

UNIVERSITÉ OUAGA I
PROFESSEUR JOSEPH KI-ZERBO

École Doctorale
Sciences et Technologies

Laboratoire d'Energies Thermiques

Renouvelables (L.E.T.RE)



N° d'ordre : 441

Thèse Présentée par :

Thierry Sikoudouin Maurice KY

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO

Spécialité : Physique

Option : Thermique - Optique

ANALYSE DES IMAGES OPTIQUES DES CONCENTRATEURS SOLAIRES. APPLICATION POUR LA CONCEPTION DE FOURS À PAIN.

Soutenue le 29 juillet 2016 devant le jury composé de :

Président :

M. Magolmèèna BANNA Professeur titulaire à l'Université de Lomé (Togo) Rapporteur

Membres :

M. Yézouma COULIBALY Maître de Conférence à l'Institut 2iE - Ouagadougou Rapporteur

M. Martial ZOUNGRANA Maître de Conférence à l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO Rapporteur

M. Sié KAM Maître de Conférence à l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO Examineur

M. Alfa Oumar DISSA Maître de Conférence à l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO Examineur

M. Florent KIENO Maître de Conférence à l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO Examineur

M. D. Joseph BATHIEBO Professeur titulaire à l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO .. Directeur de thèse

DÉDICACE

Au Parent Céleste

Aux Vrais Parents du ciel, de la terre et de l'humanité

À toute ma Famille spirituelle et physique

REMERCIEMENTS.

Je remercie M. Dieudonné Joseph BATHIEBO, Professeur titulaire à l'Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, Directeur du Laboratoire d'Energies Thermiques Renouvelables (L.E.T.RE) pour avoir bien voulu diriger ces travaux. Il m'a très favorablement accueilli dans son laboratoire, offert un environnement propice à la recherche et mis à disposition du matériel et des équipements permettant d'aboutir aux résultats actuels. Il a toujours positivement orienté ces travaux par ses conseils et ses enseignements.

Je remercie M. Magolmèèna BANNA, Professeur titulaire de Physique à l'Université de Lomé, pour avoir accepté de participer à ce jury et de présider.

Je remercie M. Yézouma COULIBALY, Maître de Conférence en Physique Énergétique à l'institut 2IE, pour avoir bien voulu participer à ce jury.

Je remercie M. Martial ZOUNGRANA, Maître de Conférence en Physique à l'Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, pour m'avoir constamment inspiré à la recherche par ses conseils et son exemple, et pour avoir bien voulu participer à ce jury.

Je remercie M. Sié KAM, Maître de Conférence en Physique à l'Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, pour ses nombreux conseils scientifiques, son accompagnement depuis le DEA et pour avoir bien voulu participer à ce jury.

Je remercie M. Alfa Oumar DISSA, Maître de Conférence en Physique à l'Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, pour avoir bien voulu participer à ce Jury.

Je remercie M. Florent KIENO, Maître de Conférence en Physique à l'Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, pour ses conseils scientifiques et pour avoir bien voulu participer à ce Jury.

Je remercie M. François ZOUGMORE, Professeur Titulaire à l'Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, Fondateur du Troisième cycle de Physique Appliquée, Directeur du Laboratoire LAME et Directeur de l'école Doctorale Sciences et Techniques, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et accepté de diriger mes travaux de DEA.

Je remercie tous mes collègues enseignants de l'Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées (UFR-SEA) de l'Université Ouaga I Professeur Joseph KI-ZERBO, pour leur franche collaboration et leur soutien, soit direct ou indirect à l'avancement de ce travail.

Je remercie tous mes collègues enseignants des laboratoires LETRE, LAME et LPCE pour leurs soutiens, conseils et encouragements.

Je remercie M. Honoré Patrice TOE, Directeur de l'entreprise ITC, pour son soutien moral, matériel et financier vis-à-vis de ce travail.

Je remercie Mme Christianne KY/CHAKMA pour son soutien moral, matériel et financier vis-à-vis de ce travail.

Je remercie M. Christophe SANON, Directeur de l'entreprise TECHNOVA, pour son soutien moral, matériel et financier vis-à-vis de ce travail.

Je remercie M. Désiré Yawovi BATCHASSI, Directeur de l'entreprise SECA, pour son soutien moral, matériel et financier vis-à-vis de ce travail.

Je remercie Mme Mau ILBOUDO/NGOMA, Ex-Présidente du Comité Académique pour la Recherche des Principes (CARP) dont je fus membre dans les années 2005-08, et actuelle Présidente Régionale de la Fédération des Femmes pour la Paix Mondiale (FFPM), pour avoir inspiré et oeuvré à mon inscription en DEA à l'Université Ouaga

I Professeur Joseph KI-ZERBO, et pour m'avoir depuis lors encouragé et accompagné spirituellement et moralement dans mes travaux de thèse.

Je remercie Tous les doctorants de ma promotion des laboratoires LETRE, LAME et LPCE pour leur soutien moral et leur bonne camaraderie.

Je remercie tous les membres de la Fédération des Familles pour la Paix Mondiale et l'Unification (FFPMU), de la Fédération pour la Paix Universelle (FPU), de La Fédération des Jeunes pour la Paix Mondiale (FJPM) et du Comité Académique pour la Recherche des Principes (CARP) pour leurs soutiens spirituel et moral vis-à-vis de ce travail.

Je remercie tous ceux qui de près ou de loin ont contribué, tant spirituellement que matériellement à la réussite de ce travail.

RÉSUMÉ

Dans ce travail de thèse, L'ensemble des concentrateurs solaires a été passé en revue dans le but de faire un choix optimum pour les fours à pain. La thèse s'inspire des difficultés rencontrées par l'installation solaire de l'établissement Gabriel TABORIN de Saaba à Ouagadougou. Cette installation est construite selon le système *Scheffler*. Le travail d'ajustement laborieux dans la poursuite de la déclinaison ainsi que sa motorisation pour sa poursuite du soleil d'Est en Ouest à rendu ce système peu adapté pour les pays africains.

En définitive, le choix s'est porté sur un concentrateur hémisphérique avec un receveur en forme de croissant, qui est placé dans le plan de moindre diffusion et calibré en fonction de la tache solaire pour une optimisation. Les coefficients de concentration géométrique et géométrique moyen ont été redéfinis selon le principe de juxtaposition.

Des relevés effectués sur deux prototypes ont permis de montrer que, avec des améliorations futures, le système de concentration hémisphérique peut remplacer le système *Scheffler* avec des avantages certains tels que la suppression de la traque motorisée d'Est en Ouest du soleil, et l'amélioration de la traque de la déclinaison par une simple rotation du receveur.

Ce travail aussi postule sur la possibilité de remplacer les systèmes de concentration cylindro-parabolique par des systèmes hémisphériques, car cela garantirait plus les installations contre les intempéries, en remplaçant la traque de la déclinaison par une rotation du receveur seul plutôt qu'une rotation du système tout entier.

Mots clés : concentrateur hémisphérique, Scheffler, Fixed Mirror Distributed Focus - FMDF, Solar bowl.

ABSTRACTS

In this thesis, The entire solar concentrators was spent revised in order to make an optimum choice for bread ovens. The thesis draws on the difficulties encountered by the solar plant of the school Gabriel TABORIN - Saaba in Ouagadougou. This facility is built according to the *Sheffler* system. The laborious adjustment work in the pursuit of declination and its engine-tracking of the sun from East to West made this system less suitable for African countries.

Ultimately, the choice fell on a hemispheric concentrator with a crescent shaped receiver, which is placed in the less diffusion plan and calibrated according to the sunspot for optimization. The coefficients of geometric concentration and geometric mean concentration were redefined according to the principle of juxtaposition.

Surveys conducted on two prototypes have shown that with future improvements, the hemispherical concentration system can replace the *Scheffler* system with benefits such as the elimination of motorized tracks of the sun from East to West and improvement of the tracking of declination by a simple rotation of the receiver.

This work also postulates the possibility of replacing the parabolic trough concentrating systems by hemispheric systems as this would secure facilities against bad weather, by shifting the sun-track of the declination by a rotation of the receiver rather than a rotation of the whole system.

Keywords Hemispheric concentrator, Scheffler, Fixed Mirror Distributed Focus - FMDF, Solar bowl.

Table des matières

DÉDICACE	ii
REMERCIEMENTS.	iii
RÉSUMÉ.	vi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.	1
Chap. 1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I POSITIONNEMENT DES COLLECTEURS.	7
I.1 Position du soleil	7
I.2 Orientation des collecteurs par rapport au soleil	10
II ÉTAT DE L'ART SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE	16
II.1 Définition du concentrateur solaire.	18
II.2 Les concentrateurs à section parabolique.	23
II.2.1 Le concentrateur parabolöide	24
II.2.2 Le concentrateur cylindro-parabolique	25
II.3 Les concentrateurs à section circulaire.	25
II.3.1 Le concentrateur hémisphérique.	26
II.3.2 Le concentrateur cylindrique à section circulaire.	26
II.4 Le concentrateur à section conique.	27
II.5 Le concentrateur à image diffuse.	28
II.5.1 Les concentrateurs paraboliques composés	29
II.5.2 Les concentrateurs hyperboloïdes elliptiques	30
II.6 Les nouvelles pistes.	31
II.6.1 Les concentrateurs à bandes de section parabolique.	31
II.6.2 Les autres concentrateurs	32
III ÉTAT ACTUEL DE DÉVELOPPEMENT DU FOUR SOLAIRE À PAIN	36
III.1 Les moyens de cuisson solaire artisanaux	36
III.2 Les moyens de cuisson solaire semi-industriels	37
III.3 Les moyens de cuisson solaire industriels	38
IV CHOIX DU DISPOSITIF D'ÉTUDE	41
IV.1 Limites des dispositifs actuels de four solaire à pain	41
IV.2 Justification du choix d'un concentrateur hémisphérique	41
Chap. 2 THÉORIES DES CONCENTRATEURS	48
I BASE MATHÉMATIQUE DE LA THÉORIE	49
II BASE PHYSIQUE DE LA THÉORIE	53
II.1 Les systèmes réflectifs	53
II.2 Les systèmes dioptriques	54
III FORMATION DE L'IMAGE AU NIVEAU DU FOYER	56
IV DÉFINITIONS DU COEFFICIENT DE CONCENTRATION	59

V	RECEVEURS ET TRANSFERTS DE CHALEUR	63
V.1	Positionnement des receveurs	63
V.2	les formes de receveurs à surface cavité	64
V.3	Transfert de chaleur - Équations de base	65
Chap. 3	CONCEPTION ET RÉALISATION DU DISPOSITIF	69
I	ÉTUDE DU CONCENTRATEUR HÉMISPHERIQUE	70
I.1	Avec receveur à surface externe	71
I.2	Comparaison des concentrateurs parabolique et sphérique	78
I.3	Avec receveur à surface cavité.	80
I.3.1	<i>Caustique du concentrateur hémisphérique :</i>	80
I.3.2	<i>Plan et disque de moindre diffusion :</i>	81
I.3.3	<i>Aberrations et concentrateur hémisphérique :</i>	89
I.4	Étude du receveur et du transfert de chaleur	92
I.4.1	<i>Choix et disposition du receveur :</i>	92
I.4.2	<i>Transfert de chaleur au niveau du receveur</i>	93
II	COMPARAISON DES SYSTÈMES PARABOLIQUE ET SPHÉRIQUE	96
III	CONCEPTION DU DISPOSITIF	99
III.1	Schémas du montage	99
III.2	Réalisation des prototypes de l'étude	100
III.2.1	<i>Prototype N°1- Hémisphère métallique à carreaux</i> . . .	100
III.2.2	<i>Prototype N°2- Hémisphère en béton à paroi lisse</i> . . .	106
Chap. 4	ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET ANALYSE DE PERFOR-	
	MANCE	110
I	PROTOTYPE N°1	111
I.1	Matériels et méthodes	111
I.2	Résultats et discussion	113
II	PROTOTYPE N°2	117
II.1	Matériels et méthodes	117
II.2	Résultats et discussions : Relevés du 06 juin 2016	118
III	IMPLICATIONS DÉGAGÉES DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE . .	121
	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.	125
	BIBLIOGRAPHIE	128
A	ANNEXES	I
Annexe.1	SPECTRE SOLAIRE / SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE	I
Annexe.2	BILAN RADIATIF DE LA TERRE	II
Annexe.3	ROBOTIQUE ET SYSTÈMES DE TRAQUE DU SOLEIL	V
Annexe.4	RECETTE DE CUISSON DU PAIN	X
Annexe.5	RÉFLECTEUR SCHEFFLER	XI
Annexe.6	CONCENTRATION GÉOMÉTRIQUE D'UN HÉMISPHERE	XV
Annexe.7	CAUSTIQUE D'UN MIROIR CIRCULAIRE	XXI
B	PUBLICATION	XXVII
	INDEX.	XXXVIII

Table des figures

1.1	Le spectre électromagnétique	4
1.2	Rayonnement électromagnétique solaire	5
1.3	Schéma cinématique : Trajectoire du soleil	7
1.4	Mouvement du soleil	8
1.5	Orientation des collecteurs	10
1.6	Configurations Altazimutale et Équatoriale	12
1.7	Configurations quasi fixe et fixe à l'année	14
1.8	Capteur solaire photovoltaïque	16
1.9	Collecteur à effet de serre	17
1.10	Concentrateur solaire	17
1.11	Concentrateur réflectif (Miroir) ou dioptrique (Lentille)	19
1.12	Position du point focal par rapport à la parabole	20
1.13	Différentes formes de concentrateurs solaires	21
1.14	Perte de focalisation à 20 °	23
1.15	Concentrateur paraboloides	24
1.16	Concentrateur cylindro-parabolique	25
1.17	Concentrateur circulaire - receveur déplacé	26
1.18	Concentrateurs sphérique et cylindrique	27
1.19	Section conique et Concentrateur conique	28
1.20	Concentrateur CPC	29
1.21	Section du CPC	29
1.22	Concentrateurs paraboliques composés (CPC) : positionnements	30
1.23	EHC - Principe	30
1.24	EHC - Image	30
1.25	Concentrateur RAC	31
1.26	Coupe des bandes	31
1.27	Collecteur solaire à miroir fixe (FMSC)	33
1.28	Collecteur à cible oscillante	34
1.29	Centrale solaire à miroir de Fresnel (SLATS)	35
1.30	Fournaise solaire	35
1.31	Four artisanal	37
1.32	Four à pain mobile	38
1.33	Dispositifs Scheffler simple et en vis-à-vis	39
1.34	Coefficient de concentration optique (C_o) d'un hémisphère	42
1.35	Délimitation de la zone de concentration pour $\phi_s=30^\circ$	43
1.36	Rayons solaires dans la direction est-ouest	44
1.37	Concentrateur circulaire 3D	44
1.38	Rayons solaires dans la direction nord-sud	44
2.1	Concentration géométrique	49
2.2	Réflexion - réfraction d'un rayon lumineux	53
2.3	Effet miroir parfait	54

2.4	Parabole et réflexion	54
2.5	Lentille convexe	55
2.6	Dimension de l'image	56
2.7	Image de Gauss	61
2.8	Receveur à surface cavité	63
2.9	Receveur à surface externe	63
2.10	Formes de receveurs à surface cavité	64
2.11	Bilan énergétique	65
3.1	Concentrateur hémisphérique	70
3.2	Receveur à surface externe	70
3.3	Receveur à surface cavité	70
3.4	Caractéristiques optiques	71
3.5	Receveur conique	73
3.6	Coefficient de concentration géométrique (C_g) le long de l'axe y	75
3.7	Coefficient de concentration géométrique (C_g) simplifié et fonction de ϕ	76
3.8	Coefficient de concentration géométrique (C_g) simplifié et fonction de y	77
3.9	Coefficient de concentration géométrique moyen $C_{g_{moy}}$:	79
3.10	Stigmatisme	80
3.11	Caustique de la sphère	81
3.12	Plan (P) de moindre diffusion	81
3.13	Évolution de la position du plan (P) de moindre diffusion	84
3.14	Évolution du rayon interne du receveur	85
3.15	Tracé du coefficient de concentration géométrique moyen	85
3.16	Prise en compte de R_a	87
3.17	Zoom sur R_a	87
3.18	Tracés des rayons $\frac{R_a}{r_s}(\phi_s)$ et $\frac{r_a}{r_s}(\phi_s)$	88
3.19	Tracé du coefficient de concentration géométrique moyen	89
3.20	Évolution de la position du plan (P) de moindre diffusion $Y_{(P)}$	90
3.21	Comparaison du rayon r_a du receveur cavité	91
3.22	Receveur cavité (N-S)	92
3.23	Zoom du receveur (N-S)	92
3.24	Receveur à midi (Est-Ouest)	93
3.25	Zoom (Est-Ouest)	93
3.26	Receveur thermique	94
3.27	Receveur thermique-Zoom	94
3.28	Coefficients de concentration hémisphérique et parabolique	97
3.29	Photo d'un concentrateur hémisphérique à utilisation mixte	98
3.30	Montage Complet du dispositif	99
3.31	Dimensions du 1 ^{er} prototype	100
3.32	Classement des miroirs	100
3.33	Tracé du coefficient de concentration géométrique réel en fonction de ϕ	101
3.34	Tracé du coefficient de concentration géométrique réel en fonction de y :	102
3.35	Receveur du 1 ^{er} prototype	103
3.36	Receveur - vue de profil	103
3.37	Tracé du coefficient de concentration géométrique réel moyen :	104
3.38	Tracé du coefficient de concentration géométrique réel moyen réel	105
3.39	Dimensions du 2 ^d prototype	106
3.40	Hémisphère-Béton	106
3.41	Receveur du second prototype	107

4.1	Photo du prototype : receveur positionné sur le concentrateur sphérique	111
4.2	Dispositif complet N°1 de l'étude	112
4.3	Enregistreur GL200A	113
4.4	Solarimètre SL100	113
4.5	Relevés de températures du 07/11/2014	114
4.6	Relevés de l'ensoleillement du 07/11/2014	114
4.7	Relevés de températures du 15/12/2014	116
4.8	Relevés de l'ensoleillement du 15/12/2014	116
4.9	Dispositif complet N2 de l'étude	117
4.10	Enregistreur GL200A	118
4.11	Pyranomètre SR03	118
4.12	Relevés de températures du 06/06/2016	119
4.13	Relevés de l'ensoleillement du 06/06/2016	120
4.14	Système hémisphérique	121
4.15	Système <i>Scheffler</i>	121
4.16	Système à chauffage par points	122
4.17	Système à chauffage continu	122
4.18	Système hémisphérique	123
4.19	Système parabolique	123
A.1	Spectre solaire par rapport au spectre électromagnétique	I
A.2	Constante solaire et orbite	II
A.3	Bilan radiatif	IV
A.4	Cinoptique du robot	V
A.5	Rotation suivant X	VII
A.6	Rotation suivant Y	VII
A.7	Rotation suivant Z	VII
A.8	Robot altazimutal	IX
A.9	Robot équatorial	IX
A.10	Robot quasi-fixe	IX
A.11	Parabole de Scheffler	XI
A.12	Scheffler : réglage	XII
A.13	Tracé du nombre de réflexion $n(\phi)$	XV
A.14	Évolution de la fonction de position $\frac{Y(\phi, n)}{r_s}$	XVI
A.15	Évolution du rayon du receveur $\frac{R_a(\phi, n)}{r_s}$	XVII
A.16	Surfaces élémentaires	XVII
A.17	Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(\phi_i, n)$	XVIII
A.18	Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(y, n)$	XIX
A.19	Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(\phi)$	XIX
A.20	Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(y)$	XIX
A.21	Caustique d'un miroir circulaire	XXI
A.22	Tracé de la caustique à $\phi_s = 30^\circ$	XXIII
A.23	Evolution de $\psi_0(\phi_s)$	XXIV

Liste des tableaux

1.1	Évolution de la température de stagnation en fonction de C_g	22
2.1	Coefficient de concentration géométrique selon le concentrateur	52
2.2	Coefficient de concentration géométrique moyen selon le concentrateur	62
3.1	Position du plan (P), rayon r_a du disque-receveur, et $C_{g_{moy}(Cir_3D)}$	83
3.2	$\frac{R_a}{r_s}$ du disque-receveur, et $C_{g_{moy}^*(Cir_3D)}$	87
3.3	Comparaison des Coefficients de concentration géométriques	96
3.4	Prototype N°1 : Caractéristiques du concentrateur hémisphérique	103
3.5	Prototype N°1 : Caractéristiques du receveur	106
3.6	Prototype N°2 : Caractéristiques du concentrateur hémisphérique	107
3.7	Prototype N°2 : Caractéristiques du receveur	108
A.1	Matrices de transformation homogène 4x4	VIII
A.2	Évolution de l'angle ψ_0 par rapport à ϕ_s	XXV
A.3	Évolution de $\frac{Y_{(P)}}{r_s}$ par rapport à ϕ_s	XXVI

Nomenclature

ABRÉVIATIONS

<i>CPC</i>	<i>Compound Parabolic Concentrator</i> , Concentrateur en paraboles tronquées	
<i>EHC</i>	<i>Elliptical Hyperboloid Concentrator</i> , Concentrateur Hyperboloïde Elliptique	..
<i>FMDF</i>	<i>Fixed Mirror Distributed Focus</i> , Bol solaire	
<i>FMSC</i>	<i>Fixed Mirror Solar Collecteur</i> , Collecteur solaire à miroir fixe	
<i>HAARP</i>	<i>High Frequency Active Auroral Research Program</i> , Energie hertsienne	
<i>HCS</i>	<i>Heure de Coucher du Soleil de la localité</i>	(h)
<i>HLS</i>	<i>Heure de Lever du Soleil de la localité</i>	(h)
<i>RAC</i>	<i>Ring Array Concentrator</i> , Concentrateur circulaire à bandes paraboliques	
<i>SLATS</i>	<i>Solar Linear Array Thermal System</i> , Centrale solaire à miroir de Fresnel	...

SYMBOLES GRECQUES

α_{abs}	Facteur d'absorption solaire	
β	Angle d'incidence du rayon solaire / normale du collecteur	(°)
Δ	Demi-angle de dispersion du rayon solaire	(°)
δ	Angle de déclinaison solaire	(°)
δ_i	Demi-angle d'incidence du rayon solaire d'un concentrateur conique	(°)
Δ_l	Valeur de dispersion due aux défauts de surface du concentrateur	(m)
δ_s	Demi-angle de sommet d'un cone	(°)
η	Rendement d'un système	
γ	Angle d'orientation du collecteur suivant l'azimut	(°)
λ	Conductivité thermique du milieu	($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
μ_l	Aberration longitudinale d'un hémisphère	(m)
μ_t	Aberration transversale d'un hémisphère	(m)
ν	Fréquence d'une onde électromagnétique	(Htz)
ω	Angle horaire	(°)
ω_s	Angle de coucher du soleil	(°)
Φ	Angle de latitude de la localité choisie pour installer le collecteur	(°)

ϕ	Angle variable de 0 à ϕ_s ou ϕ_r (°)
ϕ_r	Demi-angle décrivant la largeur d'exposition par rapport au foyer (°)
ϕ_s	Demi-angle par rapport au centre de la sphère (°)
ψ	Demi-angle de Néphroïde (°)
ψ_0	Racine de Néphroïde (°)
ρ_i	facteur énergétique (i=e) ou optique (i=o)
σ	Constante de Stephan - Boltzmann ($W.m^{-2}.K^{-4}$)
θ_a	Demi-angle d'acceptation du rayon solaire d'un CPC (°)
θ_s	Demi-angle de sommet traduisant le rayon apparent du soleil (°)
ε	Angle d'orientation du collecteur suivant l'angle horaire (°)
φ	Angle de latitude (°)
φ_i	Flux de chaleur selon mode et type i (W)
ξ_i	Facteur d'émission de la surface

SYMBOLES ROMAINS

a	Angle d'azimut (°)
A_c	Aire ou surface d'exposition d'un concentrateur (m^2)
A_r	Aire ou surface de réception au niveau du receveur (m^2)
C_g	Coefficient de concentration géométrique d'un concentrateur
C_o	Coefficient de concentration optique d'un concentrateur
$C_{g(Cir_3D)}$	Cg d'un concentrateur hémisphérique
$C_{g(CPC_3D)}$	Cg d'un concentrateur parabolique Composé 3D
$C_{g(Par_3D)}$	Cg d'un concentrateur paraboloïde
$C_{g_{moy}(Par_2D)}$	Cg moyen d'un concentrateur cylindro-parabolique
C_{id}	Coefficient de concentration idéal d'un concentrateur
$D_{(c)}$	Diamètre optimum d'un receveur circulaire à placer au foyer (m)
$D_{ap(sol)}$	Diamètre apparent du soleil formé au foyer du concentrateur (m)
E	Énergie d'un photon (J)
$E_{A_r \rightarrow S}$	Coefficient de conduction ($W.m^{-2}$)
f	Distance focale d'une parabole ou d'une lentille (m)
Gr	Nombre de Grashof en transfert thermique
H	Hauteur de l'hémisphère tronqué (m)
h	Angle de hauteur (°)
h_a	Profondeur de receveur (m)
h_p	Constante de Planck (J.s) ou ($feV.Hz^{-1}$)

h_{Cv}	Coefficient de transfert de la chaleur par convection	$(W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1})$
i	Angle d'orientation du collecteur par rapport à l'horizontale	$(^{\circ})$
k	Constante de Boltzmann	$(J.K)$
L	Largeur d'exposition d'un concentrateur parabolique	(m)
$L_{(p)}$	Largeur optimale d'un receveur plan à placer au foyer	(m)
$L_{(sc)}$	Longueur d'arc optimale d'un receveur semi-circulaire à placer au foyer ...	(m)
$\bar{M}_i^0$	Matrice homogène 4X4 des rotation et translation	
N	Nombre d'heure d'ensoleillement	
$n(\phi)$	Nombre de réflexions sur l'hémisphère	
n_i	Indice de transparence du milieu i	
Pr	Nombre de Prandtl en transfert thermique	
Q_i	Angles d'incidence, de réflexion et de réfraction	$(^{\circ})$
Q_s	Quantité totale de radiation émise par le soleil	(W)
$Q_{A_r \rightarrow S}$	Quantité de radiations au niveau du receveur	(m^2)
$Q_{S \rightarrow A_c}$	Fraction des radiations solaires arrivant sur le concentrateur	(W)
R	Distance soleil - terre	(m)
r	Rayon apparent du soleil depuis la terre	(m)
r_a ou R_a	Rayon du receveur	(m)
r_r	Rayon maximum d'un concentrateur parabolique	(m)
r_s	Rayon du concentrateur hémisphérique	(m)
Ra	Nombre de Rayleigh en transfert thermique	
Re	Nombre de Reynolds en transfert thermique	
$[Rot(\vec{x}_i = \vec{x}_{i+1}), \beta]$	Matrice homogène 4X4 de rotation sur x_i et d'angle β	
$\bar{Rot}_i^0$	Matrice 3X3 des rotations	
S_{exp}	Surface d'exposition brute du concentrateur	(m^2)
S_{ut}	Surface utile de concentration atteignant le receveur	(m^2)
T	Période d'une onde électromagnétique	(s)
T_s	Température du soleil	(K)
$[Tr\vec{x}_i, L_j]$	Matrice homogène 4X4 de translation suivant x_i et de longueur L_j	
$\vec{Tr}_i^0$	Vecteur translation	
v_i	Vitesse de la lumière dans le matériau i	$(m.s^{-1})$
$Y(\phi, n)$	Réflexions sur l'axe receveur d'un hémisphère	(m)

INTRODUCTION GÉNÉRALE.

Les pays africains sont en crise énergétique. En effet, avec leur démographie en forte croissance et les ruraux en exode vers les grandes villes, ces pays ont été surpris par une demande explosive en énergie électrique. Leur développement industriel est ainsi rendu impossible sans une solution adéquate, le coût du kilowattheure y étant très peu compétitif par rapport aux pays du nord et d'Asie déjà fortement industrialisés. Des efforts sont engagés pour explorer tous les voies et moyens afin de palier à ce sérieux handicap.

Quand à ces pays industriels du nord et d'Asie, ils viennent de connaître une sérieuse déconvenue avec l'énergie nucléaire sur laquelle ils avaient fortement mise. Avec les accidents successifs de *Three Mile Island* le 28 mars 1979 aux États-Unis, de *Tchernobyl* le 26 avril 1986 en Ukraine et de *Fukushima* le 11 mars 2011 au Japon, les risques socio-sanitaires causés aux populations, les conséquences liées aux abandons de territoires pendant des périodes considérables, et toujours le manque de solution quand aux traitements des déchets radioactifs produits, sont en train de décourager l'utilisation de cette énergie, pourtant à la base de la puissance économique et militaire de ces nations.

Les hydrocarbures sur lesquels les espoirs du développement reposent désormais ne sont pas en reste ; les rejets de gaz à effet de serre constituant une menace sur le climat planétaire, ainsi que l'instabilité des nations productrices de ce précieux carburant rappellent le besoin d'une alternative plus sûre pour garantir la demande d'énergie au niveau mondial.

Cette crise énergétique est renforcée par une prise de conscience de la nécessité

d'utiliser des énergies propres ayant des conséquences écologiques minimales sur l'environnement. Tout cela pour dire qu'il y a de plus en plus un consensus, et donc une volonté commune au niveau international pour appuyer le développement de nouvelles énergies, y compris le solaire.

Dans le cas du solaire, si l'on imagine la construction d'une centrale thermique faisant tourner des systèmes de turbine à vapeur classiquement utilisés avec des composants parfaitement sûrs et éprouvés dans une zone très ensoleillée comme le Maroc, cette centrale sera amortie au niveau énergétique en 5 mois, c'est-à-dire qu'elle aura produit plus d'énergie qu'en ont nécessité sa construction et son démarrage (BMU-Archive, 2015). Ceci est comparable à l'éolien (4 à 7 mois), mais bien plus rapide que les modules photovoltaïques en silicium qui nécessitent actuellement encore 3 à 5 ans pour rembourser leur dette énergétique, mais qui nécessiteront moins de frais et de travail pour leur entretien et fonctionnement. Le solaire est donc une source d'énergie qui a incontestablement un fort potentiel de développement dans plusieurs pays sahéliens comme le Burkina Faso de par leurs latitudes correspondant à celles des zones fortement ensoleillées, et avec un impact a priori modéré sur l'environnement.

Ce document de thèse cherchera à apporter des réponses aux problèmes rencontrés par l'installation solaire de l'établissement scolaire Gabriel TABORIN à Saaba-Ouagadougou. Cette installation solaire produisait 1 000 baguettes de pain par jour.

Ce document portera en un premier lieu (Chapitre 1) sur l'étude Bibliographique, c'est-à-dire l'état de l'art dans l'énergie et la cuisson solaire. Puis l'on fera une étude théorique des concentrateurs tout en expliquant comment l'image optique du soleil est produite en fonction de chaque système de concentration (Chapitre 2). En un troisième lieu (Chapitre 3), un prototype sera conçu et réalisé. En quatrième lieu (Chapitre 4), ce document fera enfin une étude expérimentale sur la solution proposée et montrera ses avantages et ses inconvénients, tout en proposant des pistes pour les améliorations futures.

Chapitre 1

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION.

Par rapport aux avancées technologiques du moment, les trois principales formes d'énergies tirées du solaire sont le thermique, le photovoltaïque et dans une moindre mesure, celle provenant des ondes radios.

Cela est dû à la nature du rayonnement solaire par rapport au spectre électromagnétique décrit par la figure 1.1 page suivante.

Le spectre électromagnétique est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différents constituants en termes de fréquence ou de période, d'énergie des photons ou encore de longueur d'onde associée. Les quatre grandeurs : fréquence ν , période T , énergie E et longueur d'onde λ sont liées deux à deux par la constante de Planck : $h_p \approx 6,626\,069\,10^{-34}\text{ J.s}$ ou $h_p \approx 4,135\,67\text{ feV.Hz}^{-1}$ et la vitesse de la lumière : $c = 299\,792\,458\text{ m.s}^{-1}$, selon les équations suivantes (Taillet et al., 2013) :

$$E = h_p \nu = \frac{h_p}{T} \quad (1.1)$$

pour l'énergie transportée par le photon,

$$c = \lambda \nu = \frac{\lambda}{T} \quad (1.2)$$

pour le déplacement dans le vide du photon.

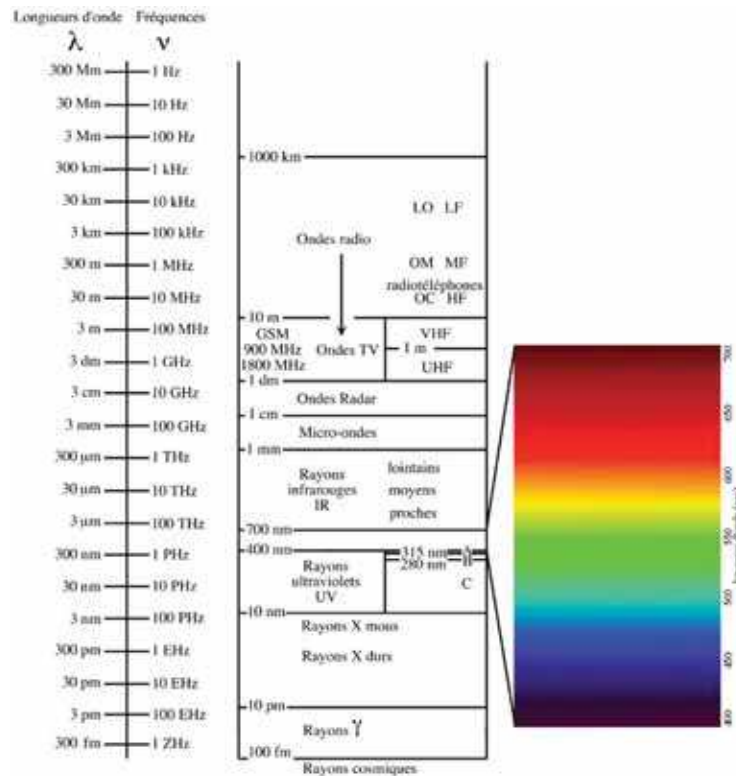


FIG : 1.1 – Le spectre électromagnétique

On y voit les différentes bandes définies selon des phénomènes physiques spécifiques et qui sont fonctions des fréquences ou des longueurs d'ondes associées¹.

On découpe habituellement le spectre électromagnétique en divers domaines selon les longueurs d'onde et le type de phénomène physique émettant ce type d'onde :

- **Ondes radio** : Oscillations d'électrons au sein d'un circuit électrique comme une antenne.
- **Micro-ondes** : Oscillations d'électrons au sein de composants électriques spécifiques comme une diode par exemple.
- **Infrarouge** : Oscillations de particules, transitions d'électrons de valence au sein d'atomes ou de molécules.
- **Visible (ou lumineux)** : Transitions d'électrons de valence de haute énergie qui ont la particularité d'être détectées par l'œil humain.

1. Source : <https://casocouleurb3.wordpress.com/tag/spectre-de-la-lumiere/>

- **Ultraviolet** : Transitions d'électrons de valence de plus haute énergie encore, et donc non observables par l'œil humain.
- **Rayons X** : Transitions d'électrons au sein d'un atome ou accélération d'électrons libres de haute énergie.
- **Rayons gamma** : Décomposition radioactive d'un noyau instable, de façon spontanée ou sous l'effet d'une accélération au sein d'un accélérateur de particules.

La gamme de fréquence émise par le soleil par rapport au spectre électromagnétique est représentée par la figure A.1 page I en Annexe.1. La longueur d'onde couverte par le rayonnement électromagnétique solaire part de 280 à 3 000 nanomètres (Figure 1.2).

Un agrandissement de cette tranche électromagnétique en abscisse et de l'énergie du Rayonnement en ordonnées permet de confirmer que le soleil qui est considéré par les astronomes comme un corps noir, émet essentiellement dans les gammes du rayonnement visible 42,5 %, de l'infrarouge 51,2 % et de l'ultraviolet 6,3 % environ.

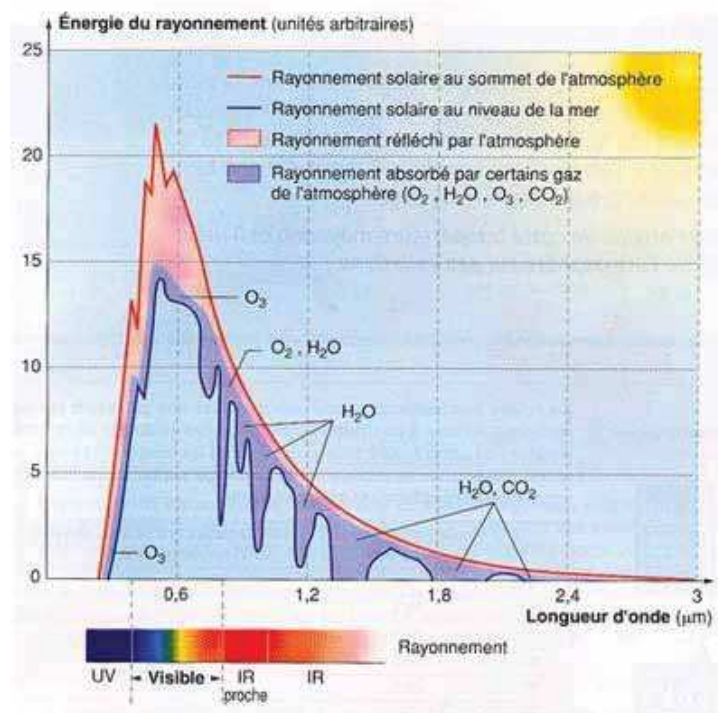


FIG : 1.2 – Rayonnement électromagnétique solaire

La bande électromagnétique couverte par le rayonnement solaire va de 280 à 3 000 μm. Certains rayonnements sont soit réfléchis, soit absorbés par l'atmosphère².

2. Source : http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/nte/geosciences/geodyn_ext/Exercices/ExosTT1Atmosphere.htm

Le flux solaire incident est fonction de la luminosité solaire et inversement proportionnel au carré de la distance au soleil. La Constante solaire correspond au flux solaire ramené à la distance Terre-Soleil. Sa moyenne annuelle est de $1\,368\text{ W.m}^{-2}$.

La valeur de 342 W.m^{-2} est la valeur moyenne annuelle du flux solaire à la surface du globe (Voir l' Annexe.2 page II) (Beauchamp, 2003). Elle est de $2\,074\text{ kWh.m}^{-2}$ au Burkina Faso alors qu'elle n'est que de 728 kWh.m^{-2} en Allemagne, bref elle est inégalement répartie à la surface de globe, et les pays tels que le Burkina Faso sont assez bien lotis en terme de flux radiatif du soleil.

L'énergie thermique provenant du soleil se trouve dans le rayonnement visible (0,4 à $0,8\text{ }\mu\text{m}$) et infrarouge. Le rayonnement visible représente 46 % de l'émittance totale du soleil.

Dans ce chapitre, le positionnement des récepteurs à concentration va être paramétré par des angles. Des robots de traque vont être identifiés par des configurations. Ensuite, les concentrateurs solaires vont être définis, passés en revue et classifiés en fonction des températures qui peuvent être obtenues. Enfin, les concentrateurs couramment utilisés pour la cuisson du pain vont être présentés, permettant de conclure sur le choix du dispositif qui sera adopté, après justification de ce choix.

I POSITIONNEMENT DES COLLECTEURS.

La plupart des collecteurs fonctionnent avec l'unique condition quelquefois sine qua non d'avoir les rayons incidents du soleil qui leur viennent de façon perpendiculaire à leur surface d'exposition.

De ce fait, l'inclinaison des collecteurs est fonction de la latitude du lieu de l'installation. Cette inclinaison doit être faite de sorte que la direction des rayons venants sur les panneaux soit le plus proche possible de la normale. C'est une condition absolue pour la plupart des concentrateurs, mais cela reste un facteur d'accroissement du rendement pour la totalité des collecteurs, y compris photovoltaïques. L'idéal serait que les collecteurs suivent la course de soleil afin de maintenir cette condition, cependant une inclinaison adéquate peut constituer un meilleur compromis pour certains dans la mesure où les pertes liées à une inclinaison statique optimisée n'excéderont pas 30 %. D'où l'intérêt de l'étude soigneuse que nécessite cette inclinaison.

I.1 Position du soleil

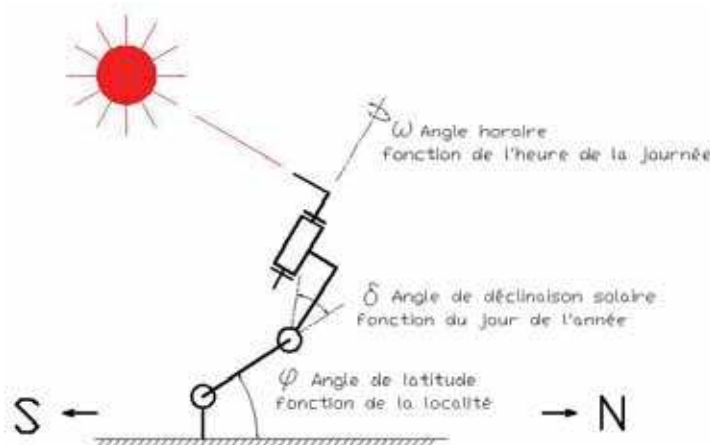


FIG : 1.3 – Schéma cinématique : Trajectoire du soleil

Pour un observateur terrestre, le soleil bouge en fonction des angles φ = angle de latitude de la localité, δ = angle de déclinaison et ω = angle horaire.

La position du soleil est définie directement par les angles caractéristiques suivants : (Figure 1.3).

φ : Angle de latitude : positif au Nord, variant de -90° à $+90^\circ$. Il est fonction de la localité. La latitude de Ouagadougou est de $12,36^\circ$ et nulle à l'équateur.

δ : Angle de déclinaison solaire : positif au Nord et variant entre $-23,45^\circ$ et

23,45 °. Il est extrémal aux solstices d'hiver et d'été (les 21 décembre et 21 juillet) et nul aux équinoxes du printemps et d'automne (les 21 mars et 23 septembre).

ω : **Angle horaire** : correspondant au déplacement angulaire du soleil d'Est en Ouest du méridien de la localité. Il est graduel de 15 ° par heure, négatif le matin et positif l'après midi. Cet angle est nul au Midi Solaire (Midi sans décalage horaire).

La position du soleil est également définie par 2 paramètres conventionnels qui sont **l'angle de hauteur h** (en °) et **l'azimut a** (en °), comme indiqués sur la figure 1.4.

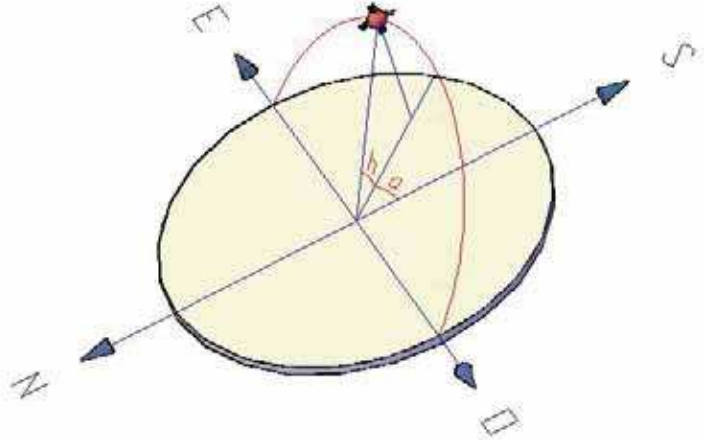


FIG : 1.4 – Mouvement du soleil

Le calcul de l'angle de hauteur du soleil s'effectue à l'aide de l'équation :

Un dispositif de traque du soleil pourrait utiliser les angles a : angle d'azimut et h : angle de hauteur.

$$\sin(h) = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (1.3)$$

Dans cette équation, h peut être $> 90^\circ$, notamment dans les zones équatoriales ou tropicales où généralement $|\varphi| < 23,45^\circ$, valeur maximales de l'angle de déclinaison solaire δ . Cela veut dire que le soleil passe du Sud au Nord ou vice-versa dans cette localité. Par conséquent, la tropicalisation de cette équation donne :

- Pour $\varphi \geq \delta$: $\sin(h) = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(AH)$
- Pour $\varphi < \delta$: $\sin(180 - h) = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos(AH)$ (1.4)

La déclinaison solaire est déterminée pour tout jour quelconque de l'année par l'équation suivante (Duffie and Beckman, 1980)³ :

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (1.5)$$

Avec n correspondant au nombre du jour de l'année, c'est-à-dire $n = 1$ pour le 1^{er} janvier et $n = 32$ pour le 1^{er} février etc.

Une valeur plus précise de la déclinaison solaire est donnée par l'équation suivante (Duffie and Beckman, 1980)⁴ :

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos(B) + 0,070257 \sin(B) \\ & - 0,006758 \cos(2B) + 0,000907 \sin(2B) \\ & - 0,002679 \cos(3B) + 0,00148 \sin(3B) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Avec :

$$B = (n - 1) \frac{360n}{365}$$

Le calcul de l'azimut du soleil s'effectue à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$\sin(a) = \frac{\cos \delta \cos \omega}{\cos(h)} \quad (1.7)$$

Avec les équations (1.4) page précédente et (1.7), il est possible de déterminer de manière précise à toute date et heure de l'année, quelle sera la position du soleil, et ceci en tout point du globe terrestre (Exception faite des régions polaires). On peut également déterminer les heures précises de levée et de couché du soleil et connaître ainsi la durée totale d'insolation (exposition au soleil). Pour cela, on calcul **l'angle de coucher du soleil** ω_s (en °) par l'équation suivante :

$$\cos \omega_s = -\tan \Phi \tan \delta \quad (1.8)$$

3. Équation d'approximation de Cooper - 1969

4. Équation de Spencer - 1971

L'heure de coucher du soleil - HCS est déterminée par l'équation suivante :

$$HCS = 12 + \frac{\omega_s}{15} \quad (1.9)$$

De même, **l'heure de lever du soleil - HLS** est déterminée par l'équation suivante :

$$HLS = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad (1.10)$$

Enfin, on définit le **nombre d'heures d'ensoleillement de la journée N** par :

$$N = 2 \frac{\omega_s}{15} \quad (1.11)$$

Tous ces paramètres ci-dessus identifiés suffisent à définir la position du soleil avec une approximation acceptable sur la période d'utilisation d'un dispositif d'énergie solaire. Pour des calculs plus affinés, des explications plus poussées sur les mouvements de la terre dans le parcours galactique du soleil sont également données (IMCCE, 2015).

I.2 Orientation des collecteurs par rapport au soleil

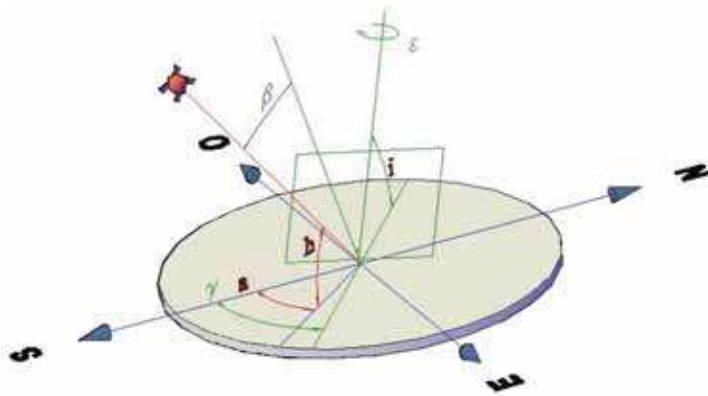


FIG : 1.5 – Orientation des collecteurs

Pour orienter un collecteur qui traque le soleil, il faut en définitif que l'angle β soit nul. l'on va agir donc sur i et γ ou sur i et ε .

L'orientation des collecteurs peut être définie par deux (2) angles i (en $^\circ$) = 0 pour le plan horizontal, et ε (en $^\circ$) = 0 pour le Midi Solaire comme indiqué sur la figure 1.5. Cette méthode d'orientation, appelée *équatoriale* (Ilhem, 2005), a l'avantage principal de permettre une motorisation moins

lourde : l'angle i est réglable une fois tous les deux-trois jours et pourrait donc être actionné manuellement, tandis-que l'angle ε est à vitesse constante. Ainsi le plan orienté des collecteurs peut être défini par le couple $(i; \varepsilon)$.

L'orientation des collecteurs peut être également définie par deux (2) angles i (en $^\circ$) = 0 pour le plan horizontal, et γ (en $^\circ$) = 0 pour un plan orienté au Sud (pour les pays de l'hémisphère Nord et vice versa). Ce sont les angles sur lesquels il faudra jouer pour que les surfaces des collecteurs suivent la course du soleil. Cette méthode d'orientation, appelée *altazimutale* (Ilhem, 2005), nécessite un dispositif intelligent, contrôlant la traque de l'angle de hauteur et de l'angle d'azimut simultanément. Les vitesses de traque sont variables. C'est donc une méthode nécessitant une motorisation plus lourde.

Ainsi, le plan orienté des collecteurs peut être défini par le couple de données $(i; \gamma)$.

L'angle d'incidence β (en $^\circ$) est l'angle formé par le rayon solaire incident et la normale au plan du collecteur. Le calcul de l'angle d'incidence β sur une surface $(i; \gamma)$ d'un collecteur peut être effectué à l'aide de l'équation trigonométrique générale suivante :

$$\cos\beta = |\cos(h)\sin(i)\cos(a - \gamma) + \sin(h)\cos(i)| \quad (1.12)$$

Cet angle permet de déterminer la composante utile du rayonnement solaire direct sur les panneaux solaires photovoltaïques et dans une certaine mesure pour les concentrateurs Compounds. Cependant dans le cas des autres concentrateurs, la production d'une image optique nécessite que les rayons solaires viennent perpendiculairement sur ces concentrateurs, c'est-à dire que l'on cherchera à ce que l'angle d'incidence β soit nul.

Pour la suite, il faudra considérer les quatre (4) configurations suivantes pour le positionnement des collecteurs en général, et des concentrateurs solaires en particulier :

- ★ Configuration $(i; \gamma)$: orientation au fil du soleil (Figure 1.6a page suivante), et traque des angles de hauteur et d'azimut (Configuration Altazimutale). Tous les angles i et γ sont actifs. Il faut donc un dispositif de traque du soleil, motorisé ou

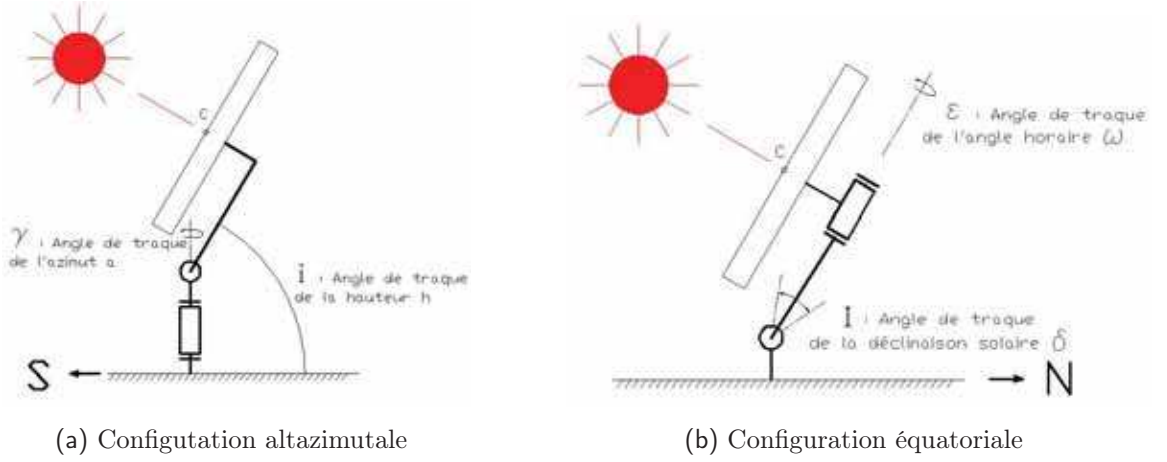


FIG : 1.6 – Configurations Altazimutale et Équatoriale

Dans la configuration Altazimutale, le robot traque les angles de hauteur (h) et d'azimut (a) en agissant sur les angles de réglage i et γ . Dans la configuration Équatoriale, le robot traque les angles de déclinaison (δ) et horaire (ω) en agissant sur les angles de réglage (I) et (ε).

non, qui contrôle le respect des deux angles. Cette configuration est généralement utilisée pour l'orientation des concentrateurs points. Dans cette configuration, l'on cherchera à faire correspondre les couples $(i; \gamma)$ et $(180-h; a)$.

La matrice homogène 4x4 $M_{(Alt)_2}^0$ décrivant le mouvement du plan du collecteur (C, X_2, Y_2, Z_2) par rapport à un référentiel $(0, X_0, Y_0, Z_0)$, et conformément à la figure A.8 page IX en Annexe.3 est :

$$M_{(Alt)_2}^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} \bar{Rot}_2^0 & Tr_2^0 & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$= \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \gamma & -\sin \gamma \cos(i) & \sin \gamma \sin(i) & \sin \gamma [\sin(i)L_1 - \cos(i)L_2] \\ \sin \gamma & \cos \gamma \cos(i) & -\cos \gamma \sin(i) & \cos \gamma [-\sin(i)L_1 + \cos(i)L_2] \\ 0 & \sin(i) & \cos(i) & L_0 + \cos(i)L_1 + \sin(i)L_2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (1.13)$$

Avec :

- $\overline{Rot}_2^0$, la matrice des rotations du repère (C, X_2, Y_2, Z_2) par rapport au référentiel $(0, X_0, Y_0, Z_0)$.

- $\vec{Tr}_2^0$, le vecteur translation du point C par rapport au point 0.

★ Configuration $(I; \varepsilon)$: orientation semi contrôlée (Figure 1.6b page précédente), qui traque des angles de déclinaison et horaire (Configuration équatoriale). Le collecteur est positionné selon l'angle I dans la direction Nord-Sud, alors qu'un autre l'angle ε est actif. Il faut donc un dispositif, motorisé ou non, qui contrôle le respect de l'angle ε évoluant selon l'angle horaire ω . Cette configuration peut fonctionner pour tous les concentrateurs, mais elle est généralement utilisée pour l'orientation des concentrateurs linéaires. L'axe du cylindre serait dans la direction Nord-Sud et incliné selon l'horizontal de l'angle I fixé tous les deux-trois jours. L'axe du cylindre serait l'axe de rotation pour l'angle ε . L'angle I est obtenu par l'équation suivante :

$$I = 180 - h \text{ avec } \omega = 0 \quad (1.14)$$

L'angle I peut donc être compris comme étant l'angle de réglage du concentrateur correspondant à la valeur maximale de l'angle de hauteur h de la journée. En effet, cet angle de hauteur maximale h est obtenu au Midi solaire de la journée ($\omega = 0$). L'on obtient donc le résultat suivant en utilisant l'équation (1.4) page 8 :

$$I = \varphi + \delta \quad (1.15)$$

Dans cette configuration, l'on cherchera à faire correspondre les couples $(i; \varepsilon)$ et $(\varphi + \delta; \omega)$.

La matrice homogène 4x4 $\overline{M}_{(Equ)_2}^0$ décrivant le mouvement du plan du collecteur (C, X_2, Y_2, Z_2) par rapport à un référentiel $(0, X_0, Y_0, Z_0)$, et conformément à la figure A.9 page IX en Annexe.3 est :

$$M_{(Equ)_2}^0 = \left[\begin{array}{c|c} \vec{Rot}_2^0 & \vec{Tr}_2^0 \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right]$$

$$= \left[\begin{array}{ccc|c} \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon & 0 & -\sin \varepsilon L_2 \\ \cos(i) \sin \varepsilon & \cos(i) \cos \varepsilon & -\sin(i) & -\sin(i) L_1 + \cos(i) \cos \varepsilon L_2 \\ \sin(i) \sin \varepsilon & \sin(i) \cos \varepsilon & \cos(i) & \cos(i) L_1 + \sin(i) \cos \varepsilon L_2 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (1.16)$$

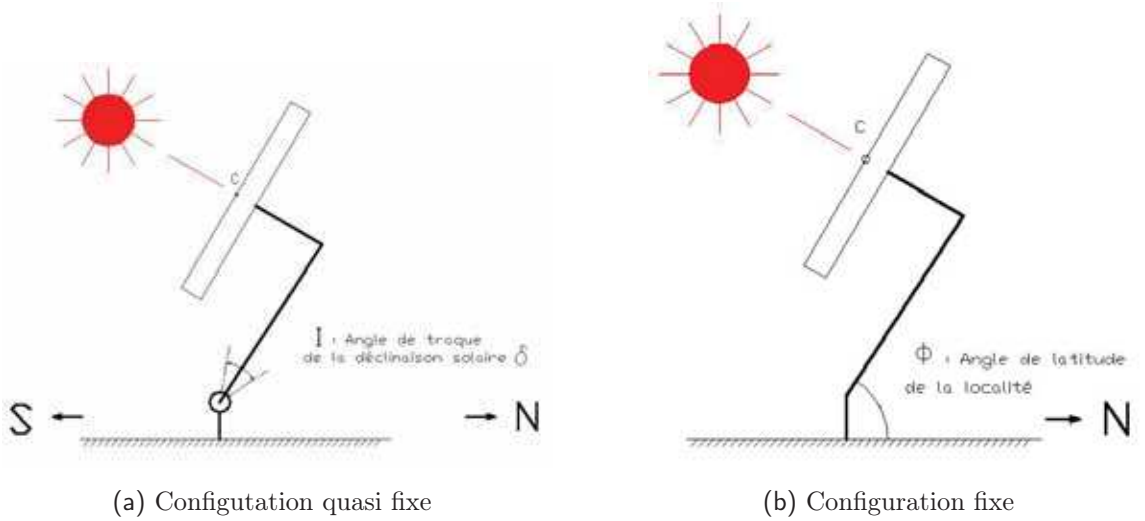


FIG : 1.7 – Configurations quasi fixe et fixe à l'année

Dans la configuration quasi fixe, le robot traque l'angle de déclinaison (δ) en agissant sur l'angle de réglage (I). Dans la configuration fixe, le dispositif ne subit aucun réglage, et est installé suivant l'angle de latitude (Φ) de la localité.

★ Configuration ($I; 0$) : orientation quasi fixe (Figure 1.7a). Le collecteur est positionné selon l'angle I dans la direction Nord-sud, alors que l'angle ε est nul. Un dispositif motorisé n'est pas indispensable, car l'angle I qui doit être modifié tous les deux-trois jours peut être actionné manuellement. Cette configuration est généralement utilisée pour l'orientation des concentrateurs linéaires. L'axe du cylindre serait dans la direction Est-Ouest. Il est souhaitable que l'axe de rotation de l'angle I soit l'axe du cylindre. Dans cette configuration, l'on cherchera à faire correspondre les couples $(i; \varepsilon)$ et $(\varphi + \delta; 0)$.

La matrice homogène 4x4 $M_{(QuF)_1}^0$ décrivant le mouvement du plan du collecteur (C, X_1, Y_1, Z_1) par rapport à un référentiel (0, X_0, Y_0, Z_0), et conformément à la figure A.10 page IX en Annexe.3 est :

$$M_{(QuF)_1}^0 = \left[\begin{array}{c|c} \bar{Rot}_1^0 & \bar{Tr}_1^0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i) & -\sin(i) & -\sin(i)L_0 + \cos(i)L_1 \\ 0 & \sin(i) & \cos(i) & \cos(i)L_0 + \sin(i)L_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (1.17)$$

★ Configuration (Φ ; 0) : orientation fixe à l'année (Figure 1.7b page précédente).

Cette configuration correspondrait à un positionnement des collecteurs selon un angle $i = \Phi = \varphi$ suivant la direction Nord-Sud, φ étant l'angle de latitude de la localité considérée. Une fois la localité d'installation choisie, l'angle de latitude n'est en effet plus variable. De plus, on ne fait pas intervenir l'angle de déclinaison solaire ($\delta = 0$), pas plus que l'angle ε qui est nul. Cette configuration est l'idéal envisagé, car elle exclue tout système de motorisation et même tout réglage après installation des collecteurs. Dans cette configuration, l'on cherchera à faire correspondre les couples (i ; ε) et (φ ; 0). Le point C n'a aucune mobilité par rapport au point 0.

La matrice homogène 4x4 $M_{(F)_1}^0$ décrivant le mouvement du plan du collecteur (C, X_1, Y_1, Z_1) par rapport à un référentiel (0, X_0, Y_0, Z_0) est :

$$M_{(F)_1}^0 = \left[\begin{array}{c|c} \bar{Rot}_1^0 & \bar{Tr}_1^0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (1.18)$$

La modélisation des *robots* de traque solaire est expliquée en Annexe.3 page V.

Des documents d'aide sur la robotique sont également proposés :

(Hocine, 2002-03, Merzouki, 2010-11).

II ÉTAT DE L'ART SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE

Il existe trois principaux modes d'utilisation du rayonnement solaire. Ces modes sont fonctions des fréquences électromagnétiques du rayonnement solaire.

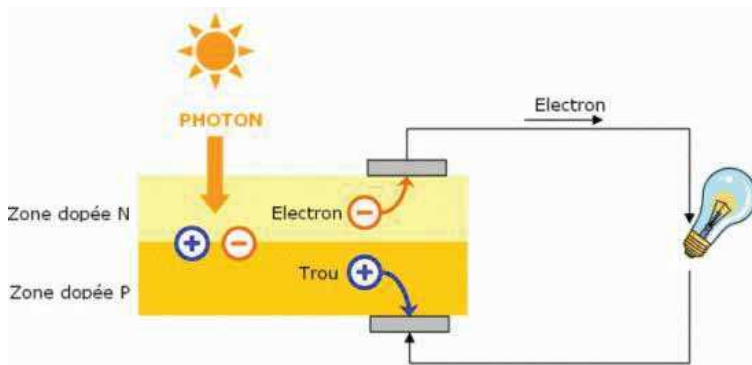


FIG : 1.8 – Capteur solaire photovoltaïque

Ce capteur fonctionne en utilisant le rayonnement visible qui est directement converti en électricité⁵.

1. L'utilisation de l'énergie solaire dans le but de produire une énergie photovoltaïque s'explique dans le cadre d'une transformation directe de la partie lumineuse de cette énergie en une énergie électrique prête à l'emploi. En effet,

l'électricité est le mode de distribution d'énergie par excellence qu'ont adopté les États. Dans ce mode de conversion solaire photovoltaïque, seules les ondes lumineuses sont converties (Figure 1.8) (Zerbo, 2005, Zouma, 2007, Ky, 2007).

De plus, dans le cas de l'utilisation avec concentration sur la photopile, l'on cherchera plutôt, soit à se débarrasser à perte de la chaleur qui fait baisser les rendements de cette photopile, soit à récupérer cette énergie thermique supplémentaire pour un usage domestique (chauffage, chauffe-eau, etc.).

2. L'utilisation de l'énergie solaire dans le but de produire une énergie thermique s'explique dans les cadres suivants :

5. Source : <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/>

a. Par effet de serre : Des collecteurs sont utilisés pour le chauffage domestique des habitats, de l'eau chaude des ménages, le séchage ou l'extraction des huiles essentielles de plantes. Ils fonctionnent à effet de serre piégeant en plus les rayons infrarouges. Cette utilisation ne permet pas d'aller au delà d'une température de 150 °C. Un tel collecteur est décrit par la figure 1.9 (Ouédraogo, 2013).

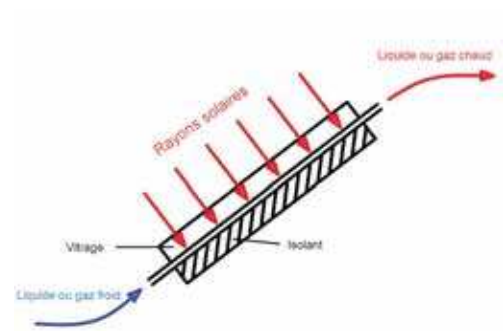


FIG : 1.9 – Collecteur à effet de serre

Ce capteur fonctionne en piégeant le rayonnement infrarouge qui contribue ainsi en plus du rayonnement direct à l'accroissement de la température.

Une utilisation industrielle pour produire de l'énergie électrique par un système de cheminée-tour solaire est de plus en plus courante. De l'air chaud est produit par un collecteur (effet de serre) et introduit dans une cheminée (effet cheminée), utilisant ainsi les deux effets combinés de serre et cheminée pour faire tourner des génératrices (Bonnelle, 2002).

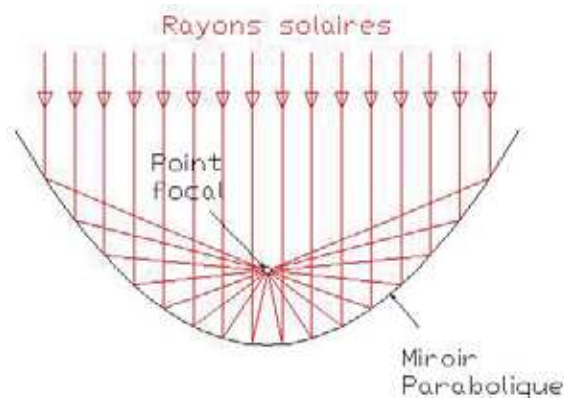


FIG : 1.10 – Concentrateur solaire

Il concentre les rayons parallèles provenant du soleil en un point focal.

b. Par concentration : Des collecteurs sont utilisés pour les cuissons (Fours solaires), pour faire tourner des génératrices en vue de produire de l'électricité (Moteurs Stirling, tours solaires), ou pour tout autre utilisation (pompes à eau, fourneaux de fontes de métaux) y compris la climatisation (compression et détente d'un gaz) (Figure 1.10). Pour cela, il faut des dispositifs permettant une hausse de température plus consé-

quente (au delà de 100 °C et pouvant atteindre 3 000 °C), tels que les concentrateurs.

Le principe général de fonctionnement des collecteurs à concentration est de renvoyer les rayons lumineux parallèles du soleil sur un point focal destiné à en absorber l'énergie thermique. Ce point focal doit alors avoir un fort taux de conductivité thermique. Cette concentration peut être obtenue soit par un dispositif de réflexion tel que le miroir, soit par un dispositif de réfraction tel que la lentille.

On peut utiliser un fluide calo-porteur gazeux ou liquide pour la récupération de l'énergie au niveau du point focal.

3. L'utilisation de l'énergie solaire dans le but de produire une énergie hertzienne [High Frequency Active Auroral Research Program : HAARP] est de plus en plus à l'étude (Manpaey, 1998). Cette production est obtenue par la mise en place de dispositifs récupérant et concentrant les ondes radios (partie infime de l'énergie solaire). Bien-que les ondes radios ne soient pas significatives dans le spectre solaire, du fait que le dispositif de concentration s'étende sur des surfaces très importantes, une concentration peut générer une quantité considérable d'énergie. Cette utilisation n'est qu'à une phase d'étude très primaire, et se positionne pour l'instant plus dans la modification très localisée de phénomènes climatiques que dans la production d'énergie.

Cette étude portera essentiellement sur l'utilisation des concentrateurs solaires dans le domaine thermique à température moyenne, entre 150 ° et 350 °, utilisant donc des concentrateurs. Pour cela, un intérêt particulier sera porté sur toutes les formes d'images optiques produites par les concentrateurs.

II.1 Définition du concentrateur solaire.

Le concentrateur est un dispositif conçu pour rediriger des rayons lumineux vers un objectif (ou foyer). Une lentille de loupe par exemple redirige en un point focal, les rayons lumineux qui la traversent. C'est un concentrateur *dioptrique*.

Le même phénomène est observé lorsque l'on fait réfléchir des rayons lumineux sur

une surface continue parabolique concave (Concentrateur *réflectif*), à la différence que le foyer se trouvera du même côté que la source des rayons lumineux pour la surface parabolique alors que la lentille se retrouvera entre la source et le foyer (Figure 1.11).

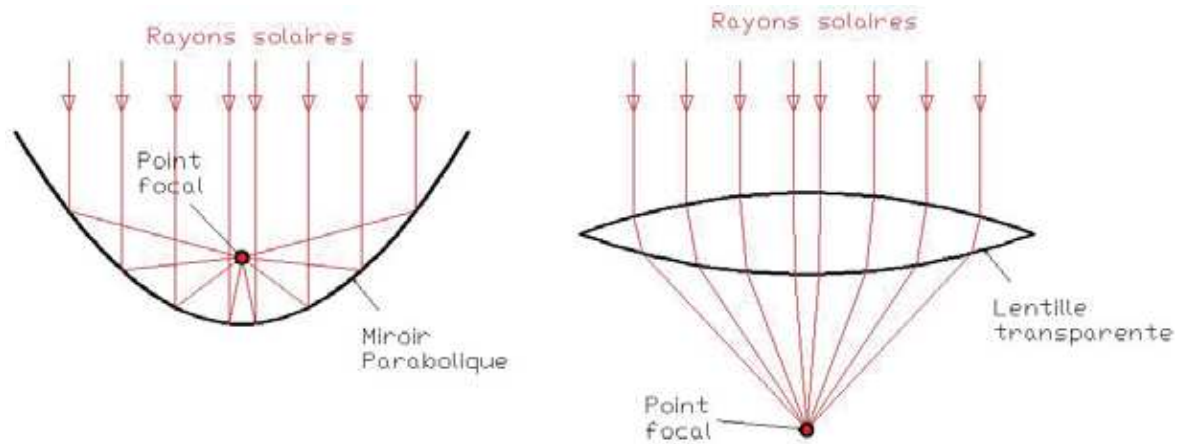


FIG : 1.11 – Concentrateur réflectif (Miroir) ou dioptrique (Lentille)

Les concentrateurs réflectif et dioptrique concentrent par déviation les rayons parallèles provenant du soleil. Cette déviation se fait par réflexion ou par réfraction.

La particularité du rayonnement solaire est le fait que les rayons arrivent sur le concentrateur de façon parallèle. Cette particularité prédéfinit le type de dispositif à concevoir pour refléter ou concentrer ces rayons solaires.

Par la concentration des rayons, l'on peut obtenir au niveau du foyer, des énergies considérables à des températures plus élevées (ou encore des intensités lumineuses plus élevées pour les systèmes photovoltaïques à concentration), et exploitables en fonction des dispositifs en place pour les récupérer (Quoilin, 2007, Pitz-paal, 2006).

L'image optique est le résultat après réflexion des rayons solaires dans le cas de dispositifs à miroirs, ou le résultat après réfraction à travers le dispositif à lentille convergente.

Le concentrateur solaire peut se définir comme étant tout dispositif conçu pour concentrer les rayons solaires sur une cible (foyer) dans le but d'en récupérer les énergies. La concentration a pour objectif principal d'obtenir au niveau du foyer, une tem-

pérature plus élevée que celle obtenue par des collecteurs plans.

On peut avoir le point focal à l'intérieur ou à l'extérieur du bol formé par la parabole (Figure 1.12).

Dès lors que la surface d'exposition est identique sur les deux paraboles, l'énergie tirée de chaque parabole sera

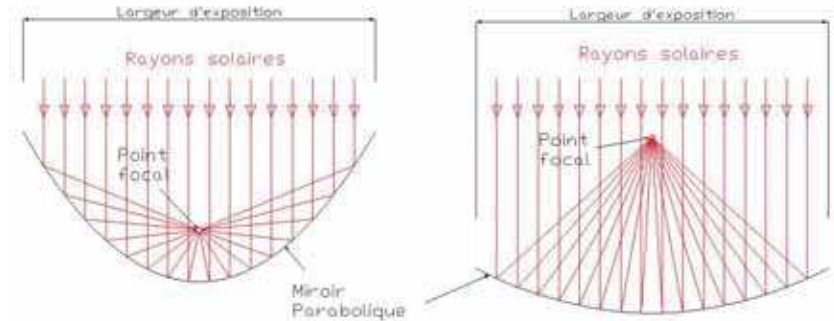


FIG : 1.12 – Position du point focal par rapport à la parabole

Pour une même largeur d'exposition, l'on reçoit la même quantité d'énergie. La différence se situe au niveau du point focal qui se trouve soit à l'intérieur ou à l'extérieur du bol-concentrateur.

identique. Cependant, la surface de matériau utilisé pour fabriquer le miroir parabolique sera différente. Cela peut être un argument de choix quand à la position du point focal.

La *concentration* qui est le rapport entre la section d'ouverture ou surface d'exposition, et la section de réception du receveur au foyer, est également la fonction d'accroissement de la température : Le foyer peut être ponctuel (concentration en un point), linéaire (concentration sur une ligne), ou plan (concentration sur un plan).

Le concentrateur peut-être de forme cylindrique projetant ainsi sur une ligne, ou en forme de disque projetant sur un point. Le concentrateur peut également être en assemblage mosaïques de pièces linéaires ou rectangulaires utilisant le système *Fresnel* comme technique de réflexion. Ces différentes configurations sont expliquées par la figure 1.13 page suivante.

La température de stagnation est la température maximale que l'on peut atteindre par l'effet de concentration. Elle est très intéressante à déterminer surtout lorsque l'on s'intéresse à la cuisson solaire, et est fonction du coefficient de concentration géométrique C_g , qui sera défini ultérieurement. De plus, le choix d'un système

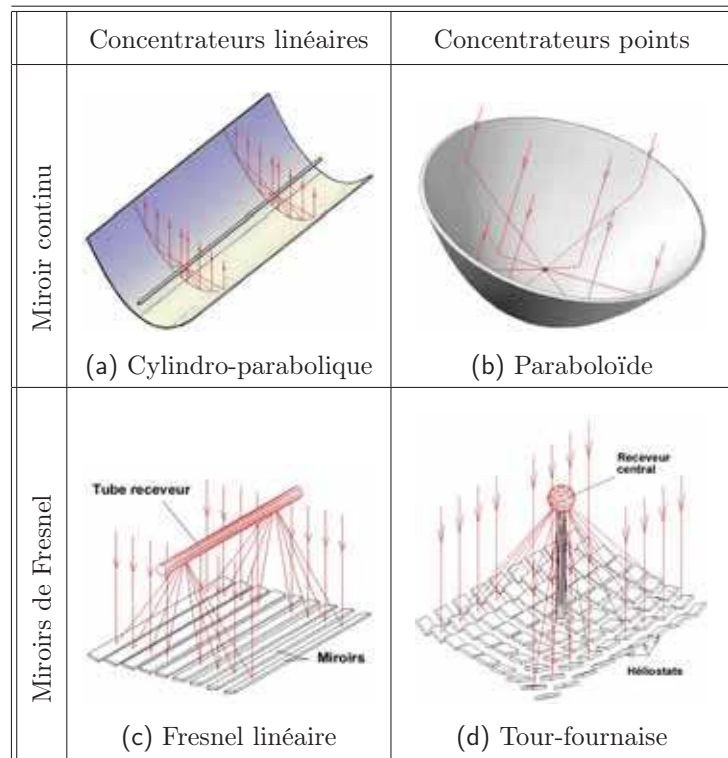


FIG : 1.13 – Différentes formes de concentrateurs solaires

Une classification horizontale peut être faite selon la forme continue ou discontinue (Fresnel) des concentrateurs et une classification verticale, selon le mode de concentration (Ponctuel ou linéaire).

(plan, linéaire ou ponctuel) impose le coefficient de concentration géométrique que l'on peut atteindre, et définit de facto la température de stagnation que l'on espère obtenir au foyer (Veynandt, 2011). Le tableau 1.1 page suivante montre l'évolution de la température de stagnation en fonction du coefficient de concentration géométrique.

Les terminologies suivantes seront adoptées :

- **Le collecteur** désigne le dispositif dans son ensemble.
- **Le concentrateur** sera la surface ou l'équipement optique qui redirige les rayons vers le point focal.
- **Le receveur** ou la cible est l'élément placé au niveau du foyer pour convertir ou absorber les rayons solaires.
- **La surface d'exposition** ou **la section d'ouverture** est la surface présentée

au soleil, définie par sa normale parallèle aux rayons solaires.

TAB : 1.1 – Évolution de la température de stagnation en fonction de C_g

Type de système	C_g	Température de stagnation	
		[°C]	[K]
Plan	1	91	364
Linéaire	10	375	648
	50	696	969
	100	879	1 152
Ponctuel	500	1 450	1 723
	1 000	1 776	2 049
	10 000	3 371	3 644

La température croît avec l'augmentation du coefficient de concentration. On note alors une classification par type de systèmes et les températures que ceux-ci peuvent permettre d'atteindre.

La forme des concentrateurs est fonction des images optiques qu'elles peuvent produire. Par conséquent, en fonction de l'évolution dans le domaine du solaire et de la volonté d'accroître le rendement des collecteurs à concentration, l'on rencontre toute une batterie de formes dont les images optiques produites seront étudiées.

Lorsqu'un rayon lumineux est projeté sur une surface réfléchissante visant à obtenir un effet miroir parfait (réflexion totale du rayon incident), sa trajectoire se trouve modifiée par rapport à la normale, tel que l'angle de réflexion soit égal à l'angle d'incidence. Ce comportement du rayon est la raison des diverses solutions envisagées pour le concentrer.

D'ordre général :

- Un concentrateur à surface continue peut être remplacé par un concentrateur à système de Fresnel (surface discontinue)

- Un concentrateur dioptrique peut être remplacé par un concentrateur réfléchitif.

C'est pourquoi, dans cette étude, seuls les concentrateurs à surface réfléchissante continue seront présentés et une extrapolation sera faite aux autres cas.

II.2 Les concentrateurs à section parabolique.

La parabole concentre en un point des rayons incidents parallèles. Le mécanisme de concentration semble simple, mais à l'application, l'on se rend vite compte que les conditions d'optimisation rendent le système un peu plus compliqué.

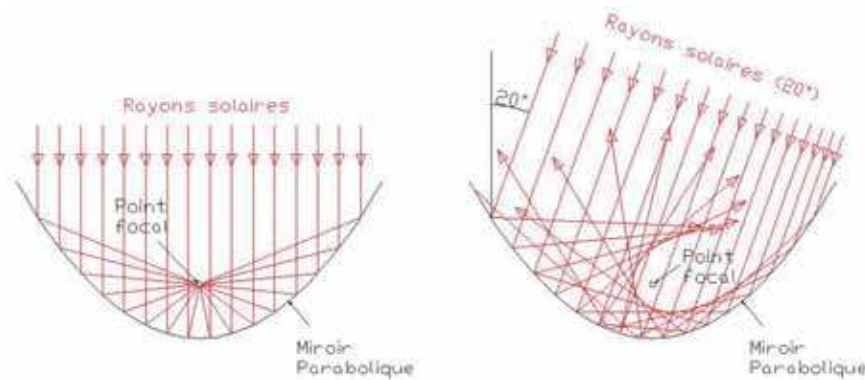


FIG : 1.14 – Perte de focalisation à 20 °

Une parabole qui reste fixe pendant 1 h 20 mn soit une différence entre l'angle horaire et son angle de traque $\omega - \varepsilon = 20^\circ$ perd sa focalisation. Aucun rayon ne passe par le point focal.

En effet, la concentration est optimale si les rayons venant sur le dispositif lui sont perpendiculaires. Dès-que ces rayons adoptent un autre angle, la focalisation est perdue (Figure 1.14).

C'est ce qui explique le fait que, en dehors des conditions de pertes acceptables, le concentrateur à section parabolique ne peut être fixe et la cible mobile ; il faut un dispositif conçu pour traquer le soleil de sorte à obtenir cette perpendicularité aux rayons solaires, en permanence.

II.2.1 Le concentrateur parabololoïde

Le concentrateur parabololoïde [Parabolic dish or Paraboloid] est un dispositif qui concentre en un point [point-focus concentrator] (Figure 1.15).

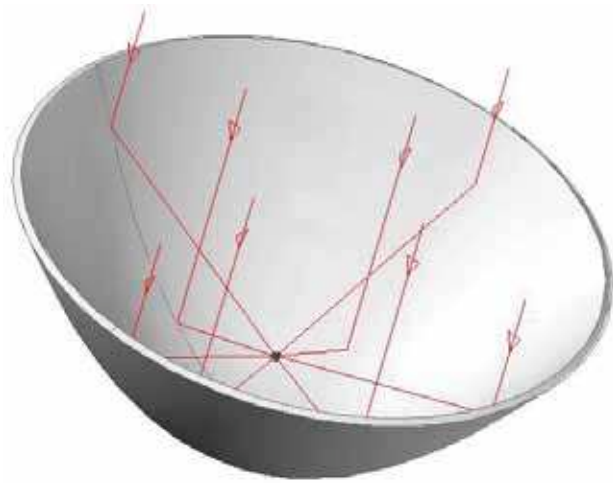


FIG : 1.15 – Concentrateur parabololoïde

Il est par excellence le concentrateur point.

Il offre par conséquent une très forte concentration, car tous les rayons solaires venant sur sa surface concave réfléchive seront reflétés au foyer ponctuel. Cela correspond à une forte concentration d'énergie, et également de chaleur. De cette façon, l'on peut atteindre des températures de l'ordre de 3 000 °C. La principale exigence du concentrateur parabololoïde est le fait qu'il faut lui associer un dispositif de traque du soleil au respect de la configuration $(i; \gamma)$ ou $(I; \varepsilon)$ (Feldheim, 2010).

II.2.2 Le concentrateur cylindro-parabolique

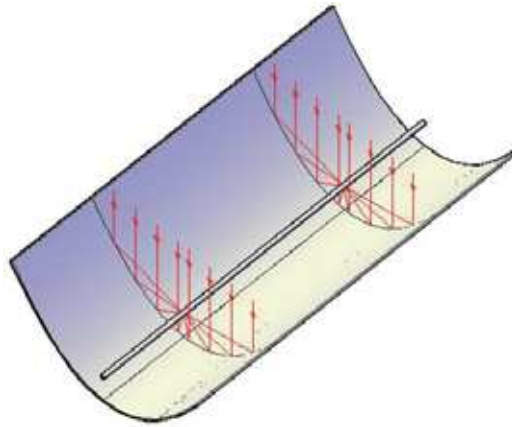


FIG : 1.16 – Concentrateur cylindro-parabolique

Il concentre sur un axe parallèle au cylindre.

Le concentrateur cylindro-parabolique [Parabolic trough] a la forme d'un cylindre de section parabolique (Figure 1.16). Dans cette condition, les rayons qui lui sont projetés seront réfléchis sur une ligne; le receveur sera alors de forme rectiligne [linear-focus concentrator]

Les configurations $(I; \varepsilon)$ et $(I; 0)$ sont celles qui seront adoptées pour orienter les concentrateurs cylindro-paraboliques (Gama et al., 2008, Imadojemu, 1995).

La configuration $(I; \varepsilon)$ nécessite un dispositif de traque du soleil, et est donc légèrement plus couteuse. Elle offre cependant une meilleure optimisation.

La configuration $(I; 0)$ est plus économique, mais elle nécessite que le rayon parabolique soit le plus petit possible pour réduire les pertes, c'est-à dire que l'axe soit le plus proche de la parabole (axe compris dans le bol de la parabole). Une autre solution pour réduire les pertes, est de vérifier le rapport de longueur totale à la longueur qui sort de la zone de concentration.

II.3 Les concentrateurs à section circulaire.

La section circulaire concentre sur l'axe parallèle aux rayons solaires tournant autour de l'axe du cercle dans le plan de section. La longueur de concentration est égale à la moitié du rayon du cercle (Figure 1.17 page suivante). De par la forme géométrique du cercle, une simple orientation de l'axe receveur autour du centre du cercle de façon à ce qu'il soit toujours parallèle aux rayons solaires est suffisante pour que le rendement soit optimum. C'est un atout considérable qui évite à ce que tout le concentrateur soit

orienté (Gandhe et al., 1986a).

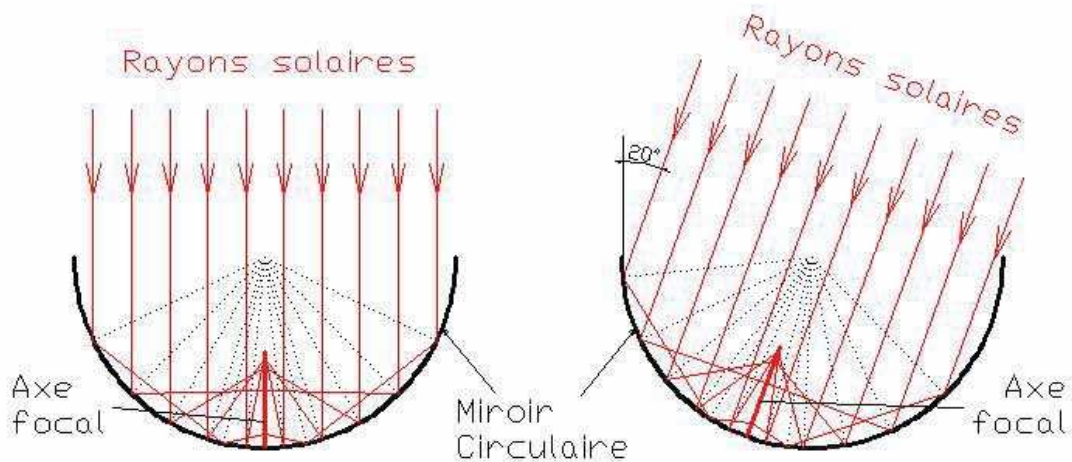


FIG : 1.17 – Concentrateur circulaire - receveur déplacé

Le concentrateur circulaire focalise toujours. Quelque soit l'angle par rapport à la surface d'exposition, il n'y a pas de perte de focalisation.

II.3.1 Le concentrateur hémisphérique.

Le concentrateur hémisphérique, appelé dispositif à concentration répartie à miroir fixe [Fixed Mirror Distributed Focus - FMDF] ou encore communément appelé bol solaire [Solar bowl] concentre les rayons solaires sur l'axe passant par le centre du bol et parallèle aux rayons solaires (Figure 1.18a page suivante). L'axe receveur seul peut être rendu mobile tandis que le concentrateur resterait fixe. Un système de traque du soleil doit être alors installé pour permettre au receveur placé sur l'axe de concentration de respecter les configurations $(i; \gamma)$ ou $(I; \varepsilon)$.

II.3.2 Le concentrateur cylindrique à section circulaire.

Le concentrateur cylindrique à section circulaire concentre les rayons solaires sur le plan passant par le centre du bol et parallèle aux rayons solaires (Figure 1.18b page suivante). Ce plan receveur peut être rendu mobile tandis que le concentrateur resterait fixe. Un système de traque du soleil doit être alors installé pour permettre au receveur placé dans ce plan de concentration de respecter les configurations $(I; \varepsilon)$

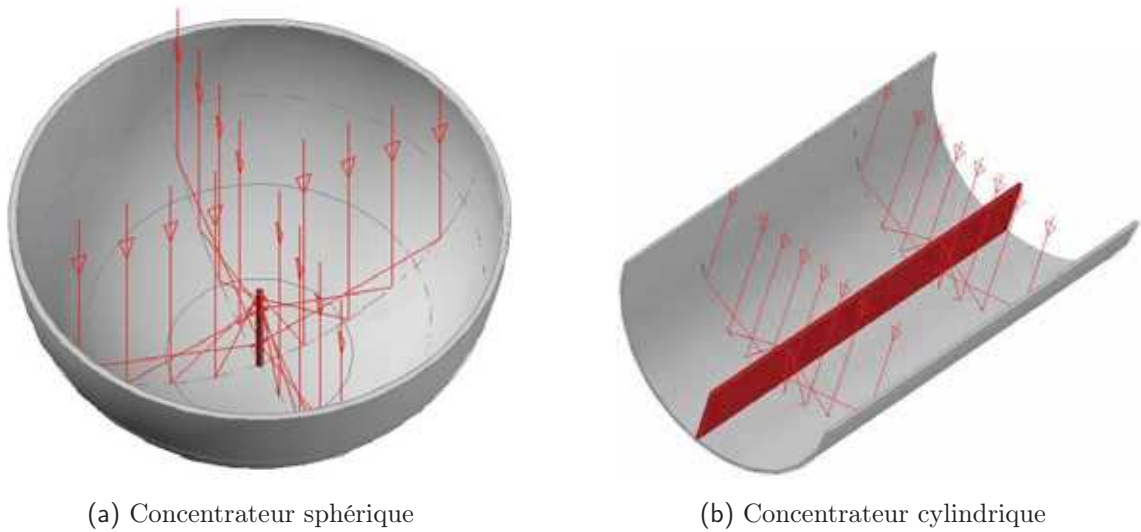


FIG : 1.18 – Concentrateurs sphérique et cylindrique

Le concentrateur hémisphérique concentre sur un axe, tandis que le concentrateur cylindrique concentre sur une aire.

et $(I; 0)$. Les mêmes remarques que celles du concentrateur cylindro-parabolique sont observées quand à l'aspect un peu plus couteux de la configuration $(I; \varepsilon)$ par rapport à la configuration $(I; 0)$.

Le concentrateur cylindrique à section circulaire n'est pas très utilisé, car il concentre sur un plan, ce qui réduit fortement la concentration.

II.4 Le concentrateur à section conique.

la section conique concentre sur l'axe parallèle aux rayons solaires et constituant la médiane dans le plan de section dont la base serait la largeur d'exposition. La longueur de concentration est fonction de l'angle de sommet δ_s du cône : pour un cône d'angle de sommet $\delta_s = 90^\circ$, la longueur de concentration est égale à la longueur de ladite médiane. Cette concentration n'est pas également répartie sur la médiane, la partie la plus proche de la base ayant un plus fort coefficient de concentration puisque la surface qui concentre à ce niveau est plus grande (Figure 1.19a page suivante). Dans

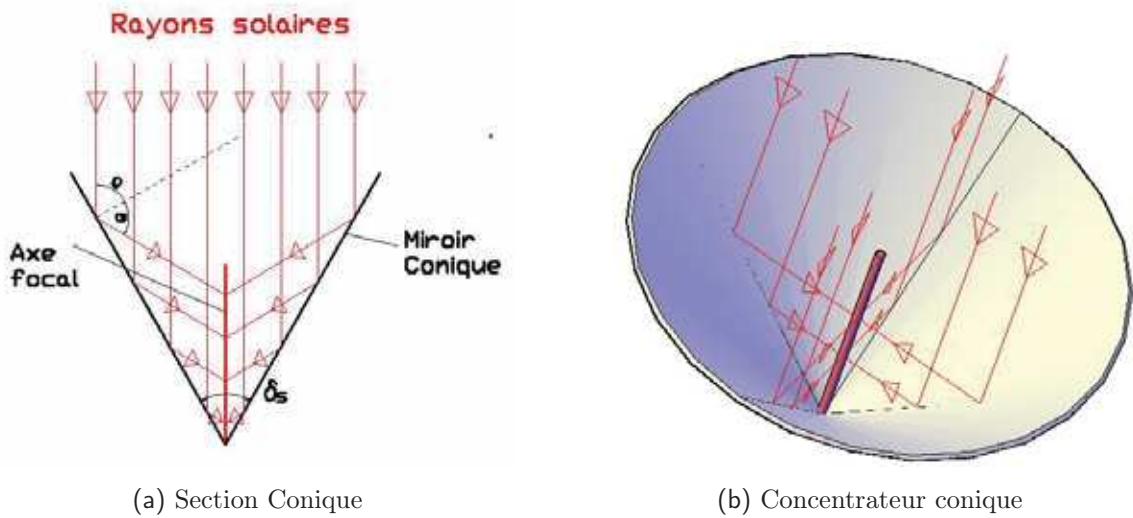


FIG : 1.19 – Section conique et Concentrateur conique

l'application, l'on dispose de concentrateur conique concentrant sur un axe comme le montre la figure 1.19b. Un prisme à section conique pourrait être envisageable, celui-ci concentrerait sur un plan. Il est plus courant de voir des concentrateurs en cône tronqué, l'opération consistant à s'intéresser à la partie proche de la base qui concentre plus. Une autre utilisation du concentrateur conique qui est la plus courante est plutôt la canalisation du rayonnement entrant dans le cône vers une base réceptrice.

Il faut un dispositif de traque intégral pour le concentrateur conique selon la configuration $(i; \gamma)$ ou $(I; \varepsilon)$.

II.5 Le concentrateur à image diffuse.

Il existe toute une panoplie des concentrateurs à image diffuse [Nonimaging concentrators]. Le terme *image diffuse* sous-entend que la connaissance de l'emplacement exacte de l'image optique n'est pas recherchée. Ces concentrateurs ont la principale caractéristique de concentrer les rayons incidents sur leurs cibles à condition que les rayons solaires leur viennent dessus avec un angle dans la limite acceptable : $\theta_a =$ **angle d'acceptation**. Le but recherché est donc de se passer des systèmes com-

plexes de traque du soleil. Tous les concentrateurs à image diffuse fonctionnent sur ce même principe et visent les mêmes objectifs.

II.5.1 Les concentrateurs paraboliques composés [Compound Parabolic Concentrators - CPC]

Ils sont cylindriques avec une section formée de deux (2) paraboles tronquées comme indiqué sur les figures 1.20 et 1.21 (Duffie and Beckman, 1980).

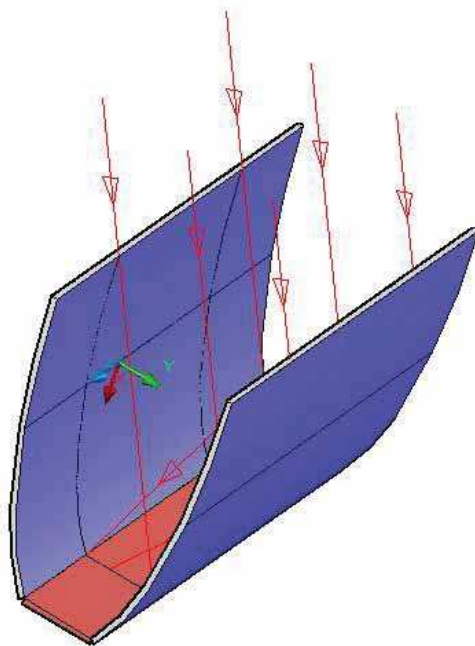


FIG : 1.20 – Concentrateur CPC

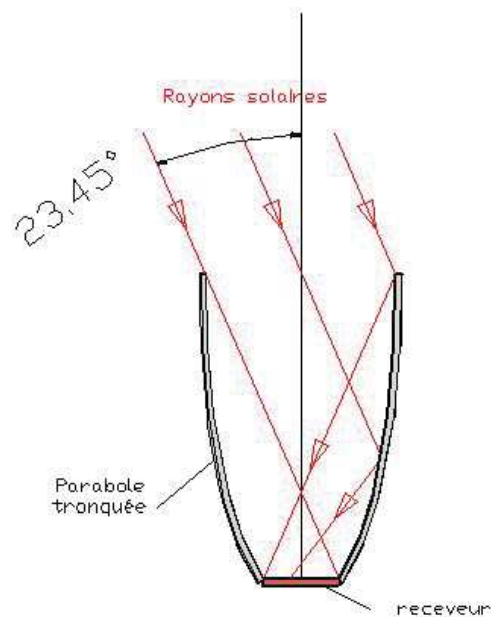


FIG : 1.21 – Section du CPC

Le concentrateur parabolique composé (CPC) est construit de sorte à être disposé de façon permanente. Son demi-angle d'ouverture est égal à $23^{\circ}45'$ de sorte à couvrir la déclinaison pendant toute l'année.

L'angle d'acceptation idéal d'un CPC est $-23,5^{\circ} \leq \theta_a \leq 23,5^{\circ}$, légèrement supérieur à l'angle de déclinaison solaire pour permettre une configuration fixe à l'année ($\varphi; 0$) selon la figure 1.22a page suivante. Le choix d'un angle d'acceptation de $-11,75^{\circ} \leq \theta_a \leq 11,75^{\circ}$ oblige un réglage tous les six (6) mois de l'année (configuration semi-fixe), c'est-à-dire aux équinoxes (Figure 1.22b page suivante). Dans ce cas, les positions seront : ($\varphi+11,73; 0$) établie le 23 septembre et ($\varphi-11,73; 0$) établie le 21 mars. Ce réglage peut constituer une contrainte supplémentaire, mais il permet un meilleur rapport de concentration.

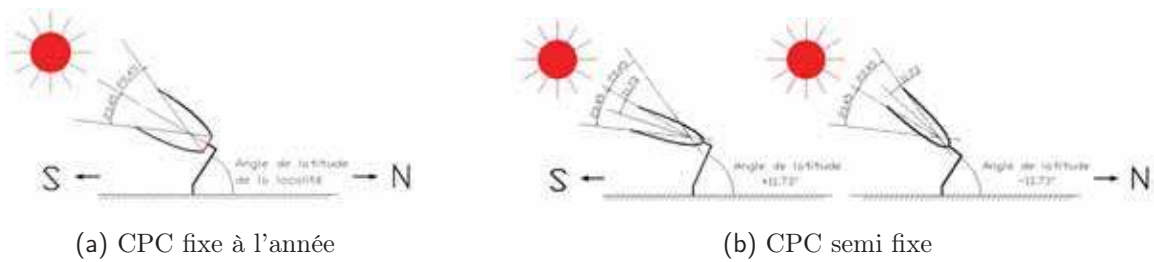


FIG : 1.22 – Concentrateurs paraboliques composés (CPC) : positionnements

Le concentrateur parabolique composé peut être construit avec un angle d'acceptation $\theta_a \leq \delta$ l'angle de déclinaison tel qu'il permet de capter les rayons solaires toute l'année, ou avec un angle d'acceptation $\theta_a \leq \delta/2$ la moitié de l'angle de déclinaison pour un changement de positionnement deux fois par an (pendant les équinoxes de printemps et d'automne).

II.5.2 Les concentrateurs hyperboloïdes elliptiques [Elliptical Hyperboloid Concentrators - EHC]

Ils sont également les résultats de la nouvelle orientation de la recherche qui consiste à construire des concentrateurs ne nécessitant pas de systèmes de traques. L'angle d'acceptation peut varier de $\theta_a = \pm 90^\circ$. (Figures 1.23 et 1.24), (Ali, 2013).

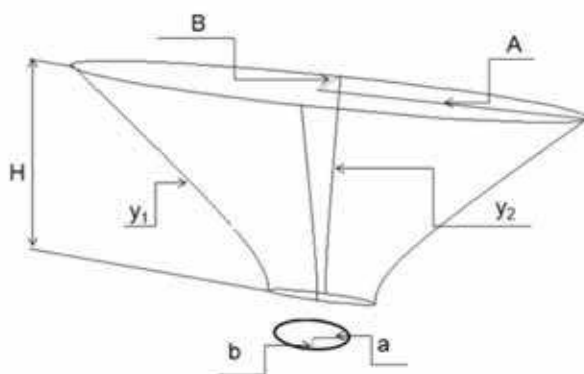


FIG : 1.23 – EHC - Principe

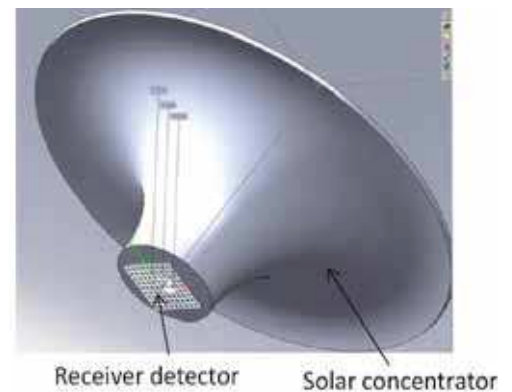


FIG : 1.24 – EHC - Image

(Source : Ali, 2013). Le concentrateur hyperboloïde elliptique admet également un angle d'acceptation tel que les rayons réfléchis peuvent alimenter une cellule solaire photovoltaïque à haut rendement.

De par leur très faible coefficient de concentration ($C_{comp} = 2,51$ avec $\theta_a = 23,5^\circ$), les concentrateurs à image diffuse sont plus souvent utilisés au niveau des receveurs pour intercepter les pertes dues à une mauvaise concentration ou un défaut de forme du concentrateur. Leur section d'exposition est petite par rapport à la surface de matériaux nécessaires pour les réaliser, ce qui en fait une solution peut économique par rapport au gain obtenu. Ils peuvent cependant être utilisés très avantageusement dans des capteurs thermiques à effet de serre pour relever la température à des valeurs supérieures à 100°C .

II.6 Les nouvelles pistes.

II.6.1 Les concentrateurs à bandes de section parabolique.

Le concentrateur cylindrique ou circulaire à bandes de section parabolique [Ring Array Concentrator - RAC] utilise une technique de concentration comme représentée par la figure 1.25. Le concentrateur est formé de miroirs paraboliques tronqués (Vasylyev, 1981, Mouzouris et al., 2011). Les paraboles en question ont le même point focal, et apparaissent imbriquées les-unes dans les autres. Ces paraboles concentrent en un point ou une droite s'il s'agit de cylindres (figure 1.26).

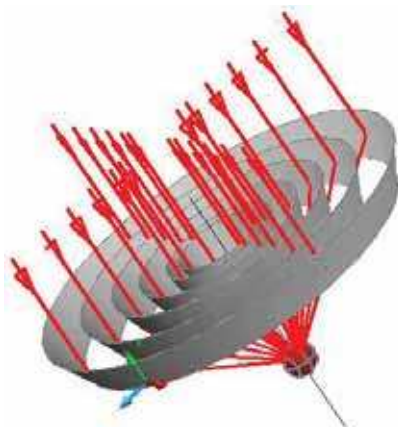


FIG : 1.25 – Concentrateur RAC

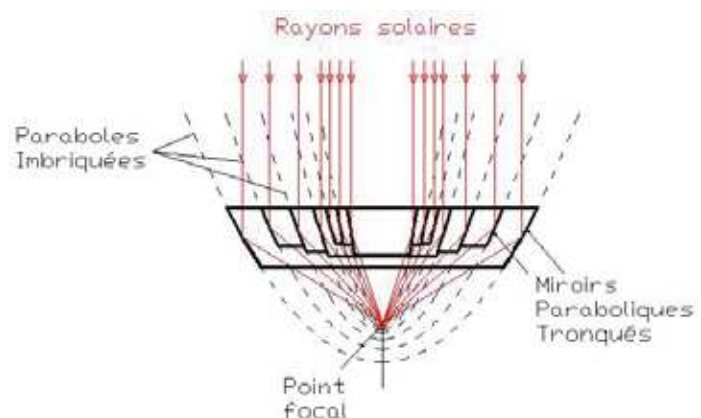


FIG : 1.26 – Coupe des bandes

Le concentrateur à bandes de section parabolique (RAC) focalise comme une parabole à la différence que le concentrateur se trouve entre la source et la cible, là où l'on aurait plutôt placé un système dioptrique.

Un système de traque du soleil doit être installé. Pour cela, les configurations $(i; \gamma)$ et $(I; \varepsilon)$ peuvent être choisies pour le concentrateur circulaire à bandes de section parabolique, et les configurations $(I; \varepsilon)$ et $(I; 0)$ pour le concentrateur cylindrique à bandes de section parabolique. L'unique avantage de ces concentrateurs à bandes est qu'ils sont placés entre la source et la cible, contrairement aux autres dispositifs miroirs, là où l'on placerait plutôt un dispositif dioptrique.

II.6.2 Les autres concentrateurs

Les concentrateurs sont développés en fonction de la difficulté que l'on essaye de contourner. Soit l'on veut prioritairement se passer des dispositifs plus ou moins complexes de traque du soleil, ou l'on veut un maximum d'énergie à tout prix.

1- Les collecteurs favorisant le déplacement de la cible plutôt que celui du concentrateur sont dans cette catégorie. L'on peut citer quelques-uns :

a- Le collecteur solaire à miroir fixe : [Fixed-Mirror Solar Collector - FMSC].

Ce collecteur est formé d'un concentrateur à lames fixes rivées sur un cadre habituellement cylindrique (Figure 1.27 page suivante), (Stine et al., 1986). Ces lames sont disposées chacune selon un angle propre à leur position. Le receveur est placé sur le même cylindre que les lames et se déplacera quotidiennement en suivant le point focal qui oscille entre deux extrema inter-saisons et journaliers. L'objectif est donc de plutôt déplacer le receveur moins encombrant que le concentrateur. Ce collecteur est disposé avec l'axe du cylindre dans la direction Est-Ouest et selon la configuration $(\varphi; 0)$.

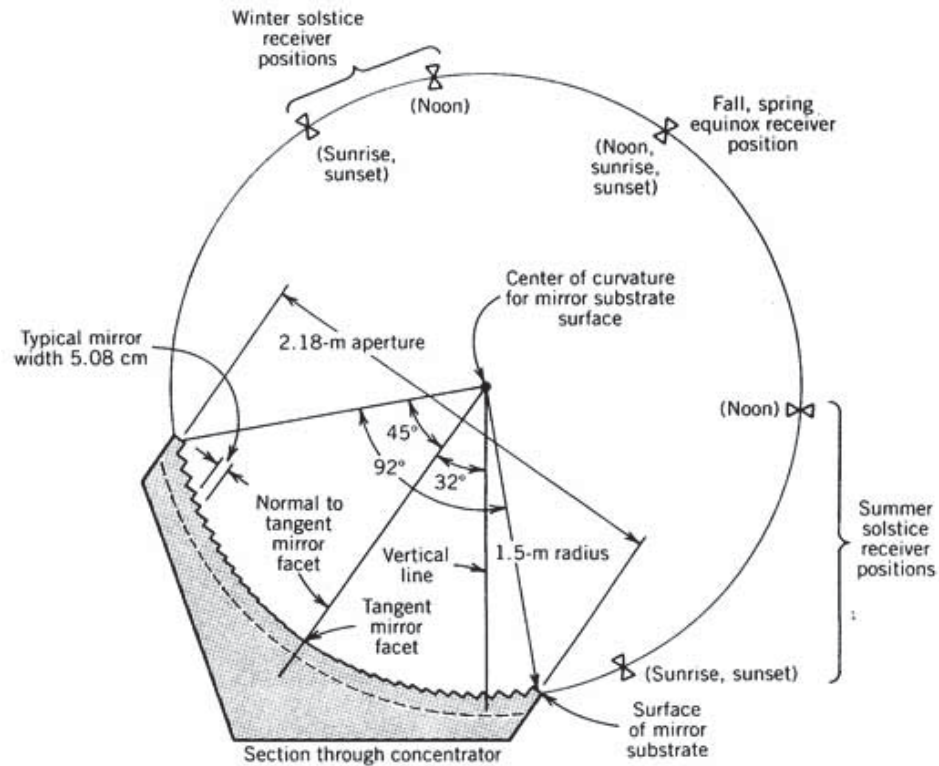


FIG : 1.27 – Collecteur solaire à miroir fixe (FMSC)

(Source : Stine et al., 1986, Albuquerque - New Mexico - USA). Le concentrateur de ce système est à lames fixes telles que son receveur se promène sur un cercle tandis que le concentrateur reste fixe.

b- Le collecteur solaire à cible oscillante [hovering concentrator] :

Il fonctionne presque de façon semblable au précédent, c'est juste la forme du concentrateur qui n'est pas forcément cylindrique (Figure 1.28 page suivante). Généralement cylindro-parabolique avec l'axe de la section disposé dans la direction Nord - Sud et selon la configuration $(\Phi; 0)$, le miroir fixe réfléchit sur une cible mobile qui se déplace d'Ouest en Est en fonction de l'évolution du soleil. Noter qu'aux positions extrêmes, seule une moitié du concentrateur focalise vers la cible.

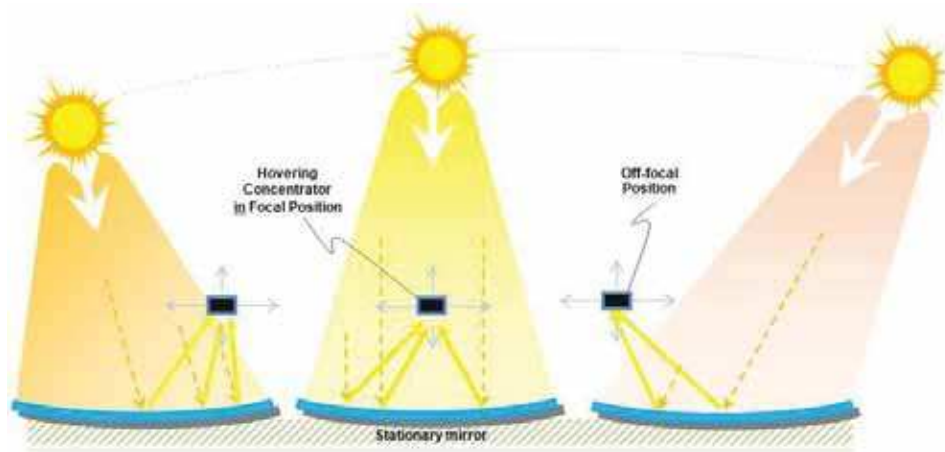


FIG : 1.28 – Collecteur à cible oscillante

Ce collecteur a un receveur qui navigue d'Ouest en Est selon la position angulaire du soleil. C'est donc la cible qui est rendue mobile au profit du concentrateur qui reste fixe⁶.

2- Les collecteurs favorisant l'énergie à tout prix seront reconnaissables par le fait que l'on adopte le morcellement du concentrateur en une multitude d'éléments mosaïques qui seront actionnés indépendamment, mais de façon cohérente pour que leurs mouvements satisfassent la règle de réflexion du rayon solaire incident vers la cible en fonction de la position du soleil et de leurs propres positions respectives.

a- La centrale solaire à miroir de Fresnel [Moving Reflector Stationary Receiver] est aussi appelé système solaire thermique à lames linéaires [Solar Linear Array Thermal System - SLATS]. Elle est composée de lames réfléchissantes orientables disposées sur un cadre fixe (Karoua, 2011). Ces lames sont disposées sur ce cadre par des liaisons pivots à leurs extrémités (Figure 1.29 page suivante).

6. Source : [GreenVineSolar/MoreAboutHoveringSolar.mht](#)

Leur objectif est de réfléchir sur une cible linéaire commune, chaque lame étant orientée indépendamment pour cet effet. Un avantage supplémentaire est le fait que les lames mobiles sont de surface plane, beaucoup moins compliquée à réaliser que le profil parabolique.

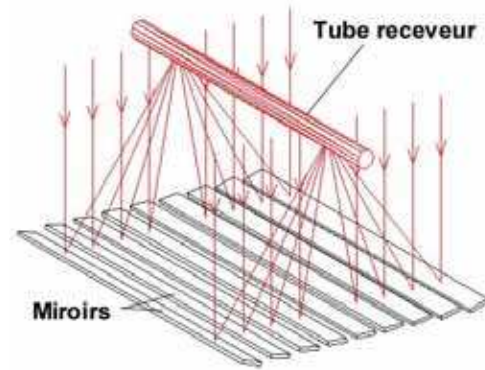


FIG : 1.29 – Centrale solaire à miroir de Fresnel (SLATS)

Ce système a un concentrateur composé de lames planes orientables indépendamment (Système Fresnel). L'on cherche à se dispenser des formes complexes.

b- La fournaise solaire [Solar Furnace] est composée d'une multitude de petits panneaux plats carrés ou rectangulaires appelés *Héliostats*, activés indépendamment et qui réfléchissent sur une cible ponctuelle commune (Figure 1.30) (Quoilin, 2007).

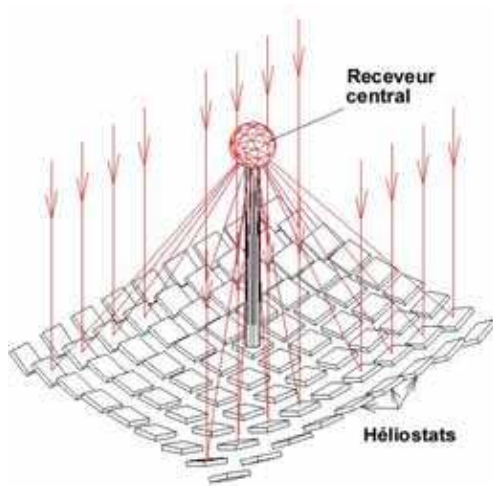


FIG : 1.30 – Fournaise solaire

Ce système a un concentrateur composé d'éléments plats mosaïques (héliostats) orientables indépendamment (Système Fresnel). L'on cherche à se dispenser des formes complexes.

Pour ces collecteurs favorisant l'énergie à tout prix, le guidage de traque du soleil de chacun des panneaux est différent d'un panneau à l'autre de par la position géographique de chaque élément par rapport à la cible. La traque du soleil ne consistant pas à aligner la normale de chaque élément avec le rayon incident, mais plutôt à réfléchir ce rayon incident vers la cible commune, une installation complexe et sophistiquée faisant appel à la robotique, gérée par un automate utilisant des algorithmes de calcul pour l'orientation de chaque élément est nécessaire.

III ÉTAT ACTUEL DE DÉVELOPPEMENT DU FOUR SOLAIRE À PAIN

La cuisson solaire est un enjeu majeur, surtout pour les pays en voie de développement. En effet, jusque là, la cuisson dans ces pays se fait par l'utilisation du bois de chauffe et du gaz butane, ressources quasiment rares dans les pays sub-sahariens. Les pays limitrophes au Sahara sont précisément dans une politique de reboisement et d'interdiction des coupes de ce bois pour lutter contre la déforestation et l'avancée du désert (Schwarzer and Vieira Da Silva, 2003). Dans le cas de la production du pain, qui doit être considérée comme une production industrielle, l'on utilise également du bois, du gaz, du gasoil ou de l'électricité. Une solution de cuisson du pain utilisant l'énergie solaire serait bien plus que souhaitable.

La cuisson du pain est très exigeante quand au contrôle du temps et de la température de cuisson. Voici en Annexe.4 page X, une petite recette de la boulangerie "Binôme Gourmant" sur la cuisson du pain avec un faible taux d'humidité (300 g d'eau pour 500 g de farine). Cette recette montre bien des températures de cuisson entre 250 °C et 275 °C. Ces températures doivent être maintenues durant la mise du pain en four, d'où le souci d'une régulation très contrôlée de cette température (Nicolas et al., 2010).

L'utilisation du soleil dans la cuisson du pain peut être classée en trois catégories. Les moyens de cuisson solaire artisanaux, semi-industriels et industriels.

III.1 Les moyens de cuisson solaire artisanaux

Il s'agit généralement de dispositifs réfléchissants au milieu desquels l'on place un récipient contenant le pain à cuire. Les dispositifs réfléchissants concentrent donc les rayons lumineux sur le récipient (Figure 1.31 page suivante) (Aakfs et al., 2004, Muthusivagami et al., 2010).

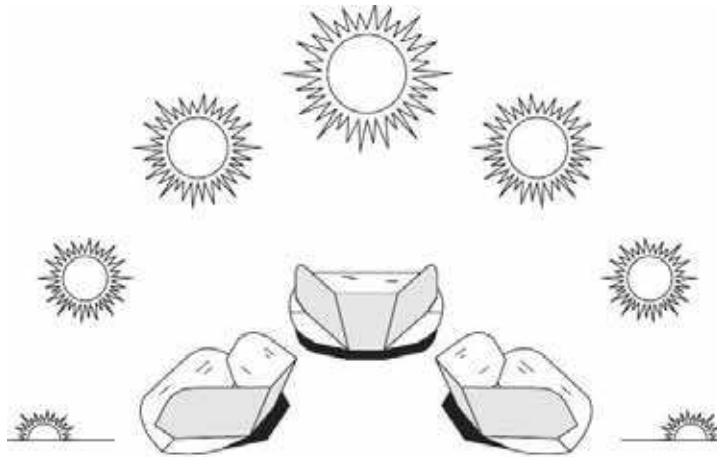


FIG : 1.31 – Four artisanal

(Source : solarcookers.org, Solar Cookers International, Sacramento -USA). La traque du soleil consiste à orienter l'ouverture vers le soleil par simple rotation de l'ensemble et à régler l'inclinaison du dossier (Système Altazimutal).

Ces dispositifs nécessitent une présence humaine pour assurer manuellement leur orientation vis -à vis de la source solaire par des rotations successives de l'ensemble dispositif plus récipient, et des réglages manuels d'inclinaison des réflecteurs si nécessaire. Aucun moyen de traque du soleil proprement conçu permet les réglages et leur vérifications. Seul l'intuition de l'utilisateur lui permettra d'obtenir un bon positionnement, et donc un bon rendement. L'usage de ces dispositifs reste essentiellement domestique. De plus, la température de cuisson n'est pas assez élevée, et la qualité du pain produit reste incertaine.

La poursuite du soleil, même manuelle, suit celui du système altazimutal pour la plupart de ces dispositifs.

III.2 Les moyens de cuisson solaire semi-industriels

Il s'agit généralement de dispositifs réfléchissants de forme conique. Leurs fonds sont aménagés pour recevoir le pain à cuire. Les dispositifs réfléchissants concentrent donc les rayons lumineux sur le fond (Figure 1.32 page suivante).

Ces dispositifs nécessitent une présence humaine pour assurer manuellement leur orientation vis -à vis de la source solaire par des rotations successives de l'ensemble. Le

moyen de traque du soleil est conçu pour fonctionner de façon manuelle et permettre les réglages et leur vérifications. Ces dispositifs peuvent déjà permettre une production de pain semi-industrielle avec des températures de cuisson allant jusqu'à 260 °C.



FIG : 1.32 – Four à pain mobile

(Source : SUNBAKERY Ref :PSL26471YH, USA). Ce dispositif a un concentrateur pivotant sur un axe vertical et horizontal (Système Altazimutal). Son réglage est manuel.

Le système de poursuite du soleil est altazimutal pour la plupart de ces dispositifs.

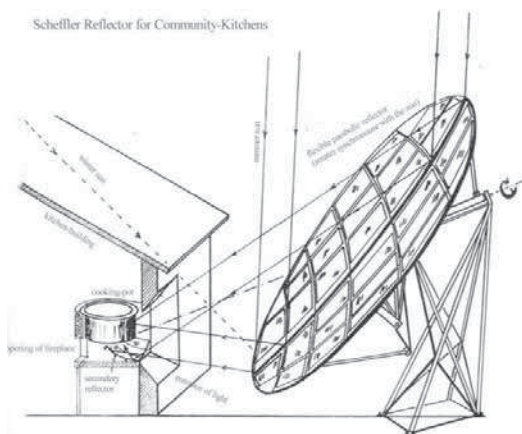
III.3 Les moyens de cuisson solaire industriels

Il s'agit généralement de dispositifs réfléchissants à foyer fixe. deux systèmes de traque se dégagent :

- Le système **fournaise** + **héliostats** : le réflecteur avec point focal éloigné, est guidé par un système complexe, voir automatisé, pour poursuivre le soleil. Le système *fournaises + héliostats* est expliqué à la section II.6.2 page 35.
- Le système **Scheffler** (Munir et al., 2010) : le réflecteur est une portion de parabolo-

loïde avec un axe de rotation passant par le centre de la portion réfléchive de paraboloïde et le point focal. La rotation autour de cet axe suit l'angle horaire. Son système de poursuite du soleil est donc équatorial. Quand au réglage au vu de la poursuite de la déclinaison, celui-ci est un peu compliqué : il y a en effet trois points de fixation de tiges-bielles alignées sur la portion du paraboloïde, qui servent simultanément de moyen de positionnement en vue du respect de la déclinaison, et de moyen de modification du profil de la cette portion de paraboloïde pour permettre la netteté de focalisation des rayons projetés. En bref, le profil de cette portion de paraboloïde doit être modifié progressivement avec la déclinaison pour que la formation de l'image au point focal soit plus nette. Le système *Scheffler* est expliqué en Annexe.5 page XI (Ruelas et al., 2013).

Les dispositifs Scheffler (Figure 1.33) sont essentiellement automatisés en ce qui concerne du moins la poursuite du soleil selon l'angle horaire. La traque de la déclinaison doit être faite par des réglages mécaniques successifs tous les jours, et de façon manuelle.



(a) Système Scheffler



(b) Systèmes Scheffler en vis-à-vis

FIG : 1.33 – Dispositifs Scheffler simple et en vis-à-vis

(1.33a-Source : *Solare-bruecke.org*, 1.33b-Source : *Solare-bruecke.org*. Construit par : IUT d'électronique de Grenoble, Installé à : Trièves, France). Le dispositif Scheffler simple permet de comprendre que cette portion de parabole pivote autour d'un axe passant par le foyer pour la traque de l'angle horaire. Pour compenser les écarts de surfaces d'exposition dus à la déclinaison, des portions de parabole Scheffler peuvent être montées en vis-à-vis.

Les dispositifs Scheffler peuvent être montés par élément seul, mais dans ce cas, il y a une variation très importante de la surface d'exposition, et donc de l'énergie produite. (Figure 1.33a page précédente) A titre d'exemple, un réflecteur Scheffler de $8m^2$ collecte la lumière arrivant sur une surface d'ouverture variable de $4,3m^2$ à $6,4m^2$. Pour compenser cette variation, les dispositifs Scheffler sont montés en vis-à-vis par paire (Figure 1.33b page précédente) : pendant que l'un des réflecteurs a sa surface d'exposition réduite au voisinage des solstices, l'autre voit la sienne augmenter, compensant ainsi les énergies produites individuellement. (Sardeshpande and Pillai, 2012).

Ces deux dispositifs décrits ci-dessus sont conçus pour une production industrielle, les températures dans le four pouvant atteindre $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

IV CHOIX DU DISPOSITIF D'ÉTUDE

IV.1 Limites des dispositifs actuels de four solaire à pain

Les systèmes **Fournaises** + **héliostats** ont montré leur limite quand à leur utilisation pour la cuisson du pain du fait de l'automatisation complète des différents héliostats, nécessitant des connaissances poussées en robotique et en automatisme. Quand aux systèmes **Scheffler**, malgré le fait que leurs concepteurs soient convaincus qu'ils sont les meilleurs systèmes adaptés pour les pays en voie de développement, et que leur utilisation soit très vulgarisée en Inde, la complexité des réglages ainsi que la diminution conséquente de puissances produites au voisinage des solstices rendent leur utilisation pour la cuisson du pain un peu difficile pour l'Afrique. Il y a pour mémoire la boulangerie solaire industrielle de l'établissement *Gabriel TABORIN* à Saaba - Ouagadougou, avec une capacité de cuisson de 1 000 baguettes françaises par jour. Construite depuis ≈ 2002 , elle est totalement à l'arrêt actuellement, et cela pour des raisons d'incapacité d'obtenir la température adéquate dans le four (Kombassere, 2008).

C'est pourquoi, le choix dans cette étude se portera sur l'utilisation d'un **concentrateur hémisphérique** comme dispositif de production d'énergie. Ce choix constitue en effet une nouvelle approche dans la conception de fours à pain ne nécessitant pas une assistance mécanique pointue et lourde.

IV.2 Justification du choix d'un concentrateur hémisphérique

Le concentrateur solaire hémisphérique montre des particularités intéressantes énumérées ci-dessous :

1. De par sa forme, il concentre toujours quelque soit la position du soleil. Son foyer se déplace suivant un axe parallèle aux rayons solaires et passant par l'axe central de la demi sphère (voir figure 1.17 page 26)(Rogers et al., 2012).
2. Son coefficient de concentration énergétique est assez élevé, surtout sur la por-

tion de l'axe proche du milieu du rayon où $C_{o_{Max}(Cir_3D)} \approx 500$ (Figure 1.34) (Stine et al., 1986).

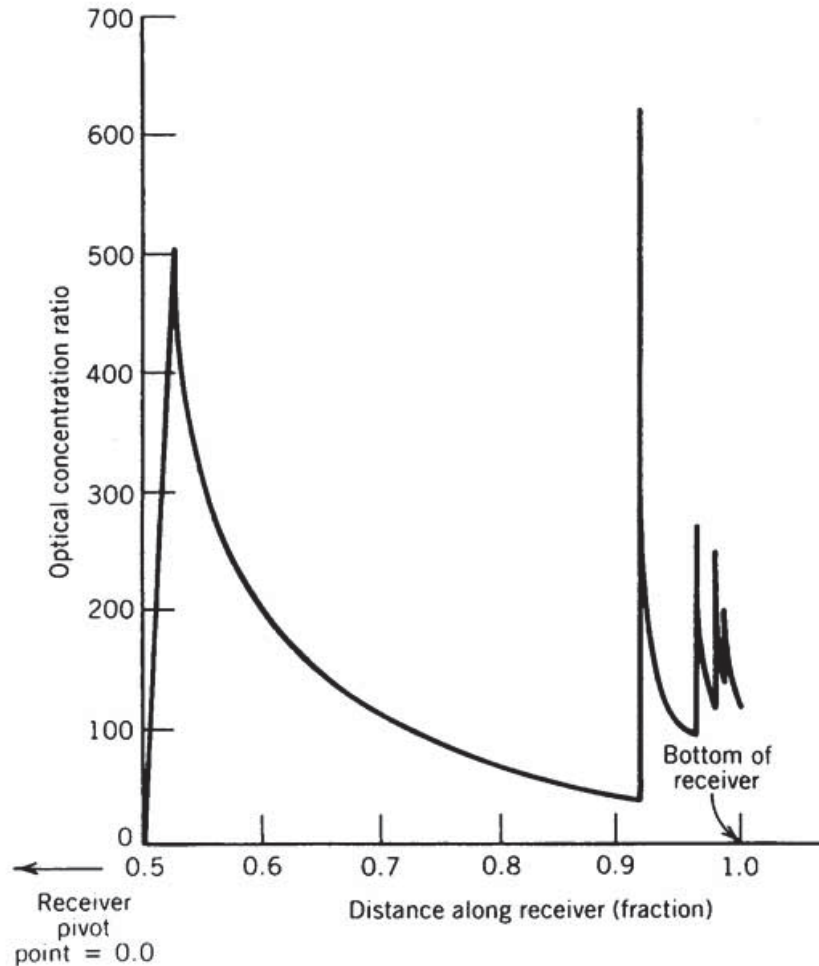


FIG : 1.34 – Coefficient de concentration optique (C_o) d'un hémisphère

(Source : Stine et al., 1986). Cette courbe correspond à la répartition sur l'axe du cône-receveur du coefficient de concentration optique. on constate que ce coefficient vaut 500 sur le sommet du cône-receveur et décroît fortement au voisinage de la base du cône. Les multiples réflexions génèrent également de nombreux pics à la base du cône-receveur.

3. Le concentrateur hémisphérique s'apparente à s'y méprendre à un concentrateur parabolique pour des petites valeurs du demi-angle ϕ_r , et donne donc l'impression de concentrer en un point, comme indiqué sur la figure 1.35a page suivante. Son coefficient de concentration géométrique moyen est maximum pour $\phi_r = 22^\circ$, $C_{g_{moy}(Cir_3D)}(22^\circ) \approx 3\,000$. (Khaled, 2008).
4. L'analyse de l'image optique montre que la formation de l'image est très proche de celle d'un paraboloïde pour une aire commençant par le rayon incident pas-

sant par l'axe et se projetant sur une distance inférieure ou égale à 0,50 fois le rayon de la sphère. Donc, pour $\phi_s \leq 30^\circ$, le concentrateur hémisphérique présente toujours une image optique proche de celui d'un concentrateur-point, sous réserve des aberrations au voisinage du point focal à évaluer. (figure 1.35b). Avec cet angle $\phi_s = 30^\circ$, le coefficient de concentration géométrique moyen décroît substantiellement, mais reste toujours raisonnable : $C_{g_{moy}(Cir_3D)}(30^\circ) \approx 241$. Cette valeur est en effet supérieure au coefficient de concentration géométrique moyen d'un concentrateur cylindro-parabolique dont la valeur est maximale à $\phi_r = 45^\circ$. ($C_{g_{moy}(Par_2D)}(45^\circ) \approx 215$). À cette valeur, la température souhaitée pour le dispositif (300°C) est généralement atteinte (Dayanga and Gamalath, 2008).

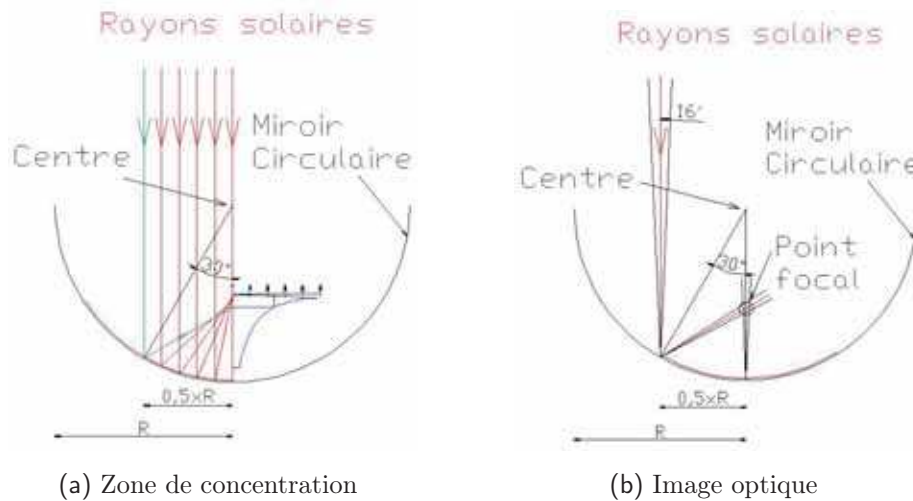


FIG : 1.35 – Délimitation de la zone de concentration pour $\phi_s = 30^\circ$

Pour un demi-angle caractérisant la surface d'exposition $\phi_s = 30^\circ$, la zone de concentration géométrique moyen reste assez large avec un coefficient proche de 241.

Remarque : Dans le cas d'un concentrateur hémisphérique, ϕ_r est le demi-angle de sommet par rapport au point focal. Cependant, ce point focal se déplace en fonction de cet angle ϕ_r comme il sera vu à la section I.3 page 80. C'est pourquoi, l'on utilise ϕ_s le demi-angle de sommet par rapport au centre de la sphère.

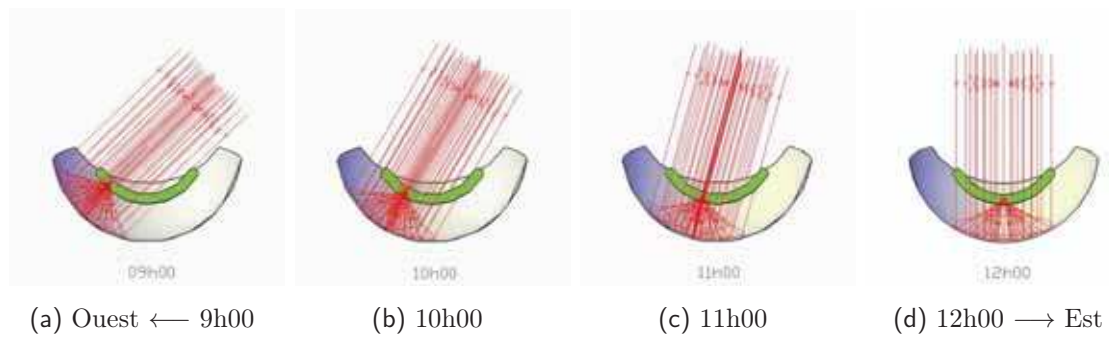


FIG : 1.36

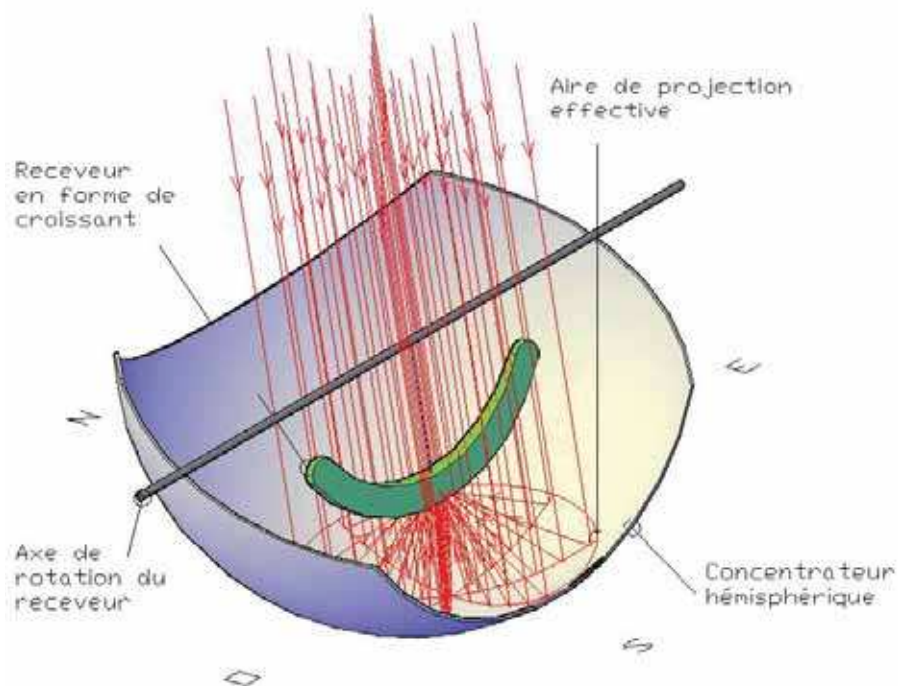


FIG : 1.37 – Concentrateur circulaire 3D

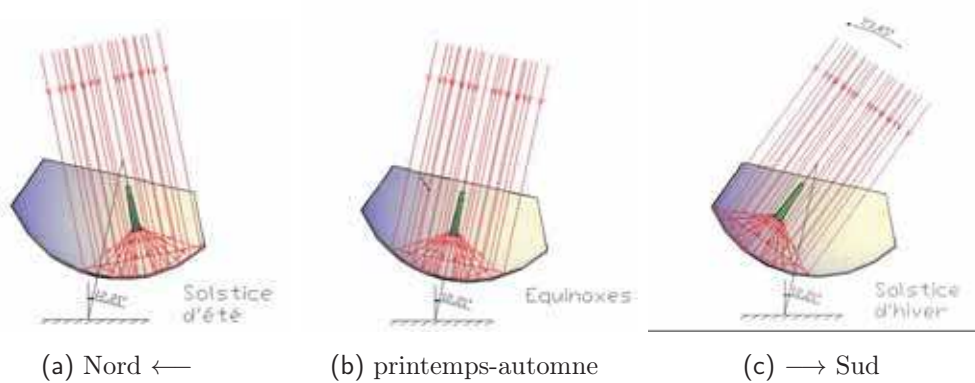


FIG : 1.38

Le dispositif (Figure 1.37 page précédente) montre que le soleil dans sa course d'Est en Ouest se reflète sur un concentrateur hémisphérique et crée une image qui peut être récupérée invariablement sur le receveur en forme de croissant vert. La section dont les projections sont récupérées est un cercle de rayon égal à 0,50 fois le rayon de la sphère ($\phi_s=30^\circ$). Ce cercle se déplace d'Ouest en Est suivant un angle horaire constant (Figure 1.36 page précédente), et du Nord au Sud suivant la déclinaison (Figure 1.38 page précédente) sur le concentrateur hémisphérique. Un tel dispositif avec son concentrateur hémisphérique positionné de façon permanente, pourrait concentrer l'énergie solaire de 8 h 00 à 16 h 00 toute l'année, la seule contrainte étant de faire tourner régulièrement le receveur sur son axe de rotation de quelques degrés. De ce fait en comparaison avec le dispositif Scheffler, celui-ci se révèle moins contraignant, car il n'impose pas de modifier une inclinaison et un profil parabolique au jugée, une simple rotation du receveur suffirait. De plus, il n'y a pas besoin de système motorisé de traque de l'angle horaire.

Avec une possible amélioration, les positions des débuts de mois pourraient être reportées sur un rapporteur placé au niveau de l'axe pour indiquer les positions graduelles du receveur au cours de l'année.

CONCLUSION SUR L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

L'inventaire des images optiques telles qu'elles sont produites par les concentrateurs solaires permet de dégager :

1. Les constatations de performance suivantes :
 - La concentration sur un point confère un meilleur coefficient que la concentration sur une ligne.
 - La concentration sur une ligne confère un meilleur coefficient que la concentration sur un plan.
2. Différents objectifs synthétisés comme suit :
 - La quête d'une mobilité moindre du concentrateur vis-à-vis du soleil. L'on cherchera en effet à se dispenser du système de traque.
 - Le cas échéant, la quête d'une mobilité du receveur, moins encombrant que le concentrateur. Si en effet l'on veut une plus grande concentration, il peut s'avérer plus compliqué de déplacer une très grande surface montée en un bloc sur un robot. Alors, l'on serait dans ce cas tenté de garder fixe le concentrateur et de rendre mobile le receveur.
 - Dans le cas d'une installation grande capacité, la quête d'une automatisation avec pour autant un concentrateur composé de pièces légères et de formes simples, articulées par un automate. L'on n'est plus dans le domaine de l'économie, mais plutôt dans le domaine de la collection maximale. Le morcellement de la surface du concentrateur permet dans ce cas de monter chaque pièce suffisamment légère sur un robot. De plus, Il ne sera plus nécessaire de donner à ces pièces une forme parabolique. Une forme plane suffira, car les dispersions de par la taille des pièces par rapport au receveur resteront dans le domaine de l'acceptable.

La cuisson du pain (cuit avec un four industriel) nécessite une température dans le four comprise entre 240 et 290 °C. Cela permet de statuer sur le choix du concentrateur. En effet, pour atteindre de telles températures, il faut des concentrateurs à coefficient de concentration géométrique élevé. Les meilleurs candidats dans ce cas sont :

- ★ Les concentrateurs cylindro-paraboliques
- ★ Les concentrateurs paraboloides
- ★ Les concentrateurs hémisphériques
- ★ Les fournaies solaires

Pour obtenir la température pour un four solaire industriel à pain, seul le système *Scheffler* avait prouvé son efficacité surtout dans les pays comme l'Inde et la Chine où ce système est très utilisé. Cependant, ce système avait montré des difficultés à être adopté en Afrique du fait qu'il faille régler en même temps son inclinaison et son profil parabolique. L'étude d'un système associant un concentrateur hémisphérique en lieu et place du système *Scheffler* comme moyen de cuisson solaire industriel est donc envisagée pour répondre aux difficultés techniques rencontrées, et également pour se dispenser d'une motorisation quant-à la poursuite du soleil d'Est en Ouest. Dans le chapitre 4, la mise en épreuve d'un prototype pour confirmer la validité de ce système avec concentrateur hémisphérique est présentée.

Chapitre 2

THÉORIES DES CONCENTRATEURS

INTRODUCTION.

Dans ce chapitre, les bases mathématiques et physiques ayant permis l'étude des systèmes de concentration seront développées. L'accent sera mis sur le processus de formation de l'image optique au foyer de concentration. Les constantes de concentration seront passées en revue et leurs équations définies. des tableaux sur les constantes de concentration les plus courantes des différents concentrateurs (Coefficient de concentration géométrique et coefficient de concentration géométrique moyen) seront présentés, soulignant les valeurs de concentration maximales atteintes à titre comparatif. Les types de receveurs à disposer au foyer seront présentés. Enfin, un mode de transfert de chaleurs au niveau de ces receveurs sera esquissé.

I BASE MATHÉMATIQUE DE LA THÉORIE

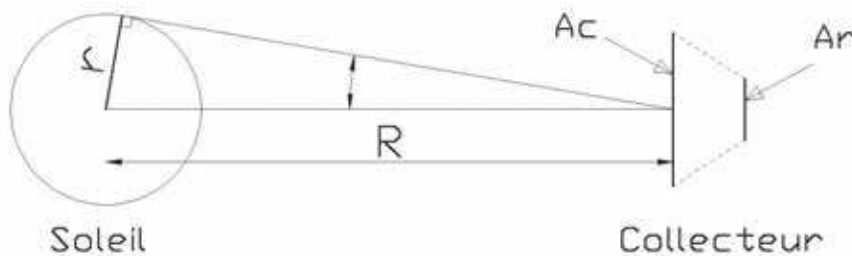


FIG : 2.1 – Concentration géométrique

Le calcul du coefficient de concentration géométrique se résume généralement à faire le rapport de l'aire du concentrateur (A_c) sur l'aire du receveur (A_r). Le résultat s'exprime en fonction de la distance (R) et le rayon (r) du soleil.

Le coefficient de concentration géométrique =
 C_g est le rapport entre la surface d'exposition du concentrateur exposée au flux de rayons solaires, et la surface de

réception au niveau du receveur (Figure 2.1). L'hypothèse communément admise est que le flux du rayonnement solaire est constant sur la surface exposée, et sa valeur moyenne est connue. Il existe une fonction reliant les maxima de températures produites au niveau du point focal, et le coefficient de concentration géométrique, ce qui justifie l'intérêt de ce coefficient. Ce coefficient de concentration géométrique est exprimé par l'équation suivante (Rabl, 1976) :

$$C_g = \frac{A_c}{A_r} \quad (2.1)$$

Avec :

- A_c : Aire ou surface d'exposition du concentrateur
- A_r : Aire ou surface de réception au niveau du receveur.

La limite supérieure du coefficient de concentration dépend du fait que le concentrateur est tridimensionnel (paraboloïde par exemple) ou bidimensionnel (cylindro-parabolique par exemple). Son calcul tient compte des paramètres décrits par la figure 2.1 tels que :

R : la distance Soleil - terre $\approx 149\,637\,000$ km

r : le rayon apparent du soleil $\approx 696\,700$ km

θ_s : le demi angle de sommet que fait la distance et le rayon du soleil $\approx 0,266^\circ$ ou $\approx 4,65 \cdot 10^{-3}$ rad.

Sous les hypothèses du soleil, de la terre et des composants du collecteur étant tous assimilables à des corps noirs d'une part, de forme et de réflectivité parfaite du concentrateur d'autre part, la quantité de radiations totale émise par le soleil est :

$$Q_S = 4\pi r^2 \sigma T_s^4 \quad (2.2)$$

La fraction de quantité de ces radiations du soleil qui arrive sur le concentrateur est :

$$Q_{S \rightarrow A_c} = A_c \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \quad (2.3)$$

Et la quantité de radiations au niveau du receveur est :

$$Q_{A_r \rightarrow S} = A_r \sigma T_s^4 E_{A_r \rightarrow S} \quad (2.4)$$

Avec :

$$\sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{n^2 k^4}{h_p^3 v_0^2} \quad (2.5)$$

et les paramètres :

- T_s : Température du soleil $\approx 5\,800$ K
- $E_{A_r \rightarrow S}$: Coefficient de conduction ≤ 1
- k : Constante de Boltzmann $\approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K
- h_p : Constante de Planck $\approx 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s
- v_0 : Vitesse de la lumière dans le vide
- n : Indice de transparence
- σ : Coefficient de Stephan - Boltzmann $\approx 5,667 \cdot 10^{-8} \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$.

Les deux équations (2.3) et (2.4) page précédente donnent un coefficient de concentration géométrique pour un concentrateur parabolöide $C_{g(Par_3D)}$ et cylindro-parabolique $C_{g(Par_2D)}$ dans les conditions optimales ($E_{A_r \rightarrow S} = 1$; $n=1$) :

$$C_{g(Par_3D)} = \frac{A_c}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{\sin^2 \phi}{\sin^2 \theta_s} \quad (2.6)$$

$$C_{g(Par_2D)} = \frac{\sin \phi}{\sin \theta_s} \quad (2.7)$$

Remarque :

Le calcul de du coefficient de concentration géométrique C_g par le rapport des quantités de radiation (*Méthode thermodynamique*), dans les conditions de pertes négligeables, aboutit également à un rapport de sections (*Méthode géométrique*) . C'est ce résultat qui sera désormais utilisé pour la suite (Rabl, 1976, Duffie and Beckman, 1980, Pronovost, 2010).

Le tableau 2.1 page suivante fait l'état des coefficients de concentration géométrique maxima selon les formes géométriques des concentrateurs les plus communément utilisés avec :

- $C_{g(Cir_3D)}(\phi)$: Coefficient de concentration géométrique d'un concentrateur hémisphérique défini en fonction du demi angle ϕ .
- $C_{g(Cir_3D)}(y)$: Coefficient de concentration géométrique d'un concentrateur hémisphérique défini en fonction de y , la position sur l'axe-receveur conique.
- $C_{g(CPC_3D)}$: Coefficient de concentration géométrique d'un concentrateur parabolique composé (CPC).

TAB : 2.1 – Coefficient de concentration géométrique selon le concentrateur

Concentrateur	Équation concentration géométrique	$C_{g_{Max}}$: valeurs maxi	Observations
Parabolique 3D	$C_{g(Par_3D)} = \frac{\sin^2 \phi}{\sin^2 \theta_s}$	46 248 (Pour $\phi = 90^\circ$)	θ_s : demi-angle de sommet entre distance et rayon du soleil ($\theta_s \approx 4,65 \cdot 10^{-3} \text{rad}$)
Parabolique 2D	$C_{g(Par_2D)} = \frac{\sin \phi}{\sin \theta_s}$	215	Idem pour θ_s et ϕ
Circulaire 3D ¹	$C_{g(Cir_3D)}(\phi) = \frac{4}{\sin^4 \theta_s} \cos^4 \phi$ ou $C_{g(Cir_3D)}(y) = \frac{1}{4(y-1)^4 \sin \theta_s}$	≈ 860	Pour $\phi \rightarrow 0$ ou $y \rightarrow 0,5$
CPC 3D	$C_{g(CPC_3D)} = \frac{1}{\sin^2(\theta_a)}$	24,11 pour $\theta_a = 11,75^\circ$	θ_a : demi-angle d'acceptation ($\theta_a = 11,75^\circ$ ou $23,5^\circ$)
CPC 2D	$C_{g(CPC_2D)} = \frac{1}{\sin(\theta_a)}$	4,91 pour $\theta_a = 11,75^\circ$	Idem pour θ_a

Ce tableau donne les équations des coefficients de concentration géométrique des dispositifs courants, leurs valeurs maximales et les conditions limites d'obtention des ces valeurs maximales.

D'ordre général, au vue des valeurs maximales qui sont présentées dans ce tableau, l'on constate que le coefficient de concentration géométrique d'un dispositif 3D est le carré du coefficient de concentration géométrique de ce même dispositif en 2D :

$$C_{g(PAR_3D)} = [C_{g(PAR_2D)}]^2 \quad (2.8)$$

$$C_{g(CPC_3D)} = [C_{g(CPC_2D)}]^2 \quad (2.9)$$

1. Equations (A.19) et (A.20) en Annexe.6 page XV

II BASE PHYSIQUE DE LA THÉORIE

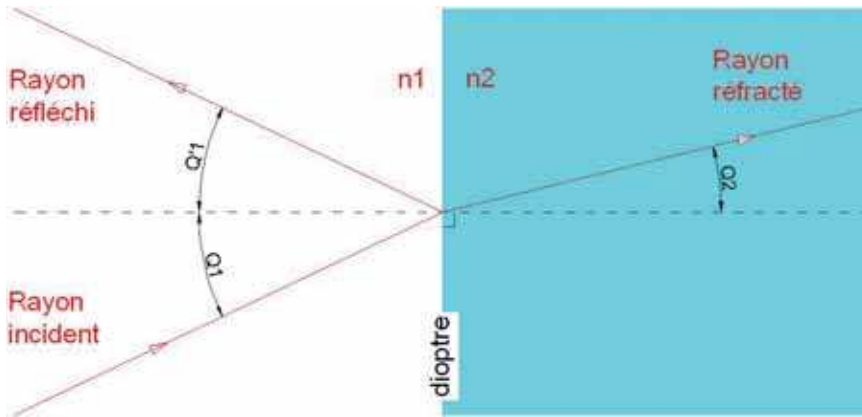


FIG : 2.2 – Réflexion - réfraction d'un rayon lumineux

Un rayon lumineux arrivant sur un dioptre séparant deux milieux d'indices de réfraction n_1 et n_2 est soit réfléchi, soit réfracté selon la loi de Snell-Descartes.

Lorsqu'un rayon lumineux arrive d'un milieu 1 vers un autre milieu 2, selon le degré de transparence et de densité de celui-ci, une partie de ce rayon sera réfléchi, et une autre partie sera réfrac-

tée comme indiqué sur la figure 2.2. Ce phénomène de réflexion - réfraction est celui utilisé pour la conception des modèles d'exploitation de l'énergie solaire. Il repose sur les lois de Snell-Descartes. Il s'en dégage alors deux (2) types de systèmes : les systèmes *réflectifs* qui utiliseront la propriété réfléchive des matériaux, et les systèmes *dioptriques* qui utiliseront leur propriété réfractrice.

II.1 Les systèmes réflectifs

Les systèmes réflectifs parfaits répondent à la loi de réflexion parfaite, telle que tout rayon venant sur un miroir, quelque soit la forme de celui-ci, reparte avec un angle de réflexion identique à l'angle d'incidence par rapport à la normale de la surface de ce miroir, comme indiqué sur la figure 2.3 page suivante.

Le système de réflexion qui décrit le mieux le concentrateur solaire est la section parabolique, car les rayons lumineux réfléchis convergent en un point focal F. Cette

parabole a donc pour équation :

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad (2.10)$$

Avec f : distance focale correspondant sur la figure 2.4 à la distance OF.

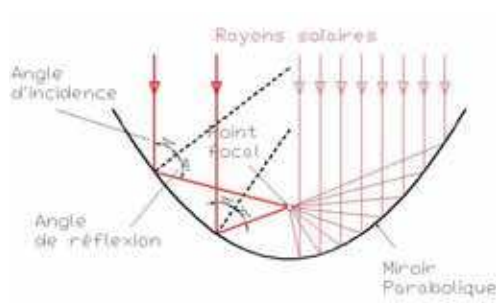


FIG : 2.3 – Effet miroir parfait

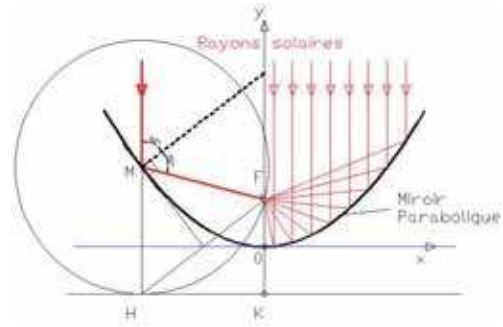


FIG : 2.4 – Parabole et réflexion

*Une réflexion sur un miroir parfait donne un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence.
Les tangentes de réflexion contigües définissent une parabole.*

En effet, cela s'explique géométriquement par la formation d'un triangle isocèle de base HF et de sommet M, tel que H évolue sur la droite horizontale passant par K, point situé sur la verticale de O et distant de celui-ci de la valeur f . De cette façon, la trajectoire de M, avec $OM = HM$ est une parabole. Un constat permet de voir que cette parabole est également la localisation des tangentes de réflexion des rayons lumineux.

II.2 Les systèmes dioptriques

Tout milieu transparent laisse passer la lumière. Cependant, à cause de la densité du matériau de ce milieu, la vitesse de la lumière est ralentie. Le milieu ambiant est caractérisé par son indice de réfraction n_1 , le milieu traversé est caractérisé par son indice de réfraction n_2 , et l'interface entre deux milieux d'indices différents est appelée *dioptre*. En général, l'indice de réfraction n se définit comme suit :

$$n = \frac{v_0}{v_1} \quad (2.11)$$

Avec :

- v_0 : vitesse de la lumière dans le vide

- v_1 : Vitesse de la lumière dans le milieu 1

Tout rayon incident arrivant d'un angle Q_1 par rapport à la normale de la surface du milieu est dévié lors de sa traversée du milieu d'indice n_2 d'un angle Q_2 tel que :

$$n_1 \sin Q_1 = n_2 \sin Q_2 \quad (2.12)$$

On remarque que le rayon réfracté se rapproche de la normale lorsque $n_1 < n_2$.

Avec ce principe, la fabrication d'une lentille conduit à l'équation suivante en ce qui concerne l'objet et son image (Figure 2.5) :

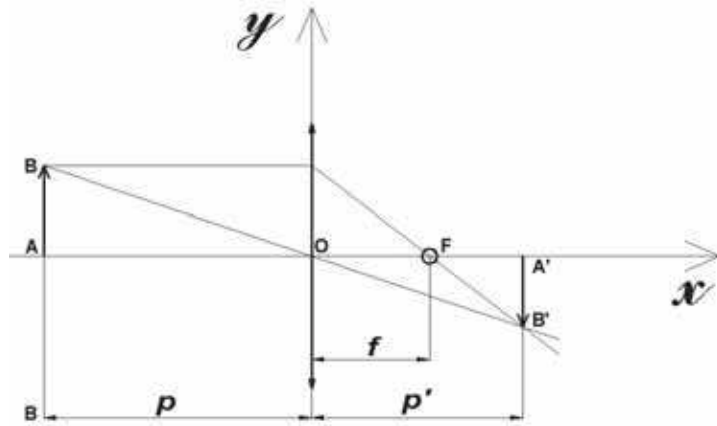


FIG : 2.5 – Lentille convexe

Un objet AB placé à la distance P d'une lentille convexe de foyer f crée une image inversée A'B' à une distance P'.

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f} \quad (2.13)$$

Avec :

- p : Distance de la lentille à l'objet
- p' : Distance de la lentille à l'image
- f : Distance focale de la lentille

Avec donc une distance extrêmement grande de l'objet par rapport à la lentille (cas du soleil : p très grande), la distance $p' \approx f$, ce qui veut dire que l'image se forme quasiment au niveau du foyer.

III FORMATION DE L'IMAGE AU NIVEAU DU FOYER

Il serait intéressant de savoir quelle est la taille de l'image du soleil formée au foyer des concentrateurs paraboliques. Ainsi, le dispositif - receveur pourra être dimensionné en consé-

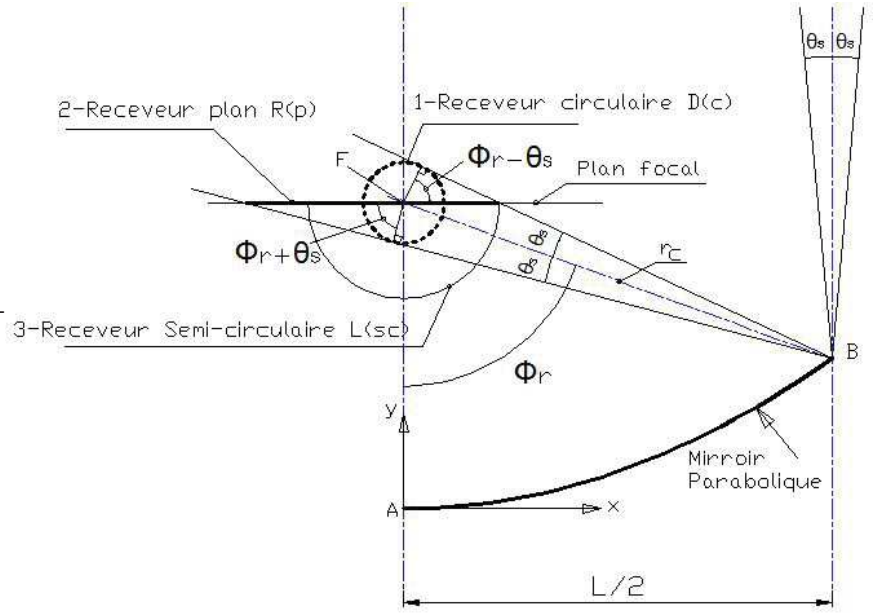


FIG : 2.6 – Dimension de l'image

quence, comme indiqué sur la figure 2.6.

Les rayons solaires après réflexion forment une tache caractérisée par le demi angle θ_s au point focal. Il y a trois positionnements possibles d'un receveur de récupération totale de l'image produite par le soleil au foyer. Soit l'on dispose un receveur circulaire (1), plan (2) ou semi-circulaire (3).

Le soleil, de par sa taille, est réfléchi sur le miroir parabolique tel que son reflet forme un cône de demi-angle de sommet $\theta_s \approx 4,65 \cdot 10^{-3}$ rad.

Le demi-angle ϕ_r (Duffie and Beckman, 1980) dont le sommet est le point focal et qui décrit la largeur d'exposition L peut être exprimé comme suit :

$$\tan \phi_r = \left[\frac{8 \frac{f}{L}}{16 \left(\frac{f}{L} \right)^2 - 1} \right] \quad (2.14)$$

Avec :

- L : la largeur d'exposition
- f : la distance focale. f = distance (AF)

Le *Diamètre apparent* du soleil $D_{ap(sol)}$ formé au foyer du concentrateur sera :

$$D_{ap(sol)} = 2r_r \sin \theta_s \quad (2.15)$$

Avec r_r : *Rayon maximum du concentrateur parabolique*. r_r = distance (BF). Ce rayon est obtenu de 2 manières :

- En fonction de la largeur d'exposition L : $r_r(L) = \frac{L}{2 \sin \phi_r}$.
- En fonction de la distance focale f : $r_r(f) = \frac{2f}{1 + \cos \phi_r}$.
- Ainsi, pour un *receveur circulaire* de diamètre $D_{(c)}$ à disposer au niveau du plan focal :

$$D_{(c)} = D_{ap(sol)} \quad (2.16)$$

D'où :

$$D_{(c)}(L) = \frac{L \sin \theta_s}{\sin \phi_r} \text{ ou } D_{(c)}(f) = \frac{4f \sin \theta_s}{1 + \cos \phi_r} \quad (2.17)$$

- Ensuite, pour un *receveur semi-circulaire* de longueur d'arc $L_{(sc)}$ à disposer au niveau du plan focal :

$$L_{(sc)} = \frac{\pi D_{ap(sol)}}{2 \cos(\phi_r - \theta_s)} \quad (2.18)$$

D'où :

$$L_{(sc)}(L) = \frac{\pi L \sin \theta_s}{2 \sin \phi_r \cos(\phi_r - \theta_s)} \text{ ou } L_{(sc)}(f) = \frac{2\pi f \sin \theta_s}{(1 + \cos \phi_r) \cos(\phi_r - \theta_s)} \quad (2.19)$$

- Enfin, pour un *receveur plan* de largeur $L_{(p)}$ à disposer au niveau du plan focal :

$$L_{(p)} = \frac{D_{ap(sol)}}{\cos(\phi_r + \theta_s)} \quad (2.20)$$

D'où :

$$L_{(p)}(L) = \frac{L \sin \theta_s}{\sin \phi_r \cos(\phi_r + \theta_s)} \text{ ou } L_{(p)}(f) = \frac{4f \sin \theta_s}{(1 + \cos \phi_r) \cos(\phi_r + \theta_s)} \quad (2.21)$$

On retrouve ainsi le coefficient de concentration géométrique en utilisant l'équation (2.17) page précédente :

$$C_{g(Par_2D)} = \frac{L}{D_{(c)}(L)} = \frac{\sin \phi_r}{\sin \theta_s} \quad (2.22)$$

Nota Bene

Toutes ces équations ci-dessus sont données pour une **section parabolique plane**. Le calcul des concentrateurs paraboliques 2D ou 3D s'appuiera donc sur la même méthodologie.

IV QUELQUES DÉFINITIONS SUR LE COEFFICIENT DE CONCENTRATION

- On définira le **coefficient de concentration géométrique** $= C_g$, d'un concentrateur traduisant le rapport des sections d'exposition du receveur et du concentrateur, comme récapitulé dans le tableau 2.1 page 52, ainsi que leurs valeurs maximales :

$$C_g = \frac{A_c}{A_r} = \frac{L}{D_{(c)}(L)}$$

$$C_{g(Par_2D)} \approx \frac{\sin \phi_r}{\sin \theta_s}; \dots C_{g(Par_3D)} \approx \frac{\sin^2 \phi_r}{\sin^2 \theta_s}; \quad (2.23)$$

- On définira également un **coefficient de concentration géométrique moyen** $= C_{g_{moy}}$ d'un concentrateur traduisant le rapport des sections d'exposition du receveur et du concentrateur, tel que la section du receveur est parallèle à la section d'ouverture du concentrateur (Figure 2.6 page 56). Ce coefficient $C_{g_{moy}}$ se calcule en utilisant l'équation (2.21) page 57.

$$C_{g_{moy}(Par_2D)} = \frac{L}{L_{(p)}(L)} = \frac{\sin \phi_r \cos(\phi_r + \theta_s)}{\sin \theta_s} \quad (2.24)$$

Avec $\theta_s \ll \phi_r$, alors $\cos(\phi_r + \theta_s) \approx \cos(\phi_r)$. L'on peut faire des simplifications. $C_{g_{moy}}$ dépend essentiellement de la section du receveur. Lorsque celle-ci est plane rectangulaire (2D) ou circulaire (3D), l'on obtient :

$$C_{g_{moy}(Par_2D)} \approx \frac{\sin(2\phi_r)}{2 \sin \theta_s}; \dots C_{g_{moy}(Par_3D)} \approx \frac{\sin^2(2\phi_r)}{4 \sin^2 \theta_s}; \quad (2.25)$$

De par la valeur du demi-angle ϕ_r à laquelle $C_{g_{moy}}$ est optimum, le calcul de ce coefficient est plus adapté au dimensionnement des collecteurs avec *receveur cavité* (Stine et al., 1986). En pratique, pour le cas spécifique d'un concentrateur parabolique, C_g doit toujours évoluer en fonction du demi angle ϕ_r jusqu'à ce que

celui-ci tende vers 180° , alors que $C_{g_{moy}}$ évolue jusqu'à un angle ϕ_r maximum de 90° . C'est en effet seulement à ces valeurs de $\phi_r \leq 90^\circ$ que les rayons pourront s'engouffrer dans la cavité. Les receveurs cavités sont présentés à la section V.1 page 63.

Si la section du receveur est bombée semi-cylindrique (2D) ou hémisphérique (3D), l'on obtient par l'équation (2.19) page 57 :

$$C_{g_{moy}(Par_2D)} = \frac{L}{L_{(sc)}(L)}$$

$$C_{g_{moy}(Par_2D)} \approx \frac{\sin(2\phi_r)}{\pi \sin \theta_s}; \dots C_{g_{moy}(Par_3D)} \approx \frac{\sin^2(2\phi_r)}{\pi^2 \sin^2 \theta_s}; \quad (2.26)$$

- Le **coefficient de concentration géométrique réel** $C_{gR}(\Delta)$ et **moyen réel** $C_{gR_{moy}}(\Delta)$ se définit en prenant en compte, l'effet additionnel d'un *demi-angle de dispersion* Δ sur l'image optique qui se forme au foyer. La section du receveur sera soustraite dans le cas du calcul du coefficient de concentration géométrique moyen réel $C_{gR_{moy}}(\Delta)$ si la face du dessus exposée au soleil n'est pas réceptive. En exemple et dans le cas d'un concentrateur Parabolique 2D :

$$C_{gR(Par_2D)}(\Delta) = \frac{\sin \phi_r}{\sin(\theta_s + \Delta)} \quad (2.27)$$

$$C_{gR_{moy}(Par_2D)}(\Delta) = \frac{\sin \phi_r \cos(\phi_r + \theta_s + \Delta)}{\sin(\theta_s + \Delta)} - 1 \quad (2.28)$$

- Le **coefficient de concentration optique (ou énergétique)** $= C_o$ est défini comme traduisant la brillance de l'image au niveau du receveur.

$$C_o = \frac{I_r}{I_c} \text{ avec } I_r = \frac{1}{A_r} \int I_r dA_r \quad (2.29)$$

- I_r : éclairement solaire direct moyen sur la surface du receveur (en $W.m^{-2}$).
- I_c : éclairement solaire direct sur la surface d'ouverture du concentrateur (en $W.m^{-2}$).

Il existe un facteur ρ_e (facteur énergétique) ou ρ_o (facteur optique) établissant une relation entre le coefficient de concentration géométrique et le coefficient de concentration énergétique (ou optique) :

$$C_o = \rho_e C_g \text{ ou } C_o = \rho_o C_g. \quad (2.30)$$

- On définira également un **coefficient de concentration idéal (ou de Gauss)** $= C_{id}$, traduisant la concentration idéale d'un concentrateur.

$$C_{id} = \frac{A_c}{A_G} \text{ avec } A_G = \pi f^2 \theta_s^2 \quad (2.31)$$

Avec A_G : surface de l'image de Gauss du soleil formée au foyer du concentrateur (Figure 2.7).

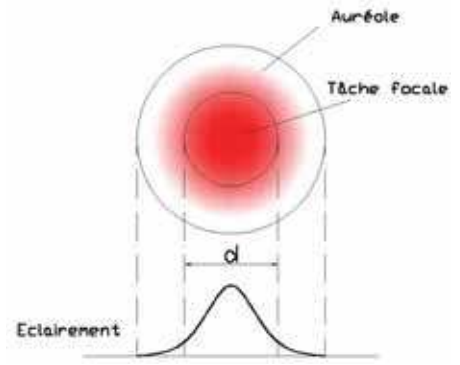


FIG : 2.7 – Image de Gauss

L'image de Gauss du soleil est appelée ainsi du fait que l'allure de la courbe d'éclairement est gaussienne.

Remarques :

1. Il sera adopté dans l'ensemble de ce document, la convention ϕ_r comme étant le *demi-angle* traduisant la surface d'exposition du concentrateur par rapport au point focal.
2. Il sera aussi adopté la convention $\theta_s \approx 0,266^\circ \approx 4,65 \cdot 10^{-3}$ rad comme étant le *demi-angle* de sommet formé par la distance du soleil à la terre et le rayon du soleil. Ce demi-angle θ_s traduisant le rayon apparent du soleil vu de la terre est très petit. Par conséquent, l'approximation $\sin \theta_s \approx \theta_s$ (**en Radian**) est généralement adoptée. Cette approximation est également adoptée dans ce document, notamment pour les valeurs du tableau 2.2 page suivante.

Le tableau récapitulatif 2.2 des coefficients de concentration géométrique moyen ainsi que leur valeur maximale est établi à titre comparatif.

TAB : 2.2 – Coefficient de concentration géométrique moyen selon le concentrateur

Concentrateur	Équation concentration géométrique moyen	$C_{g_{moy}}$: valeurs maxi	Obsevation
Parabolique 3D	$C_{g_{moy}(Par_3D)} = \frac{\sin^2(2\phi_r)}{4\theta_s^2}$	11 541 (pour $\phi_r=45^\circ$)	Receveur de forme <i>plane</i>
Parabolique 2D	$C_{g_{moy}(Par_2D)} = \frac{\sin(2\phi_r)}{2\theta_s}$	107 (idem : $\phi_r=45^\circ$)	Idem
	$C_{g_{moy}(Par_2D)} = \frac{\sin(2\phi_r)}{\pi\theta_s}$	≈ 68 (pour $\phi_r=45^\circ$)	Receveur de forme <i>circulaire</i>
Circulaire 3D	$C_{g_{moy}(Cir_3D)} = \left[\frac{\sin(2\phi_r)}{\sin \phi_r \sin^2(\frac{\phi_r}{4}) + 2\theta_s} \right]^2$	2 964 (pour $\phi_r=22^\circ$)	Receveur de forme <i>Plane</i>
Circulaire 2D	$C_{g_{moy}(Cir_2D)} = \frac{\sin(2\phi_r)}{\sin \phi_r \sin^2(\frac{\phi_r}{4}) + 2\theta_s}$	54 (idem : $\phi_r=22^\circ$)	Idem
Conique 3D	$C_{g_{moy}(Con_3D)} = \frac{\sin^2(2\delta_s)}{\theta_s}$	215 (pour $\delta_s=45^\circ$)	δ_s : demi-angle de sommet du cone
$\theta_s \approx 4,65 \cdot 10^{-3}$ rad : l'approximation $\sin \theta_s \approx \theta_s$ a été adoptée pour les équations de ce tableau.			

La même observation est à faire quand à la relation entre un système 3D et 2D :

$$C_{g_{moy}(CIR_3D)} = [C_{g_{moy}(CIR_2D)}]^2 \quad (2.32)$$

$$C_{g_{moy}(PAR_3D)} = [C_{g_{moy}(PAR_2D)}]^2 \quad (2.33)$$

V RECEVEURS ET TRANSFERTS DE CHALEUR

Le receveur est l'élément qui transformera en chaleur, les rayonnements électromagnétiques en provenance du concentrateur. C'est pourquoi, son positionnement ainsi que le choix technique adopté pour sa forme sont importants pour espérer le résultat attendu.

V.1 Positionnement des receveurs

Il y a principalement deux types de procédés de récupération de l'énergie au niveau du receveur, conduisant également à deux positionnements possibles : Ces sont les receveurs à surface cavité (Figure 2.8) et ceux à surface externe (Figure 2.9).

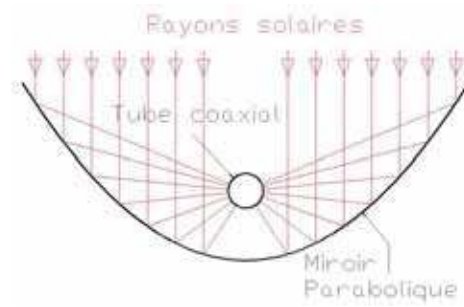
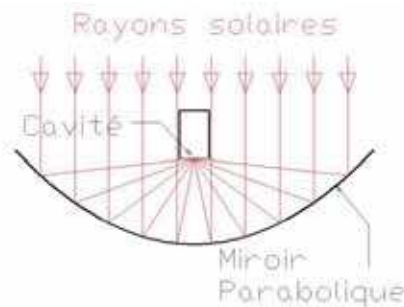


FIG : 2.8 – Receveur à surface cavité FIG : 2.9 – Receveur à surface externe

Le receveur à surface cavité (ou receveur cavité) récupère tous les rayons qui entrent dans sa cavité. Le receveur à surface externe récupère les rayons qui viennent sur sa surface externe.

1. Les receveurs à surface cavité :

Les rayonnements sont reçus à l'intérieur du receveur, et l'énergie est récupérée par un circuit disposé à l'intérieur ou autour de cette cavité dans laquelle circule un fluide calo-porteur liquide ou gazeux, comme indiqué sur la figure 2.8. Ce circuit peut être sous forme de serpentín tournant de façon hélicoïdale autour de la cavité (généralement pour les calo-porteurs liquides), ou sous forme de pointes offrant une surface de contact la plus grande possible afin que le transfert de chaleur soit favorisé (généralement pour les calo-porteurs gazeux).

2. Les receveurs à surface extérieur :

les rayonnements se projettent sur la surface externe du receveur. Il y a donc un fluide qui circule à l'intérieur de ce receveur et qui récupère de cette façon l'énergie thermique. L'exemple le plus évident est celui du concentrateur cylindro-parabolique qui projette sur un tube coaxial (Figure 2.9 page précédente).

V.2 les formes de receveurs à surface cavité

La forme du receveur est réalisée dans le but d'optimiser les échanges thermiques (Figure 2.10), (Yong et al., 2008, Mao et al., 2014). Les matériaux généralement utilisés pour sa conception ont les caractéristiques suivantes :

- Un facteur d'absorption voisin de 1
- Un facteur d'émission dans l'infrarouge aussi faible que possible
- Une bonne conductivité et un bon coefficient de diffusion thermique
- Une inertie thermique
- Une résistance chimique au fluide caloporteur qu'il contient.

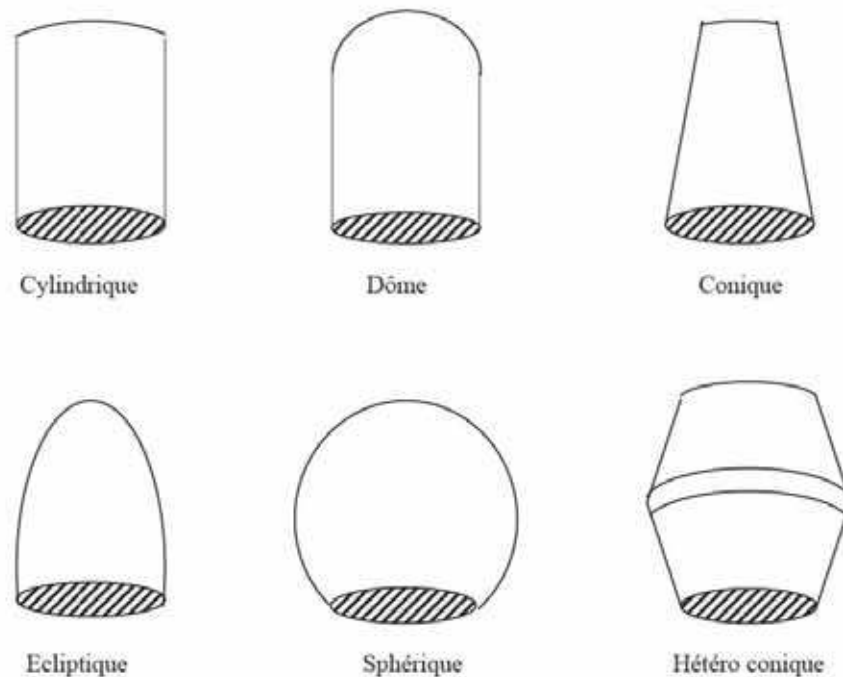


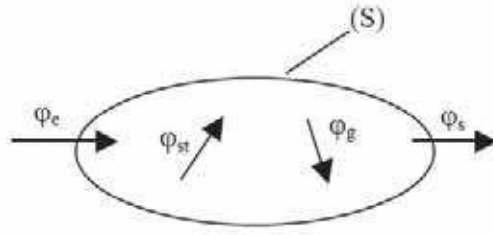
FIG : 2.10 – Formes de receveurs à surface cavité

V.3 Transfert de chaleur - Équations de base

(Jannot, 2012)

Soit un système (S) défini par ses limites dans l'espace selon le croquis (Figure 2.11).

Le bilan des énergies s'établit grâce au 1^{er} principe de la thermodynamique :



Avec :

- φ_e : flux de chaleur entrant
- φ_g : flux de chaleur générée
- φ_s : flux de chaleur sortant
- φ_{st} : flux de chaleur stockée

FIG : 2.11 – Bilan énergétique

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st} \quad (2.34)$$

Si cette équation devait être appliquée au niveau du receveur où il n'y a ni chaleur générée φ_g , ni chaleur stockée φ_{st} , elle deviendrait :

$$\varphi_e = \varphi_s \quad (2.35)$$

1. Conduction :

Hypothèse de Fourier : *la densité de flux $\varphi_{(Cd)}$ est proportionnelle au gradient de température.*

$$\vec{\varphi}_{(Cd)} = -\lambda S \vec{\text{grad}}(T) \quad (2.36)$$

Avec :

- $\varphi_{(Cd)}$: Flux de chaleur transmis (en W)
- λ : Conductivité thermique du milieu (en $Wm^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
- S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (en m^2)

2. Convection :

Loi de Newton : *Transfert de chaleur entre un solide et un fluide : l'énergie $\varphi_{(Cv)}$ est transmise par le déplacement du fluide.*

$$\varphi_{(Cv)} = h_{Cv} S (T_p - T_\infty) \quad (2.37)$$

Avec :

- h_{Cv} : Coefficient de transfert de chaleur par convection (en $W m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$)
- T_p : Température de surface du solide (en $^\circ C$)
- T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (en $^\circ C$)
- S : Aire de la surface de contact solide/fluide (en m^2)

REMARQUE : La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h_{Cv} est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide.

★ $h_{Cv} = f(Re, Pr)$ en convection forcée.

★ $h_{Cv} = f(Gr \text{ ou } Ra, Pr)$ en convection naturelle.

Avec :

- ★ Re : Nombre de Reynolds.
- ★ Ra : Nombre de Rayleigh.
- ★ Pr : Nombre de Prandtl.
- ★ Gr : Nombre de Grashof.

3. Rayonnement :

$\varphi_{(Ry)}$ est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de transferts thermiques, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas, il existe la relation :

$$\varphi_{(Ry)} = \sigma \xi_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (2.38)$$

Avec :

- σ : Constante de Stephan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$).
- ξ_p : Facteur d'émission de la surface

CONCLUSION SUR L'ÉTUDE THÉORIQUE.

L'étude théorique des concentrateurs a permis de passer en revue les phénomènes optiques et géométriques qui entrent en jeux dans la concentration. Des équations mathématiques ont été établies suite à l'analyse des phénomènes physiques. Des tableaux récapitulatifs sur le coefficient de concentration géométrique et géométrique moyen des concentrateurs les plus courants ont été présentés, permettant une comparaison des valeurs maximales obtenues de ces coefficients. Une définition plutôt exhaustive des coefficients de concentration a été également présentée. L'étude passe finalement en revue les receveurs à disposer au foyer et les méthodes optimales pour leur conception. Les phénomènes d'échange de chaleur ont été brièvement expliqués.

En utilisant les mêmes outils mathématiques et physiques, le dispositif choisi sera dimensionné et réalisé conséquemment.

Chapitre 3

CONCEPTION ET RÉALISATION DU DISPOSITIF

INTRODUCTION.

Dans ce chapitre, une étude approfondie du concentrateur hémisphérique sera réalisée. Son coefficient de concentration géométrique sera recalculé selon la méthode de juxtaposition, Des expressions simplifiées de ces équations seront établies. Son coefficient de concentration géométrique moyen sera calculé par la méthode de la caustique, permettant de définir la position de son plan (P) de moindre diffusion et la dimension de l'orifice du receveur cavité à disposer au foyer. Puis, ces coefficients de concentration géométrique et géométrique moyen seront comparés avec ceux des concentrateurs paraboliques 2D et 3D. Enfin, deux prototypes, ayant chacun une disposition du receveur au foyer différente, seront dimensionnés et conçus.

I ÉTUDE DU CONCENTRATEUR HÉMISPHERIQUE

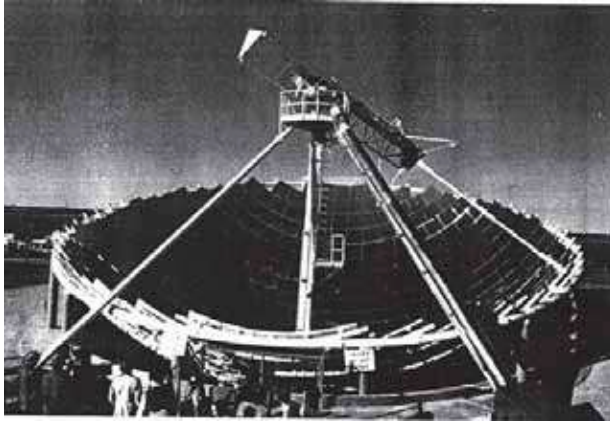


FIG : 3.1 – Concentrateur hémisphérique

*(Source : Stine et al., 1986, Courtesy of Santa
National Laboratories. Construit à : Crosbyton -
Texas - USA)*

Le concentrateur hémisphérique s'impose de plus en plus comme moyen de cuisson solaire au niveau international. Développé surtout en Inde pour la cuisine solaire dans les cantines scolaires, le fait que son bol reste fixe le rend moins vulnérable que les autres concentrateurs face aux intempéries. De plus, l'on peut atteindre des températures de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ au point chaud (Figure 3.1).

On note deux configurations d'utilisation du système à concentration hémisphérique :

1. Le concentrateur hémisphérique avec receveur à surface externe (Figure 3.2).
2. Le concentrateur hémisphérique avec receveur à surface cavité (Figure 3.3).

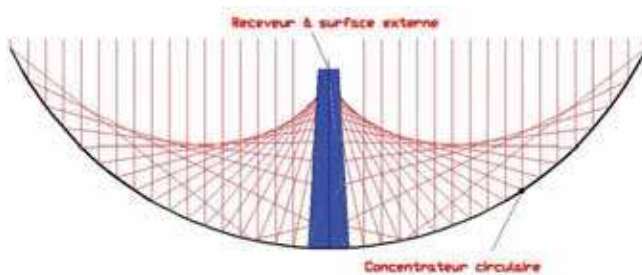


FIG : 3.2 – Receveur à surface externe

Le receveur à surface externe d'un concentrateur hémisphérique est un cône.

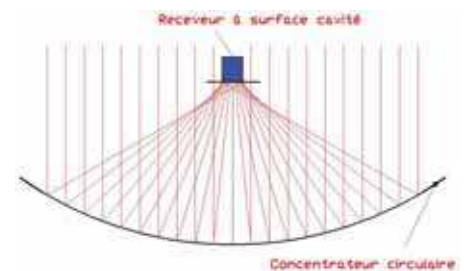


FIG : 3.3 – Receveur à surface cavité

On peut également disposer un receveur cavité sur concentrateur hémisphérique.

I.1 Concentrateur hémisphérique avec receveur à surface externe

Le concentrateur hémisphérique ne concentre pas en un point. Il concentre sur l'axe parallèle aux rayons solaires et passant par le centre de la sphère. C'est donc sur cet axe qu'il faut disposer le receveur.

Une étude montre que la position de réflexion sur l'axe est

obtenue par le calcul suivant *Le concentrateur hémisphérique focalise sur un axe. Au dela d'un angle $\phi \geq 60^\circ$, Il y a des réflexions multiples.* (Figure 3.4).

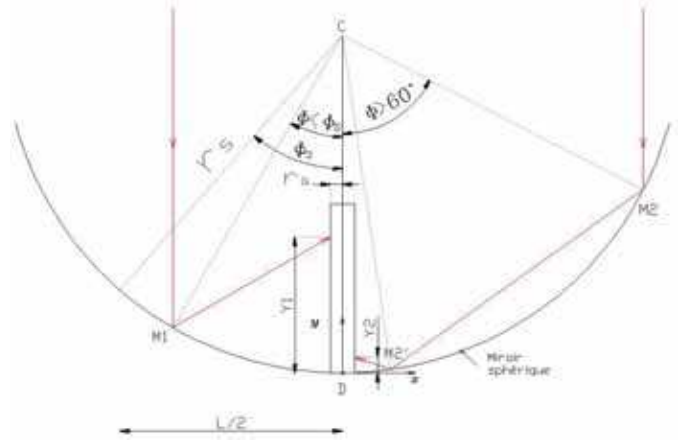


FIG : 3.4 – Caractéristiques optiques

$$Y(\phi, n) = \sqrt{1 - R^2} + (-1)^n \frac{\sin \phi}{\sin(2n\phi)} - R \cot(2n\phi) \quad (3.1)$$

Avec (El-Refaie, 1987, Ng et al., 2012, Bouguetaia, 2013, Sulaiman et al., 1997) :

- ★ $Y(\phi, n)$: ordonnée de réflexion sur l'axe-receveur.
- ★ n : nombre de réflexions du rayon incident sur la surface du concentrateur.
- ★ r_s : Rayon du concentrateur hémisphérique.
- ★ r_a : Rayon de l'axe-receveur cylindrique du concentrateur hémisphérique.
- ★ ϕ : Angle variable traduisant la position du rayon incident par rapport à l'axe-receveur.

Pour un demi-angle $\phi \geq 60^\circ$, le rayon solaire connaît de multiples réflexions avant d'atteindre sa cible. Il se projette cependant toujours sur l'axe. Le nombre de réflexion par rapport à l'angle d'incidence du rayon est donnée par :

$$n = \left\lceil \frac{\phi - \arcsin R}{180 - 2\phi} \right\rceil + 1 \quad (3.2)$$

Très souvent, la valeur entre crochet est arrondie à la valeur inférieure pour obtenir un nombre entier de réflexions dans cette équation.

Une équation de détermination du rayon minimum R_a du receveur à disposer sur l'axe est proposée (Ng et al., 2012, El-Refaie, 1987)¹. L'on y perçoit une volonté d'optimisation du receveur en tenant compte du demi angle $\theta_s \approx 4,65 \cdot 10^{-3}$ rad caractérisant l'image optique du soleil, et en adoptant le rapport maximum des rayons là où l'image optique est la plus large.

$$R_a \geq r_s \frac{4,65 \cdot 10^{-3} \sin(2n\phi) \left[(n-1) \frac{\sin(2\phi)}{\sin \phi} + \frac{\sin((2n-1)\phi)}{\sin(2n\phi)} \right]}{\sin(2n\phi) - (-1)^n 4,65 \cdot 10^{-3}} \quad (3.3)$$

Cependant, si l'on se réfère à l'image optique formée le long de l'axe, l'on constate que la distance entre le point de réflexion sur le concentrateur et le point de réception sur le receveur varie de $\frac{r_s}{2}$ à r_s (Figure 3.5 page suivante).

Remarques :

- Le passage de r_a à R_a est motivé par le fait que ce rayon R_a soit établi en rapport avec *l'image optique* du soleil sur le receveur.
- θ_s est le demi angle caractérisant l'image du soleil. $\theta_s \approx 4,65 \cdot 10^{-3}$ rad.
(Demi-angle sous lequel on voit le rayon du soleil depuis la terre).

1. Optimisation du receveur :

Pour une première optimisation du receveur et en considérant une évolution de sa section en fonction de la distance de projection, on constate que l'axe-receveur doit avoir la forme d'un cône tronqué avec la base proche de la surface du concentrateur hémisphérique et le sommet au niveau du demi-rayon de l'hémisphère. L'on obtient ainsi donc comme caractéristiques du receveur en forme de cône tronqué :

- ★ $R_{a1} = \frac{r_s}{2} \sin \theta_s$ à sa partie supérieure proche du demi rayon de l'hémisphère.

1. Les équations sont données en considérant $R = \frac{r_a}{r_s}$

★ $R_{a2} = r_s \sin \theta_s$ à sa partie inférieure proche de la surface du concentrateur.

★ $h_a = \frac{r_s}{2}$: hauteur du cone-receveur.

Une équation qui fait évoluer le rayon R_a en fonction de l'image optique du soleil peut être établie comme suit :

$$R_a(\phi, n) = -r_s(-1)^n \frac{\sin \phi}{\sin(2n\phi)} \sin \theta_s \quad (3.4)$$

$R_a(\phi, n)$ est également fonction de $n(\phi)$ qui selon l'équation précédente est fonction de R_a . Il faut alors redéfinir $n(\phi)$:

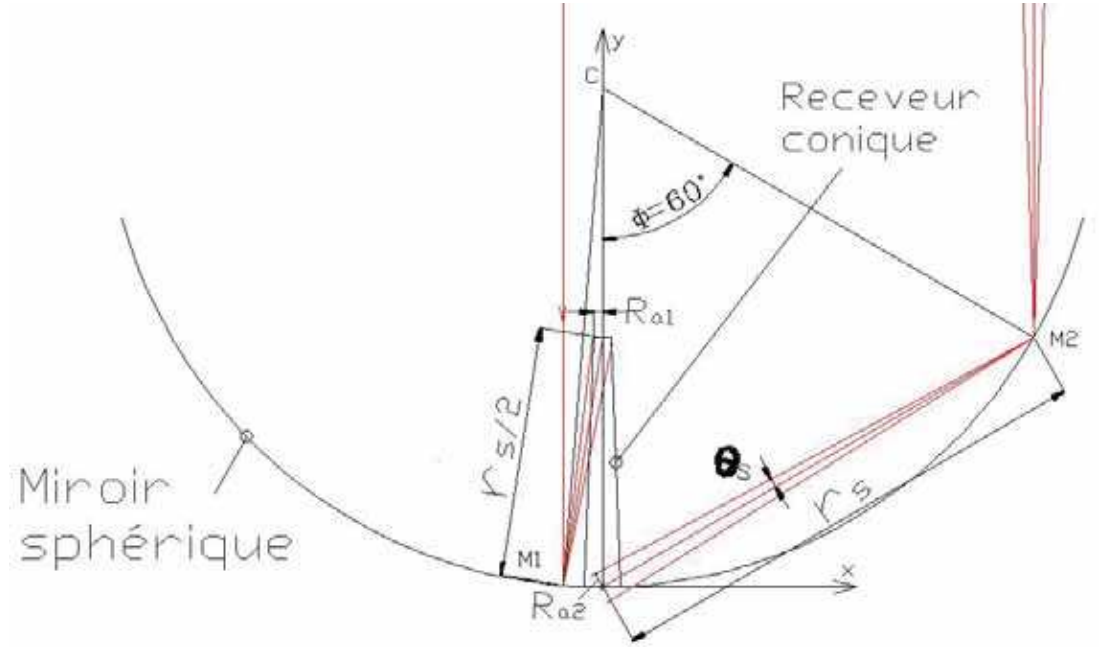


FIG : 3.5 – Récepteur conique

Pour les petits angles $\phi \approx 0^\circ$, la distance de réflexion est proche de $\frac{r_s}{2}$ permettant ainsi de définir R_{a1} le rayon de sommet du cône receveur. Pour un angle $\phi = 60^\circ$, la distance de réflexion est de r_s et permet de définir R_{a2} , le rayon de la base du cône receveur.

2. Redéfinition de $n(\phi)$:

Le rayon R_{a2} de la base du receveur en forme conique est proportionnel au rayon r_s de l'hémisphère, ϕ évoluant sur l'intervalle $[\theta_s ; 90^\circ]$. $n(\phi)$ peut s'écrire alors :

$$n(\phi) = \text{Arrondi.inf} \left\{ \left[\frac{\phi}{180 - 2\phi} \right] + 1 \right\} \quad (3.5)$$

3. Redéfinition de $Y(\phi, n)$:

L'image optique étant proportionnelle au rayon du receveur, la tache optique couvre totalement celui-ci tel que $Y(\phi, n)$ peut être défini comme suit :

$$Y(\phi, n) = r_s \left[1 + (-1)^n \frac{\sin \phi}{\sin(2n\phi)} \right] \quad (3.6)$$

4. Définition du coefficient de concentration géométrique $C_{g(Cir_3D)}$:

Le coefficient de concentration géométrique $C_{g(Cir_3D)}$ le long du receveur est l'interpolation des rapports de la surface de réflexion élémentaire du concentrateur sur la surface élémentaire de projection au receveur. Ces surfaces peuvent être définies comme suit :

★ Surface élémentaire de réflexion du concentrateur :

$$S_{sph}(\phi_i) = \pi r_s^2 [\sin^2(\phi_{i+1}) - \sin^2(\phi_i)] \quad (3.7)$$

★ Surface élémentaire de réception au niveau du receveur :

$$S_{rec}(\phi_i, n) = 2\pi \frac{R_a(\phi_{i+1}, n) + R_a(\phi_i, n)}{2} [Y(\phi_{i+1}, n) - Y(\phi_i, n)] \quad (3.8)$$

L'on obtient un coefficient de concentration géométrique élémentaire $C_g(\phi_i)$ de la forme :

$$C_g(\phi_i, n) = \frac{S_{sph}(\phi_i)}{S_{rec}(\phi_i, n)} \quad (3.9)$$

$$\text{Et : } C_{g(Cir_3D)}(\phi_i, n) = \frac{1}{\sin \theta_s} \frac{\sin^2(\phi_{i+1}) - \sin^2(\phi_i)}{|A^2(\phi_{i+1}, n) - A^2(\phi_i, n)|} \quad (3.10)$$

$$\text{Avec : } A(\phi, n) = \frac{\sin \phi}{\sin(2n\phi)} \quad (3.11)$$

$C_{g(Cir_3D)}(\phi_i, n)$ est une équation itérative qui détermine le coefficient de concentration géométrique en un endroit précis du receveur. Le paramètre i varie sur l'intervalle de $\phi \in [\theta_s ; 90^\circ]$ selon le pas de discrétisation choisi.

Avec les moyens de calcul numériques disponibles et une nouvelle expression en fonction de y (avec $y = \frac{Y}{r_s}$ et donc $0 \leq y \leq 0,5 - \sin \theta_s$) plutôt que de ϕ , la courbe du coefficient de concentration géométrique $C_{g(Cir_3D)}(y, n)$ le long du receveur peut être tracée (Figure 3.6).

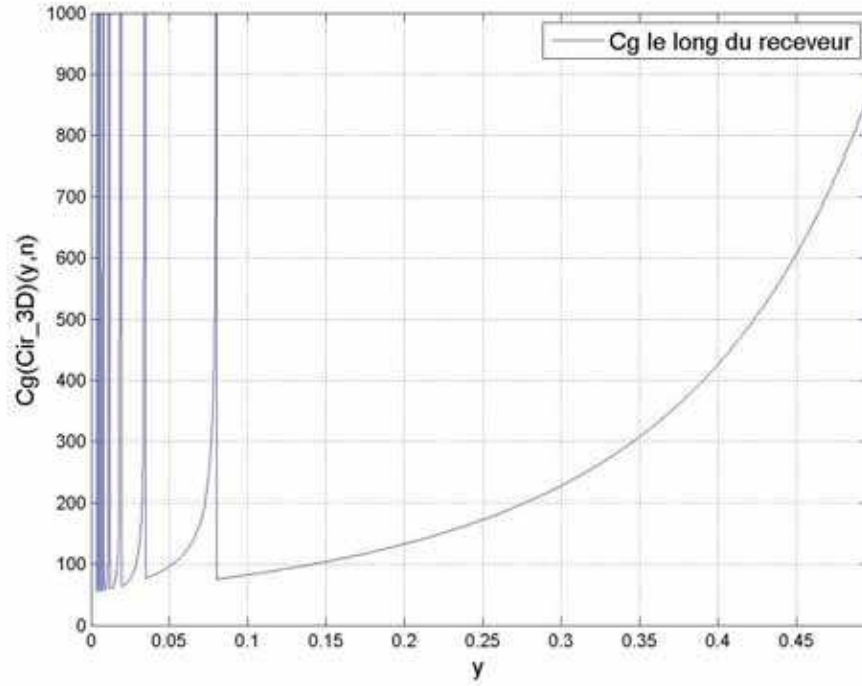


FIG : 3.6 – Coefficient de concentration géométrique (C_g) le long de l'axe y

$$C_{g(Cir_3D)}(y, n); y \in [0; 0,5 - \sin \theta_s]$$

$y = 0$ correspond à la base du cône receveur. Les pics sur la courbe correspondent aux multiples réflexions. Au delà de $y \geq 0.08$, la courbe croît de 76 à 860 où elle atteint son maximum au voisinage de $y \approx 0,5$.

L'on note de multiples réflexions à la base du cône receveur jusqu'à $y \approx 0,08$ où le coefficient prend une valeur optimale de 76. Puis, il croît progressivement jusqu'à atteindre un maximum au niveau du sommet du cône receveur proche du demi rayon de l'hémisphère : $C_{gMax(Cir_3D)}(y = 0,5 - \sin \theta_s) \approx 860$.

Observation :

Les multiples réflexions génèrent des pics de concentration au voisinage de l'extrémité inférieure du cône receveur, créant ainsi une zone d'échauffement très voisine de la surface du concentrateur. Cet échauffement ne doit pas être négligé

lors de la conception du concentrateur, car $C_{g(Cir_3D)}(y=0) \approx 54$.

5. **Simplification de la fonction $C_{g(Cir_3D)}(\phi, n)$:**

Comme tous les coefficients de concentration géométrique qui sont déterminés directement en fonction du paramètre ϕ , La fonction $C_{g(Cir_3D)}(\phi, n)$ peut elle aussi être exprimée en fonction de ϕ . Cette simplification est obtenue pour $n=1$, c'est à dire en excluant les multiples réflexions et en se focalisant exclusivement sur l'intervalle $[\theta_s ; 60^\circ]$ (ou le long de l'axe receveur, c'est à dire en fonction de y sur l'intervalle $[0 ; 0,5 - \sin \theta_s]$). L'on obtient donc les fonctions suivantes avec leurs tracés (Figures 3.7 et 3.8 page suivante) :

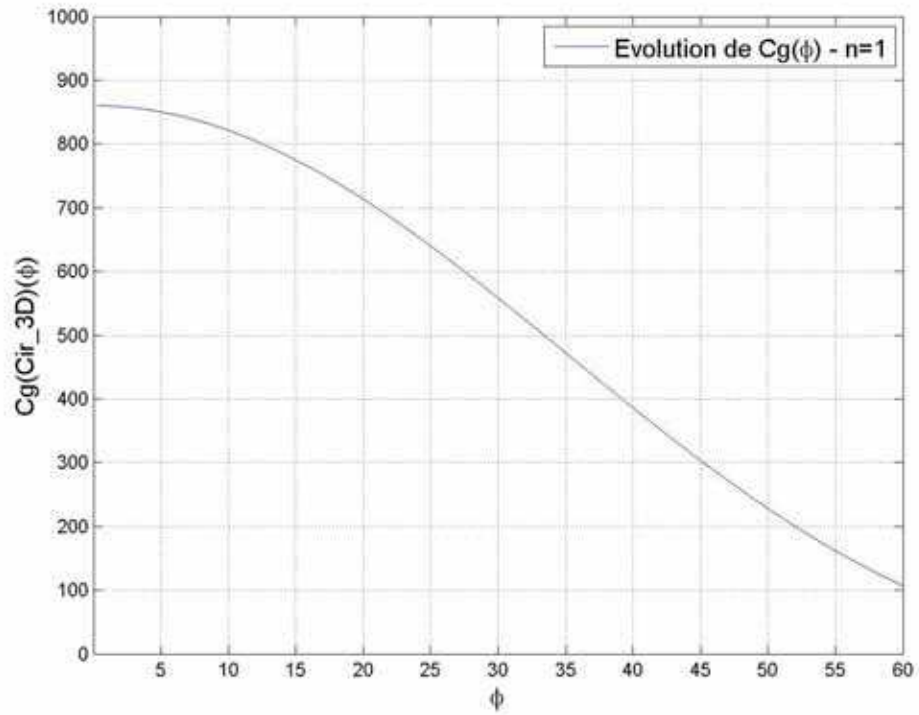


FIG : 3.7 – Coefficient de concentration géométrique (C_g) simplifié et fonction de ϕ

$$C_{g(Cir_3D)}(\phi) = \frac{4}{\sin \theta_s} \cos^4 \phi ; \phi \in [\theta_s ; 60^\circ]$$

Cette courbe est une simplification de la courbe itérative $C_{g(Cir_3D)}(\phi, n)$. Cette simplification est possible pour un angle $\phi \leq 60^\circ$, c'est-à-dire en dehors de la zone de multiples réflexions. La concentration décroît de 860 à 54 pour un angle $0 < \phi \leq 60^\circ$.

$$C_{g(Cir_3D)}(\phi) = \frac{4}{\sin \theta_s} \cos^4 \phi \quad (3.12)$$

$$C_{g(Cir_3D)}(y) = \frac{1}{4(y-1)^4 \sin \theta_s} \quad (3.13)$$

Le Coefficient de concentration est maximum à $\phi \approx \theta_s$, soit :

$$C_{gMax(Cir_3D)}(\phi = \theta_s) = C_{gMax(Cir_3D)}(y = 0,5 - \sin \theta_s) \approx \frac{4}{\sin \theta_s} \quad (3.14)$$

Les méthodologies d'obtention des fonctions sont expliquées en Annexe.6 page XV.

Cette courbe $C_{g(Cir_3D)}(\phi)$ décroît de 860 à 54. Elle est une simplification de la courbe itérative $C_{g(Cir_3D)}(\phi_i, n)$.

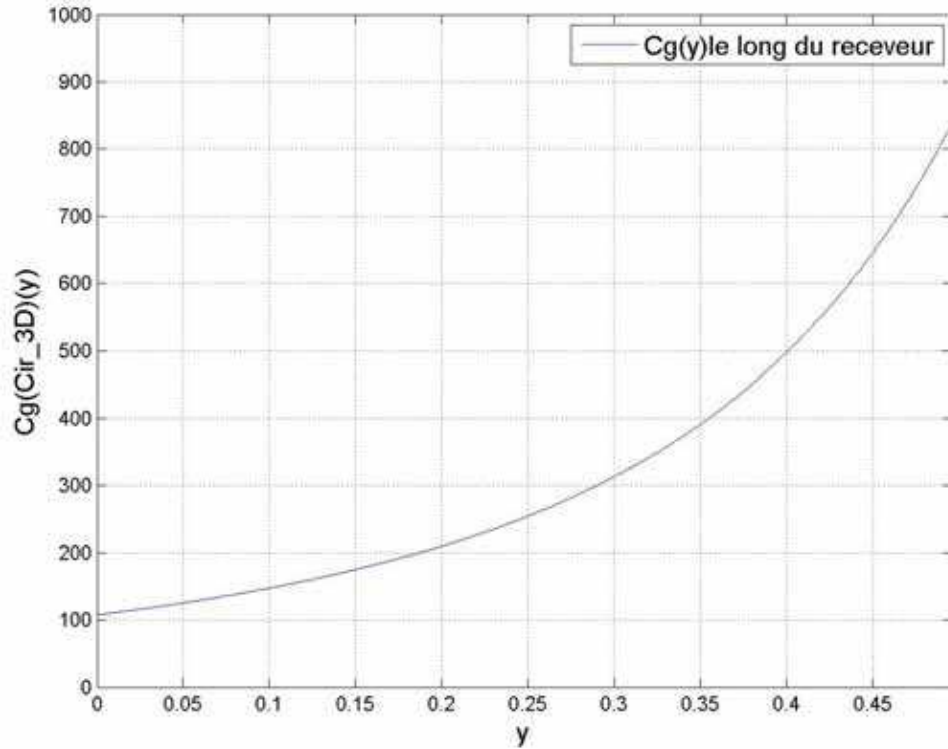


FIG : 3.8 – Coefficient de concentration géométrique (C_g) simplifié et fonction de y

$$C_{g(Cir_3D)}(y) = \frac{1}{4(y-1)^4 \sin \theta_s} ; y \in [0 ; 0,5 - \sin \theta_s]$$

Cette courbe est une simplification de $C_{g(Cir_3D)}(y, n)$ en dehors de la zone des réflexions multiples. Elle croît de 54 à 860 pour $0 \leq y < 0,5$.

De même, la courbe $C_{g(Cir_3D)}(y)$ a la même allure et passe par les mêmes valeurs que la courbe itérative $C_{g(Cir_3D)}(y, n)$ (Figure 3.6 page 75) sans la zone de multiples réflexions. Elle correspond donc à la simplification de celle-ci.

I.2 Comparaison des concentrateurs Paraboloïde et hémisphérique

Une étude comparative des coefficients de concentration géométrique moyen $C_{g_{moy}}$ des concentrateurs paraboloïde et hémisphérique permet de mettre en relief les capacités du concentrateur hémisphérique lorsqu'il est couplé à un receveur à surface cavité.

Le coefficient de concentration géométrique moyen est en effet un bon outil de comparaison, car celui-ci est établi pour des concentrateurs **stigmatiques**, c'est-à-dire avec concentration-point.

les courbes de la figure 3.9 page suivante sont obtenues par l'utilisation des équations suivantes (Tableau 2.2 page 62) :

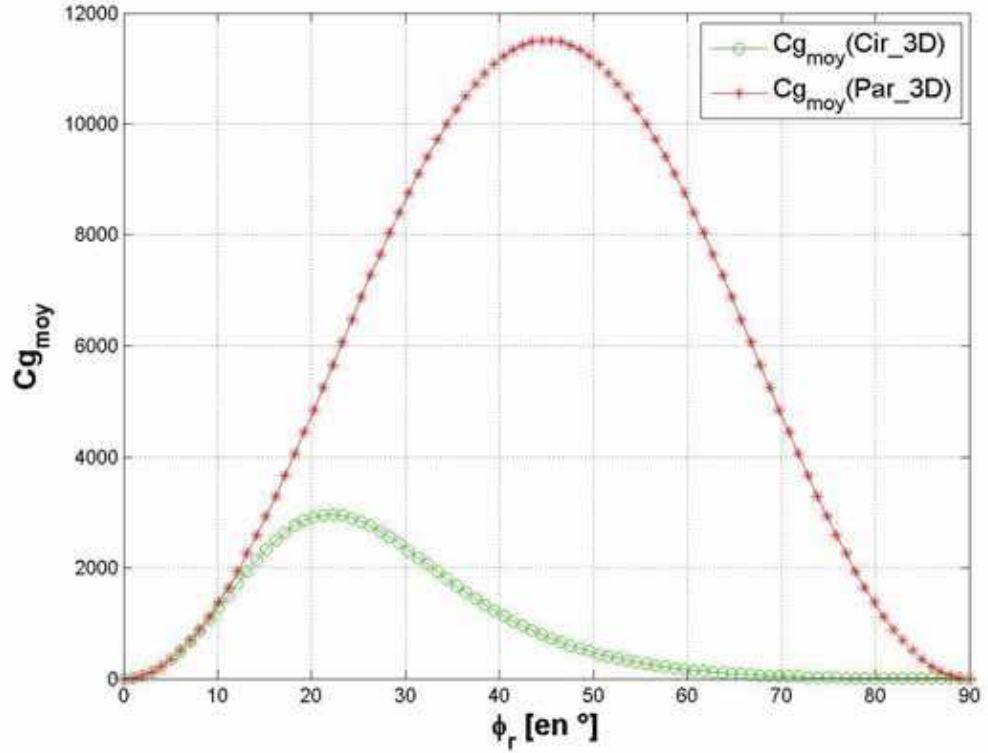


FIG : 3.9 – Coefficient de concentration géométrique moyen $C_{g_{moy}}$:

Comparaison entre les coefficients du paraboloïde et hémisphérique

On remarque que les courbes débutent de la même manière jusqu'aux valeurs de $\phi_r \leq 11^\circ$. C'est la zone d'approximation de Gauss. La courbe du coefficient du paraboloïde atteint son maximum pour $\phi_r = 45^\circ$, tandis que la courbe du coefficient de l'hémisphère atteint son maximum pour $\phi_r = 22^\circ$.

$$C_{g_{moy}(Par_3D)} = \frac{\sin^2(2\phi_r)}{4\theta_s^2} \quad (3.15)$$

$$C_{g_{moy}(Cir_3D)} = \left[\frac{\sin(2\phi_r)}{\sin \phi_r \sin^2\left(\frac{\phi_r}{4}\right) + 2\theta_s} \right]^2 \quad (3.16)$$

Les allures de ces courbes caractérisant $C_{g_{moy}}$ sont presque semblables pour les petites valeurs de ϕ_r , et c'est cette similitude qui permet, par **l'approximation de Gauss**, de considérer le concentrateur hémisphérique comme un concentrateur-point. $C_{g_{moy}(Cir_3D)} \approx 3\,000$ est maximum pour $\phi_r = 22^\circ$, et décroît progressivement, prouvant que la focalisation ponctuelle du concentrateur hémisphérique est perdue au fur et à mesure que ϕ_r grandit. $C_{g_{moy}(Cir_3D)}$ reste cependant suffisamment intéressant pour

$\phi_r \approx 60^\circ$, (soit pour $\phi_s = 30^\circ$) pour que cette configuration soit retenue.

Au vu donc de la figure 3.10, de comparaison des concentrateurs parabolique et hémisphérique, le concentrateur parabolique est *stigmatique*, tandis que le concentrateur hémisphérique est **astigmatique**. Il n'est considéré *stigmatique* que par approximation de Gauss, C'est-à dire pour les faibles valeurs de ϕ .

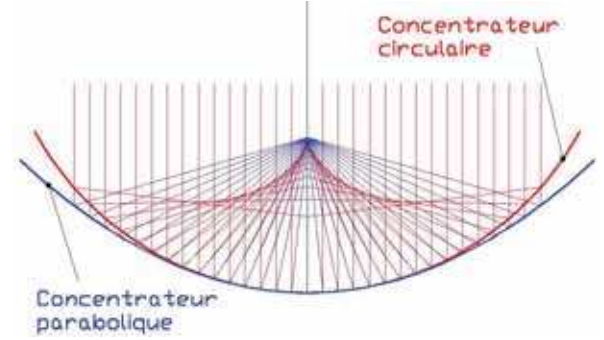


FIG : 3.10 – Stigmatisme

L'endroit où les profils parabolique et hémisphérique (courbes rouge et bleue) sont confondus est la zone d'approximation de Gauss. L'hémisphère peut être considéré comme stigmatique à cet endroit.

I.3 Concentrateur hémisphérique avec receveur à surface cavité.

L'on suppose (en un premier temps) un concentrateur hémisphérique suivant la course du soleil grâce à un dispositif de traque type altazimutal ou équatorial. L'on souhaite ainsi déterminer la position du receveur à disposer au foyer, dans les conditions de l'approximation de Gauss.

I.3.1 *Caustique du concentrateur hémisphérique :*

Les réflexions des rayons solaires ne convergeant pas, elles sont tangentes à une surface de révolution appelée **caustique d'aberration sphérique**. Cette caustique a pour équation plane (figure 3.11 page suivante) :

$$\begin{aligned} X(\psi) &= r_s \sin^3 \psi \\ Y(\psi) &= \frac{r_s}{2} \cos \psi (1 + 2 \sin^2 \psi) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Cette équation paramétrique est une équation de **Néphroïde** (Khaled, 2008).

I.3.2 Plan et disque de moindre diffusion :

Le plan (P) de moindre diffusion est le plan dans lequel il est souhaitable de placer le receveur pour obtenir des températures élevées (Figure 3.12). La recherche donc de ce plan (P) de moindre diffusion est équivalent à rechercher la location du point focal où le receveur sera disposé.

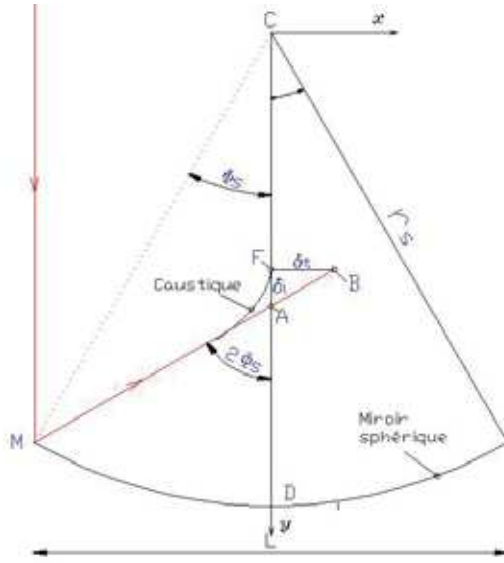


FIG : 3.11 – Caustique de la sphère

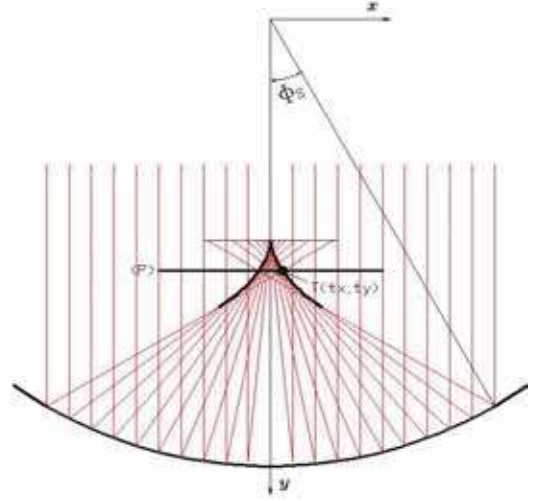


FIG : 3.12 – Plan (P) de moindre diffusion

La courbe formée au voisinage du point focal et tangente aux rayons réfléchis est la caustique. Le plan (P) de moindre diffusion est l'endroit où l'on dispose le receveur cavité, car son diamètre y sera le plus petit possible.

Le rayon r_a du disque de moindre diffusion est la distance de l'axe à l'abscisse du point $T(t_x, t_y)$ d'interception entre la caustique et la droite (AM) (Figure 3.11). Ce disque est la surface à laquelle il est souhaitable de faire correspondre la surface du receveur-plan à disposer pour capter le maximum de chaleur. Ce rayon r_a servira donc à dimensionner le receveur. L'équation de la droite (AM) est :

$$X \cos(2\phi) + Y \sin(2\phi) - r_s \sin \phi = 0 \quad (3.18)$$

La valeur algébrique du rayon r_a du disque de moindre diffusion correspond à l'abscisse du point $T(t_x, t_y)$:

$$r_a = \bar{t}_x \quad (3.19)$$

La valeur algébrique $Y_{(p)}$ de positionnement du plan (P) de moindre diffusion correspond donc à l'ordonnée du point $T(t_x, t_y)$:

$$Y_{(p)} = \bar{t}_y \quad (3.20)$$

Le coefficient de concentration géométrique moyen $C_{g_{moy}(Cir_3D)}$ se calcule comme suit :

$$C_{g_{moy}(Cir_3D)} = \left(\frac{r_s \sin \phi_s}{r_a} \right)^2 \quad (3.21)$$

Le tableau 3.1 page suivante donne la position $Y_{(p)}$ du plan (P), le rayon r_a du disque de moindre diffusion et le coefficient de concentration géométrique moyen $C_{g_{moy}(Cir_3D)}$ par rapport au demi angle d'ouverture choisi ϕ_s .

TAB : 3.1 – Position du plan (P), rayon r_a du disque-receveur, et $C_{g_{moy}(Cir_3D)}$

$\phi_s [en^\circ]$	Position de (P) : $\frac{Y_{(p)}}{r_s}$	Rayon du disque : $\frac{r_a}{r_s}$	$C_{g_{moy}(Cir_3D)}$
2.5	0,500	$0,01 \cdot 10^{-3}$	17 565 848
5	0,501	$0,08 \cdot 10^{-3}$	1 080 938
10	0,506	$0,69 \cdot 10^{-3}$	63 433
15	0,513	$2,44 \cdot 10^{-3}$	11 244
20	0,525	$6,21 \cdot 10^{-3}$	3 034
25	0,540	$13,38 \cdot 10^{-3}$	997
30	0,562	$26,47 \cdot 10^{-3}$	357
35	0,592	$50,83 \cdot 10^{-3}$	127
40	0,635	$101,58 \cdot 10^{-3}$	40
42.5	0.665	$154,08 \cdot 10^{-3}$	19

Ce tableau indique la position du plan (P) de moindre diffusion par rapport au centre de l'hémisphère, le rayon interne du receveur (sans considération de la tache solaire) et le coefficient de concentration géométrique obtenu en fonction du demi angle d'ouverture ϕ_s .

Remarque : La méthode d'obtention des valeurs du point $T(t_x, t_y)$ d'intersection entre la droite (AM) (Figure 3.11 page 81) et la Caustique en vue d'établir le tableau 3.1 est une approche numérique. Elle consiste à remplacer les valeurs de $X(\psi)$ et $Y(\psi)$ provenant de l'équation paramétrique de la caustique dans l'équation de la droite (AM) à ϕ_s connu ! La valeur de ψ pour laquelle cette nouvelle équation est nulle donnera les coordonnées de $T(t_x, t_y)$. Il ne reste plus qu'à faire une méthode itérative où l'on peut faire varier ϕ_s et obtenir les coordonnées correspondantes de $T(t_x, t_y)$. Cette méthode est expliquée en Annexe.7 page XXI.

Observations :

- - On voit donc que la position $Y_{(p)}$ du plan (P) de moindre diffusion est fonction du demi angle d'ouverture ϕ_s . Son évolution est traduite par la

courbe 3.13, et elle s'accroît ostensiblement pour les angles d'ouvertures de grandes valeurs.

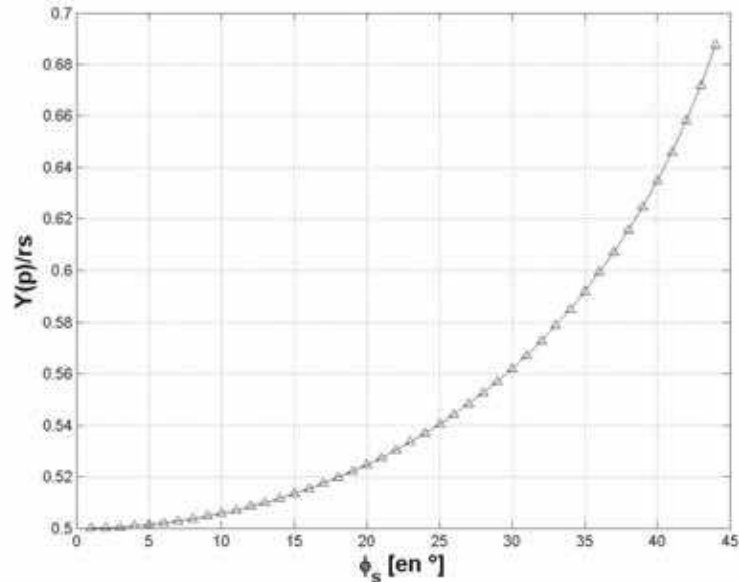


FIG : 3.13 – Évolution de la position du plan (P) de moindre diffusion

en fonction du demi angle ϕ_s . $\frac{Y_{(P)}}{r_s}(\phi_s)$

Le plan (P) de moindre diffusion se déplace du centre vers le concentrateur avec l'accroissement du demi angle ϕ_s . Sa croissance est lente au début, ce qui explique l'intérêt de disposer le receveur à ce niveau.

- - Le rayon r_a du disque de moindre diffusion s'accroît également avec la valeur du demi angle d'ouverture ϕ_s . Sa valeur reste raisonnable pour les angles de petites valeurs. Son évolution est traduite par la courbe 3.14 page suivante.

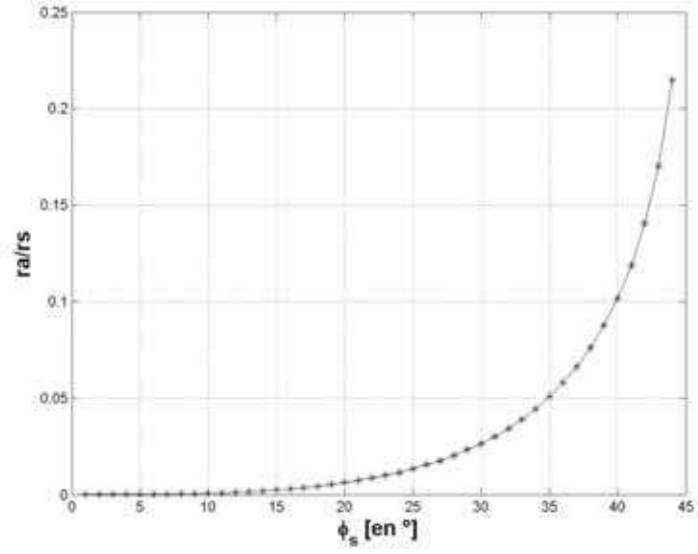


FIG : 3.14 – Évolution du rayon interne du receveur

en fonction du demi angle ϕ_s . $\frac{r_a}{r_s}(\phi_s)$

L'on constate aussi un accroissement du rayon r_a du receveur pour les petites valeurs du demi angle ϕ_s . Son allure est exponentielle pour $\phi_s \geq 30^\circ$.

- o - Le coefficient de concentration géométrique moyen $C_{g_{moy}(Cir_3D)}$ varie également avec le demi angle d'ouverture, surtout si le disque-receveur est dimensionné en fonction de cet angle (Courbe 3.15).

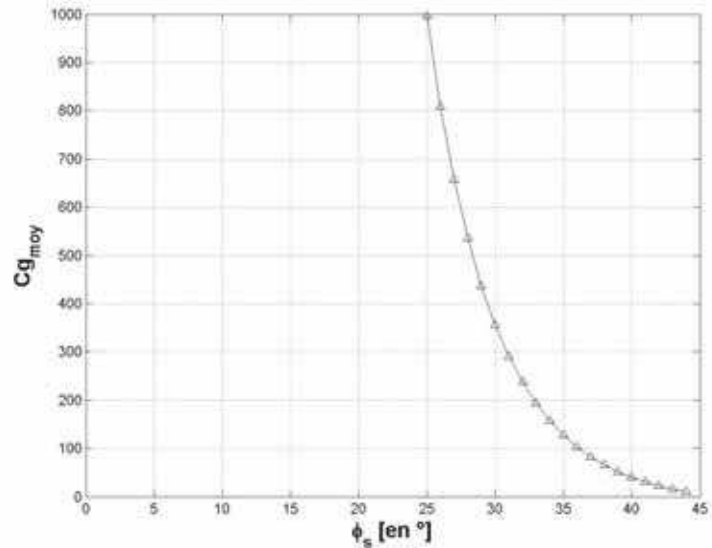


FIG : 3.15 – Tracé du coefficient de concentration géométrique moyen

en fonction du demi angle ϕ_s . $C_{g_{moy}(Cir_3D)}(\phi_s)$

Le coefficient de concentration géométrique moyen se dégrade très vite quand on quitte la zone d'approximation de Gauss.

L'approximation de Gauss est bien visible dans ce cas, car le coefficient de concentration moyen est très supérieur pour les petits angles d'ouverture et se dégrade très vite lorsque l'on quitte les conditions de cette approximation de Gauss.

Cependant, les valeurs du coefficient de concentration géométrique moyen sont aberrantes, car elles ne tiennent pas compte du diamètre apparent du soleil qui produit un élargissement de la caustique. En ce sens, la courbe est seulement indicative de l'évolution du coefficient de concentration géométrique moyen avec le demi angle d'ouverture, justifiant le fait qu'un concentrateur hémisphérique avec receveur à surface cavité peut être assimilé à un concentrateur point.

La prise en compte du diamètre apparent du soleil conduit à recalculer un autre rayon du disque de moindre diffusion R_a à disposer comme suite et au vue des figures 3.16 et 3.17 page suivante, conduisant aux valeurs du tableau 3.2 page suivante :

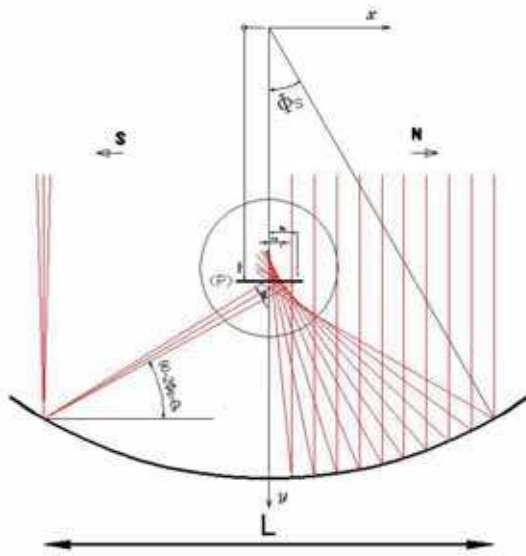
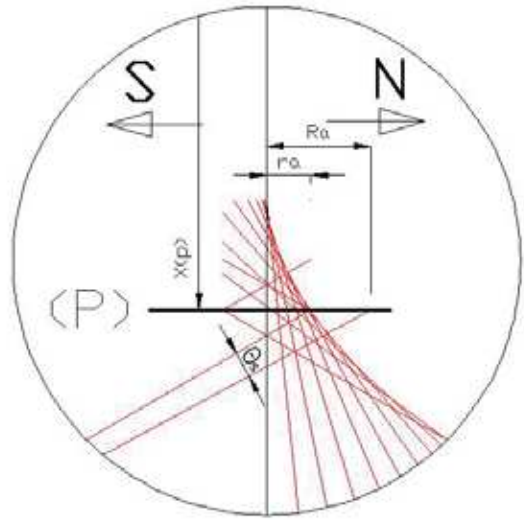
$$R_a = \frac{r_s \cos \phi_s - Y_{(p)}}{\cot(2\phi_s + \theta_s)} - r_s \sin \phi_s \quad \text{avec } Y_{(p)} = \bar{t}_y$$

Ou encore :

$$R_a = (r_s \sin \phi_s + r_a) \frac{\cot(2\phi_s)}{\cot(2\phi_s + \theta_s)} - r_s \sin \phi_s \quad \text{avec } r_a = \bar{t}_x \quad (3.22)$$

Le coefficient de concentration géométrique moyen corrigé par rapport à R_a , $C_{g_{moy}^{*}(Cir_3D)}$ se calcul comme suit :

$$C_{g_{moy}^{*}(Cir_3D)} = \left(\frac{r_s \sin \phi_s}{R_a} \right)^2 \quad (3.23)$$

FIG : 3.16 – Prise en compte de R_a FIG : 3.17 – Zoom sur R_a

Tenir compte du demi angle θ_s caractérisant le rayon apparent du soleil ramène à redéfinir le rayon R_a de la cavité du récepteur qui prendra en compte la tache entière que fait le soleil au point focal.

TAB : 3.2 – $\frac{R_a}{r_s}$ du disque-receveur, et $C_{g_{moy}^*(Cir_3D)}$

ϕ_s [en °]	Rayon du disque : $\frac{R_a}{r_s}$	$C_{g_{moy}^*(Cir_3D)}$
2,5	$2,35 \cdot 10^{-3}$	344
5	$2,46 \cdot 10^{-3}$	1 252
10	$3,22 \cdot 10^{-3}$	2 905
15	$5,26 \cdot 10^{-3}$	2 421
20	$9,52 \cdot 10^{-3}$	1 291
25	$17,53 \cdot 10^{-3}$	581
30	$32,19 \cdot 10^{-3}$	241
35	$60,00 \cdot 10^{-3}$	91
40	$122,41 \cdot 10^{-3}$	28
42,5	$201,11 \cdot 10^{-3}$	11

Ce tableau donne les valeurs du rayon d'ouverture R_a du Récepteur cavité et du coefficient de concentration géométrique moyen correspondant $C_{g_{moy}^*(Cir_3D)}$ en fonction du demi angle d'ouverture ϕ_s d'un concentrateur hémisphérique.

Observations :

- - Le rayon R_a du disque de moindre diffusion s'accroît avec la valeur du demi angle d'ouverture ϕ_s . Sa valeur reste raisonnable pour les angles de petites valeurs, et légèrement supérieur aux valeurs de r_a . Son évolution est traduite par la courbe 3.18.

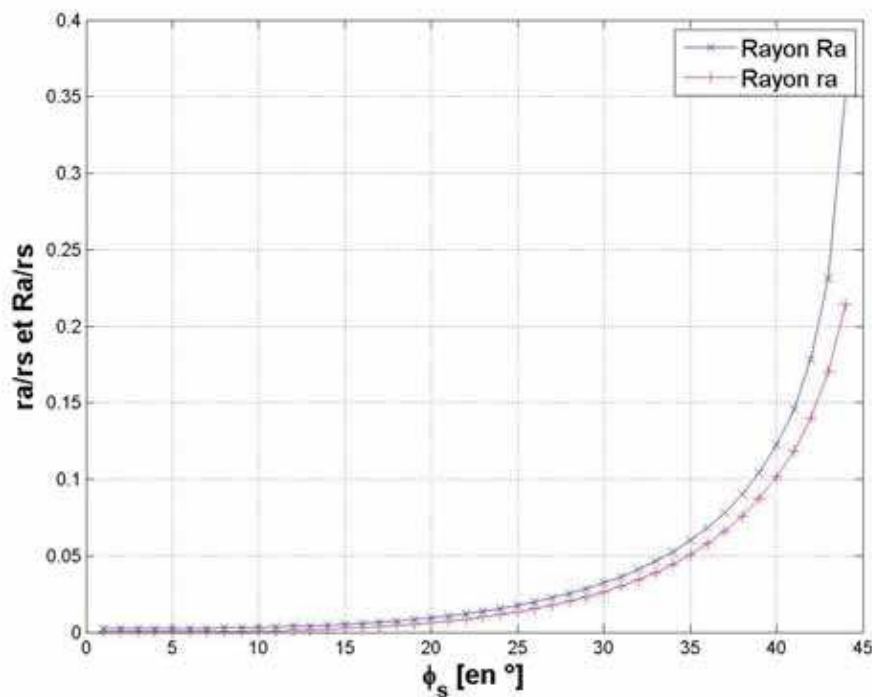


FIG : 3.18 – Tracés des rayons $\frac{R_a}{r_s}(\phi_s)$ et $\frac{r_a}{r_s}(\phi_s)$

Il y a une différence entre les rayons r_a et R_a , et cette différence va croissante avec l'évolution du demi angle ϕ_s . Le dimensionnement du receveur cavité doit donc tenir compte de la tâche solaire caractérisée par le demi angle θ_s .

- - Le coefficient de concentration géométrique moyen Corrigé par rapport à R_a , $C_{g_{moy}}(Cir_3D)$ varie également avec le demi angle d'ouverture. La valeur maximale se trouve autour de 11 °où elle est égale à 2 968. (Courbe 3.19 page suivante). Elle se dégrade très vite lorsque l'on quitte les conditions de cette approximation de Gauss. Elle reste toujours intéressante jusqu'à $\phi_s = 30^\circ$.

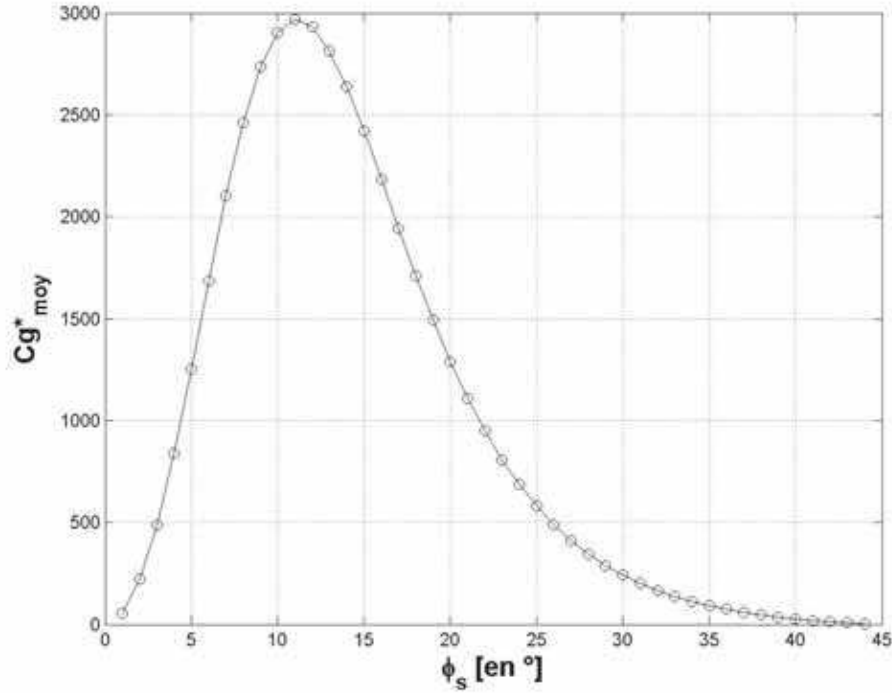


FIG : 3.19 – Tracé du coefficient de concentration géométrique moyen

en fonction du demi angle ϕ_s . $C_{g^*_{moy}(Cir_3D)}(\phi_s)$

La courbe du coefficient de concentration géométrique moyen évolue en forme de cloche non symétrique en partant de zéro à 2 968 en fonction du demi angle ϕ_s .

Remarque : La nouvelle courbe du coefficient de concentration géométrique moyen $C_{g^*_{moy}(Cir_3D)}(\phi_s)$ n'est pas en contradiction avec celle présentée plus haut à la section I.2 page 78 $C_{g_{moy}(Cir_3D)}(\phi_r)$. Il s'agit bien de la même courbe définie soit en fonction de ϕ_r demi-angle de sommet par rapport au point focal, ou ϕ_s demi-angle de sommet par rapport au centre de l'hémisphère. En effet, $\phi_r \approx 2\phi_s$.

I.3.3 Aberrations et concentrateur hémisphérique :

Le concentrateur hémisphérique n'étant pas stigmatique, des aberrations apparaissent au niveau de la zone de concentration. Ces aberrations correspondent aux écarts entre les images projetées en rapport avec l'évolution du demi angle ϕ . On distingue ainsi des aberrations longitudinales et transversales.

★ **L'aberration longitudinale principale** μ_l se traduit par le calcul de la distance

FA (Figure 3.11 page 81) :

$$\mu_l = \frac{r_s}{2} \left(\frac{1}{\cos \phi_s} - 1 \right) \quad (3.24)$$

★ **L'aberration transversale principale** μ_t se traduit par le calcul de la distance

FB (Figure 3.11 page 81) :

$$\mu_t = \mu_l \tan(2\phi_s) = \frac{r_s}{2} \left(\frac{1}{\cos \phi_s} - 1 \right) \tan(2\phi_s) \quad (3.25)$$

- (Figure 3.20). Une comparaison entre le déplacement $Y_{(P)}$ du plan (P) de moindre diffusion et de l'aberration principale longitudinale μ_l permet de constater que l'aberration longitudinale évolue légèrement plus vite que le déplacement du plan (P) de moindre diffusion par rapport à l'évolution du demi angle ϕ_s .

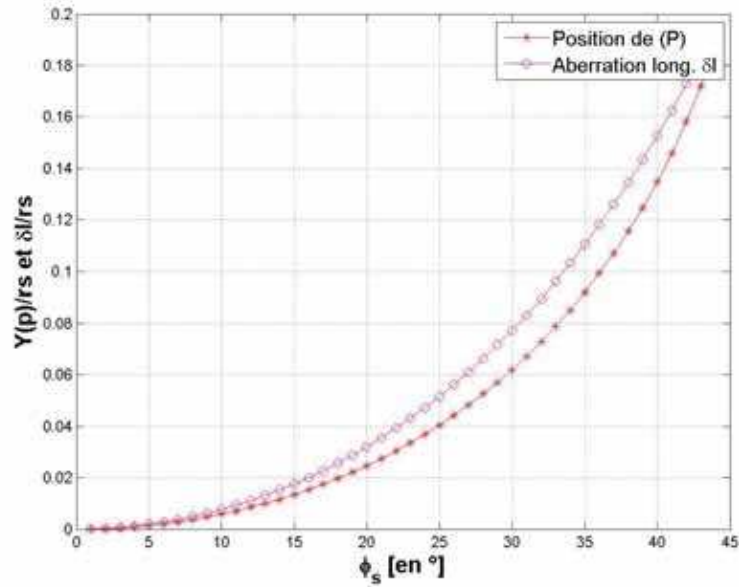


FIG : 3.20 – Évolution de la position du plan (P) de moindre diffusion $Y_{(P)}$

par rapport à celle de l'aberration longitudinale μ_l . $\frac{Y_{(P)}}{r_s}(\phi_s) - \frac{1}{2}$ et $\frac{\mu_l}{r_s}(\phi_s)$
L'évolution de l'aberration longitudinale μ_l est très semblable à celle de la position du plan (P) de moindre diffusion $Y_{(P)}$ du receveur cavité par rapport au demi angle ϕ_s .

- Une comparaison entre le rayon du disque de moindre diffusion r_a et l'aberration transversale principale μ_t permet également de constater que l'aberration transversale évolue plus vite que le rayon du disque de moindre diffusion par rapport à l'évolution du demi angle ϕ_s (Figure 3.21).

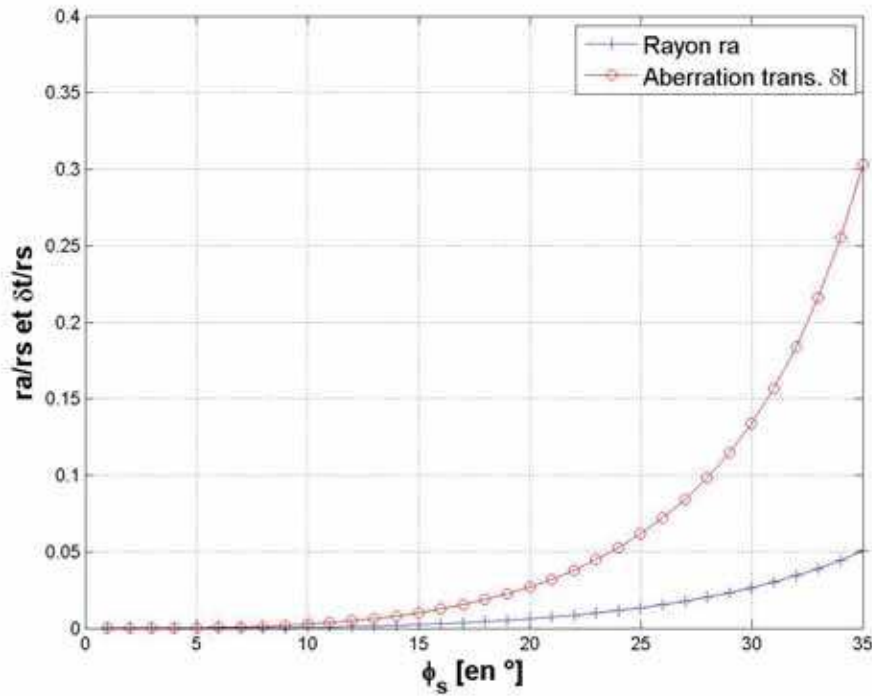


FIG : 3.21 – Comparaison du rayon r_a du receveur cavité

et de l'aberration transversale μ_t . $\frac{r_a}{r_s}(\phi_s)$ et $\frac{\mu_t}{r_s}(\phi_s)$

L'évolution de l'aberration transversale μ_t est plus importante que celle du rayon r_a du receveur cavité. C'est pourquoi, il faut tenir compte du plan (P) de moindre diffusion là où le rayon est le plus petit.

La prise en compte de ces aberrations n'a d'importance que si l'on souhaite placer un receveur à surface externe. Dans ce cas, les aberrations principales peuvent permettre un placement judicieux. Si un receveur-cavité est proposé, celui-ci sera placé en respectant la position du plan (P) et avec un orifice correspondant au rayon r_a (ou R_a) du disque de moindre diffusion.

I.4 Étude du receveur et du transfert de chaleur

I.4.1 Choix et disposition du receveur :

Pour le dispositif d'étude, le choix se portera sur un receveur cavité en forme de demi - cerceau comme présenté sur les figures 3.22 à 3.25 page suivante. La dimension de l'orifice de la cavité sera de demi-largeur r_a dans la direction nord-sud (Figures 3.22 et 3.23). La position du bord externe de ce receveur sera à $Y_{(p)}$ par rapport au centre du cercle concentrateur, et son rayon de courbure externe est aussi de $Y_{(p)}$ dans la direction est-ouest (Figures 3.24 page suivante et 3.25 page suivante).

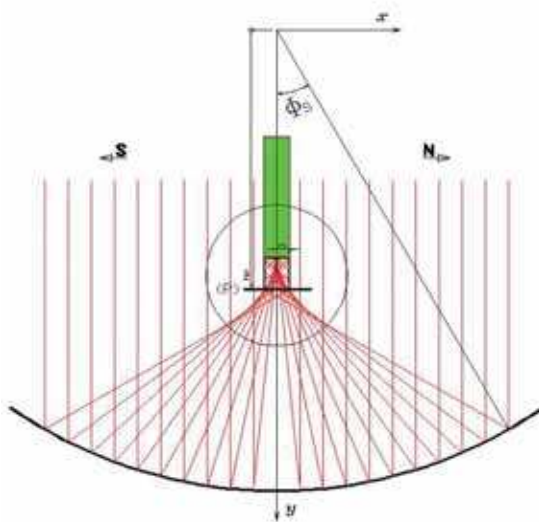


FIG : 3.22 – Receveur cavité (N-S)

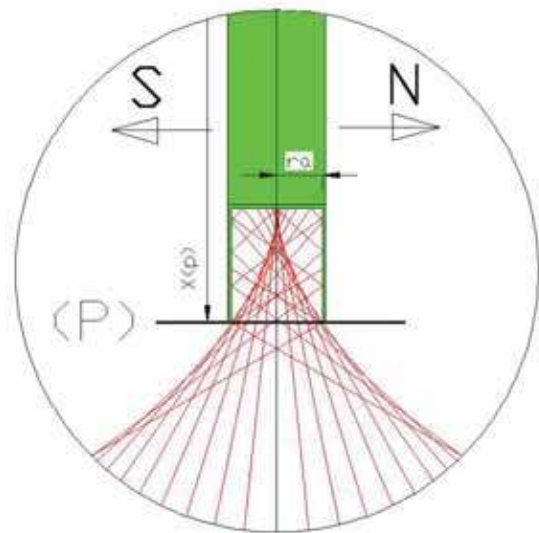


FIG : 3.23 – Zoom du receveur (N-S)

Le receveur cavité avec son orifice de rayon r_a disposé à la position $Y_{(p)}$, distance caractérisant le plan (P) de moindre diffusion par rapport au centre de l'hémisphère. Observateur regardant dans la direction Est-Ouest.

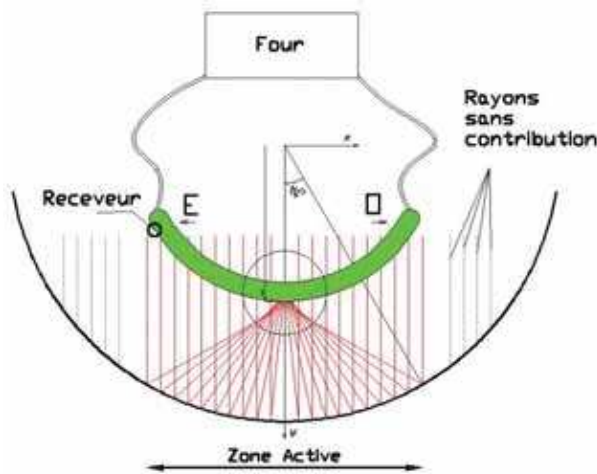


FIG : 3.24 – Receveur à midi (Est-Ouest)

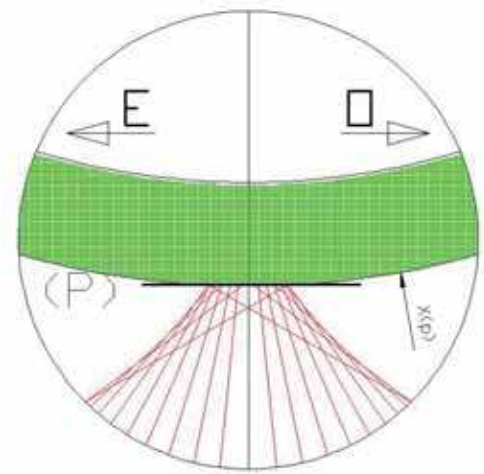


FIG : 3.25 – Zoom (Est-Ouest)

Le receveur cavité avec son orifice de rayon r_a disposé à la position $Y_{(P)}$, distance caractérisant le plan (P) de moindre diffusion par rapport au centre de l'hémisphère. Observateur regardant dans la direction Nord-Sud.

La demi-largeur a été choisie égale à r_a (plutôt que R_a), parce que le désir d'obtenir une haute température au niveau du four nécessite que l'on place le receveur sur la tache focale et que l'on abandonne la zone auréolée de l'image de Gauss du soleil formée au foyer du concentrateur. $C_{g_{moy}^*(Cir_3D)}(30^\circ)=241$ alors que $C_{g_{moy}(Cir_3D)}(30^\circ)=357$.

1.4.2 Transfert de chaleur au niveau du receveur

Le transfert de chaleur se fait au niveau du receveur. Le fluide utilisé pourrait être un liquide ou un gaz. Le choix se porte sur le gaz (Air). Pour cela, il faut un système d'échange de chaleur (ailettes...) disposé à l'intérieur de la cavité du receveur. Le système d'échange choisi est le *Porcupine Receiver* développé par l'*Institut Weizmann* en Israël. Des pointes noires, car très absorbantes de chaleur, seront disposées selon les figures 3.26 page suivante et 3.27 page suivante. La partie inférieure du receveur sera recouverte d'un vitrage transparent simple et résistant aux hautes températures. Les parties restantes du receveur seront rendues au mieux imperméables à toute fuite thermique.

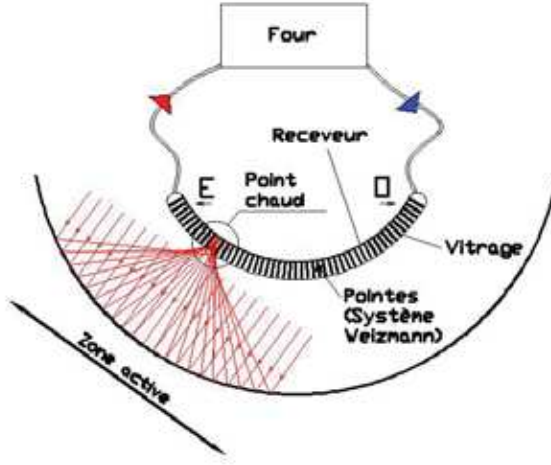


FIG : 3.26 – Receveur thermique

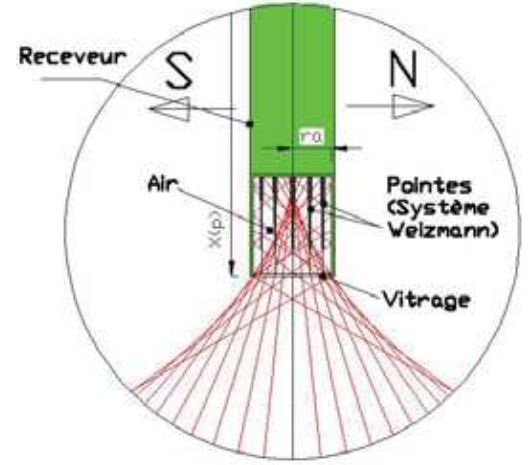


FIG : 3.27 – Receveur thermique-Zoom

Le receveur en forme de croissant garni de pointes pour être conforme au système Weizmann.

Les équations de bilan thermiques sont les suivantes :

1. Puissance absorbée au niveau du receveur P_{abs} :

La puissance absorbée P_{abs} est la puissance produite par la surface utile du concentrateur.

$$P_{abs} = \dot{Q}_{abs} S_p \quad \text{avec} \quad \dot{Q}_{abs} = C_{o,eff} I_{DN} \quad (3.26)$$

- $\dot{Q}_{abs}$: Flux solaire moyen dans l'ouverture du receveur.
- S_p : Section de passage du rayonnement solaire au niveau du receveur.
- $C_{o,eff}$: Coefficient de concentration énergétique effective du concentrateur.
- I_{DN} : Éclairement solaire direct au niveau de la surface utile du du concentrateur.

2. La Puissance utile du receveur P_{ut} :

La puissance utile du receveur P_{ut} est la puissance absorbée moins les pertes. L'on considérera uniquement les pertes par rayonnement $P_{ert(Ray)}$.

$$P_{ut} = \dot{Q}_{abs} S_p \alpha_{abs} - P_{ert(Ray)} \quad \text{avec}$$

$$P_{ert(Ray)} = \xi_{abs} S_p \sigma (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad (3.27)$$

- α_{abs} : Facteur d'absorption solaire.
- $P_{ert(Ray)}$: Pertes par rayonnements.
- ξ_{abs} : Facteur d'émission dans l'infrarouge.
- T_{abs} : Température moyenne dans le receveur.
- T_{amb} : Température ambiante.

3. Le rendement thermique du receveur η_{th} se calcule comme suit, en négligeant les pertes par convection :

$$\eta_{th} = \frac{P_{ut}}{P_{abs}} = \alpha_{abs} - \frac{\xi_{abs} \sigma (T_{abs}^4 - T_{amb}^4)}{C_{o,eff} I_{DN}} \quad (3.28)$$

4. Le rendement de Carnot au niveau du four η_c :

Avec la circulation de l'air chaud entre le receveur et le four, l'on peut considérer que l'échange receveur-four suit un cycle de Carnot.

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{entre}}{T_{sortie}} \quad (3.29)$$

- T_{entre} : Température à l'entrée du four.
- T_{sortie} : Température à la sortie du four.

5. Le rendement global η se calcule comme suit :

$$\eta = \eta_{th} \eta_c = \alpha_{abs} \left(1 - \frac{T_{entre}}{T_{sortie}} \right) \left[1 - \frac{\xi_{abs} \sigma (T_{abs}^4 - T_{amb}^4)}{\alpha_{abs} C_{o,eff} I_{DN}} \right] \quad (3.30)$$

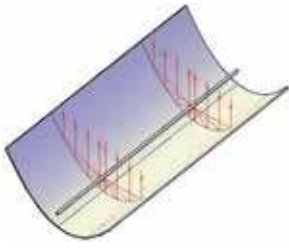
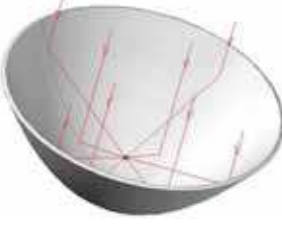
En somme, la température espérée au niveau du receveur T_{abs} n'est pas la difficulté majeure, car des travaux antérieurs montrent un concentrateur hémisphérique avec un receveur à surface cavité, (doté d'un dispositif de traque du soleil), qui obtenait des résultats satisfaisants (Khaled, 2008, Bellel, 2011, Gandhe et al., 1989). Cependant, l'on souhaite éviter la traque du soleil dans ce travail.

La difficulté se situe donc au niveau de la conception du receveur tel que décrit et permettant l'obtention d'une telle température au four sans la traque de l'angle horaire du soleil.

II COMPARAISON DES SYSTÈMES PARABOLIQUE ET SPHÉRIQUE

Il a été vu dans le tableau 1.1 page 22 de l'évolution des températures de stagnation avec le coefficient de concentration géométrique que la frontière de concentration maximale d'un système linéaire est autour de la centaine. En fait, comme récapitulé dans le tableau 3.3, le coefficient de concentration maximum qui peut être obtenu avec un système linéaire est 215 (Quatrième ligne). Le coefficient de concentration moyen est de 107, soit la moitié de la valeur du coefficient de concentration géométrique (Sixième ligne).

TAB : 3.3 – Comparaison des Coefficients de concentration géométriques

	Concentrateur linéaire	Concentrateur mixte	Concentrateur point
Miroir continu	 (a) Cylindro-parabolique	 (b) Hémisphérique	 (c) Paraboloïde
$C_g =$	$\frac{\sin \phi_r}{\sin \theta_s}$	$\frac{4}{\sin \theta_s} \cos^4 \left(\frac{\phi_r}{2} \right)$	$\frac{\sin^2 \phi_r}{\sin^2 \theta_s}$
C_g - Maxi	215	860	46 848
$C_{g_{moy}} =$	$\frac{\sin(2\phi_r)}{2 \sin \theta_s}$	$\left[\frac{\sin(2\phi_r)}{\sin \phi_r \sin^2 \left(\frac{\phi_r}{4} \right) + 2 \sin \theta_s} \right]^2$	$\frac{\sin^2(2\phi_r)}{4 \sin^2 \theta_s}$
$C_{g_{moy}}$ - Maxi	107	2 964	11 541

Ce tableau permet une comparaison des coefficients de concentration géométrique et géométrique moyen des concentrateurs cylindro-parabolique, hémisphérique et paraboloïde. Le demi angle ϕ_s de l'hémisphère est ramené au demi-angle ϕ_r par rapport au point de concentration pour permettre cette comparaison.

Les observations suivantes peuvent donc être faites :

- Toujours dans le tableau 3.3 page précédente, il est montré que le coefficient de concentration géométrique maximum qui peut être atteint par un concentrateur hémisphérique est de 860. Ce coefficient de concentration géométrique varie entre 860 et 215 pour $\phi_r \in [0; 90^\circ]$. Au vu du graphique d'évolution du coefficient de concentration géométrique d'un système hémisphérique (Figure 3.28), $C_g(Cir_3D) \geq 215$ et est toujours supérieur ou égale au coefficient de concentration géométrique du système cylindro parabolique $\{C_g(Cir_3D) \geq C_g(Par_2D)\}$. Le concentrateur hémisphérique concentrant sur un axe, il est à priori l'un des meilleurs systèmes à concentration linéaire.

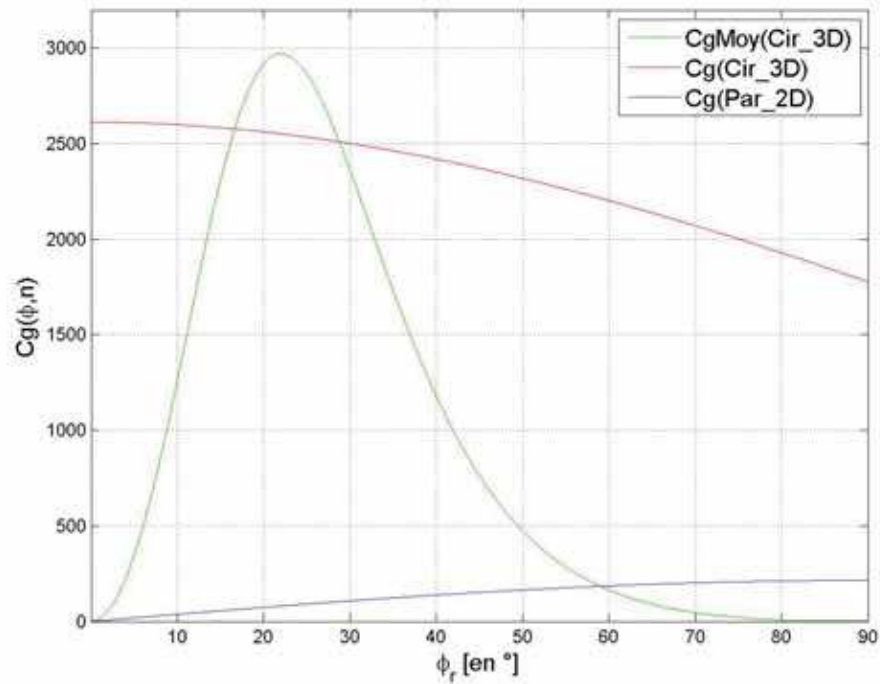


FIG : 3.28 – Coefficients de concentration hémisphérique et parabolique

L'on remarque que la courbe d'évolution du coefficient de concentration géométrique de l'hémisphère $C_g(Cir_3D)$ est toujours au dessus de la celle du cylindro-parabolique $C_g(Par_2D)$ pour $0 < \phi_r \leq 90^\circ$. De plus, le coefficient de concentration géométrique moyen de l'hémisphère $C_{g_{moy}}(Cir_3D)$ est supérieur à son coefficient de concentration géométrique $C_g(Cir_3D)$ pour $9^\circ \lesssim \phi_r \lesssim 47^\circ$.

- Le système hémisphérique concentre également par approximation de gauss en un point lorsqu'il est utilisé à cet effet, et l'on obtient un coefficient de concen-

tration géométrique moyen maximum de 2 968. Bien entendu, cette valeur est obtenue pour une petite valeur du demi angle $\phi_r = 22^\circ$, mais cela en fait un système comparable au système *Scheffler* qui aurait un coefficient de concentration géométrique de 150.

- Pour finir, le système hémisphérique est à classer comme étant un système mixte, c'est-à dire linéaire et ponctuel. Les valeurs de ses coefficients de concentration le positionnent donc entre les systèmes linéaires et ponctuels. La figure 3.29 montre un concentrateur hémisphérique équipé d'un axe receveur à utilisation mixte.



FIG : 3.29 – Photo d'un concentrateur hémisphérique à utilisation mixte

Le receveur de ce collecteur fonctionne tant à surface externe qu'à surface cavité².

Remarque :

La comparaison du système hémisphérique d'avec le système *Solar Linear Array Thermal System - SLAT* (ou Linéaire Fresnel en terme simplifié) est exclut du fait de la forte robotisation de ce dernier comme expliqué en section II.6.2 page 34.

2. Source : <http://www.auroville.org/contents/3294>

III CONCEPTION DU DISPOSITIF

III.1 Schémas du montage

Ce dispositif fonctionne par concentration hémisphérique avec receveur à surface cavité. De ce fait, des températures allant jusqu'à 300 °C sont espérées. La chaleur produite par concentration est récupérée par un receveur en forme de cerceau qui la transfère dans le four (Figure 3.30). La circulation de l'air chaud se fait entre receveur et four uniquement. le sens de cette circulation de l'air par thermosiphon est imposé par la position du soleil et son point de concentration sur le receveur. Comme d'habitude, si le point chaud est sur une branche, cette branche sera le conduit d'allée d'air chaud vers le four et l'autre, le retour.

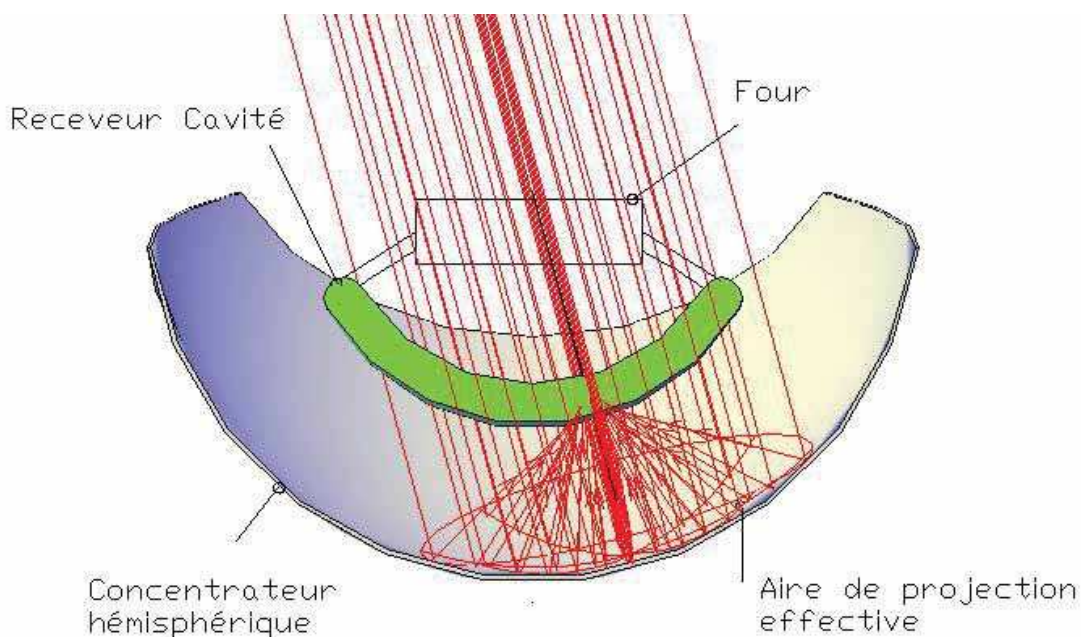


FIG : 3.30 – Montage Complet du dispositif

Les rayons solaires sont réfléchis par le concentrateur hémisphérique vers le receveur cavité en forme de croissant. L'air est chauffé dans le receveur et circule vers le four qui est disposé au dessus. Il y a ainsi circulation d'air chaud entre le receveur et le four.

Ses avantages sont sans doute la haute température espérée dans le four et qui pourrait cuire du pain entre-autre. Cet avantage est obtenu grâce à la petite quantité

d'air à chauffer, et le réglage tous les deux-trois jours du receveur qui doit tourner autour d'un axe pour traquer la déclinaison. Un positionnement rigoureux nord-sud du dispositif est donc obligatoire, mais une fois positionné, il l'est de façon permanente. Seul le réglage du receveur reste à assurer.

Sa configuration est (I; 0) : Orientation quasi fixe. (Voir la matrice homogène 4x4 caractérisant le robot de traque du soleil à la section I.2 page 14).

III.2 Réalisation des prototypes de l'étude

III.2.1 Prototype N°1- Hémisphère métallique à carreaux

○ Réalisation du concentrateur hémisphérique

Le premier prototype de l'étude a un concentrateur hémisphérique tronqué fabriqué en tôle acier, ayant pour rayon d'exposition $R_{exp} = 0,99 \text{ m}$. Le rayon de l'hémisphère R_{sph} est de 1,073 m et sa hauteur est de 0,673 m (Figure 3.31). Il est recouvert dans sa partie interne de carreaux de miroirs plats de 5 cm x 5 cm (Figure 3.32).

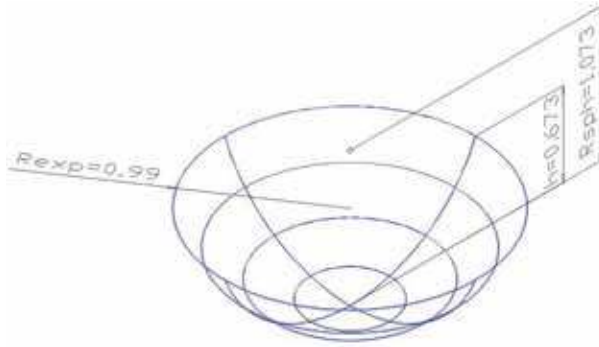


FIG : 3.31 – Dimensions du 1^{er} prototype



FIG : 3.32 – Classement des miroirs

Le premier prototype d'étude est un concentrateur hémisphérique ayant pour rayon d'exposition $R_{exp} = 0,99 \text{ m}$. Le rayon de l'hémisphère R_{sph} est de 1,073 m et sa hauteur est de 0,673 m. Il est tapissé de carreaux de miroirs de 5 cm de coté.

Son coefficient de concentration géométrique en utilisant les équations simplifiées, et en tenant compte de l'élargissement du receveur dû aux carreaux :

$$C_{gR(Cir_3D)}(\phi) = \frac{4}{\Delta_l + \sin \theta_s} \cos^4 \phi$$

ou

$$C_{gR(Cir_3D)}(y) = \frac{1}{4(y-1)^4(\Delta_l + \sin \theta_s)} \quad (3.31)$$

Avec

$$\Delta_l = \frac{0,05}{4}(1 + \sqrt{2}) \quad (3.32)$$

Δ_l est la demi-valeur moyenne en mètre du coté et de la diagonale d'un carreau de miroirs plats caractérisant la dispersion causée par celui-ci. L'on pourrait également utiliser Δ (en Rad) comme étant le demi angle de dispersion causé par un carreau de miroirs plats tel que $\Delta_l = \sin(\Delta)$. Généralement, Δ (en Rad) est suffisamment petit pour que l'approximation $\Delta_l \approx \Delta$ soit également possible. Dans l'équation (3.31), $(\Delta_l + \sin \theta_s)$ peut être remplacé par $\sin(\Delta + \theta_s)$. Dans ce cas, l'on trouve $C_{gR_{Max}(Cir_3D)} \approx 115$ (Figures 3.33 et 3.34 page suivante).

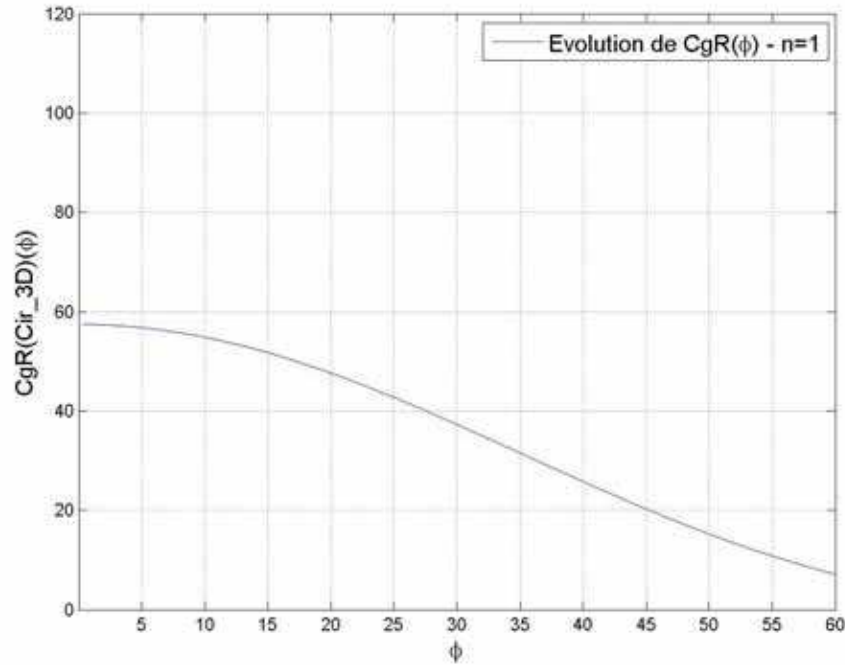


FIG : 3.33 – Tracé du coefficient de concentration géométrique réel en fonction de ϕ

$$C_{gR(Cir_3D)}(\phi) \text{ avec une dispersion } \Delta_l = \frac{0,05}{4}(1 + \sqrt{2})$$

Le tracé de cette courbe garde l'allure générale des coefficients de concentration géométrique des concentrateurs hémisphériques, mais son maximum chute à 115.

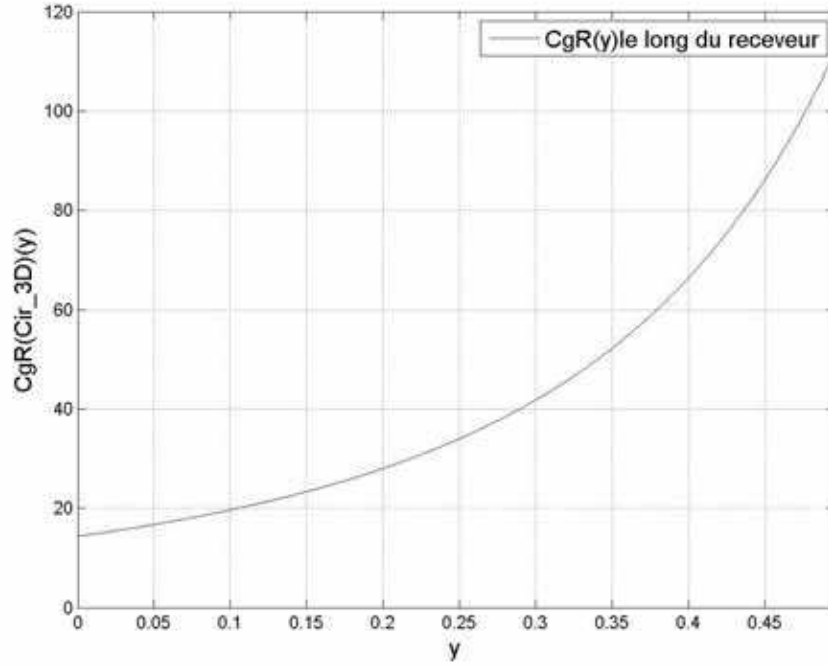


FIG : 3.34 – Tracé du coefficient de concentration géométrique réel en fonction de y :

$$C_{gR(Cir_3D)}(y) \text{ avec une dispersion } \Delta_l = \frac{0,05}{4}(1 + \sqrt{2})$$

Le tracé de cette courbe garde l'allure générale des coefficients de concentration géométrique des concentrateurs hémisphériques projetée sur l'axe-receveur, mais son maximum chute à 115.

Le coefficient de concentration est réduit à 13,5 % de sa valeur initiale le long du receveur du fait de la dispersion causée par l'utilisation des carreaux de miroirs plats. De ce fait, le volume en forme de cône de la tache solaire a pour dimension (en mètre) :

★ $R_{a1} = \frac{r_s}{2}(\Delta_l + \sin \theta_s) = \frac{r_s}{2} \sin(\theta_s + \Delta)$ à sa partie supérieure proche du demi rayon de l'hémisphère.

★ $R_{a2} = r_s(\Delta_l + \sin \theta_s) = r_s \sin(\theta_s + \Delta)$ à sa partie inférieure proche de la surface du concentrateur.

★ $h_a = \frac{r_s}{2}$: hauteur du cône-receveur.

Les caractéristiques géométriques du concentrateur hémisphérique sont les suivantes (Tableau 3.4 page suivante) :

TAB : 3.4 – Prototype N°1 : Caractéristiques du concentrateur hémisphérique

Symbole	Val.	U	Désignations
r_s	= 1,073	m	Rayon de la sphère
$L(30^\circ)$	= 1,073	m	Largeur utile à $\phi_s=30^\circ$
$L(22^\circ)$	= 867	cm	Largeur utile à $\phi_s=22^\circ$
$S_{exp}(30^\circ)$	= 3,079	m^2	Surface d'exposition brute du concentrateur pour $\phi_s=30^\circ$
$S_{exp}(22^\circ)$	= 2,362	m^2	Surface d'exposition brute du concentrateur pour $\phi_s=22^\circ$
H	= 0,673	m	Hauteur de l'hémisphère tronqué
$C_{gR_{Max}(Cir_3D)}$	= 115		Coefficient de concentration géométrique réel maxi

○ *Réalisation du receveur*

Le premier prototype de l'étude a un receveur en forme de cerceau qui est également fabriqué en tôle sur laquelle des pointes noires ont été rapportées par soudure, avec un vitrage transparent ayant une excellente résistance thermique et supportant des hautes températures sur sa partie externe. Le receveur est enveloppé de plate ayant une bonne résistance thermique (Figures 3.35 et 3.36).



FIG : 3.35 – Receveur du 1^{er} prototype



FIG : 3.36 – Receveur - vue de profil

Receveur cavité portant des graduations horaires. La partie basse comporte un vitrage transparent.

Son coefficient de concentration géométrique moyen réel en reprenant les équations (3.20) page 82, (3.22) et (3.23) page 86, puis en tenant compte de l'élargissement

du receveur dû aux carreaux donne le tracé des figures ci-après (Figure 3.37 et Figure 3.38 page suivante) :

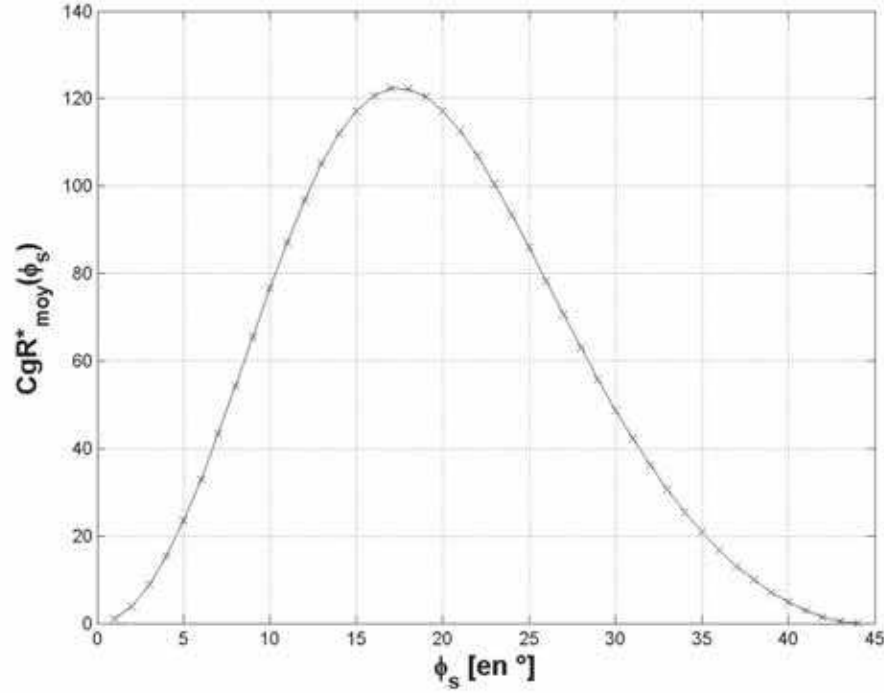


FIG : 3.37 – Tracé du coefficient de concentration géométrique réel moyen :

$$C_{gR_{moy}^{*}(Cir_3D)}(\phi_s)$$

Le coefficient de concentration géométrique réel moyen en fonction du demi angle ϕ_s du premier prototype a une allure en cloche, avec le sommet décalé vers $\phi_s = 17^\circ$. La valeur maximale de ce coefficient chute à 122.

$$R_a(\Delta_l) = \frac{r_s \cos \phi_s - Y_{(p)}}{\cot(2\phi_s + (\theta_s + \Delta))} - r_s \sin \phi_s \quad \text{avec } Y_{(p)} = \bar{t}_y$$

Ou encore :

$$R_a(\Delta_l) = (r_s \sin \phi_s + r_a) \frac{\cot(2\phi_s)}{\cot(2\phi_s + (\theta_s + \Delta))} - r_s \sin \phi_s \quad \text{avec } r_a = \bar{t}_x \quad (3.33)$$

$$C_{gR_{moy}^{*}(Cir_3D)} = \left(\frac{r_s \sin \phi_s}{R_a(\Delta_l)} \right)^2 \quad (3.34)$$

Le maximum de $C_{gR_{moy}^{*}(Cir_3D)} = 122$. L'utilisation des carreaux de miroirs génère des dispersions qui ramènent le maximum du coefficient de concentration géométrique moyen à 4,11 % du maximum précédent.

1. En utilisant l'équation (3.33) page précédente : $C_{gR_{moy}(Cir_3D)} = \left(\frac{r_s \sin \phi_s}{R_a(\Delta_l)} \right)^2$

On constate que le maximum de la courbe (Figure 3.37 page précédente) se déplace vers les valeurs de ϕ_s voisines à 17° . Pour $\phi_s = 22^\circ$, $C_{gR_{moy}(Cir_3D)} \geq 100$. Il est souhaitable d'examiner la possibilité de disposer le receveur en fonction de cette valeur si la température n'évolue pas jusqu'aux valeurs désirées.

2. En utilisant l'équation (3.16) page 79 : $C_{gR_{moy}(Cir_3D)} = \left[\frac{\sin(2\phi_r)}{\sin \phi_r \sin^2\left(\frac{\phi_r}{4}\right) + 2(\theta_s + \Delta)} \right]^2$

La courbe (Figure 3.38) a la même allure et le même maximum que la figure précédente (Figure 3.37 page précédente), avec le demi angle $\phi_r \approx 2\phi_s$.

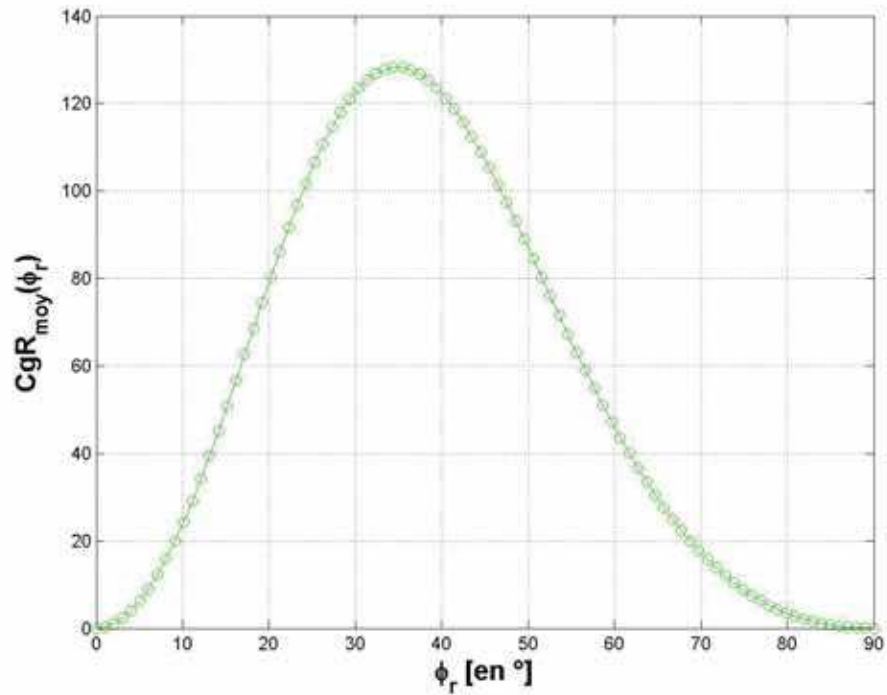


FIG : 3.38 – Tracé du coefficient de concentration géométrique moyen réel

en fonction du demi angle ϕ_r . $C_{gR_{moy}(Cir_3D)}(\phi_r)$

Le coefficient de concentration géométrique réel moyen tracé en fonction de ϕ_r a la même allure et le même sommet décalé vers $\phi_r = 34^\circ$ que la courbe précédente. la valeur maximale de ce coefficient est aussi de 122.

Les caractéristiques géométriques du receveur sont les suivantes (Tableau 3.5 page suivante) :

TAB : 3.5 – Prototype N°1 : Caractéristiques du receveur

Symbole	Val.	U	Désignations
$Y_{(p)}(30^\circ)$	= 60,3	cm	Position du plan (P) de moindre diffusion pour $\phi_s=30^\circ$
$Y_{(p)}(22^\circ)$	= 57	cm	Position du plan (P) de moindre diffusion pour $\phi_s=22^\circ$
$r_a(30^\circ)$	= 2,8	cm	Rayon du disque de moindre diffusion à $\phi_s=30^\circ$ (sans auréole)
$R_a(30^\circ)$	= 3,5	cm	Rayon du disque de moindre diffusion à $\phi_s=30^\circ$ (avec auréole)
$R_a(22^\circ)/\Delta_t$	= 3,6	cm	Rayon du disque de moindre diffusion à $\phi_s=22^\circ$ (avec auréole et disp.)
$C_{g_{moy}}(Cir_3D)(30^\circ)$	= 357		Coef. de concentration géo. moy. à $\phi_s=30^\circ$ (sans auréole)
$C_{g_{moy}}^*(Cir_3D)(30^\circ)$	= 241		Coef. de concentration géo. moy. à $\phi_s=30^\circ$ (avec auréole)
$C_{gR_{moy}}^*(Cir_3D)(22^\circ)$	= 107		Coef. de concentration géo. moy. réel à $\phi_s=22^\circ$ (avec auréole)
h_a	= 7	cm	Profondeur du receveur (arbitraire)

III.2.2 Prototype N°2- Hémisphère en béton à paroi lisse

○ **Réalisation du concentrateur hémisphérique** Le second prototype de l'étude (Figure 3.39) a un concentrateur hémisphérique tronqué fabriqué en béton armé avec sa paroi interne lisse. Celle-ci est tapissée d'un film de miroir autocollant ayant une réflectivité de 95 % (Figure 3.40). Son rayon d'exposition $R_{exp} = 0,57 \text{ m}$. Le rayon de l'hémisphère R_{sph} est de 0,49 m et sa hauteur est de 0,46 m.

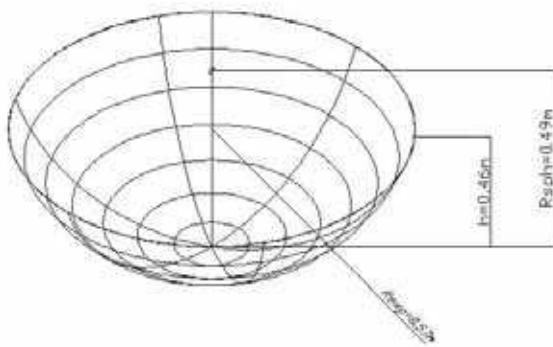


FIG : 3.39 – Dimensions du 2^d prototype



FIG : 3.40 – Hémisphère-Béton

Le second prototype d'étude est un concentrateur hémisphérique ayant pour rayon d'exposition $R_{exp} = 0,57 \text{ m}$. Le rayon de l'hémisphère R_{sph} est de 0,49 m et sa hauteur est de 0,46 m. Il est en béton armé avec la paroi interne bien lisse.

Son coefficient de concentration géométrique peut être calculé en utilisant les équations simplifiées (3.13) page 77.

Les caractéristiques géométriques du concentrateur hémisphérique sont les suivantes (Tableau 3.6) :

TAB : 3.6 – Prototype N°2 : Caractéristiques du concentrateur hémisphérique

Symbole		Val.	U	Désignations
r_s	=	0,59	m	Rayon de la sphère
$L(22^\circ)$	=	44	cm	Largeur utile à $\phi_s=22^\circ$
$S_{exp}(22^\circ)$	=	0,1535	m^2	Surface d'exposition brute du concentrateur pour $\phi_s=22^\circ$
H	=	0,46	m	Hauteur de l'hémisphère tronqué
$C_{gMax(Cir_3D)}$	=	817		Coefficient de concentration géométrique maxi

○ *Réalisation du receveur*

Le second prototype de l'étude a un receveur à surface externe en forme de cerceau qui est également fabriqué en tôle et peint de couleur noire pour une absorption optimale des rayons. Il comporte un réservoir creux couvert dont la température de l'air qu'il contient sera relevée (Figure 3.41).



FIG : 3.41 – Receveur du second prototype

Le receveur de second prototype est à surface externe. Il comporte une cavité correspondant au four. Il est peint en noir pour mieux absorber les rayons solaires.

Son coefficient de concentration géométrique moyen est obtenu en reprenant les équations (3.20) page 82, (3.22) et (3.23) page 86, et en multipliant par 95 %.

Le maximum de $C_{gmoy}(Cir_3D) = 2\,815$.

Les caractéristiques géométriques du receveur sont les suivantes (Tableau 3.7) :

TAB : 3.7 – Prototype N°2 : Caractéristiques du receveur

Symbole		Val.	U	Désignations
$Y_{(p)}(22^\circ)$	=	31,5	cm	Position du plan (P) de moindre diffusion pour $\phi_s=22^\circ$
$R_a(30^\circ)$	=	1,9	cm	Rayon du disque de moindre diffusion à $\phi_s=30^\circ$ (avec auréole)
$R_a(22^\circ)/\Delta_t$	=	0,7	cm	Rayon du disque de moindre diffusion à $\phi_s=22^\circ$ (avec auréole et disp.)
$C_{gmoy}(Cir_3D)(30^\circ)$	=	340		Coef. de concentration géo. moy. à $\phi_s=30^\circ$ (sans auréole)
$C_{gmoy}^*(Cir_3D)(30^\circ)$	=	229		Coef. de concentration géo. moy. à $\phi_s=30^\circ$ (avec auréole)
$C_{gmoy}(Cir_3D)(22^\circ)$	$\approx$	1 000		Coef. de concentration géométrique moyen à $\phi_s=22^\circ$
h_a	=	7	cm	Profondeur du receveur (arbitraire)

CONCLUSION SUR LES CONCEPTIONS ET RÉALISATIONS DES DISPOSITIFS.

Pour le dispositif à concevoir, le choix c'est porté sur un concentrateur hémisphérique et un receveur cavité en forme de croissant. Pour ce faire, les coefficients de concentration géométrique et géométrique moyen du concentrateur hémisphérique ont été redéfinis. Une comparaison entre le concentrateur hémisphérique et les concentrateurs parabolique et paraboloïde a été faite pour montrer que le concentrateur hémisphérique est un concentrateur hybride à concentration linéaire et ponctuelle et est d'ailleurs très souvent utilisé comme tel.

- Le premier concentrateur hémisphérique réalisé a une ossature métallique et une paroi interne en tôle plane tapissée de carreaux de miroirs de 5 cm de côté. Cela réduit considérablement les coefficients de concentration. L'hémisphère a un rayon $r_s = 1,073\text{ m}$ et une surface d'exposition $S_{exp}(30^\circ) = 3,079\text{ m}^2$ pour $\phi_s = 30^\circ$. Son receveur cavité en forme de croissant a été dimensionné en fonction de la tache solaire au foyer du concentrateur hémisphérique, et positionné dans le plan de moindre diffusion, afin d'optimiser son rendement. il a été calibré pour un angle $\phi_s = 30^\circ$.
- Le second concentrateur hémisphérique, de taille plus réduite, est réalisé en béton armé avec une paroi interne lisse et tapissé d'un film autocollant de réflectivité $\approx 95\%$. l'hémisphère a un rayon $r_s = 0,59\text{ m}$ et une surface d'exposition $S_{exp}(22^\circ) = 0,153\text{ m}^2$ pour $\phi_s = 22^\circ$.

Son receveur à surface externe a été dimensionné en fonction de la tache solaire au foyer du concentrateur hémisphérique, et positionné dans le plan de moindre diffusion, afin d'optimiser son rendement. il a été calibré pour un angle $\phi_s = 22^\circ$.

Chapitre 4

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET ANALYSE DES PERFORMANCES DES PROTOTYPES CONSTRUITS

INTRODUCTION.

Dans ce chapitre, les deux prototypes réalisés seront étudiés. Le matériel utilisé pour les mesures ainsi que la méthode de mesure seront décrits. La précision de ces mesures sera donnée.

Les courbes obtenues seront commentées, expliquées et discutées.

Enfin, les implications issues de ces résultats seront déclinées.

I PROTOTYPE N°1

La figure 4.1 représente le receveur N°1 positionné au dessus du concentrateur métallique à carreaux (N°1).

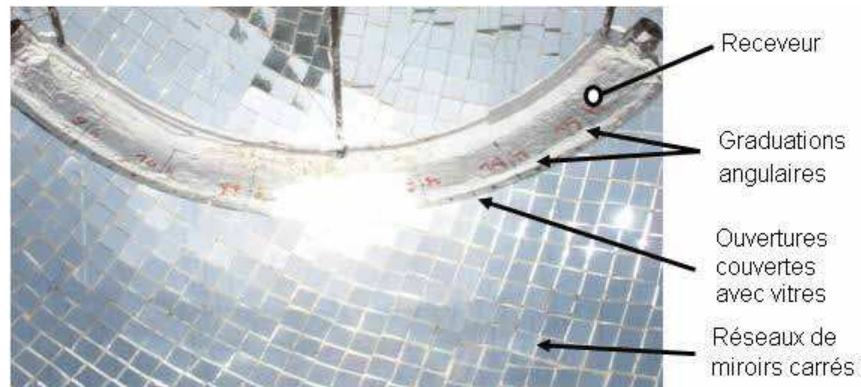


FIG : 4.1 – Photo du prototype : receveur positionné sur le concentrateur sphérique

La position de celui-ci est ajustée au vue du plan de moindre diffusion. Pour relever la température au foyer, il faut suivre au jugé la course du soleil et rechercher le point focal. L'on peut se faire aider par les graduations angulaires portées sur le receveur, mais le point précis doit être recherché au voisinage de ces graduations en essayant de suivre la course du soleil toutes les 5 minutes.

I.1 Matériels et méthodes

Pour étudier le dispositif (Figure 4.2 page suivante), il faudrait les équipements énumérés ci-dessous et les méthodes de mesures s'y référant :



FIG : 4.2 – Dispositif complet N°1 de l'étude

1. Un enregistreur de données de type Midi LOGGER GL200A et de marque GRAPH-TEC (Figure 4.3 page suivante). Les mesures de température sont données directement en °C. Sa précision est de $\pm 0,8 \%$. Pour l'expérience, il a été décidé une mesure de température toutes les 2,5 minutes.
 - Une sonde est placée contre la vitre du receveur pour mesurer la température au foyer.
 - Une autre sonde mesure la température ambiante.
2. Un solarimètre de type SL100 et de marque KIMO pour mesurer l'ensoleillement (Figure 4.4 page suivante). Les mesures de l'ensoleillement sont données directement en $W.m^{-2}$. Sa précision est à 5 % de la mesure.



FIG : 4.3 – Enregistreur GL200A



FIG : 4.4 – Solarimètre SL100

Les mesures de la température au foyer se font en cherchant au jugé le point le plus chaud sur la face exposée du receveur, en se faisant aider par les graduations angulaires reportées sur celui-ci. Ces graduations représentent la position du soleil de 09 h 00 à 16 h 00. Il faut rappeler que l'amplitude d'une heure correspond à 15 °angulaire.

I.2 Résultats et discussion

Relevés du 07 novembre 2014

L'on constate que la courbe des températures (Figure 4.5 page suivante) tracée au vue des relevés au niveau du foyer croît progressivement jusqu'à 12 h 30 où elle atteint un pic à 250 °C. Cela suit à peu près l'évolution de l'ensoleillement du jour (Figure 4.6 page suivante). Cette correspondance est normale, car le coefficient de concentration étant constant, la température est directement fonction du rayonnement direct. Les quelques incohérences autour de 12 h et 13 h sont dues à des alternances nuageuses.

Un autre constat montre également que la température est déjà supérieure à 120 °C dès 8 h 30 du matin et ne descend à aucun moment en deçà de cette température, même à 15 h. Bref, la température évolue entre 120 °C et 250 °C pendant 8 h 30 et 15 h.

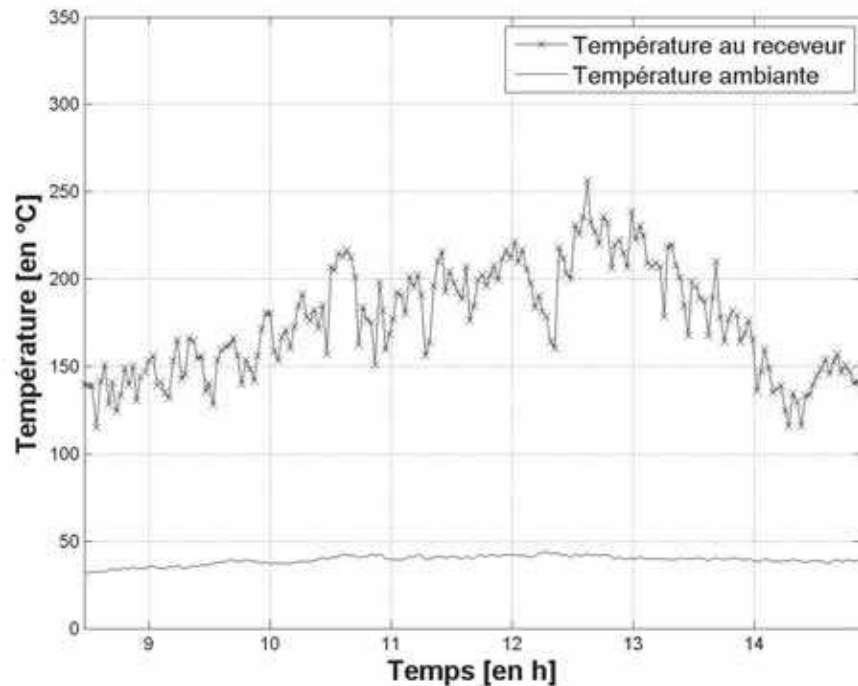


FIG : 4.5 – Relevés de températures du 07/11/2014

Les relevés de température se font sur un intervalle de [08 h 30; 14 h 50] . La température ambiante évolue entre 34 et 45 °C. La température du point focal est déjà supérieur à 120 °C dès 08 h 30 pour atteindre un maximum de 250°C à 12 h 30. Après, elle redescend tout en restant au delà de 120 °C. Elle est conforme à l'évolution de l'ensoleillement.

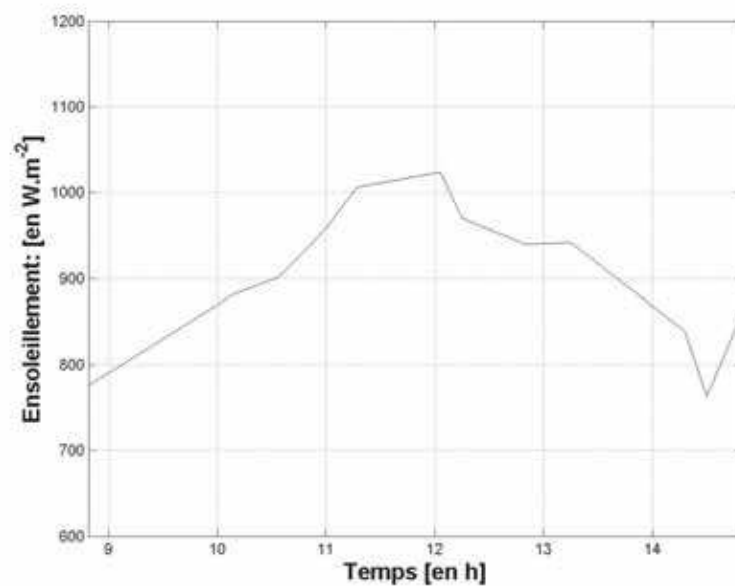


FIG : 4.6 – Relevés de l'ensoleillement du 07/11/2014

La courbe d'ensoleillement garde sa forme de cloche, avec quelques irrégularités entre 12 h et 13 h et au delà de 14 h dues à des passages nuageux. Elle varie de 780 à 1 015 Wm⁻².

Relevés du 15 décembre 2014

L'on constate que la courbe des températures tracée au vue des relevés au niveau du foyer croit progressivement jusqu'à 12 h où elle atteint un pic à 260 °C (Figure 4.7 page suivante). Cela suit à peu près l'évolution de l'ensoleillement du jour (Figure 4.8 page suivante). Cette correspondance reste normale du fait que le coefficient de concentration reste constant. Les quelques incohérences après 12 h sont dues à des couvertures nuageuses.

La température reste toujours supérieure à 120 °C entre 9 h du matin et ne descend à aucun moment en deçà de cette température, même à 15 h. Bref, la température évolue entre 120 °C et 260 °C pendant toute la journée.

Le changement de la valeur de ϕ_s de 30 ° à 22 ° a pourtant apporté un résultat certes difficilement perceptible du fait d'un après midi perturbé, mais on constate un relèvement de la température autour de 200 °C dès 10 h. Ce qui veut dire qu'en dépit de fait que la surface d'exposition est réduite pour $\phi_s=22^\circ$ (de 3,079 m² à 2,362 m²), la concentration est meilleure et la température également s'améliore conséquemment.

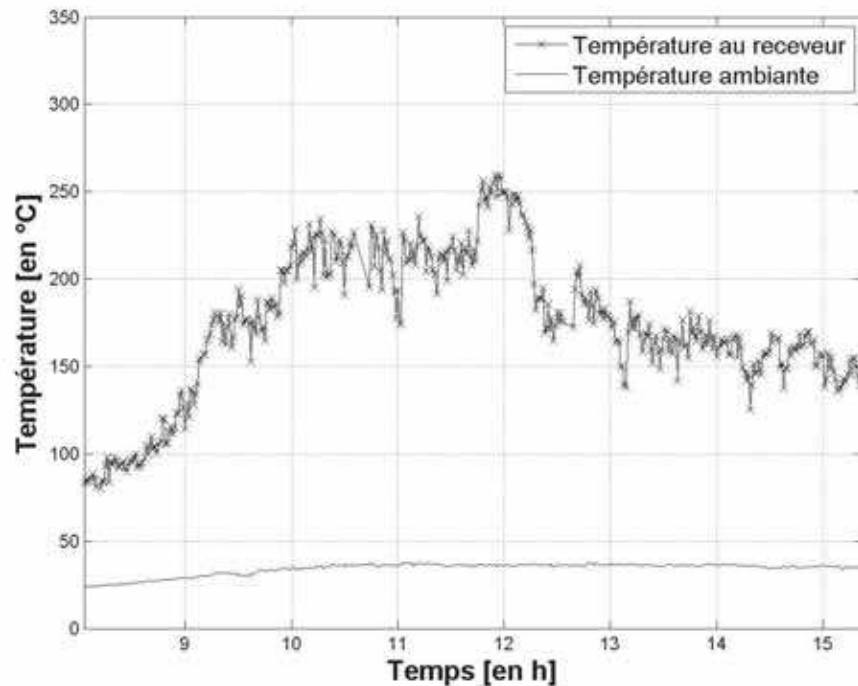


FIG : 4.7 – Relevés de températures du 15/12/2014

Les relevés de température se font sur un intervalle de [08 h; 15 h 20] . La température ambiante évolue entre 25 et 38 °C. La température du point focal commence à 74 °C dès 08 h pour atteindre un maximum de 260 °C à 12 h. Après, elle redescend tout en restant au delà de 130 °C. Elle est conforme à l'évolution de l'ensoleillement.

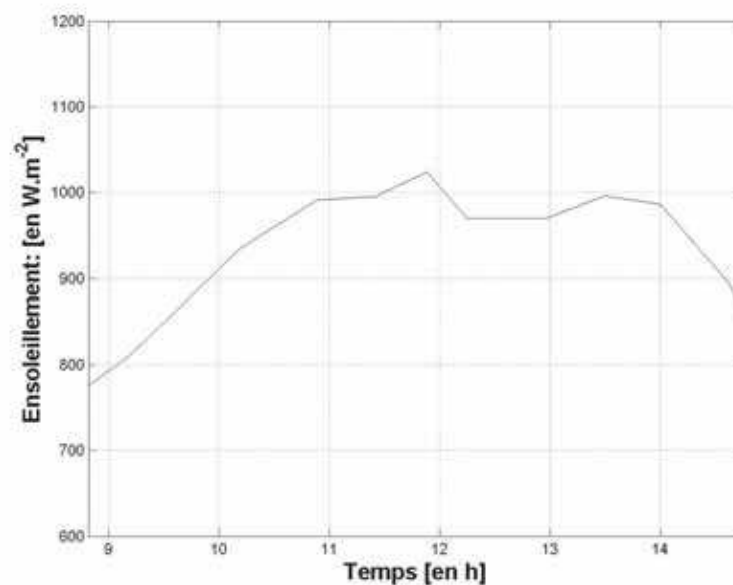


FIG : 4.8 – Relevés de l'ensoleillement du 15/12/2014

La courbe d'ensoleillement garde sa forme de cloche, avec quelques irrégularités entre 11 h 50 et 13 h 30 dues à des passages nuageux. Elle varie de 780 à 1 015 Wm⁻².

II PROTOTYPE N°2

II.1 Matériels et méthodes

Pour étudier le dispositif (Figure 4.9), il faudrait utiliser les équipements énumérés ci-dessous et les méthodes de mesures s'y référant :



FIG : 4.9 – Dispositif complet N2 de l'étude

1. Un enregistreur de données de type Midi LOGGER GL200A et de marque GRAPH-TEC (Figure 4.10 page suivante). Les mesures de température sont données directement en °C. Sa précision est de $\pm 0,8 \%$. Pour l'expérience, il a été décidé une mesure de température toutes les 2 minutes.
 - o deux sondes sont placées de part et d'autre (Nord et Sud) contre la courbure du receveur se trouvant dans le plan (P) de moindre diffusion pour mesurer la température au foyer. Notons que ces sondes sont enrobées des gaines spéciales résistant aux hautes températures.

- deux sondes sont placées à l'intérieur du receveur de chaque côté (Est et Ouest) et introduites de 10 *cm* pour mesurer la température de l'air se trouvant dans la cavité de celui-ci.
 - Une autre sonde mesure la température ambiante.
2. Un pyranomètre de type SR03 et de marque Hukseflux pour mesurer l'ensoleillement (Figure 4.11). Sa précision est à 3,5 % de la mesure. Les mesures de l'ensoleillement sont enregistrées directement par le Midi LOGGER. Celui-ci enregistre en *mV*. Ces valeurs sont ensuite multipliées par un coefficient de conversion pour obtenir des $W.m^{-2}$.



FIG : 4.10 – Enregistreur GL200A



FIG : 4.11 – Pyranomètre SR03

Les mesures de la température au foyer se font en cherchant au jugé les points les plus chauds sur les faces Nord et Sud du receveur, en se faisant aider par les taches lumineuses qui apparaissent sur celui-ci. La température dans le four, qui correspond à la cavité à l'intérieur du receveur, sera mesurée par les sondes Est et Ouest placées à chaque extrémité et introduites à une distance de 10 *cm* par rapport à l'ouverture.

II.2 Résultats et discussions : Relevés du 06 juin 2016

L'on constate que les courbes des températures (Figure 4.12 page suivante) tracées au vue des relevés au niveau du foyer coté Nord et Sud du receveur croissent progressivement jusqu'à 11 h 00 où elles atteignent un pic à 686 °C. Cela suit à peu

près l'évolution de l'ensoleillement du jour (Figure 4.13 page suivante), même si, par l'absence de continuité des courbes, l'on perçoit des difficultés à trouver le point focal lors du placement des sondes Nord et Sud.

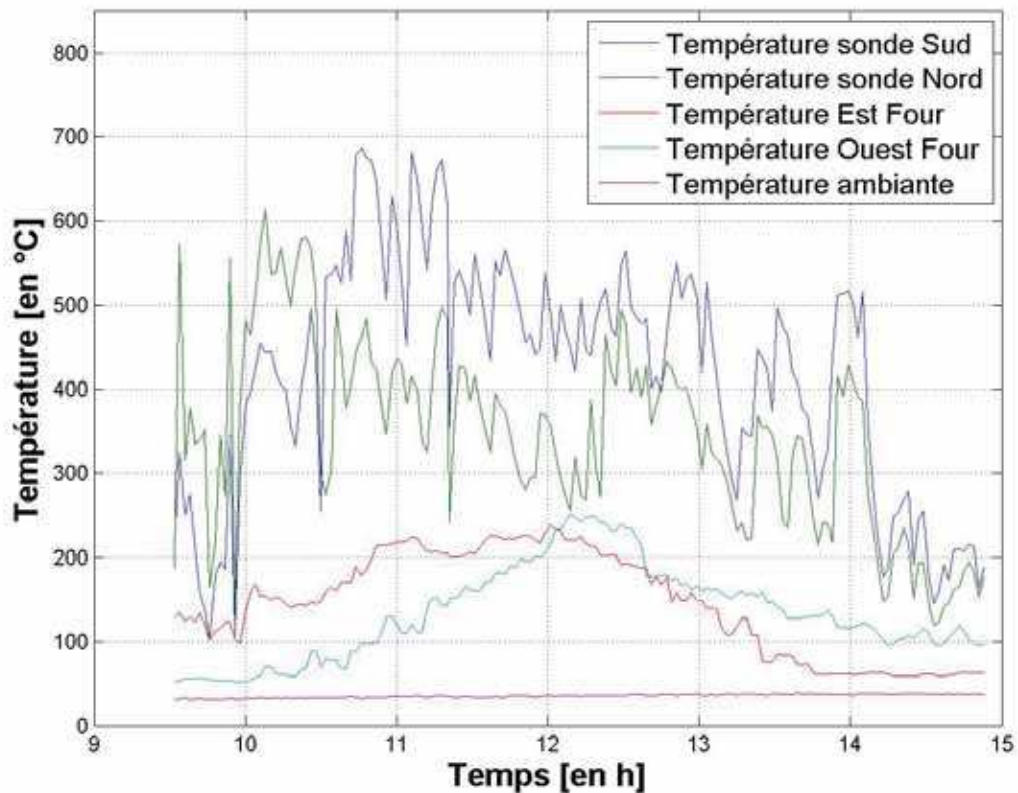


FIG : 4.12 – Relevés de températures du 06/06/2016

Les relevés de température se font sur un intervalle de [09 h 30; 14 h 55] . La température ambiante évolue entre 30 et 40 °C. Les températures des sondes Nord et Sud évoluent au delà de 100 °C de 09 h 30 à 14 h 50 en passant par un maximum de 686 °C autour de 11 h. Il y a alternance de valeurs positives de sondes Nord et Sud à 10 h 30 stipulant un défaut d'alignement du receveur dans le plan de déclinaison. On note également des pics de températures au delà de 500 °C atteintes dès 09 h 30 et qui persistent jusqu'à 14 h 10, permettant de spéculer qu'il serait possible de garantir cette température dans des conditions d'alignement et de positionnement idéales du receveur. Les valeurs des sondes Est et Ouest mesurant la température de l'air dans le four varient de 50 °C à 252 °C, maximum atteint autour de 11 h. L'évolution de toutes ces courbes est conforme à l'évolution de l'ensoleillement du jour.

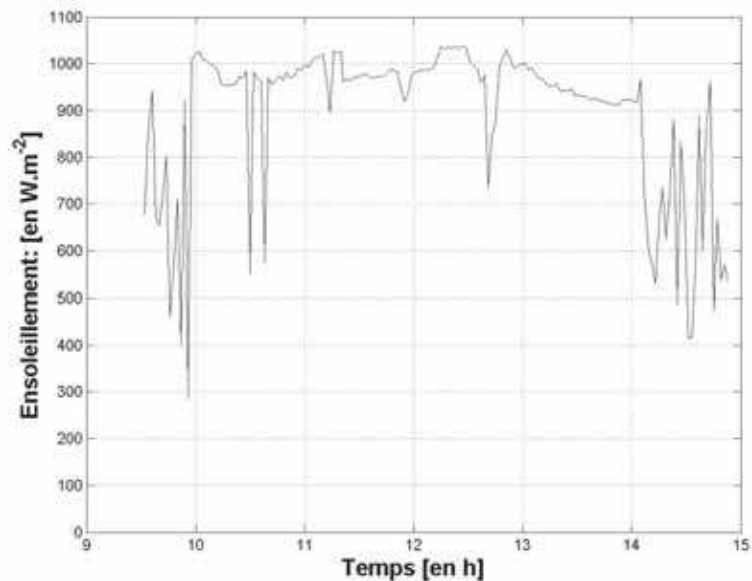


FIG : 4.13 – Relevés de l'ensoleillement du 06/06/2016

La courbe d'ensoleillement n'a pas sa forme de cloche à cause de la plage réduite des mesures avec des incertitudes avant 09 h et après 14 h dues à des perturbations nuageuses, mais elle évolue de 300 à 1 020 W.m^{-2} .

Un autre constat est que des températures supérieures à 500 °C sont déjà atteintes de façon sporadique vers 9 h 30 dans la matinée et également vers 14 h 10 dans l'après-midi, ce qui permet de dire que dans les conditions idéales d'alignement et de positionnement du receveur, des températures supérieures à 500 °C peuvent être maintenues entre 9 h 30 et 14 h 30.

Quand à la température à l'intérieur du receveur, et en considérant les maxima des deux sondes Est et Ouest, celle-ci varie entre 97 °C et 252 °C. Ces valeurs de température sont en deçà des valeurs souhaitées pour la cuisson du pain. Cela peut être justifié par le fait que les parois du four ne sont pas isolées de façon adiabatique ; il y a des pertes dues aux échanges thermiques avec l'extérieur. De plus, l'air est un très mauvais fluide calo-porteur. Même s'il a l'avantage d'être utilisable directement pour la cuisson du pain, il a l'inconvénient d'être difficile à élever en température.

III IMPLICATIONS DÉGAGÉES DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Suite à cette étude expérimentale, deux implications peuvent être établies :

1. Le système hémisphérique peut être utilisé avantageusement à la place d'un système *Scheffler* qui est motorisé quand à la poursuite du soleil d'Est en Ouest (Figures 4.14 et 4.15).

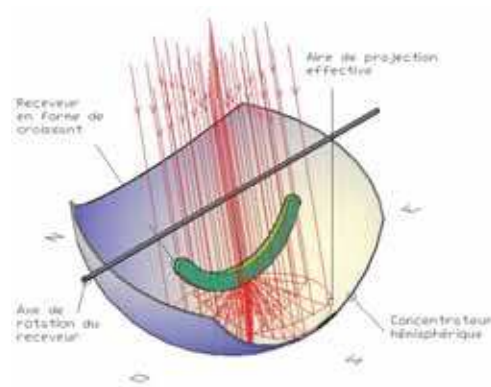


FIG : 4.14 – Système hémisphérique



FIG : 4.15 – Système *Scheffler*

(4.15-Source : *Solare-bruecke.org*. Construit par : IUT d'électronique de Grenoble, Installé à : Trièves, France). Le même effet peut être obtenu avec un concentrateur hémisphérique avec receveur en forme de croissant sur axe rotatif qu'un système *Scheffler*.

Les avantages du système hémisphérique par rapport au système *Scheffler* sont :

- ★ Plus besoin de système motorisé de traque du soleil d'Est en Ouest.
 - ★ Plus besoin d'ajustement mécanique et de changement de profil parabolique dû à la déclinaison, la seule rotation du receveur suivant son axe tous les 2-3 jours suffirait.
2. Le système hémisphérique pourrait être avantageusement utilisé en lieu et place des concentrateurs paraboliques linéaires (Figures 4.16 et 4.17 page suivante). En effet, les systèmes paraboliques linéaires sont très généralement utilisés avec l'axe de rotation aligné dans la direction Est-Ouest. La déclinaison solaire seule est ajustée. Le système hémisphérique pourrait également être utilisé de cette façon.

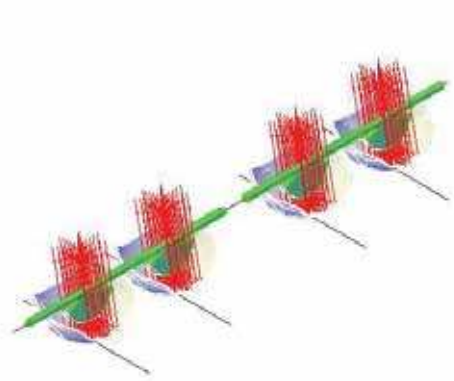


FIG : 4.16 – Système à chauffage par points FIG : 4.17 – Système à chauffage continu

(Source figure 4.17 : Courtesy of Kramer Junction Operating Company - USA). Des concentrateurs hémisphériques alignés à chauffage intermittent pourraient être utilisés en lieu et place de systèmes cylindro-paraboliques avec un avantage sécuritaire.

Les concentrateurs hémisphériques seraient dans ce cas accolés les uns aux autres avec un axe-receveur commun orienté dans la direction Est-Ouest. De cette façon, ce serait l'axe-receveur qui subirait une rotation tous les 2-3 jours pour un alignement en fonction de la déclinaison. La différence est que le chauffage du fluide calo-porteur est linéaire et permanent pour le concentrateur cylindro-parabolique, tandis-que le chauffage du fluide calo-porteur pour le concentrateur hémisphérique se fait de manière intermittente par point.

L'avantage du système hémisphérique est que son concentrateur est fixe, donc moins sensible aux intempéries contrairement au concentrateur cylindro-parabolique qui est mobile, et donc exposé aux vents (Figures 4.18 et 4.19 page suivante).

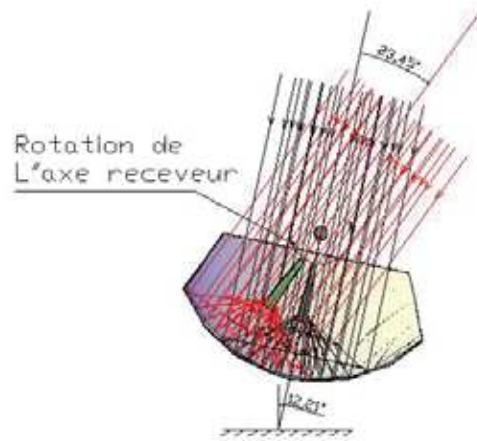


FIG : 4.18 – Système hémisphérique

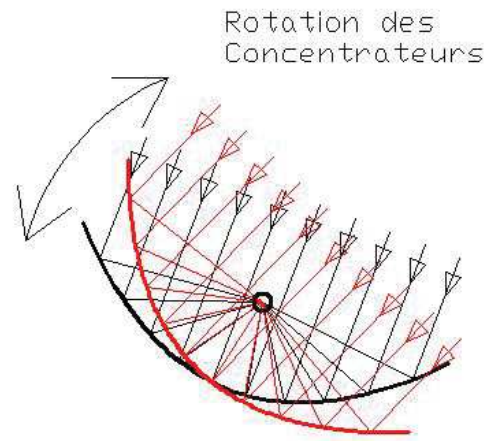


FIG : 4.19 – Système parabolique

Pour les systèmes hémisphériques, le receveur commun est en mouvement avec les concentrateurs hémisphériques fixes, tandis-que pour les systèmes cylindro-paraboliques, c'est tout l'ensemble qui est en mouvement.

CONCLUSION SUR L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.

L'étude montre qu'avec un concentrateur hémisphérique ayant un coefficient de concentration géométrique moyen de valeur maximale de 2 815 et un coefficient de concentration géométrique de valeur maximale de 817, il a été possible d'obtenir des températures au foyer externe du receveur évoluant entre 100 °C et 686 °C de 09 h 30 à 14 h 50 sous un ensoleillement moyen de $930 W m^{-2}$. Il a été également possible d'obtenir des températures à l'intérieur du four évoluant entre 97 °C et 252 °C, et cela avec un système de traque quasi-fixe, c'est-à-dire avec seulement l'ajustement tous les 2-3 jours de l'angle de déclinaison par une rotation du receveur.

De ces résultats, deux implications peuvent être dégagées :

1. Le système à concentration hémisphérique peut avantageusement remplacer le système *Scheffler* par sa non motorisation pour la traque du soleil d'Est en Ouest, son réglage mécanique pour la traque de la déclinaison et le changement de profil de ses paraboles pour la focalisation. Pour le système à concentration hémisphérique, une rotation du receveur seul est suffisant.
2. Le système à concentration hémisphérique pourrait avantageusement remplacer les systèmes cylindro-paraboliques. Quand les systèmes cylindro-paraboliques ont leur axe orienté Est-Ouest, la traque de la déclinaison seule est assurée. Les systèmes à concentration hémisphériques sont également disposés de la même manière dans cette étude, avec la traque de la déclinaison assurée par une rotation du receveur seul. Cela constitue un avantage certain face aux intempéries puisque le concentrateur hémisphérique est fixe.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.

Conclusion Générale.

Dans ce document de thèse, les différents procédés de captation de l'énergie solaires ont été passés en revue. Une attention plus soutenue a été portée sur les différents types de concentrateurs et la formation de l'image optique en vue d'établir les coefficients de concentration. Les différents coefficients de concentration ont été récapitulés dans des tableaux à but comparatif.

Par la suite, le choix s'est porté sur l'analyse approfondie des images optiques du concentrateur circulaire hémisphérique pour une application aux fours à Pain. Son coefficient de concentration géométrique a été redéfini selon le principe de juxtaposition et au vue d'un dimensionnement de son receveur en forme de croissant de lune, et son coefficient de concentration géométrique moyen a aussi été redéfini en fonction de l'équation de la caustique, permettant une meilleure disposition dans le plan de moindre diffusion, et une meilleure définition de la largeur de son receveur-cavité.

Des mesures ont été faites sur deux prototypes : le premier prototype a son concentrateur hémisphérique conçu à l'aide de carreaux de miroir de 5 cm de côté. Cela avait pour inconvénient de réduire conséquemment ses coefficients de concentration. Il a également un receveur cavité en forme de croissant. En résultat, ce prototype n'a pas permis d'obtenir des valeurs de températures significatives au receveur pour une cuisson

du pain.

Le second prototype a son concentrateur hémisphérique conçu en béton armé avec sa paroi interne bien lisse et tapissée d'un miroir autocollant de 95 % de réflectivité. Son receveur à surface externe (en opposition à surface cavité) comporte un four incorporé pour les relevés de températures. Les résultats finaux présentés ici correspondent aux mesures faites sur ce second prototype, car c'est finalement ce dernier qui donne des valeurs assez proches des valeurs souhaitées.

Les mesures de température montrent qu'avec un concentrateur hémisphérique ayant un coefficient de concentration géométrique moyen de valeur maximale de 2 815 et un coefficient de concentration géométrique de valeur maximale de 817, il a été possible d'obtenir de 09 h 30 à 14 h 50, des températures au foyer évoluant entre 100 °C et 686 °C, et des températures dans le four du receveur comprises entre 97 °C et 252 °C, sous un ensoleillement moyen de 930 W m^{-2} , et cela avec un système de traque quasi-fixe du receveur, c'est-à-dire avec seulement l'ajustement tous les 2-3 jours de l'angle de déclinaison par simple rotation du receveur.

Sur la base de ces résultats, deux implications ont été dégagées :

1. Le concentrateur hémisphérique peut avantageusement remplacer les systèmes *Scheffler* en se passant de la motorisation pour la poursuite du soleil d'Est en Ouest, et du réglage mécanique de ses portions de parabole. En effet, un réglage mécanique compliqué de l'inclinaison des portions de paraboles en vue de traquer la déclinaison, et un changement du profil des portions de parabole pour la focalisation était nécessaire tous les 2-3 jours. Toutes ces manipulations seraient désormais réduites à une simple rotation de l'axe-receveur dans le cas du système à concentration hémisphérique.
2. Le concentrateur hémisphérique peut avantageusement remplacer le concentrateur cylindro-parabolique. Il y aura bien-entendu une différence dans le chauffage du fluide calo-porteur qui est linéaire continu pour le cylindro-parabolique, et

intermittent par point pour l'hémisphérique. L'avantage se situerait au niveau sécuritaire des installations hémisphériques qui sont fixées de façon permanente avec un receveur rotatif tandis-que les concentrateurs cylindro-paraboliques sont mobiles pour traquer la déclinaison, avec tous les risques de prise au vent qu'ils encourent.

Perspectives.

Malgré les bons résultats de relevés de températures au contact du receveur, les relevés à l'intérieur du four n'atteignent pas les valeurs de température pour la cuisson du pain. Cela peut s'expliquer par le fait que l'alignement du receveur dans le plan de déclinaison n'est pas parfait. Ce fait est corroboré par les pics de températures de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ atteintes dès 9 h 30 et qui persistent au delà de 14 h. Une autre explication est que les parois du four n'étant pas adiabatiques, il y a beaucoup de pertes thermiques. Enfin, l'air est un très mauvais fluide caloporteur.

Pour des améliorations futures, il faudrait :

1. Trouver un moyen de positionner avec précision le receveur dans le plan de déclinaison solaire.
2. Isoler les parois du receveur en espérant que cela ne réduira pas substantiellement la surface d'exposition du concentrateur.
3. Changer de fluide caloporteur en adoptant une huile à la place de l'air et ayant un meilleur coefficient de convection thermique que celui-ci.

D'autre part, Il faudrait faire des expériences qui prouvent qu'un système de concentrateurs hémisphériques pourrait avantageusement remplacer les systèmes de concentrateurs cylindro-paraboliques.

Bibliographie

- BMU-Archive. *ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE - ETUDE COMPARATIVE*. Technical report, Ministère Fédéral Allemand de l'Environnement, 2015.
- Richard Taillet, Loic Villain, and Pascal Febvre. *DICIONNAIRE DE PHYSIQUE*. De Boeck, 2013.
- Jacques Beauchamp. *BILAN RADIATIF DE LA TERRE*. Universite de Picardie Jules Verne - France, 11 2003.
- John A. Duffie and William A. Beckman. *SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES*. WILEY Interscience, 1980.
- IMCCE. *CALCUL DES SAISONS*. Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides, 77, avenue Denfert-Rochereau F-75014 Paris, 2015.
- Zeguib Ilhem. *ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN CONCENTRATEUR SOLAIRE PARABOLIQUE*. Master's thesis, Universite Mentouri Constantine Faculte Des Sciences Departement De Physique, 2005.
- Hamdi Hocine. *INTRODUCTION À LA ROBOTIQUE*. Mentouri-Constantine, 2002-03.
- Rochdi Merzouki. *ROBOTIQUE INDUSTRIELLE*. Robot Khepara II, 2010-11.
- Issa Zerbo. *ETUDE EN MODELISATION D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE AU SILICIUM SOUS ECLAIREMENT MULTISPECTRAL EN REGIME DYNAMIQUE FREQUENTIEL : METHODES DE DETERMINATION DES PARAMETRES DE RECOMBINAISON*. PhD thesis, Université de Ouagadougou - UFR SEA - LAME, 2005.
- Bernard Zouma. *ETUDE 3D D'UNE PHOTOPILE BIFACIALE POLYCRISTALLINE : DETERMINATION DES PARAMETRES DE RECOMBINAISON A PARTIR DU RENDEMENT QUANTIQUE INTERNE*. PhD thesis, Université de Ouagadougou - UFR SEA - LAME, 2007.
- Thierry Ky. *SYSTÈME PHOTO-VOLTAÏQUE : DIMENSIONNEMENT POUR POMPAGE D'EAU, POUR UNE IRRIGATION GOUTTE-À-GOUTTE*. Master's thesis, Université de Ouagadougou - UFR SEA - LAME, 2007.

- Boukaré Ouédraogo. *ÉVALUATION DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN CAPTEUR À AILETTES EN CONVECTION NATURELLE ET FORCÉE*. Master's thesis, Université de Ouagadougou-UFR-SEA-LETRE, 2013.
- Denis Bonnelle. TOUR SOLAIRE, TOUR A VATORISATION D'EAU, ET MODES DE CONVERSION D'ENERGIE RENOUVELABLE APPARENTES : PRESENTATION, CRITIQUES ET SUGGESTIONS. PhD thesis, Université Claude BERNARD - LYON 1, 2002.
- Luc Manpaey. *LE PROGRAMME HAARP - SCIENCE OU DESASTRE ? DES Gestion*, Université Libre de Bruxelles, Octobre 1998.
- Sylvain Quoilin. LES CENTRALES SOLAIRES À CONCENTRATION. Université de Liège Faculté des sciences appliquées, 2007.
- Robert Pitz-paal. *HIGH TEMPERATURE SOLAR CONCENTRATOR. Solar energy conversion and photoenergy systems*, 1 :43, 2006.
- François Veynandt. CONGÉNÉRATION HÉLIOTHERMODYNAMIQUE AVEC CONCENTRATEUR LINÉAIRE DE FRESNEL : MODÉLISATION DE L'ENSEMBLE DU PROCÉDÉ. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2011.
- Véronique Feldheim. ÉNERGIE SOLAIRE. Polytech. Mons, 2010.
- A. Gama, M. Haddadi, and A. Malek. *ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN CONCENTRATEUR CYLINDRO PARABOLIQUE AVEC POURSUITE SOLAIRE AVEUGLE. Revue des Energies Renouvelables*, 11 :437–451, 2008.
- H. E. Imadojemu. *CONCENTRATING PARABOLIC COLLECTORS : A PATENT SURVEY. Energy conversion*, 36 :225–237, 1995.
- V. B. Gandhe, A. Venkatesh, and V. Sriramulu. *OPTICAL ANALYSIS OF A CYLINDRICAL ABSORBER IN A FIXED SPHERICAL REFLECTOR. Energy*, 11 :969–976, 1986a.
- Imhamed M. Saleh Ali. DESIGN AND ANALYSIS OF A NOVEL 3-D ELLIPTICAL HYPERBOLOID STATIC SOLAR CONCENTRATOR OF PROCESS HEAT APPLICATIONS. PhD thesis, Instifute of mechanical - Heriot-Watt university, Edingurgh, United Kingdom, 2013.
- V. P. Vasylyev. *CONCENTRATOR OF RADIANT ENERGY "PERESVET" AND THE MANUFACTURING METHOD - USSR Patent, SU1023270*, 1981.
- M. Mouzouris, L. W. Roberts, and M. Brooks. *THERMAL PERFORMANCE OF A HIGH-FLUX SOLAR CONCENTRATING SYSTEM. R&D Journal of the South African Institute of Mechanical Engineering*, 27 :10–22, 2011.
- Williams B. Stine, Michael Geyer, and R. W. Harrigan. SOLAR ENERGY SYSTEMS DESIGN. Solar Power System, 1986.

-
- Housseyn Karoua. *ÉTUDE DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN CAPTEUR SOLAIRE AVEC EFFET DE CONCENTRATION DE TYPE FRESNEL*. Master's thesis, Ecole Doctorale en Energétique et Développement durable - Algérie, 2011.
- Klemens Schwarzer and Maria Eugenia Vieira Da Silva. *SOLAR COOKING SYSTEM WITH OR WITHOUT HEAT STORAGE FOR FAMILIES AND INSTITUTIONS*. *Solar Energy*, 75 :35–41, 2003.
- Vincent Nicolas, Patrick Salagnac, Jean-pierre Ploteau, Vanessa Jury, Patrick Glouannec, and Lionel Boillereaux. *ÉTUDE NUMÉRIQUE DES TRANSFERTS DE MASSE ET DE CHALEUR DANS LE PAIN LORS DE LA CUISSON*. In *COMSOL*, Paris-France, nov 2010.
- Mark Aakfs, Paul Barth, Elinor Benes, Roger Bernard, Rick Blodgett, and Barbara Blum. *CUISEUR SOLAIRE. COMMENT CONSTRUIRE, EMPLOYER ET APPRÉCIER*. Technical report, Solar Cookers International, 2004.
- R. M. Muthusivagami, R. Velraj, and R. Sethumadhavan. *SOLAR COOKERS WITH AND WITHOUT THERMAL STORAGE - A REVIEW*. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 14 :691–701, 2010.
- A. Munir, O. Hensel, and W. Scheffler. *DESIGN PRINCIPLE AND CALCULATIONS OF A SCHEFFLER FIXED FOCUS CONCENTRATOR FOR MEDIUM TEMPERATURE APPLICATIONS*. *Solar Energy*, 84 :1490–1502, 2010.
- José Ruelas, Nicolas Velazquez, and Jesus Cerezo. *A MATHEMATICAL MODEL TO DEVELOP A SCHEFFLER-TYPE SOLAR CONCENTRATOR COUPLED WITH A STIRLING ENGINE*. *Applied Energy*, 101 :253–260, 2013.
- Vishal Sardeshpande and Indu R. Pillai. *EFFECT OF MICRO-LEVEL AND MACRO-LEVEL FACTORS ON ADOPTION POTENTIAL OF SOLAR CONCENTRATORS FOR MEDIUM TEMPERATURE THERMAL APPLICATIONS*. *Energy for sustainable Development*, 16 :216–223, 2012.
- Alain Marie Emile Kombassere. *ETUDE EXPÉRIMENTALE DES PERFORMANCES THERMIQUES D'UN SYSTÈME À CONCENTRATION À TEMPÉRATURE MOYENNE*. Master's thesis, UO, UFR/SEA, 2008.
- Steven C. Rogers, Connor Barichman, Greg Chavoor, Matt Kinni, Nik Glazar, and Peter V. Schwartz. *CONCENTRATING SUNLIGHT WITH AN IMMOBILE PRIMARY MIRROR AND IMMOBILE RECEIVER : RAY-TRACING RESULTS*. *Solar Energy*, 86 :132–138, 2012.
- Mahdi Khaled. *CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN CONCENTRATEUR SPHÉRIQUE*. Master's thesis, Université Mentouri Constantine Faculte Des Sciences Exactes Departement De Physique, 2008.

-
- W.t.t. Dayanga and K.a.i.l.w. Gamalath. *THERMODYNAMIC INVESTIGATION OF SOLAR ENERGY CONVERSION INTO WORK. Sri Lanka Journal of Physics*, 9 :47–60, 2008.
- Ari Rabl. *COMPARISON OF SOLAR CONCENTRATORS. Solar Energy*, 18 :93–111, 1976.
- Francis Pronovost. *DÉVELOPPEMENT D'UN CONCENTRATEUR SOLAIRE DANS UNE PERSPECTIVE D'EXPLOITATION DURABLE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE. Master's thesis, Faculté Des Sciences Et De Génie Université Laval Québec*, 2010.
- Shuai Yong, Xia Xin-Lin, and Tan He-Ping. *RADIATION PERFORMANCE OF DISH SOLAR CONCENTRATOR/CAVITY RECEIVER SYSTEMS. Solar Energy*, 82 :13–21, 2008.
- Qianjun Mao, Yong Shuai, and Yuan Yuan. *STUDY ON RADIATION FLUX OF THE RECEIVER WITH A PARABOLIC SOLAR CONCENTRATOR SYSTEM. Energy conversion and management*, 84 :1–6, 2014.
- Yves Jannot. *TRANSFERT THERMIQUE. Mac Graw Hill*, 2012.
- M. F. El-Refaie. *PERFORMANCE ANALYSIS OF THE STATIONARY-REFLECTOR/TRACKING-ABSORBER SOLAR COLLECTOR. Applied Energy*, 28 :163–189, 1987.
- K. M. Ng, N. M. Adam, and B. Z. Azmi. *NUMERICAL SIMULATION ON THE REFLECTION CHARACTERISATION AND PERFORMANCE OF A SOLAR COLLECTOR - A CASE STUDY OF UPM SOLAR BOWL. Science and Technology*, 20 :283–298, 2012.
- Nadia Bouguetaia. *CONTRIBUTION À L'ETUDE ET À LA SIMULATION D'UN CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE. Master's thesis, Universite Constantine 1 Faculte Des Sciences Exactes*, 2013.
- M. Yusof Sulaiman, W. M. Hlaing Oo, Mahdi A.B.D. Wahab, and Z. Abidin Sulaiman. *CONCEPTUAL DESIGN OF A HYBRID THERMAL AND PHOTOVOLTAIC RECEIVER OF AN FMDF COLLECTOR. Renewable energy*, 12 :91–98, 1997.
- Nadir Bellel. *STUDY OF TWO TYPES OF CYLINDRICAL ABSORBER OF A SPHERICAL CONCENTRATOR. Energy Procedia*, 6 :217–227, 2011.
- V. B. Gandhe, A. Venkatesh, and V. Sriramulu. *THERMAL ANALYSIS OF AN FMDF SOLAR CONCENTRATOR. Solar and wind technology*, 3 :197–202, 1989.
- V. B. Gandhe, A. Venkatesh, and V. Sriramulu. *ANALYSIS OF A FIXED SPHERICAL REFLECTOR EXPOSED TO OBLIQUE INCIDENT RAYS. Energy conversion Management*, 26 :363–368, 1986b.

Annexe A

Annexe.1 SPECTRE SOLAIRE PAR RAPPORT AU SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique.

Les rayonnements électromagnétiques se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite. Ils se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde λ .

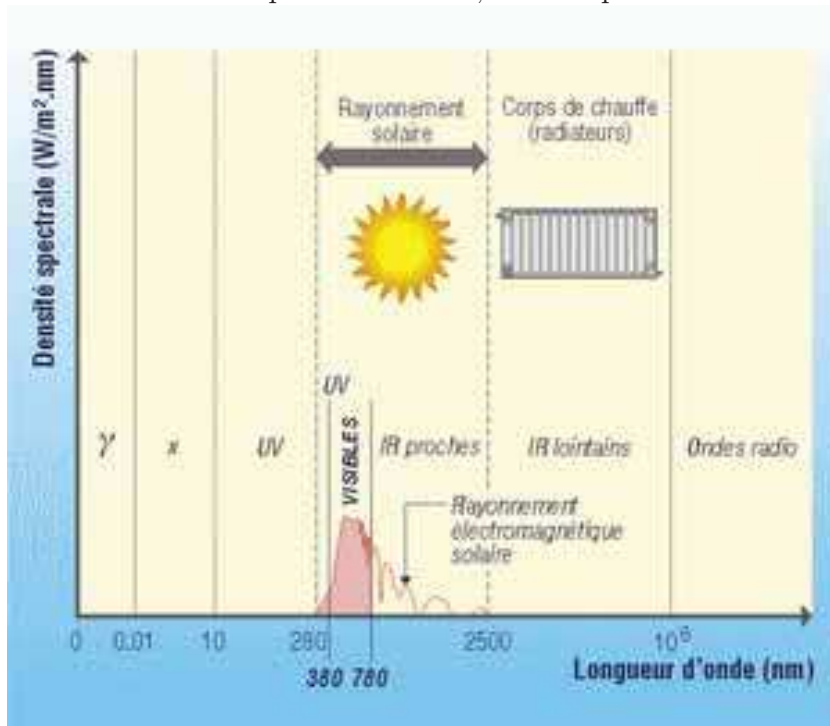


FIG : A.1 – Spectre solaire par rapport au spectre électromagnétique
http://www-energie.arch.ucl.ac.be/eclairage/guide_sources.htm#ancree01

Annexe.2 BILAN RADIATIF DE LA TERRE

2.1 Énergie solaire et orbite terrestre

Le flux solaire incident est fonction de la luminosité solaire et inversement proportionnel au carré de la distance au soleil. La Constante solaire correspond au flux solaire ramené à la distance Terre-Soleil. Elle varie selon l'activité solaire (cycle de 11 ans) et l'excentricité de l'orbite terrestre :

- Périhélie (3 janvier) : $1\,410\text{ W / m}^2$
- Aphélie (3 juillet) : $1\,320\text{ W / m}^2$
- Moyenne annuelle : $1\,368\text{ W / m}^2$

L'orbite terrestre est une ellipse de faible excentricité (2 %).

La distance moyenne
de la Terre au
Soleil est l'unité
astronomique -U.A. ;
 $1\text{ U.A.} = 149,510^6\text{ km}$.

Le flux solaire
est réparti sur la
surface sphérique
de la Terre qui est
4 fois plus grande
que sa section.

En 24 heure, compte-

tenu de la rotation de la Terre (qui occulte la partie opposée au soleil) , le flux solaire moyen qui atteint le sommet de l'atmosphère est de 342 W / m^2 . Cette valeur reste très théorique (grande différence en pratique entre le flux reçu à l'équateur et aux pôles).

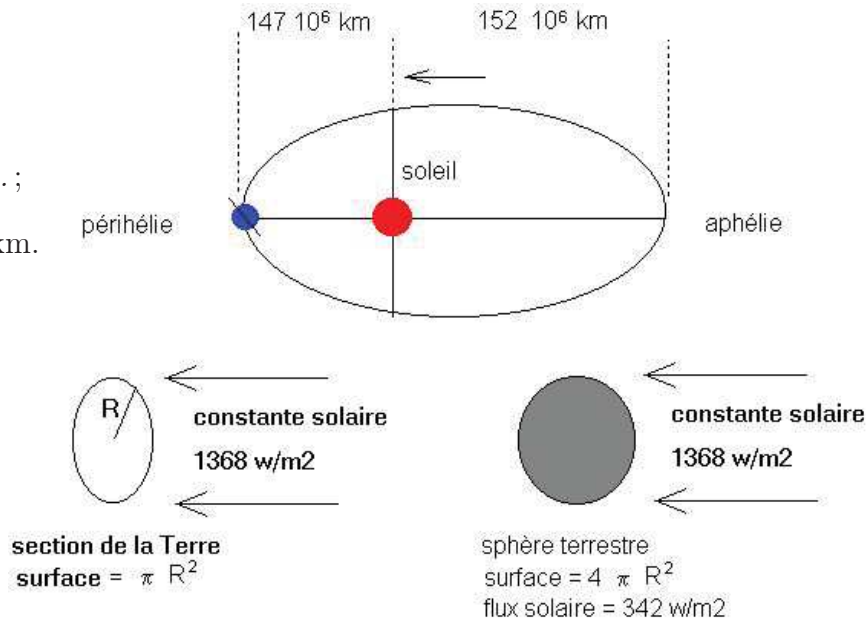


FIG : A.2 – Constante solaire et orbite

Comparativement, le flux de chaleur d'origine interne est négligeable ($0,06 \text{ W / m}^2$).

La valeur de 342 w/m^2 est la valeur moyenne annuelle du flux solaire à la surface du globe.

2.2 Flux solaire et albédo

La surface du soleil est à une température d'environ $6\,000^\circ\text{F}$. Elle émet des radiations dont la longueur d'onde varie de $0,2$ à $4 \mu\text{m}$, c'est à dire depuis l'ultraviolet jusqu'au proche infrarouge. Le domaine visible s'étend de $0,3$ à $0,7 \mu\text{m}$ environ. En moyenne : 30% du flux est réfléchi ou diffusé vers l'espace (par les nuages, les aérosols et la surface de la Terre) ; 70% est absorbé par l'atmosphère et par la surface et transformé en chaleur. Cette portion d'énergie solaire convertie en chaleur est le moteur des mouvements des masses d'air et d'eau à la surface du globe, et donc des climats. La Terre, dont la température superficielle est beaucoup plus basse, émet à son tour un flux d'infrarouges de forte longueur d'onde (de 3 à $30 \mu\text{m}$ environ). L'état thermique du système Terre-Atmosphère est relativement stationnaire sur une période de plusieurs années : le bilan radiatif global est nul.

L'albédo, qui est la partie de flux radiatif réfléchi par rapport au flux radiatif incident vaut :

- 30% pour le globe
- $5\text{-}10 \%$ sur les mers sans nuages
- $10\text{-}15 \%$ au dessus des forêts
- $30\text{-}50 \%$ sur les déserts
- $60\text{-}85 \%$ sur la neige et la glace.

2.3 Bilan radiatif moyen

Avec un albédo de 30% , 70% du rayonnement solaire est absorbé et transformé en chaleur : Les ultraviolets sont absorbés par l'ozone de la stratosphère Les infrarouges

sont absorbés par la vapeur d'eau et le gaz carbonique de la troposphère puis ré-émis vers le sol et vers l'espace. Le Visible et le proche infrarouge atteignent la surface.

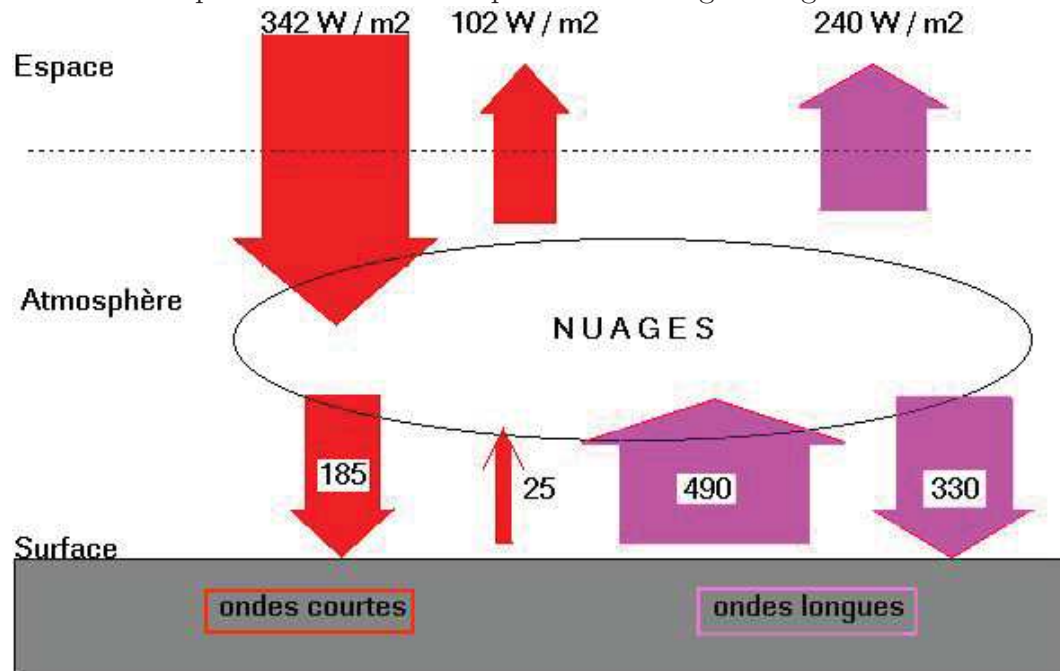


FIG : A.3 – Bilan radiatif

Sans absorption des radiations par l'atmosphère, la température moyenne globale serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ au lieu de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$: c'est l'effet de serre.

Les principaux gaz à effet de serre sont : H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 , O_3 , Fréons.

Le bilan radiatif est nul à l'échelle du globe et pour un an. En revanche il change selon le lieu et la saison. Le flux solaire incident varie en fonction de la latitude, de la saison et de l'heure. L'albédo varie en fonction de la latitude et de la saison. Le bilan annuel est positif à l'équateur mais négatif aux pôles.

Source :

★ (Beauchamp, 2003)

Annexe.3 ROBOTIQUE ET SYSTÈMES DE TRAQUE DU SOLEIL

3.1 Généralités

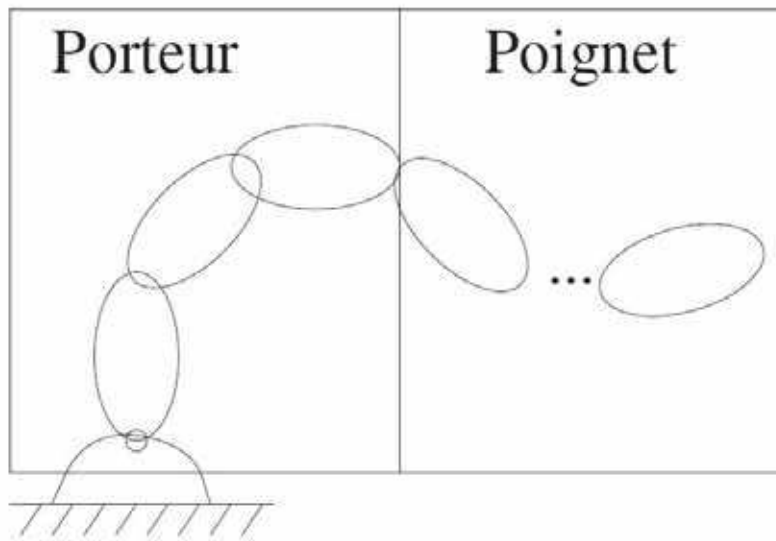


FIG : A.4 – Cinoptique du robot

Les systèmes de traque des concentrateurs solaires, que l'on veuille admettre ou non, sont des robots. Par conséquent, tous les calculs associés au positionnement, aux vitesses, aux inerties etc de ces

concentrateurs font donc appel à la robotique.

Un robot est constitué d'un *porteur* et d'un *poignet* (ou *préhenseur*). Parce que le mouvement du soleil peut être représenté par une chaîne cinématique, les systèmes pour le traquer seront aussi représentés par des chaînes cinématiques et donc par les modèles de robot correspondants (Figure A.4).

3.2 Représentation du positionnement d'un solide dans l'espace.

Un solide peut être représenté dans l'espace par :

1. Six paramètres (Trois pour la position T_x, T_y, T_z , et trois pour l'orientation R_x, R_y, R_z).

2. Douze paramètres (Trois pour la position T_x, T_y, T_z , et neuf pour représenter la matrice d'orientation $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{21}, R_{22}, R_{23}, R_{31}, R_{32}, R_{33}$)
3. Sept paramètres (Trois pour la position T_x, T_y, T_z + trois composantes d'un vecteur + un angle)
4. Neuf paramètres (3X3 coordonnées des trois points sur le solide)
5. etc.

Mais il n'y a que 6 paramètres indépendants (les six premiers), les autres étant liés par des équations.

3.3 Représentation paramétrique de la matrice d'orientation.

Les figures A.5, A.6 et A.7 page VII représentent les trois matrices de rotation possibles dans l'espace suivant les axes $0\vec{x}$, $0\vec{y}$ et $0\vec{z}$.

On distingue ainsi dans l'industrie, trois types de robots couramment utilisés ayant les représentations paramétriques suivantes :

- • Angles d'EULER : $R_{z_0}(\phi).R_{x_1}(\theta).R_{z_2}(\psi)$.
- • Angles de BRYANT : $R_{x_0}(\phi).R_{y_1}(\theta).R_{z_2}(\psi)$.
- • Angles de LEBIAN : $R_{z_0}(\phi).R_{x_1}(\theta).R_{x_2}(\psi)$.

3.4 Les matrices de transformation homogène 4X4

Toute matrice donnant la position et l'orientation d'un point P de l'espace par rapport à un repère R donné, peut être exprimée sous forme de matrice (4X4) comprenant (Hocine, 2002-03) :

1. Une matrice de (3X3) d'orientation.
2. Un vecteur colonne de position
3. Un vecteur ligne de perspective
4. Un facteur d'échelle (1X1)

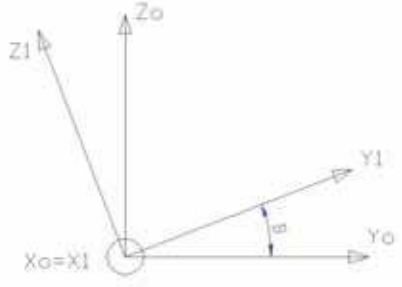


FIG : A.5 – Rotation suivant X

$$\bar{\bar{R}}_x(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

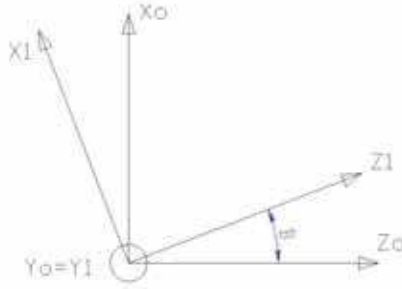


FIG : A.6 – Rotation suivant Y

$$\bar{\bar{R}}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

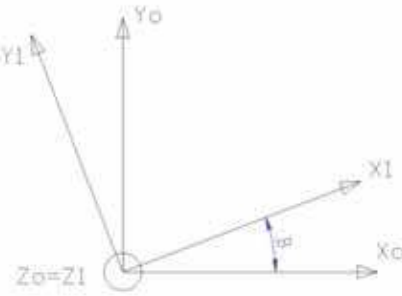


FIG : A.7 – Rotation suivant Z

$$\bar{\bar{R}}_z(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ces derniers paramètres (coefficient de perspective et facteur d'échelle) utilisés uniquement en graphique, sont des coefficients de correction pour tenir compte des déformations dues à la vision en perspective et à la distance focale. Ils sont pour la robotique, toujours constants : perspective nulle et facteur d'échelle égal a un.

Ainsi, comme expliqué en exemple dans le tableau A.1 ; une rotation pure d'angle β et une translation pure L_j seront données par des matrices homogènes 4x4.

Il convient par principe de calculer le porteur du robot indépendamment de son préhenseur. ainsi, l'on se retrouve avec deux matrices représentant chacune le porteur

TAB : A.1 – Matrices de transformation homogène 4x4

- La matrice de transformation homogène 4X4 est une matrice de calcul très couramment utilisée en robotique. Elle permet de calculer la rotation et le déplacement simultanément d'un solide dans l'espace.

$$\bar{M}_i^0 = \left[\begin{array}{ccc|c} \bar{Rot}_i^0 & \bar{Tr}_i^0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

- Une matrice homogène Transposée 4x4 de rotation d'un angle β suivant l'axe $0\vec{x}_i$ par exemple s'écrit comme suit :

$$[Rot(\vec{x}_i = x_{i+1}), \beta]^T = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & \sin(\beta) & 0 \\ 0 & -\sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

- Une matrice homogène 4x4 de translation d'une distance L_j suivant l'axe $0\vec{x}_i$ par exemple s'écrit comme suit :

$$[Tr\vec{x}_i, L_j] = \left[\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & L_j \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

et le préhenseur.

Les matrices sont apposées les unes près des autres dans l'ordre des transformations successives. puis on fait le produit matriciel par ordre après regroupement des matrices deux à deux. Selon l'expression que l'on souhaite, comme par exemple la position du repère final par rapport au repère initial, il est possible que l'on soit obligé d'utiliser les matrices inverses des rotations, qui sont de facto les matrices transposées car symétriques.

Remarque : Il existe d'autres méthodes comme celle de DENAVIT-HARTENBERG pour effectuer les opérations matricielles en robotique (Merzouki, 2010-11).

Les figures A.8 à A.10 sont des modélisations des robots servant de systèmes de traque pour les concentrateurs solaires. Avec cette modélisation cinématique, l'on peut construire les matrices des mouvements (équations (A.1) à (A.3)).

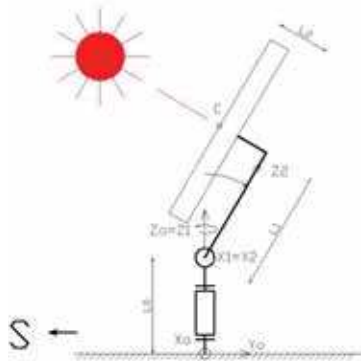


FIG : A.8 – Robot altazimutal

$$M_{(Alt)_2}^0 = [Tr \vec{z}_0, L_0] \cdot [Rot(\vec{z}_0 = \vec{z}_1), \gamma]^T \\ [Tr \vec{z}_1, L_1] \cdot [Rot(\vec{x}_1 = \vec{x}_2), i]^T \cdot [Tr \vec{y}_2, L_2] \quad (A.1)$$

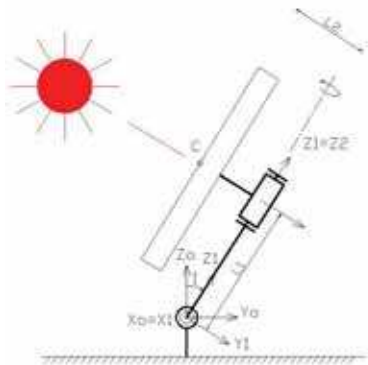


FIG : A.9 – Robot équatorial

$$\begin{aligned} M_{(Equ)}^0 &= [Rot(\vec{x}_0 = \vec{x}_1), i]^T \cdot [Tr\vec{z}_1, L_1] \\ &[Rot(\vec{z}_1 = \vec{z}_2), \varepsilon]^T \cdot [Tr\vec{y}_2, L_2] \end{aligned} \quad (A.2)$$

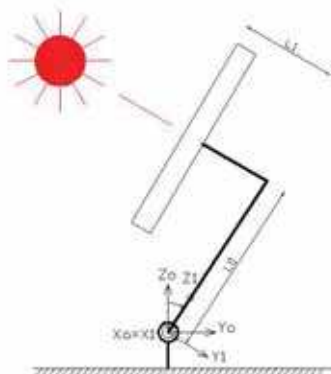


FIG : A.10 – Robot quasi-fixe

$$M_{(QuF)_1}^0 = [Rot(\vec{x}_0 = \vec{x}_1), i]^T \cdot [Tr\vec{z}_1, L_0] [Tr\vec{y}_1, L_1] \quad (A.3)$$

Annexe.4 RECETTE POUR LA CUISSON DU PAIN

Voici une petite recette de la boulangerie "Binôme Gourmant" sur la cuisson du pain avec un faible taux d'humidité (300 g d'eau pour 500 g de farine).

1. *Disposer le pain sur une grille trouée recouverte d'un papier siliconé. Je ne vous conseille pas les toiles de cuisson à cause de la température élevée et je trouve la cuisson moins performante avec.*
2. *Positionner la grille directement sur la sole du four.*
3. *Mettre 50cl environ d'eau non calcaire dans la lèchefrite.*
4. *Positionner la lèchefrite directement sous la voûte du four.*
5. *Allumer le four à 275 °C ou à la température maximum si votre four n'atteint pas cette température.*
6. *Attendre que le four ait atteint la température voire un peu plus longtemps.*
7. *Mettre la plaque sur la grille en évitant de laisser la porte du four trop longtemps ouverte afin de ne pas faire tomber la température et éviter que la vapeur ne s'échappe trop.*
8. *Au bout de 10 minutes de cuisson remonter la grille d'un cran (et un cran seulement) et enlever la lèchefrite. A ce moment là le pain est tout gonflé mais encore blanc.*
9. *Baisser la température à 250 °C.*
10. *Laisser cuire 10 minutes de plus. 3/4 minutes de moins si il s'agit de petits pains, de 5 à 10 minutes de plus si il s'agit de gros pains.*
11. *Sortir le pain et le laisser refroidir sur une grille ou, mieux, debout.*

★ <http://gourmandbinome2.canalblog.com/archives/2012/02/14/23524368.html>

Annexe.5 RÉFLECTEUR SCHEFFLER

5.1 Idée

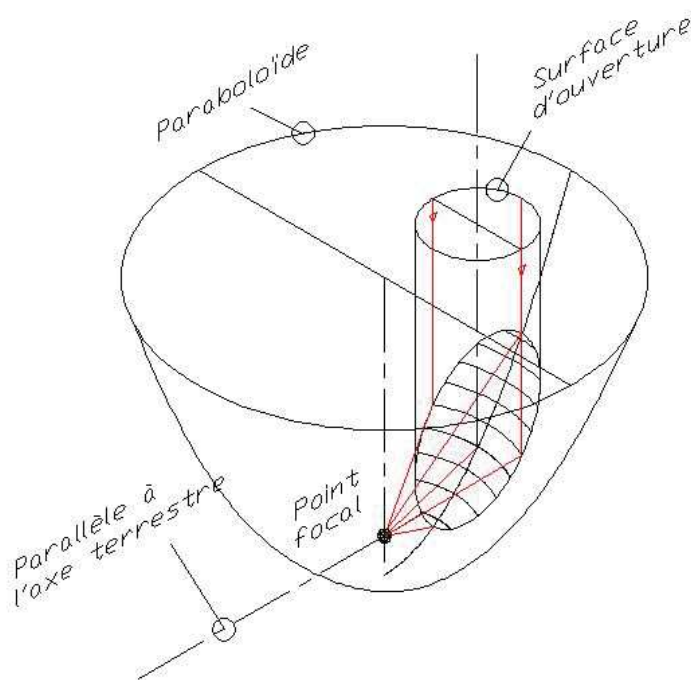


FIG : A.11 – Parabole de Scheffler

L'idée de base, qui a conduit au développement du réflecteur Scheffler, était de rendre la cuisine solaire aussi confortable que possible. Parallèlement, le système devait pouvoir être construit dans tous les ateliers ruraux des pays du Sud, après une certaine période d'essai. Les matériaux devant être achetés au niveau local.

5.2 Technique

Afin de rendre la cuisine plus facile et confortable, le lieu de cuisson doit rester immobile et au mieux dans la maison. Le concentrateur des rayons solaires se trouve devant la maison. La meilleure solution pour ce faire, est une parabole flexible et excentrée, qui tourne autour d'un axe parallèle à celui de rotation de la Terre, suivant la course du soleil. Et suivant les saisons, l'inclinaison de la parabole peut être modifiée facilement.

5.3 Mode de fonctionnement

Le miroir est constitué de petites sections latérales intégrées dans une plus grande parabole. Cette partie inclinée est à l'origine de la forme elliptique typique du réflecteur Scheffler. Les rayons solaires atteignant ces parties

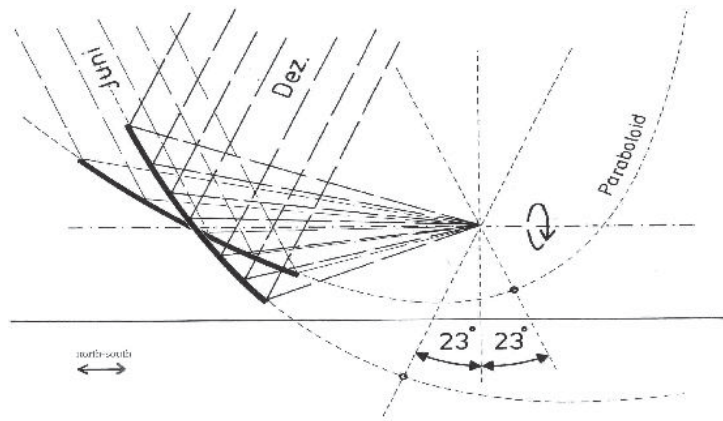


FIG : A.12 – Scheffler : réglage

de parabole, sont concentrés au point focal situé à l'extérieur de la parabole (Figure A.11 page XI).

L'axe autour duquel tourne la parabole durant la journée, est orienté du nord au sud parallèlement à l'axe de rotation de la Terre et passe par le centre de gravité du réflecteur.

Ainsi, le réflecteur est toujours en équilibre. Le système mécanique (par pendule) nécessitant peu d'énergie, permet à la parabole de bouger en synchronisation avec le soleil.

Le point focal est situé sur l'axe de rotation (voir figure A.12) , ce qui l'empêche de bouger lorsque le réflecteur tourne. L'écart entre le point focal et le centre du réflecteur dépend du choix de la forme de la parabole. Durant la journée, la lumière concentrée tourne autour de son propre centre sans pouvoir aller dans une autre direction. Le point focal reste donc identique, ce qui est évidemment très pratique, car la zone de cuisson reste immobile. L'inclinaison des rayons solaires varie entre les saisons de $+ / - 23,5^\circ$ par rapport à l'axe perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre. La parabole doit effectuer le même changement d'inclinaison afin de rester orienté face au soleil, sinon, il n'est plus possible d'obtenir un point focal précis et identique. Or, le milieu du réflecteur et le point focal ne peuvent absolument pas bouger. Ceci est seulement réalisable en confectionnant une parabole par saison, voir par jour, adaptée à l'angle d'inclinaison

du soleil, ce qui induit un *changement de forme du réflecteur*. La forme du réflecteur est construite pour les équinoxes. En inclinant et en déformant de façon élastique la forme du réflecteur, toutes les autres paraboles peuvent être réalisées avec une précision suffisante. Le changement de l'inclinaison et la déformation du réflecteur sont mécaniquement combinés : les deux points de rotation A, de chaque côté du réflecteur, et le point de rotation B au centre du réflecteur ne forment pas une ligne, le point B se situant en dessous. La manière d'incliner le réflecteur conduit à un changement dans sa profondeur, le centre du réflecteur est rehaussé (grande angle de traverse) ou abaissé (petit angle de traverse) relativement à la forme du réflecteur. Ceci suffit pour ajuster les parties hautes et basses du réflecteur (C et D) afin d'obtenir une forme de réflecteur suffisamment précise. La stabilité est réalisée par des barres télescopiques de chaque côté du réflecteur.

L'ajustement de la forme du réflecteur doit être réalisée manuellement tous les 2 ou 3 jours, jusqu'à ce que la totalité des rayons concentrés passent par l'ouverture dans la zone de cuisson. La lumière est ensuite réfléchi sur le fond noir du plat de cuisson partiellement par un petit réflecteur (deuxième réflecteur). Le fond absorbe la lumière, puis conduit la chaleur. Le rendement de cuisson, i.e lorsque l'eau voit sa température augmenter de 25 °C à 100 °C, peut être de 57 %. Il dépend de l'état de propreté de la surface réfléchissante et de l'isolation du plat de cuisson. Au point focal, il a été mesuré une efficacité optique de 75 % (avec des miroirs ordinaires de 2 mm).

Suivant la saison, un réflecteur elliptique de 2,8 m x 3,8 m (taille standard d'un réflecteur Scheffler de 8 m²) collecte la lumière arrivant sur une surface de 4,3 m² à 6,4 m² mesurée perpendiculairement au soleil (aperture). De ce fait, la puissance de cuisson varie avec les saisons. En moyenne, avec un réflecteur de 8 m², 22 litres d'eau froide peuvent être portés à ébullition en une heure (avec un ensoleillement de 700 W/m²). Quelques données sur le réflecteur Scheffler de 8 m² et de 10 m² :

- • Température maximum atteinte au point focal 1 020 °C

- ● Rendement optique maximum (surface réfléchive miroir en verre blanc/miroir ordinaire) 84 % / 75 %
- ● Puissance de cuisson sous un ensoleillement de 700 W/m^2 avec des miroirs simples (8 m^2) 2,2 kW : (1,7 kW en été et 2,5 kW en hiver)

Liens sources :

★ <http://www.solare-bruecke.org/index.php>

★ http://solarcooking.wikia.com/wiki/Wolfgang_Scheffler

★ <http://claude.bonello.free.fr/boulangerie/boulangerie.htm>

Annexe.6 CONCENTRATION GÉOMÉTRIQUE D'UN HÉMISPHERE

D'ordre général, la détermination du coefficient de concentration géométrique suit toujours la même règle qui consiste à faire le rapport de la surface de réflexion (Concentrateur) sur la surface de réception (Receveur). Dans le cas du concentrateur hémisphérique, la concentration se fait sur un axe et est inégalement réparti sur ce axe.

C'est pourquoi, il faut commencer par une discrétisation de ce coefficient de concentration géométrique, dont la méthodologie sera sommairement expliquée dans cet annexe.

6.1 Nombre de réflexions $n(\phi)$:

$n(\phi)$ joue un rôle prépondérant dans l'expression de $Y(\phi, n)$ qui change en conséquence (Figure A.13).

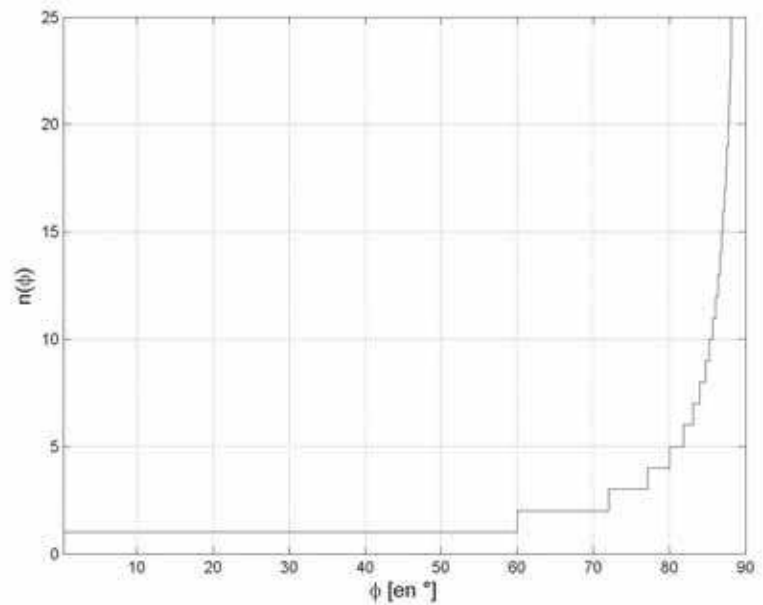


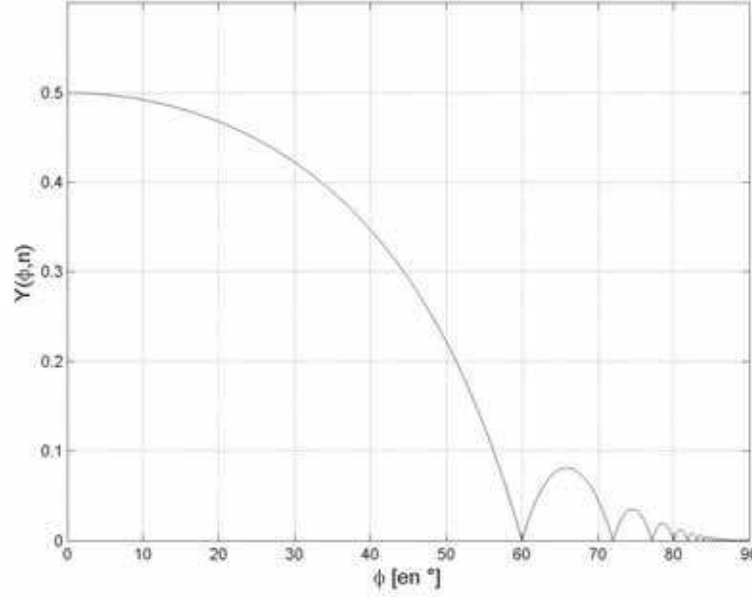
FIG : A.13 – Tracé du nombre de réflexion $n(\phi)$

$$n(\phi) = \text{Arrondi.inf} \left\{ \left\lceil \frac{\phi}{180 - 2\phi} \right\rceil + 1 \right\} \quad (\text{A.4})$$

On remarque en effet qu'au delà d'un angle $\phi > 60^\circ$, le rayon réfléchi n'atteint

pas directement la cible, il subit des réflexions multiples au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de l'hémisphère.

6.2 Fonction de position $Y(\phi, n)$:



Le tracé de la courbe $Y(\phi, n)$ (Figure A.14) montre également la dépendance de celle-ci au nombre de réflexions $n(\phi)$.

FIG : A.14 – Évolution de la fonction de position $\frac{Y(\phi, n)}{r_s}$

$$\frac{Y(\phi, n)}{r_s} = \left[1 + (-1)^n \frac{\sin \phi}{\sin(2n\phi)} \right] \quad (\text{A.5})$$

6.3 Caractéristiques du receveur R_a :

Il y a une relation entre $R_a(\phi, n)$ et $Y(\phi, n)$, telle que $R_a(\phi, n) = (r_s - Y(\phi, n)) \sin \theta_s$, (ou encore $\frac{R_a}{r_s} = (1 - y) \sin \theta_s$ si l'on pose $y = \frac{Y}{r_s}$). Cela est bien visible sur la figure A.15 page XVII. De cette façon, le receveur prend une forme conique telle que :

$$\frac{r_s}{2} \sin \theta_s \leq R_a \leq r_s \sin \theta_s.$$

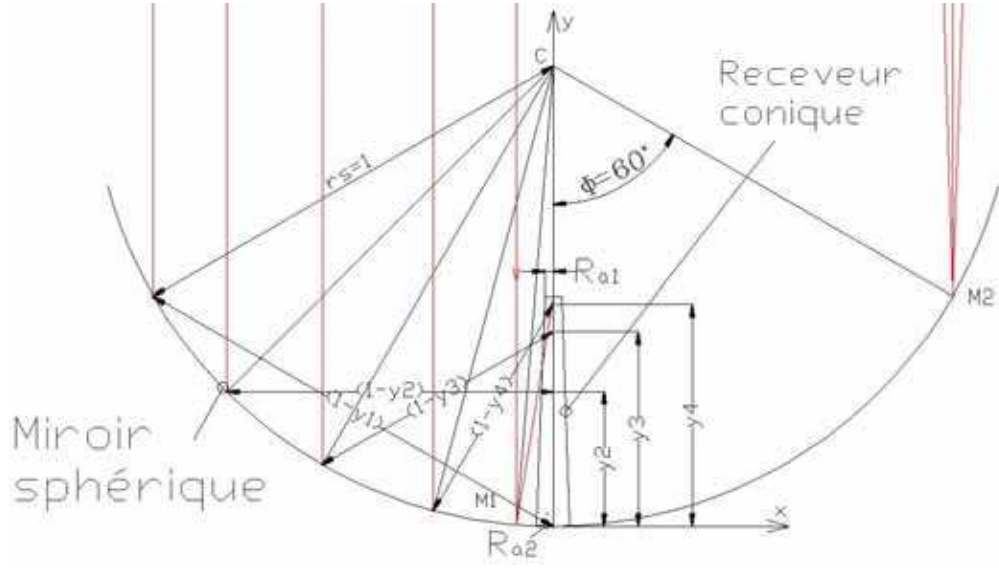


FIG : A.15 – Évolution du rayon du receveur $\frac{R_a(\phi, n)}{r_s}$

$$\frac{R_a(\phi, n)}{r_s} = -(-1)^n \frac{\sin \phi}{\sin(2n\phi)} \sin \theta_s \quad (\text{A.6})$$

6.4 Algorithme de $C_{g(Cir_3D)}(\phi_i, n)$:

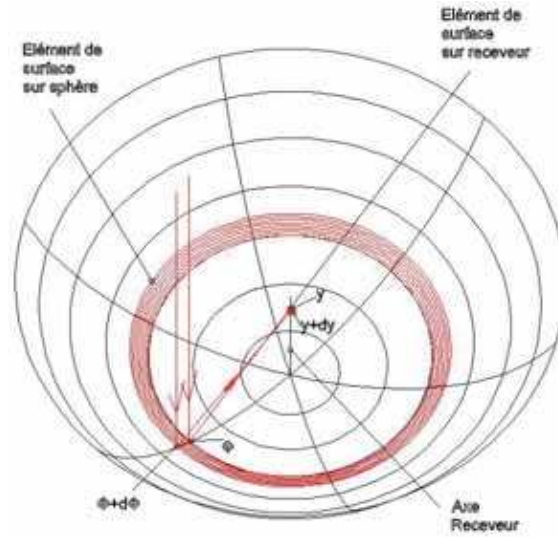


FIG : A.16 – Surfaces élémentaires

Il peut être construit en divisant les sections élémentaires réfléchives (Concentrateur) sur les sections élémentaires réceptrices (Receveur) conformément à la figure A.16.

Le tracé de
 $C_{g(Cir_3D)}(\phi_i, n)$
est représenté à
la figure A.17

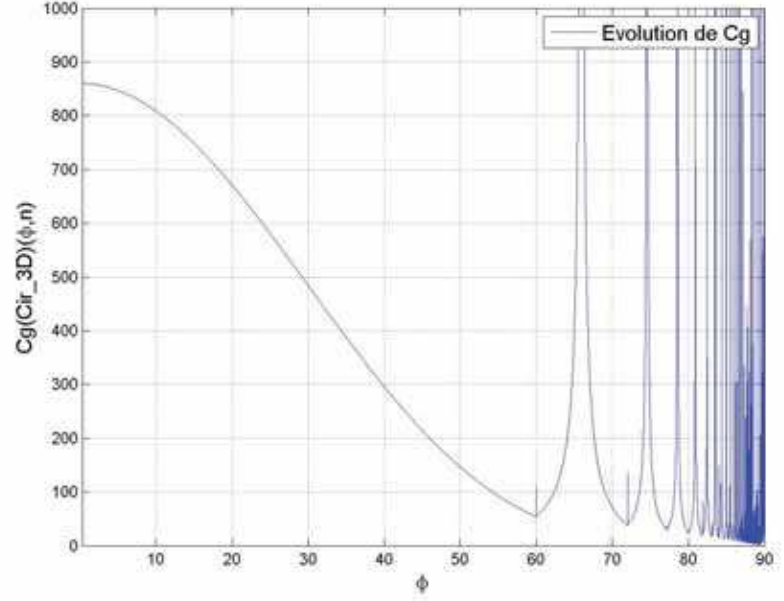
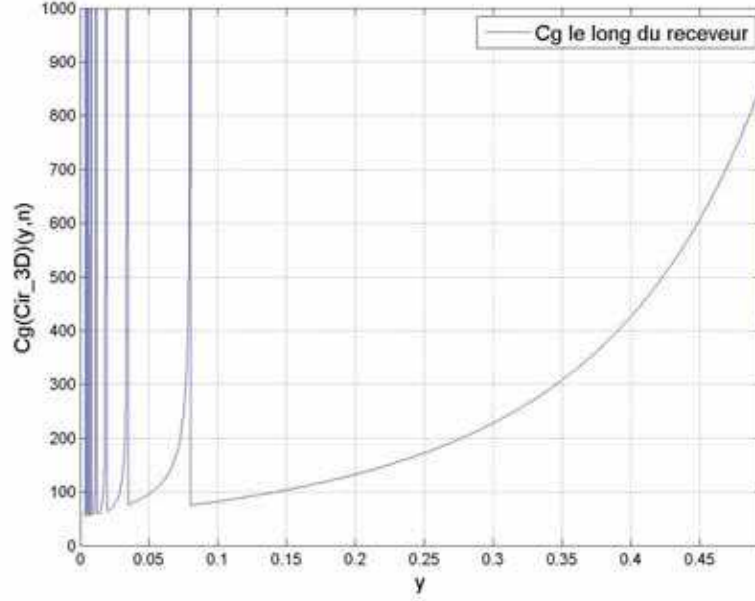


FIG : A.17 – Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(\phi_i, n)$

$$C_{g(Cir_3D)}(\phi_i, n) = \frac{1}{\sin \theta_s} \frac{\sin^2(\phi_{i+1}) - \sin^2(\phi_i)}{|A^2(\phi_{i+1}, n) - A^2(\phi_i, n)|} \quad (A.7)$$

$$A(\phi, n) = \frac{\sin \phi}{\sin(2n\phi)} \quad (A.8)$$

6.5 Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(y, n)$:



Il ne restera donc qu'à faire évoluer $C_{g(Cir_3D)}$ en fonction de y plutôt que de ϕ . (Figure A.18).

FIG : A.18 – Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(y, n)$

6.6 Simplification de la fonction $C_{g(Cir_3D)}$:

Cette simplification est possible sur l'intervalle $[\theta_s ; 60^\circ]$, sur lequel $n(\phi) = 1$ (Figure A.19). L'intervalle $[0 ; 0,5 - \sin \theta_s]$ peut également être adopté si $C_{g(Cir_3D)}$ est fonction de y (Figure A.20).

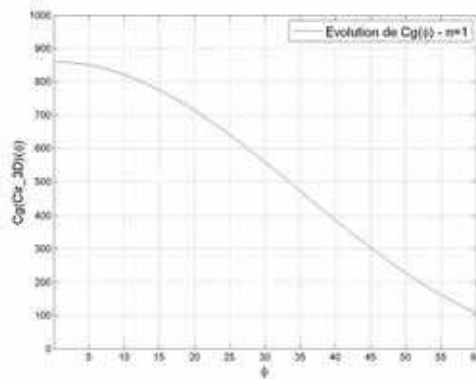


FIG : A.19 – Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(\phi)$

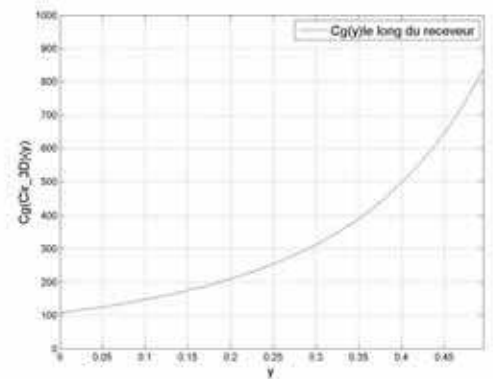


FIG : A.20 – Tracé de $C_{g(Cir_3D)}(y)$

$$C_{g(Cir_3D)}(\phi) = \frac{4}{\sin \theta_s} \cos^4 \phi : \phi \in [\theta_s ; 60^\circ] \quad (\text{A.9})$$

$$C_{g(Cir_3D)}(y) = \frac{1}{4(y-1)^4 \sin \theta_s} : y \in [0 ; 0,5 - \sin \theta_s] \quad (\text{A.10})$$

6.7 Observations :

La méthodologie habituelle de calcul du coefficient géométrique $C_{g(Cir_3D)}$ consiste à considérer la première intersection entre le rayon et le receveur cylindrique (au lieu de conique), alors que l'image optique sur cette surface est généralement étirée (El-Refaie, 1987, Ng et al., 2012, Bouguetaia, 2013, Gandhe et al., 1986b). Cette méthode présentée ici adopte l'hypothèse que la tache solaire est homogène d'une part, et le calcul s'effectue là où l'image optique se résume en un point, c'est-à-dire, au niveau de l'axe parallèle au rayon solaire. Le fait que l'image optique se résume en un point sous-entend que l'image n'a pas subi de déformation. De plus, cette méthode s'aligne au concept de "juxtaposition" au lieu de "superposition" d'images optiques du soleil (Veynandt, 2011 P.30).

L'équation paramétrique simplifiée de la néphroïde par rapport aux rayons solaires venant sur un miroir de façon parallèle est :

$$\begin{aligned} X(\psi) &= r_s \sin^3 \psi \\ Y(\psi) &= \frac{r_s}{2} \cos \psi (1 + 2 \sin^2 \psi) \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

7.2 Comment trouver le point d'intersection $T(t_x, t_y)$?

★ Trouver l'équation de la droite d'intersection (ici la droite (AM)) :

$$X \cos(2\phi) + Y \sin(2\phi) - r_s \sin \phi = 0 \quad (\text{A.14})$$

★ Remplacer X et Y par leur valeur paramétrique provenant de l'équation de la néphroïde, en considérant $\phi = \phi_s$, angle maximum désiré comme décrivant la surface d'exposition.

$$\sin^3 \psi \cos(2\phi_s) + \frac{1}{2} \cos \psi (1 + 2 \sin^2 \psi) \sin(2\phi_s) - \sin \phi_s = 0 \quad (\text{A.15})$$

★ L'angle ψ_0 , racine de cette nouvelle équation permettra de calculer les coordonnées de $T(t_x, t_y)$.

★ Les valeurs de $T(t_x, t_y)$ sont trouvées en utilisant l'équation paramétrique de la néphroïde et en calculant :

$$T : \begin{cases} t_x = X(\psi_0) \\ t_y = Y(\psi_0) \end{cases}$$

L'on se rend bien compte que pour chaque valeur de ϕ_s correspond un point d'intersection $T(t_x, t_y)$ unique à trouver. Trouver ces points permet par la suite de calculer la position $Y_{(p)}$ du plan (P) et le rayon r_a de moindre diffusion, et donc de déterminer les caractéristiques et dimensions du receveur à placer au foyer.

7.3 Exemple.

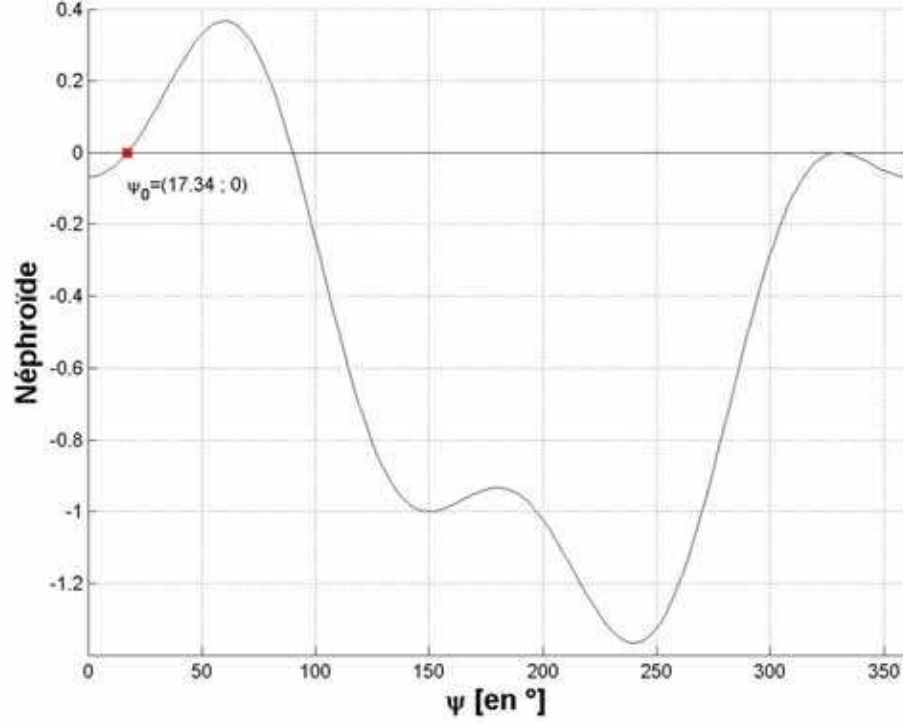


FIG : A.22 – Tracé de la caustique à $\phi_s = 30^\circ$

Par exemple, sur le graphe A.22 de la caustique à $\phi_s = 30^\circ$, la courbe coupe l'axe des abscisses à $\psi_0 = 17,34^\circ$. ψ_0 est donc la racine positive de la caustique au voisinage de l'origine. Cela donne pour les coordonnées de T :

$$T : \begin{cases} t_x = X(17,34^\circ) = 26,47 \cdot 10^{-3} r_s \\ t_y = Y(17,34^\circ) = 0,562 r_s \end{cases}$$

7.4 Identification du paramètre ψ_0 connaissant ϕ_s .

Pour connaître l'évolution de la position $Y_{(p)}$ du plan (P) et le rayon r_a (ou R_a) de moindre diffusion, il faut connaître l'évolution de l'angle ψ_0 , racine positive de la néphroïde au voisinage de l'origine, par rapport à ϕ_s . La figure A.23 page XXIV montre l'évolution de ψ_0 par rapport à ϕ_s , tandis-que le tableau A.2 page XXV montre la valeur

de ψ_0 connaissant $1 \leq \phi_s \leq 44$. . Finalement, la position Y_P du plan (P) de moindre diffusion peut être connue connaissant le demi angle ϕ_s (Tableau A.3 page XXVI).

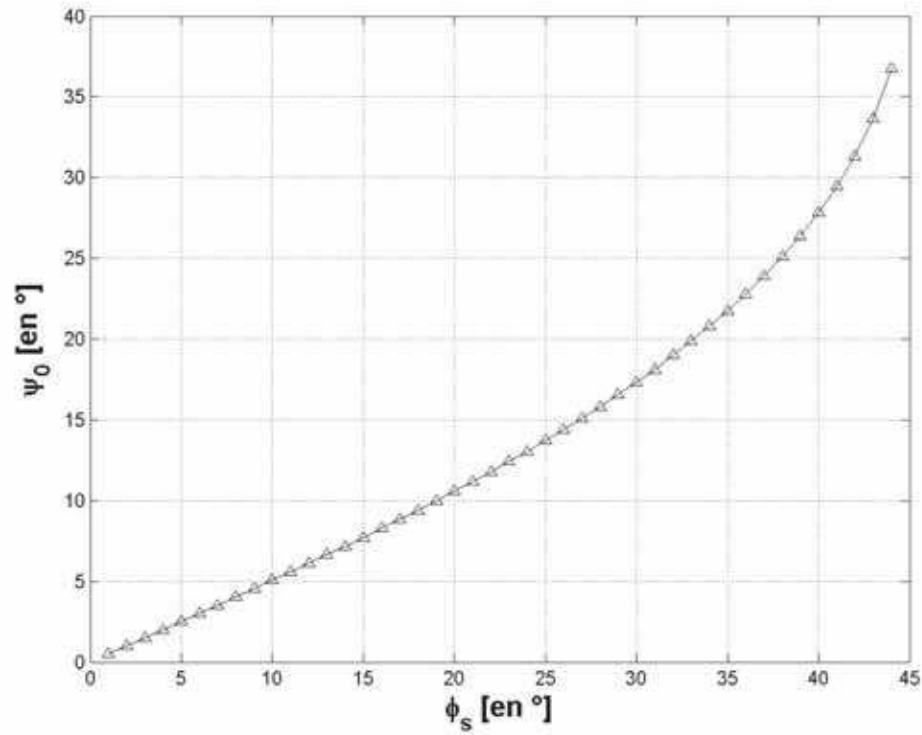


FIG : A.23 – Evolution de $\psi_0(\phi_s)$

TAB : A.2 – Évolution de l'angle ψ_0 par rapport à ϕ_s

ϕ_s [en °]	$\psi_0(\phi_s)$ [en °]	ϕ_s [en °]	$\psi_0(\phi_s)$ [en °]	ϕ_s [en °]	$\psi_0(\phi_s)$ [en °]
1	0,50	16	8,29	31	18,14
2	1,00	17	8,85	32	18,98
3	1,50	18	9,42	33	19,85
4	2,00	19	10,00	34	20,77
5	2,51	20	10,59	35	21,74
6	3,01	21	11,19	36	22,77
7	3,52	22	11,81	37	23,88
8	4,03	23	12,43	38	25,07
9	4,55	24	13,08	39	26,37
10	5,07	25	13,73	40	27,81
11	5,59	26	14,41	41	29,44
12	6,12	27	15,11	42	31,33
13	6,65	28	15,83	43	33,64
14	7,19	29	16,57	44	36,78
15	7,74	30	17,34		

TAB : A.3 – Évolution de $\frac{Y_{(P)}}{r_s}$ par rapport à ϕ_s

ϕ_s [en °]	$\frac{Y_{(P)}}{r_s}(\phi_s)$	ϕ_s [en °]	$\frac{Y_{(P)}}{r_s}(\phi_s)$	ϕ_s [en °]	$\frac{Y_{(P)}}{r_s}(\phi_s)$
1	0,5000	16	0,5153	31	0,5673
2	0,5002	17	0,5174	32	0,5728
3	0,5005	18	0,5197	33	0,5787
4	0,5009	19	0,5221	34	0,5851
5	0,5014	20	0,5247	35	0,5919
6	0,5020	21	0,5274	36	0,5992
7	0,5028	22	0,5304	37	0,6070
8	0,5037	23	0,5335	38	0,6155
9	0,5047	24	0,5369	39	0,6247
10	0,5058	25	0,5405	40	0,6348
11	0,5071	26	0,5443	41	0,6458
12	0,5084	27	0,5483	42	0,6580
13	0,5100	28	0,5526	43	0,6718
14	0,5116	29	0,5572	44	0,6876
15	0,5134	30	0,5621		

Annexe. B

PUBLICATION

OPTICAL ANALYSIS OF A HEMISPHERIC CONCENTRATOR WITH A MANUAL TRACKING SYSTEM FOR THE DECLINATION

KY, THIERRY S. M., KAM, SIÉ., DIANDA, BOUREIMA AND BATHIEBO, D. JOSEPH

(Received 29 April 2015; Revision Accepted 17 August 2015)

ABSTRACT

We present in this paper, a craft prototype of a fixed hemispheric concentrator, built from small square mirrors with a moon crescent receiver. The position of the receiver is adjusted every three days taking into account the declination. This system achieves a geometric mean concentration of 122 and the experimental measurements lead to temperatures varying between 120°C and 260°C in the plan for the least diffusion. The proposed improvements should allow for more competitiveness and convenience than the *Scheffler* system with its electromechanical sun tracking.

KEYWORDS: hemispheric concentrator, Fixed Mirror Distributed Focus – FPDF, Solar bowl, Scheffler,

INTRODUCTION

There are a number of difficulties associated with the use of solar systems in cooking food due to the target temperature: when it comes to solar ovens which need to reach temperatures from 250°C to 300°C for the baking of bread for example, it is necessary to use concentrators with sun tracking systems. Nowadays two systems of concentration prevail in solar cooking:

The "Scheffler" system (Munir *et al.*, 2010): Its reflector is a portion of a paraboloid with a pivot axis that passes through the focal point and the centre of this portion. This axis is the axis of rotation of the reflector for tracking the sun from east to west. As for the declination, (variation), it needs a setting-up every 2-3 days for the position and shape of the reflector. Finally, the Scheffler reflector has only a geometric mean concentration of 150 (Sardeshpande Pillai, 2012, P.221). Its apparently simple adjustment proves addictive for employees in Africa (Kombasséré, 2008).

The Central Collector (Quoilin, 2007) consists of a multitude of small squares or rectangular flat panels called heliostats independently activated which reflect on a common point target. For these collectors that promote energy at all costs, monitoring the sun-tracking system for each panel is different from one panel to another because of the geographical position of each element relative to the target. Chasing the sun does not consist in aligning the normal of each item with the incident ray, but rather to reflect this incident beam

towards the common target, a complex and sophisticated system involving robotics, managed by a PLC using algorithms of calculation for the orientation of each element is necessary.

Studies on hemispheric concentrators were conducted, usually to show that they focus at a point just like a paraboloid concentrator (Bellel, 2011). The angle change does not cause a loss in the concentration ratio (Rogers *et al.*, 2012). Comparisons of the coefficients of concentration with other types of concentrators were also conducted (Bouguetaia, 2013).

We offer a device of hemispheric concentration composed with a receiver constantly in the plan for the least diffusion by manual tracking of the declination.

1. Hemispheric concentrator with crescent receiver: description of the prototype

Figure 2 shows that the sun, in its course from east to west, as reflected on a hemispheric concentrator and creates an image that can be invariably recovered on the crescent receiver.

The section whose projections are recovered is a circle with a radius equal to 0.5 times the radius of the sphere for an angle $\Phi_s = 30^\circ$ which is the half-angle relative to the center of the sphere. The circle moves from west to east at a constant hour angle (Figure 1), and from north to south along the declination (Figure 3) on the hemispheric concentrator. Such a device with its hemispheric concentrator permanently positioned, could concentrate solar

Ky, Thierry S. M., Laboratory of Renewable Thermal Energies, UFR / SEA, 03 BP 7021, University of Ouagadougou, Burkina Faso.

Kam, Sié., Laboratory of Renewable Thermal Energies, UFR / SEA, 03 BP 7021, University of Ouagadougou, Burkina Faso.

Dianda, Boureima, Laboratory of Renewable Thermal Energies, UFR / SEA, 03 BP 7021, University of Ouagadougou, Burkina Faso.

Bathiebo, D. Joseph, Laboratory of Renewable Thermal Energies, UFR / SEA, 03 BP 7021, University of Ouagadougou, Burkina Faso.

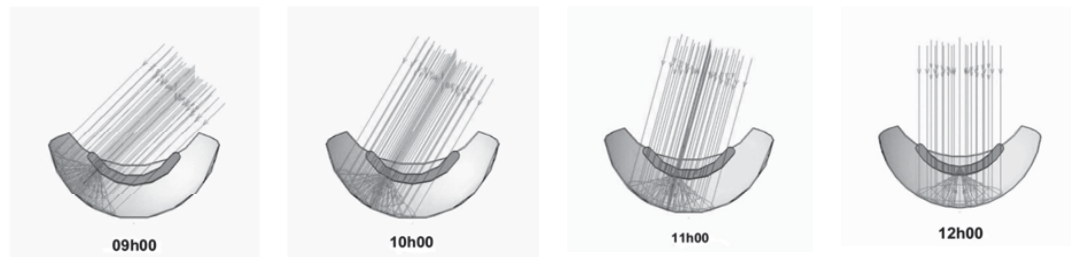


Figure 1: Evolution of the concentration profile with time

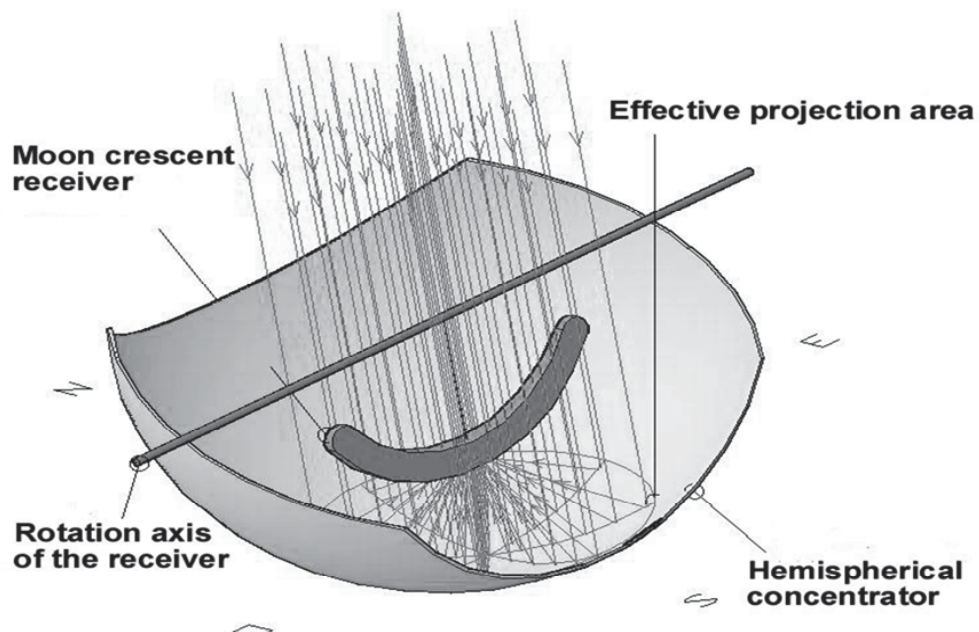


Figure 2: Crescent receiver in the zone for the least diffusion

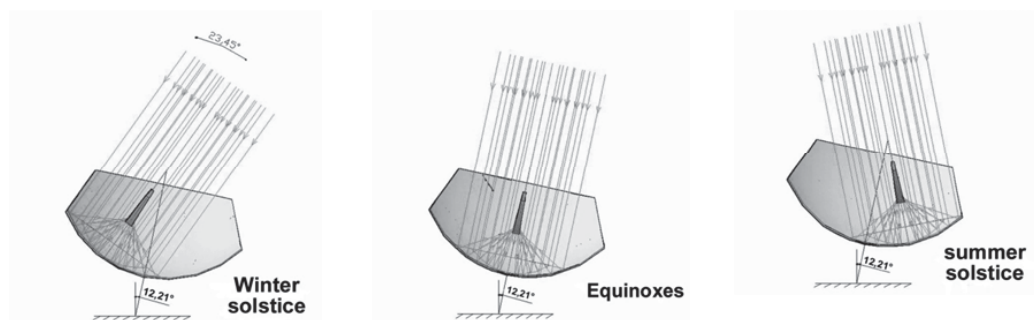


Figure 3: Evolution of the concentration profile with seasons

OPTICAL ANALYSIS OF A HEMISPHERIC CONCENTRATOR WITH A MANUAL TRACKING SYSTEM**147**

energy from 8 a.m. to 4 p.m. throughout the year. The receiver is regularly turned on its axis of rotation to less than one degree every three days to follow declination. Thus, in comparison with the Scheffler device, it proves less restrictive because it does not require changing a tilt and a parabolic profile on trial since a simple rotation

of the receiver would be enough. In addition, there is no need for a motorized system of tracking for hour angle. With a possible improvement, the positions of early-month could be shown on a reporter placed at the level of the axis for incremental positions of the receiver during the year.

2. Geometric parameters of a hemispheric concentrator.

The coefficient of geometric mean concentration of the hemispheric concentrator $C_{g_{moy}}(Cir_3D)$ is calculated using the following formula (Bouguetaia, 2013, P.31):

$$C_{g_{moy}}(Cir_3D) = \left[\frac{\sin(2\phi_r)}{\sin \phi_r \sin^2\left(\frac{\phi_r}{4}\right) + 2\theta_s} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

where ϕ_r is the half-angle describing the width of exposure relative to the focus, and θ_s the top of half-angle reflecting the apparent radius of the sun.

This gives a maximum value of 2964 for an angle $\phi_r = 22^\circ$.

However, to get the value of concentration by this coefficient, we must ensure a proper positioning and sizing of the receiver. The hemispheric concentrator is astigmatic and is considered as a point-concentrator by Gauss approximation only for small-angle values, in comparison with the paraboloid concentrator (Figure 4). The reflections of solar rays are tangent to a surface of revolution called caustic spherical aberration (Figure 5) which has the following Nephroid-type parametric equation (Khaled, 2008, P.55):

$$\begin{aligned} X(\psi) &= r_s \sin^3 \psi \\ Y(\psi) &= \frac{r_s}{2} \cos \psi (1 + 2 \sin^2 \psi) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Where $X(\psi)$ and $Y(\psi)$ are the coordinates of the caustic, r_s is the radius of the hemispheric concentrator and ψ the angle of the Nephroid.

Reflection at point M of the radius corresponding to angle ϕ_s forms a straight line (AM) with equation (Khaled, 2008, P.55):

$$X \cos(2\phi) + Y \sin(2\phi) - r_s \sin \phi = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

with ϕ , the half angle varying from 0 to ϕ_s .

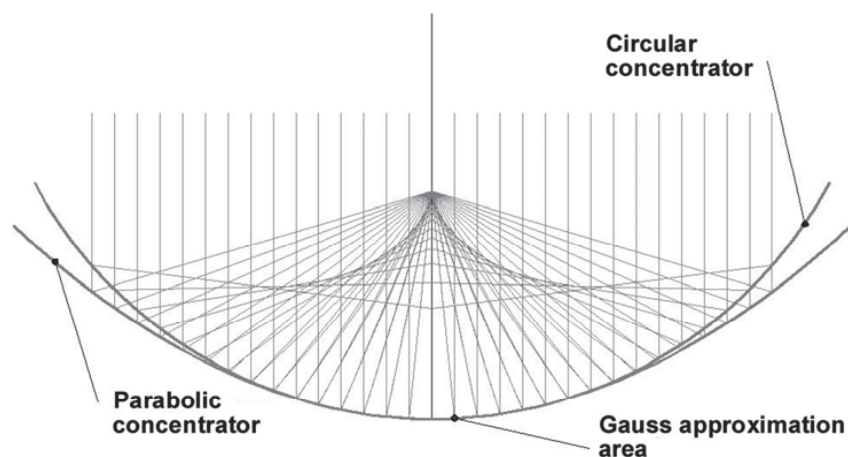


Figure 4: Comparison of the concentration profile of a parabola and a circle



The intersection of this line with the caustic is done at point T(tx, ty) in which plan (P) of less diffusion is established, a positioning plan of the cavity receiver. We then need to find the point T(tx, ty), which makes it possible to position the cavity receiver on the y axis: $Y(P) = \bar{t}y$.

Similarly, to calibrate the receiver, we must know the inner radius R_u of the cavity receiver using the Equations (2) and (3):

Or :

The geometric mean concentration $C_{g_mean(Cir-3D)}^*$ is determined using equation (4) or (5) :

The plot of $C_{g_{mean}(Cir_3D)}^*$ is indicated by figure (6). It is observed that the curve has the same shape and the same maximum as that of $C_{g_{mean}(Cir_3D)}^*$ shown in Figure (7) below. In fact, this is the same curve with ϕ_s defined in relation to the center of the hemisphere while ϕ is defined in relation to the center of the orifice of the cavity-receiver.

The method used for obtaining point T values (t_x , t_y) of intersection between the straight line (AM) and the caustic is a numerical approach. It consists to replace the value of $X(\psi)$ and $Y(\psi)$ taken from the parametric equation of the caustic in the equation of the straight line (AM) where ϕ is known.

Root Ψ_0 of this new equation will give the coordinates of T (tx, ty). (Khaled, 2008, P.56).

KY Thierry S.M. LETRE/UFR-SEA, Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO

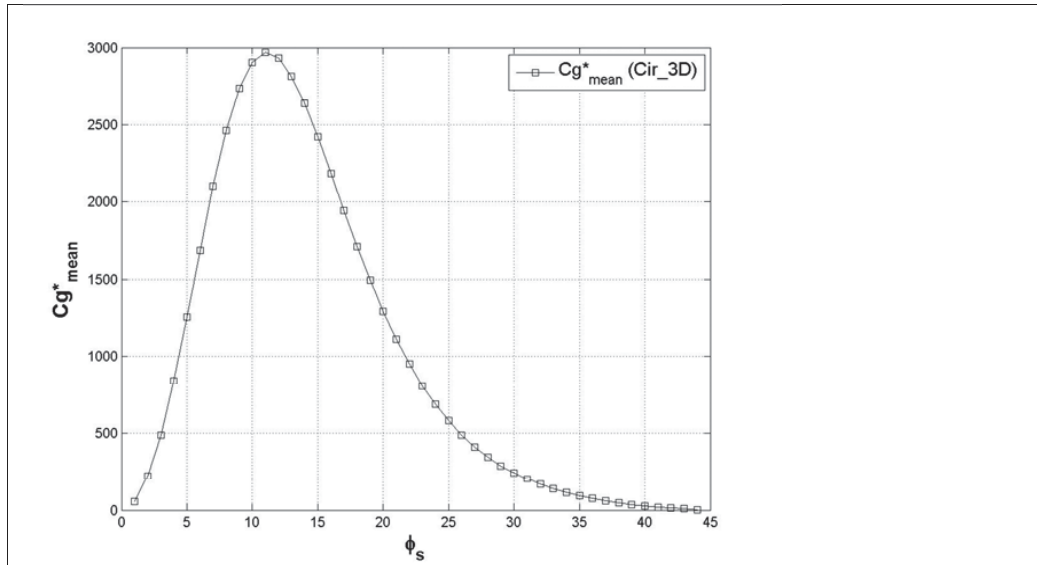


Figure 6: Geometric mean concentration as a function of the angle Φ_s from the centre of the sphere

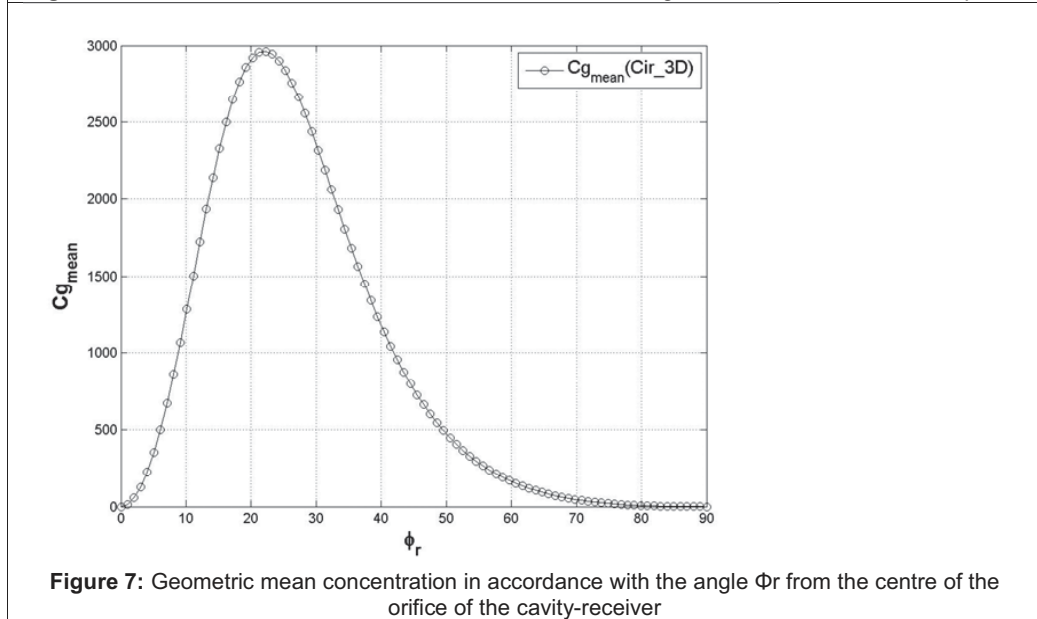


Figure 7: Geometric mean concentration in accordance with the angle Φ_r from the centre of the orifice of the cavity-receiver

It only remains to use an iterative method where ϕ_s can be varied and get the corresponding coordinates of T (tx, ty).

Thereby we obtain the values of ψ_0 as a function of ϕ_s , or Y (P)/ r_s according to ϕ_s . These values are indicated in figures (8) and (9).

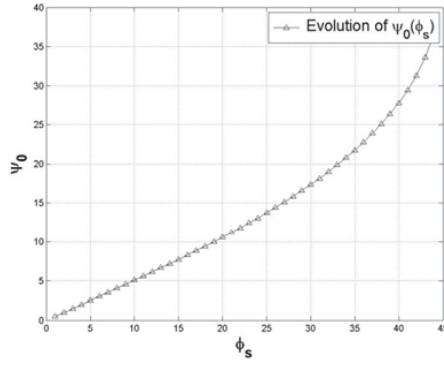


Figure 8: Evolution of the root of the Nephroid ψ_0 with respect to angle Φ_s (in °)

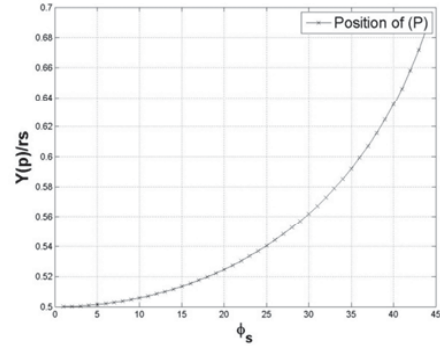


Figure 9: Evolution of the position of the least diffusion plane relative to angle Φ_s (in °)

3. Designing of a collector with a manual tracking system of the declination: Experimental values

The prototype of the study has a truncated hemispherical concentrator made of sheet steel coated on its inside with flat mirror tiles of 5 cm x 5 cm (Figure 10). This results in a dispersion of the radiation that can be quantified by Δ_l (in m):

$$\Delta_l = \frac{0,05}{4}(1+\sqrt{2}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$R_a(\Delta_l) = \frac{r_s \cos \phi_s - Y_{(p)}}{\cot(2\phi_s + (\theta_s + \Delta_l))} - r_s \sin \phi_s \quad \text{with} \quad Y_{(p)} = \bar{t}_y \quad \dots\dots\dots (9)$$

Or:

$$R_a(\Delta_l) = (r_s \sin \phi_s + r_a) \frac{\cot(2\phi_s)}{\cot(2\phi_s + (\theta_s + \Delta_l))} - r_s \sin \phi_s \quad \text{with} \quad r_a = \bar{t}_x \quad \dots\dots\dots (10)$$

$R_a(\Delta_l)$ corresponds to the internal radius of the cavity receiver calculated as a function of dispersions Δ_l , it gives a real geometric mean concentration $C_{g_{mean}^*(Cir_3D)}$ calculated using equations (9) or (10):

$$C_{g_{mean}^*(Cir_3D)} = \left(\frac{r_s \sin \phi_s}{R_a(\Delta_l)} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$C_{g_{mean}^*(Cir_3D)}$ has a maximum value of 122. This maximum is 4.11% of the previous maximum.

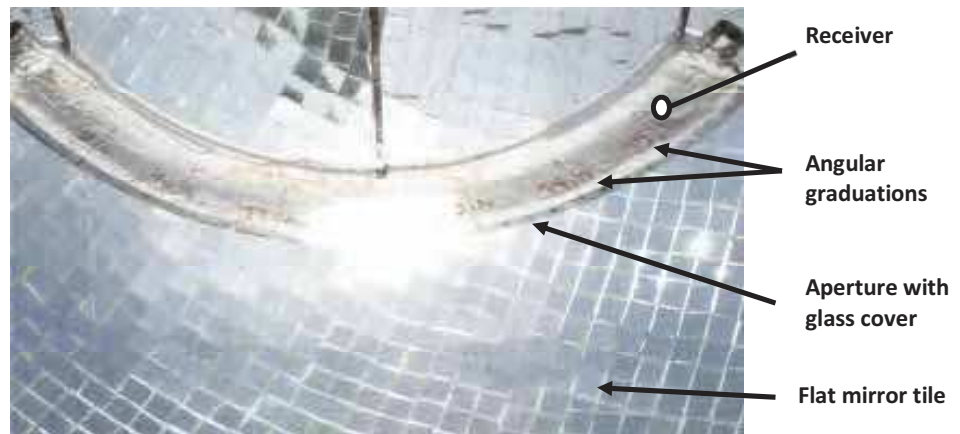


Figure 10: Photo of the prototype: the receiver positioned on the hemispherical concentrator

OPTICAL ANALYSIS OF A HEMISPHERIC CONCENTRATOR WITH A MANUAL TRACKING SYSTEM

151

3.1. Experimental details: studying the device

The prototype (Figure 10) has a radius of 107.3cm for the hemispherical concentrator. The external radius of its receiver is therefore $Y(p)=60.3\text{cm}$. The receiver aperture is $2^*R_a=7\text{cm}$.

To study the device (Figure 11) the equipment listed below and the related methods of measurement had been used:

- A data logger type Midi LOGGER GL200A and GRAPHTEC brand.

- A probe (probe A) is placed against the glass window of the receiver to measure the temperature in the focal point. To do this, we follow the light spot indicating the reflection of the sun and search for the highest temperature. We got helped by the angular graduations on the receiver, but the precise point was searched around the light spot following the sun's path every 5 minutes.

- A second probe (probe B) reports the ambient temperature.

- A type SL100 and brand KIMO solarimeter is used to measure solar radiation.

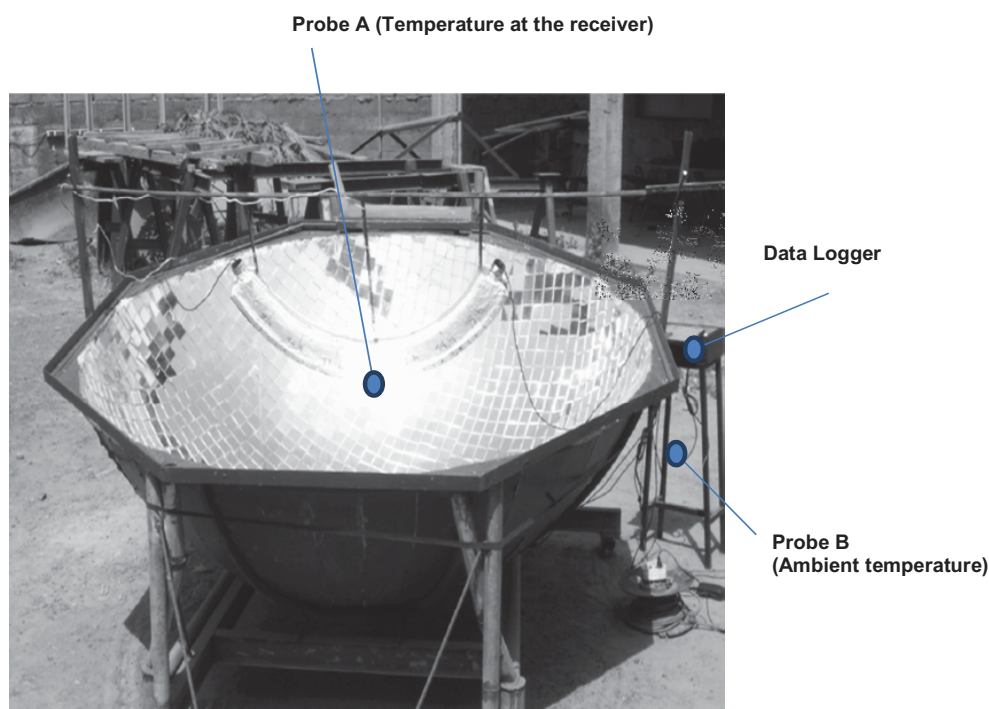


Figure 11: Photo of the device

3.2. RESULTS AND DISCUSSION

We find that the temperature curve for the day of November 07, 2014 (Figure 12) drawn according to surveys at the household level increased gradually until 12.30 p.m. when it reached a peak at 250°C. It roughly follows the evolution of the irradiation of the day (Figure 13). This correspondence is normal, because since the concentration is constant, the temperature is directly a function of the direct irradiation. The few inconsistencies around 12 noon and 1 p.m. are due to cloud-waves.

Another finding also shows that the temperature is already above 120°C as early as 8.30 a.m. and never goes down at any point below this temperature, even at 3 p.m. In short, the temperature ranges between 120°C and 250°C for the whole day.

We find that the temperature curve for the day of December 17, 2014 (Figure 14) drawn according to surveys at the household level gradually increases until it reaches a peak of 260°C at 12 noon. It roughly follows the evolution of the irradiation of the day (Figure 15). This correspondence remains normal because of the constant concentration ratio. The few inconsistencies after 12 noon are due to cloud cover.

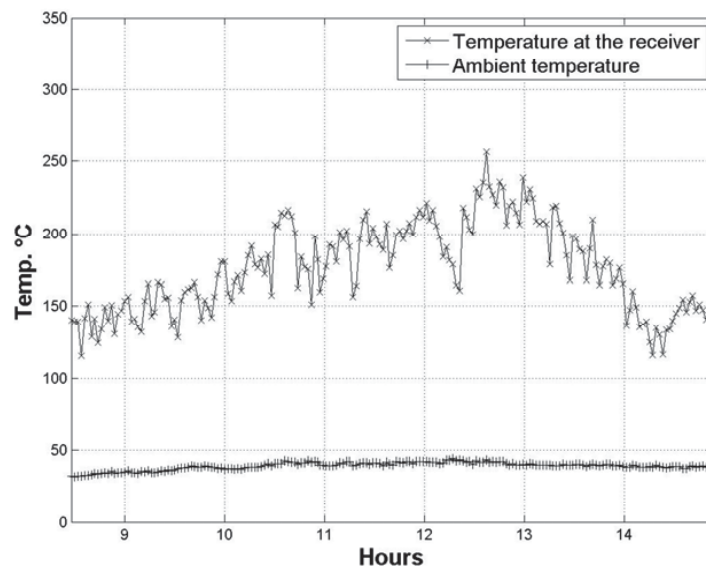


Figure 12: Temperature curves on July 11th, 2014 at $\Phi_s = 30^\circ$

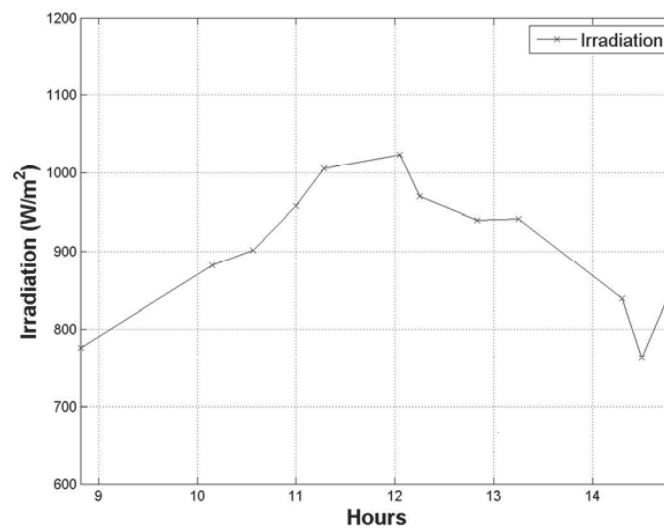


Figure 13: Radiation curve on July 11th, 2014

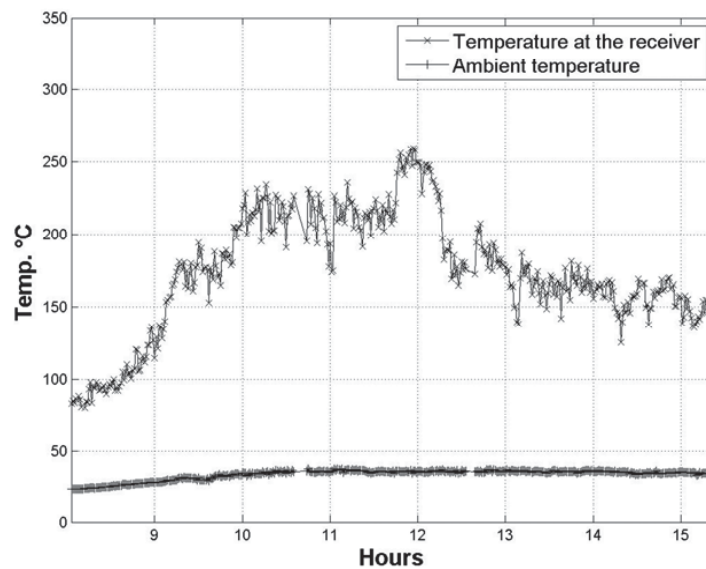


Figure 14: Temperature curves on December 17th, 2014 at $\Phi_s = 22^\circ$

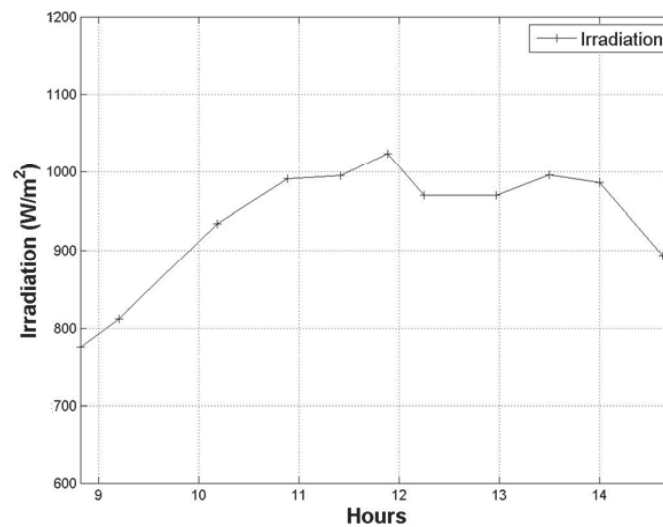


Figure 15: Radiation curve on December 17th, 2014

The temperature remains above 120°C between 9 a.m. and does not go down at any point below this temperature, even at 3 p.m. In short, the temperature ranges between 120°C and 260°C during the day.

The change in Φ_s value from 30° to 22° has nevertheless made hardly noticeable results due to a disrupted afternoon, but there is an increase in the temperature around 200°C at 10 a.m. This means that despite the fact that the exhibited surface area is reduced for $\Phi_s = 22^\circ$ (from 3.079m² to 2.362m²), the

concentration is better and the temperature also increases accordingly.

CONCLUSION

The study shows that with a hemispheric concentrator having a maximum of geometric mean concentration of 122, it is possible to obtain internal temperatures evolving between 150°C and 260°C from 9 a.m. to 3 p.m. during a day under an average

sunshine of 920W/m^2 , with a quasi-fixed tracking system. Such results are obtained with an adjustment on the angle of sun declination only every 2-3 days and a steady hemispherical concentrator. This is much more advantageous than the Scheffler system that is motorized for the tracking of the sun from East to West. In addition, an improvement of these results can be achieved by the rigorous development of the spherical profile of the concentrator (choice of a very smooth wall for the hemispheric concentrator).

Therefore, this prototype of hemispheric concentrator, with the proposed improvements, could advantageously be used for baking bread at temperatures ranging from 250°C to 300°C .

REFERENCES

- Bellel, N., 2011. Study of two types of cylindrical absorber of a spherical concentrator. *Energy precedia* 6: 217-227.
- Bouguetaia, N., 2013. Contribution à l'étude et à la simulation d'un concentrateur cylindro-parabolique. Master's thesis, Université de Constantine 1, Algérie, 94pp.
- Kombassere, A. M. E., 2008. Etude expérimentale des performances thermiques d'un système à concentration à température moyenne. Master's thesis, University of Ouagadougou, Burkina Faso, 44pp.
- Khaled, M., 2008. Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique. Master's thesis, Université de Constantine, Algérie, 128pp.
- Munir, A., Hensel, O and Scheffler, W., 2010. Design principle and calculations of a Scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications. *Solar Energy* 84: 1490-1502.
- Quoilin, S., 2007. Les centrales solaires à concentration. Université de Liège, France, 34pp.
- Rogers, S. C., Barichman, C., Chavoor, G., Kinni, M., Glazar, N and Schwartz, P. V., 2012. Concentrating sunlight with an immobile primary mirror and immobile receiver: Ray -tracing results. *Solar Energy* 86 : 132-138.
- Sardeshpande, V and Pillai, I. R., 2010. Effect of micro-level and macro-level factors on adoption potential of solar concentrators for medium temperature thermal applications. *Energy for sustainable development* 16 : 216-223.

Index

SYMBOLES GRECQUES	i
Δ [°] : Demi-angle de dispersion du rayon solaire	60, 101, 102, 104–106
Δ_l [m] : Valeur de dispersion due aux défauts de surface du concentrateur	101, 102, 104–106
Φ [°] : Angle de latitude de la localité choisie pour installer le concentrateur	10, 15, 33
α_{abs} : Facteur d'absorption solaire	95
β [°] : Angle d'incidence du rayon solaire / normale du collecteur	VI, VIII, 11
δ [°] : Angle de déclinaison solaire	7, 9, 13
δ_i [°] : Demi-angle d'incidence du rayon solaire d'un concentrateur conique	52
δ_s [°] : Demi-angle de sommet d'un cône	62
η : Rendement d'un système	95
γ [°] : Angle d'orientation du collecteur suivant l'azimut	VIII, 11, 12
λ [W.m ⁻¹ . °C ⁻¹] : Conductivité thermique du milieu	65
μ_l [m] : Aberration longitudinale d'un hémisphère	90
μ_t [m] : Aberration transversale d'un hémisphère	90
ν [Htz] : Fréquence d'une onde électromagnétique	3
ω [°] : Angle horaire	8, 10, 13
ω_s [°] : Angle de coucher du soleil	9
ϕ [°] : angle variable de 0 à ϕ_s ou ϕ_r	71
ϕ_r [°] : Demi-angle décrivant la largeur d'exposition / foyer	56, 57, 59, 60, 62
ϕ_s [°] : Demi angle / au centre de la sphère	XXII–XXIV, 43, 45, 82–84, 87–91
ψ [°] : Demi angle de Néphroïde	XXI, XXII, 80, 83
ψ_0 [°] : Racine de Néphroïde	XXII–XXIV
ρ_i : facteur énergétique (i=e) ou optique (i=o)	61
σ [W.m ⁻² .K ⁻⁴] : Constante de Stephan - Boltzmann	50, 67, 94, 95
θ_a [°] : Demi-angle d'acceptation du rayon solaire d'un CPC	52
θ_s [°] : Demi-angle de sommet traduisant le rayon apparent du soleil	50–52, 56, 57, 61

ε [°] : Angle d'orientation du collecteur suivant l'angle horaire	10
φ [°] : Angle de latitude	7, 8, 13, 15, 29
φ_i [W] : Flux de chaleur selon mode et type i	65, 66
ξ_i : Facteur d'émission de la surface	67, 94, 95

SYMBOLES ROMAINS i

a [°] : Angle d'azimut	8, 9, 11
A_c [m ²] : Aire ou surface d'exposition d'un concentrateur	49–51
A_r [m ²] : Aire ou surface d'exposition au niveau du receveur	49, 51
C_g : Coefficient de concentration géométrique d'un concentrateur	49, 52, 58, 59
C_o : Coefficient de concentration optique d'un concentrateur	42, 60
C_{id} : Coefficient de concentration idéal d'un concentrateur	61
$D_{(c)}$ [m] : Diamètre optimum d'un receveur circulaire à placer au foyer	57
$D_{ap(sol)}$ [m] : Diamètre apparent du soleil formé au foyer du concentrateur	57
E [J] : Énergie d'un photon	3
$E_{A_r \rightarrow S}$ [W.m ⁻²] : Coefficient de conduction	50
f [m] : distance focale d'une parabole ou d'une lentille	54
Gr : Nombre de Grashof en transfert thermique	66
H [m] : Hauteur de l'hémisphère tronqué	103, 107
h [°] : Angle de hauteur	8, 9, 11
h_a [m] : Profondeur du receveur	106, 108
h_p [J.s] ou [feV.Hz ⁻¹] : Constante de Planck	3, 50
h_{Cv} [W.m ⁻² . °C ⁻¹] : Coefficient de transfert de chaleur par convection	66
i [°] : Angle d'orientation du collecteur par rapport à l'horizontale	10
k [J.K] : Constante de Boltzmann	50
L [m] : Largeur d'exposition d'un concentrateur parabolique	56
$L_{(p)}$ [m] : Largeur optimale d'un receveur plan à placer au foyer	57
$L_{(sc)}$ [m] : Longueur d'arc optimale d'un receveur semi-circulaire à placer au foyer	57
$\bar{M}_i^0$: Matrice homogène 4X4 des rotation et translation	VIII, 12, 13, 15

$n(\phi)$: Nombre de réflexions sur l'hémisphère	XV, XVI, XIX, 71, 73
n_i : Indice de transparence du milieu i	55
Pr : Nombre de Prandtl en transfert thermique	66
Q_i [°] : Angles d'incidence, de réflexion et de réfraction	55
Q_s [W] : Quantité totale de radiation émise par le soleil	50
$Q_{A_r \rightarrow S}$ [W] : Quantité de radiations au niveau du receveur	50
$Q_{S \rightarrow A_c}$ [W] : Fraction des radiations solaires arrivant sur le concentrateur	50
R [m] : Distance soleil - terre	49
r [m] : Rayon apparent du soleil depuis la terre	50
r_a ou R_a [m] : Rayon du receveur .. XVII, XXIII, 71–74, 82–84, 86–88, 91, 92, 102, 104, 106, 108	
r_r [m] : Rayon maximum d'un concentrateur parabolique	57
r_s [m] : Rayon de l'hémisphère XVI, XXI–XXIII, 71–74, 80, 82, 83, 86, 87, 90, 102–104, 107	
Ra : Nombre de Rayleigh en transfert thermique	66
Re : Nombre de Reynolds en transfert thermique	66
$[Rot(\vec{x}_i = x_{i+1}), \beta]$: Matrice homogène 4X4 de rotation sur x_i et d'angle β	VIII
$\bar{Rot}_i^0$: Matrice 3X3 des rotations	VIII, 13
S_{exp} [m ²] : Surface d'exposition brute du concentrateur	103, 107
S_{ut} [m ²] : Surface utile de concentration atteignant le receveur	103, 107
T [s] : Période d'une onde électromagnétique	3
T_s [K] : Température du soleil	50
$[Tr\vec{x}_i, L_j]$: Matrice homogène 4X4 de translation suivant x_i et de longueur L_j	VIII
$\vec{Tr}_i^0$: Vecteur translation	VIII, 13
v_i [m.s ⁻¹] : Vitesse de la lumière dans un matériau i	54
$Y(\phi, n)$ [m] : réflexions sur l'axe receveur d'un hémisphère	XV, XVI, 71, 74