97 * 10^{(-5)}</math></p> |              | $b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$                                 | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$                                     |
|   | $\phi = 0.3$ | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$                    | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$              |
|   | $\phi = 0.4$ | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$                    | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$                 |
|   | $\phi = 0.5$ | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$                        | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$                       |
|   | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                    | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$              |
|   | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                    | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$              |
|   | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                    | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$              |
|   | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                    | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$              |
|   | $\phi = 1$   | $a = 0.9999$<br>$b = 0.0001$<br>$c = 1.9999$<br>$d = 0.0001$<br>$e = 0.0001$ | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} \approx 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6666$<br>$X_{H_2} \approx 0$<br>$X_{O_2} \approx 0$ |
|   | $\phi = 1.1$ | $a = 0.7954$<br>$b = 0.2046$<br>$c = 1.841$<br>$d = 0.159$                   | $X_{CO_2} = 0.2651$<br>$X_{CO} = 0.0682$<br>$X_{H_2O} = 0.6137$<br>$X_{H_2} = 0.0530$                          |

|  |              | $e = 0$  | $X_{O_2} = 0$   |
|--|--------------|--|---|
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.6451$<br>$b = 0.3549$<br>$c = 1.6882$<br>$d = 0.3118$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2150$<br>$X_{CO} = 0.1183$<br>$X_{H_2O} = 0.5627$<br>$X_{H_2} = 0.1039$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.6835$<br>$b = 0.6165$<br>$c = 1.9959$<br>$d = 0.6041$<br>$e = 0.0103$ | $X_{CO_2} = 0.1748$<br>$X_{CO} = 0.1577$<br>$X_{H_2O} = 0.5104$<br>$X_{H_2} = 0.1545$<br>$X_{O_2} = 0.0026$ |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.5816$<br>$b = 0.8184$<br>$c = 1.9089$<br>$d = 0.8911$<br>$e = 0.0547$ | $X_{CO_2} = 0.1367$<br>$X_{CO} = 0.1923$<br>$X_{H_2O} = 0.4487$<br>$X_{H_2} = 0.2094$<br>$X_{O_2} = 0.0129$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.3781$<br>$b = 0.6219$<br>$c = 1.2885$<br>$d = 0.7115$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1260$<br>$X_{CO} = 0.2073$<br>$X_{H_2O} = 0.4295$<br>$X_{H_2} = 0.2372$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.324$<br>$b = 0.676$<br>$c = 1.176$<br>$d = 0.824$<br>$e = 0$          | $X_{CO_2} = 0.1080$<br>$X_{CO} = 0.2253$<br>$X_{H_2O} = 0.3920$<br>$X_{H_2} = 0.2747$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.2799$<br>$b = 0.7201$<br>$c = 1.9785$<br>$d = 0.9269$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0933$<br>$X_{CO} = 0.2400$<br>$X_{H_2O} = 0.3577$<br>$X_{H_2} = 0.3090$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.2434$<br>$b = 0.7566$<br>$c = 0.9788$<br>$d = 1.0212$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0811$<br>$X_{CO} = 0.2522$<br>$X_{H_2O} = 0.3263$<br>$X_{H_2} = 0.3404$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.2129$<br>$b = 0.7871$<br>$c = 0.8924$<br>$d = 1.1076$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0710$<br>$X_{CO} = 0.2624$<br>$X_{H_2O} = 0.2975$<br>$X_{H_2} = 0.3692$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.187$<br>$b = 0.813$<br>$c = 0.813$<br>$d = 1.187$                     | $X_{CO_2} = 0.0623$<br>$X_{CO} = 0.2710$<br>$X_{H_2O} = 0.2710$<br>$X_{H_2} = 0.3957$                       |

|  |  |         |               |
|--|--|---------|---------------|
|  |  | $e = 0$ | $X_{O_2} = 0$ |
|--|--|---------|---------------|

✚ **Pour T=1700K**

Table IV-2: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1700} = 3.3884$  et  $K_{p1}^{T=1700} = 6.77 * 10^{-5}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1700} = 3.3884$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1700} = 6.77 * 10^{(-5)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|  | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|  | $\phi = 0.7$      | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$ | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|  | $\phi = 0.8$      | $a = 0.8$<br>$b = 0$                                      | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$   |

|  |              |  |  |
|--|--------------|--|--|
|  |              | $c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$  | $X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$   |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                    | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$              |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9982$<br>$b = 0.0018$<br>$c = 1.9989$<br>$d = 0.0011$<br>$e = 0.0014$ | $X_{CO_2} = 0.3333$<br>$X_{CO} \approx 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6666$<br>$X_{H_2} \approx 0$<br>$X_{O_2} \approx 0$ |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.7855$<br>$b = 0.2145$<br>$c = 1.8509$<br>$d = 0.1491$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2618$<br>$X_{CO} = 0.0715$<br>$X_{H_2O} = 0.6170$<br>$X_{H_2} = 0.0497$<br>$X_{O_2} = 0$         |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.6294$<br>$b = 0.3706$<br>$c = 1.7039$<br>$d = 0.2961$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2098$<br>$X_{CO} = 0.1235$<br>$X_{H_2O} = 0.5680$<br>$X_{H_2} = 0.0987$<br>$X_{O_2} = 0$         |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.6453$<br>$b = 0.6547$<br>$c = 2.0028$<br>$d = 0.5972$<br>$e = 0.0259$ | $X_{CO_2} = 0.1644$<br>$X_{CO} = 0.1668$<br>$X_{H_2O} = 0.5101$<br>$X_{H_2} = 0.1521$<br>$X_{O_2} = 0.0066$    |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.5521$<br>$b = 0.8479$<br>$c = 1.9354$<br>$d = 0.8646$<br>$e = 0.0562$ | $X_{CO_2} = 0.1297$<br>$X_{CO} = 0.1992$<br>$X_{H_2O} = 0.4547$<br>$X_{H_2} = 0.2031$<br>$X_{O_2} = 0.0132$    |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.3583$<br>$b = 0.6417$<br>$c = 1.3084$<br>$d = 0.6916$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1194$<br>$X_{CO} = 0.2139$<br>$X_{H_2O} = 0.4361$<br>$X_{H_2} = 0.2305$<br>$X_{O_2} = 0$         |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.3048$<br>$b = 0.6952$<br>$c = 1.1952$<br>$d = 0.8048$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1016$<br>$X_{CO} = 0.2317$<br>$X_{H_2O} = 0.3984$<br>$X_{H_2} = 0.2683$<br>$X_{O_2} = 0$         |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.2617$<br>$b = 0.7383$<br>$c = 1.0913$<br>$d = 0.9087$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0872$<br>$X_{CO} = 0.2461$<br>$X_{H_2O} = 0.3638$<br>$X_{H_2} = 0.3029$<br>$X_{O_2} = 0$         |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.2264$<br>$b = 0.7736$<br>$c = 0.9958$<br>$d = 1.0042$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0755$<br>$X_{CO} = 0.2579$<br>$X_{H_2O} = 0.3319$<br>$X_{H_2} = 0.3347$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.1971$<br>$b = 0.8029$<br>$c = 0.9082$<br>$d = 1.0918$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0657$<br>$X_{CO} = 0.2676$<br>$X_{H_2O} = 0.3027$<br>$X_{H_2} = 0.3639$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.1724$<br>$b = 0.8276$<br>$c = 0.8276$<br>$d = 1.1724$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0575$<br>$X_{CO} = 0.2759$<br>$X_{H_2O} = 0.2759$<br>$X_{H_2} = 0.3908$<br>$X_{O_2} = 0$ |

✚ **Pour T=1800K**

Table IV-3: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1800} = 3.8548$  et  $K_{p1}^{T=1800} = 2.03 * 10^{-4}$

| Constante d'équilibre  | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|--|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=1800} = 3.8548$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1800} = 2.03 * 10^{(-4)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|  | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|  | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|  | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|  | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|  | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$   | $X_{CO_2} = 0.2308$   |

|  |              |  |   |
|--|--------------|--|---|
|  |              | $b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                                 | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$                                  |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                    | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$           |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                    | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$           |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                    | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$           |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9962$<br>$b = 0.0038$<br>$c = 1.9980$<br>$d = 0.0020$<br>$e = 0.0029$ | $X_{CO_2} = 0.3318$<br>$X_{CO} = 0.0013$<br>$X_{H_2O} = 0.6654$<br>$X_{H_2} = 0.0006$<br>$X_{O_2} = 0.0009$ |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.7758$<br>$b = 0.2242$<br>$c = 1.8605$<br>$d = 0.1395$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2586$<br>$X_{CO} = 0.0747$<br>$X_{H_2O} = 0.6202$<br>$X_{H_2} = 0.0465$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.6139$<br>$b = 0.3861$<br>$c = 1.7194$<br>$d = 0.2806$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2046$<br>$X_{CO} = 0.1287$<br>$X_{H_2O} = 0.5731$<br>$X_{H_2} = 0.0935$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.6145$<br>$b = 0.6855$<br>$c = 2.0199$<br>$d = 0.5801$<br>$e = 0.0328$ | $X_{CO_2} = 0.1563$<br>$X_{CO} = 0.1743$<br>$X_{H_2O} = 0.5136$<br>$X_{H_2} = 0.1475$<br>$X_{O_2} = 0.0083$ |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.5230$<br>$b = 0.8770$<br>$c = 1.9616$<br>$d = 0.8384$<br>$e = 0.0577$ | $X_{CO_2} = 0.1228$<br>$X_{CO} = 0.2060$<br>$X_{H_2O} = 0.4607$<br>$X_{H_2} = 0.1969$<br>$X_{O_2} = 0.0136$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.3388$<br>$b = 0.6612$<br>$c = 1.3278$<br>$d = 0.6722$                 | $X_{CO_2} = 0.1129$<br>$X_{CO} = 0.2204$<br>$X_{H_2O} = 0.4426$<br>$X_{H_2} = 0.2241$                       |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  |              | $e = 0$   | $X_{O_2} = 0$  |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.2860$<br>$b = 0.7140$<br>$c = 1.2140$<br>$d = 0.7860$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0953$<br>$X_{CO} = 0.2380$<br>$X_{H_2O} = 0.4047$<br>$X_{H_2} = 0.2620$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.2440$<br>$b = 0.7560$<br>$c = 1.1089$<br>$d = 0.8911$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0813$<br>$X_{CO} = 0.2520$<br>$X_{H_2O} = 0.3696$<br>$X_{H_2} = 0.2970$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.2100$<br>$b = 0.7900$<br>$c = 1.0122$<br>$d = 0.9878$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0700$<br>$X_{CO} = 0.2633$<br>$X_{H_2O} = 0.3374$<br>$X_{H_2} = 0.3293$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.1820$<br>$b = 0.8180$<br>$c = 0.9233$<br>$d = 1.0767$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0607$<br>$X_{CO} = 0.2727$<br>$X_{H_2O} = 0.3078$<br>$X_{H_2} = 0.3589$<br>$X_{O_2} = 0$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.1585$<br>$b = 0.8415$<br>$c = 0.8415$<br>$d = 1.1585$<br>$e = 0$ | $X_{CO_2} = 0.0528$<br>$X_{CO} = 0.2805$<br>$X_{H_2O} = 0.2805$<br>$X_{H_2} = 0.3862$<br>$X_{O_2} = 0$ |

 **Pour T=1900K**

Table IV-4: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=1900} = 4.1591$  et  $K_{p1}^{T=1900} = 5.41 * 10^{-4}$

| Constante d'équilibre | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|-----------------------|-------------------|---|---|
|                       | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|                       | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|                       | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$   | $X_{CO_2} = 0.1304$   |

|  |              |  |   |
|--|--------------|--|---|
| $K_p^{T=1900} = 4.1591$<br><br><b>ET</b><br><br>$K_{p1}^{T=1900} = 5.41 * 10^{(-4)}$ |              | $b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$                                 | $X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$                                  |
|  | $\phi = 0.4$ | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$                    | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$              |
|  | $\phi = 0.5$ | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$                        | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$                    |
|  | $\phi = 0.6$ | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$                    | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$           |
|  | $\phi = 0.7$ | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$                    | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$           |
|  | $\phi = 0.8$ | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$                    | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$           |
|  | $\phi = 0.9$ | $a = 0.9$<br>$b = 0$<br>$c = 1.8$<br>$d = 0$<br>$e = 0.2$                    | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$           |
|  | $\phi = 1$   | $a = 0.9927$<br>$b = 0.0073$<br>$c = 1.9965$<br>$d = 0.0035$<br>$e = 0.0054$ | $X_{CO_2} = 0.3303$<br>$X_{CO} = 0.0024$<br>$X_{H_2O} = 0.6643$<br>$X_{H_2} = 0.0012$<br>$X_{O_2} = 0.0018$ |
|  | $\phi = 1.1$ | $a = 0.7702$<br>$b = 0.2298$<br>$c = 1.8661$<br>$d = 0.1339$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.2567$<br>$X_{CO} = 0.0766$<br>$X_{H_2O} = 0.6220$<br>$X_{H_2} = 0.0446$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.2$ | $a = 0.3952$<br>$b = 0.6048$<br>$c = 1.7285$<br>$d = 0.2715$                 | $X_{CO_2} = 0.2016$<br>$X_{CO} = 0.1317$<br>$X_{H_2O} = 0.5762$<br>$X_{H_2} = 0.0905$                       |

|  |              | $e = 0$  | $X_{O_2} = 0$   |
|--|--------------|--|---|
|  | $\phi = 1.3$ | $a = 0.5998$<br>$b = 0.7002$<br>$c = 2.0338$<br>$d = 0.5662$<br>$e = 0.0332$ | $X_{CO_2} = 0.1525$<br>$X_{CO} = 0.1780$<br>$X_{H_2O} = 0.5171$<br>$X_{H_2} = 0.1439$<br>$X_{O_2} = 0.0084$ |
|  | $\phi = 1.4$ | $a = 0.5070$<br>$b = 0.8930$<br>$c = 1.9780$<br>$d = 0.8220$<br>$e = 0.0575$ | $X_{CO_2} = 0.1191$<br>$X_{CO} = 0.2098$<br>$X_{H_2O} = 0.4646$<br>$X_{H_2} = 0.1931$<br>$X_{O_2} = 0.0135$ |
|  | $\phi = 1.5$ | $a = 0.3276$<br>$b = 0.6724$<br>$c = 1.3391$<br>$d = 0.6609$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.1092$<br>$X_{CO} = 0.2241$<br>$X_{H_2O} = 0.4464$<br>$X_{H_2} = 0.2203$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.6$ | $a = 0.2753$<br>$b = 0.7247$<br>$c = 1.2247$<br>$d = 0.7753$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0918$<br>$X_{CO} = 0.2416$<br>$X_{H_2O} = 0.4082$<br>$X_{H_2} = 0.2584$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.7$ | $a = 0.2339$<br>$b = 0.7661$<br>$c = 1.1190$<br>$d = 0.8810$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0780$<br>$X_{CO} = 0.2554$<br>$X_{H_2O} = 0.3730$<br>$X_{H_2} = 0.2937$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.8$ | $a = 0.2007$<br>$b = 0.7993$<br>$c = 1.0216$<br>$d = 0.9784$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0669$<br>$X_{CO} = 0.2664$<br>$X_{H_2O} = 0.3405$<br>$X_{H_2} = 0.3261$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.1734$<br>$b = 0.8266$<br>$c = 0.9319$<br>$d = 1.0681$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0578$<br>$X_{CO} = 0.2755$<br>$X_{H_2O} = 0.3106$<br>$X_{H_2} = 0.3560$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.1507$<br>$b = 0.8493$<br>$c = 0.8493$<br>$d = 1.1507$<br>$e = 0$      | $X_{CO_2} = 0.0502$<br>$X_{CO} = 0.2831$<br>$X_{H_2O} = 0.2831$<br>$X_{H_2} = 0.3836$<br>$X_{O_2} = 0$      |

✚ **Pour T=2000K**

Table IV-5: fractions molaires des produits après correction en fonction de l'équivalent ratio sous  $K_p^{T=2000} = 4.5289$  et  $K_{p1}^{T=2000} = 1.31 * 10^{-3}$

| Constante d'équilibre   | Equivalence Ratio | Paramètres de l'équation de combustion                    | Fraction molaire (%)  |
|---|-------------------|---|---|
| $K_p^{T=2000} = 4.5289$<br><br><b>And</b><br><br>$K_{p1}^{T=2000} = 1.31 * 10^{(-3)}$ | $\phi = 0.1$      | $a = 0.1$<br>$b = 0$<br>$c = 0.2$<br>$d = 0$<br>$e = 1.8$ | $X_{CO_2} = 0.0476$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.0952$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.8571$ |
|   | $\phi = 0.2$      | $a = 0.2$<br>$b = 0$<br>$c = 0.4$<br>$d = 0$<br>$e = 1.6$ | $X_{CO_2} = 0.0909$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.1818$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.7273$ |
|   | $\phi = 0.3$      | $a = 0.3$<br>$b = 0$<br>$c = 0.6$<br>$d = 0$<br>$e = 1.4$ | $X_{CO_2} = 0.1304$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.2609$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.6087$ |
|   | $\phi = 0.4$      | $a = 0.4$<br>$b = 0$<br>$c = 0.8$<br>$d = 0$<br>$e = 1.2$ | $X_{CO_2} = 0.1667$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.3333$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.5$    |
|   | $\phi = 0.5$      | $a = 0.5$<br>$b = 0$<br>$c = 1$<br>$d = 0$<br>$e = 1$     | $X_{CO_2} = 0.2$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.4$          |
|   | $\phi = 0.6$      | $a = 0.6$<br>$b = 0$<br>$c = 1.2$<br>$d = 0$<br>$e = 0.8$ | $X_{CO_2} = 0.2308$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.4615$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.3077$ |
|   | $\phi = 0.7$      | $a = 0.7$<br>$b = 0$<br>$c = 1.4$<br>$d = 0$<br>$e = 0.6$ | $X_{CO_2} = 0.2593$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5185$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.2222$ |
|   | $\phi = 0.8$      | $a = 0.8$<br>$b = 0$<br>$c = 1.6$<br>$d = 0$<br>$e = 0.4$ | $X_{CO_2} = 0.2857$<br>$X_{CO} = 0$<br>$X_{H_2O} = 0.5714$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.1429$ |
|   | $\phi = 0.9$      | $a = 0.9$<br>$b = 0$                                      | $X_{CO_2} = 0.3103$<br>$X_{CO} = 0$   |

|  |              |  |   |
|--|--------------|--|---|
|  |              | c = 1.8<br>d = 0<br>e = 0.2  | $X_{H_2O} = 0.6207$<br>$X_{H_2} = 0$<br>$X_{O_2} = 0.0690$  |
|  | $\phi = 1$   | a = 0.9868<br>b = 0.0132<br>c = 1.9941<br>d = 0.0059<br>e = 0.0096 | $X_{CO_2} = 0.3279$<br>$X_{CO} = 0.0044$<br>$X_{H_2O} = 0.6626$<br>$X_{H_2} = 0.0020$<br>$X_{O_2} = 0.0032$ |
|  | $\phi = 1.1$ | a = 0.7640<br>b = 0.2360<br>c = 1.8723<br>d = 0.1277<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.2547$<br>$X_{CO} = 0.0787$<br>$X_{H_2O} = 0.6421$<br>$X_{H_2} = 0.0426$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.2$ | a = 0.5948<br>b = 0.4052<br>c = 1.7385<br>d = 0.2615<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.1983$<br>$X_{CO} = 0.1351$<br>$X_{H_2O} = 0.5795$<br>$X_{H_2} = 0.0872$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.3$ | a = 0.5862<br>b = 0.7138<br>c = 2.0338<br>d = 2.0524<br>e = 0.307  | $X_{CO_2} = 0.1491$<br>$X_{CO} = 0.1816$<br>$X_{H_2O} = 0.5221$<br>$X_{H_2} = 0.1393$<br>$X_{O_2} = 0.0078$ |
|  | $\phi = 1.4$ | a = 0.3826<br>b = 0.6174<br>c = 1.4746<br>d = 0.5254<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.1275$<br>$X_{CO} = 0.2058$<br>$X_{H_2O} = 0.4915$<br>$X_{H_2} = 0.1751$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.5$ | a = 0.3152<br>b = 0.6848<br>c = 1.3515<br>d = 0.64857<br>e = 0     | $X_{CO_2} = 0.1051$<br>$X_{CO} = 0.2283$<br>$X_{H_2O} = 0.4505$<br>$X_{H_2} = 0.2162$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.6$ | a = 0.2634<br>b = 0.7366<br>c = 1.2366<br>d = 0.7634<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.0878$<br>$X_{CO} = 0.2455$<br>$X_{H_2O} = 0.4122$<br>$X_{H_2} = 0.2545$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.7$ | a = 0.2229<br>b = 0.7771<br>c = 1.1301<br>d = 0.8699<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.0743$<br>$X_{CO} = 0.2590$<br>$X_{H_2O} = 0.3767$<br>$X_{H_2} = 0.2900$<br>$X_{O_2} = 0$      |
|  | $\phi = 1.8$ | a = 0.1905<br>b = 0.8095<br>c = 1.0318<br>d = 0.9682<br>e = 0      | $X_{CO_2} = 0.0635$<br>$X_{CO} = 0.2698$<br>$X_{H_2O} = 0.3439$<br>$X_{H_2} = 0.3227$<br>$X_{O_2} = 0$      |

|  |              |   |  |
|--|--------------|---|--|
|  | $\phi = 1.9$ | $a = 0.1641$<br>$b = 0.8359$<br>$c = 0.9412$<br>$d = 1.0588$<br>$e = 0$ | $X_{\text{CO}_2} = 0.0547$<br>$X_{\text{CO}} = 0.2786$<br>$X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3137$<br>$X_{\text{H}_2} = 0.3529$<br>$X_{\text{O}_2} = 0$ |
|  | $\phi = 2$   | $a = 0.1422$<br>$b = 0.8578$<br>$c = 0.8578$<br>$d = 1.1422$<br>$e = 0$ | $X_{\text{CO}_2} = 0.0474$<br>$X_{\text{CO}} = 0.2859$<br>$X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.2859$<br>$X_{\text{H}_2} = 0.3807$<br>$X_{\text{O}_2} = 0$ |