

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SIENTIFIQUE

Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département du génie mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

De Master académique en génie mécanique

Option Énergétique

THEME

Simulation numérique d'une cheminée solaire

Proposé et dirigé par :

M^r : M. HAMZAOU

Réalisé par :

M^r : Krimou SEMMANI

Promotion 2012 / 2013

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu, le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonte et surtout la santé durant toutes ces années d'études.

Mes plus vifs remerciements s'adressent à mon promoteur M^r Malek HAMZAOUI de m'avoir proposé ce sujet et de m'avoir dirigé tout au long de sa réalisation, merci infiniment.

Nos remerciements s'adressent aussi au président et aux membres de jury, qui ont acceptés d'examiner ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents à qui je dois tout, Dieu me les garde.

Mes sœurs et mes frères.

Mes proches.

À tous mes ami(e)s.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
DEDICACES	ii
SOMMAIRE	iii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xiii
NOMENCLATURE	xiv
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapitre I : DESCRIPTION DE LA CHEMINEE SOLAIRE

I.1. Introduction	3
I.2. Historique	3
I.3. Principe de fonctionnement de la cheminée solaire	4
I.4. Principaux éléments de la cheminée solaire	5
I.4.1. Collecteur	5
I.4.2. Cheminée	6
I.4.3. Turbine éolienne	7
I.4.4. Système de stockage	9
I.5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire	10
I.5.1. Avantages	10
I.5.2. Inconvénients	10
I.6. Conclusion	10

Chapitre II : CALCULS ENERGETIQUES

II.1. Introduction	11
II.2. Bilans thermiques	12
II.2.1. Vitre	12
II.2.2. Absorbeur (sol)	14
II.3. Calcul de T_s et T_v	16
II.4. Propriétés thermo-physiques et spectrales des éléments du collecteur	19
II.5. Résultats	19
II.5.1. Influence de la température ambiante et du rayonnement solaire	19

II.5.2. Influence de la température ambiante et de la vitesse du vent	21
II.6. Validation du programme de calcul de T_s et T_v	22
II.7. Conclusion	23

Chapitre III : MODELISATION MATHEMATIQUE

III.1 : Introduction	24
III.2. Définition du problème	24
III.3. Hypothèses simplificatrices	25
III.4. Principes d'hydrodynamique	26
III.4.1. Principe de conservation de la masse	26
III.4.2. Principe de conservation de la quantité de mouvement	27
III.5. Effet de la turbulence sur les équations de Navier-Stokes moyennées par rapport au temps	28
III.6. Modèles de turbulence	29
III.6.1. Modèle standard $k-\varepsilon$	29
III.7. Principe de conservation de l'énergie	31
III.8. Forme générale des équations de transport	32
III.9. Conditions aux limites	33
III.10. Conclusion	34

Chapitre IV : MODELISATION NUMERIQUE

IV.1. Introduction	35
IV.2. Procédure de modélisation	35
IV.3. Géométrie du problème	37
IV.4. Initiation au logiciel GAMBIT	38
IV.4.1. Construction d'un maillage	38
IV.4.1.1. Réalisation de la géométrie	38
IV.4.1.2. Réalisation du maillage	39
IV.5. Réalisation du maillage pour la géométrie simple	40
IV.5.1. maillage des lignes	40
IV.5.2. Maillage des surfaces	41
IV.6. Réalisation du maillage pour la géométrie courbé	41
IV.6.1. maillage des lignes	41

IV.6.2. Maillage des surfaces	42
IV.7. Définition des conditions aux limites	42
IV.8. Simulation numérique d'une cheminée solaire par FLUENT	43
IV.8.1. Présentation du logiciel FLUENT	43
IV.8.2. Procédure de simulation	43
IV.8.2.1. Lecture du fichier, vérification du maillage et définition de l'échelle	43
IV.8.2.2. Modèle	43
IV.8.2.3. Propriétés du fluide	44
IV.8.2.4. Conditions de fonctionnement et aux limites	44
IV.8.2.5. Critères de convergence	45
IV.8.2.6. Couplage pression-vitesse, sous relaxation et discrétisation	46
IV.9. Conclusion	46

Chapitre V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction	47
V.2. Effet du maillage	47
V.3. Courbe des résidus	49
V.4. Type d'écoulement	51
V.5. Validation du code de calcul	52
V.6. Résultats	54
V.6.1. Contours de température, de pression, de vitesse et lignes de courant	54
V.6.1.1. Contours de température	54
V.6.1.2. Contours de pression	58
V.6.1.3. Contours de vitesse	63
V.6.1.4. Lignes de courant	68
V.6.2. Profils de vitesse, de température et de pression	73
V.6.2.1. Dans le Collecteur	73
V.6.2.1.1. Profils à $z = 0.5$ m	73
V.6.2.1.1.1. Profils de température	74
V.6.2.1.1.2. Profils de vitesse	75
V.6.2.1.1.3. Profils de pression	76
V.6.2.1.2. Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur	77
V.6.2.2. Dans la Cheminée	80

V.6.2.2.1. Profils de vitesse à $z = 4$ m	80
V.6.3. Puissance utile de la turbine	81
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	84
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Schéma présentatif d'une cheminée solaire	3
Figure I.2	Principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire	5
Figure I.3	Vue interne du collecteur d'une cheminée solaire	6
Figure I.4	Disposition schématique	7
Figure I.5	Turbines verticales dans le collecteur	8
Figure I.6	Une grande turbine horizontale dans la cheminée	8
Figure I.7	Plusieurs petites turbines horizontales dans la cheminée	8
Figure I.8	Principe de stockage de la chaleur par des tubes d'eau	9
Figure II.1	Réseau thermique du collecteur de la cheminée solaire	11
Figure II.2	Organigramme de calcul de T_s et T_v	18
Figure II.3	Effet de la température ambiante et du rayonnement solaire sur la température de la vitre en °C	20
Figure II.4	Effet de la température ambiante et du rayonnement solaire sur la température de l'absorbeur (sol) en °C	20
Figure II.5	Effet de la température ambiante et de la vitesse du vent sur la température de la vitre en °C	21
Figure II.6	Effet de la température ambiante et de la vitesse du vent sur la température de l'absorbeur (sol) en °C	22
Figure II.7	Effet de la température ambiante et de rayonnement solaire sur la température de l'absorbeur (sol) en °C	22
Figure III.1	La géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire	24
Figure III.2	La géométrie simple bidimensionnelle de la cheminée solaire	25
Figure III.3	La géométrie courbée bidimensionnelle de la cheminée solaire	25
Figure III.4	Les conditions aux limites associées aux équations de transport	33
Figure IV.1	Procédure de modélisation	36
Figure IV.2	Les dimensions de la cheminée solaire	37
Figure IV.3	Les dimensions de la géométrie bidimensionnelle simple	37
Figure IV.4	Les dimensions de la géométrie bidimensionnelle courbée	37
Figure IV.5	Réalisation de la géométrie sous GAMBIT	39
Figure IV.6	Réalisation du maillage sous GAMBIT	40
Figure IV.7	Maillage des lignes dans le cas $H = 50$ m pour la géométrie simple	40
Figure IV.8	Maillage de la géométrie simple dans le cas $H = 50$ m	41

Figure IV.9	Maillage des lignes dans le cas $H = 50$ m pour la géométrie courbée	41
Figure IV.10	Maillage de la géométrie courbée dans le cas $H = 50$ m	42
Figure IV.11	Définition des conditions aux limites dans les deux géométries de la cheminée solaire	42
Figure IV.12	Choix de l'unité de longueur	43
Figure IV.13	Modèle sous FLUENT	44
Figure IV.14	Propriétés de l'air sous FLUENT	44
Figure IV.15	Conditions de fonctionnement et aux limites	45
Figure IV.16	Fixation des résidus	45
Figure IV.17	Paramètres de solution sous FLUENT	46
Figure V.1	Évolution des résidus pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m ²	49
Figure V.2	Évolution des résidus pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m ²	49
Figure V.3	Évolution des résidus pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m ²	49
Figure V.4	Évolution des résidus pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m ²	50
Figure V.5	Évolution des résidus pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m ²	50
Figure V.6	Évolution des résidus pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m ²	50
Figure V.7	Évolution des résidus pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m ²	51
Figure V.8	Profils de température à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m [nos calculs]	53
Figure V.9	Profil de température du fluide traversant le collecteur [6]	53
Figure V.10	Profils de vitesse à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m [nos calculs]	53
Figure V.11	Profil de vitesse du fluide traversant le collecteur [6]	53
Figure V.12	Profils de pression à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m [nos calculs]	53
Figure V.13	Profil de pression statique du fluide traversant le collecteur [6]	53
Figure V.14	Contours de température dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m ²	54
Figure V.15	Contours de température dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m ²	55
Figure V.16	Contours de température dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m ²	55

Figure V.17	Contours de température dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m ²	56
Figure V.18	Contours de température dans les deux géométries pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m ²	56
Figure V.19	Contours de température dans les deux géométries pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m ²	57
Figure V.20	Contours de température dans les deux géométries pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m ²	58
Figure V.21	Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m ²	59
Figure V.22	Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m ²	59
Figure V.23	Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m ²	60
Figure V.24	Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m ²	60
Figure V.25	Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m ²	61
Figure V.26	Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m ²	62
Figure V.27	Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m ²	63
Figure V.28	Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m ²	64
Figure V.29	Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m ²	64
Figure V.30	Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m ²	65
Figure V.31	Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m ²	65
Figure V.32	Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m ²	66

Figure V.33	Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m^2	67
Figure V.34	Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m^2	68
Figure V.35	Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m^2	69
Figure V.36	Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m^2	69
Figure V.37	Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m^2	70
Figure V.38	Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m^2	70
Figure V.39	Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m^2	71
Figure V.40	Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m^2	72
Figure V.41	Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m^2	73
Figure V.42	La zone de mi-hauteur du collecteur ($z = 0.5$ m)	74
Figure V.43	Profils de température à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m	75
Figure V.44	Profils de température à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de H et $G = 700$ W/m^2	75
Figure V.45	Profils de vitesse à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m	76
Figure V.46	Profils de vitesse à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de H et $G = 700$ W/m^2	76
Figure V.47	Profils de pression à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m	77
Figure V.48	Profils de pression à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de H et $G = 700$ W/m^2	77
Figure V.49	Les sections verticales à étudier dans le collecteur ($r = 10, 20, 30, 40$ m)	78

Figure V.50	Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m^2	79
Figure V.51	Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m^2	79
Figure V.52	Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m^2	79
Figure V.53	Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m^2	80
Figure V.54	La zone de $z = 4$ m	80
Figure V.55	Profils de vitesse à $z = 4$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m	81
Figure V.56	Profils de vitesse à $z = 4$ m pour différentes valeurs de H et $G = 700$ W/m^2	81
Figure V.57	Puissance utile en fonction du rayonnement solaire	82
Figure V.58	Puissance utile en fonction de la hauteur de la cheminée	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1	Propriétés thermo-physiques de l'air à 25 °C	19
Tableau II.2	Caractéristiques thermiques et spectrales moyennes des composants du collecteur	19
Tableau III.1	Termes de l'équation générale de transport	33
Tableau V.1	Optimisation du maillage de la géométrie simple pour $G = 700 \text{ W/m}^2$	48
Tableau V.2	Optimisation du maillage de la géométrie courbée pour $G = 700 \text{ W/m}^2$	48
Tableau V.3	Nombres adimensionnels pour la paroi inférieure du collecteur (sol) et pour différentes valeurs de H et $G = 700 \text{ W/m}^2$	52

NOMENCLATURE

a	Diffusivité thermique de l'air	[m ² /s]
a_s	Diffusivité thermique du sol	[m ² /s]
C_{ms}	Chaleur massique du sol	[J/kg K]
C_p	Chaleur massique de l'air à pression constante	[J/kg K]
C_v	Chaleur massique de l'air à volume constant	[J/kg K]
C_μ	Constante	[-]
$C_{1\varepsilon}$	Constante	[-]
$C_{2\varepsilon}$	Constante	[-]
$C_{3\varepsilon}$	Constante	[-]
D_h	Diamètre hydraulique	[m]
d_s	Profondeur d'atténuation	[m]
F_i	Forces de volume	[N/m ³]
G	Rayonnement solaire	[W/m ²]
Gr	Nombre de Grashof	[-]
g	Constante gravitationnelle	[m/s ²]
G_k	Génération de l'énergie cinétique due au gradient de vitesse	[kg/m s ³]
G_b	Génération de k due au découlement et des forces de volume	[kg/m s ³]
h_{rvs}	Coefficient convectif entre la vitre et l'absorbeur	[W/m ² K]
h_w	Coefficient convectif entre la vitre et l'extérieure	[W/m ² K]
h_{rc}	Coefficient de rayonnement au ciel	[W/m ² K]
h_{vif}	Coefficient convectif entre la vitre et l'air intérieur	[W/m ² K]
h_{sf}	Coefficient convectif entre le sol et l'air intérieur	[W/m ² K]
h	Hauteur du collecteur	[m]
H	Hauteur de la cheminée	[m]
k_1	Constante	[W/m ² K]
k_2	Constante	[W/m ² K]
k_3	Constante	[W/m ² K]
k_4	Constante	[W/m ² K]
k	Énergie cinétique de turbulence	[m ² /s ²]
\dot{m}	Débit massique	[kg/s]
Nu	Nombre de Nusselt	[-]

Pr	Nombre de Prandtl	[-]
Pr_t	Nombre de Prandtl turbulent pour l'énergie	[-]
P	Pression	[Pa]
ΔP	Différence de pression entre la pression atmosphérique et l'entrée ou sortie de la cheminée solaire	[Pa]
P_u	Puissance utile de la turbine	[W]
\dot{q}_v	Rayonnement solaire reçu par la vitre	[W/m ²]
\dot{q}_{rvs}	Flux thermique radiatif entre la vitre et l'absorbeur	[W/m ²]
\dot{q}_w	Flux thermique convectif entre la vitre et l'extérieur	[W/m ²]
\dot{q}_{rc}	Flux thermique radiatif entre la vitre et le ciel	[W/m ²]
\dot{q}_{vf}	Flux convectif entre la vitre et l'air intérieur	[W/m ²]
\dot{q}_s	Rayonnement solaire reçu par le sol	[W/m ²]
\dot{q}_{sf}	Flux convectif entre l'absorbeur et l'air intérieur	[W/m ²]
\dot{q}_b	Perte thermique par conduction au sous sol	[W/m ²]
R	Rayon du collecteur	[m]
Ra	Nombre de Raleigh	[-]
r	Direction radiale ou rayon de la cheminée	[m]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
Ri	Nombre de Richardson	[-]
S_k	Terme de source pour k	[kg/m s ³]
S_ε	Terme de source pour ε	[kg/m s ⁴]
S_{ij}	Tenseur moyen du taux de déformation	[s ⁻¹]
S_ϕ	Terme de source	
T	Température	[K]
T_s	Température du sol	[K]
T_v	Température de la vitre	[K]
T_a	Température ambiante	[K]
T_c	Température du ciel	[K]
T_f	Température de l'air à l'intérieure du collecteur	[K]
T_b	Température du sol à la profondeur d'atténuation	[K]
T_0	Température de référence	[K]
t	Temps	[s]

U_b	Coefficient global de perte de chaleur au sol	[W/m ² K]
U_s	Coefficient de transfert thermique au sol	[W/m ² K]
u	Vitesse radiale	[m/s]
u'	Vitesse radiale fluctuante	[m/s]
U	Vitesse radiale moyenne	[m/s]
v_i	Vitesse dans la direction i	[m/s]
v	Vitesse axiale	[m/s]
v'	Vitesse axiale fluctuante	[m/s]
V	Vitesse axiale moyenne	[m/s]
V	Vitesse	[m/s]
\bar{V}	Vitesse moyenne	[m/s]
w	Vitesse du vent	[m/s]
x_i	Coordonné	[m]
Y_M	La contribution de la dilation fluctuante dans la turbulence compressible pour ε	[kg/m s ³]
z	Direction axiale	[m]

Symboles grecs :

α_v	Absorptivité de la vitre	[-]
α_s	Absorptivité du sol	[-]
β	Coefficient de dilatation thermique	[1/K]
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique	[m ² /s ³]
ε_v	Émissivité de la vitre	[-]
ε_s	Émissivité du sol	[-]
ϕ, φ	Variable de l'écoulement	
Φ	Composante moyenne de φ	
Φ	Fonction de dissipation	[W/m ³]
φ'	Composante fluctuante de φ	
Γ_ϕ	Coefficient de diffusion	
λ	Conductivité thermique de l'air	[W/m K]
λ_s	Conductivité thermique du sol	[W/m K]
μ	Viscosité dynamique de l'air	[kg/m s]
μ_t	Viscosité turbulente	[kg/m s]

ν	Viscosité cinématique de l'air	$[\text{m}^2/\text{s}]$
ρ	Masse volumique de l'air	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_0	Masse volumique à T_0	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_s	Masse volumique du sol	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
σ	Constante de Stefan – Boltzmann	$[\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4]$
σ_{ij}	Tenseur des contraintes	$[\text{Pa}]$
τ_v	Transmissivité de la vitre	$[-]$
ω	Fréquence angulaire journalière	$[1/\text{s}]$

INTRODUCTION GENERALE

L'augmentation rapide de la population et le développement économique impliquent une demande croissante de l'énergie afin d'assurer une vie moderne acceptable et soutenable. L'utilisation des énergies fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz possède le risque d'épuiser les réserves d'énergies non renouvelables ainsi que les risques de pollution qu'ils impliquent, ceci exige l'orientation des efforts et des recherches vers les sources renouvelables de l'énergie afin d'avoir une énergie propre et durable.

L'énergie solaire est l'un des plus grands espoirs comme source d'énergie inépuisable. Plusieurs applications sont faites pour produire de l'énergie thermique ou électrique à partir du rayonnement solaire.

La cheminée solaire est l'une de ces applications qui sert à produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire par la transformation de cette dernière en énergie cinétique de l'air interne et cette énergie cinétique à son tour entraîne des turbines éoliennes puis se transforme en électricité en finale.

Sur le plan physique, la cheminée solaire est un système énergétique complexe dans lequel tous les différents modes d'échange thermique interviennent. S'ils sont relativement simples et bien connus, leur couplage entraîne des difficultés dans la simulation de ce système. La convection naturelle est un mécanisme particulièrement important pour l'échange d'énergie inclus dans la cheminée solaire.

Le présent mémoire se compose de la simulation numérique de la cheminée solaire, du point de vue dynamique des fluides et transfert thermique en concentrant notre étude sur l'influence des paramètres géométriques de la cheminée solaire et du rayonnement solaire sur le comportement de l'air à l'intérieure de la cheminée solaire.

Le premier chapitre explique le principe de la cheminée solaire et les organes principaux intervenant dans son fonctionnement. Le mouvement d'air crée sous forme de convection naturel dans la cheminée solaire a conduit à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique.

Le deuxième chapitre concerne à exposé les corrélations thermiques utiles pour une étude d'un capteur solaire ou une serre ou bien un collecteur d'une cheminée solaire, dont

nous avons calculé les températures du sol et de la vitre du collecteur qui servent comme des conditions aux limite dans la simulation du problème sous FLUENT.

Le troisième chapitre est une modélisation mathématique sur les équations régissant le phénomène de la convection naturelle en régime turbulent d'où le modèle se compose de six équations qui sont : l'équation de continuité, les équations du mouvement suivant l'axe Or et l'axe Oz , les équations de $k-\varepsilon$ et l'équation de l'énergie.

Le quatrième chapitre est une modélisation numérique concernant les étapes suivies pour la simulation d'une cheminée solaire sous FLUENT.

Le cinquième chapitre est une analyse et une discussion des résultats des paramètres tracés, tels que les contours de vitesse, de température, et de pression ...etc.

Enfin une conclusion générale sur les résultats aboutis et ainsi que les recommandations qui peuvent être déduites.

Chapitre I :

DESCRIPTION DE LA CHEMINEE SOLAIRE

I.1. Introduction

La cheminée solaire est un moyen de production de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire. Elle repose sur l'idée d'exploiter l'énergie cinétique des mouvements de convection naturelle de l'air chauffé par le soleil.

Une immense serre appelée « collecteur » contient de l'air chauffé par le rayonnement solaire puis l'envoie vers une cheminée. Cet air chaud, naturellement aspiré par cette cheminée, est continuellement renouvelé par l'air situé à la périphérie de la serre. La cheminée solaire est équipée de tubes noirs contenant de l'eau qui absorbe la chaleur durant toute la journée pour la restituer pendant la nuit, un vent régulier se met alors en place. L'énergie cinétique de l'air est ensuite prélevée par un système de turbines éoliennes entraînant des générateurs d'électricité.

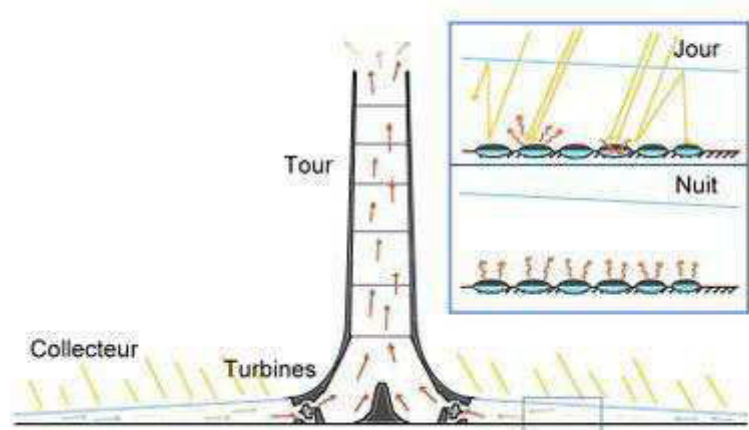


Figure I.1 : Schéma présentatif d'une cheminée solaire.

I.2. Historique

De nombreux chercheurs dans le monde ont présenté différents projets de tour solaire. Le premier est incontestablement un militaire espagnol, le colonel « Isidoro Cabanyes », qui proposa en 1903 un modèle de tour solaire dans la revue « La Energía eléctrica », on peut également citer le physicien français « Bernard DUBOS » qui proposa en 1926 d'exploiter un vent vertical produit par un gros tube installé sur le flanc d'une montagne, l'une des premières représentations d'une tour solaire a été rédigée en 1931 par un auteur allemand « Hanns Günther ».

Entre 1940 et 1960, le français « Edgard Nazare », après avoir observé plusieurs tourbillons de sable dans le sud saharien, et en avoir mesuré les caractéristiques grâce à son

déclinomètre-alidade de poche, imagina un dispositif totalement révolutionnaire « la tour à dépression », appelée aujourd'hui « tour à vortex ». C'est en 1956 qu'il déposa son premier brevet à Alger. Ce brevet fut redéposé à Paris le 3 août 1964. Il s'agissait de générer artificiellement une ascendance atmosphérique tourbillonnaire dans une sorte de tour en forme de tuyère de Laval et d'en récupérer une partie de l'énergie au moyen de turbines. En 1975 l'ingénieur canadien « Louis M. Michaud » publia son projet « Vortex Power Station » dans le bulletin de la Société Américaine de Météorologie. Il s'agissait également de générer une ascendance atmosphérique tourbillonnaire, mais dans une tour cylindrique.

Mais ce n'est qu'en 1981 qu'un premier prototype de cheminée solaire fut effectivement construite à Manzanares (ville espagnole à 150 kilomètres de Madrid) sous la direction de l'ingénieur allemand « Jörg Schlaich », et grâce aux fonds du ministère allemand de la recherche et de la technologie. Il ne s'agissait pas d'une tour à vortex mais d'une simple cheminée solaire, 5 fois moins puissante (à hauteur égale). Cette cheminée mesurait 194 mètres pour une puissance de 50 kW et a fonctionné jusqu'en 1989. Elle fut arrêtée en raison d'un coût du kilowattheure, cinq fois plus élevé qu'une centrale thermique classique.

Enfin, c'est le 8 octobre 1985 que le russe « George Mamulashvili » déposa son brevet pour un projet comparable à la tour à vortex appelé « Vertical Aerothermal Power Station ». En termes plus précis, les anglo-saxons désignent la technologie de la cheminée solaire par « Single Flow Upwind System » et la technologie de la tour à vortex par: « Rotational Flow Wirling System ».

I.3. Principe de fonctionnement de la cheminée solaire

L'air est chauffé par le rayonnement solaire sous l'effet de serre dans le collecteur qui est ouvert à la périphérie pour introduire l'air frais, et puisque l'air le plus chaud est plus léger que l'air froid, il s'élève en haut d'une cheminée localisée au centre du collecteur.

Une turbine éolienne à la base de la cheminée est mise dans la trajectoire de l'écoulement de l'air pour convertir l'énergie cinétique de l'air en énergie mécanique, et le générateur entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique (figure I.2).

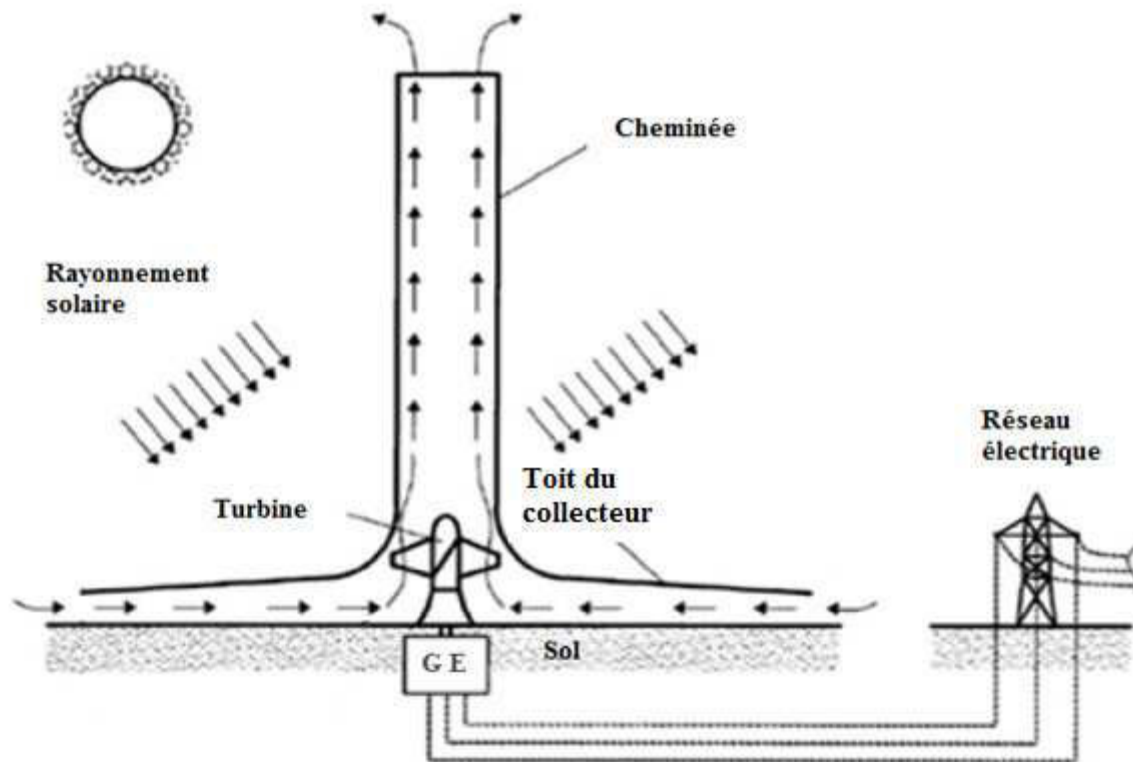


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale à cheminée solaire. [8]

I.4. Principaux éléments de la cheminée solaire

I.4.1. Collecteur

Le collecteur est la partie qui est employée pour produire l'air chaud par effet de serre, sa hauteur va de 2 à 6 mètres est il recouvre une vaste surface de plusieurs milliers de m². Comme le poids du verre augmente la masse du toit, les collecteurs doivent avoir une structure avec des tiges assez résistantes et attachées (figure I.3).

Divers matériaux peuvent constituer le dessus de la serre comme du verre ou des films plastiques, le plus efficace semble être le collecteur en verre, puisque son rendement de conversion de l'énergie solaire en chaleur peut aller jusqu'à 70%, la moyenne annuelle typique est de l'ordre de 50%. En outre, avec un entretien et une maintenance appropriée, sa durée de vie peut facilement être de 60 ans ou plus.



Figure I.3 : Vue interne du collecteur d'une cheminée solaire.

I.4.2. Cheminée

La partie la plus importante de l'équipement c'est la cheminée, il existe plusieurs configurations de la cheminée telles que cheminée à section constante, cheminée à section convergente et cheminée à section divergente (figure I.4). La cheminée peut être construite en béton, en acier ou bien en membranes plastiques, mais la durée de vie est importante dans une construction en béton ou en acier par rapport à celle des matériaux légers.

L'efficacité de la cheminée ne dépend pas de la température de l'air entrant, mais de la différence de température avec l'air extérieur en haut de la cheminée.

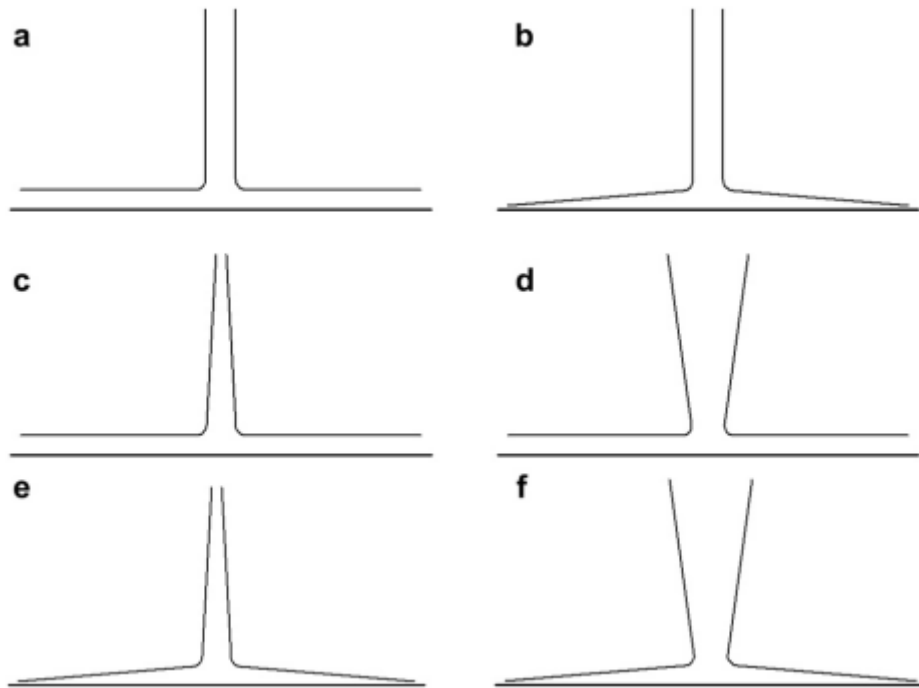


Figure I.4 : Disposition schématique ; (a) schéma de référence, (b) un collecteur incliné avec une cheminée à section constante, (c) un collecteur à taille constante avec une cheminée convergente, (d) un collecteur à taille constante avec une cheminée à section divergente, (e) un collecteur incliné avec une cheminée à section convergente, (f) un collecteur incliné avec une cheminée à section divergente. [9]

I.4.3. Turbine éolienne

Les turbines sont toujours placées où la vitesse d'écoulement d'air est plus élevée, pour transformer le maximum d'énergie cinétique en énergie mécanique ; le générateur entrainé par la turbine transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les turbines sont placées soit verticalement à la sortie du collecteur (figure I.5) ; soit horizontalement dans la cheminée. Afin d'obtenir le maximum d'énergie à partir de l'air chauffé, les lames des turbines doivent couvrir toute la section de la cheminée c'est pour cela une grande turbine (figure I.6) ou plusieurs petites turbines (figure I.7) devraient être utilisées au pied de la cheminée.

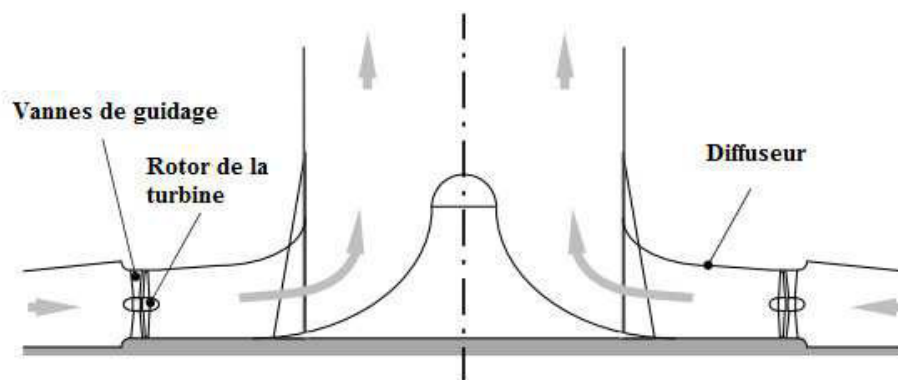


Figure I.5 : Turbines verticales dans le collecteur. [10]

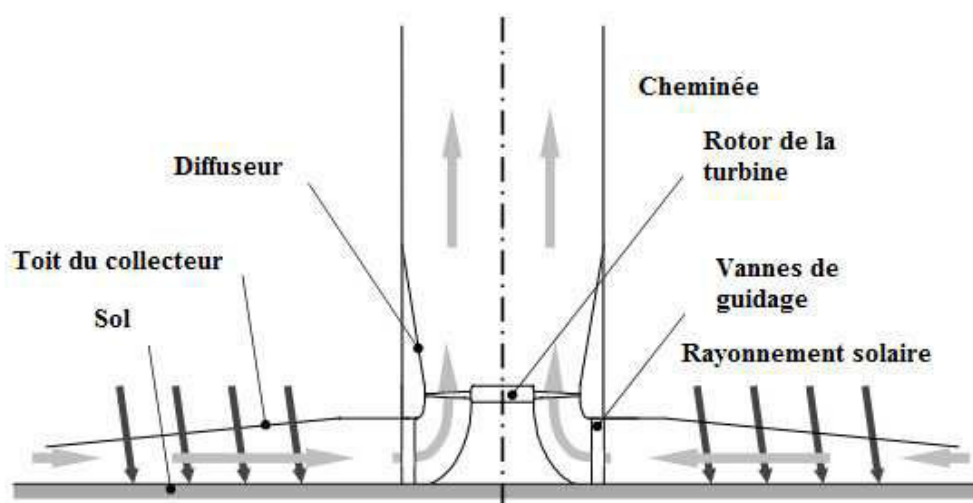


Figure I.6 : Une grande turbine horizontale dans la cheminée. [10]

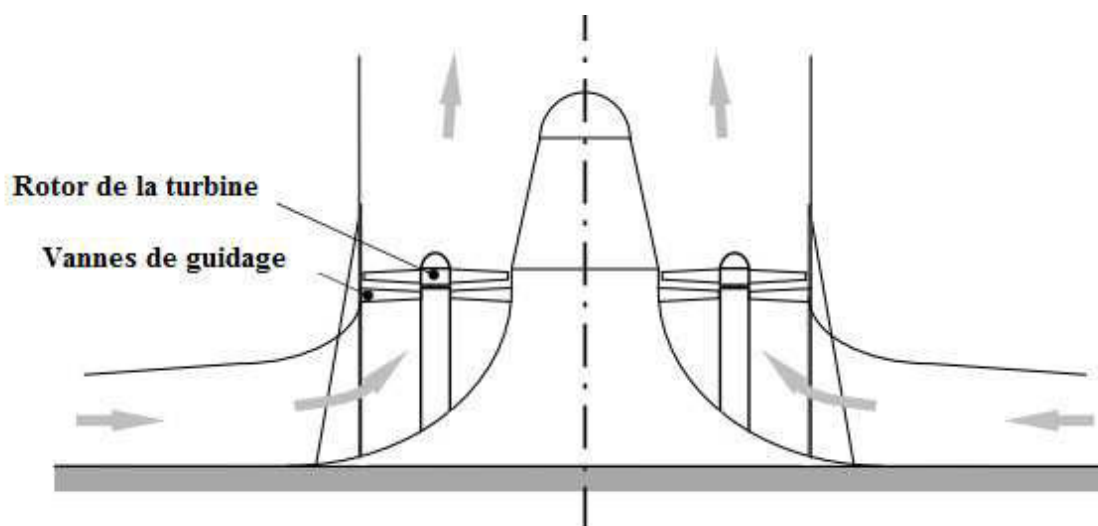


Figure I.7 : Plusieurs petites turbines horizontales dans la cheminée. [10]

I.4.4. Système de stockage

Le stockage de l'énergie thermique est assuré par des tubes noirs remplis d'eau, et mis côte à côte sur le sol. Ils sont remplis d'eau une seule fois et restent par la suite fermés, afin qu'aucune évaporation ne puisse avoir lieu. L'eau à l'intérieur des tubes stocke une grande partie de la chaleur solaire et la libère pendant la nuit, quand l'air dans le collecteur se refroidit.

La quantité d'eau utilisée pour le stockage a un effet sur la production de l'énergie électrique ; la production de l'énergie électrique atteint la valeur maximale vers midi, mais cette valeur diminue avec l'augmentation de la quantité d'eau de stockage. Dans le cas où il n'existe pas de l'eau de stockage, la production de l'énergie électrique pendant le jour est plus élevée que celle avec l'eau de stockage, mais elle se réduit pendant la nuit et devient minimale en comparaison avec la production en présence de l'eau de stockage.

Dans le cas où il existe de l'eau de stockage, la production de l'énergie électrique augmente avec la diminution du volume d'eau, par exemple pour les tubes de 5 cm de diamètre, l'énergie électrique produite pendant le jour est plus élevée que celle avec des tubes de 10 cm de diamètre, mais pendant la nuit, c'est l'inverse. Ce qui nous oblige à choisir une quantité convenable de l'eau de stockage.

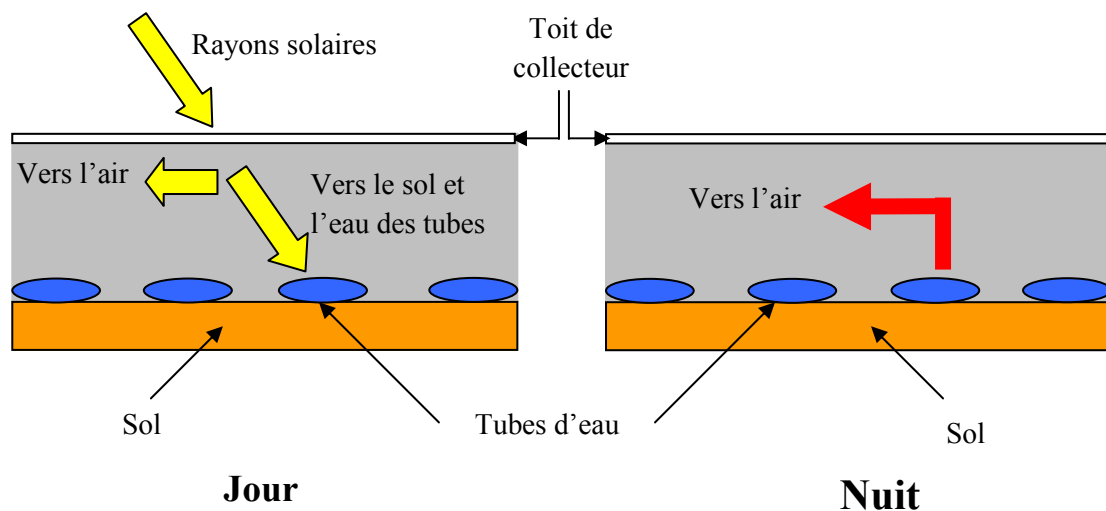


Figure I.8 : Principe de stockage de la chaleur par des tubes d'eau.

I.5. Avantages et inconvénients de la cheminée solaire

I.5.1. Avantages

- La cheminée solaire est particulièrement adaptée à la production d'électricité dans les déserts et les terres arides.
- En raison du système de stockage de chaleur, la cheminée solaire actionnera 24 h sur l'énergie solaire uniquement.
- Aucun carburant n'est nécessaire.
- Elle ne nécessite pas d'eau de refroidissement et elle est adaptée à des régions où règne une sécheresse extrême.
- La cheminée solaire est particulièrement fiable et nécessite peu de maintenances comparativement aux autres usines de production d'électricité.
- Les matériaux nécessaires à la construction d'une cheminée solaire sont le béton, le verre et l'acier, sont disponibles en quantités suffisantes partout dans le monde.

I.5.2. Inconvénients

- L'investissement de départ est plus élevé.
- La production n'est pas constante pendant le jour ou l'année.
- Le collecteur occupe une immense surface.
- Impact visuel négatif (certains y voient une dégradation du paysage).
- Quelques estimations disent que les coûts d'investissement pour la production d'électricité à partir d'une cheminée solaire est 5 fois plus important que celui à partir d'une turbine à gaz.

I.6. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre les différentes parties d'une centrale réelle à cheminée solaire, nous essayerons de reproduire le phénomène par la simulation numérique mais on se limite seulement à un cas simple sans prendre en considération les turbines et le système de stockage dont on verra juste comment l'air met en mouvement dans une cheminée solaire.

Chapitre II :

CALCULS ENERGETIQUES

II.1. Introduction

Beaucoup de facteurs, tels que les matériaux utilisés pour construire la cheminée solaire, la taille de la cheminée et du collecteur, et le type de sol ou de roche sous le capteur solaire peuvent influencer sur la performance de la cheminée solaire. En outre, l'important pour la production d'électricité à partir de l'énergie solaire est le gisement solaire de lieu considéré, ici une méthode de calcul est rapportée qui prend en considération le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent.

Dans ce chapitre, on présente les bilans thermiques du collecteur de la cheminée solaire, en arrivant vers la fin à calculer les températures du sol (paroi inférieure du collecteur) et de la vitre (paroi supérieure du collecteur) qu'on a supposé constantes le long des ces parois. La figure II.1 représente les différents transferts thermiques (conduction, convection, et rayonnement) intervenants dans ce processus.

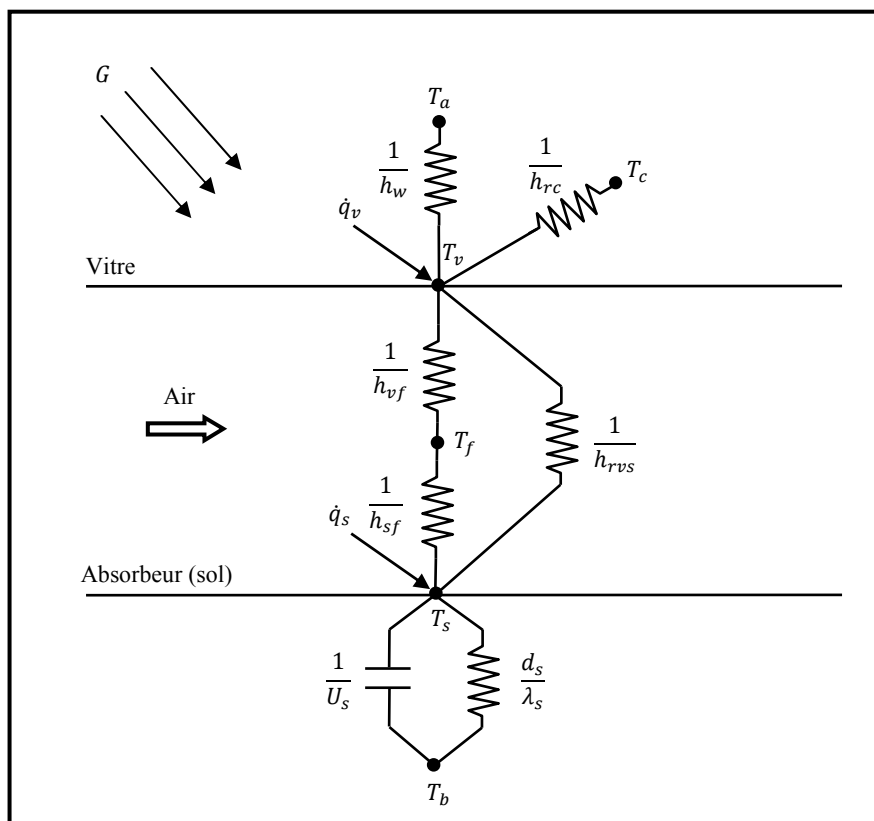


Figure II.1 : Réseau thermique du collecteur de la cheminée solaire.

II.2. Bilans thermiques

II.2.1. Vitre

$$\dot{q}_v + \dot{q}_{rvs} = \dot{q}_w + \dot{q}_{rc} + \dot{q}_{vf} \quad (\text{II.1})$$

\dot{q}_v : Rayonnement solaire reçu par la vitre.

$$\dot{q}_v = \alpha_v \times G \quad (\text{II.2})$$

α_v : Absorptivité de la vitre.

G : Rayonnement solaire.

\dot{q}_{rvs} : Flux thermique radiatif entre la vitre et l'absorbeur.

Compte tenu du fait que la hauteur h du collecteur est le plus souvent très petite devant son rayon R , on considère que l'échange radiatif a lieu entre deux plans parallèles infinis : [1]

$$\dot{q}_{rvs} = h_{rvs}(T_s - T_v) = \frac{\sigma(T_s^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (\text{II.3})$$

Cette équation permet d'exprimer le coefficient convectif entre la vitre et l'absorbeur h_{rvs} sous la forme :

$$h_{rvs} = \frac{\sigma(T_s^2 + T_v^2)(T_s + T_v)}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (\text{II.4})$$

σ : Constante de Stefan – Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

ε_s : Émissivité du sol.

ε_v : Émissivité de la vitre.

T_s : Température du sol.

T_v : Température de la vitre.

\dot{q}_w : Flux thermique convectif entre la vitre et l'extérieur.

$$\dot{q}_w = h_w(T_v - T_a) \quad (\text{II.5})$$

T_a : Température ambiante.

Lorsqu'un vent souffle parallèlement à une paroi, il existe une corrélation empirique simple qui permet d'avoir une idée du coefficient d'échange par convection forcée en fonction de la composante w de la vitesse du vent : [2]

$$h_w = 5.7 + 3.8 w \quad (\text{II.6})$$

h_w : Coefficient convectif entre la vitre et l'extérieure.

w : Vitesse du vent.

\dot{q}_{rc} : Flux thermique radiatif entre la vitre et le ciel.

Il s'agit ici d'échange radiatif entre la vitre à T_v et le ciel à la température T_c qu'on peut calculer par la formule empirique suivante : [3]

$$T_c = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (\text{II.7})$$

En considérant le ciel comme un corps noir, la puissance échangée par rayonnement est donnée par : [2]

$$\dot{q}_{rc} = h_{rc}(T_v - T_a) = \varepsilon_v \sigma(T_v^4 - T_c^4) \quad (\text{II.8})$$

D'où l'on tire h_{rc} :

$$h_{rc} = \frac{\varepsilon_v \sigma(T_v^4 - T_c^4)}{T_v - T_a} \quad (\text{II.9})$$

\dot{q}_{vf} : Flux convectif entre la vitre et l'air intérieur.

$$\dot{q}_{vf} = h_{vf}(T_v - T_f) \quad (\text{II.10})$$

T_f : Température de l'air à l'intérieure du collecteur.

Donc l'équation II.1 devient :

$$\dot{q}_v + h_{rvs}(T_s - T_v) = h_w(T_v - T_a) + h_{rc}(T_v - T_a) + h_{vf}(T_v - T_f) \quad (\text{II.11})$$

II.2.2. Absorbeur (sol)

$$\dot{q}_s = \dot{q}_{sf} + \dot{q}_{rvs} + \dot{q}_b \quad (\text{II.12})$$

\dot{q}_s : Rayonnement solaire reçu par le sol.

$$\dot{q}_s = \alpha_s (\tau_v \times G) \quad (\text{II.13})$$

α_s : Absorptivité du sol.

τ_v : Transmissivité de la vitre.

\dot{q}_{sf} : Flux convectif entre l'absorbeur et l'air intérieur.

$$\dot{q}_{sf} = h_{sf} (T_s - T_f) \quad (\text{II.14})$$

Les coefficients convectifs h_{vf} et h_{sf} sont considérés égaux, on peut les calculer à partir de l'équation suivante : [4]

$$h_{vf} = h_{sf} = \frac{\lambda}{D_h} Nu \quad (\text{II.15})$$

λ : Conductivité thermique de l'air.

D_h : Diamètre hydraulique.

Le collecteur a une forme circulaire avec un rayon R et une hauteur h ($h \ll R$), son diamètre hydraulique est donné par. [4]

$$D_h = \frac{4(2\pi R \times h)}{2(2\pi R + h)} \cong 2h \quad (\text{II.16})$$

Nu : Nombre de Nusselt est donné par. [4]

$$Nu = 0.54 Ra^{0.25} \quad \text{Si} \quad 2 \times 10^4 < Ra < 8 \times 10^7 \quad (\text{II.17})$$

$$Nu = 0.15 Ra^{0.33} \quad \text{Si} \quad 8 \times 10^7 < Ra < 8 \times 10^{11} \quad (\text{II.18})$$

Le nombre de Rayleigh Ra est défini comme le produit de nombres de Grashof Gr et de Prandtl Pr est donné par : [5]

$$Ra = Gr Pr = \frac{g \beta (T_s - T_f) D_h^3}{\nu^2} Pr \quad (\text{II.19})$$

g : Constante gravitationnelle.

β : Coefficient de dilatation thermique.

ν : Viscosité cinématique de l'air.

\dot{q}_b : Perte thermique par conduction au sous sol.

$$\dot{q}_b = U_b(T_s - T_b) \quad (\text{II.20})$$

T_b : Température du sol à la profondeur d'atténuation.

U_b : Coefficient global de perte de chaleur au sol est donné par. [5]

$$U_b = \frac{1}{\frac{d_s}{\lambda_s} + \frac{1}{U_s}} \quad (\text{II.21})$$

λ_s : Conductivité thermique du sol.

d_s : Profondeur d'atténuation. [5]

$$d_s = \sqrt{\frac{2 a_s}{\omega}} \quad (\text{II.22})$$

a_s : Diffusivité thermique du sol.

ω : Fréquence angulaire journalière. [5]

$$\omega = \frac{2\pi}{t} = 0.0000727 \text{ s}^{-1} \quad (\text{II.23})$$

U_s : Coefficient de transfert thermique au sol. [5]

$$U_s = 2 \sqrt{\frac{\lambda_s \rho_s C_{ms}}{\pi t}} \quad (\text{II.24})$$

ρ_s : Masse volumique du sol.

C_{ms} : Chaleur massique du sol.

t : Temps.

Dans ce modèle, une valeur moyenne pendant une période t de 84600 secondes est employée dans le calcul d'énergie en jour et T_b est égal à T_a . [5]

D'où l'équation II.12 devient :

$$\dot{q}_s = h_{sf}(T_s - T_f) + h_{rvs}(T_s - T_v) + U_b(T_s - T_a) \quad (\text{II.25})$$

II.3. Calcul de T_s et T_v

La température de l'air T_f à l'entrée du collecteur est égale à la température ambiante T_a ce qui nous donne un système de deux équations à deux inconnues T_v et T_s :

$$\begin{cases} k_2 T_v - h_{rvs} T_s = \dot{q}_v + k_1 T_a \\ -h_{rsv} T_v + k_4 T_s = \dot{q}_s + k_3 T_a \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$k_1 = h_w + h_{rc} + h_{vf} \quad (\text{II.27})$$

$$k_2 = k_1 + h_{rvs} \quad (\text{II.28})$$

$$k_3 = h_{sf} + U_b \quad (\text{II.29})$$

$$k_4 = k_3 + h_{rvs} \quad (\text{II.30})$$

On met le système II.26 sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} k_2 & -h_{rvs} \\ -h_{rsv} & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_v \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_v + k_1 T_a \\ \dot{q}_s + k_3 T_a \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} T_v \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2 & -h_{rvs} \\ -h_{rsv} & k_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{q}_v + k_1 T_a \\ \dot{q}_s + k_3 T_a \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Ou :

$$[T] = [A]^{-1}[B] \quad (\text{II.33})$$

Pour résoudre cette équation matricielle on suit les étapes suivantes :

- La première étape : saisir les données météorologiques telles que le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent et le calcul des constantes.

- La deuxième étape : initialiser les températures T_v et T_s puis calculer les éléments de A et B .
- La troisième étape : calcul de vecteur T et vérification de la convergence.

Toutes ces étapes sont représentées dans l'organigramme ci-dessous, le programme a été développé sous MATLAB.

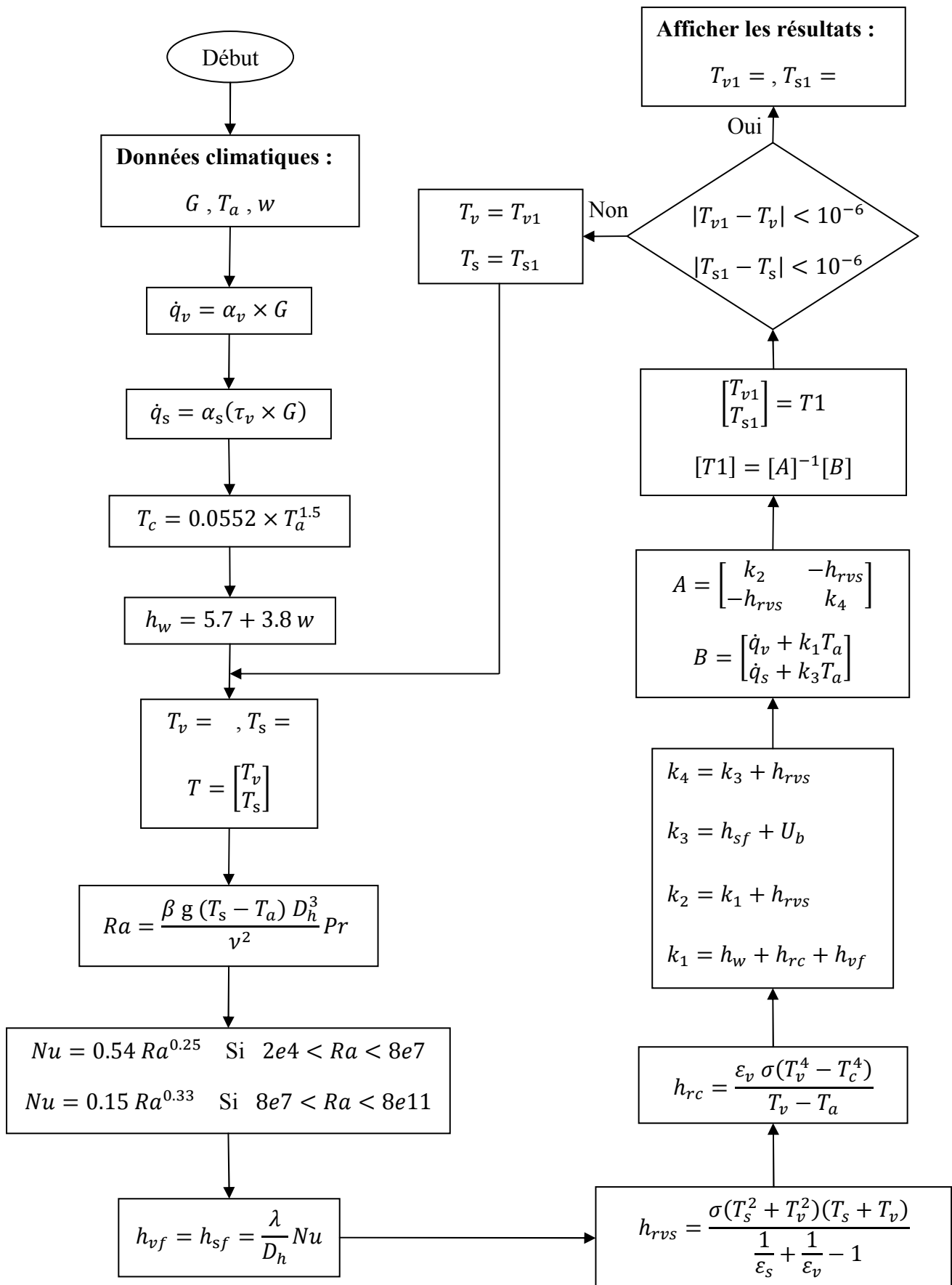


Figure II.2 : Organigramme de calcul de T_c et T_v .

II.4. Propriétés thermo-physiques et spectrales des éléments du collecteur

Les tableaux II.1 et II.2 ci-dessous résument les propriétés thermo-physiques et spectrales utilisées dans nos calculs.

Masse volumique	ρ (kg/m ³)	1.184
Chaleur massique	C_p (J/kg.K)	1006.82
Conductivité thermique	λ (W/m.K)	0.0261
Viscosité dynamique	μ (kg/m.s)	1.8455E-05
Viscosité cinématique	ν (m ² /s)	1.5587E-05
Diffusivité thermique	a (m ² /s)	2.1895E-05
Nombre de Prandtl	Pr	0.7119
Coefficient de dilatation thermique	β (1/K)	0.0034

Tableau II.1 : Propriétés thermo-physiques de l'air à 25 °C.

Composant	Masse volumique (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur massique (J/kg.K)	Eclairement
Sol	$\rho_s = 1500$	$\lambda_s = 1$	$C_{ms} = 1900$	$\alpha_s = 0.75$ $\varepsilon_s = 0.9$
Verre				$\alpha_v = 0.15$ $\tau_v = 0.75$ $\varepsilon_v = 0.93$

Tableau II.2 : Caractéristiques thermiques et spectrales moyennes des composants du collecteur.

II.5. Résultats

II.5.1. Influence de la température ambiante et du rayonnement solaire

Les résultats présentés dans les figures II.3 et II.4 ont été calculés pour une vitesse du vent de 5 m/s, la température ambiante variée de 5 °C à 45 °C, et le rayonnement solaire variée de 100 W/m² à 1000 W/m².

L'analyse a montré que pour une température ambiante et un rayonnement solaire faibles ; la température de la vitre égale à la température ambiante, si non elle augmente avec ces deux paramètres, en titre de comparaison entre ces deux figures, on voit que le rayonnement solaire influe beaucoup sur la température du sol, car une grande partie de ce dernière est absorbée par le sol.

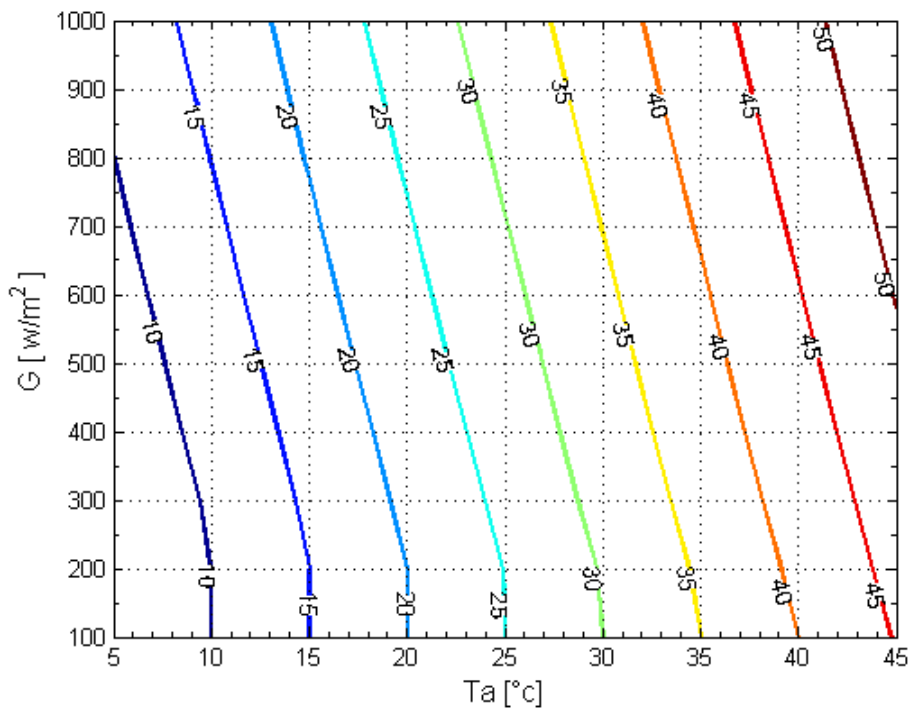


Figure II.3 : Effet de la température ambiante et du rayonnement solaire sur la température de la vitre en $^{\circ}\text{C}$.

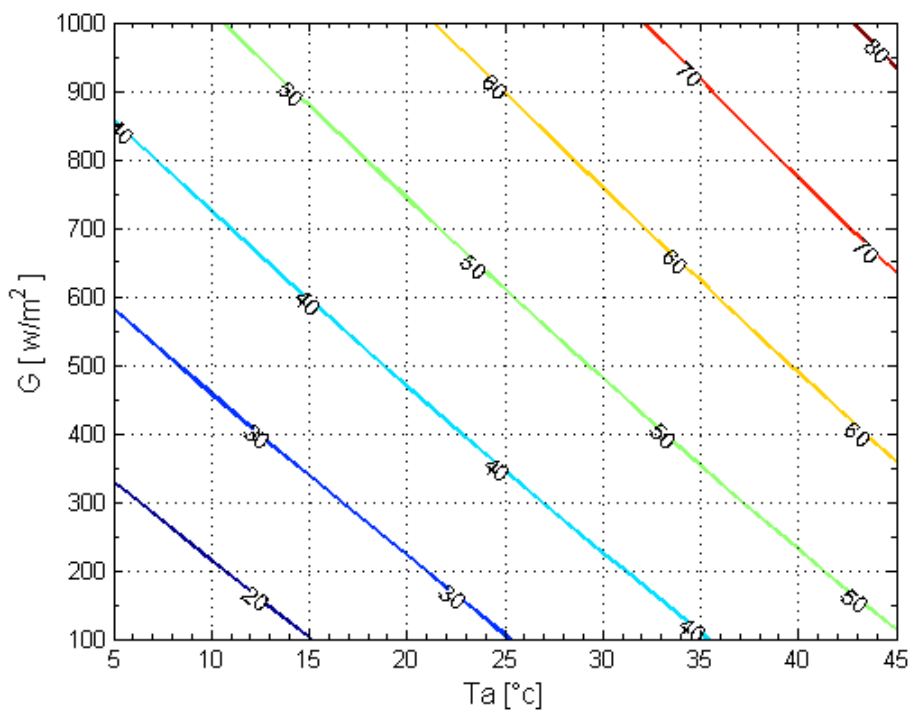


Figure II.4 : Effet de la température ambiante et du rayonnement solaire sur la température de l'absorbeur (sol) en $^{\circ}\text{C}$.

I.5.2. Influence de la température ambiante et de la vitesse du vent

Les résultats présentés dans les figures II.5 et II.6 ont été calculés pour une valeur de 700 W/m^2 de rayonnement solaire, la température ambiante variée de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ à $45 \text{ }^\circ\text{C}$, et la vitesse du vent variée de 0 à 10 m/s .

L'analyse a montré que la vitesse du vent influe sur la température de la vitre car il y a une dissipation thermique par convection forcée, contrairement à la variation de la température du sol est faible en fonction de la vitesse du vent.

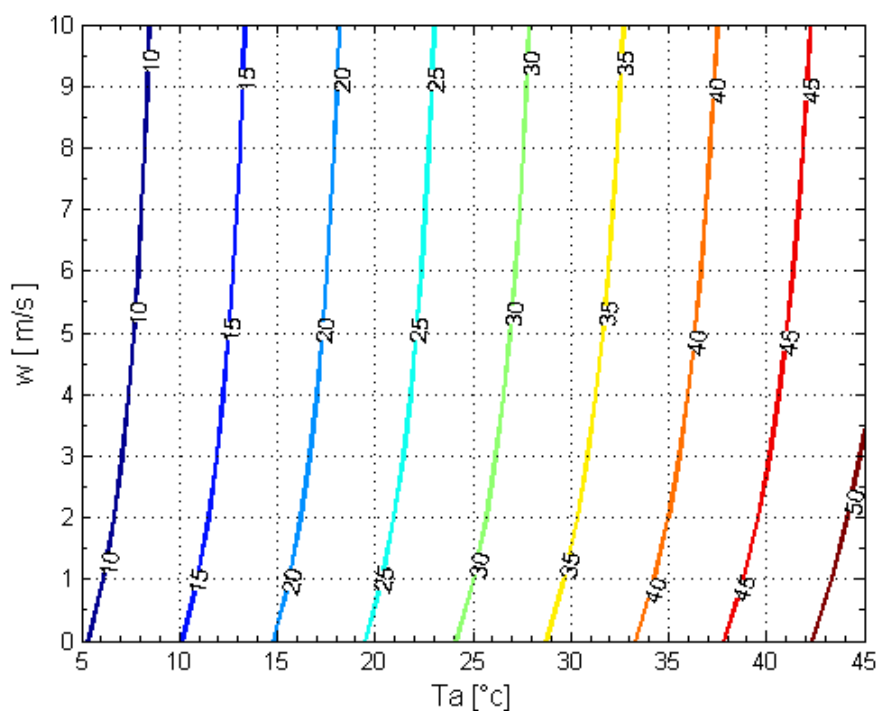


Figure II.5 : Effet de la température ambiante et de la vitesse du vent sur la température de la vitre en $^\circ\text{C}$.

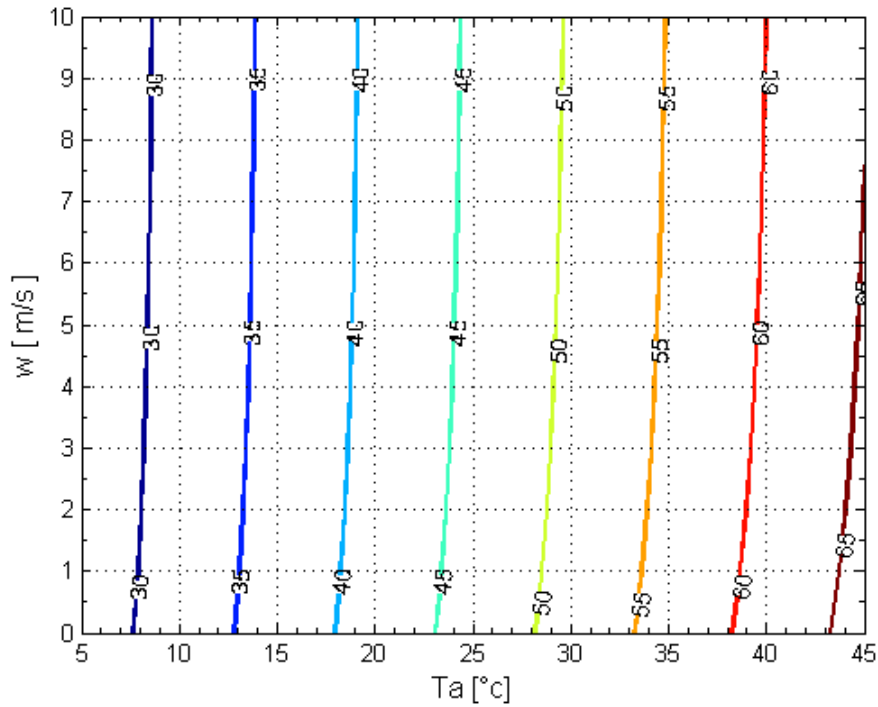


Figure II.6 : Effet de la température ambiante et de la vitesse du vent sur la température de l'absorbeur (sol) en °C.

II.6. Validation du programme de calcul de T_s et T_v

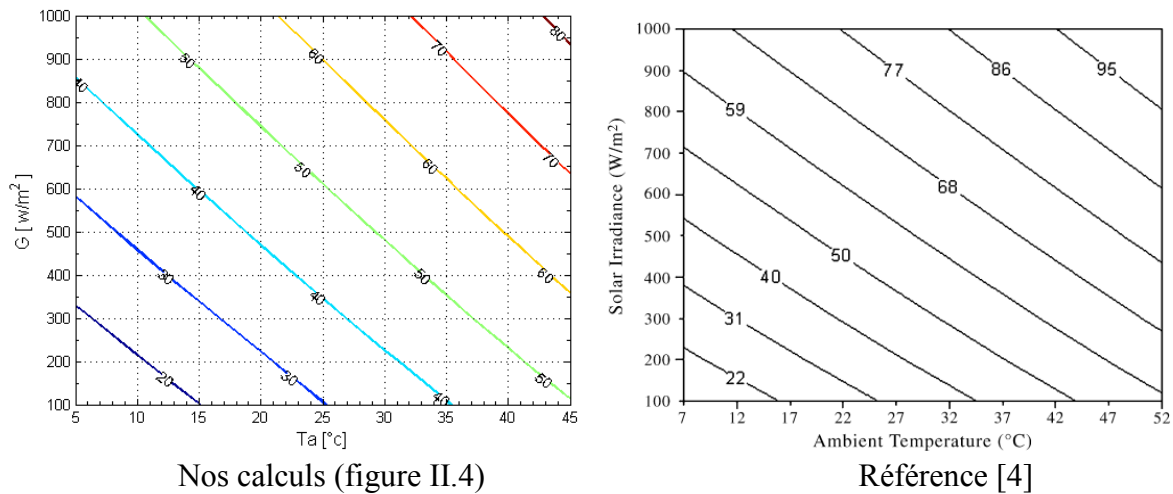


Figure II.7 : Effet de la température ambiante et du rayonnement solaire sur la température de l'absorbeur (sol) en °C.

Le programme numérique développé dans ce chapitre a été validé en comparant les résultats obtenus avec ceux de Salah Larbi et al [4], pour l'effet de la température ambiante et du rayonnement solaire sur la température de l'absorbeur (sol).

En comparant la figure II.4 à celle de la référence [4], on remarque que ces deux figures sont bien accordées (figure II.7).

II.7. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est atteint, puisque nous avons arrivées à calculer les températures du sol et de la vitre du collecteur qui sont en fonction du rayonnement solaire. Ces températures seront utilisées comme des conditions aux limites dans la simulation par FLUENT.

Chapitre III :

MODELISATION MATHEMATIQUE

III.1. Introduction

Pour formuler un phénomène physique, on utilise toujours des équations mathématiques. Une formulation mathématique doit obligatoirement exprimer le comportement de ce phénomène dans l'espace et dans le temps.

En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation, à savoir :

- Conservation de la masse.
- Conservation de la quantité de mouvement.
- Conservation de l'énergie.

Le nombre de Rayleigh dans le système de la cheminée solaire dépasse la valeur critique, cela signifie que l'écoulement turbulent se produit presque dans le système entier excepté l'entrée du collecteur. [13]

Ce chapitre expose les équations mathématiques générales gouvernantes de l'écoulement généré par la convection naturelle en régime turbulent dans deux géométries de la cheminée solaire, l'une simple sous forme « L » et l'autre courbée.

III.2. Définition du problème

Nous considérons que la géométrie de la cheminée solaire est composée de deux cavités cylindriques (la cheminée et le collecteur) ouvertes superposées l'une sur l'autre (figure III.1).

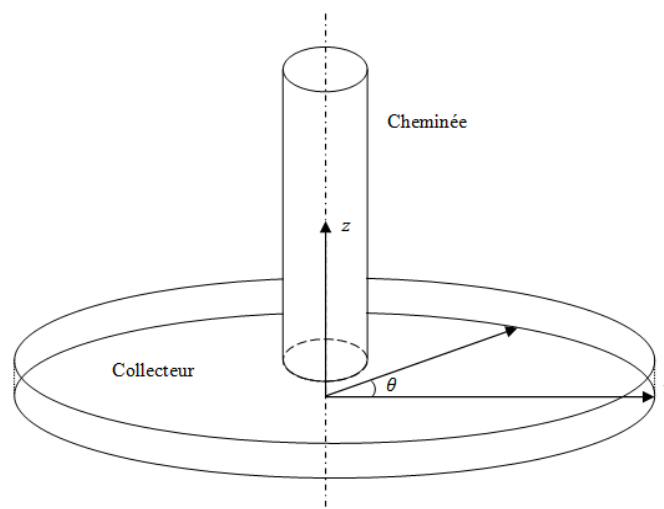


Figure III.1 : La géométrie tridimensionnelle de la cheminée solaire.

La symétrie de révolution fait que la solution est bidimensionnelle axisymétrique (ne dépend que de r et z). Donc, les géométries de la cheminée solaire deviennent comme montré sur les figures III.2 et III.3.

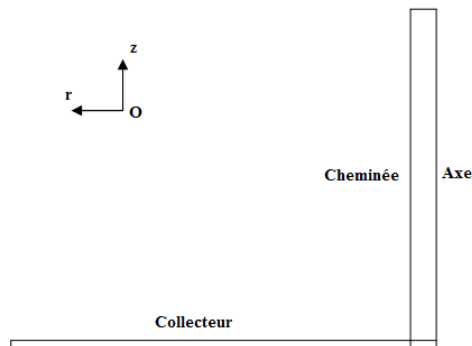


Figure III.2 : La géométrie simple bidimensionnelle de la cheminée solaire.

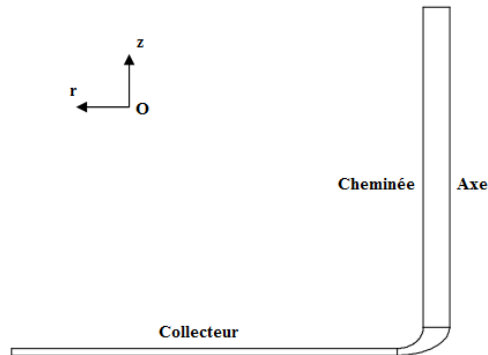


Figure III.3 : La géométrie courbée bidimensionnelle de la cheminée solaire.

III.3. Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier le modèle mathématique, nous considérons quelques hypothèses et approximations :

1. Le fluide newtonien incompressible.
2. Les propriétés thermo-physiques du fluide sont supposées constantes.
3. La fonction de dissipation est négligeable.
4. Pas d'échange par rayonnement au sein du fluide.
5. Nous supposons être dans le cadre de l'approximation de Boussinesq, qui consiste à considérer que la masse volumique ρ du fluide ne varie pas que dans le terme des forces de volume, dont les variations avec la température sont supposées linéaires engendrent la convection naturelle. Ces variations sont alors traduites par une équation d'état qui relie la masse volumique à la température.

L'équation d'état est donc :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \quad (\text{III.1})$$

Où :

T_0 : Température de référence.

ρ_0 : Masse volumique à T_0 .

β : Coefficient de dilatation thermique.

Au niveau de tous les autres termes, la masse volumique est constante et égale à ρ_0 .

6. Écoulement permanent bidimensionnel axisymétrique.

III.4. Principes d'hydrodynamique

III.4.1. Principe de conservation de la masse

C'est le principe de physique, qui permet d'établir une relation entre certaines caractéristiques du fluide et ses mouvements, indépendamment des causes qui les provoquent. Il se traduit par l'équation de continuité qui exprime que la variation de la masse contenue dans un volume donné pendant un certain temps doit être égale à la somme de masse de fluide qui entre diminuée de celle en sorte.

La relation mathématique correspondante est comme suit : [11]

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (\text{III.2})$$

ρ : Masse volumique du fluide.

v_i : Vitesse dans la direction i .

x_i : Coordonnée.

t : Temps.

D'où :

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III.3})$$

On peut aussi écrire l'équation (III.2) sous la forme générale :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Cette équation peut s'écrire en coordonnées cylindriques (r, z) comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.5})$$

Avec :

u : Vitesse radiale.

v : Vitesse axiale.

III.4.2. Principe de conservation de la quantité de mouvement

C'est le principe de mécanique, qui permet d'établir des relations entre les caractéristiques du fluide et celles des causes. Il se traduit par l'équation fondamentale de la dynamique.

L'équation du mouvement est donnée par : [11]

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (\text{III.6})$$

Avec :

σ_{ij} : Tenseur des contraintes.

F_i : Forces de volume.

Pour un fluide Newtonien, l'équation (III.6) s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial v_j}{\partial x_j} \right) + F_i \quad (\text{III.7})$$

Avec :

μ : Viscosité dynamique de fluide.

De plus, pour un fluide Newtonien incompressible, elle s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + F_i \quad (\text{III.8})$$

Donc :

Suivant l'axe Or :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial r} \quad (\text{III.9})$$

Suivant l'axe Oz :

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho u v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \rho g \beta (T - T_0) \quad (\text{III.10})$$

III.5. Effet de la turbulence sur les équations de Navier-Stokes moyennées par rapport au temps

Nous définissons la moyenne Φ d'une propriété φ comme suit (équation de Reynolds) : [15]

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt \quad (\text{III.11})$$

La propriété de l'écoulement φ est dépendante du temps et peut être prise comme la somme d'une composante Φ moyenne constante et une composante fluctuante dans le temps φ' dont la moyenne temporelle est nulle. Nous aurons donc : [15]

$$\varphi(t) = \Phi + \varphi'(t) \quad (\text{III.12})$$

Ou :

$$\varphi = \Phi + \varphi' \quad (\text{III.13})$$

Avant d'écrire les équations moyennées de l'écoulement turbulent, nous devons présenter les règles régissant la moyenne temporelle d'une propriété fluctuante φ . [12]

$$\overline{\frac{\partial(\varphi)}{\partial t}} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (\text{III.14})$$

$$\overline{div(\vec{v} \varphi)} = div(\vec{V} \Phi) + div(\overline{\vec{v}' \varphi'}) \quad (\text{III.15})$$

$$\overline{div(grad(\varphi))} = div(grad(\Phi)) \quad (\text{III.16})$$

Nous remplaçons les variables de l'écoulement par la somme d'une valeur moyenne et une composante fluctuante. Nous obtenons :

➤ Équation de continuité (équation III.5) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho U)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.17})$$

➤ Équation de mouvement suivant l'axe Or (équation III.8) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho U U)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V U)}{\partial z} \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial z} \right) - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho \overline{u'u'})}{\partial r} + \frac{\partial(\rho \overline{v'u'})}{\partial z} \right] - \frac{\partial P}{\partial r} \end{aligned} \quad (\text{III.18})$$

➤ Équation de mouvement suivant l'axe Oz (équation III.9) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho U V)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V V)}{\partial z} \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial z} \right) - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho \overline{u'v'})}{\partial r} + \frac{\partial(\rho \overline{v'v'})}{\partial z} \right] \\ + \rho g \beta (T - T_0) \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

III.6. Modèles de turbulence

Un modèle de turbulence est une procédure numérique pour fermer les équations de l'écoulement moyen III.16, III.17 et III.18, de telle sorte que plusieurs variétés d'écoulement peuvent être calculées. Les modèles les plus utilisés en CFD sont les suivants :

- Modèles classiques : Ils sont basés sur l'équation de Reynolds.
 1. Modèles à zéro équation : Modèle à longueur de Mélange
 2. Modèles à deux équations : Modèle $k-\varepsilon$; Modèle $k-\omega$
 3. Modèles à équations de contraintes de Reynolds
 4. Modèle à contraintes algébriques.
- Simulation des grandes échelles : Basés sur la filtration spatiale des équations.

Les modèles classiques sont basés sur l'hypothèse qu'il existe une analogie entre l'action des contraintes visqueuse et les contraintes turbulentes (Contraintes de Reynolds) sur l'écoulement moyen.

III.6.1. Modèle standard $k-\varepsilon$

Le modèle de turbulence à deux équations standard $k-\varepsilon$ a été appliqué avec succès pour la simulation d'une variété d'écoulement turbulent (couches limites, écoulement dans des conduits, écoulements cisailés libres, jets, sillages, écoulement avec des zones de recirculation ...etc.). Il combine la simplicité de la formulation mathématique, le réalisme des phénomènes de transport turbulent et l'économie en termes de calcul numérique.

Les équations de k et ε sont comme suit : [14]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k V_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{III.20})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon V_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{III.21})$$

Avec :

k : Énergie cinétique de turbulence.

ε : Taux de dissipation de l'énergie cinétique.

G_k : Génération de l'énergie cinétique due au gradient de vitesse.

$$G_k = -\rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (\text{III.22})$$

Ou bien :

$$G_k = 2 \mu_t S_{ij} S_{ij} \quad (\text{III.23})$$

S_{ij} : Tenseur moyen du taux de déformation.

μ_t : Viscosité turbulente est donnée par :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{III.24})$$

C_μ : Constante adimensionnelle.

G_b : Génération de k due au découlement et des forces de volume.

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (\text{III.25})$$

g_i : Composante du vecteur gravitationnel dans la direction i .

Pr_t : Nombre de Prandtl turbulent pour l'énergie.

Y_M : La contribution de la dilation fluctuante dans la turbulence compressible pour ε (négligeable dans le modelage des écoulements incompressibles).

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$: Constantes.

S_k, S_ε : Termes source.

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$: Nombre de Prandtl turbulent pour k et ε .

Les constantes du modèle sont :

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 ; C_{2\varepsilon} = 1.92 ; \sigma_k = 1.00 ; \sigma_\varepsilon = 1.3 ; C_\mu = 0.09 ; Pr_t = 0.85$$

$C_{3\varepsilon} = 1$; si le sens d'écoulement est perpendiculaire au vecteur de la gravité.

$C_{3\varepsilon} = 0$; si le sens d'écoulement est parallèle au vecteur de la gravité.

Dans le repère (r, z) , les équations III.19 et III.20 deviennent comme suit :

➤ Équation de k :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho k U)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho k V)}{\partial z} \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k + \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (\text{III.26})$$

➤ Équation de ε :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho \varepsilon U)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho \varepsilon V)}{\partial z} \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

III.7. Principe de conservation de l'énergie

Le premier principe de la thermodynamique exprime que la variation d'énergie d'un système dans l'unité de temps est égale à la puissance des forces extérieures augmentée de la puissance thermique échangée entre le système et son milieu extérieur.

Si on se limite aux seules formes d'énergie mécanique et thermique, et on néglige les échanges thermique par rayonnement et les apports d'énergie chimique par exemple, l'équation de la thermique des fluides en écoulement est donnée par : [12]

$$\frac{\partial(\rho C_v T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_v T V_i)}{\partial x_i} = -P \frac{\partial V_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \Phi \quad (\text{III.28})$$

Avec :

C_v : Chaleur massique à volume constant.

T : Température.

P : Pression.

λ : Conductivité thermique du fluide.

Φ : Fonction de dissipation.

Puisque nous avons un fluide incompressible avec C_v constante et Φ négligeable ; alors l'équation III.24 peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho T V_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{C_v} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (\text{III.29})$$

Enfin, l'équation III.25 s'écrit dans le repère (r, z) comme suit :

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho U T)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V T)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\lambda}{C_v} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{C_v} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{III.30})$$

III.8. Forme générale des équations de transport

On considère une variable générale ϕ . La forme conservatrice pour toutes les équations de transport (équations III.17, III.18, III.19, III.26, III.27 et III.30) de l'écoulement peut s'écrire :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t}}_I + \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho U \phi)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V \phi)}{\partial z}}_{II} = \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)}_{III} + \underbrace{S_\phi}_{IV} \quad (\text{III.31})$$

Soit :

I : Taux d'augmentation de ϕ dans l'élément fluide.

II : Taux net de ϕ en sortie de l'élément fluide.

III : Taux d'augmentation de ϕ dû à la diffusion.

IV : Taux d'augmentation de ϕ dû à la source.

Le tableau III.1 résume les variables, les coefficients de diffusion et les termes de source pour chaque équation.

Équation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuité	1	0	0
Mouvement suivant Or	U	μ	$-\left[\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho\overline{u'u'})}{\partial r} + \frac{\partial(\rho\overline{v'u'})}{\partial z}\right] - \frac{\partial P}{\partial r}$
Mouvement suivant Oz	V	μ	$-\left[\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho\overline{u'v'})}{\partial r} + \frac{\partial(\rho\overline{v'v'})}{\partial z}\right] + \rho g \beta(T - T_0)$
k	k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G_k + \beta g \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho \varepsilon$
ε	ε	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$
Énergie	T	$\frac{\lambda}{C_v}$	0

Tableau III.1 : Termes de l'équation générale de transport.

III.9. Conditions aux limites

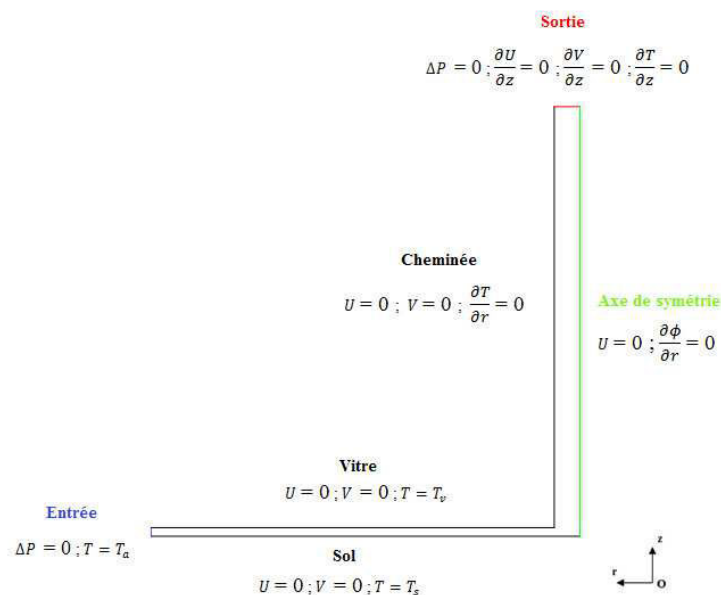


Figure III.4 : Les conditions aux limites associées aux équations de transport.

La figure III.4 montre les conditions aux limites associées aux équations de transport de notre modèle mathématique.

Les températures de la vitre et du sol (T_v et T_s) sont calculées en fonction du rayonnement solaire, de la température ambiante et de la vitesse du vent qui sont l'objectif du chapitre III. Les différences de pression à l'entrée et à la sortie sont nulles, cela signifie que la pression à l'entrée et à la sortie de la cheminée solaire sont égales à celle de l'atmosphère.

III.10. Conclusion

La description du problème de la cheminée solaire exige une modélisation mathématique, c'est pour cela on a considéré quelques hypothèses simplificatrices permettant de présenter les équations gouvernantes et de donner les conditions aux limites.

Nous avons abouti à un modèle de six équations, la résolution de ce genre d'équations se fait par un logiciel qui utilise la méthode des volumes finis tel que FLUENT.

Chapitre IV :

MODELISATION NUMERIQUE

IV.1. Introduction

Avant d'entreprendre la simulation numérique de l'écoulement de l'air dans la cheminée solaire à l'aide d'un code de simulation numérique, il est utile de préciser ce qu'on peut attendre d'une telle méthode.

La simulation numérique en mécanique des fluides (CFD : *Computational Fluid Dynamics*) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournables de conception et elle est largement utilisée dans l'industrie. Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre.

Les codes de simulation numérique des écoulements, résolvent les équations régissant les mouvements d'un fluide. Ces équations traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes), ainsi que la conservation de l'énergie.

Nous utilisons dans notre travail deux logiciels commerciaux très utilisés dans l'industrie : un mailleur (GAMBIT) et un solveur (FLUENT).

IV.2. Procédure de modélisation

La figure IV.1 illustre la procédure suivie dans notre travail de simulation numérique d'une cheminée solaire sous les logiciels GAMBIT et FLUENT.

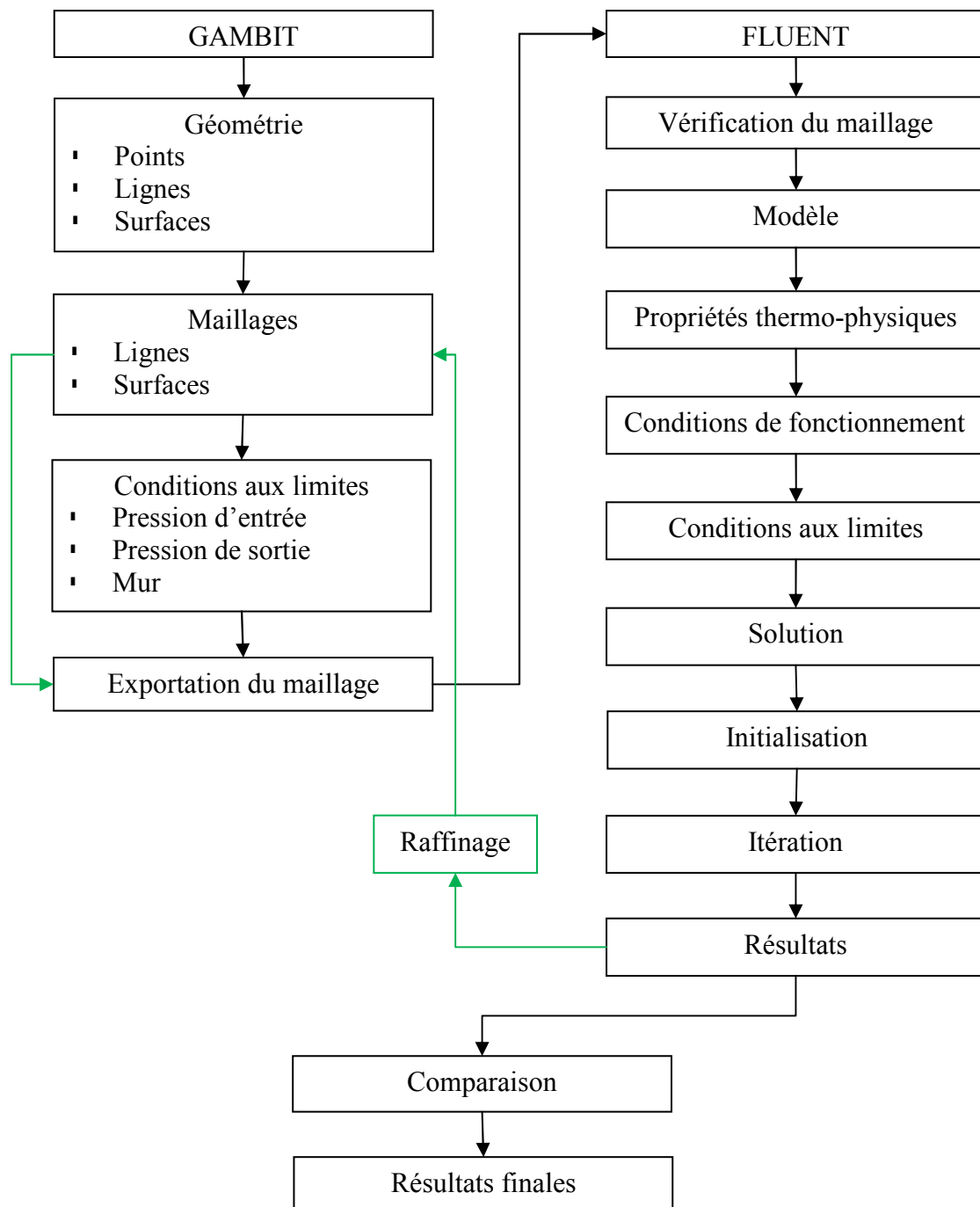


Figure IV.1 : Procédure de modélisation.

IV.3. Géométrie du problème

On va choisir la cheminée solaire avec les dimensions suivantes :

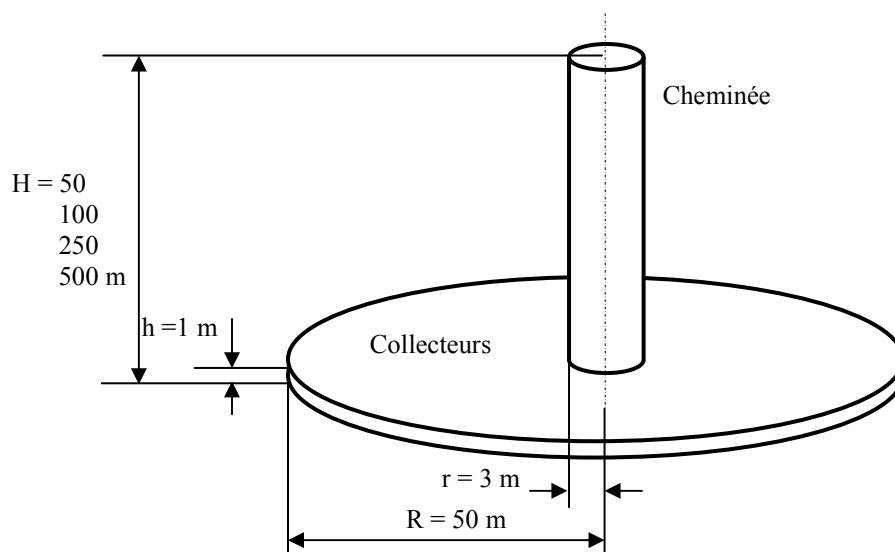


Figure IV.2 : Les dimensions de la cheminée solaire.

Comme le problème est axisymétrique, on va traiter seulement les deux géométries bidimensionnelles (simple et courbée).

Le logiciel FLUENT prend par défaut l'axe des x comme axe de symétrie, donc il faut réaliser les deux géométries comme suit :

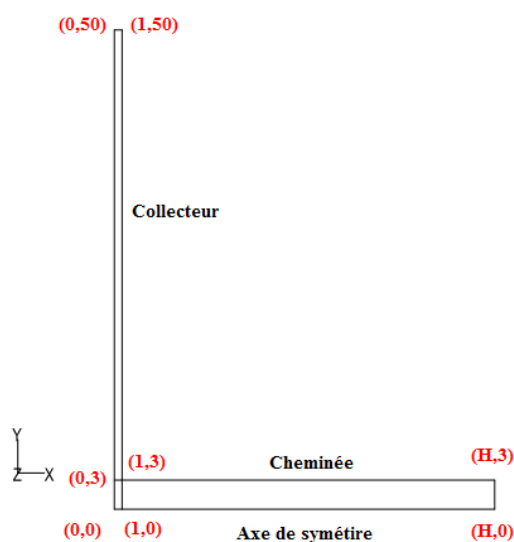


Figure IV.3 : Les dimensions de la géométrie bidimensionnelle simple.

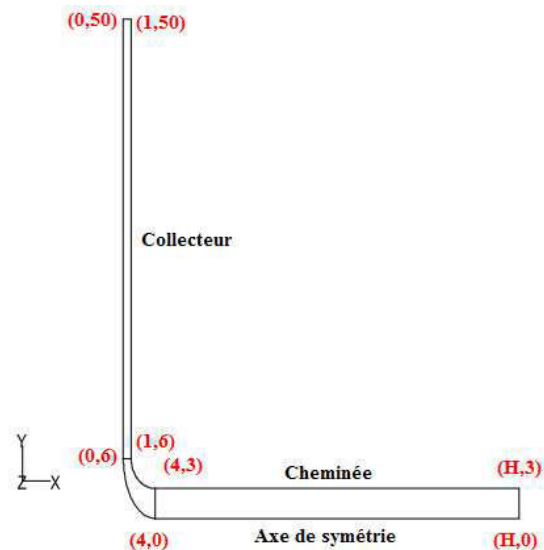


Figure IV.4 : Les dimensions de la géométrie bidimensionnelle courbée.

IV.4. Initiation au logiciel GAMBIT

GAMBIT est un préprocesseur qui permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage.

La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau. Il permet de créer plusieurs types de maillage suivant la géométrie et de spécifier le type de matériau (fluide ou solide).

IV.4.1. Construction d'un maillage

Pour construire un maillage, on suit la démarche suivante :

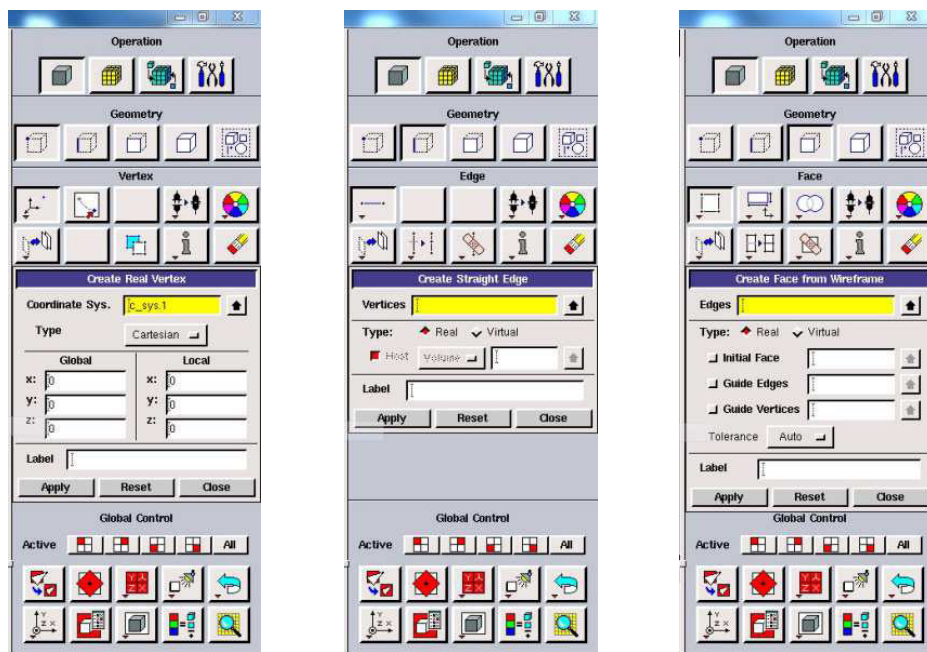
- a) Réaliser la géométrie.
- b) Réaliser le maillage.
- c) Définir les cellules correspondantes aux conditions aux limites et aux zones de calcul.

IV.4.1.1. Réalisation de la géométrie

Il est impératif de bien distinguer entre la géométrie et le maillage qui lui-même est différent du domaine de calcul. La géométrie comprend les positions physiques des points caractéristiques qui définissent la zone à mailler (figures IV.3 et IV.4). Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble des figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Il peut être avantageux de définir des points intermédiaires qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées pour raffiner le maillage près des parois par exemple ou bien pour épouser au mieux la forme des obstacles, parois ou autres ...etc. Pour définir la géométrie sur GAMBIT, il faut suivre la démarche suivante (figure IV.5) :

- a) Création des points : créer les points qui caractérisent la géométrie.
- b) Création des lignes : créer les lignes qui relient les points déjà créés.
- c) Création des surfaces : créer les surfaces limitées par les lignes déjà créées.



Création des points

Création des Lignes

Création des Surface

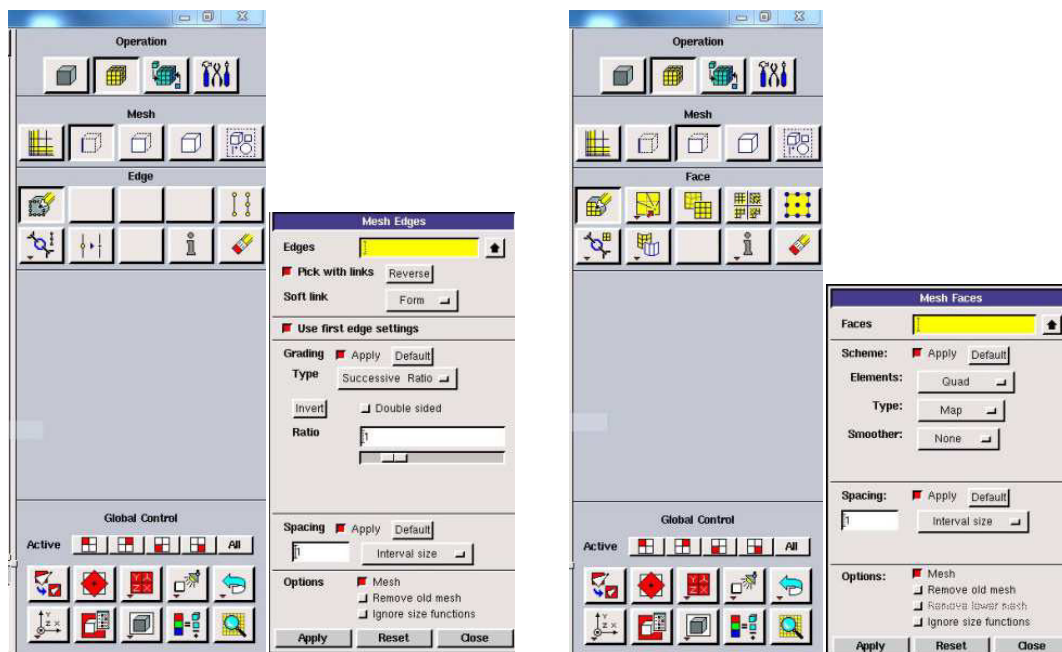
Figure IV.5 : Réalisation de la géométrie sous GAMBIT.

IV.4.1.2. Réalisation du maillage

Le maillage est l'ensemble des mailles générées pour subdiviser en petits éléments les zones définies par la géométrie. Ces éléments peuvent tous avoir la même forme ; carrée ou rectangulaire pour des maillages cartésiens réguliers. Mais ils peuvent aussi être déformés par rapport à une forme de départ dans le cas d'un raffinement en maillage cartésien par exemple ou pour un maillage curviligne épousant la forme de la paroi.

Pour réaliser le maillage sous GAMBIT, il faut suivre la démarche suivante (figure IV.6) :

- a) Maillage des lignes.
- b) Maillage des surfaces.



Maillage des lignes

Maillage des surfaces

Figure IV.6 : Réalisation du maillage sous GAMBIT.

IV.5. Réalisation du maillage pour la géométrie simple

IV.5.1. Maillage des lignes

La figure IV.7 montre le nombre de nœuds et de ratios utilisés dans le cas $H = 50$ m pour la géométrie simple.

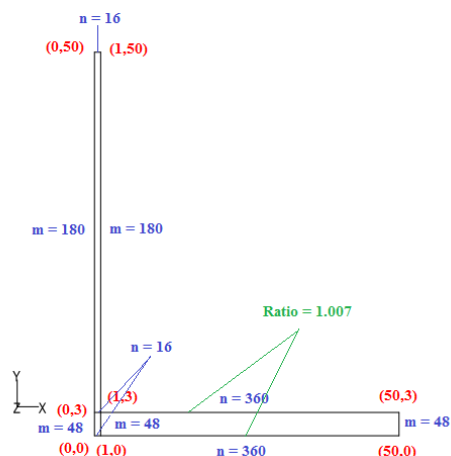


Figure IV.7 : Maillage des lignes dans le cas $H = 50$ m pour la géométrie simple.

Le ratio défini par :

$$Ratio = \frac{L_{i+1}}{L_i} \quad (IV.1)$$

Où L_i et L_{i+1} : les longueurs des deux mailles successives.

IV.5.2. Maillage des surfaces

On va mailler les trois rectangles qui forment le domaine, et après on aura le maillage suivant :

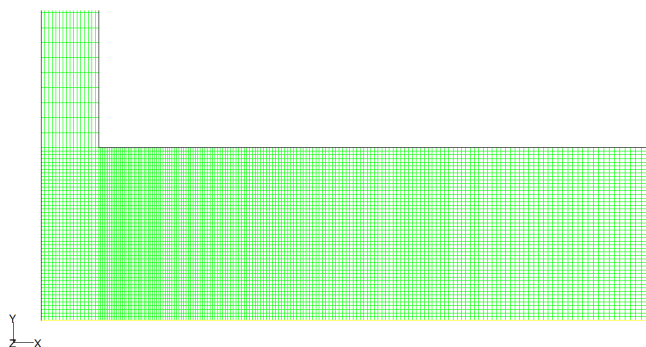


Figure IV.8 : Maillage de la géométrie simple dans le cas $H = 50$ m.

IV.6. Réalisation du maillage pour la géométrie courbée

IV.6.1. Maillage des lignes

La figure IV.9 montre le nombre de nœuds et de ratios utilisés dans le cas $H = 50$ m pour la géométrie courbée.

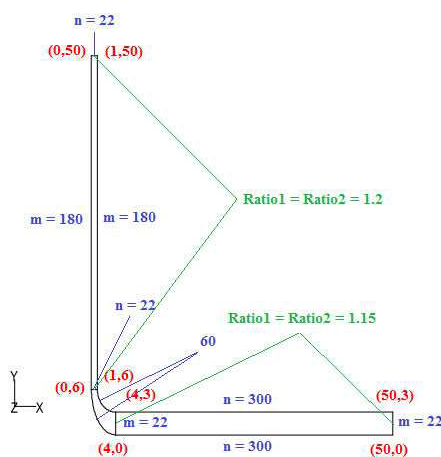


Figure IV.9 : Maillage des lignes dans le cas $H = 50$ m pour la géométrie courbée.

IV.6.2. Maillage des surfaces

On va faire les mêmes démarches qu'avant pour mailler les surfaces. On aura le maillage suivant :

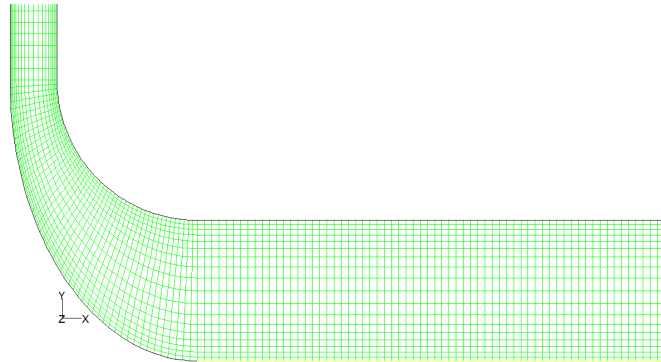


Figure IV.10 : Maillage de la géométrie courbée dans le cas $H = 50$ m.

IV.7. Définition des conditions aux limites

La figure IV.11 montre les conditions aux limites et les noms de chaque paroi dans les deux géométries de la cheminée solaire.

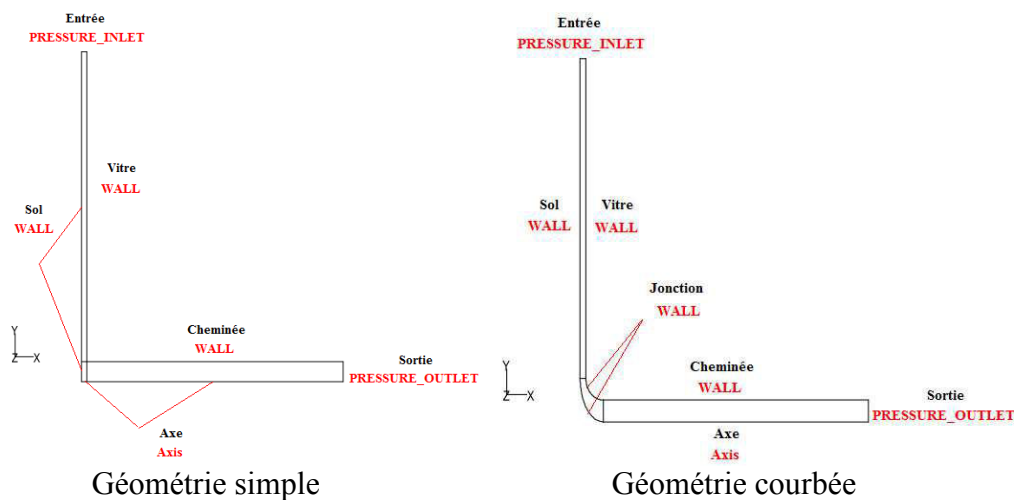


Figure IV.11 : Définition des conditions aux limites dans les deux géométries de la cheminée solaire.

Il faut aussi définir l'intérieur du domaine comme un fluide, définir chaque rectangle comme étant un fluide qui se nomme « Air ».

IV.8. Simulation numérique d'une cheminée solaire par FLUENT

IV.8.1. Présentation du logiciel FLUENT

Le logiciel FLUENT est utilisé pour la simulation numérique. Il permet la prédiction des écoulements des fluides par résolution des équations de conservation en se basant sur la méthode des volumes finis. Ce logiciel est capable de simuler une large gamme d'écoulement de fluides dans des configurations très diverses (écoulement laminaire ou turbulent, régimes permanents ou variables, écoulements incompressibles et compressibles, écoulements internes et externes avec ou sans transfert de chaleur.. etc.).

IV.8.2. Procédure de simulation

IV.8.2.1. Lecture du fichier, vérification du maillage et définition de l'échelle

Cette étape consiste à lire le fichier « msh » sauvegardé, suivant l'onglet « File-Read-Case ». Après le chargement du fichier, elle vient l'étape de vérification du maillage sous l'onglet « Grid-Info-Check ». Comme la géométrie réalisée sous GAMBIT est sans unité de référence, la fonction « Scale » sous l'onglet « Grid » nous permet de choisir ou de modifier une unité. Le mètre est l'unité de longueur choisie par défaut sous FLUENT.

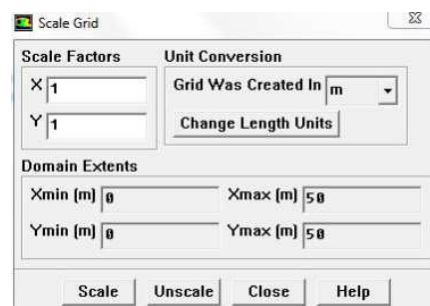


Figure IV.12 : Choix de l'unité de longueur.

IV.8.2.2. Modèle

Le problème de la simulation numérique d'une cheminée solaire est défini comme étant un problème bidimensionnel axisymétrique d'un écoulement de l'air en régime turbulent, et il s'agit aussi d'un problème couplé de la mécanique des fluides et de transfert thermique.

La figure IV.13 montre les étapes suivies pour construire le modèle de ce problème sous FLUENT.

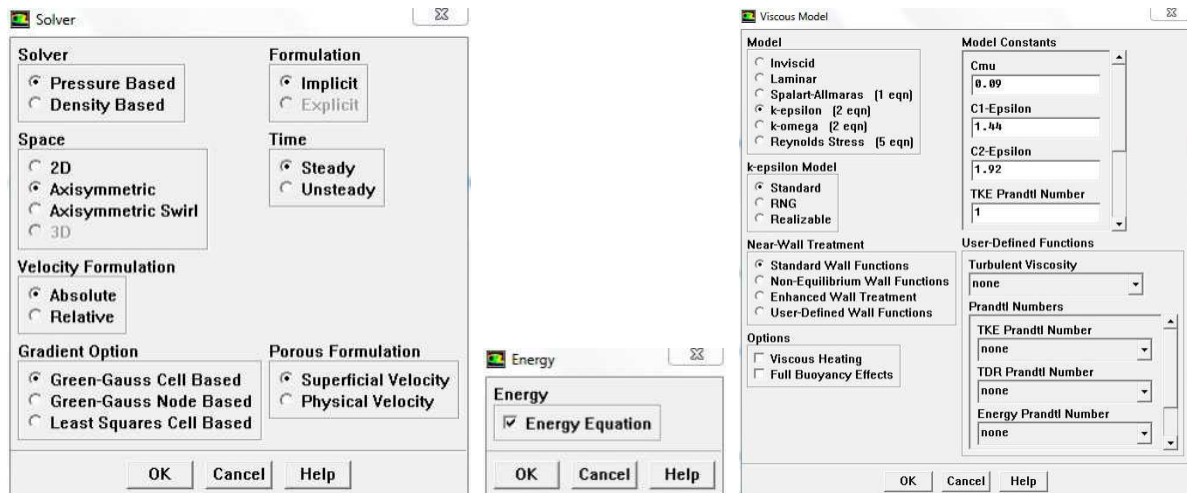


Figure IV.13 : Modèle sous FLUENT.

IV.8.2.3. Propriétés du fluide

Sachant que le fluide circulant à l'intérieur de la cheminée solaire c'est de l'air, à l'aide de l'onglet « Define-Materials », on déclare ses propriétés. Le problème s'agit d'une convection naturelle avec approximation de Boussinesq, que nous avons déclaré. Les propriétés thermo-physiques sont considérées constantes.

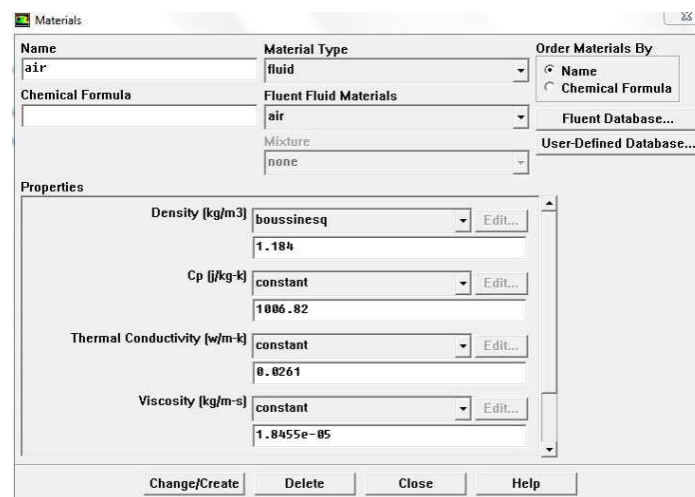


Figure IV.14 : Propriétés de l'air sous FLUENT.

IV.8.2.4. Conditions de fonctionnement et aux limites

L'onglet « Define-Operating Conditions » nous permet d'introduire les composantes du vecteur de la gravité, la température de référence et la masse volumique à cette température.

L'onglet « Define-Boundary Conditions » nous permet d'introduire les conditions aux limites. La figure suivante illustre cette procédure.

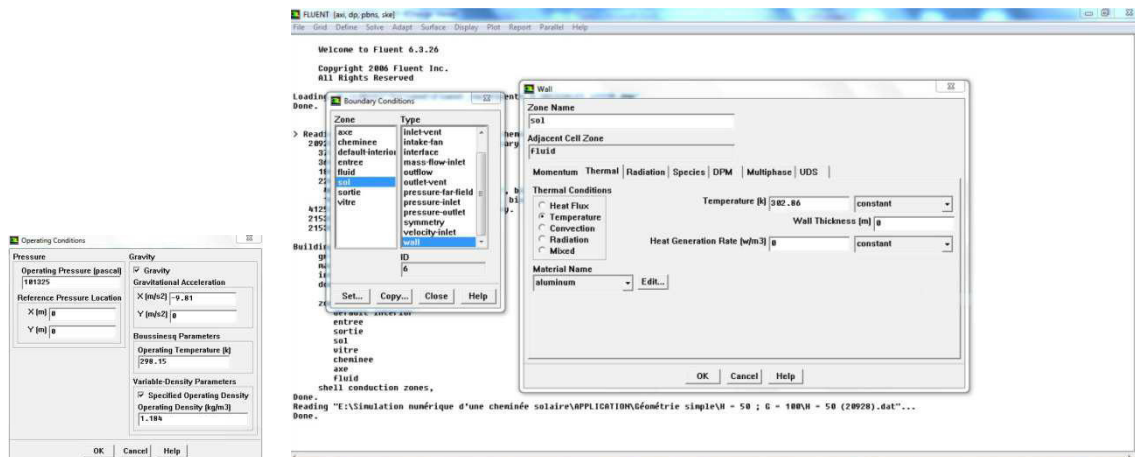


Figure IV.15 : Conditions de fonctionnement et aux limites.

IV.8.2.5. Critères de convergence

La convergence est conditionnée par les grandeurs suivantes des résidus. 10^{-6} pour l'équation de continuité et 10^{-9} pour l'équation de l'énergie.

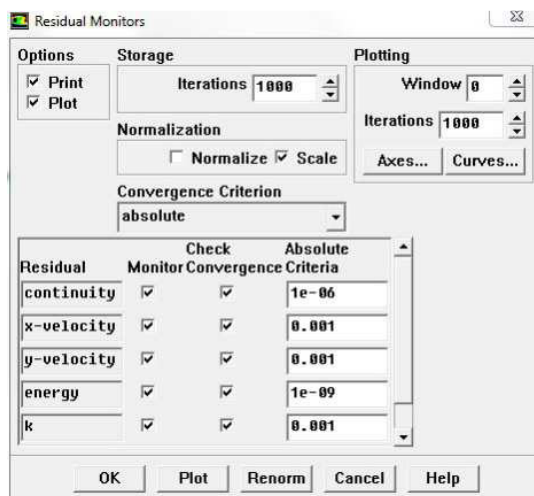


Figure IV.16 : Fixation des résidus.

IV.8.2.6. Couplage pression-vitesse, sous relaxation et discrétisation

La figure IV.17 montre l'algorithme choisie pour résoudre notre problème sous FLUENT. Les facteurs de sous-relaxation sont laissés par défaut.

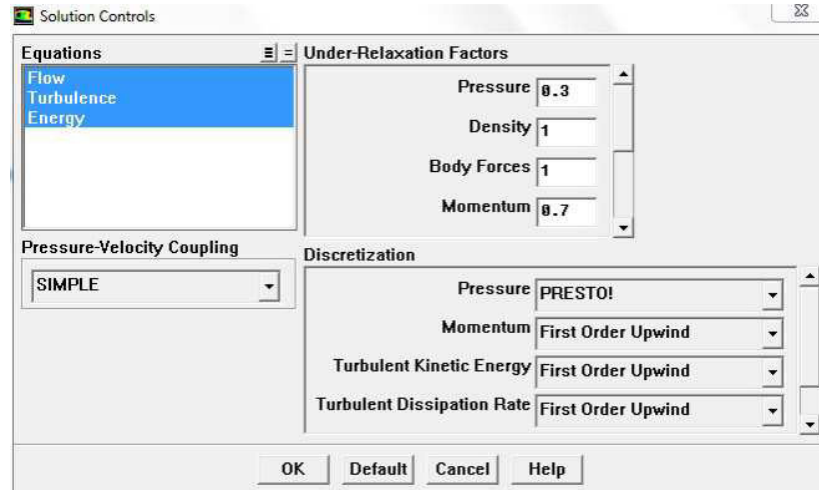


Figure IV.17 : Paramètres de solution sous FLUENT.

IV.9. Conclusion

Dans ce présent chapitre, on a essayé de définir avec un peu plus de détail notre modélisation numérique sous FLUENT. D'abord, on a présenté une procédure de modélisation qui illustre en général les étapes principales de résolution.

On a défini la géométrie du problème avec la construction du maillage sous GAMBIT. Les conditions aux limites sont présentées dans chaque cas étudié.

Le logiciel FLUENT utilise la méthode numérique des volumes finis pour la discrétisation des équations de Navier Stokes, de conservation de la masse et de l'énergie, qui est faite ici sur des éléments quadrilatéraux structurés. Elle conduit à un système d'équations non linéaires couplées, ce système est résolu de manière itérative.

Chapitre V :

RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Introduction

Arrivé au terme de cette étude, rappelons brièvement nos objectifs initiaux. Nous avons présentés les équations qui décrivent le phénomène de la convection naturelle en régime turbulent dans la cheminée solaire, puis la méthode de résolution numérique de ces équations. Dans ce chapitre, nous discuterons les résultats obtenus que nous avons simulé. Il s'agit des écoulements d'air au sein d'une cheminée solaire.

Nous avons présenté nos résultats pour le rayonnement solaire G variant de 100 à 1000 W/m^2 et pour la hauteur H de la cheminée variant de 50 à 500 m. les résultats sont présentés sous forme graphique.

V.2. Effet du maillage

Nous avons opté dans le présent travail pour un maillage uniforme régulier dans les deux directions, longitudinale et transversale. La taille des mailles qui dépendent du nombre de nœuds dans les deux directions, joue un rôle primordial dans la précision des résultats, d'où la nécessité d'utiliser des mailles très fines.

Or, ce degré de précision tant souhaité, ne peut se faire au détriment du temps de calcul, qui demeure comme l'un des critères les plus pesants dans un travail de simulation numérique. Par conséquent, il faut déterminer un maillage optimum qui répond aux besoins de la précision sans pour autant qu'il soit gourmand en temps machine.

Pour cela, nous avons réalisé plusieurs calculs avec différentes variantes pour le maillage avec un rayonnement solaire égal à 700 W/m^2 et nous avons comparé les résultats obtenus de façon à ce qu'au-delà du maillage choisi, les résultats ne seront plus affectés de façon remarquable. L'estimation de l'erreur commise sur les valeurs maximales de la ligne de courant et de la vitesse. Cette étude est menée pour le cas de la géométrie simple et la géométrie courbée.

Les tableaux V.1 et V.2 représentent les valeurs maximales de la ligne de courant et de la vitesse pour différentes valeur de la hauteur H de la cheminée. L'erreur est calculée avec un maillage de référence qui se situe en dernière ligne pour chaque valeur de H .

	Maillage (n × m)			Nombre de mailles	Ψ_{max} (kg/s)	Er (%)	V_{max} (m/s)	Er (%)
	Collecteur	Jonction	Cheminée					
H = 50 m	8 × 120	8 × 24	120 × 24	4032	16,6569	1,43	6,0095	5,60
	12 × 120	12 × 24	200 × 24	6528	16,7459	0,90	6,1061	4,08
	16 × 180	16 × 48	360 × 48	20928	16,8791	0,11	6,3146	0,81
	16 × 180	16 × 60	360 × 60	25440	16,8981	***	6,3659	***
H = 100 m	8 × 120	8 × 24	240 × 24	6912	21,8966	0,73	7,9205	5,39
	12 × 120	12 × 24	400 × 24	11328	21,9226	0,61	8,0378	2,99
	16 × 180	16 × 48	700 × 48	37248	21,9880	0,31	8,2858	1,03
	16 × 180	16 × 60	700 × 60	45840	22,0572	***	8,3719	***
H = 250 m	8 × 120	8 × 24	480 × 24	12672	30,8423	0,33	11,2382	4,29
	12 × 120	12 × 24	600 × 24	16128	30,7549	0,61	11,2993	3,77
	16 × 180	16 × 48	850 × 48	44448	30,8459	0,32	11,6219	1,03
	16 × 180	16 × 60	850 × 60	54840	30,9445	***	11,7425	***
H = 500 m	8 × 120	8 × 24	640 × 24	16512	39,2065	0,30	14,3161	4,08
	12 × 120	12 × 24	820 × 24	21408	39,0544	0,69	14,4254	3,35
	16 × 180	16 × 48	970 × 48	50208	39,1966	0,32	14,7775	0,99
	16 × 180	16 × 60	970 × 60	62040	39,3240	***	14,9254	***

Tableau V.1 : Optimisation du maillage de la géométrie simple pour $G = 700 \text{ W/m}^2$.

	Maillage (n × m)			Nombre de mailles	Ψ_{max} (kg/s)	Er (%)	V_{max} (m/s)	Er (%)
	Collecteur	Jonction	Cheminée					
H = 50 m	15 × 100	15 × 40	15 × 100	3600	22,4015	1,02	4,9618	0,73
	18 × 100	18 × 50	18 × 220	6660	22,4825	0,66	4,9289	0,07
	18 × 180	18 × 50	18 × 300	9540	22,5241	0,48	4,9330	0,15
	22 × 180	22 × 60	22 × 300	11880	22,6329	***	4,9256	***
H = 100 m	15 × 100	15 × 40	15 × 210	5250	28,9414	0,96	6,3105	0,61
	18 × 100	18 × 50	18 × 300	8100	29,0435	0,61	6,2758	0,06
	18 × 180	18 × 50	18 × 460	12420	29,0926	0,44	6,2776	0,09
	22 × 180	22 × 60	22 × 460	15400	29,2226	***	6,2720	***
H = 250 m	15 × 100	15 × 40	15 × 360	7500	39,4502	0,73	8,4966	0,59
	18 × 100	18 × 50	18 × 500	11700	39,5627	0,45	8,4557	0,11
	18 × 180	18 × 50	18 × 700	16740	39,6129	0,32	8,4535	0,08
	22 × 180	22 × 60	22 × 700	20680	39,7405	***	8,4464	***
H = 500 m	15 × 100	15 × 40	15 × 710	12750	48,0295	0,51	10,3064	0,55
	18 × 100	18 × 50	18 × 800	17100	48,1239	0,31	10,2642	0,13
	18 × 180	18 × 50	18 × 960	21420	48,1630	0,23	10,2597	0,09
	22 × 180	22 × 60	22 × 960	26400	48,2746	***	10,2504	***

Tableau V.2 : Optimisation du maillage de la géométrie courbée pour $G = 700 \text{ W/m}^2$.

On constate à travers ces deux tableaux que les valeurs de Ψ_{max} et V_{max} ne changent pas de manière significative. On peut conclure que la solution est indépendante du maillage, par conséquent nous avons choisi l'avant dernier maillage pour chaque valeur de H.

V.3. Courbes des résidus

Nous avons simulé ce cas d'écoulement (convection naturelle) pour les valeurs de $G = 100, 400, 700,$ et 1000 W/m^2 et de $H = 50, 100, 250$ et 500 m pour les deux géométries (simple et courbée). On remarque que la convergence est atteinte entre 897 et 1588 itérations dans la géométrie courbée, par contre dans la géométrie simple la convergence est prolongée, elle est atteinte entre 1424 et 3136 itérations (figures V.1, V.2, V.3, V.4, V.5, V.6 et V.7).

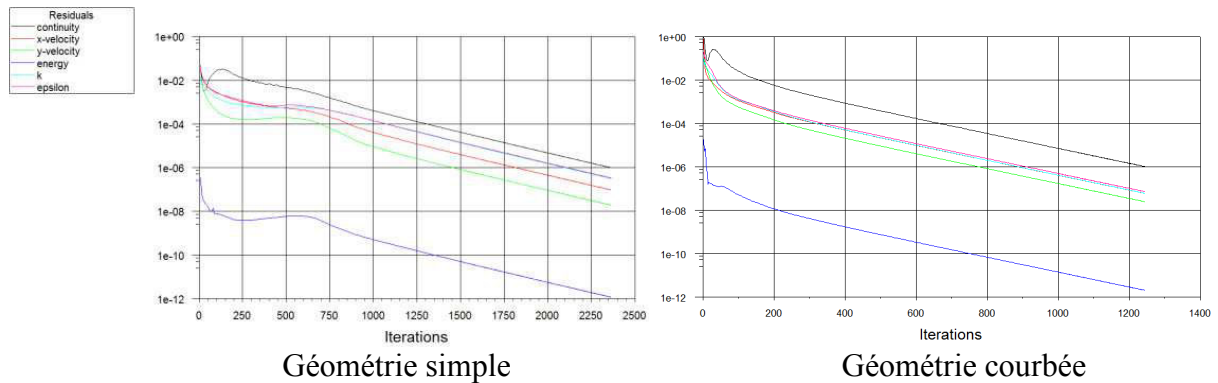


Figure V.1 : Évolution des résidus pour $H = 50 \text{ m}$ et $G = 100 \text{ W/m}^2$.

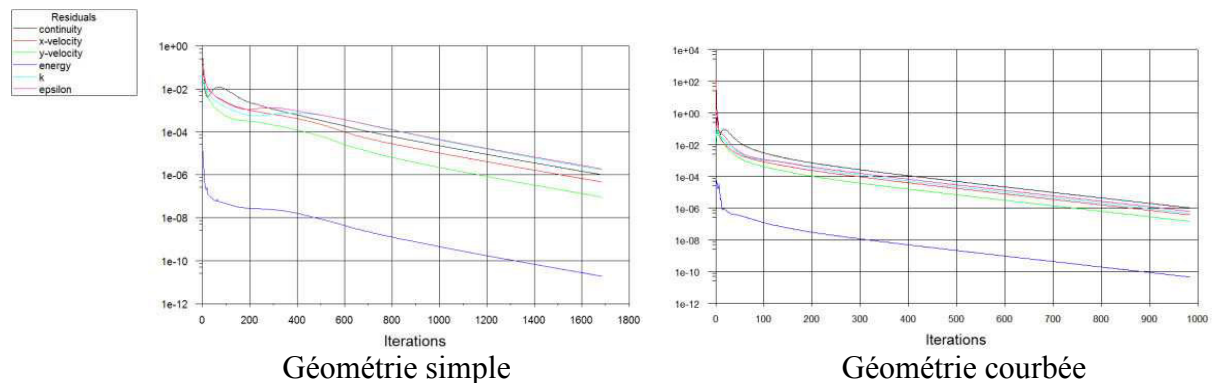


Figure V.2 : Évolution des résidus pour $H = 50 \text{ m}$ et $G = 400 \text{ W/m}^2$.

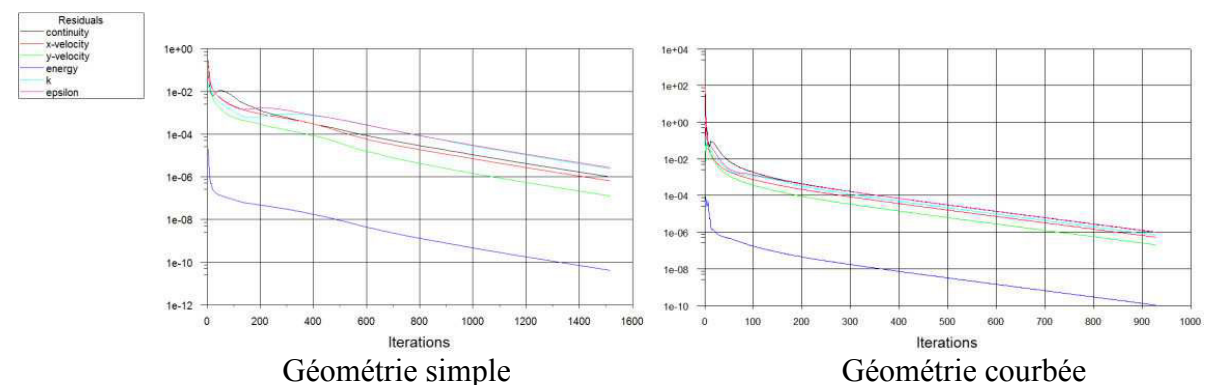


Figure V.3 : Évolution des résidus pour $H = 50 \text{ m}$ et $G = 700 \text{ W/m}^2$.

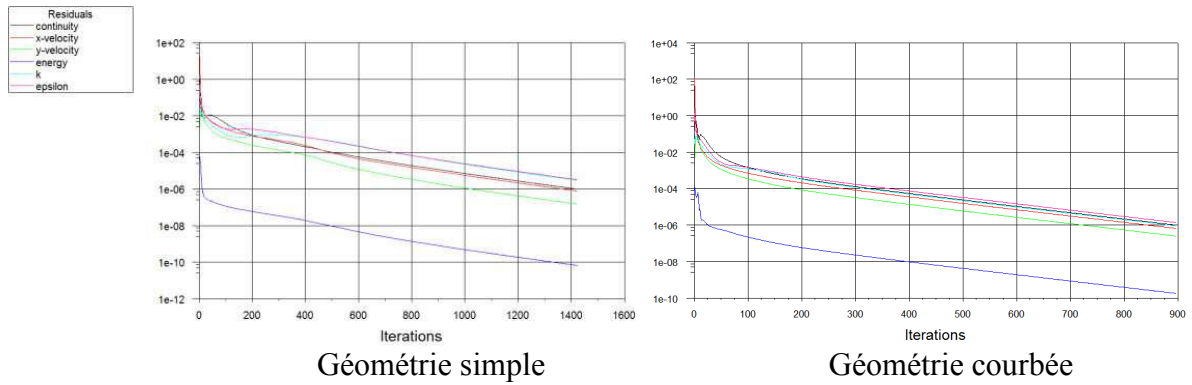


Figure V.4 : Évolution des résidus pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m².

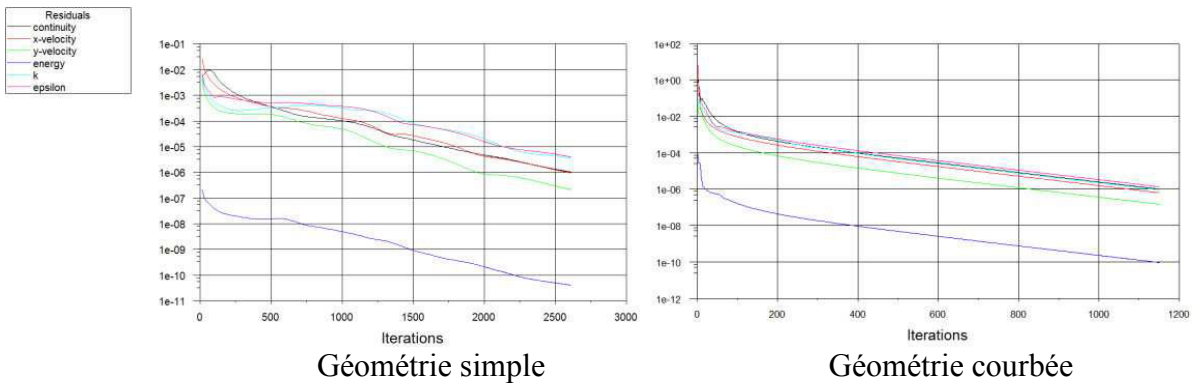


Figure V.5 : Évolution des résidus pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m².

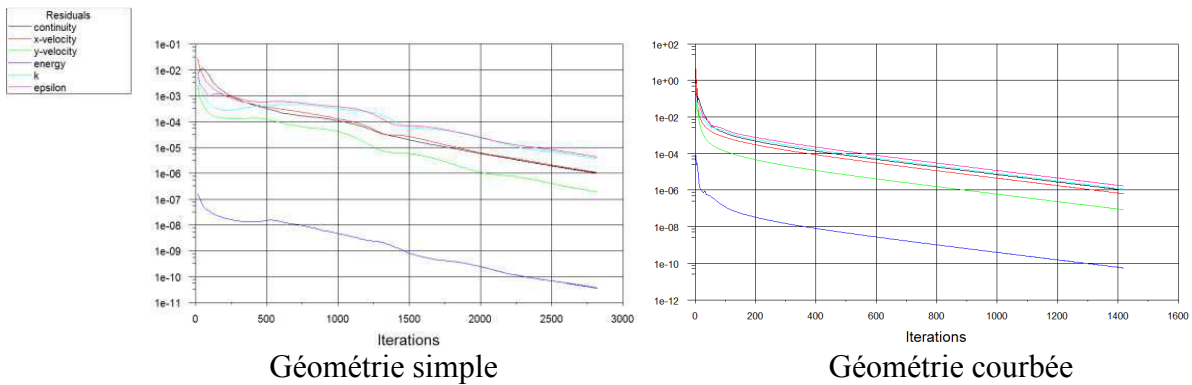


Figure V.6 : Évolution des résidus pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m².

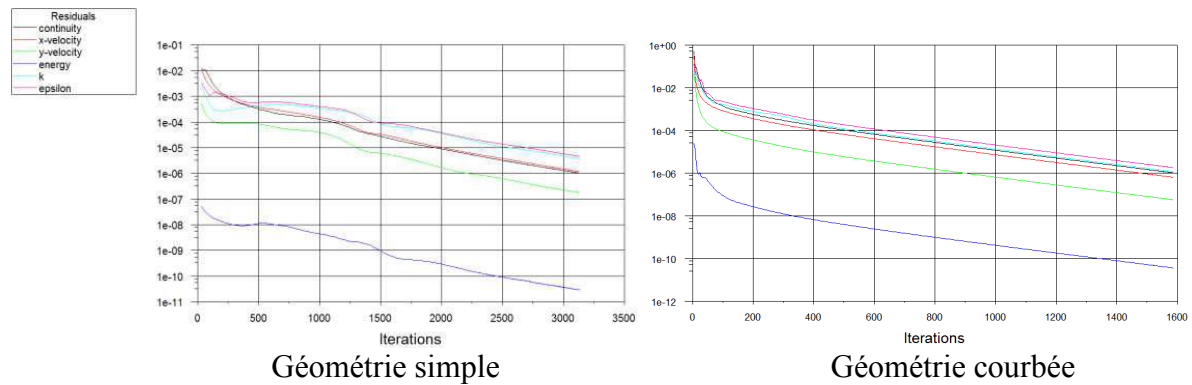


Figure V.7 : Évolution des résidus pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m².

V.4. Type d'écoulement

Dans un travail de simulation numérique d'une cheminée solaire, il y a une question qui se pose d'elle-même. Quel régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) au sein de cette géométrie et quel type de convection (naturelle ou forcée) ?

Nous avons supposé qu'il s'agit d'une convection naturelle en régime turbulent, mais ça reste à vérifier par deux nombres adimensionnels qui sont le nombre de Rayleigh et le nombre de Richardson. Nous avons calculé le nombre de Nusselt et le nombre de Reynolds moyens pour la paroi inférieure du collecteur (sol) et pour les différentes valeurs de H et $G = 700$ W/m² par FLUENT et les autres nombres par les corrélations suivantes.

Nombre de Rayleigh :

L'équation II.18 donne :

$$\overline{Ra}_{sol} = \left(\frac{\overline{Nu}_{sol}}{0.15} \right)^3 \quad (V.1)$$

\overline{Ra}_{sol} : Nombre de Rayleigh moyen de la paroi inférieure du collecteur (sol).

\overline{Nu}_{sol} : Nombre de Nusselt moyen de la paroi inférieure du collecteur (sol).

Nombre de Richardson : [7]

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (V.2)$$

Gr : Nombre de Grashof

$$Gr = \frac{\overline{Ra}_{sol}}{Pr} \quad (V.3)$$

Pr : Nombre de Prandtl ($Pr = 0.7119$)

$Ri \ll 1$, les forces de flottabilité sont négligeables (convection forcée).

$Ri \gg 1$, l'écoulement et le transfert thermique régis par des forces de flottabilité (convection naturelle).

$Ri = 1$, les forces de flottabilité et d'inertie ont le même ordre de grandeur (convection mixte).

Le tableau V.3 représente les valeurs des nombres adimensionnels mises en jeu, à travers ce tableau, on remarque que le nombre de Rayleigh inclus dans l'intervalle de régime turbulent ($8 \times 10^7 < \overline{Ra}_{sol} < 8 \times 10^{11}$) et les forces d'inertie sont négligeables ($Ri \gg 1$). Donc on peut conclure que le type d'écoulement dans la cheminée solaire est une convection naturelle en régime turbulent.

	H (m)	\overline{Nu}_{sol}	\overline{Re}_{sol}	\overline{Ra}_{sol}	Gr	Ri
Géométrie simple	50	111,5203	94,4762	4,1095E+08	5,7726E+08	6,4673E+04
	100	129,0339	106,8517	6,3656E+08	8,9417E+08	7,8317E+04
	250	157,0131	122,1314	1,1469E+09	1,6111E+09	1,0801E+05
	500	181,7091	131,8685	1,7777E+09	2,4971E+09	1,4360E+05
Géométrie courbée	50	116,6401	168,0817	4,7019E+08	6,6047E+08	2,3378E+04
	100	130,9500	184,8945	6,6534E+08	9,3460E+08	2,7339E+04
	250	152,3082	202,8479	1,0469E+09	1,4705E+09	3,5739E+04
	500	168,7526	213,0471	1,4239E+09	2,0001E+09	4,4066E+04

Tableau V.3 : Nombres adimensionnels pour la paroi inférieure du collecteur (sol) et pour les différentes valeurs de H et $G = 700 \text{ W/m}^2$.

V.5. Validation du code de calcul

Le programme numérique développé dans la présente étude a été validé en comparant les résultats obtenus avec ceux de Roozbeh Sangi et al [6], pour les profils de température, de vitesse et de pression dans la géométrie de prototype de Manzanares Espagne (la hauteur de la cheminée $H = 195 \text{ m}$ et son diamètre $D = 10 \text{ m}$, la hauteur du collecteur $h = 2 \text{ m}$ et son diamètre $d = 250 \text{ m}$). Nous avons comparé les profils de température, de vitesse et de pression à mi-hauteur du collecteur ($z = 0.5 \text{ m}$) issus de nos calculs dans le cas de la géométrie courbée et $H = 50 \text{ m}$ avec leurs résultats.

Les figures V.8, V.9, V.10, V.11, V.12 et V.13 illustrent bien cette comparaison, nous remarquons que qualitativement leurs résultats et nos résultats sont en bon accord.

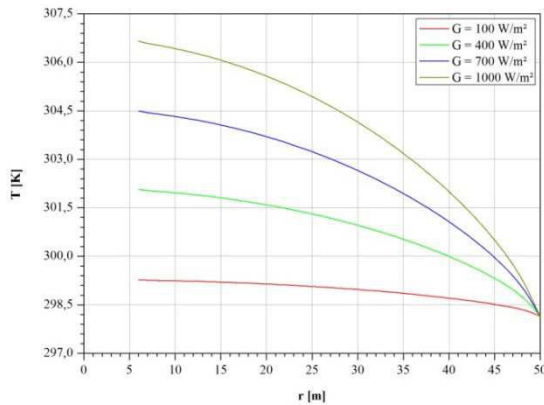


Figure V.8 : Profils de température à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m. [nos calculs]

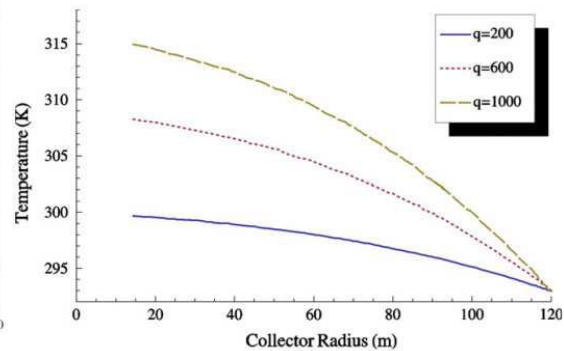


Figure V.9 : Profil de température du fluide traversant le collecteur. [6]

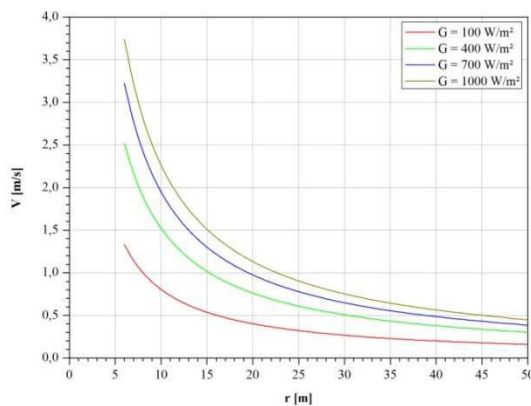


Figure V.10 : Profils de vitesse à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m. [nos calculs]

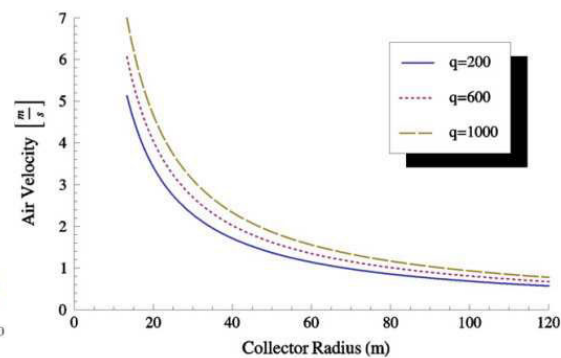


Figure V.11 : Profil de vitesse du fluide traversant le collecteur. [6]

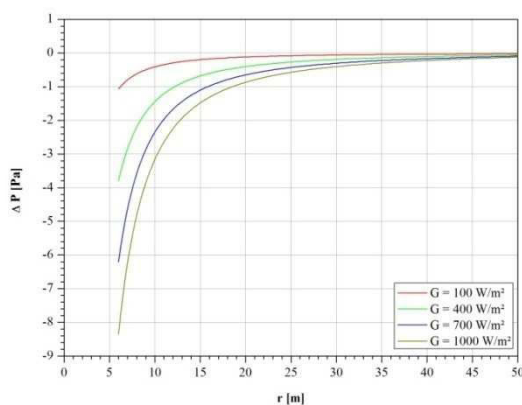


Figure V.12 : Profils de pression à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m. [nos calculs]

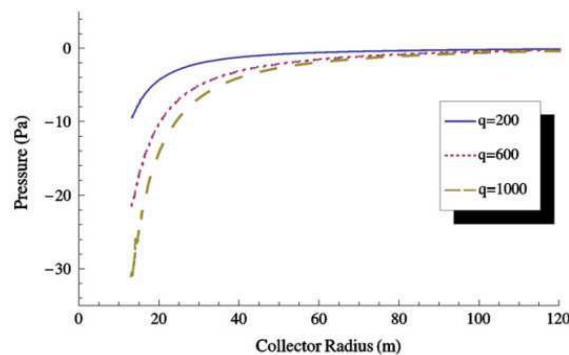


Figure V.13 : Profil de pression statique du fluide traversant le collecteur. [6]

V.6. Résultats

Cette partie elle-même est divisée en deux parties, dans la première nous allons présenter les contours de température, de pression, de vitesse et les lignes de courant pour chaque cas que nous avons simulé, dans la seconde nous allons présenter les profils de température, de vitesse et de pression dans quelques zones choisies puis nous calculerons la puissance utile de la turbine.

V.6.1. Contours de température, de pression, de vitesse et lignes de courant

V.6.1.1. Contours de température

Les figures V.14, V.15, V.16, V.17, V.18, V.19 et V.20 représentent les contours de température le long de la cheminée solaire pour le rayonnement solaire $G = 100, 400, 700$ et 1000 W/m^2 et pour la hauteur de la cheminée $H = 50, 100, 250$ et 500 m , on remarque que la température augmente de l'entrée jusqu'à la jonction (sortie du collecteur) où la convection est importante dans cette zone et puis se diminuera dans la cheminée. La distribution de la température est décroissante du sol vers la vitre du collecteur.

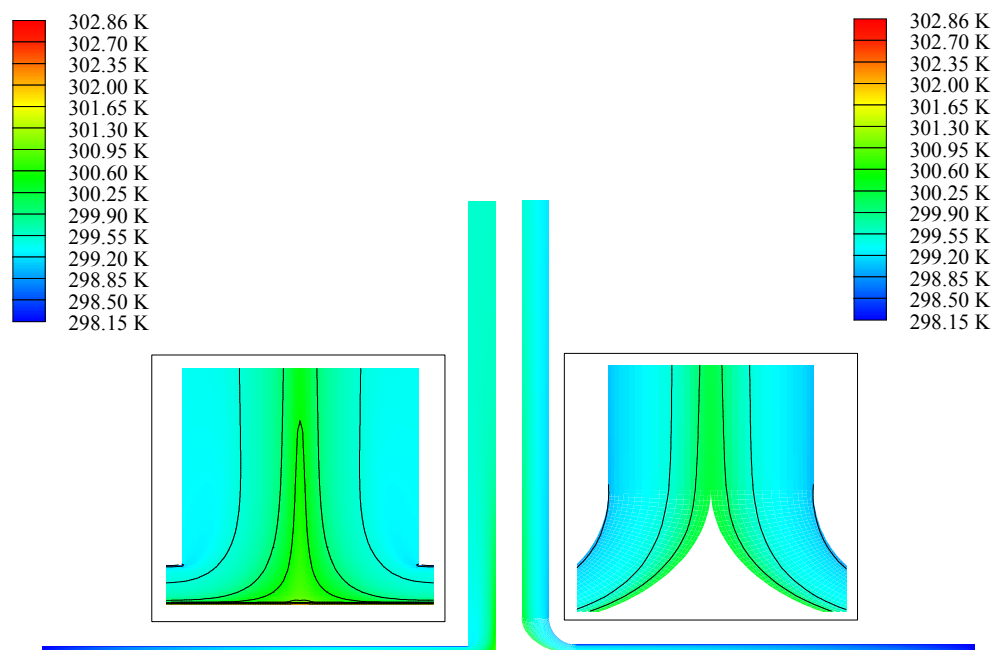


Figure V.14 : Contours de température dans les deux géométries pour $H = 50 \text{ m}$ et $G = 100 \text{ W/m}^2$.

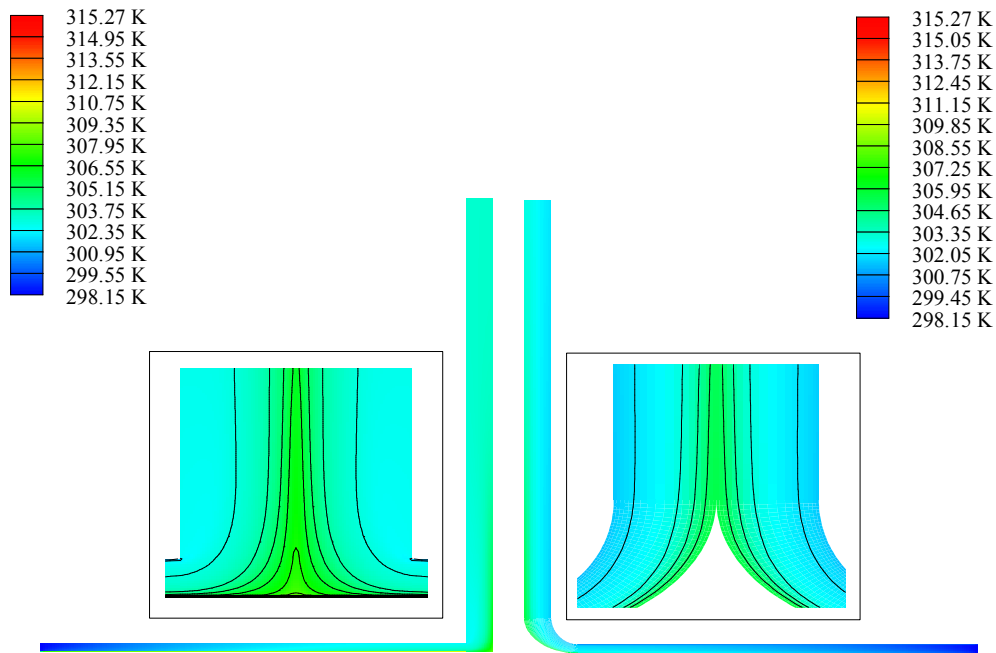


Figure V.15 : Contours de température dans les deux géométries pour H = 50 m et G = 400 W/m².

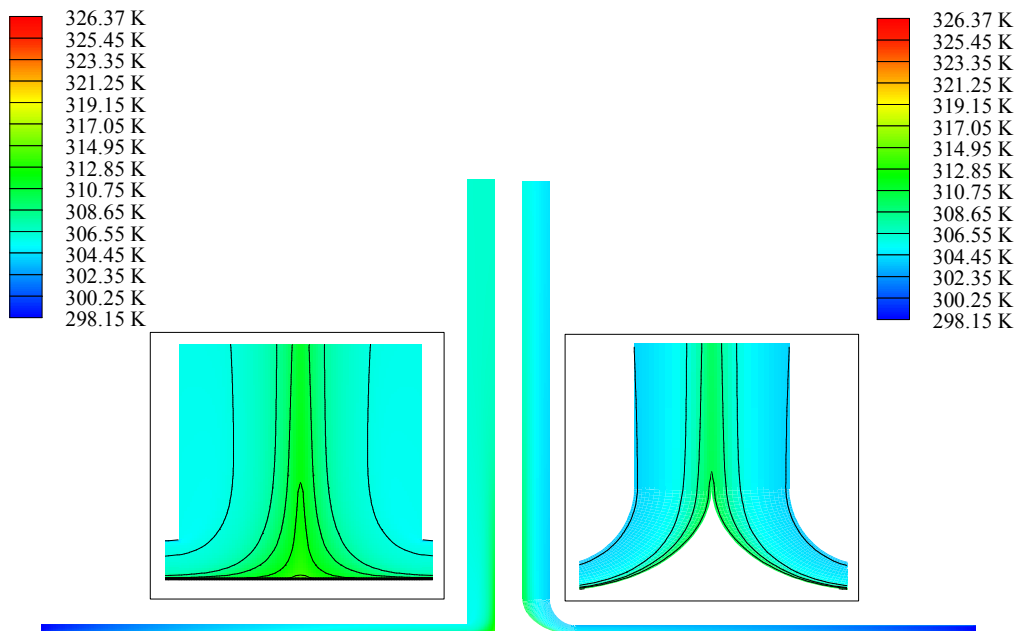


Figure V.16 : Contours de température dans les deux géométries pour H = 50 m et G = 700 W/m².

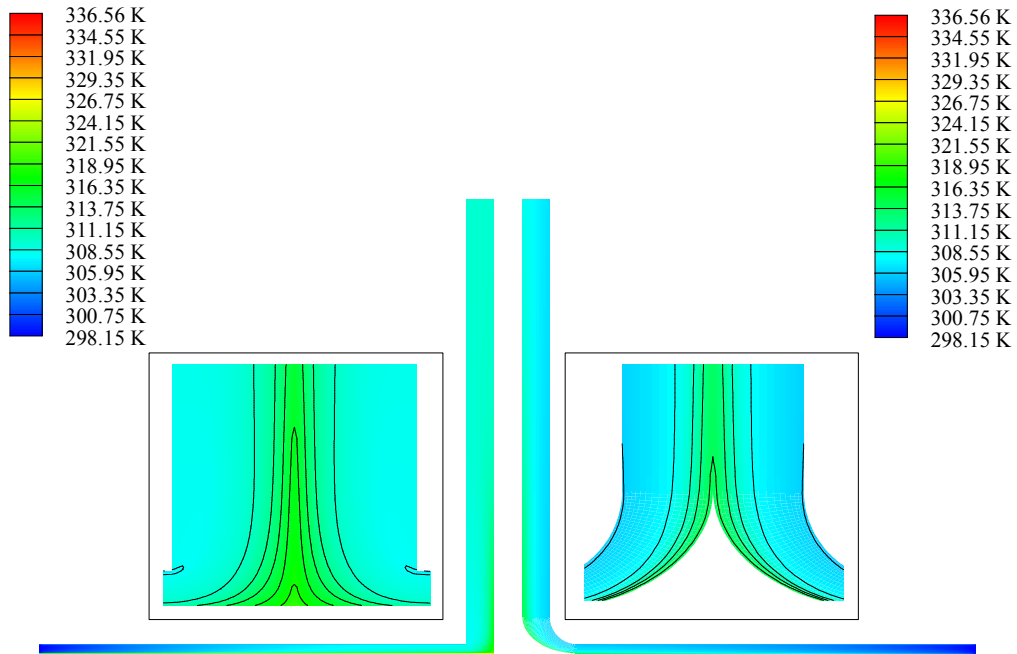


Figure V.17 : Contours de température dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m^2 .

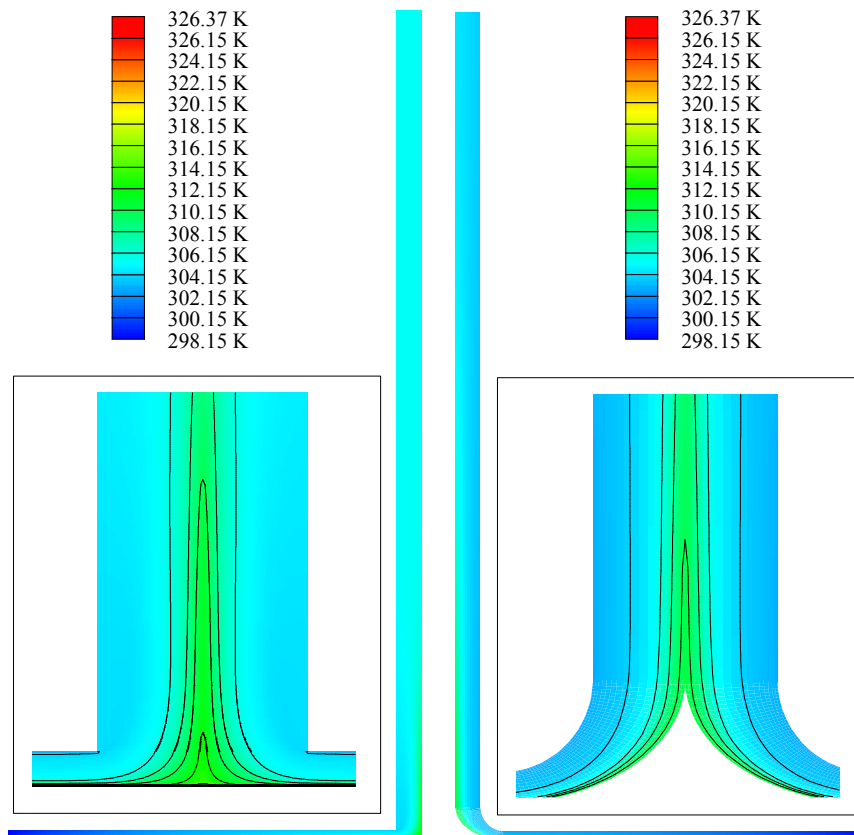


Figure V.18 : Contours de température dans les deux géométries pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m^2 .

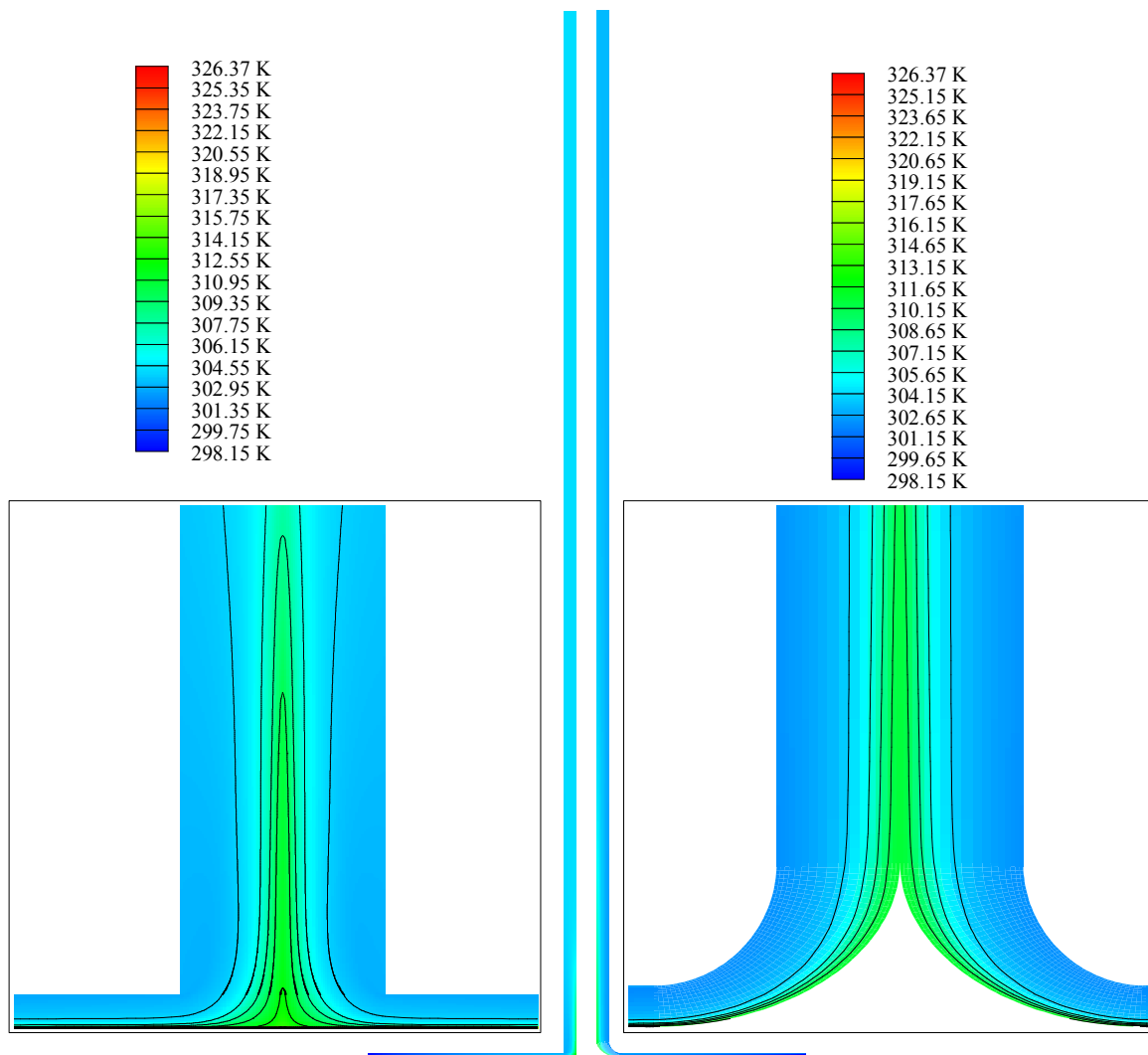


Figure V.19 : Contours de température dans les deux géométries pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m^2 .

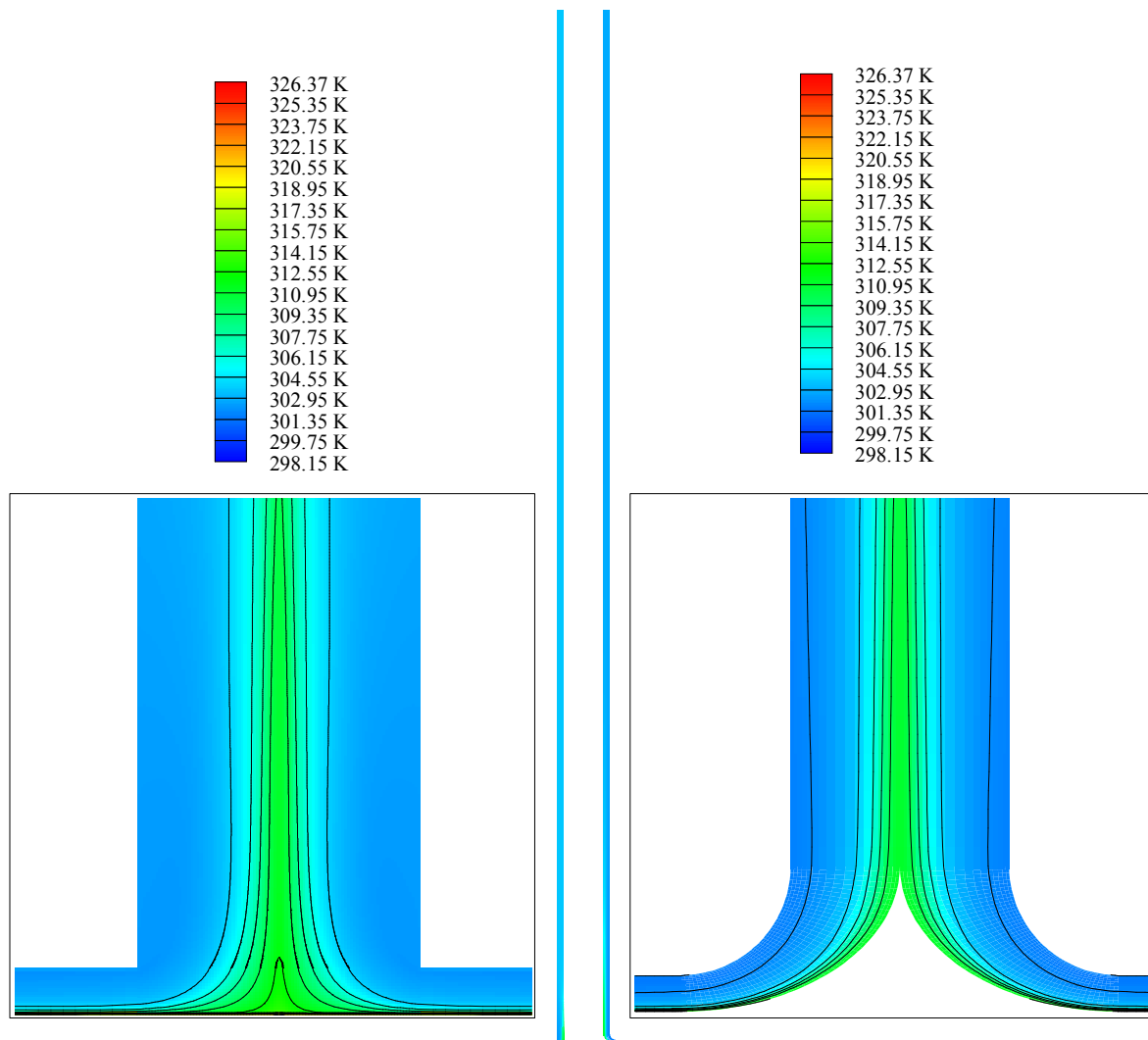


Figure V.20 : Contours de température dans les deux géométries pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m^2 .

V.6.1.2. Contours de pression

Les figures V.21, V.22, V.23, V.24, V.25, V.26 et V.27 représentent les contours de pression le long de la cheminée solaire pour le rayonnement solaire $G = 100, 400, 700$ et 1000 W/m^2 et pour la hauteur de la cheminée $H = 50, 100, 250$ et 500 m dans les deux géométries. On remarque que dans le collecteur et au près de la sortie de la cheminée il n'y a pas une grande chute de pression, mais à l'entrée de la cheminée la chute de pression atteint son maximum ceci est due au changement de direction de l'écoulement.

On remarque aussi que la chute de pression est très significative dans la géométrie simple, mais dans une zone moins importante par rapport à la géométrie courbée la chute de

pression est moins significative ce qui traduit l'effet de l'élargissement brusque dans la géométrie simple.

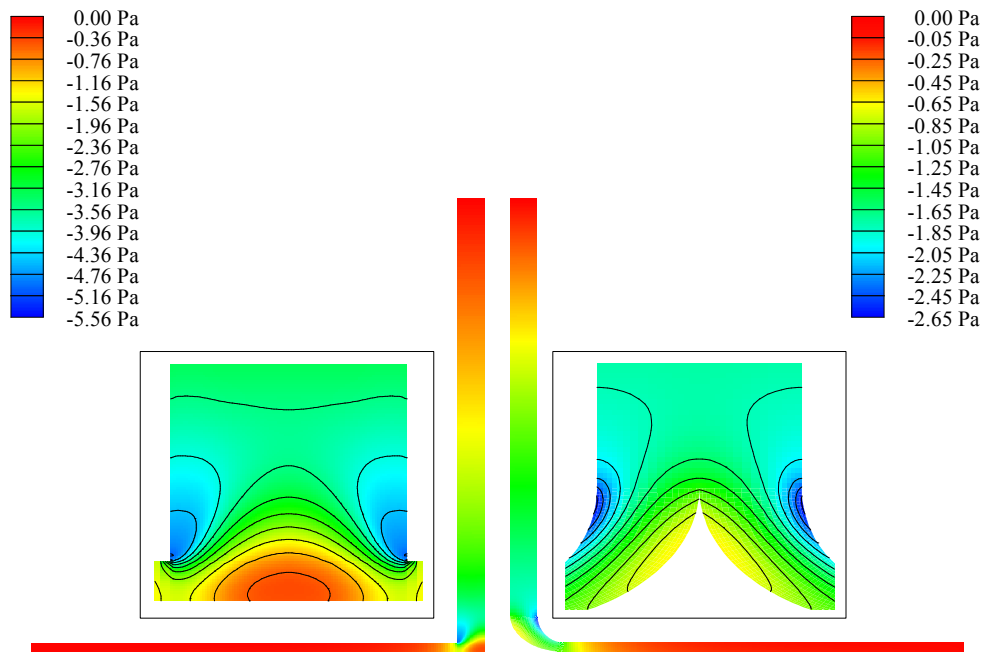


Figure V.21 : Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m^2 .

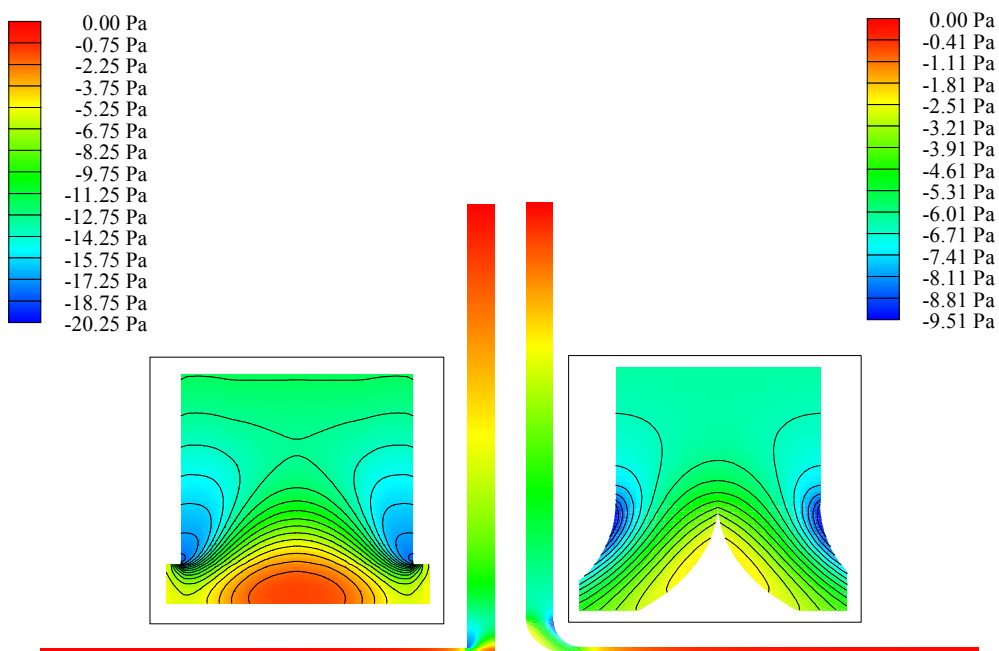


Figure V.22 : Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m^2 .

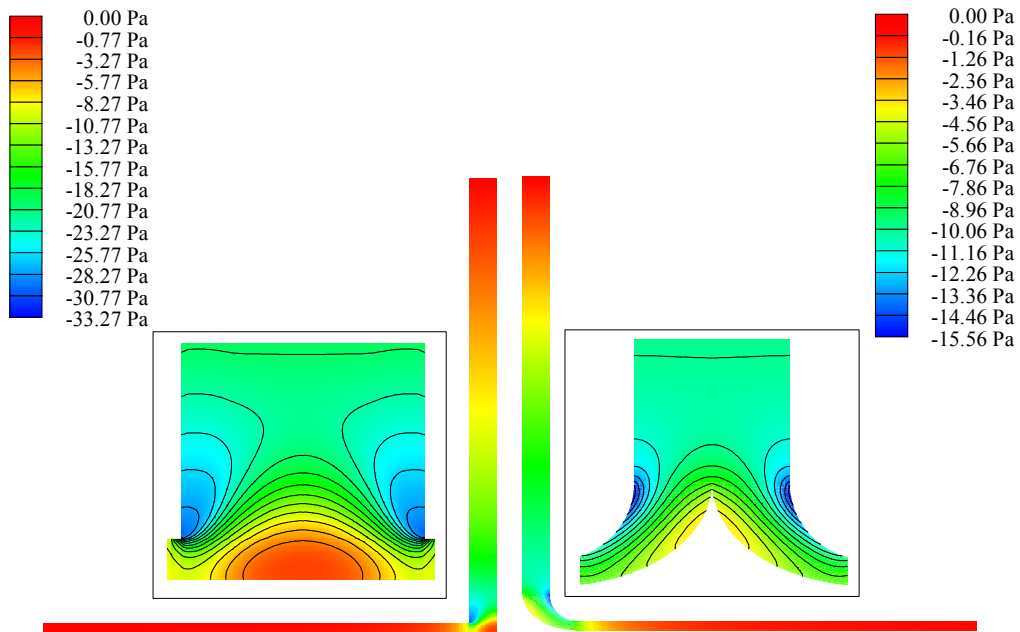


Figure V.23 : Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m^2 .

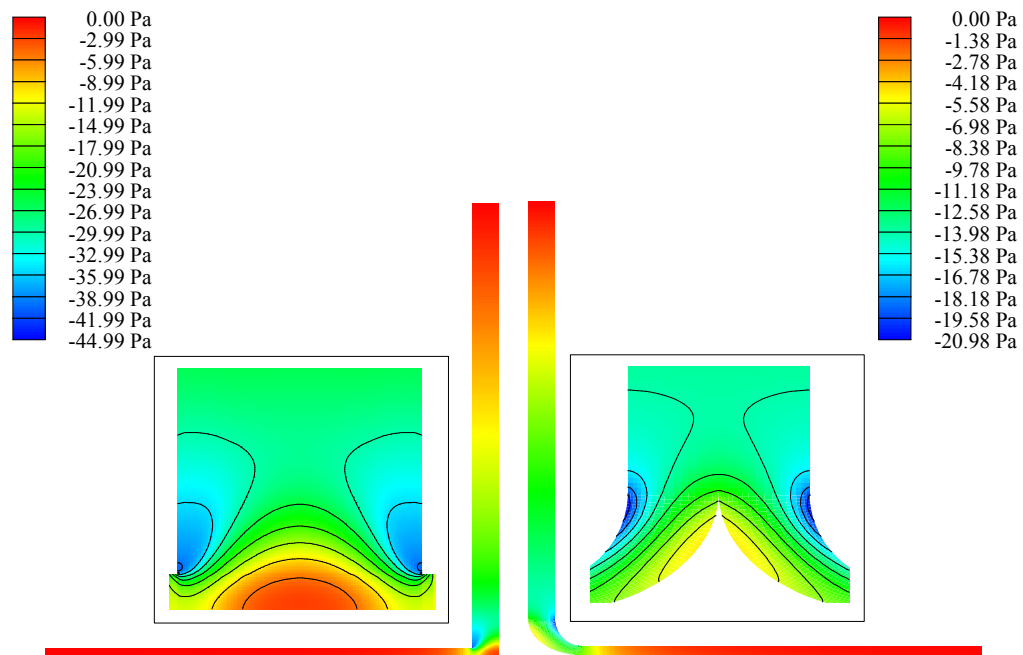


Figure V.24 : Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m^2 .

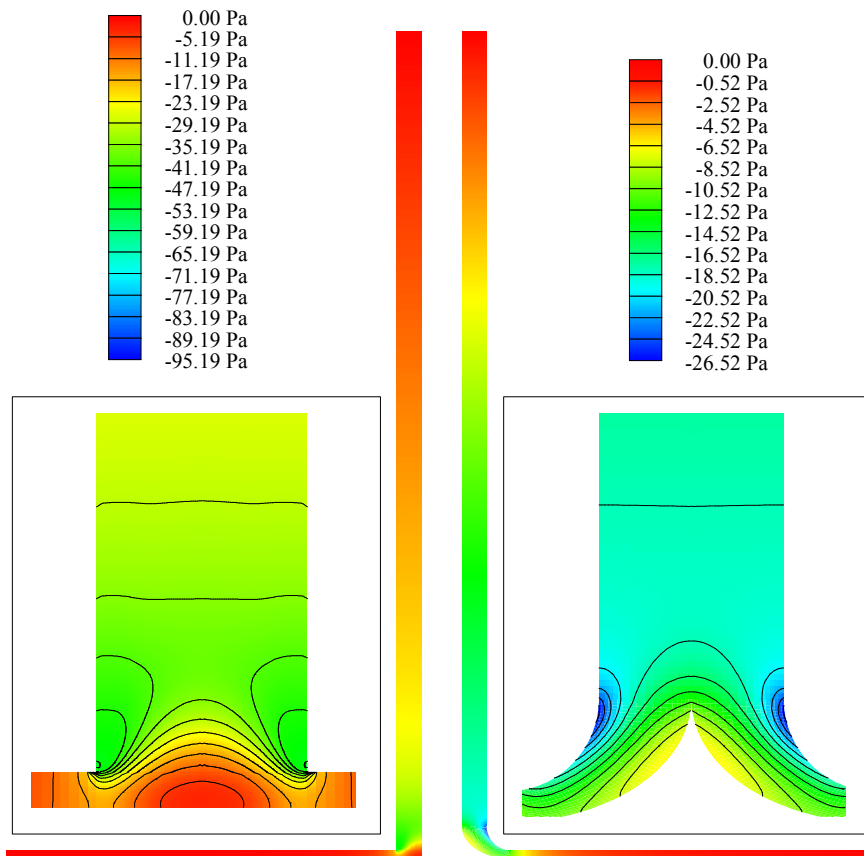


Figure V.25 : Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m^2 .

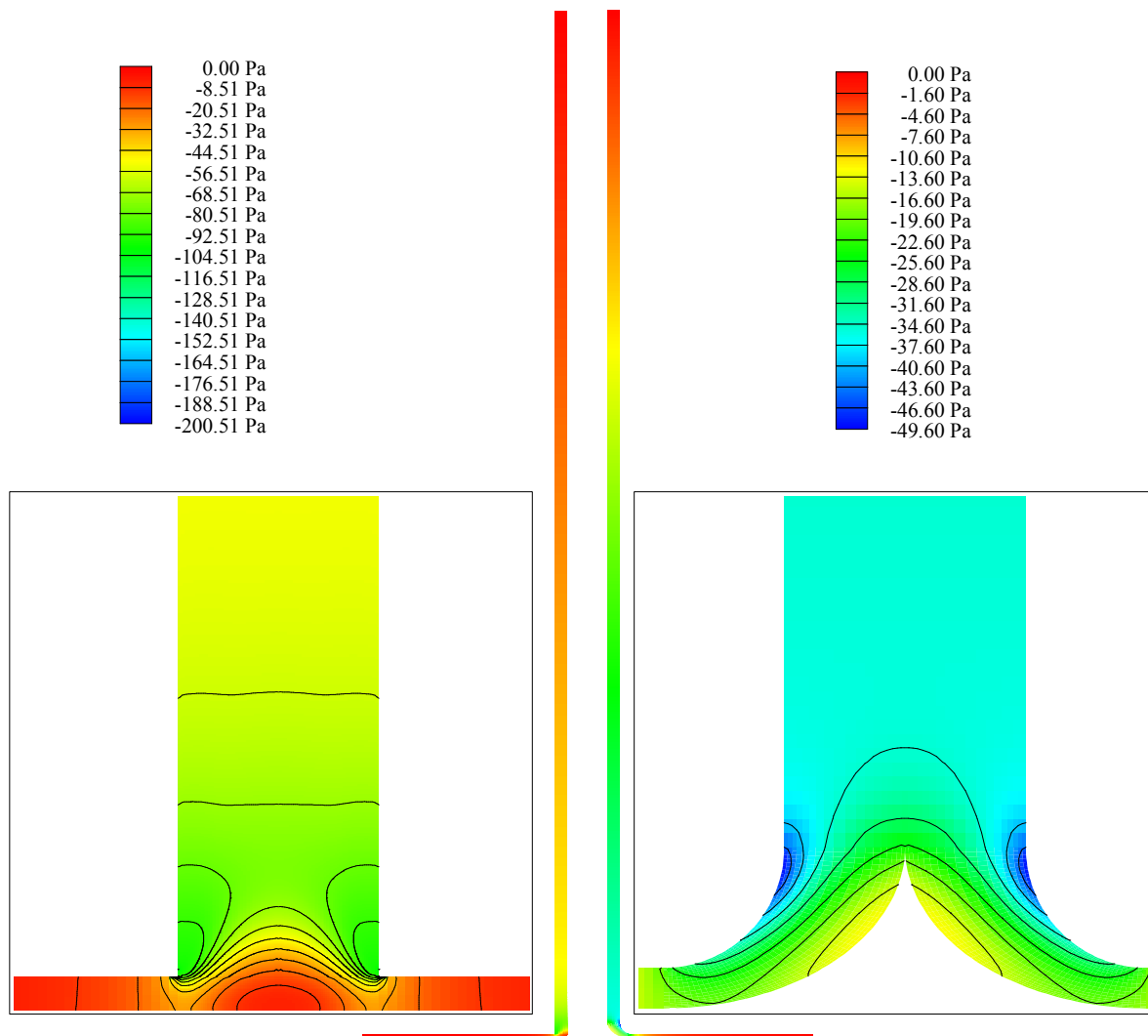


Figure V.26 : Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m².

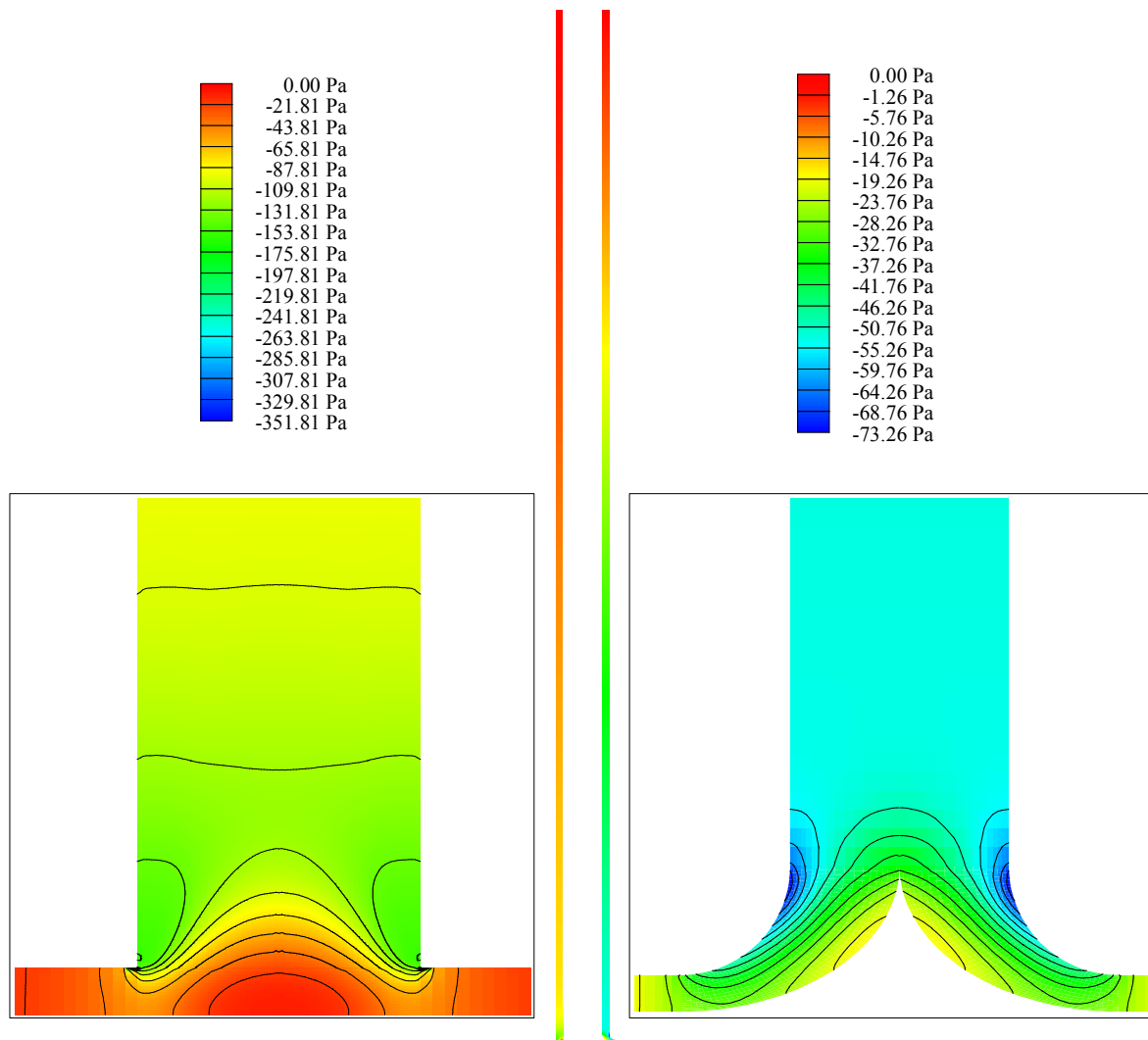


Figure V.27 : Contours de pression dans les deux géométries pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m^2 .

V.6.1.3. Contours de vitesse

L'évolution de la vitesse à l'intérieur des deux géométries de la cheminée solaire est représentée sur les figures V.28, V.29, V.30, V.31, V.32, V.33 et V.34, pour le rayonnement solaire $G = 100, 400, 700$ et 1000 W/m^2 et pour la hauteur de la cheminée $H = 50, 100, 250$ et 500 m, on remarque que cette vitesse est importante dans la cheminée et son maximum est atteint au centre.

On remarque aussi que la vitesse maximale dans la géométrie simple est supérieure à celle de la géométrie courbée, par contre, les zones où les vitesses importantes sont abondantes dans la géométrie courbée.

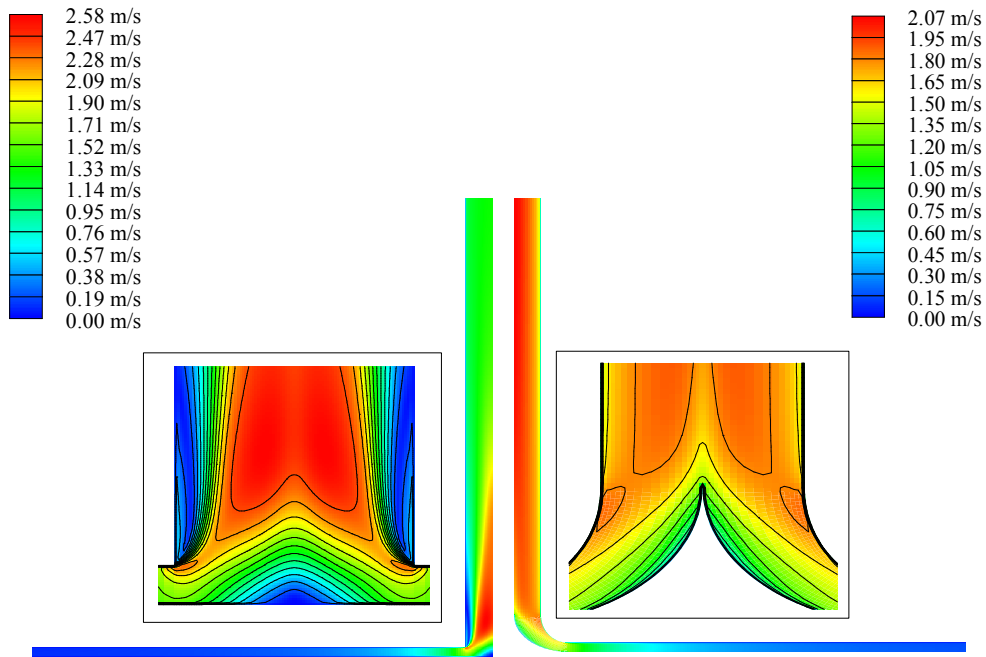


Figure V.28 : Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m².

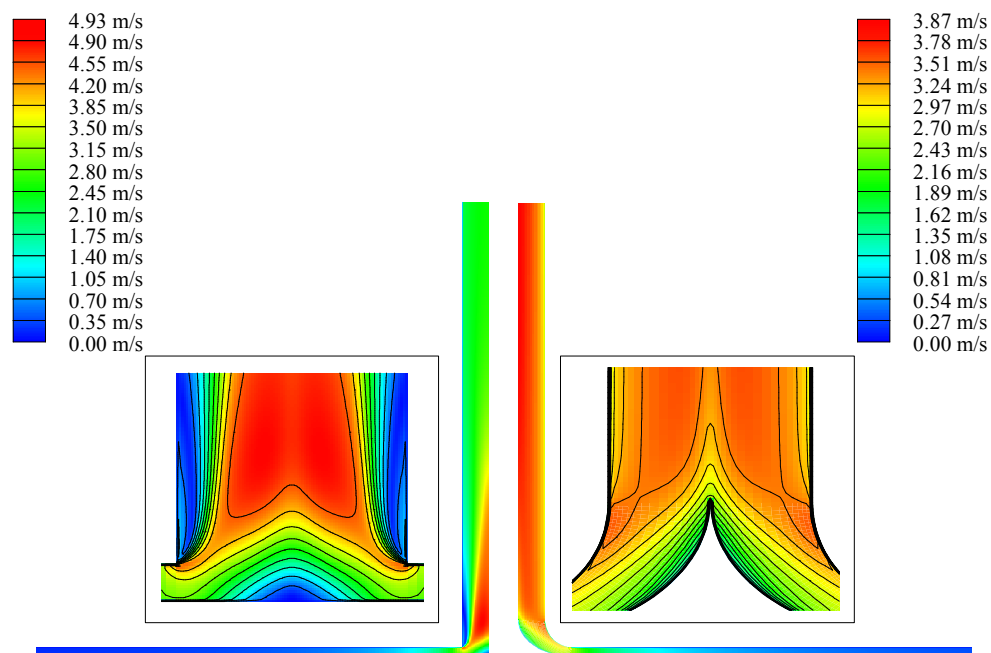


Figure V.29 : Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m².

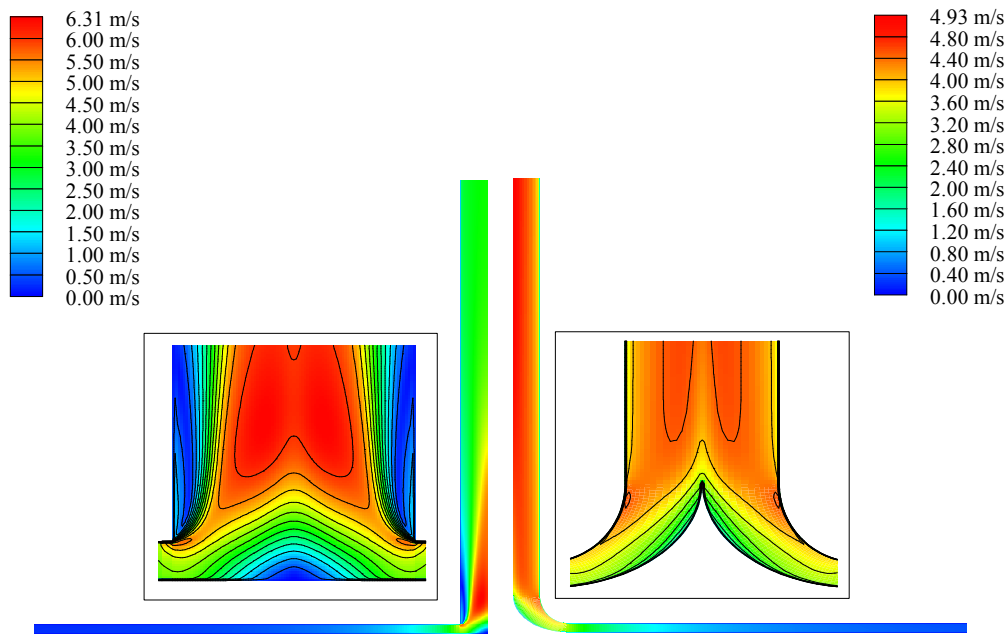


Figure V.30 : Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m^2 .

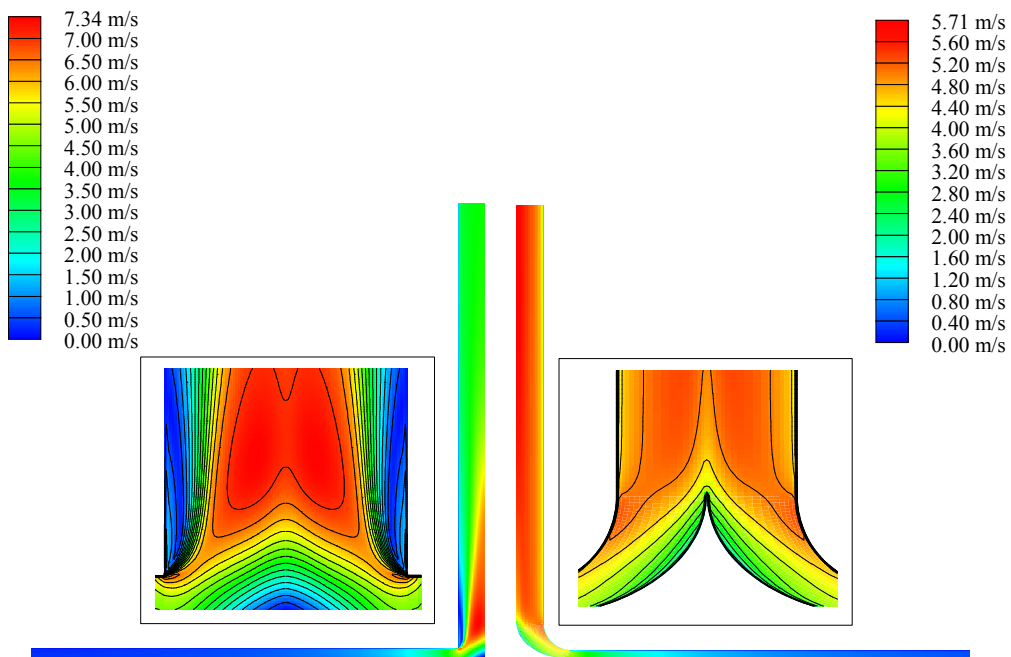


Figure V.31 : Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m^2 .

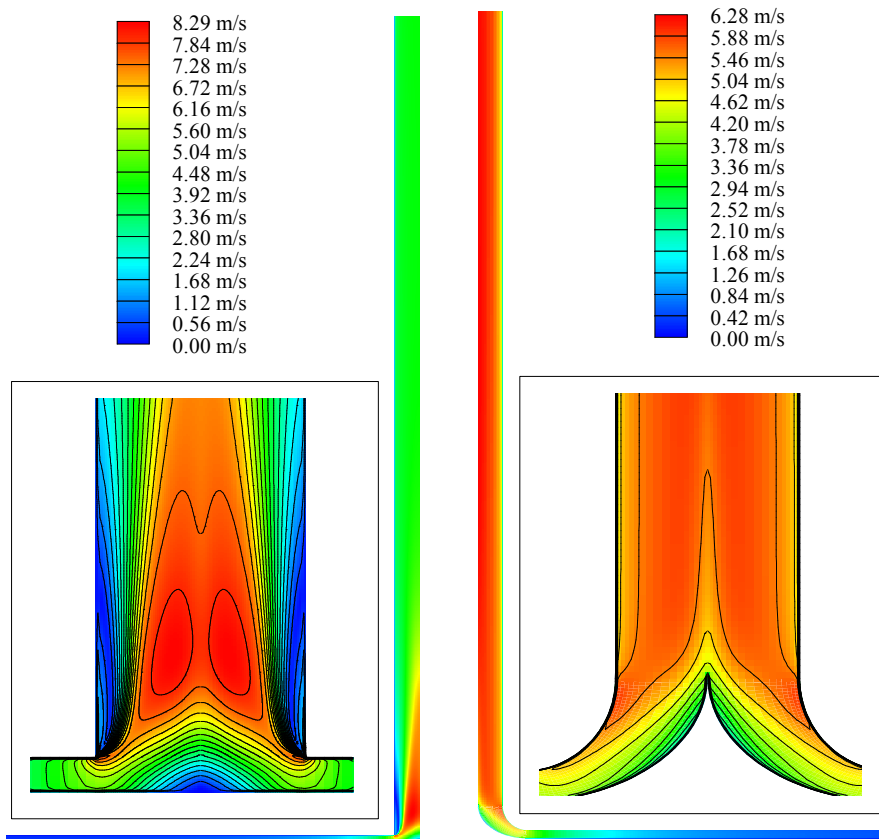


Figure V.32 : Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m^2 .

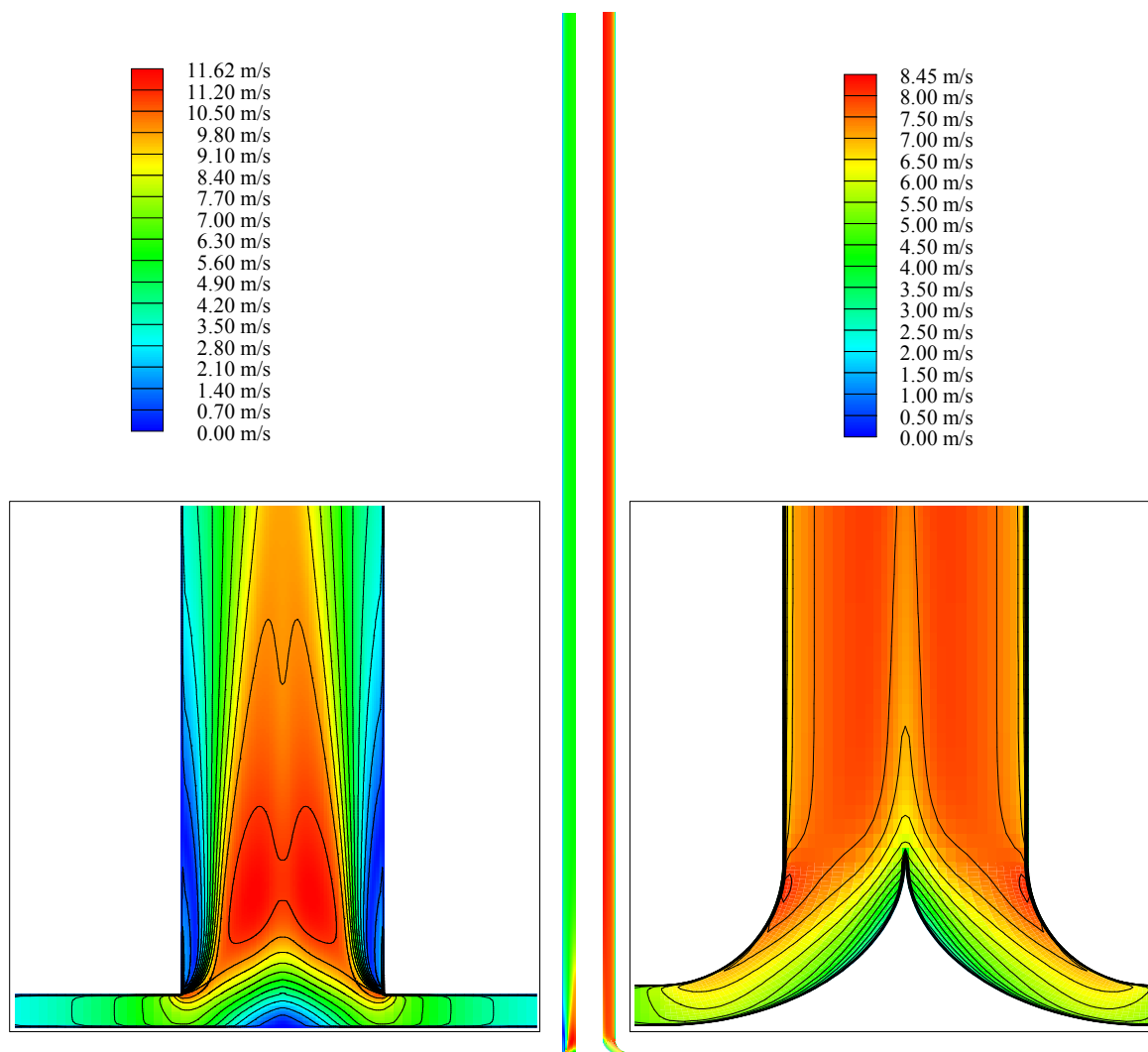


Figure V.33 : Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m^2 .

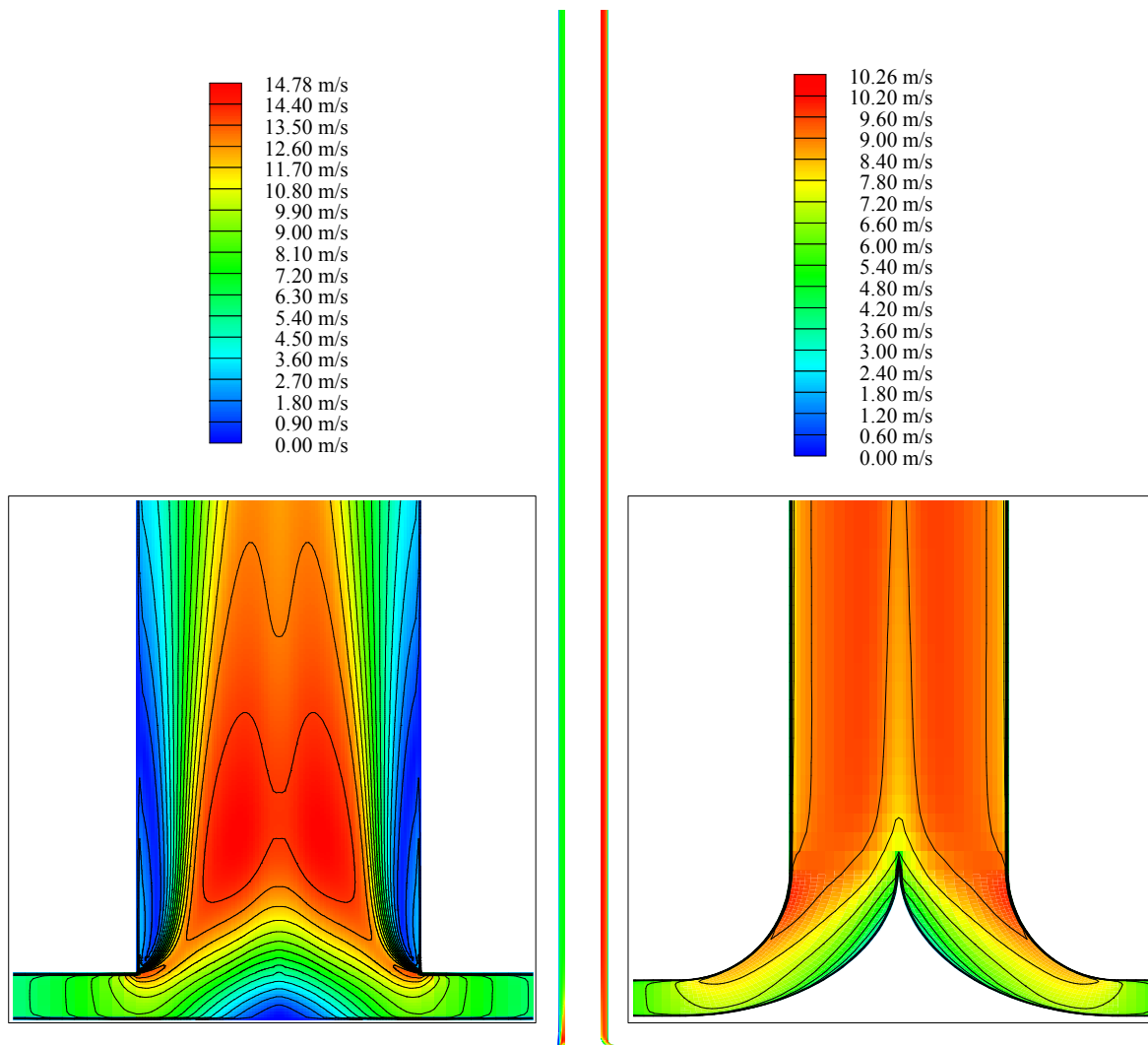


Figure V.34 : Contours de vitesse dans les deux géométries pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m^2 .

V.6.1.4. Lignes de courant

Les figures V.35, V.36, V.37, V.38, V.39, V.40 et V.41 représentent les lignes de courant le long de la cheminée solaire pour le rayonnement solaire $G = 100, 400, 700$ et 1000 W/m^2 et pour la hauteur de la cheminée $H = 50, 100, 250$ et 500 m dans les deux géométries (simple et courbée), on remarque que leurs formes sont presque parabolique où leurs maximums sont proches de la paroi supérieure du collecteur et de la paroi de la cheminée.

Dans la géométrie simple, on voit la zone de la circulation d'air mais elle disparaît dans la géométrie courbée.

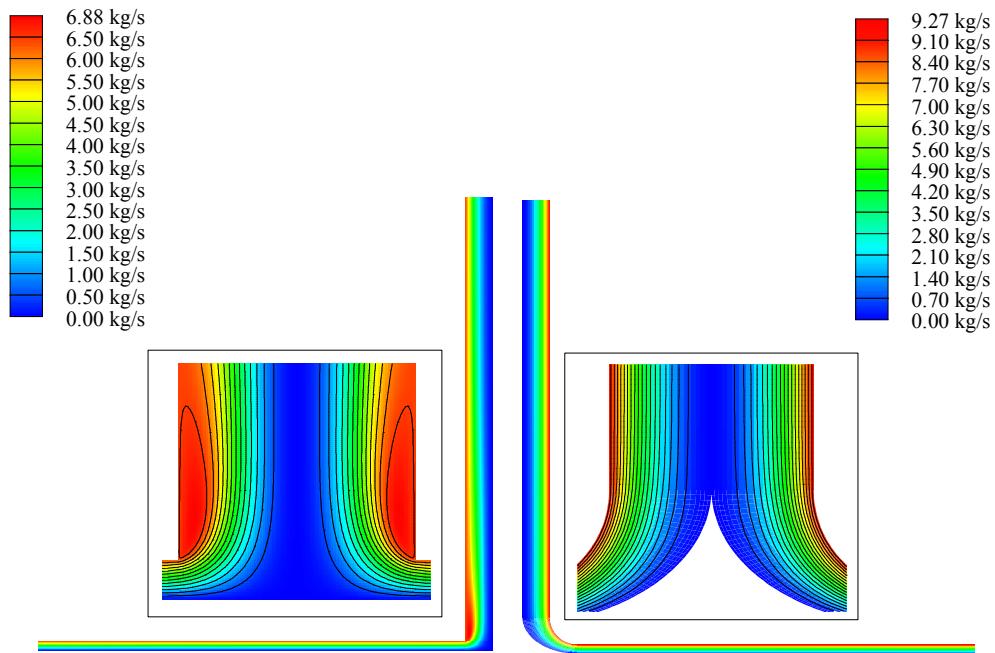


Figure V.35 : Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m².

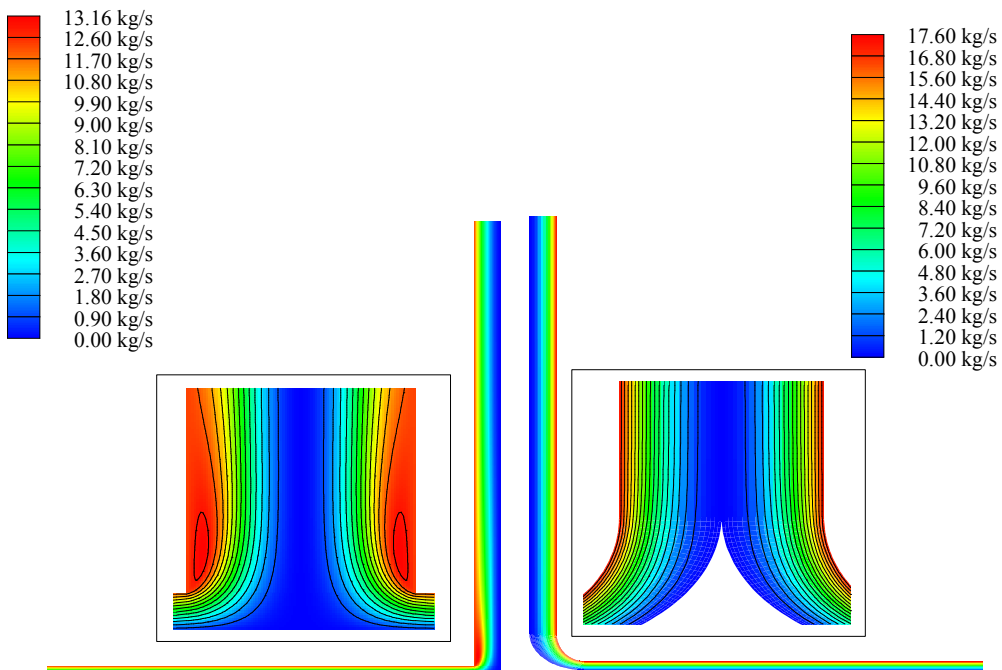


Figure V.36 : Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m².

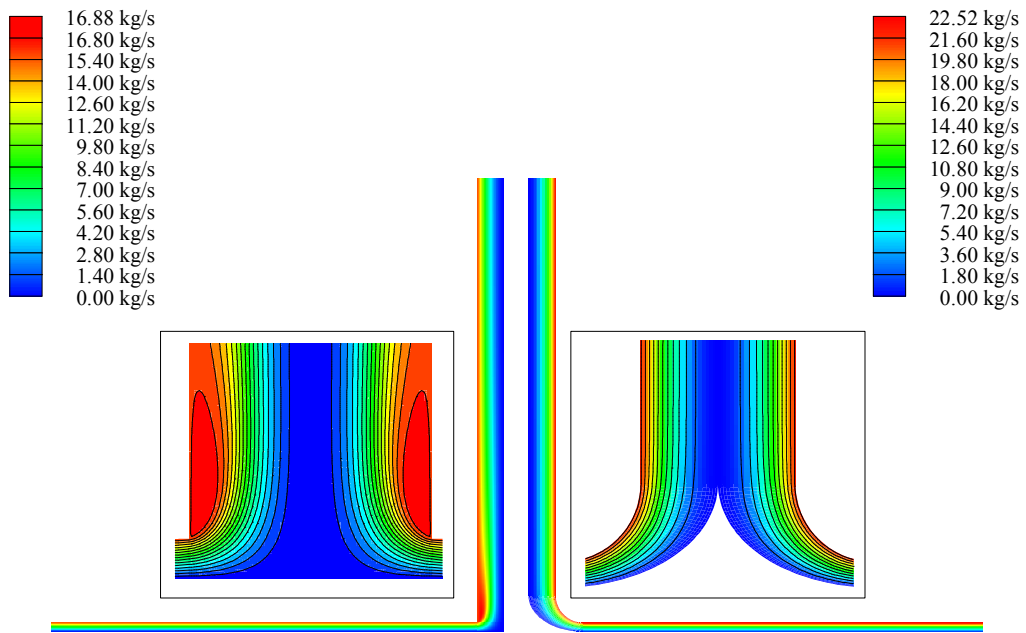


Figure V.37 : Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m².

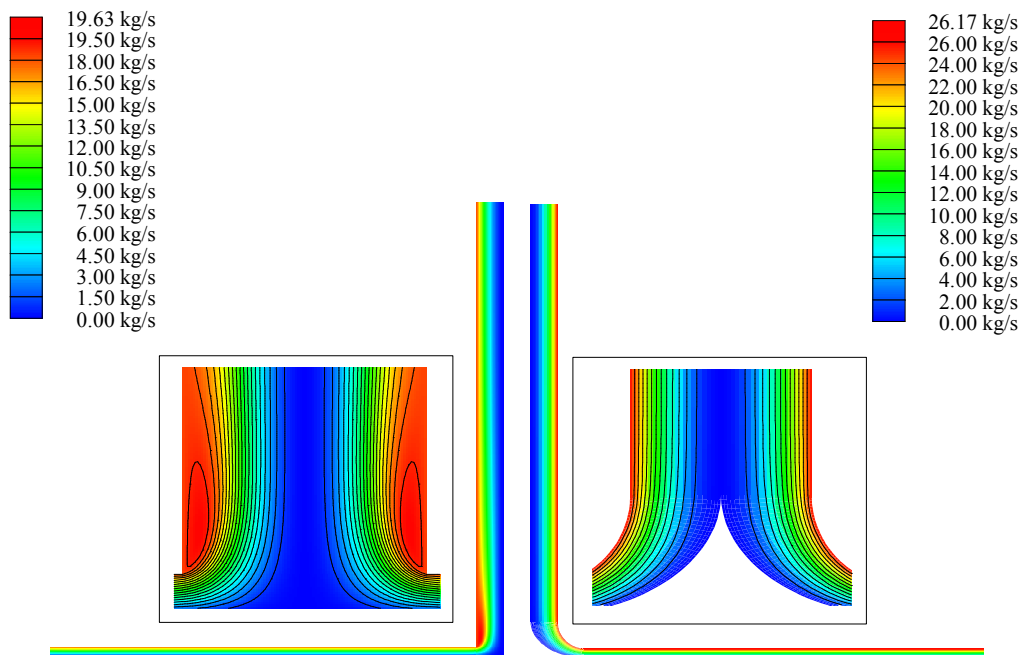


Figure V.38 : Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m².

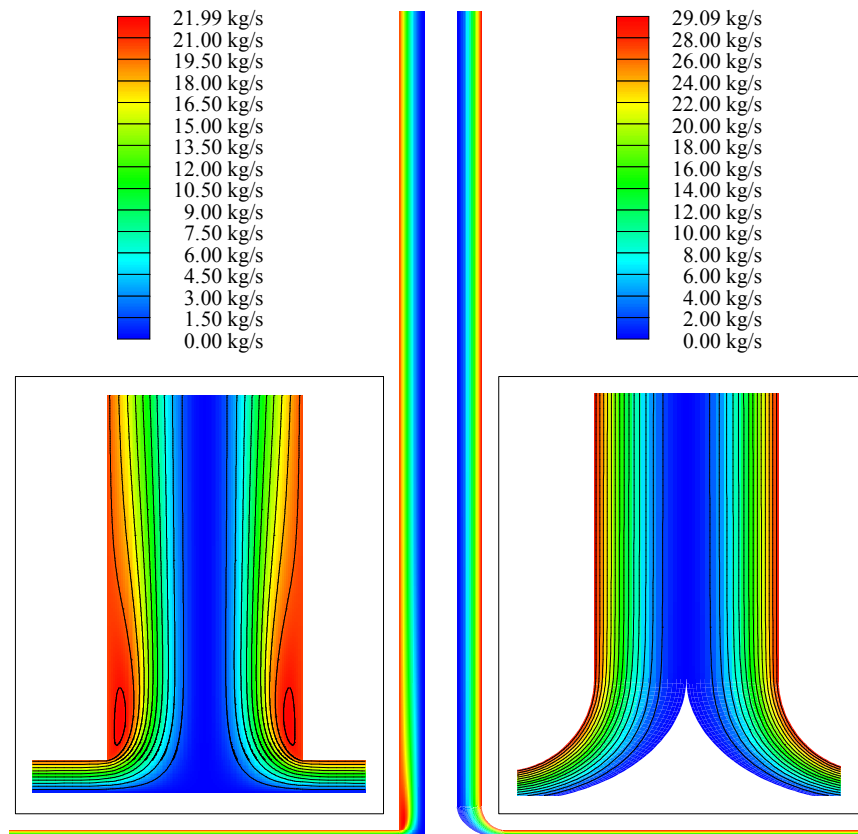


Figure V.39 : Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 100$ m et $G = 700$ W/m².

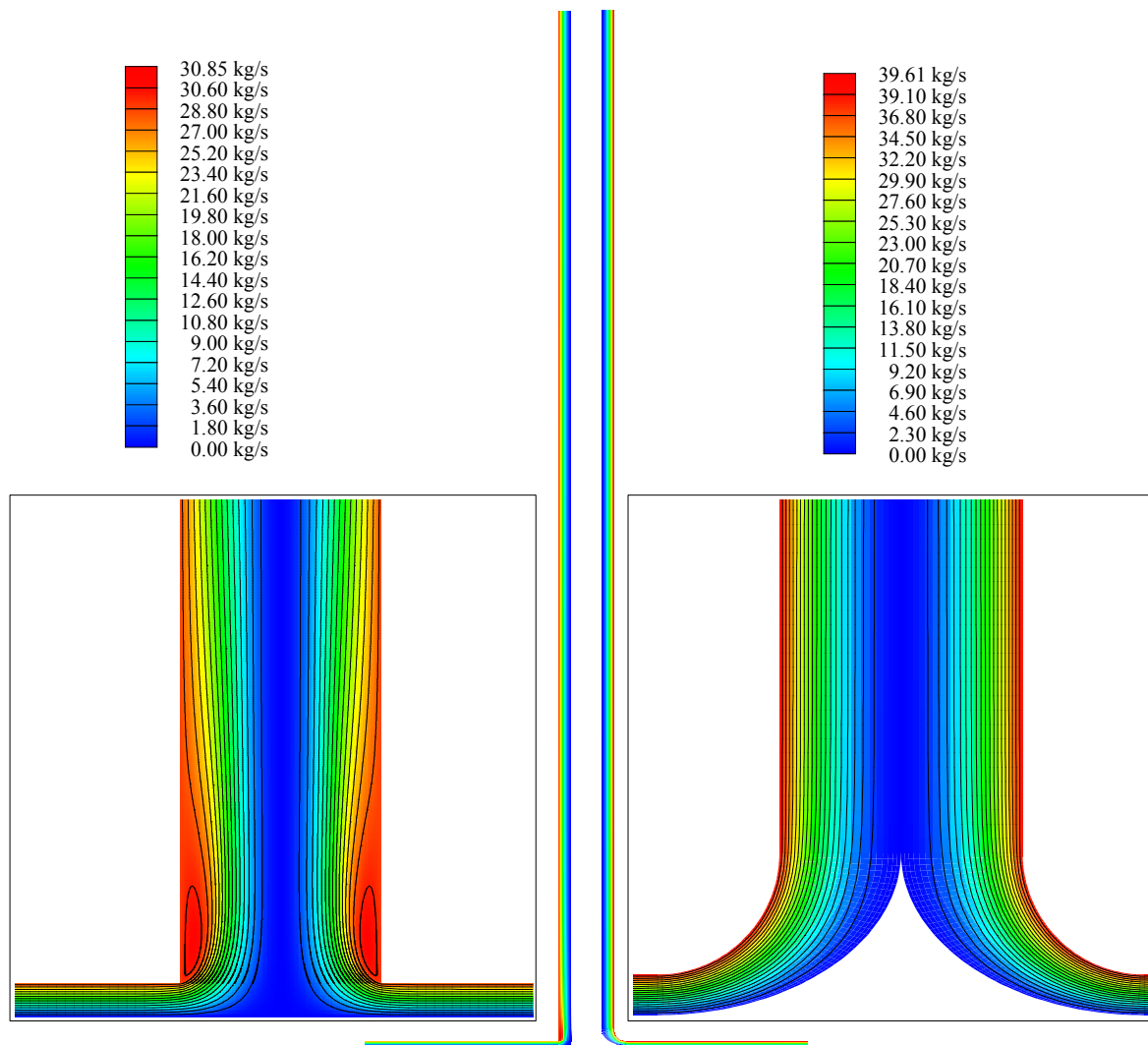


Figure V.40 : Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 250$ m et $G = 700$ W/m².

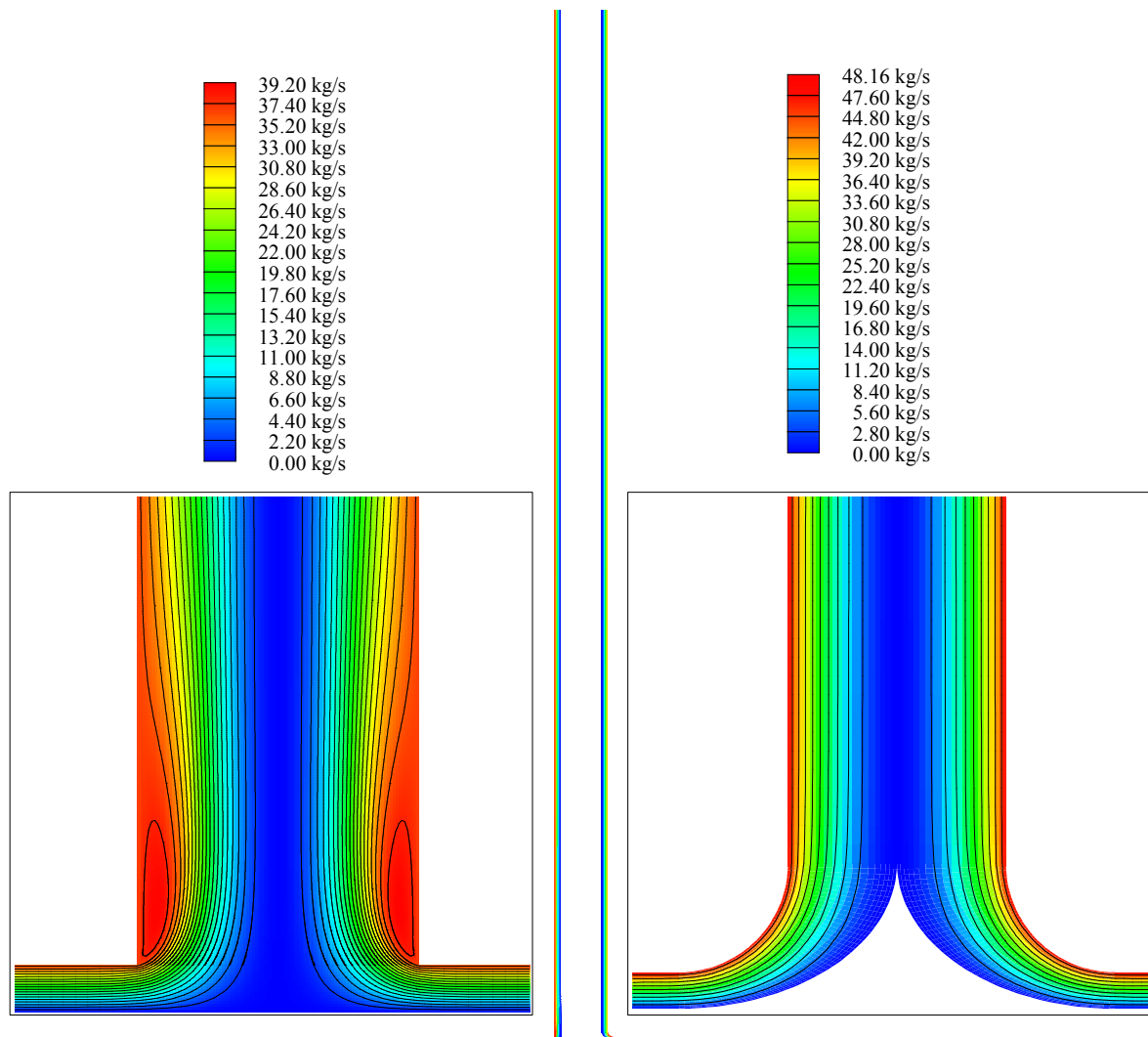


Figure V.41 : Lignes de courant dans les deux géométries pour $H = 500$ m et $G = 700$ W/m².

V.6.2. Profils de vitesse, de température et de pression

V.6.2.1. Dans le collecteur

V.6.2.1.1. Profils à $z = 0.5$ m

La figure V.42 montre la zone où on va tracer les profils de température, de vitesse et de pression à l'intérieur du collecteur (à mi-hauteur de ce dernier). Pour le rayonnement solaire $G = 100, 400, 700$ et 1000 W/m² et pour la hauteur de la cheminée $H = 50, 100, 250$ et 500 m dans les deux géométries (simple et courbée).

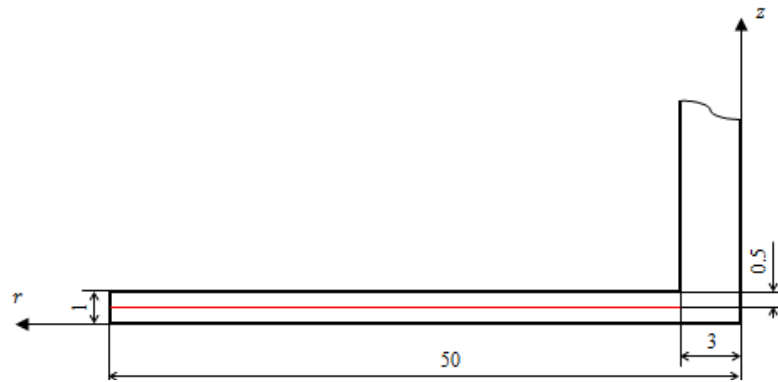


Figure V.42 : La zone à mi-hauteur du collecteur ($z = 0.5$ m).

V.6.2.1.1.1. Profils de température

Pour une hauteur fixe, les figures V.43 et V.44 montrent l'influence du rayonnement solaire et du rayon de collecteur sur le profil de température de l'air traversant le collecteur. Quand le rayonnement solaire est constant, la température de l'air augmente en diminuant le rayon du collecteur.

La figure V.43 montre aussi que, l'augmentation du rayonnement solaire cause l'augmentation de la température de l'air et ça pour le même rayon du collecteur.

La figure V.44 montre l'effet de la hauteur H de la cheminée solaire sur la température de l'air dans le collecteur. On voit que cette dernière diminue en augmentant la hauteur H , Cela revient à l'augmentation de la vitesse ; par ce que l'air maintenu chaud dans une cheminée à hauteur plus élevée contrairement à la cheminée moins élevée autrement dit les forces de flottabilité demeure longtemps dans une cheminée à hauteur plus élevée.

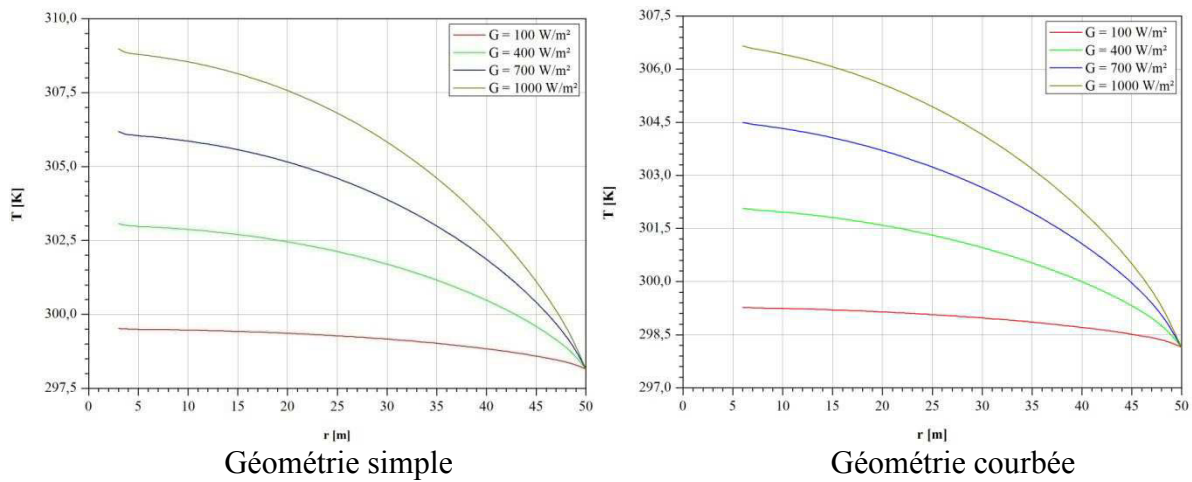


Figure V.43 : Profils de température à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m.

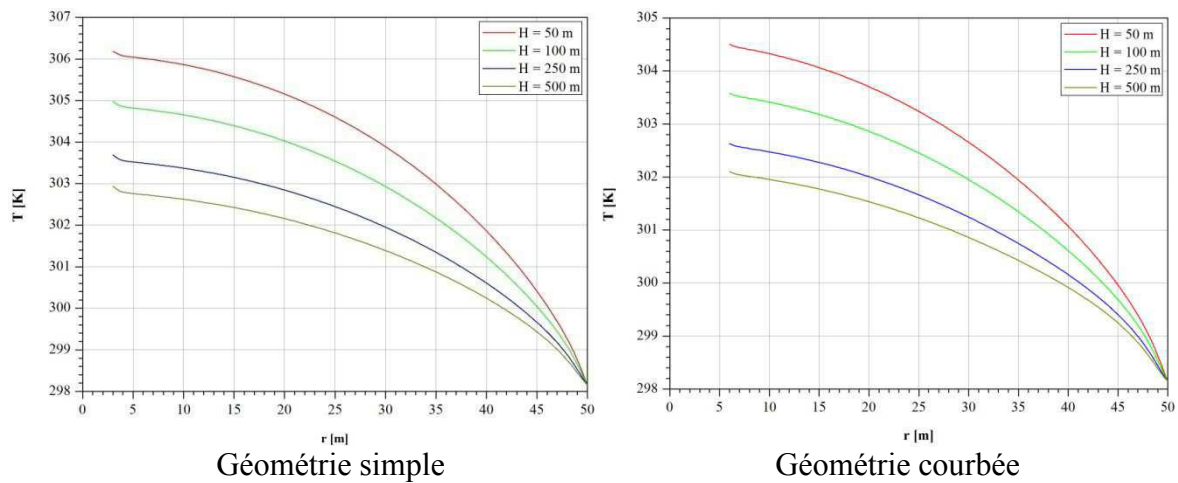


Figure V.44 : Profils de température à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de H et $G = 700$ W/m^2 .

V.6.2.1.1.2. Profils de vitesse

Les figures V.45 et V.46 montrent l'augmentation de la vitesse dans le collecteur en diminuant le rayon r , mais elle augmente brusquement en atteignant la base de la cheminée (entrée de la jonction).

Pour un rayon du collecteur constant, une augmentation de rayonnement solaire cause une augmentation de la vitesse d'air (figure V.45). Egalement comme le montre la figure V.46, pour un rayon du collecteur donné, une augmentation de la hauteur H de la cheminée cause une augmentation de la vitesse d'air.

Mais l'effet du rayonnement solaire et de la hauteur de la cheminée sur la vitesse d'air dans le collecteur n'est pas très significatif.

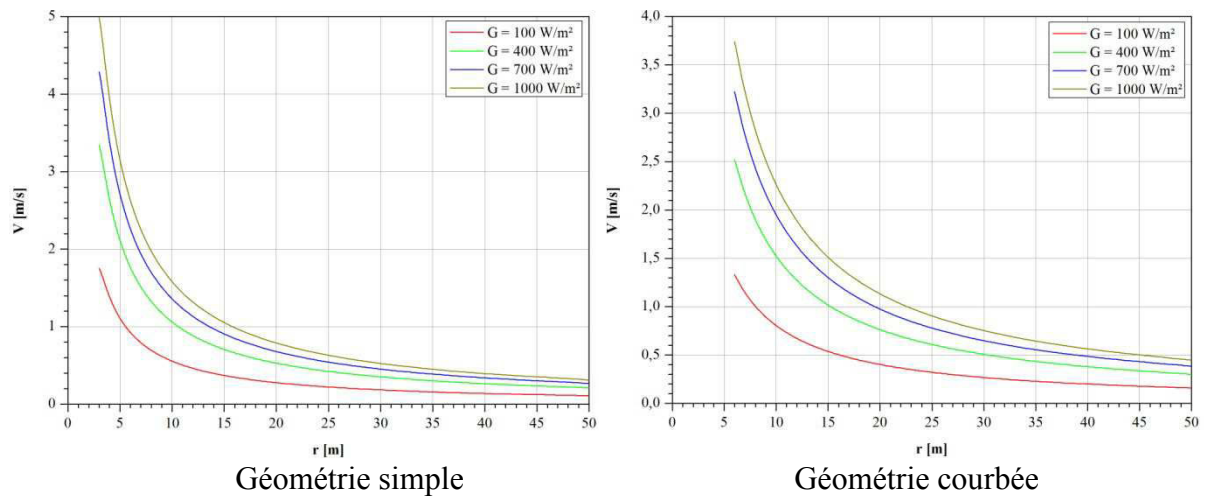


Figure V.45 : Profils de vitesse à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m.

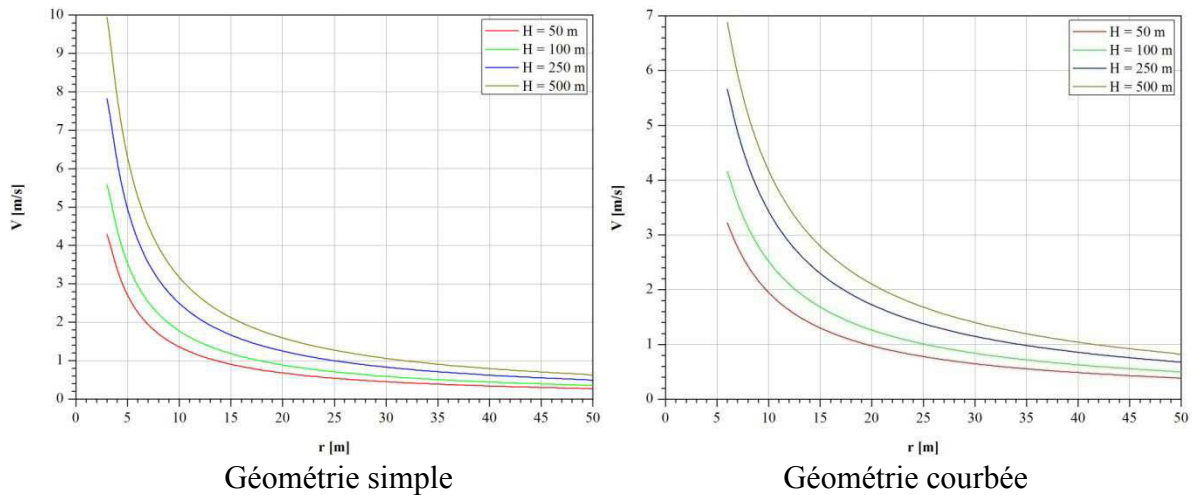


Figure V.46 : Profils de vitesse à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de H et $G = 700$ W/m².

V.6.2.1.1.3. Profils de pression

Les figures V.47 et V.48 montrent les profils de pression statique, qui diminue dans le collecteur et les basses pressions sont prêtes de la base de la cheminée (sortie du collecteur). Elles montrent également que pour un rayonnement solaire croissant (figure V.47) ou une hauteur de la cheminée croissante (figure V.48), la pression statique diminue et tout ça pour un rayon de collecteur constant.

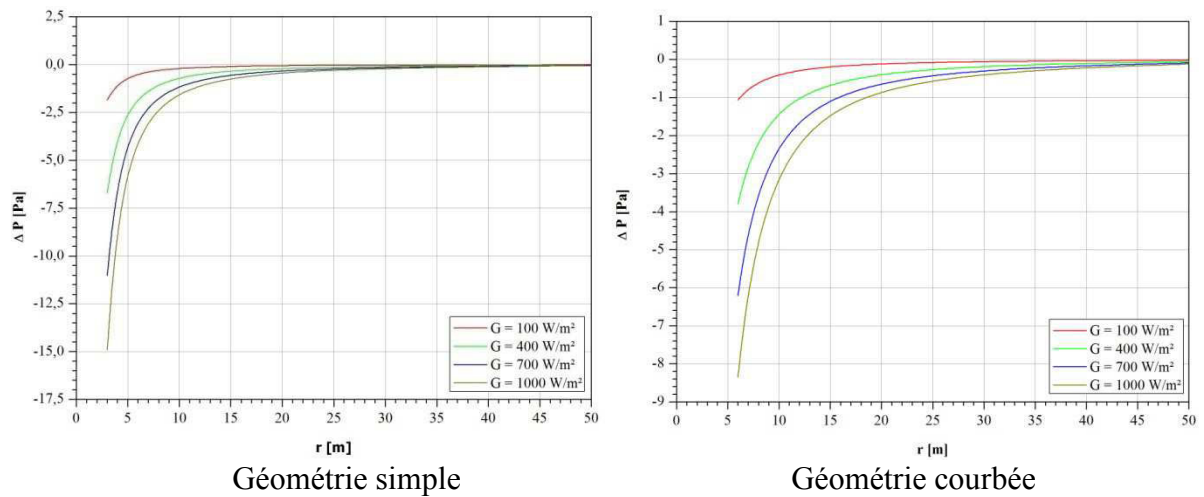


Figure V.47 : Profils de pression à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de G et $H = 50$ m.

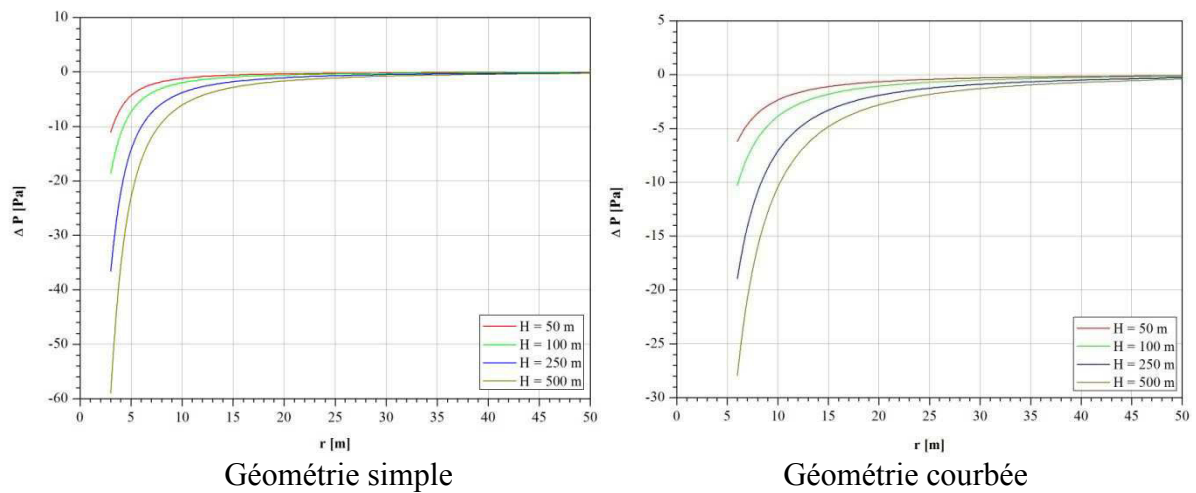


Figure V.48 : Profils de pression à $z = 0.5$ m pour différentes valeurs de H et $G = 700$ W/m².

V.6.2.1.2. Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur

Pour voir plus de détail sur l'évolution des profils de vitesse à travers le collecteur, nous avons tracé les profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur ; $r = 10, 20, 30$ et 40 m (figure V.49) pour différentes valeurs du rayonnement solaire $G = 100, 400, 700$ et 1000 W/m² et $H = 50$ m.

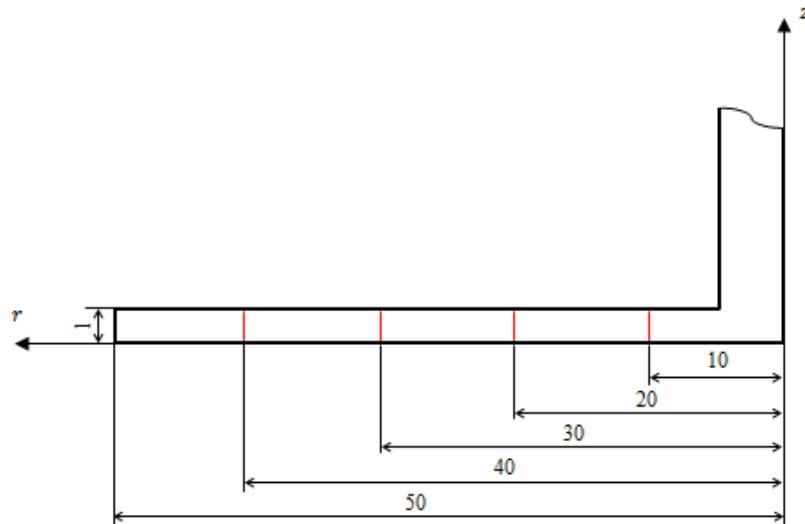


Figure V.49 : Les sections verticales à étudier dans le collecteur ($r = 10, 20, 30$ et 40 m).

Les figures V.50, V.51, V.52 et V.54 montrent les profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur, on remarque que la vitesse augmente progressivement en se dirigeant vers l'intérieur de la cheminée solaire, cette augmentation est due à la conservation de la masse et de la forme du collecteur, puisque la section d'entrée de ce dernier est très grande par rapport à celle de sortie, ceci est l'une des caractéristique principale qui fait que l'air dans la cheminée solaire s'accélère pour pouvoir utiliser cette inertie dans la turbine génératrice d'énergie électrique.

On peut constater que l'augmentation du rayonnement solaire cause une augmentation de vitesse d'écoulement. Ainsi, l'orientation de l'écoulement par la jonction courbée génère une augmentation de la vitesse à cause de l'élimination de la circulation d'air à l'entrée de la cheminée dans la géométrie simple.

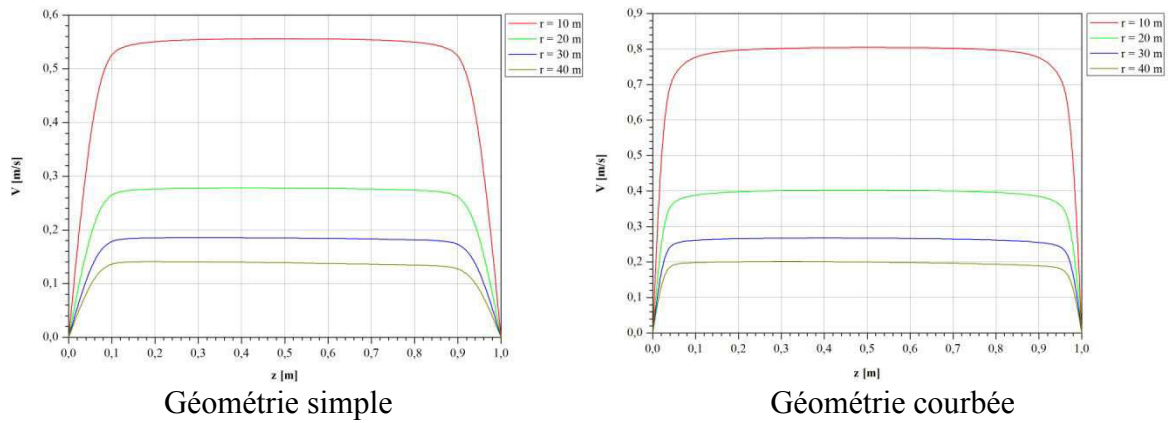


Figure V.50 : Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur pour $H = 50$ m et $G = 100$ W/m^2 .

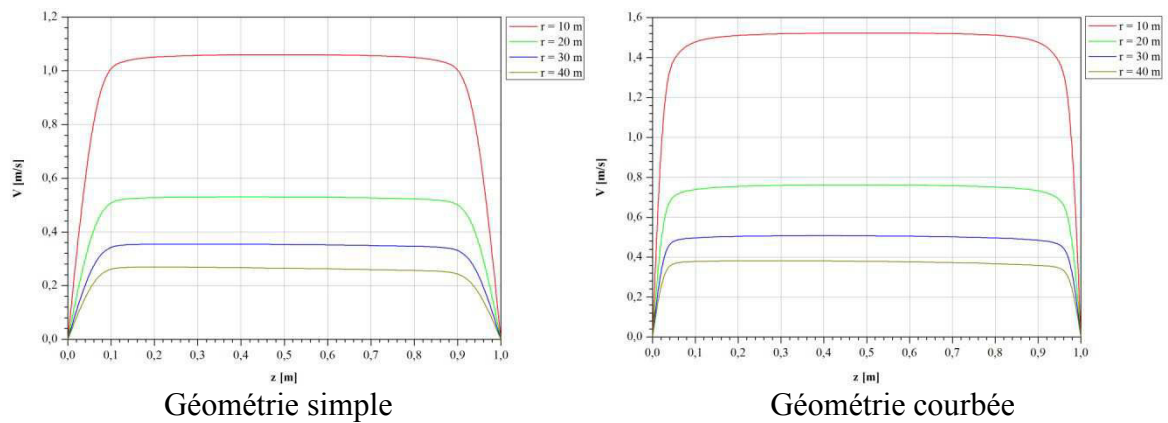


Figure V.51 : Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur pour $H = 50$ m et $G = 400$ W/m^2 .

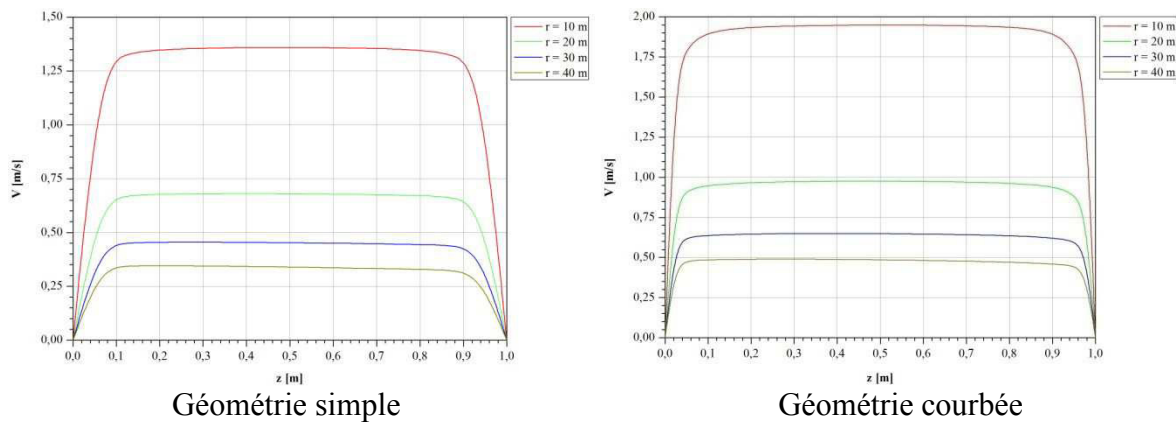


Figure V.52 : Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur pour $H = 50$ m et $G = 700$ W/m^2 .

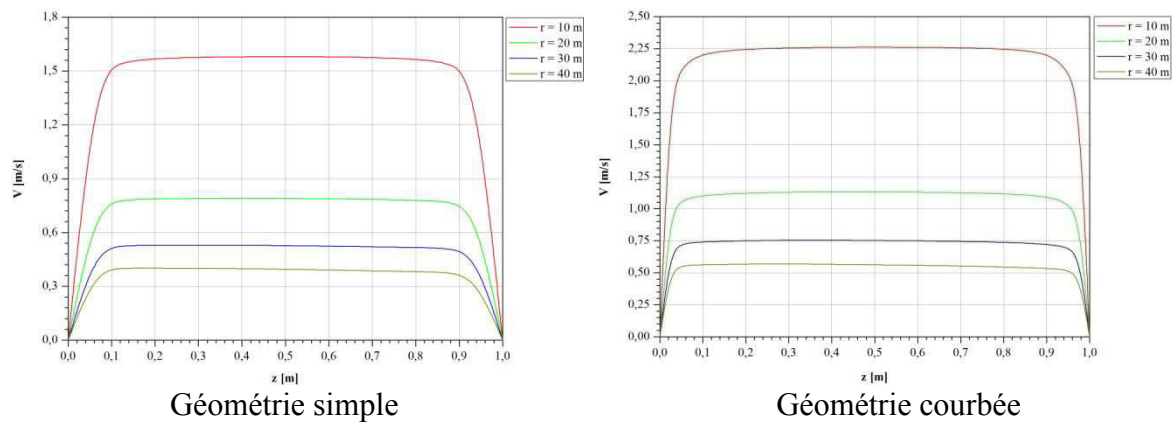


Figure V.53 : Profils de vitesse à plusieurs sections du collecteur pour $H = 50$ m et $G = 1000$ W/m^2 .

V.6.2.2. Dans la cheminée

V.6.2.2.1. Profils de vitesse à $z = 4$ m

La figure V.54 montre la zone où on va tracer les profils de vitesse à l'intérieur de la cheminée ($z = 4$ m), pour le rayonnement solaire $G = 100, 400, 700$ et 1000 W/m^2 et pour la hauteur de la cheminée $H = 50, 100, 250$ et 500 m dans les deux géométries (simple et courbée).

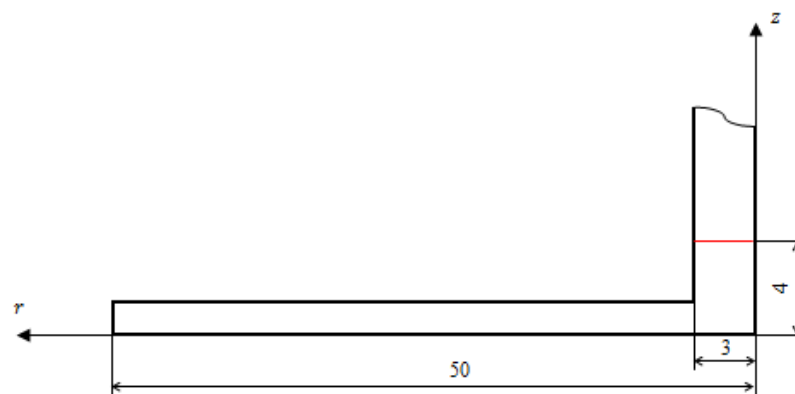


Figure V.54 : La zone de $z = 4$ m.

Les figures V.55 et V.56 montrent l'effet du rayonnement solaire et de la hauteur de la cheminée sur la vitesse d'air à $z = 4$ m (dans la cheminée), on voit que dans cette zone la vitesse est importante. Les deux paramètres G et H influent beaucoup sur la vitesse d'air contrairement dans le collecteur, c'est pour cela qu'on préfère d'installé les turbines dans cette zone, soit des petites turbines au pourtour de la base de la cheminée (entrée de la jonction) ou une grande turbine dans une hauteur près de l'entrée de la cheminée.

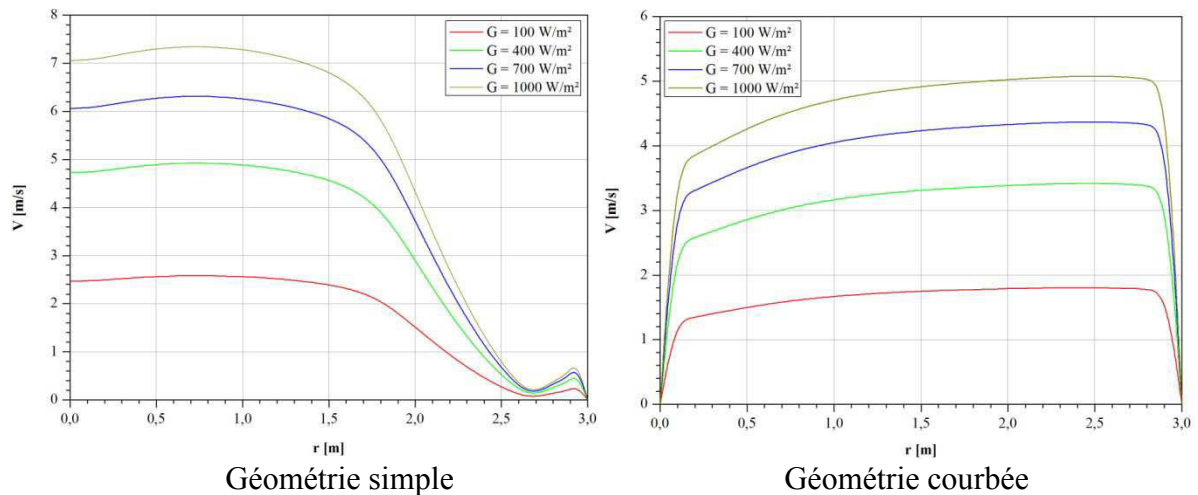


Figure V.55 : Profils de vitesse à z = 4 m pour différentes valeurs de G et H = 50 m.

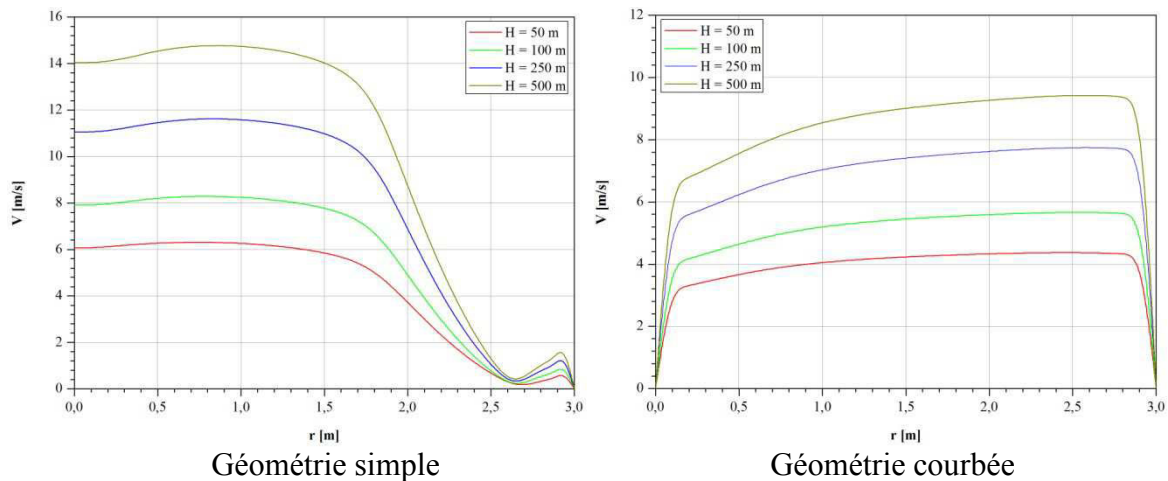


Figure V.56 : Profils de vitesse à z = 4 m pour différentes valeurs de H et G = 700 W/m².

V.6.3. Puissance utile de la turbine

Pour suivre l'influence du rayonnement solaire et de la hauteur de la cheminée sur le rendement de la cheminée solaire, on calcule la puissance utile pour chaque cas que nous avons simulé dans les deux zones où les turbines peuvent être installées (entrée de la jonction et z = 4 m) comme suit :

$$P_u = \frac{1}{2} \dot{m} \bar{V}^2 \tag{V.4}$$

Où :

P_u : Puissance utile de la turbine.

\dot{m} : Débit massique de l'air calculé d'après la simulation numérique (FLUENT).

\bar{V} : Vitesse moyenne de l'air à l'entrée de la jonction ou à $z = 4$ m, calculée d'après la simulation numérique (FLUENT).

Les figures V.57 et V.58 montrent que l'augmentation du rayonnement solaire et de la hauteur de la cheminée causent l'augmentation de la puissance utile de la turbine, on remarque que cette puissance est importante à l'entrée de la jonction dans la géométrie simple et à $z = 4$ m dans la géométrie courbée, et on remarque aussi que la puissance maximale peut être atteinte à $z = 4$ m dans la géométrie courbée (figure V.57) mais la tendance s'inverse à partir d'une hauteur $H = 250$ m ou la puissance maximale est atteinte à l'entrée de la jonction dans la géométrie simple (figure V.58).

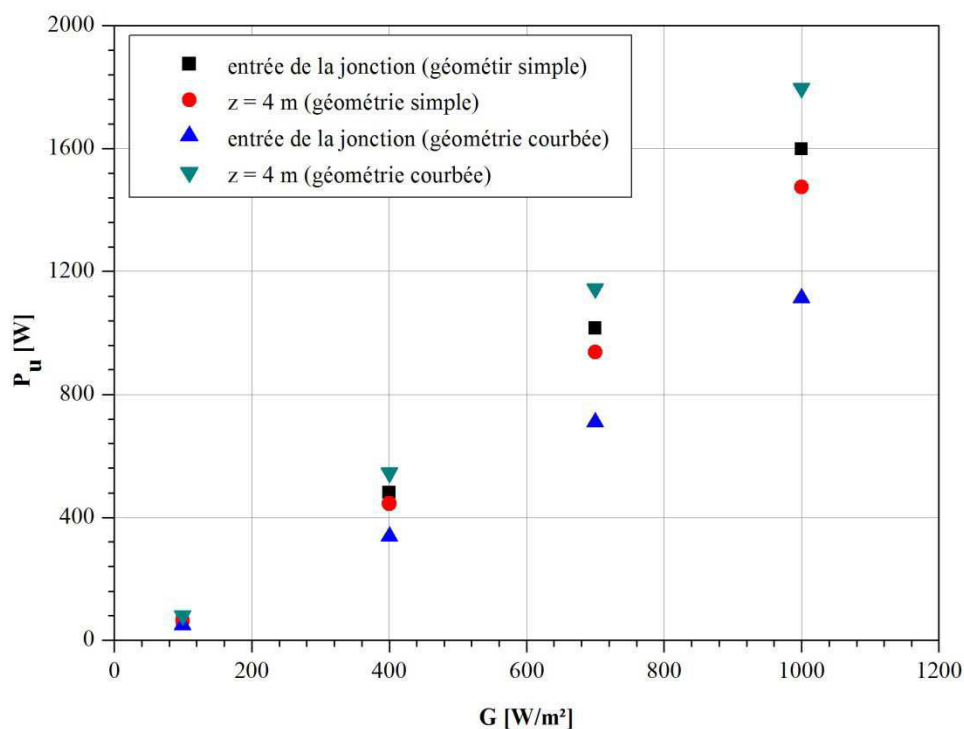


Figure V.57 : Puissance utile en fonction du rayonnement solaire.

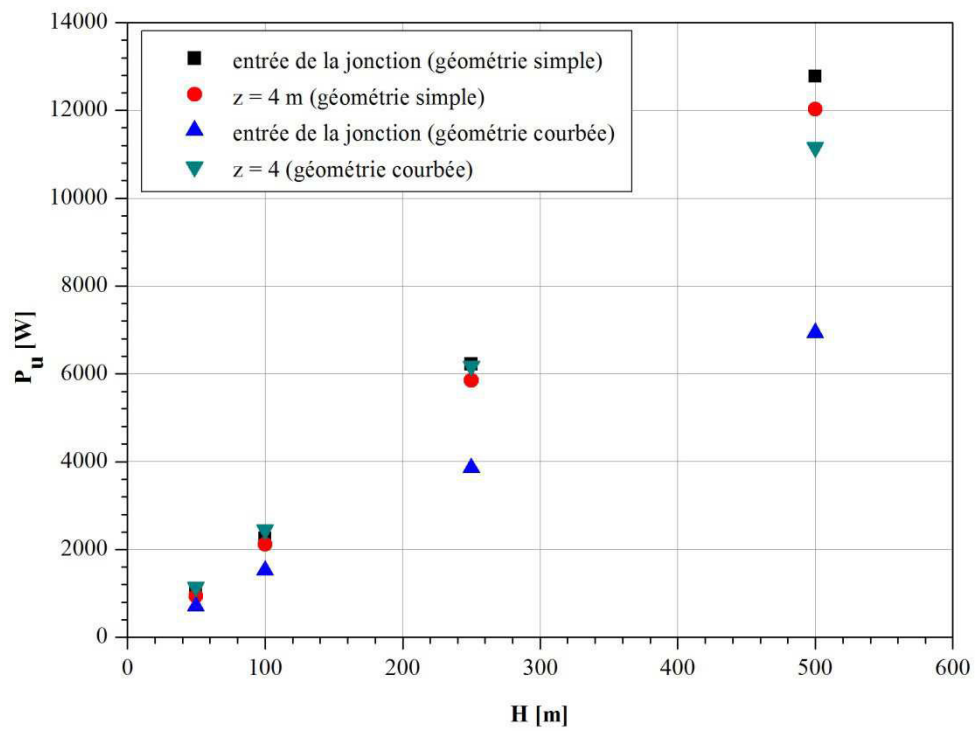


Figure V.58 : Puissance utile en fonction de la hauteur de la cheminée.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans ce présent mémoire, notre objectif principal était de faire une analyse numérique sur des champs de vitesses, de pression et de températures dans une cheminée solaire avec différents cas du rayonnement solaire et de la hauteur de la cheminée pour deux types de géométrie, pour avoir une étude comparative qui nous permet de voir les différences entre les cas étudiés et nous permet de mieux comprendre notre système.

Le logiciel FLUENT qu'on a utilisé pour la simulation numérique d'une cheminée solaire nous permet d'atteindre notre but et d'avoir une quantité importante de résultats avec une grande précision.

Les résultats de la simulation numérique ont montré, que le processus thermique d'une cheminée solaire s'agit d'une convection naturelle en régime turbulent. La vitesse de l'air à l'intérieure de la cheminée solaire augmente avec l'augmentation du rayonnement solaire, donc on peut conclure que la production optimal d'énergie électrique est atteinte vers midi où la demande de consommateurs augmente à ce moment.

Dans l'optique de cette étude, on peut dire que pour un rayonnement solaire donné, la taille de la cheminée influe beaucoup sur la vitesse d'écoulement. Et on peut constater que la jonction courbée de la cheminée solaire est plus proche de la forme réelle de la cheminée solaire.

Avec le développement des moyens de calculs, la simulation numérique devient de plus en plus un outil très intéressant pour la prédiction des phénomènes pouvant se produire à l'intérieur de la cheminée solaire, nous pouvons donc à ce titre envisager pour des investigations futures des études de situations plus intéressantes et plus proches de la réalité, telles que :

- Simulation numérique tridimensionnelle d'une cheminée solaire.
- Intégration d'une turbine à l'intérieur de la cheminée solaire et le calcul de la puissance générée par cette dernière.
- Intégration d'un système de stockage d'énergie ou une autre source d'énergie renouvelable tel que la géothermique pour assuré le fonctionnement pendant la nuit.
- Simulation numérique d'une cheminée solaire en présence des plantes pour employer le collecteur comme une serre agriculture.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Jing-yin Li, Peng-hua Guo, Yuan Wang, Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines, *Renewable Energy* 47 (2012) 21-28.
- [2] Jacques Bernard, *Énergie solaire, Calculs et optimisation*, Ellipses 2004.
- [3] Ramadan Bassiouny, Nader S.A. Koura, An analytical and numerical study of solar chimney use for room natural ventilation, *Energy and Buildings* 40 (2008) 865-873.
- [4] Salah Larbi, Amor Bouhdjar, Toufik Chergui, Performance analysis of a solar chimney power plant in the southwestern region of Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2009).
- [5] Mohammed H. Ali, Analysis Study of Solar Tower Power Plant & Its Configuration Effects on Its Performance in Iraq (Baghdad City), *Modern Applied Science*; Vol. 7, No. 4; 2013.
- [6] Roozbeh Sangi, Majid Amidpour, Behzad Hosseinizadeh, Modeling and numerical simulation of solar chimney power plants, *Solar Energy* 85 (2011) 829-838.
- [7] Michel Favre-Marinet, Sedat Tardu, *Convective Heat Transfer*, ISTE 2009.
- [8] A. Mostafa, M. F. Sedrak, Adel M. Abdel Dayem, Performance of a Solar Chimney, Under Egyptian Weather Conditions, *Numerical Simulation and Experimental Validation, Energy Science and Technology* Vol.1 No.1 2011.
- [9] Atit Koonsrisuk, Tawit Chitsomboon, Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants, *Energy* 51 (2013) 400-406.
- [10] T.P. Fluri, T.W. Von Backström, Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant, *Solar Energy* 82 (2008) 999–1008.
- [11] W. Michael Lai, David Rubin, Erhard Krempl, *Introduction to Continuum Mechanics*, Butterworth Heinemann 1993.
- [12] H. K. Versteeg, W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method*, Longman Group 1995.

[13] Ming Tingzhen, Liu Wei, Xu Guoling, Xiong Yanbin, Guan Xuhu, Pan Yuan, Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine, Renewable Energy (2007).

[14] Fluent Inc. 2006-09-20, FLUENT 6.3 User's Guide.