

## Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions. Je suis très satisfait d'avoir travaillé avec Monsieur Pr Hassini Abdelatif, mon directeur de thèse, je lui suis honoré d'adresser mes remerciements les plus sincères, dont j'ai tiré un immense profit de son savoir, de ses conseils utiles de discussions fertiles. Je suis très reconnaissant.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Zaafrane Mohamed Amine, Docteur à l'Université des Sciences technique d'Oran USTO, pour l'immense aide qui m'a apporté durant tous mon travail de thèse. Aussi je tiens à remercier Benhlime Oussama pour tous l'aide qui m'as apporté je le suis très reconnaissant.

Je remercie encore l'ensemble des personnels administratives.

*A mon Père, ma mère.*

## **Résumé**

La production d'énergie dans le monde est un problème très complexe avec la diminution de la pollution. Par conséquent, l'objectif est de trouver une solution optimale, cette recherche se concentre sur le développement et l'optimisation du concentrateur parabolique en utilisant une approche d'interactivité et des outils de conception virtuelle. Récemment, plusieurs travaux ont été développés dans ce domaine. Dans cette étude, une nouvelle conception, une approche d'optimisation de la conception a été impliquée dans la conception de l'énergie du système, y compris un nouveau concept. La stratégie de conception a été appliquée avec succès aux problèmes de conception. L'outil d'optimisation développé est basé sur l'heuristique : Gravitational Search Algorithm. Les résultats présentés dans cet article sont significatifs dans la conception énergétique du système, qui présente une approche efficace de développement en réduisant le coût d'installation, le temps d'analyse en augmentant le rayonnement et le flux solaire concentré au sein de la parabole générant une augmentation de l'énergie.

**Mots-clés** : Approche interactive, algorithme de recherche gravitationnelle, Prototype, Énergie solaire, Conception virtuelle.

## المخلص:

إنتاج الطاقة مشكلة معقدة للغاية مع تقليل التلوث. لذلك، فإن الهدف هو إيجاد الحل الأمثل، ويركز هذا البحث على تطوير وتحسين المكثف المكافئ باستخدام نهج تفاعلي وأدوات تصميم افتراضية. في الأونة الأخيرة، تم تطوير العديد من الأعمال في هذا المجال. في هذه الدراسة، تم تضمين مفهوم جديد، نهج تحسين التصميم في تصميم طاقة النظام بما في ذلك المفهوم الجديد. تم تطبيق استراتيجية التصميم بنجاح على مشاكل التصميم. تم تطوير أداة المُحسِّن بناءً على توجيهات: خوارزمية البحث عن الجاذبية. تعتبر النتائج المقدمة مهمة في تصميم طاقة النظام، والتي تقدم نهجًا فعالًا للتطوير من خلال تقليل تكلفة التركيب، ووقت التحليل عن طريق زيادة الإشعاع والتدفق الشمسي المركز داخل القطع المكافئ مما يؤدي إلى زيادة في التراكم طاقة.

**الكلمات المفتاحية:** خوارزمية بحث الجاذبية، نهج تفاعلي، النموذج الأولي، الطاقة الشمسية، التصميم الافتراضي.

## **Abstract**

The energy production in the world is a very complex problem with decreasing the pollution. Therefore, the aim is to find an optimal solution, this research focuses on the development and the optimization of parabolic concentrator using an interactivity approach and virtual design tools. Recently, several works have been developed in this area. In this study, a new conception, design Optimization approach has been involved in system energy design including new concept. The design strategy has been successfully applied to design problems. The optimizer tool developed for based on Heuristic: Gravitational Search Algorithm. The results of the presented in this paper are significant in the system energy design, which presents an effective approach of development by reducing the cost of installation, the time of analysis by increasing the radiation and solar flux concentrated within the parabola generating an increase in accumulated energy.

**Keywords:** Gravitational search algorithm, interactive approach, Prototype, Solar energy, Virtual design.

## Liste des figures

### Chapitre 1 :

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 1.1</b> : Les énergies fossiles.....   | 4  |
| <b>Figure 1.2</b> : Sable bitumineux d'Athabasca.....  | 5  |
| <b>Figure 1.3</b> : Gaz à effet de serre.....  | 6  |
| <b>Figure 1.4</b> : Source d'énergie renouvelable.....                                       | 7  |
| <b>Figure 1.5</b> : L'énergie hydraulique.....   | 8  |
| <b>Figure 1.6</b> : Les différentes technologies géothermique.....                           | 9  |
| <b>Figure 1.7</b> : Sources de Biomasse.....   | 10 |
| <b>Figure 1.8</b> : Voies de valorisation de la biomasse.....                                | 11 |
| <b>Figure 1.9</b> : Conversion solaire-électrique (photovoltaïque).....                      | 12 |
| <b>Figure 1.10</b> : Energie solaire thermique.....  | 12 |
| <b>Figure 1.11</b> : Capteurs plan non vitré.....  | 13 |
| <b>Figure 1.12</b> : Capteurs plan vitré.....  | 14 |
| <b>Figure 1.13</b> : Capteur à tubes sous vide.....  | 14 |
| <b>Figure 1.14</b> : L'énergie solaire thermique (Chauffe-eau solaire).....                  | 15 |
| <b>Figure 1.15</b> : Planché solaire.....  | 16 |
| <b>Figure 1.16</b> : Le rafraîchissement solaire.....  | 17 |
| <b>Figure 1.17</b> : Le mur trombe.....  | 17 |
| <b>Figure 1.18</b> : Architecture bioclimatique.....   | 19 |
| <b>Figure 1.19</b> : Cellule photovoltaïque.....   | 20 |
| <b>Figure 1.20</b> : Cellule photovoltaïque monocristallines.....                            | 21 |
| <b>Figure 1.21</b> : Cellule photovoltaïque polycristallines.....                            | 21 |
| <b>Figure 1.22</b> : Cellule photovoltaïque concentré.....                                   | 22 |
| <b>Figure 1.23</b> : Cellule photovoltaïque hybride.....                                     | 23 |
| <b>Figure 1.24</b> : Demande et besoin énergétique mondiale.....                             | 25 |
| <b>Figure 1.25</b> : Consommation global des énergies selon la source.....                   | 27 |
| <b>Figure 1.26</b> : L'évolution de la production des énergies renouvelables en Algérie..... | 28 |
| <b>Figure 1.27</b> : Les statistiques des émissions de CO2 évités (en tonne).....            | 29 |
| <b>Chapitre 2 :</b>  |    |
| <b>Figure 2.1</b> : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration.....   | 31 |
| <b>Figure 2.2</b> : Schéma de principe d'un cylindroparabolique.....                         | 32 |
| <b>Figure 2.3</b> : Photo de la centrale CSP Nevada Solar One.....                           | 32 |
| <b>Figure 2.4</b> : Schéma de principe d'un linéaire Fresnel.....                            | 33 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 2.5</b> : Photo de la centrale LFR.....   | 33 |
| <b>Figure 2.6</b> : Schéma de principe d'une centrale à tour.....                                       | 34 |
| <b>Figure 2.7</b> : Photo de la centrale Thémis.....  | 35 |
| <b>Figure 2.8</b> : Schéma descriptif d'une parabole.....   | 36 |
| <b>Figure 2.9</b> : Schéma descriptif du point focal d'une parabole.....                                | 37 |
| <b>Figure 2.10</b> : Schéma de principe d'une centrale à concentrateur parabolique.....                 | 38 |
| <b>Figure 2.11</b> : Photo de la parabole d'Odeillo.....  | 38 |
| <b>Figure 2.12</b> : Réflecteur Parabolique.....  | 39 |
| <b>Figure 2.13</b> : Description du système de poursuite.....   | 40 |
| <b>Figure 2.14</b> : Diagramme descriptif du cycle de Rankine-Hirn.....                                 | 42 |
| <b>Figure 2.15</b> : Diagramme descriptif du cycle de Stirling.....                                     | 43 |
| <b>Figure 2.16</b> : Coupe d'un moteur Stirling de type alpha.....                                      | 44 |
| <b>Figure 2.17</b> : Coupe d'un moteur Stirling de type beta.....                                       | 45 |
| <b>Figure 2.18</b> : Coupe d'un moteur Stirling de type gamma.....                                      | 45 |
| <b>Figure 2.19</b> : Diagramme descriptif du cycle d'Ericsson.....                                      | 46 |
| <b>Figure 2.20</b> : Diagramme descriptif du cycle de Joule-Brayton.....                                | 47 |
| <b>Figure 2.21</b> : Ensoleillement direct annuel mondial en kWh m <sup>-2</sup> an <sup>-1</sup> ..... | 48 |
| <b>Chapitre 3 :</b>   |    |
| <b>Figure 3.1</b> : Description de la longitude et latitude.....  | 51 |
| <b>Figure 3.2</b> : Mouvement et rotation terrestre.....  | 52 |
| <b>Figure 3.3</b> : Angle Horaire.....  | 53 |
| <b>Figure 3.4</b> : Equation du temps.....  | 55 |
| <b>Figure 3.5</b> : Mouvement solaire apparent.....   | 56 |
| <b>Figure 3.6</b> : Hauteur angulaire ( $h = \gamma$ ).....   | 57 |
| <b>Figure 3.7</b> : L'angle Azimut.....   | 58 |
| <b>Figure 3.8</b> : Repérage du soleil dans le ciel.....  | 59 |
| <b>Figure 3.9</b> : Diagramme polaire.....  | 60 |
| <b>Figure 3.10</b> : Rayonnement direct et diffus.....  | 61 |
| <b>Figure 3.11</b> : Les types de rayonnement.....  | 63 |
| <b>Figure 3.12</b> : Processus d'optimisation d'un problème.....  | 64 |
| <b>Figure 3.13</b> : Un problème d'optimisation.....  | 66 |
| <b>Figure 3.14</b> : Classification des algorithmes d'optimisation.....                                 | 67 |
| <b>Figure 3.15</b> : Principe de l'algorithme GSA.....  | 68 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 3.16</b> : Organigramme de l’algorithme GSA.....                     | 70 |
| <b>Chapitre 4 :</b>  |    |
| <b>Figure 4.1</b> : la disposition des points de chaux en Algérie.....         | 72 |
| <b>Figure 4.2</b> : Irradiance solaire reçu sur Oran.....                      | 73 |
| <b>Figure 4.3</b> : Irradiance solaire reçu sur Adrar.....                     | 73 |
| <b>Figure 4.4</b> : Comparaison de l’amont énergétique sur les deux sites..... | 74 |
| <b>Figure 4.5</b> : process de conception.....                                 | 75 |
| <b>Figure 4.6</b> : Concept de fabrication en réalité virtuelle.....           | 76 |
| <b>Figure 4.7</b> : Présentation du logiciel MATLAB.....                       | 77 |
| <b>Figure 4.8</b> : Présentation du logiciel PROTEUS.....                      | 77 |
| <b>Figure 4.9</b> : Présentation du logiciel ARDUINO IDE.....                  | 78 |
| <b>Figure 4.10</b> Présentation du logiciel SolidWorks.....                    | 78 |
| <b>Figure 4.11</b> : conception mecanique sous logiciel.....                   | 79 |
| <b>Figure 4.12</b> : conception mecanique sous logiciel.....                   | 80 |
| <b>Figure 4.13</b> : Le système parabolique realisé.....                       | 80 |
| <b>Figure 4.14</b> : Capteur de température (thermocouple type K).....         | 81 |
| <b>Figure 4.15</b> : Horloge 1302.....   | 82 |
| <b>Figure 4.16</b> : Accéléromètre FC03.....                                   | 82 |
| <b>Figure 4.17</b> : Module L298N.....   | 83 |
| <b>Figure 4.18</b> : La schématique et l’adaptateur pour carte SD.....         | 83 |
| <b>Figure 4.19</b> : Organigramme de programmation.....                        | 84 |
| <b>Figure 4.20</b> : Compilation du programme d’exécution.....                 | 85 |
| <b>Figure 4.21</b> : La schématique de la catre électronique.....              | 86 |
| <b>Figure 4.22</b> : La carte électronique réalisée.....                       | 87 |
| <b>Figure 4.23</b> : Paramètres du système de poursuite.....                   | 88 |
| <b>Figure 4.24</b> : Schéma fonctionnel du système de suivi.....               | 88 |
| <b>Figure 4.25</b> : L’évolution du flux solaire utile.....                    | 89 |
| <b>Figure 4.26</b> : L’évolution du flux utile expérimental.....               | 90 |
| <b>Figure 4.27</b> : L’évolution de l’angle azimutal.....                      | 90 |
| <b>Figure 4.28</b> : L’évolution de l’angle d’élévation.....                   | 91 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 4.29</b> : Graphe de convergence pour 200 itérations.....                  | 92 |
| <b>Figure 4.30</b> : Graphe de convergence pour 400 itérations.....                  | 93 |
| <b>Figure 4.31</b> : Graphe de convergence pour 800 itérations.....                  | 93 |
| <b>Figure 4.32</b> : Évolution du flux solaire utile en les paramètres standard..... | 94 |
| <b>Figure 4.33</b> : Évolution du flux solaire utile en les paramètres optimaux..... | 95 |
| <b>Figure 4.34</b> : La comparaison entre les différents paramètres.....             | 95 |
| <b>Figure 4.35</b> : Comparaison entre les différents paramètres.....                | 96 |
| <b>Figure 4.36</b> : La page d'accueil de logiciel.....                              | 97 |
| <b>Figure 4.37</b> : Le calcul de l'irradiance solaire.....                          | 98 |
| <b>Figure 4.38</b> : Dimensionnement de la parabole.....                             | 99 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau A</b> 200 itérations.....       | 91 |
| <b>Tableau B</b> 400 itérations.....       | 92 |
| <b>Tableau C</b> 400 itérations.....       | 93 |
| <b>Tableau 4.1</b> Resultats obtenus.....  | 94 |
| <b>Tableau 4.2</b> Resultats obtenus ..... | 96 |

## Liste des symboles et abréviations

| <b>Indice</b>  | <b>Abréviation</b>                 | <b>Unité</b>     |
|----------------|------------------------------------|------------------|
| $\lambda$      | Longitude                          | Degré (°)        |
| $\varphi$      | Latitude                           | Degré (°)        |
| $\delta$       | Déclinaison                        | Degré (°)        |
| $\omega$       | Angle horaire (AH)                 | Degré (°)        |
| TSV            | Temps solaire vrai                 | Heures           |
| TSL            | Temps solaire local                | Heures           |
| TU             | Temps universel                    | Heures           |
| h              | Hauteur angulaire                  | Degré (°)        |
| D0             | Durée astronomique                 | Heures           |
| a              | Azimut                             | Degré (°)        |
| G              | Rayonnement global                 | W/m <sup>2</sup> |
| I              | Rayonnement direct                 | W/m <sup>2</sup> |
| D              | Rayonnement diffus                 | W/m <sup>2</sup> |
| G <sub>h</sub> | Rayonnement global horizontal      | W/m <sup>2</sup> |
| D <sub>h</sub> | Rayonnement diffus horizontal      | W/m <sup>2</sup> |
| $\beta$        | Angle d'incidence                  | Degré (°)        |
| i              | Vitrage d'inclinaison              | Degré (°)        |
| $\gamma$       | Vitrage d'orientation              | Degré (°)        |
| $\alpha$       | Coefficient d'albédo du sol        | -                |
| $\sigma$       | Fraction d'insolation              | -                |
| S              | Durée d'insolation mesurée         | Heures           |
| S <sub>0</sub> | Durée maximale d'insolation        | Heures           |
| z              | Altitude                           | Km               |
| I <sub>i</sub> | Rayonnement direct perpendiculaire | W/m <sup>2</sup> |
| I <sub>0</sub> | Constante solaire hors atmosphère  | -                |
| m              | Epaisseur d'atmosphère traversée   | Km               |
| p <sub>m</sub> | Pression atmosphérique             | mbar             |
| I <sub>h</sub> | Irradiation direct ciel quelconque | MWh              |
| T <sub>a</sub> | Température ambiante               | K                |
| H              | Humidité relative                  | %                |
| DNI            | Insolation normale directe         | W/m <sup>2</sup> |

## Sommaire

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE.....   | 1  |
| CHAPITRE 1 : ENERGIES.   |    |
| 1.1 Introduction.....  | 4  |
| 1.2 Énergie fossile.....   | 5  |
| 1.2.1 Une extraction qui cause problèmes sur les écosystèmes.....      | 5  |
| 1.2.2 Émissions de gaz à effet de serre.....                           | 6  |
| 1.2.3 Avantages et inconvénients des énergies fossiles.....            | 6  |
| 1.3 Sources d'énergies renouvelables.....                              | 7  |
| 1.3.1 L'énergie hydraulique.....                                       | 8  |
| 1.3.2 Energie géothermique.....  | 8  |
| 1.3.2.1 Types de technologies.....                                     | 8  |
| 1.3.3 La biomasse.....   | 9  |
| 1.3.3.1 Fonctionnement technique.....                                  | 10 |
| 1.4 L'énergie solaire.....   | 11 |
| 1.4.1 Les différents types d'énergie solaire.....                      | 12 |
| 1.4.1.1 L'énergie solaire thermique.....                               | 12 |
| 1.4.1.1.1 La technologie solaire thermique à basse température.....    | 13 |
| 1.4.1.1.2 Fonctionnement technique.....                                | 13 |
| 1.4.1.1.3 La technologie solaire thermique active.....                 | 15 |
| 1.4.1.1.4 Le rafraîchissement solaire.....                             | 16 |
| 1.4.1.1.5 Le mur Trombe.....   | 17 |
| 1.4.1.1.6 Les avantages.....   | 18 |
| 1.4.1.1.7 Les limites.....   | 18 |
| 1.4.1.1.8 La technologie solaire thermique passive.....                | 18 |
| 1.4.1.2 L'énergie solaire photovoltaïque.....                          | 19 |
| 1.4.1.2.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... | 19 |
| 1.4.1.2.1.1 Le solaire photovoltaïque non concentré.....               | 20 |
| 1.4.1.2.1.2 Le solaire photovoltaïque concentré.....                   | 22 |
| 1.4.1.2.1.3 Enjeux par rapport à l'énergie.....                        | 23 |
| 1.4.1.3 L'énergie solaire thermodynamique.....                         | 24 |
| 1.5 La demande énergétique.....  | 24 |
| 1.6 Consommation mondiales des énergies.....                           | 26 |
| 1.6.1 En Algérie.....  | 28 |

|  |    |
|--|----|
| 1.7 Conclusion.....  | 29 |
| <b>CHAPITRE 2 :</b>  |    |
| 2.1 Introduction .....   | 30 |
| 2.2 Centrales solaires thermodynamiques à concentration.....             | 30 |
| 2.2.1 Les centrales cylindro-paraboliques.....                           | 31 |
| 2.2.2 Les centrales linéaires Fresnel.....                               | 32 |
| 2.2.3 Les centrales à tour.....  | 33 |
| 2.3 Equation de la parabole.....   | 35 |
| 2.3.1 Propriétés de la parabole.....                                     | 35 |
| 2.3.2 La distance focale.....  | 36 |
| 2.4 Les centrales à concentrateur parabolique.....                       | 37 |
| 2.4.1 Réflecteur (miroirs).....  | 38 |
| 2.4.2 Mécanisme de poursuite.....  | 39 |
| 2.4.3 Le collecteur (l'absorbeur).....                                   | 40 |
| 2.4.4 Les fluides caloporteurs .....                                     | 40 |
| 2.5 Les cycles de conversion énergétique .....                           | 41 |
| 2.5.1 Cycle de Hirn-Rankine.....   | 41 |
| 2.5.2 Cycle de Stirling.....   | 42 |
| 2.5.3 Moteur Stirling .....  | 43 |
| 2.5.3.1 Principe de fonctionnement .....                                 | 44 |
| 2.5.3.2 Alimentation .....   | 44 |
| 2.5.3.3 Type de moteur Stirling .....                                    | 44 |
| 2.5.3.3.1 Stirling alpha .....   | 44 |
| 2.5.3.3.2 Stirling bêta .....  | 44 |
| 2.5.3.3.3 Stirling gamma.....  | 45 |
| 2.5.4 Cycle d'Ericsson.....  | 46 |
| 2.5.5 Cycle de Brayton-Joule.....  | 46 |
| 2.6 Comparaisons des différentes centrales solaires à concentration..... | 47 |
| 2.7 Limitations des procédés solaires.....                               | 47 |
| 2.8 Conclusion.....  | 49 |
| <b>CHAPITRE 3 :</b>  |    |
| 3.1 Introduction.....  | 50 |
| 3.2 Repérage et mesures d'ensoleillement.....                            | 50 |
| 3.2.1 Repérage du soleil dans le ciel.....                               | 50 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2.1.1 | Longitude $\lambda$ .....   | 50 |
| 3.2.1.2 | Latitude $\varphi$ .....  | 51 |
| 3.2.1.3 | Déclinaison solaire $\delta$ .....                                | 51 |
| 3.2.1.4 | Angle horaire $\omega$ (ou AH).....                               | 52 |
| 3.2.2   | Les cinq temps.....   | 53 |
| 3.2.2.1 | Temps universel.....  | 54 |
| 3.2.2.2 | Temps solaire local.....  | 54 |
| 3.2.2.3 | Equation du temps.....  | 55 |
| 3.2.2.4 | Temps solaire vrai.....   | 56 |
| 3.2.2.5 | Heure légale.....   | 56 |
| 3.2.3   | Mouvement apparent.....   | 57 |
| 3.2.4   | Hauteur angulaire.....  | 58 |
| 3.2.5   | Azimut.....   | 59 |
| 3.2.6   | Système de coordonnées équatoriales.....                          | 60 |
| 3.2.7   | Abaque d'enseillement sur une latitude donnée.....                | 61 |
| 3.3     | Mesure sur une surface d'inclinaison quelconque.....              | 61 |
| 3.3.1   | Mesure par ciel clair sur une surface horizontale.....            | 62 |
| 3.4     | Expression du rayonnement direct reçu sur un plan quelconque..... | 62 |
| 3.5     | Composante diffuse pour une surface d'orientation quelconque..... | 62 |
| 3.6     | Fraction d'insolation $\sigma$ .....                              | 63 |
| 3.7     | Rayonnement direct.....   | 63 |
| 3.7.1   | Irradiance directe ciel clair (sans nuages).....                  | 63 |
| 3.7.2   | Irradiation direct ciel quelconque.....                           | 64 |
| 3.7.3   | Rayonnement diffus.....   | 64 |
| 3.7.3.1 | Ciel quelconque.....  | 65 |
| 3.8     | Rayonnement global.....   | 65 |
| 3.9     | Etat de l'art sur le domaine de l'optimisation.....               | 65 |
| 3.9.1   | Analyse.....  | 66 |
| 3.9.2   | Optimisation.....   | 67 |
| 3.9.3   | Algorithmes d'optimisation.....                                   | 68 |
| 3.9.4   | Gravitational Search Algorithm GSA.....                           | 68 |
| 3.9.4.1 | Initialisation.....   | 69 |
| 3.9.4.2 | Evaluation de tous les agents.....                                | 70 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.9.4.3 La constante de gravité.....                         | 70  |
| 3.9.4.4 Mise à jour de la masse d'inertie et de gravité..... | 70  |
| 3.9.4.5 calcul de la force totale.....                       | 70  |
| 3.9.4.6 Calcul de l'accélération et de vitesse.....          | 71  |
| 3.9.4.7 Mise à jour de position.....                         | 71  |
| <b>CHAPITRE 4 :</b>  |     |
| 4.1 Introduction.....  | 72  |
| 4.2 Intérêt géographique vis-à-vis de l'énergie solaire..... | 72  |
| 4.3 Présentation du processus de conception.....             | 74  |
| 4.4 Conception assisté par ordinateur.....                   | 75  |
| 4.4.1 Présentation du logiciel MATLAB.....                   | 76  |
| 4.4.2 Présentation du logiciel PROTEUS.....                  | 77  |
| 4.4.3 Présentation du logiciel ARDUINO IDE.....              | 77  |
| 4.4.5 Présentation du logiciel SolidWorks.....               | 78  |
| 4.5 Conception mecanique.....                                | 79  |
| 4.5 Conception electronique.....                             | 80  |
| 4.5.1 Thermocouple type K plus convertisseur Max6675.....    | 81  |
| 4.5.2 Horloge DS 1302.....                                   | 81  |
| 4.5.3 L'accelerometre FC03.....                              | 82  |
| 4.5.4 Pont en H L298N.....                                   | 83  |
| 4.5.5 Carte SD.....  | 83  |
| 4.6 Le système de tracking.....                              | 88  |
| 4.7 Interprétation des résultats.....                        | 88  |
| 4.7.1 Paramétrage de l'algorithme.....                       | 90  |
| 4.7.2 Paramétrage de l'interface graphique.....              | 96  |
| 4.8 Conclusion.....  | 99  |
| CONCLUSION GENERALE.....                                     | 100 |

## **Introduction générale**

Au cours des dernières années, la demande d'énergie électrique a augmenté rapidement compte tenu du nouveau contexte d'automatisation des systèmes dans presque tous les domaines, y compris le domaine domestique. Les pays dotés de technologies de systèmes énergétiques avancées se concentrent sur le développement des énergies renouvelables, de plus, elles ont le potentiel de jouer un rôle important dans la fourniture d'énergie durable.

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80 %) provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium. Ces gisements, ces stocks, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique, sont évidemment en quantité limitée : ils sont épuisables. Depuis quelques années, l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) et son impact sur le climat inquiète la communauté scientifique. Le dérèglement climatique, en grande partie causé par les émissions de GES liées à l'activité humaine, ne pourra probablement pas être maîtrisé sans « décarbonner » les sociétés industrielles.

Vraisemblablement promises sur le moyen et long termes à un développement important, les technologies des énergies renouvelables n'ont pour la plupart pas encore atteint une maturité suffisante pour entrer en compétition avec les énergies classiques sur une grande échelle. Il existe bien sûr une exception qui est l'hydroélectricité, ainsi que certaines formes d'énergies renouvelables qui commencent à être économiquement viables.

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle est produite par une source que la nature renouvelle en permanence, contrairement à une énergie dépendant de sources qui s'épuisent. Les énergies renouvelables sont très diverses mais elles proviennent toutes de deux sources naturelles principales :

- Le Soleil : il émet des rayonnements transformables en électricité ou en chaleur, il génère des zones de températures et de pression inégales à l'origine des vents, il engendre le cycle de l'eau, il permet la croissance des plantes et la génération de la biomasse ;
- La Terre, dont la chaleur interne peut être récupérée à la surface.

Le caractère renouvelable de ces énergies, leur faible émission de déchets, de rejets polluants et de gaz à effet de serre sont des avantages. Mais leur pouvoir énergétique, relativement disséminé, est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables fortement concentrées. Elles peuvent être - dans le cas du solaire et de l'éolien - « intermittentes » et difficilement stockables car immédiatement transformées en électricité, nécessitant alors



l'apport ponctuel d'autres énergies. Leur mise en œuvre suppose aussi des investissements lourds, même si avec le temps elles deviennent de plus en plus compétitives face aux énergies fossiles. L'énergie solaire reste néanmoins la plus importante en disponibilité, en puissance et probablement aussi la plus compétitive à développer dans le futur sous plusieurs formes.

L'Algérie avec sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation d'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement qui varie de 2650 heures /an dans le nord à 3500 heures/an dans le sud, l'une des plus élevées au monde. Elle reçoit le maximum d'énergie lors du solstice d'été (21 ou 22 juin) et le minimum lors du solstice d'hivers (21 ou 22 décembre). Dans ces dernières années, la production d'électricité à partir de la conversion photovoltaïque augmente dans le monde d'une façon remarquable. Cependant, la part de cette conversion en électricité reste faible comparativement à celle des autres énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne ou biomasse.

Pour une compréhension fondamentale de la structure électronique et mécanique, ainsi que les propriétés des matériaux, les théoriciens ont développé des méthodes basées sur des modèles semi-empiriques. De tels modèles comportent souvent de nombreux paramètres ajustables aux données expérimentales, ces paramètres dans notre cas on aider à déterminer et de quantifier l'énergie prévente du soleil, ainsi de développer un système de poursuite aveugle fonctionnant en tout temps.

Cette étude se concentrera sur une expérience de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique en réalisant un concentrateur solaire parabolique. Un système de suivi solaire est déployé pour orienter le concentrateur dans deux sens de rotation conçus en fonction d'un paramètre géographique (la zone d'étude). Afin d'obtenir une acquisition de données en temps réel et de faciliter la communication entre les systèmes (électroniques et mécaniques), une interface graphique est développée. Enfin, une simulation numérique d'un modèle théorique est exploitée afin de permettre de calculer le degré de rayonnement au niveau du réflecteur. Ce travail expérimental montre l'efficacité de la contribution proposée.

Le premier chapitre comportera un état de l'art sur les énergies fossiles, leurs types et spécifications, ainsi exposer leurs méfait et leurs danger pour l'environnement et les personnes. Ensuite on introduit les énergies renouvelables comme une solution très prometteuse pour le remplacement des énergies fossiles. On décrit les types et spécifications de chaque énergies en se concentrant sur l'énergie solaire ainsi que ses types de conversion existante.

Le deuxième chapitre rapporte un état de l'art sur les technologies de conversion solaire-thermique, les concentrateurs solaires et leurs technologies associé. Un état de l'art sur les concentrateurs parabolique et les cycles de conversion thermodynamique.

La modélisation mathématique et l'optimisation par algorithme est présentée au chapitre trois qui traite tout ce qui est en rapport avec les équations solaires et la méthode d'optimisation suivie pour réaliser la construction de façon optimale.

Enfin le chapitre quatre traite les résultats obtenus sur les trois procédés du projet réalisé :

- Conception et réalisation du prototype concentrateur parabolique.
- Conception et réalisation de l'électronique associée.
- Optimiser les paramètres géométrique de la parabole et géographique de la zone d'étude par l'algorithme d'optimisation GSA.

# **Chapitre 01**

## **Energie**

## 1.1 Introduction

Depuis l'aube des temps l'énergie est vitale pour l'homme [1]. Le terme énergie est employé pour désigner une capacité à modifier un état ou à produire un travail entraînant un mouvement ou générant un rayonnement électromagnétique - de la lumière, de la chaleur exprimée en joules ou plus souvent en Kilowatt-heurs. La provenance du mot vient du GREC Grec « ENERGIA » qui signifie « FORCE EN ACTION »

L'ère de la Révolution industrielle marque les débuts d'une consommation massive d'énergies fossiles, Le succès a été bâti sur une bonne maîtrise technologique, un rendement moyen intéressant, une disponibilité tout au long de l'année et un stockage et un transport relativement aisés. Et ce n'est que plus tard que nous nous sommes alertés quant au fait que les ressources fossiles sont limitées -- disponibles en quantités finies, leurs réserves s'épuisent au fur et à mesure de leur exploitation, contrairement aux énergies renouvelables -- et que leur combustion est très polluante et génératrice de gaz à effet de serre. Pourtant, selon l'Agence internationale de l'énergie, les énergies fossiles devraient encore dominer les mix énergétiques pour quelques années au moins.

Le nom Combustible fossile est donné à tous les combustibles riches en carbone essentiellement les hydrocarbures d'origine de la méthanisation des êtres organiques morts et enfuit dans le sol depuis plusieurs millions d'années. Principalement le pétrole, le charbon, la tourbe, et le gaz naturel ces sources ne sont pas renouvelables.

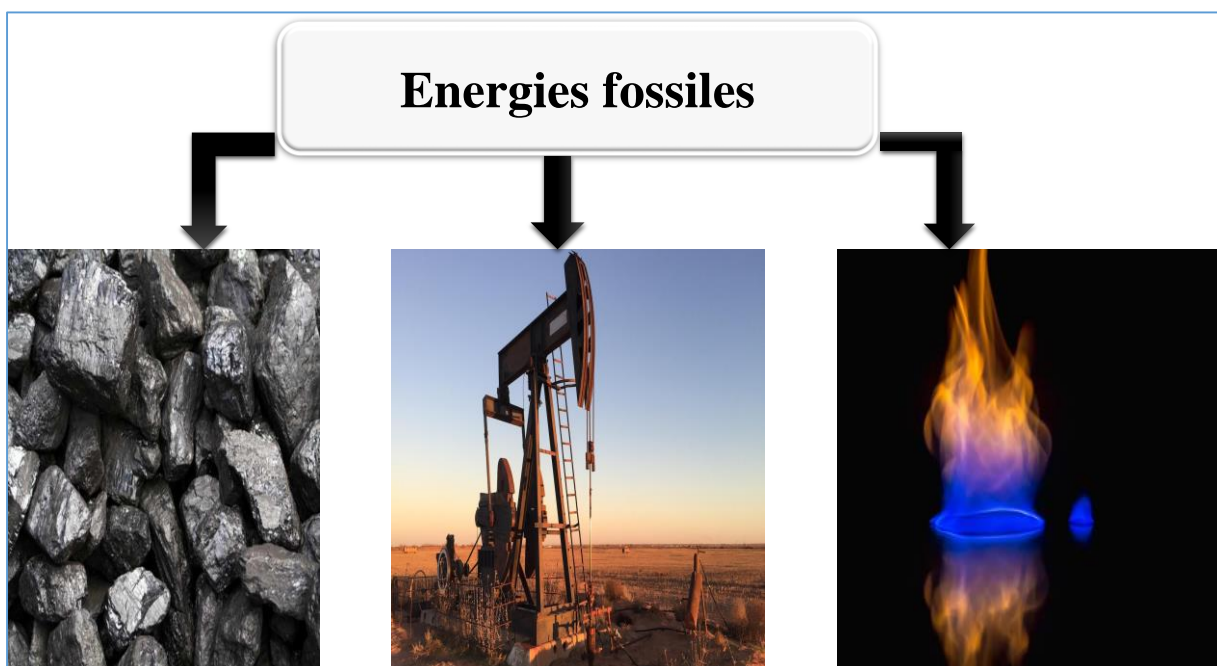


Figure 1.1 : Les énergies fossiles.

## 1.2 Énergie fossile

Le mot énergie fossile vient de l'exploitation des gisements souterrains formés par la fossilisation des espèces organiques mortes depuis plusieurs millions d'années, une énergie limitée et non renouvelables est produit. On y trouve en outre le charbon, le gaz naturel ou encore le pétrole [2].

### 1.2.1 Une extraction qui cause problèmes sur les écosystèmes

L'accélération du changement climatique fonctionne comme un signal d'alarme. La multiplication des équipements consommant une quantité astronomique d'énergie, la croissance des consommations d'électricité, et l'épuisement des sources fossiles, tout en augmentant les taux des gaz à effet de serre [3]. Un danger qui se manifeste sur plusieurs grandes lignes essentiellement dans son extraction et se traduit par : dégradation de l'environnement, explosion de l'émission de carbone, destruction des écosystèmes, ou plus la disparition des peuples autochtones.

Le méthane émis dans l'extraction de l'énergie des sables bitumineux est exponentiel et a conduit à un pic d'émission de gaz à effet de serre, que les scientifiques voient comme la conséquence d'un réchauffement climatique. Le cas d'Athabasca n'est pas un cas à part, et la quasi-totalité des lieux d'extraction d'énergies fossiles affecte grandement l'érosion des sols, la dégradation des écosystèmes et engendrent la disparition d'espèces et d'écosystèmes.



**Figure 1.2 :** Sable bitumineux d'Athabasca

### 1.2.2 Émissions de gaz à effet de serre

L'extraction des énergies fossiles n'est pas responsable sur le réchauffement climatique actuel. On peut dire que La combustion l'engendre elle aussi et de façon plus alarmante.

L'utilisation démesurée des combustibles fossiles entraîne un déséquilibre significatif du cycle du carbone. Cette consommation entraîne un déséquilibre non négligeable du cycle du carbone. Cela aboutit à un constat alarmant : une concentration plus importante du gaz à effet de serre dans l'atmosphère et un réchauffement climatique important. Au rythme actuel de consommation, la température de la planète aura augmenté de 5 °C d'ici 2050. Il faudrait dès lors, d'après Greenpeace, réduire de 80 % notre consommation d'énergie fossile pour ne pas dépasser le seuil de 2 °C à l'horizon 2050 [4].



**Figure 1.3** : Gaz à effet de serre (information.tv5monde.com).

### 1.2.3 Avantages et inconvénients des énergies fossiles

On cite divers avantages et inconvénients des énergies fossiles selon leurs natures :

- Le charbon a l'avantage d'être assez bien réparti sur la planète et se trouve en très grande quantité. Parmi ces principaux inconvénients, il y a son coût d'exploitation très élevé et la pollution qu'il génère
- Le pétrole, contrairement au charbon, est disponible presque partout sur le globe, son rendement énergétique est très important, il permet de produire un grand nombre de produits dérivés (plastique, engrais, gaz méthane et propane, essence, etc.) dont l'humanité ne peut pas encore se passer. Parmi ces inconvénients majeurs, on peut citer le fait qu'il soit très polluant (pour l'exploitation et l'utilisation), que son prix ne cesse d'augmenter et qu'il soit à l'origine de nombreux conflits à travers le monde

· Le gaz naturel, lui, est très facilement exploitable ; il est disponible en grande quantité, ne nécessite aucune transformation pour être utilisé et ne pollue pas énormément par rapport aux autres sources d'énergie fossiles. Son principal défaut est sa dangerosité (les explosions sont fréquentes aussi bien au niveau industriel que domestique).

Le défi environnemental majeur est de réussir à transiter vers des énergies plus propres plus abondantes disant renouvelables, tout cela dans le but de réduire et de limiter l'impact néfaste des énergies fossiles.

### 1.3 Source d'énergies renouvelables

L'utilisation du terme énergie renouvelable désigne les énergies dites inépuisables et disponibles en abondance. Le renouvelable se décline en plusieurs filières, selon la source de provenance de l'énergie [5] : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Leur caractéristique commune est de ne pas produire, en phase d'exploitation, d'émissions polluantes (ou peu), et ainsi d'aider à lutter contre l'effet de serre et le réchauffement climatique.



**Figure 1.4** : Source d'énergie renouvelable.

### 1.3.1 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique désigne l'énergie produite tirée des ruissellements qui s'écoule dans les cours d'eau [6]. Basée sur le principe du barrage qui par sa construction va réussir à capter l'ensemble de la force produite par l'eau.



**Figure 1.5** : L'énergie hydraulique.

### 1.3.2 Energie géothermique

Contrairement à l'énergie éolienne ou solaire, la géothermie comme son nom l'indique est une source d'énergie indigène qui s'intéresse à l'exploitation des sources chaudes en profondeur [7], disponible et contribue d'une façon significative à la réduction des gaz à effet de serre. De nombreuses solutions d'exploitation des ressources géothermiques sont éprouvées et pratiquées pour des températures terrestres allant de 10 à 300 °C et des profondeurs de 20 à 5000 m. L'utilisation la plus courante de l'énergie géothermique est celle des sondes permettant d'extraire de la chaleur terrestre mise à profit par les pompes à chaleur.

#### 1.3.2.1 Types de technologies

On peut citer plusieurs types de centrales géothermiques :

- Centrale géothermique à vapeur sèche
- Centrale géothermique à vapeur humide



- Centrale géothermique hydrothermale
- Centrale de géothermie profonde stimulée SGS

La figure suivante résume les différents types utilisés en géothermique.

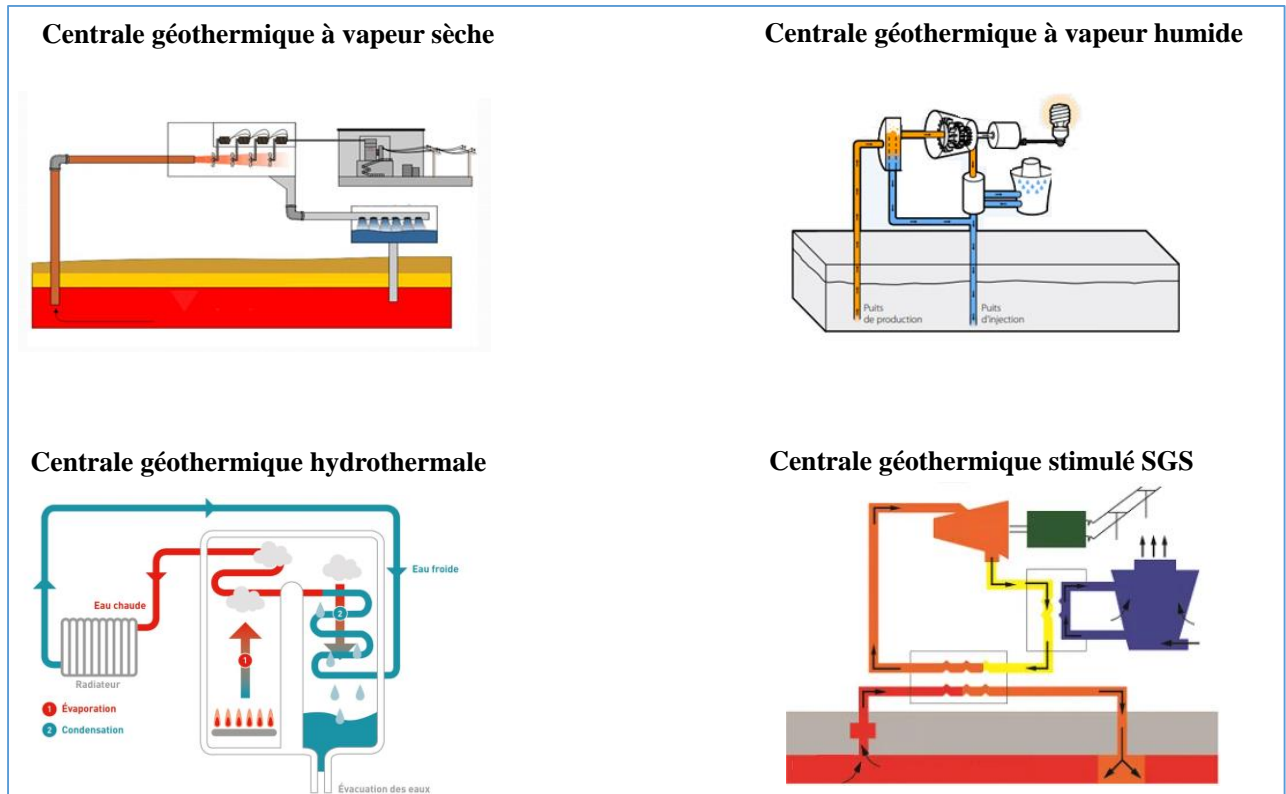


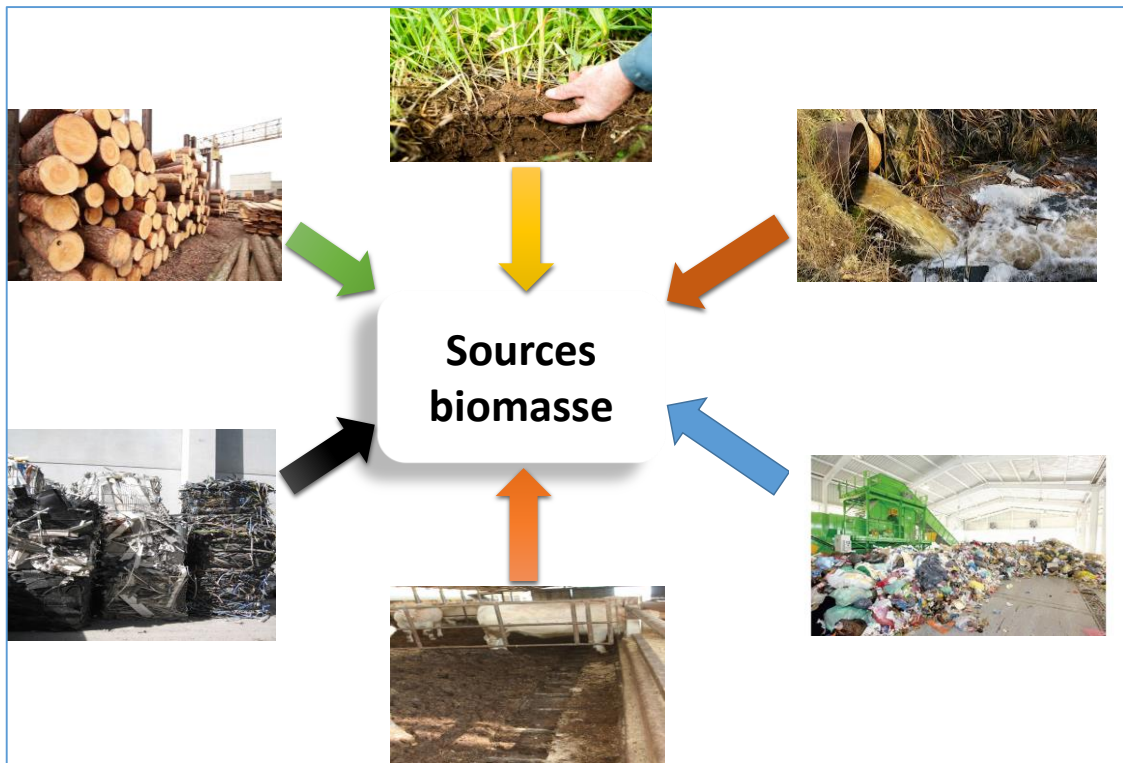
Figure 1.6 : Les différentes technologies géothermique

### 1.3.3 La biomasse

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant être exploitée autant qu'énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol). La biomasse sous toutes formes solide, liquide ou gazeuse produit de l'énergie pour différents usages comme la chaleur, l'électricité, le biogaz ou les carburants [8].

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- les solides (ex : paille, copeaux, bûches).
- les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools).
- les gazeux (ex : biogaz).



**Figure 1.7 :** Sources de Biomasse.

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres.

### 1.3.3.1 Fonctionnement technique

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre :

- Chaleur.
- Electricité.
- Force motrice de déplacement.

On distingue trois procédés de valorisation de la biomasse : la voie sèche, la voie humide et la production de biocarburants.

- La voie sèche
- La voie humide
- La production de biocarburants

La valorisation de la biomasse ne produit toutefois pas que des biocarburants.

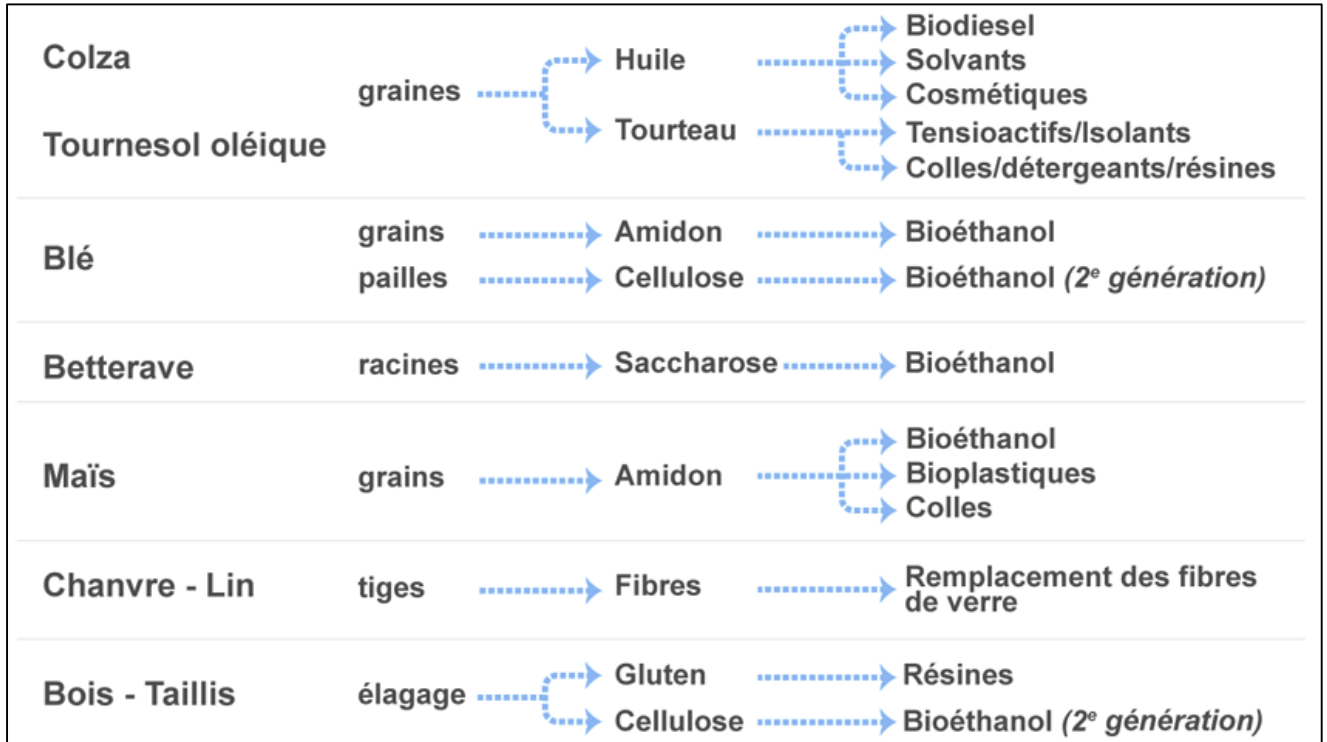


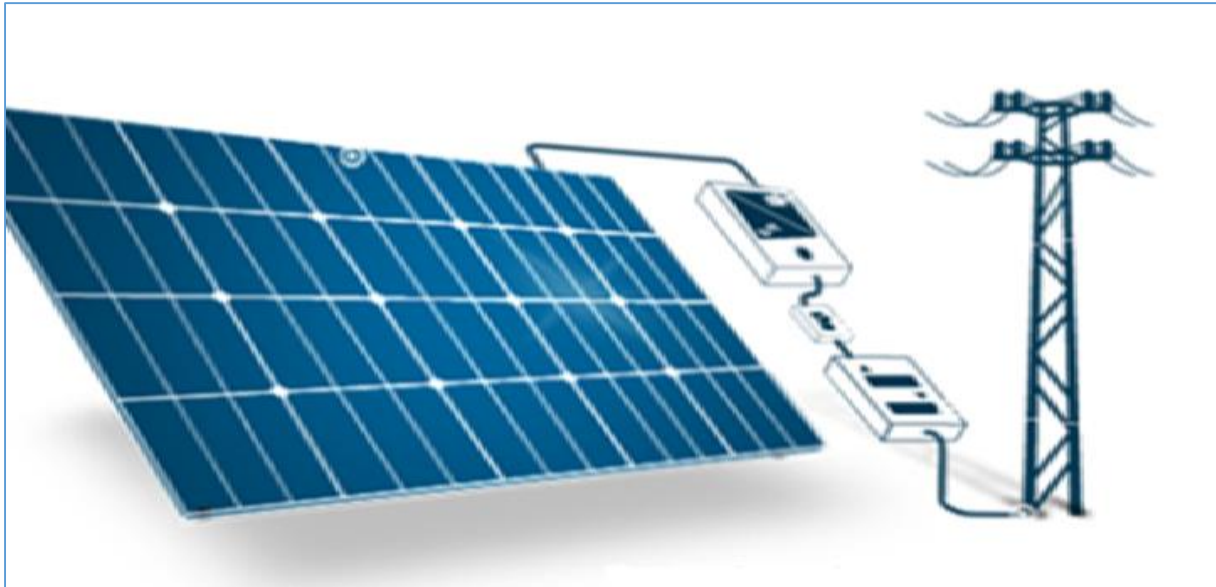
Figure 1.8 : Voies de valorisation de la biomasse.

### 1.4 L'énergie solaire

On peut définir cette énergie comme étant celle fournie par le rayonnement solaire, gratuit, inépuisable et disponible. Synonyme d'écologie, cette source d'énergie est en plus propre, (n'émet aucun gaz à effet de serre). Entre actives et passive, selon l'utilisation et la nécessité la répartition des technologies se fasse comme tel est décrite : Celles actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique, des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des zones urbaines, du chauffage et du refroidissement solaire, aux concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs en vue de générer chaleur intense issue des rayons solaires, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines et mécanismes, et même des fours solaires. Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter

l'énergie

solaire.



**Figure 1.9** : Conversion solaire-électrique (photovoltaïque).

#### 1.4.1 Les différents types d'énergie solaire

Il faut dire que les techniques d'exploitation de l'énergie solaire n'ont cessé de s'améliorer d'une façon très significative au fil de ces dernières années. Aujourd'hui, on cite trois types d'énergie solaire catégorisés selon leurs méthodes de production :

##### 1.4.1.1 L'énergie solaire thermique

Ce type d'énergie est généré lors de l'utilisation des panneaux thermiques captant la chaleur solaire et cela fonctionne comme suite : les panneaux solaires thermiques contiennent des fluides caloporteurs. Une fois chauffés par le soleil, ces derniers chauffent à leur tour le ballon d'eau chaude. L'énergie thermique solaire ainsi obtenue peut être employée de différentes façons : chauffage solaire, chauffe-eau, cuisinières...



**Figure 1.10** : Energie solaire thermique.

#### 1.4.1.1.1 La technologie solaire thermique à basse température

- **La technologie solaire «active»** : ce terme désigne les applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires thermiques sont installés sur les toits des bâtiments en vue de recueillir la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide caloporteur [9].

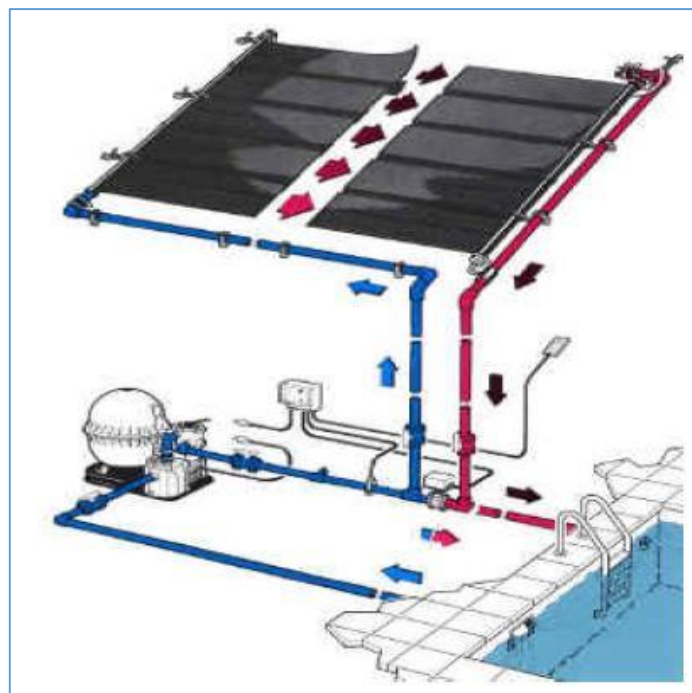
- **La technologie solaire «passive»** : Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux. L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux.

#### 1.4.1.1.2 Fonctionnement technique

Les types de panneaux solaires thermiques diffèrent selon la nature du fluide : de l'eau ou de l'air. Les capteurs solaires à eau sont utilisés pour le chauffage et/ou pour produire de l'eau chaude sanitaire. Et pour le cas des capteurs à air, l'air circule et s'échauffe au contact des absorbeurs. Il est ensuite ventilé dans les habitats pour le chauffage. On peut également les différencier selon leur structure :

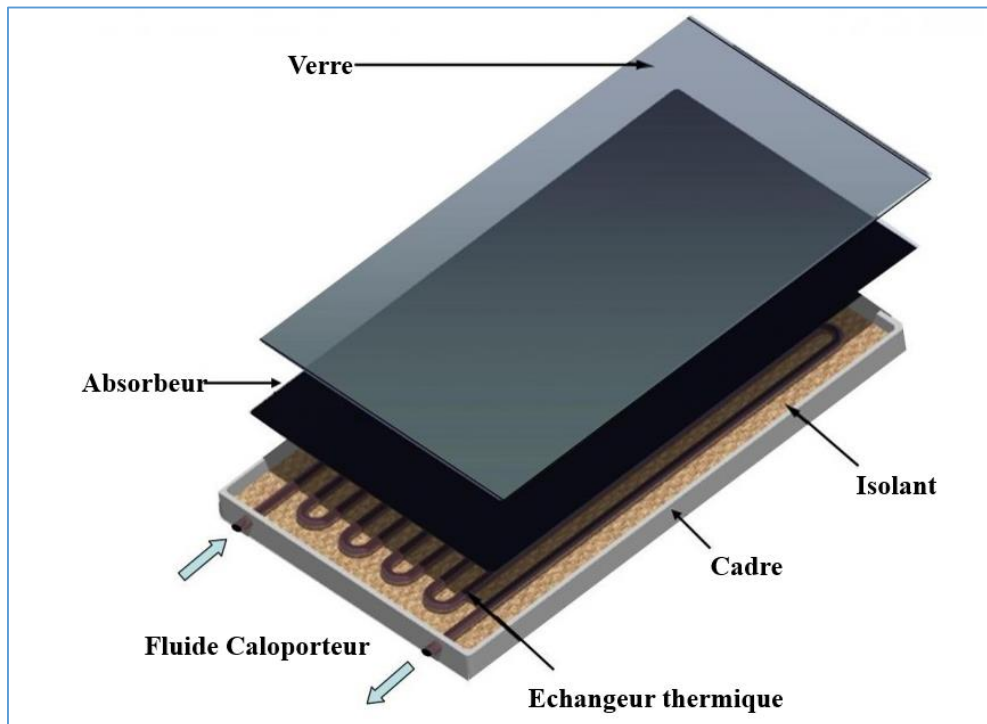
##### - Les capteurs plans non vitrés :

Leur structure est assez simple, puisque composée d'un réseau de tubes plastiques où circule le fluide caloporteur. Ils sont utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines en été [10].



**Figure 1.11** : Capteurs plan non vitré.

- **Les capteurs plans vitrés** : le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un antigel, passe dans un circuit en serpentin placé derrière une vitre [10].



**Figure 1.12** : Capteurs plan vitré.

- **Les capteurs à tubes sous vides** : le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un double tube sous vide. Le principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, l'isolation étant simplement assurée par l'absence de molécules d'air (sous vide).



**Figure 1.13** : Capteur à tubes sous vide.

### 1.4.1.1.3 La technologie solaire thermique active

Voici quelques exemples d'applications des techniques d'exploitation active de l'énergie solaire.

- **Le chauffe-eau solaire**

Un chauffe-eau solaire fonctionne selon un principe simple : l'énergie du rayonnement solaire est absorbée par des capteurs plans fonctionnant selon le principe de l'effet de serre. La chaleur emmagasinée est ensuite transportée au sein d'un circuit « primaire » contenant un mélange caloporteur d'eau et d'antigel [10].

Grâce à un échangeur thermique, le liquide caloporteur contenu dans le circuit primaire transmet son énergie thermique à de l'eau sanitaire contenue dans le réservoir (un ballon) d'un second circuit isolé, dit « secondaire ». Le liquide caloporteur refroidi repart ensuite vers les capteurs afin d'être réchauffé. Lorsque l'eau chauffée dans le ballon est utilisée, elle est remplacée par de l'eau froide du réseau, réchauffée selon le même principe.

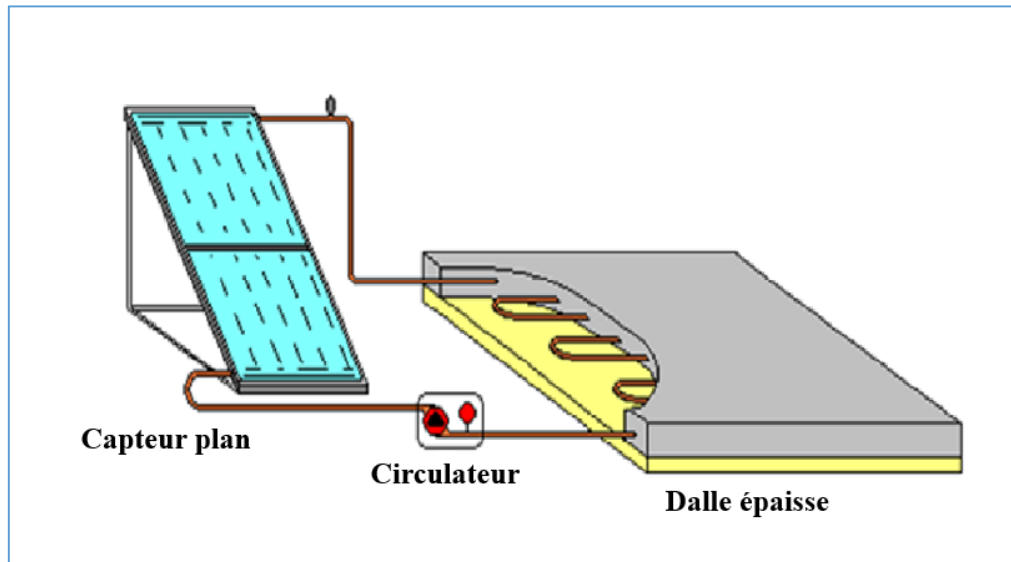


**Figure 1.14** : L'énergie solaire thermique (Chauffe-eau solaire).

- **Le plancher solaire**

Le plancher solaire utilise le même principe d'extraction de l'énergie thermique que le chauffe-eau. Le fluide caloporteur chauffé à 25-30 °C est ici directement injecté dans un réseau de tubes installés dans le sol des bâtiments. Cette technique éprouvée permet d'économiser jusqu'à la moitié des besoins en énergie de chauffage d'un foyer. Pour fournir un chauffage relativement

constant tout au long de la journée malgré l'intermittence du rayonnement solaire, le plancher solaire utilise l'inertie thermique (la capacité de stockage énergétique temporaire) de la dalle en béton et procure une distribution optimale de chaleur verticalement et horizontalement et dispose de la fonction de réversibilité [11].



**Figure 1.15** : Planché solaire.

#### 1.4.1.1.4 Le rafraîchissement solaire

Paradoxalement, la chaleur du rayonnement solaire peut aussi être utilisée pour rafraîchir un bâtiment. Cette technique utilise des capteurs solaires pour fournir de la chaleur qui est dirigée vers une machine à absorption. Cette dernière dissocie, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit du froid, par absorption de chaleur. Le froid est ensuite distribué de manière identique à celle de la climatisation classique. Les systèmes de refroidissement solaire appliqués aux bâtiments sont une alternative intéressante pour réduire la consommation d'énergie dans les systèmes de climatisation mécaniques [12].



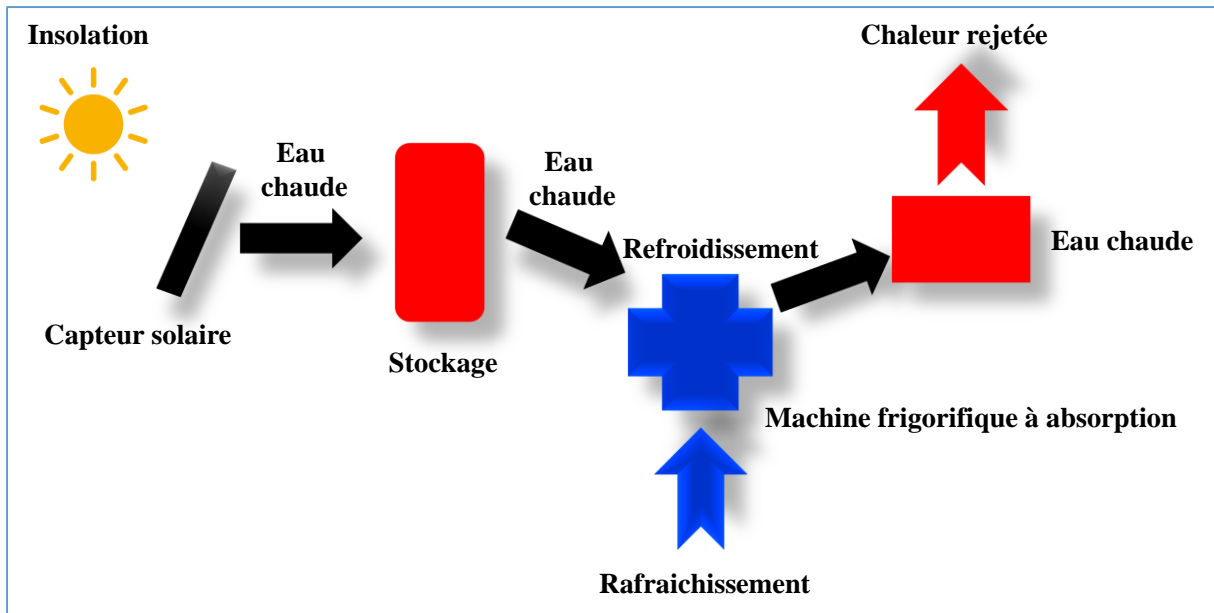


Figure 1.16 : Le rafraîchissement solaire

#### 1.4.1.1.5 Le mur Trombe

Le mur Trombe est un exemple simple et intéressant des techniques existantes permettant de mettre d'une manière passivement à profit le captage l'énergie solaire [13]. Conçu par le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel dans les années 60, ce mur capteur est composé d'un bloc de matière à forte inertie (béton, pierre, etc.) qui accumule le rayonnement solaire du jour et le restitue pendant la nuit. Devant cette paroi, on place une vitre pour créer un effet de serre afin de chauffer l'air.

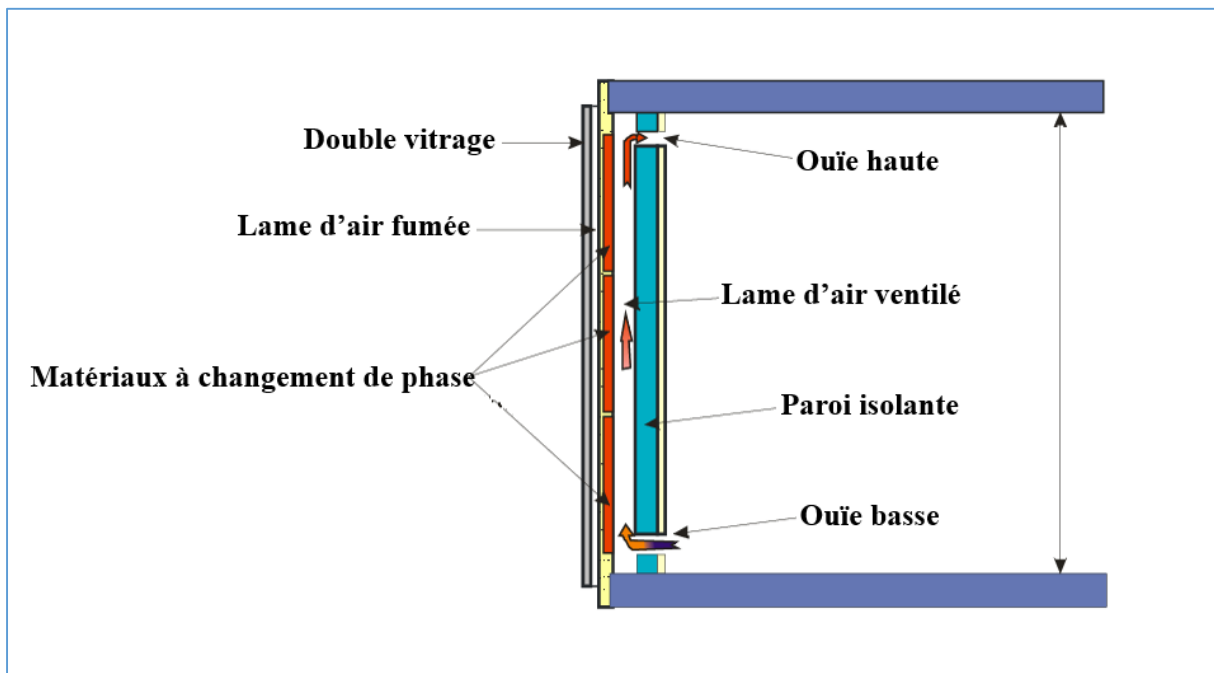


Figure 1.17 : Le mur trombe.

**1.4.1.1.6 Les avantages**

- L'énergie solaire est renouvelable, disponible gratuitement et disponible en quantités colossales à l'échelle humaine. De plus, et contrairement à sa variante thermodynamique, l'énergie thermique classique peut être utilisée dans les régions d'ensoleillement moyen.
- En phase d'exploitation, le processus de production de l'énergie thermique n'a pas d'impact sur l'environnement. Il n'y a pas de rejets de polluants ou de déchets.
- Les technologies de la technologie solaire thermique directe et indirecte sont simples et relativement peu coûteuses. Ce sont des technologies matures d'ores et déjà disponibles sur le marché.
- Il est possible de stocker temporairement la chaleur créée et de les restituer plus tard, pendant la nuit par exemple.
- Les installations thermiques sont adaptées à la majorité des contextes domestiques. C'est-à-dire qu'il est possible de valoriser la chaleur du rayonnement solaire dans tous les lieux, mêmes isolés, à partir du moment où celui-ci est suffisant.

**1.4.1.1.7 Les limites**

- La production de chaleur est tributaire des saisons et des climats. De plus, des capacités de chauffage d'appoint restent nécessaires.
- Les technologies thermiques à faible température ne produisent pas d'électricité, et ne peuvent par conséquent pas répondre à ces besoins (mais peuvent satisfaire des besoins de chaleur).

**1.4.1.1.8 La technologie solaire thermique passive**

Un bâtiment doit être considéré comme un immense capteur solaire dont on peut améliorer le rendement. Il faut prendre en considération les spécificités de son environnement local (ensoleillement, vents dominants, etc.), afin de maximiser les apports énergétiques solaires, de les stocker et de les répartir.

L'architecture bioclimatique utilise le potentiel local (climats, matériaux, main-d'œuvre...) pour recréer un climat intérieur en s'adaptant aux variations climatologiques du lieu [14].

On peut dire qu'une conception est bioclimatique si l'architecture du projet est adaptée en fonction des caractéristiques et particularités du lieu d'implantation, afin d'en tirer le bénéfice des avantages et de se prémunir des désavantages et contraintes. L'objectif principal est d'obtenir

le confort d'ambiance recherché de manière la plus naturelle possible en utilisant les moyens architecturaux, les énergies renouvelables disponibles et en utilisant le moins possible les moyens techniques mécanisés et les énergies extérieures au site. Ces stratégies et techniques architecturales cherchent à profiter au maximum du soleil en hiver et de s'en protéger durant l'été.



**Figure 1.18** : Architecture bioclimatique

#### **1.4.1.2 L'énergie solaire photovoltaïque**

On peut définir l'énergie solaire photovoltaïque par l'électricité produite issue de la transformation du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

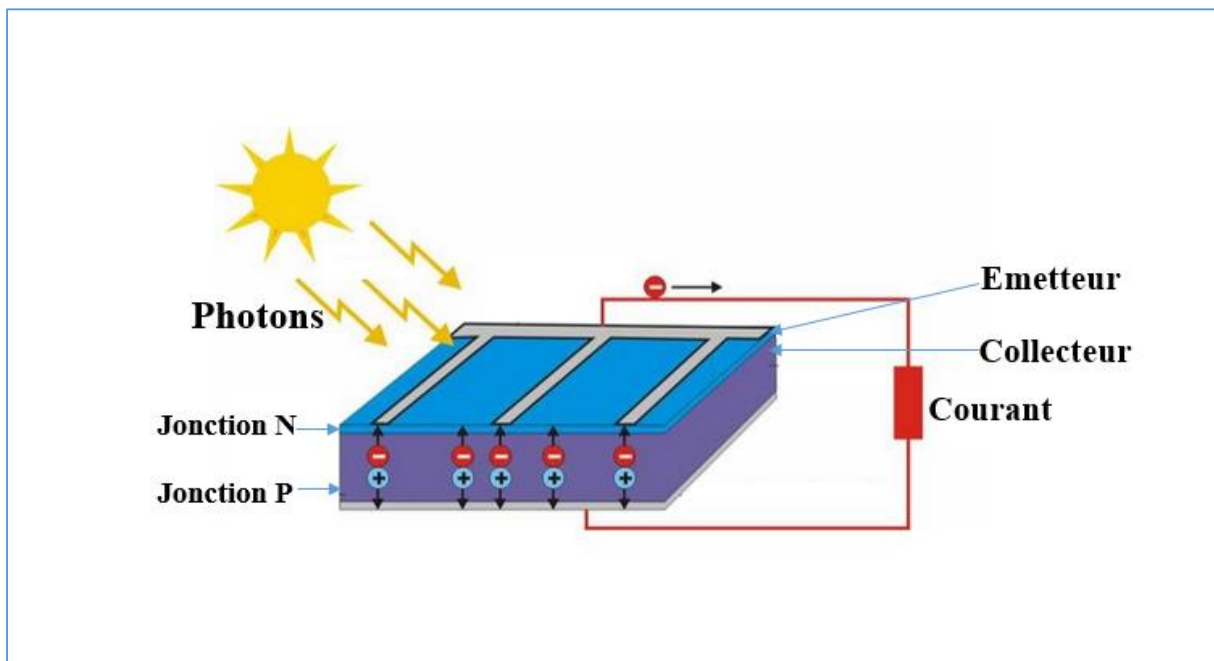
Ce processus ne nécessite aucun cycle thermodynamique intermédiaire, c'est-à-dire que le rayonnement est directement converti en électricité sans utilisation intermédiaire de la chaleur (contrairement à la solaire thermodynamique).

##### **1.4.1.2.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques [15].

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.



**Figure 1.19** : Cellule photovoltaïque

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

#### 1.4.1.2.1.1 Le solaire photovoltaïque non concentré

Les technologies à base de silicium constituent plus de 90% du marché photovoltaïque mondial.

**- Les cellules monocristallines**

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce donnant un arrangement parfait aux atomes [16]. Elles ont un bon rendement mais la méthode de production est laborieuse et coûteuse.



**Figure 1.20** : Cellule photovoltaïque monocristallines.

**- Les cellules polycristallines**

Les cellules polycristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples juxtaposés dans des différentes orientations donnant un effet mosaïque. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre [16].

Au cours des dix dernières années, le rendement moyen d'un panneau photovoltaïque à base de silicium est passé de 12% à 17%.



**Figure 1.21** : Cellule photovoltaïque polycristallines.

#### 1.4.1.2.1.2 Le solaire photovoltaïque concentré

Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement. Grâce à cette technologie de concentration, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. A puissance égale, ceci permet d'utiliser 1 000 fois moins de matériel photovoltaïque que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe.

Cette technologie devrait pénétrer le marché dans un avenir proche.

Le rendement théorique maximum de la conversion photon-électron est de l'ordre de 85% (le rendement de Carnot est 95 %). Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie est pour le moment de 46%.



**Figure 1.22** : Cellule photovoltaïque concentré.

#### - Les cellules hybrides : thermique et photovoltaïque

Le développement des systèmes photovoltaïques concentrés est devenu une tendance en vue de la gestion du budget thermique dans le récepteur pour empêcher sa surchauffe et gérer les pertes de performances liées à la température [17].

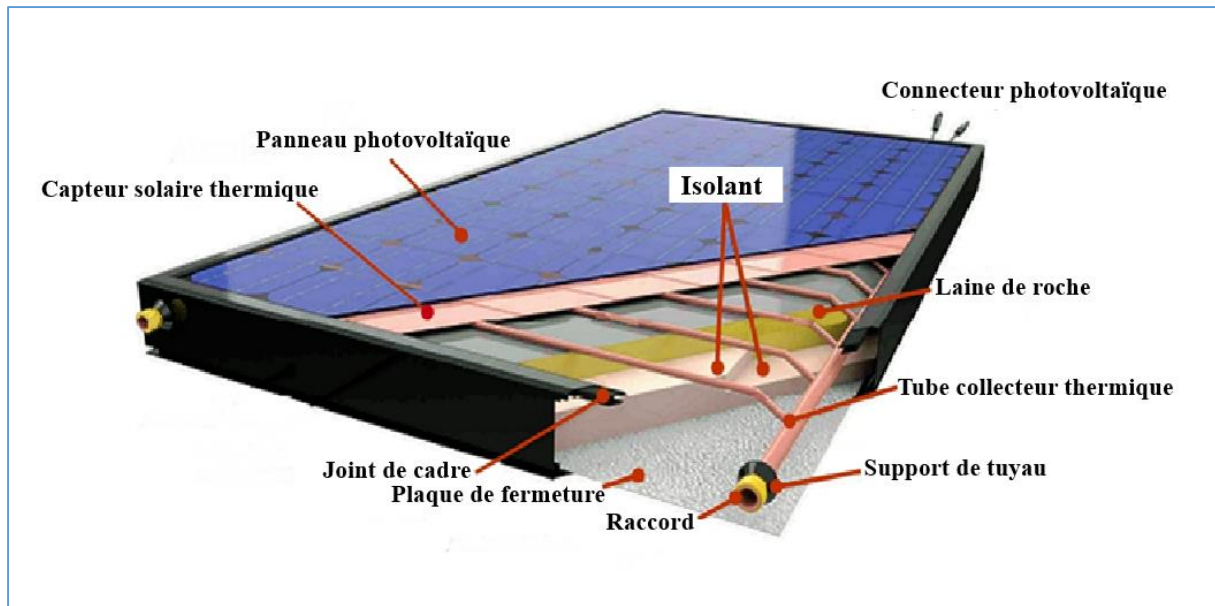


Figure 1.23 : Cellule photovoltaïque hybride.

#### 1.4.1.2.1.3 Enjeux par rapport à l'énergie

##### - Avantages

L'énergie solaire est à l'échelle humaine inépuisable et disponible gratuitement en très grandes quantités. De plus, lors de la phase d'exploitation, la production d'électricité au moyen de panneaux photovoltaïques n'est pas polluante.

Le silicium, matériau utilisé dans les panneaux solaires actuels les plus répandus, est très abondant et n'est pas toxique.

Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à plus de 30 ans et sont presque intégralement recyclables.

La modularité des panneaux est très importante, c'est-à-dire qu'il est possible de concevoir des installations de tailles diverses dans des environnements très variés. Ceux-ci sont par conséquent adaptés à la production décentralisée d'électricité en sites isolés.

Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés à des fins domestiques de petite échelle (par exemple sur des toitures) ou à des fins de production énergétique industrielle à grande échelle (par exemple, la ferme solaire de Toul-Rosières en Lorraine).

Une cellule photovoltaïque traditionnelle doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer.

### - Limites

La technologie photovoltaïque est encore coûteuse même si son coût de production a fortement baissé au cours des dernières années (avec un coût de production de 70 à 90 \$/MWh dans certaines zones aujourd'hui, des installations photovoltaïques atteignent parfois localement une « parité de prix » avec des moyens « conventionnels » de production électrique).

Les panneaux photovoltaïques les plus répandus, faits de silicium cristallin, sont lourds, fragiles et difficiles à installer.

Une centrale requiert de vastes espaces bien que la densité tende à être améliorée.

L'impact environnemental et énergétique de la fabrication des panneaux de silicium n'est pas nul. Une cellule photovoltaïque doit fonctionner entre un an et demi et cinq ans pour compenser l'énergie utilisée pour la fabriquer.

L'énergie électrique n'est pas « directement » stockable, c'est-à-dire sous sa forme primaire. Il est en revanche possible de la stocker dans des batteries sous forme chimique ou dans des accumulateurs cinétiques sous forme mécanique.

Les technologies existantes sont encore coûteuses.

#### 1.4.1.3 L'énergie solaire thermodynamique

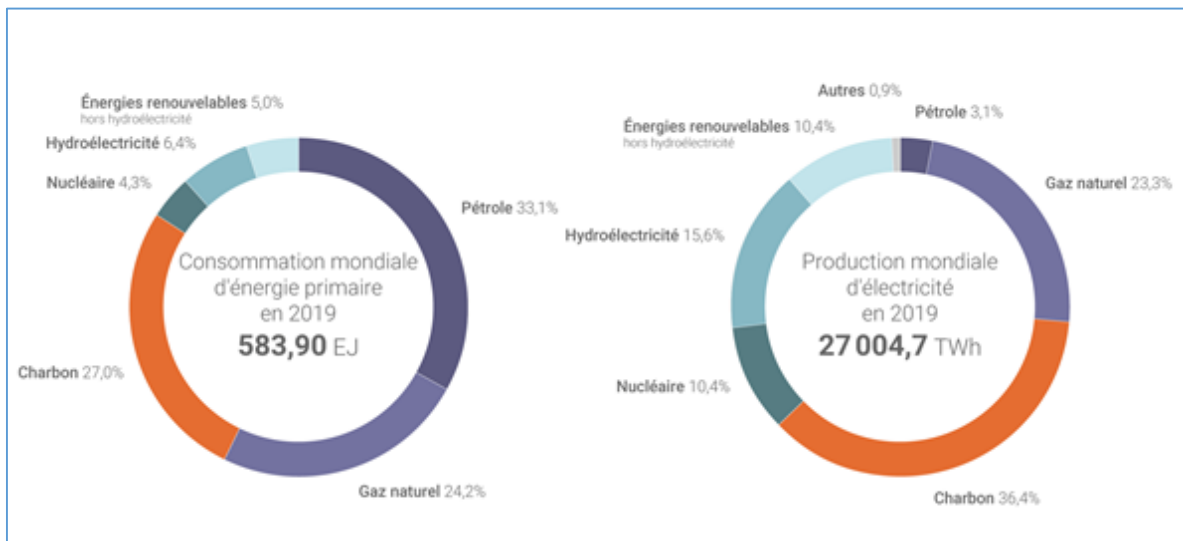
L'énergie solaire thermodynamique, quant à elle, est produite par des centrales solaires à concentration. Cet équipement est composé de miroirs avec des fluides caloporteurs et d'un générateur d'électricité solaire. Tout comme les panneaux solaires thermiques, ces miroirs transforment l'énergie apportée par le rayonnement solaire en chaleur, mais à une température considérablement plus élevée. Cette dernière peut, d'ailleurs, aller de 250 à 800° en fonction des techniques utilisées. La chaleur ainsi obtenue va, ensuite, être convertie en énergie électrique en activant le turbo-alternateur.

### 1.5 La demande énergétique

Les révolutions industrielles du 19<sup>e</sup> siècle consacrent l'avènement d'une forme d'énergie qui ne sera plus détrônée : l'énergie fossile. En l'occurrence, le charbon. Sa combustion ouvre la voie à une avancée technologique considérable : la conversion de l'énergie thermique (vapeur) en énergie mécanique. Sous sa forme solide (charbon) ou liquide (pétrole) ou gazeuse (gaz naturel), l'énergie fossile s'impose depuis près de 150 ans comme le ressort essentiel de l'économie et de la création de richesse. À l'époque des Trente Glorieuses, l'ensemble des énergies fossiles représente près de 95 % de la totalité de la demande d'énergie primaire dans le monde. Aujourd'hui, après deux chocs pétroliers, en 1973 et 1979, puis un troisième en 2008, les besoins énergétiques du monde, à plus de 11 milliards de tonnes équivalent pétrole, sont encore assurés pour plus de 80 % par un mix de pétrole, gaz et charbon auxquels on peut ajouter



la biomasse, cette dernière source d'énergie émettant également du carbone. Et leur combustion est à l'origine de deux tiers des quelque 40 milliards de tonnes de gaz à effet de serre émises chaque année dans le monde [18].



**Figure 1.24** : Demande et besoin énergétique mondiale.

Et demain ? Sommes-nous à l'aube d'une mutation radicale de nos pratiques de consommation ? Rien n'est moins sûr, répondent les experts, n'en déplaisent à une opinion publique assombrie par le péril environnemental ou l'épuisement annoncé des ressources énergétiques fossiles. En 2030, selon le scénario de référence des grandes agences internationales ayant autorité dans le domaine, nos besoins énergétiques, à 17 milliards de tonnes équivalent pétrole, auront augmenté de 50 % par rapport à aujourd'hui, et 80 % de cette demande sera toujours assurée par une offre d'énergies fossiles, tandis que les émissions de CO<sub>2</sub> résultant de leur combustion auront, quant à elles, progressé de plus de 45 %, alimentant les concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère bien au-delà du seuil fatidique des 550 ppm (parties par millions) où sont réunies toutes les conditions pour une élévation de la température du globe de 3 à 6°C à l'horizon de la fin du siècle [19]

En 2030, toujours selon la vision des grandes agences, le pétrole demeure la première source d'énergie dans le monde et satisfait 30 % des besoins. Il est rejoint à cette place par le charbon qui s'impose sur la période longue de 1980 à 2030 comme l'énergie soutenue par la plus forte croissance. Loin de constituer cette énergie obsolète à remiser dans les livres d'histoire aux côtés des premières luttes syndicales et des machines broyeuses d'hommes, le charbon, porté par l'abondance de ses réserves, sa distribution géographique idéale et ses faibles coûts d'extraction, est, sans conteste, le combustible de choix de la génération électrique. En 2030, un kWh sur deux sera produit à partir du charbon. Dans cette projection longue terme, le gaz,

quant à lui, naguère encore considéré comme l'énergie du XXI<sup>e</sup> siècle, ne se situe qu'à la troisième place avec une part un peu supérieure à 20 % du total.

Les énergies non fossiles, indispensables et déterminantes qu'elles soient dans le combat contre les changements climatiques, les grandes ressources non émettrices de carbone nucléaire ou renouvelable n'apporteront que des contributions limitées d'ici à 2030. Le nucléaire reste à 5 % et les renouvelables entre 1 et 4 % du total des productions d'énergie. Tant il est vrai que les hydrocarbures, ces concentrés d'énergie stockable, transportable et facilement mobilisable, garderont l'avantage sur le long terme.

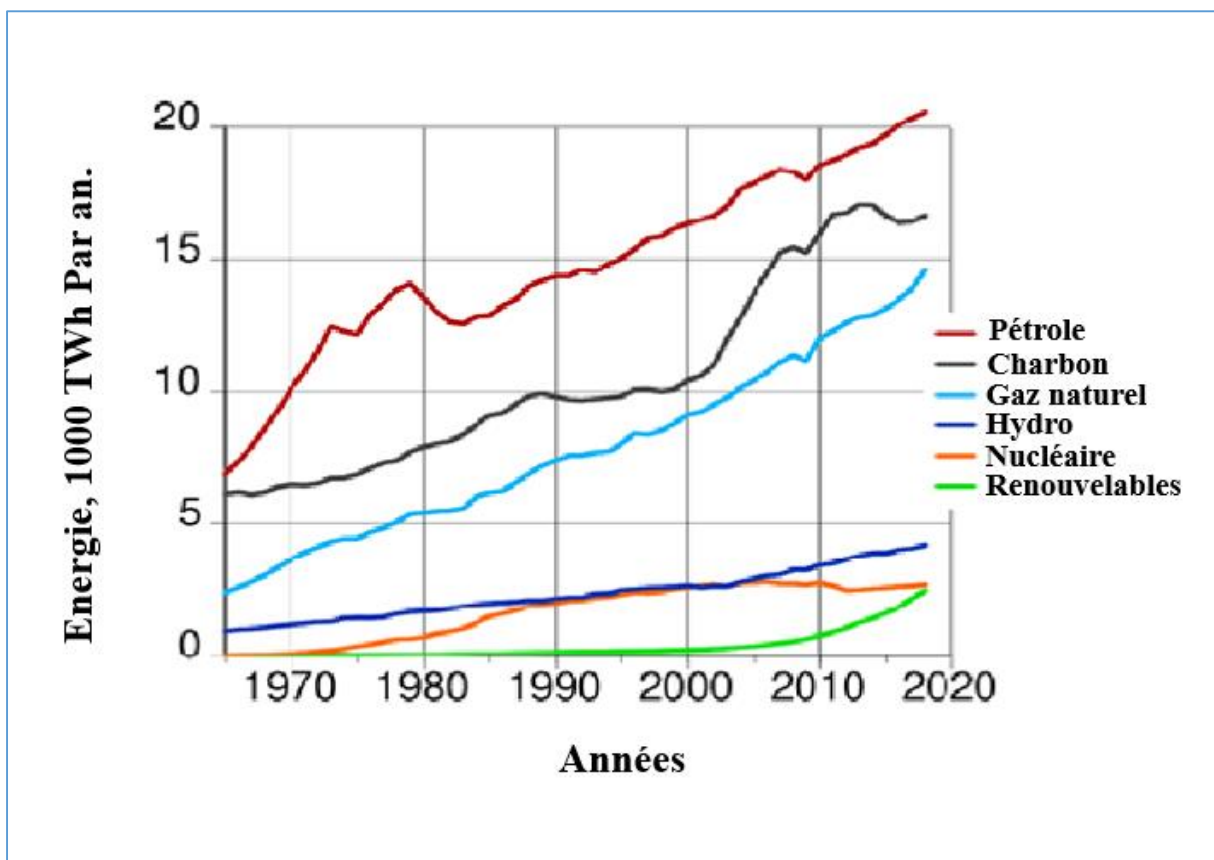
Prise dans son ensemble, la demande d'énergie primaire dans le monde s'est installée dans les années 1990 dans une croissance molle, de l'ordre de 1 % par an, qui a pu donner à penser, aux heures de gloire des valeurs technologiques et des médias, que l'industrie de l'énergie touchait à une fin de cycle. Au tournant du siècle, en revanche, la demande d'énergie s'enflamme pour atteindre un rythme de croissance qu'on ne connaissait plus de 3 % par an pour le monde entier et l'ensemble des sources, au point que les analystes se mettent alors à parler d'un changement de paradigme, voire d'une mutation de civilisation. Les anticipations sur la période 2006-2030 restent soutenues à 1,6 % par an : l'énergie sera bien une préoccupation majeure de cette première moitié de siècle. Plus frappant cependant est le fait que, sur cette même période, la demande des pays de la zone OCDE continue de croître mais au rythme ancien, voire plus faible encore, de 0,5 % par an. Ce chiffre traduit d'abord le succès des efforts entrepris sur la longue durée pour réduire l'intensité énergétique du monde développé mais aussi l'inexorable attrition du secteur manufacturier des économies matures. Pour la zone non-OCDE, la situation est tout autre. Sa demande énergétique explose (à 6 % par an) depuis le tournant du siècle. On la voit sur un rythme soutenu (à 2,4 % par an malgré la crise actuelle) sur toute la période 2006-2030. Les économies de la zone non-OCDE attirent à elles 90 % des productions d'énergie supplémentaire à compter de 2007. Les besoins globaux de l'Asie et du Moyen-Orient doublent sur la période alors que l'OCDE stagne. Ces grandes mutations de la demande énergétique reflètent en fait, comme on va le voir, un basculement plus général des pôles de puissance dans le monde [20].

Il est à ce point indispensable d'observer sur une durée longue (1980-2030) l'émergence d'une nouvelle géo-économie pour chaque grande source d'énergie : pétrole, gaz, charbon.

### **1.6 Consommation mondiales des énergies**

La consommation d'énergie finale dans le monde en 2017 était de 13 511,2 Mtep (millions de tonnes d'équivalent pétrole), marquant une augmentation de près de 2% par rapport à 2016, et de 40% depuis 2000. Malgré la trajectoire définie, les émissions sont donc reparties à la hausse.

Le charbon garde son rang de première source d'énergie dans le monde, avec 37% de la demande énergétique mondiale, et l'énergie nucléaire a augmenté sa part de 3% en 2017, représentant toujours 10% de l'énergie mondiale. Toutefois, la demande en énergies renouvelables augmente elle aussi, tirée par l'énergie éolienne, photovoltaïque, et hydroélectrique. Elles représentent un quart (25%) de la production mondiale d'électricité en 2017. En 2010, les énergies renouvelables représentaient 12,4 % dans la consommation brute d'énergie finale. Elles représentaient également 19,8 % de la production mondiale d'électricité. Rappelons que l'Europe a fixé l'objectif de 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie d'ici à 2020. Une trajectoire possible de réalisation étant donné le taux de croissance annuelle de 8 %



**Figure 1.25** : Consommation globale des énergies selon la source.

D'après l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), nous devrions passer de 82 % de la consommation d'énergie fossile aujourd'hui à 75 % d'ici 2040. C'est peu, et cela nécessite de la part des dirigeants mondiaux de se fixer un objectif bien plus ambitieux.

Le coronavirus (Covid-19) a provoqué la plus grande crise mondiale depuis des décennies, affectant les économies mondiales et leurs systèmes et sociétés, notamment sanitaire. Face à telle situation relancée des économies sont devenues un défi surtout énergétique, transport et

commerce. Il est encore trop tôt pour déterminer les impacts à plus long terme, mais le secteur de l'énergie qui sortira de cette crise sera sensiblement différent [21].

1.6.1 En Algérie

En Algérie le secteur économique énergétique domine littéralement l'économie Algérienne, les hydrocarbures à eux seuls représentent 60 % des recettes du budget et 98 % des recettes d'exportation. L'Algérie est en 2019 le 16e producteur de pétrole, le 10e producteur de gaz naturel et le 7e exportateur de gaz naturels au monde. La production et la consommation d'énergie, y compris dans le secteur de l'électricité, sont tirées des hydrocarbures à plus de 99 %. Cependant, l'État algérien commence à envisager des solutions écologiques en investissant dans les énergies renouvelables. Selon le Programme algérien de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique (PENREE) de 2012, l'Algérie visait une puissance installée d'origine renouvelable de 22 000 MW d'ici 2030. Mais sept ans après ce plan, les réalisations sont modestes : le solaire n'a produit que 0,7 % de l'électricité du pays en 2017, et l'éolien 0,01 %.

La figure suivante présente l'évolution de la production des énergies renouvelables avec les prédictions et les planifications avenir.

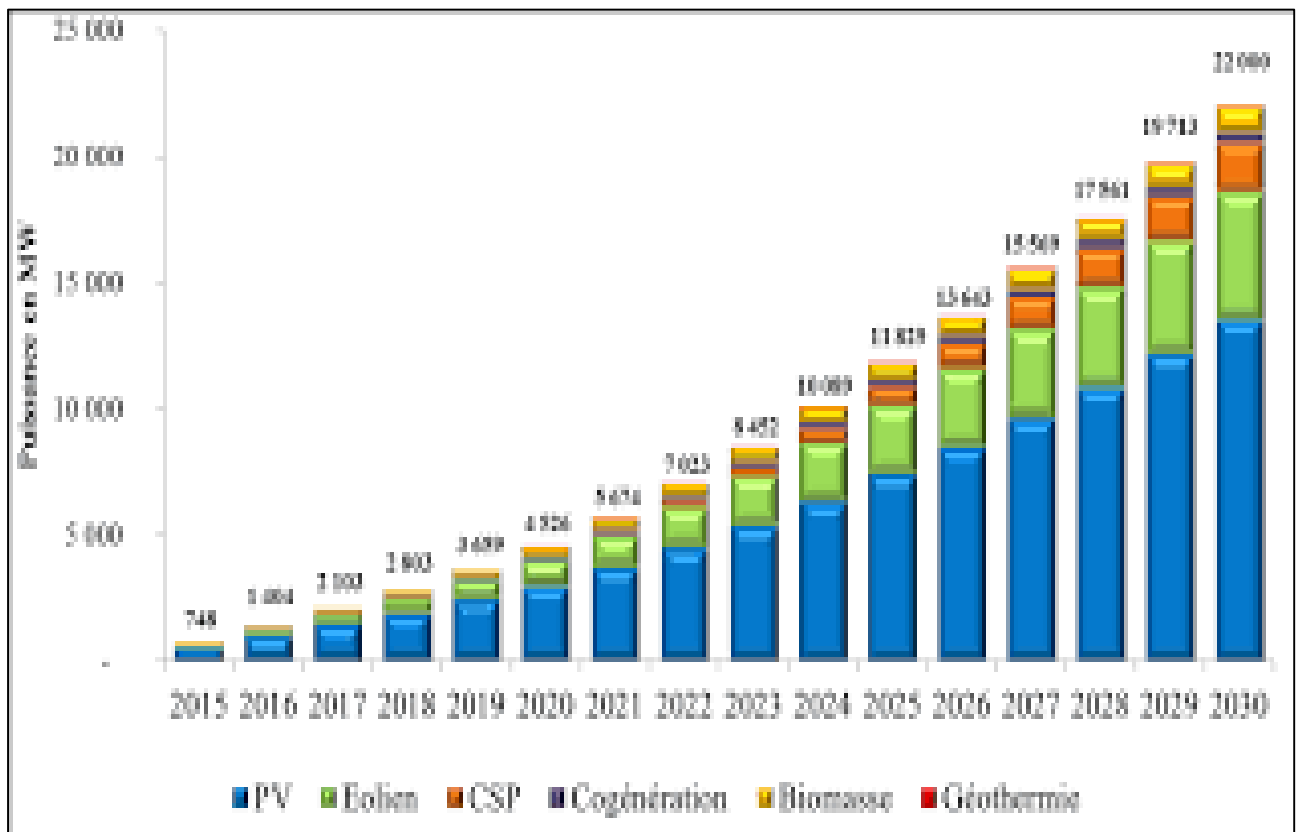
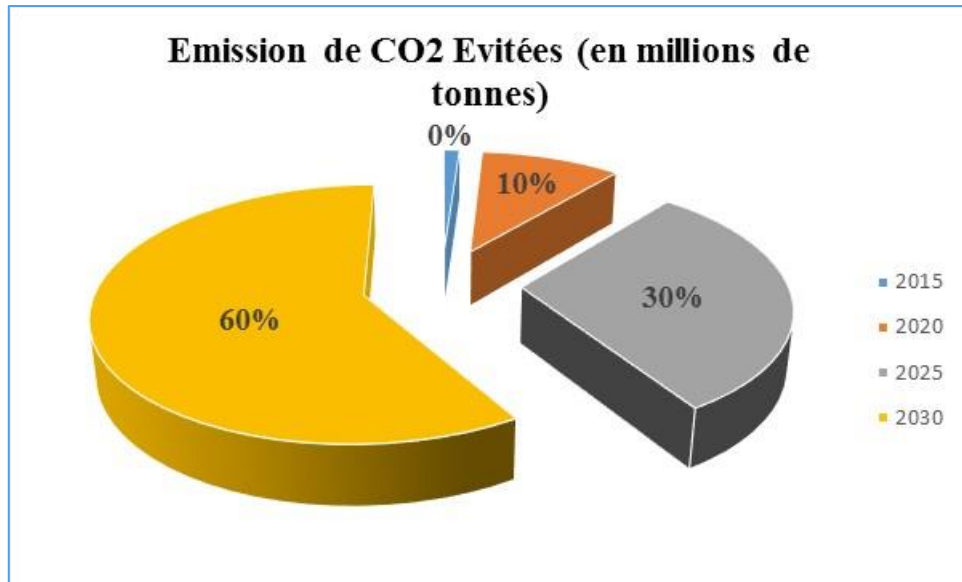


Figure 1.26 : L'évolution de la production des énergies renouvelables en Algérie.

Ecologiquement parlant la croissance de cette source d'énergie ne permet pas seulement l'approvisionnement mais aussi la réduction des émissions gazeuses nocifs et effet de serre

La figure suivante montre les statistiques des émissions de CO<sub>2</sub> (en tonnes) évités proportionnellement avec la croissance en utilisation des énergies alternatives dites renouvelables en Algérie [22].



**Figure 1.27** : Les statistiques des émissions de CO<sub>2</sub> évités (en tonne).

### 1.7 Conclusion

Vue la demande énergétique mondiale actuelle qui ne cesse d'accroître au fil de ces dernières années, et vue au contexte écologique qui est en constante dégradation (gaz à effet de serre, pollution, ...etc.), basculer vers des énergies dites plus propre et plus abondantes est devenue une nécessité plus, une urgence mondiale. Les énergies renouvelables en tous types sont une solution prometteuse, propre, disponible, utilisable sur plusieurs plans (chauffage, production d'électricité).

# **Chapitre 02**

## **Concentrateurs**

### **Solaire**

## 2.1 Introduction

L'objectif principal est de proposer un état de l'avancement de la recherche sur les différents éléments permettant le transfert de l'énergie solaire par un procédé thermodynamique afin de stocker une énergie dite électrique. Tout d'abord, les centrales solaires à concentration sont introduites avec une brève explication et un rappel des technologies actuelles. La liaison permettant de transférer l'énergie entre le champ solaire et le système de stockage est mise en place grâce à un fluide de transfert. L'huile végétale a été sélectionnée pour pallier le besoin croissant d'un nouveau fluide économiquement et environnementalement viable. Les huiles végétales, connues, maîtrisées dans l'alimentaire et depuis peu dans une utilisation en tant que biocarburant, font l'objet d'une présentation détaillée. Puis une partie plus spécifique aux procédés de stockage thermique et à la modélisation numérique est détaillée. L'intérêt de l'utilisation du stockage de l'énergie, les méthodes et les catégories du stockage d'énergie thermique sont porteurs. L'étude se focalise ensuite sur les différents aspects liés au stockage thermocline sur lit de roche qui constitue le cœur de travail réalisé tout au long des différentes parties de ce manuscrit. Cette partie développe le fonctionnement du système lors des phases de stockage et de restitution, mais aborde également les approches de modélisation en passant par une étude économique jusqu'au retour d'expériences. Le principe du stockage thermocline est basé sur l'utilisation d'un solide qui se substitue à une partie du fluide comme matériau de stockage. Le solide constitue donc un élément essentiel pour fiabiliser le système et doit répondre à un certain nombre d'exigences fortes qui se déclinent en termes de disponibilité, de coût, de mise en forme ... et différentes options sont envisageables. Ainsi la partie qui porte sur le matériau solide mis en œuvre dans le stockage est décomposée en deux sous-parties. La première concerne une identification des matériaux de stockage naturel susceptible d'être de bons candidats en tant que TESM. La deuxième étude introduit la nouvelle voie de valorisation des déchets industriels et des coproduits par le laboratoire CNRS PROMES. Le coproduit industriel sélectionné est présenté ainsi que son procédé sidérurgique. Une conclusion de l'état de l'art ainsi qu'une présentation des objectifs de recherche et de développement clôturent cette première partie.

## 2.2 Centrales solaires thermodynamiques à concentration

Une brève explication du fonctionnement des centrales solaires à concentration est réalisée. Elle est complétée par des indications sur l'ordre de grandeur de leurs performances globales et leurs limitations. Cette partie peut être complétée par les nombreux états de l'art et thèses disponibles dans la littérature. Comme le montre la Figure 1, une centrale solaire thermodynamique à concentration (CSP) [1] se compose de trois sous-systèmes principaux : un champ solaire

permettant la captation et la concentration du rayonnement, un absorbeur et un système de conversion de la chaleur en électricité. Dans les centrales actuelles, un système d'appoint et/ou un système de stockage est installé pour améliorer les performances et augmenter le facteur de capacité, c'est-à-dire sa durée annuelle de fonctionnement. L'absorbeur absorbe le rayonnement solaire concentré par les réflecteurs du champ solaire et le convertit en chaleur qui est transférée au fluide de transfert (HTF). Le HTF alimente en source chaude le système de conversion qui est le cycle thermodynamique. Le sous-système de stockage permet de compenser l'intermittence du flux solaire.



**Figure 2.1** : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration.

L'énergie solaire étant peu dense, il est donc nécessaire de la concentrer pour augmenter la densité de flux de photons sur une surface donnée afin d'atteindre des niveaux de températures assurant une production d'électricité à des rendements intéressants.

Actuellement, quatre types de centrales solaires thermodynamiques à concentration sont utilisés pour la production d'électricité. Chacun de ces procédés se distingue par sa géométrie, sa température d'utilisation, donc sa performance optique et thermique et ses coûts.

### **2.2.1 Les centrales cylindro-paraboliques**

Les centrales solaires de type cylindro-parabolique sont actuellement considérées comme la filière la plus mature et la plus pérenne et prometteuses des centrales CSP [2]. Depuis la première crise pétrolière dans les années 1970, le cylindro-parabolique a suscité un fort intérêt dans les milieux industriels et scientifiques. Ce type de centrale est composé d'alignements parallèles de longs miroirs réflecteurs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal. Le miroir réflecteur à une largeur d'ouverture d'environ 6 m et une longueur totale entre 100 et 150 m. Le rayonnement solaire est concentré sur un absorbeur tubulaire, situé sur



l'axe focal, dans lequel circule un HTF. Le facteur de concentration pour un récepteur cylindro-parabolique varie entre 70 et 80. Un exemple de centrale CSP utilisant des concentrateurs cylindro-parabolique est la centrale Nevada Solar One, visible sur la Figure 3.



**Figure 2.2 :** Schéma de principe d'un cylindro parabolique.

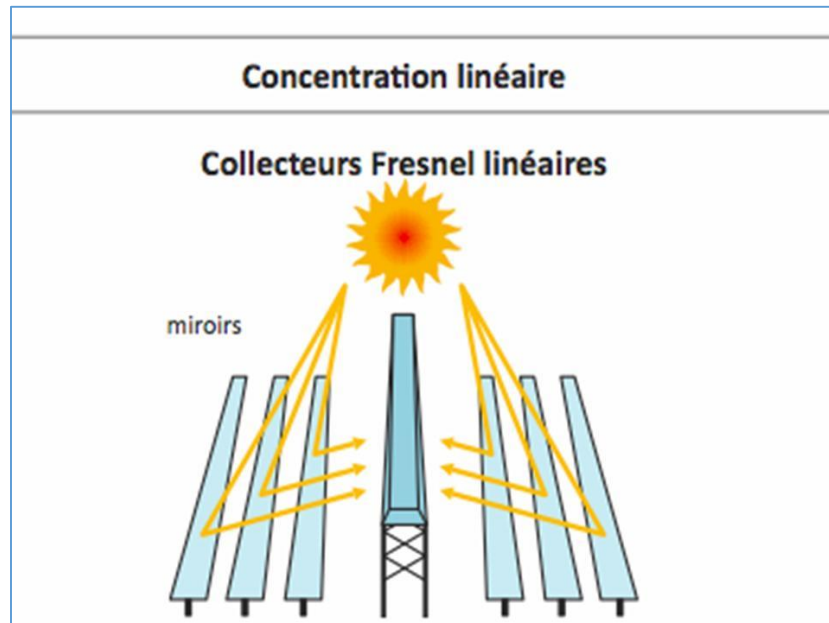


**Figure 2.3 :** Photo de la centrale CSP Nevada Solar One.

### 2.2.2 Les centrales linéaires Fresnel

Parmi les technologies de solaire thermodynamique, la technologie du linéaire de Fresnel semble la plus adaptée aux régions d'Afrique Sub saharienne. Cela en raison de la simplicité de la technologie [3] qui utilisent des miroirs plans pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur fixe situé au-dessus du champ solaire. Le récepteur est généralement composé d'un absorbeur et d'un réflecteur secondaire. Le réflecteur secondaire concentre le rayonnement qui n'atteint pas directement l'absorbeur. Il permet de réduire la surface de

l'absorbeur, ce qui diminue les pertes et apporte une homogénéité au flux collecté. L'absorbeur fixe peut être tubulaire, 10 multitubulaire ou correspondre à une surface plane. Contrairement à un absorbeur mobile, cette technologie limite les contraintes mécaniques et d'étanchéité en bout de ligne. Les miroirs plats ainsi que la structure métallique permettent une réduction des coûts par rapport aux réflecteurs paraboliques. La proximité au sol et la géométrie des miroirs réduisent les contraintes dues aux vents et facilitent le nettoyage.



**Figure 2.4** : Schéma de principe d'un linéaire Fresnel.



**Figure 2.5** : Photo de la centrale LFR.

### 2.2.3 Les centrales à tour

Les centrales à tour ont été développées pour des installations destinées à une production à grande échelle, développant de forte puissance et travaillant à haute température. Le principe de fonctionnement de la centrale est décrit sur la Figure 2.6. Ce type de centrale est composé d'un champ de réflecteurs à deux axes de suivi appelés d'héliostats [4] et d'un absorbeur placé au sommet d'une tour au centre du champ solaire. Les héliostats ont deux degrés de liberté (hauteur solaire et azimut) et redirigent les rayonnements solaires vers le foyer de l'absorbeur pendant toute la course du soleil. Un HTF circule dans l'absorbeur et emmagasine l'énergie thermique produite. Un des avantages majeurs d'un tel procédé est un facteur de concentration qui peut être compris entre 300 et 1000. Thémis, qui est actuellement utilisée comme plateforme d'essai. Thémis fut testée comme pilote pour la production d'électricité (2.5 MWe) par EDF et le CNRS de 1983 à 1986 figure 2.7.

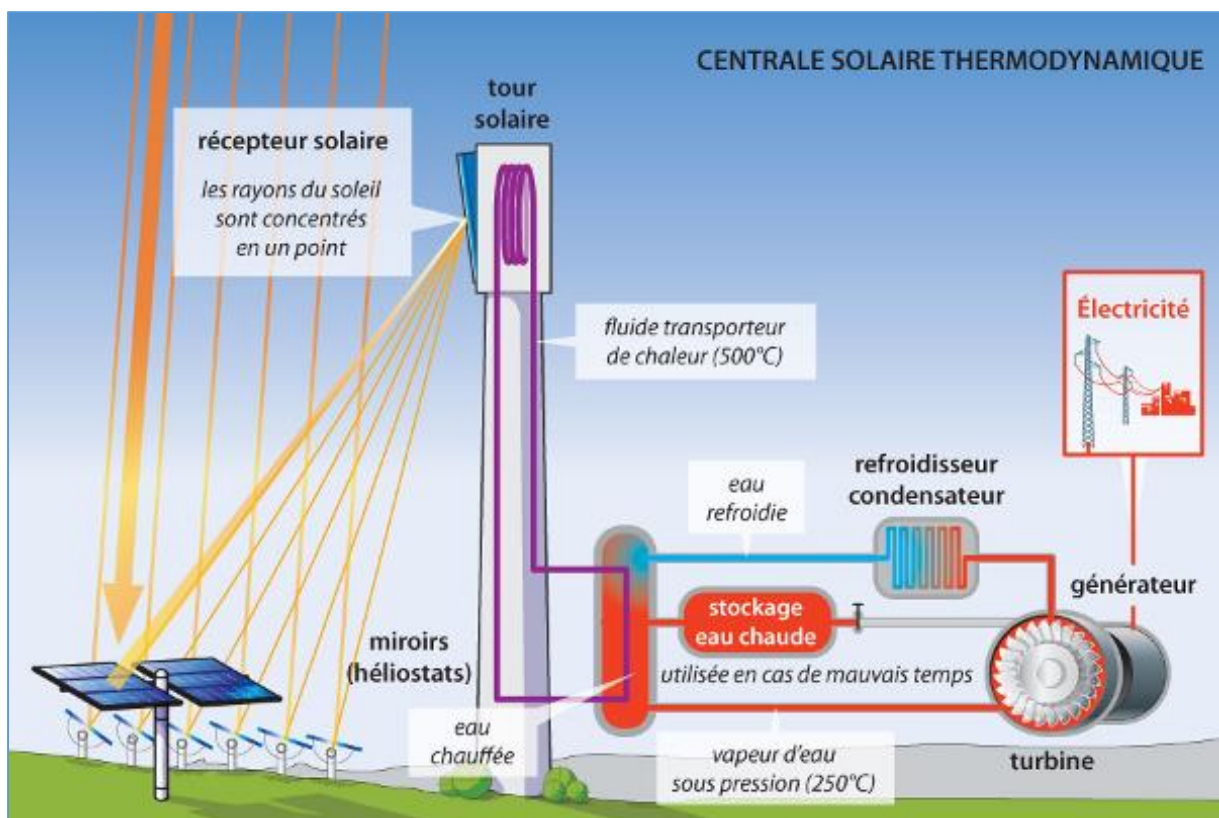


Figure 2.6 : Schéma de principe d'une centrale à tour.



**Figure 2.7** : Photo de la centrale Thémis.

### 2.3 Equation de la parabole

Une parabole est par définition l'ensemble des points situés à égale distance d'une droite fixe appelée directrice, et un point fixe F appelé foyer. L'intersection de la parabole et de son axe est le sommet qui est exactement intermédiaire entre le foyer et la directrice.

La méthode la plus simple pour tracer une parabole est d'utiliser la fonction donnée par l'équation suivante :

$$y = x^2$$

#### 2.3.1 Propriétés de la parabole

Pour toute parabole il existe une droite (d) et un point F (le foyer de la parabole) tel que, lorsque le point M se déplace sur la courbe :

les segments MF et MH sont toujours égaux

la bissectrice de l'angle HMF, c'est-à-dire la droite bleue sur la figure, est tangente à la courbe au point M (pour plus de lisibilité une moitié de l'angle HMF a été coloriée en vert et l'autre moitié en magenta, elles sont bien sûres identiques),

Mais la propriété la plus importante pour la réalisation du réflecteur parabolique d'une antenne est qu'un rayon partant du foyer F se réfléchit en M dans une direction MH parallèle à l'axe de la parabole.

Réciproquement, tous les rayons parallèles à l'axe de la parabole et interceptant l'intérieur de celle-ci seront concentrés au point F.

La parabole est la courbe qui, par rotation autour de son axe, décrit un "paraboloïde de révolution" [5].

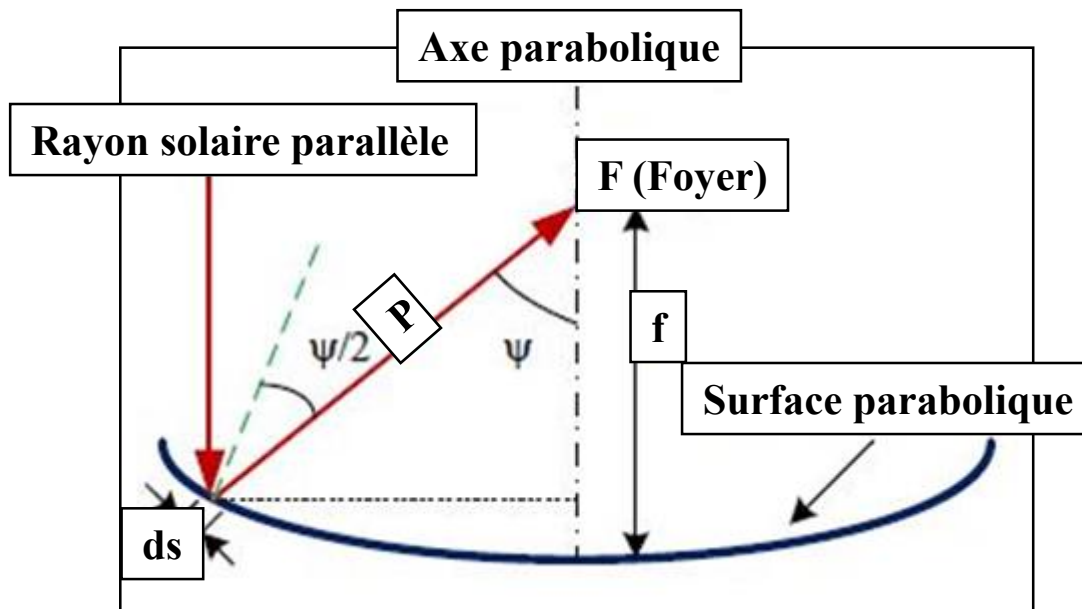


Figure 2.8 : Schéma descriptif d'une parabole

### 2.3.2 La distance focale

La distance focale  $f$  d'une parabole est le segment OF reliant le "fond" du réflecteur au foyer F. Elle peut être facilement retrouvée à l'aide de la formule :

$$f = \frac{D^2}{16 \cdot c}$$

où :

D : diamètre du paraboloïde

C : profondeur

On peut mesurer  $c$  en posant une règle sur le réflecteur et en mesurant la flèche entre le point O, centre du réflecteur, et le dessous de la règle

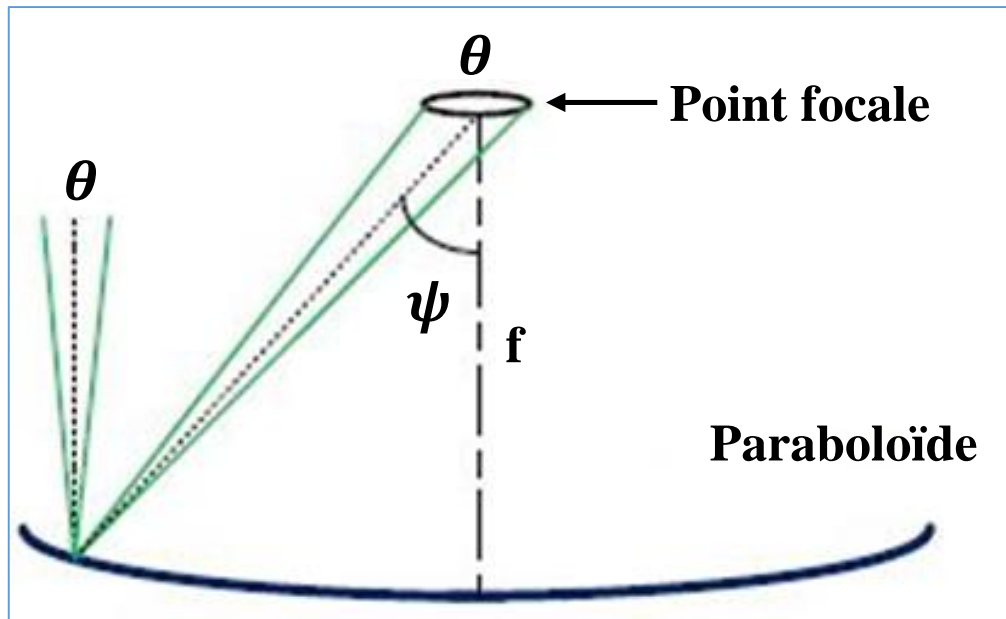
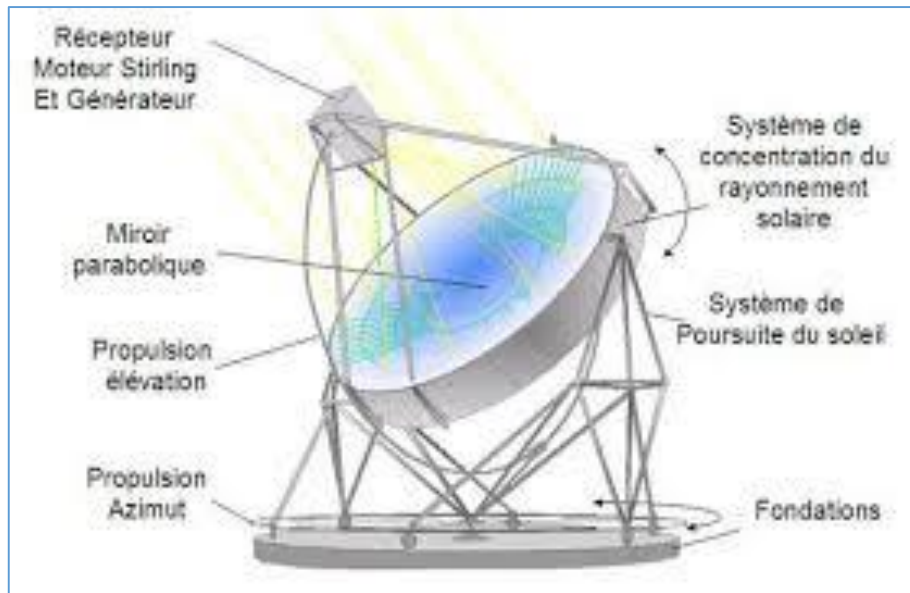


Figure 2.9 : Schéma descriptif du point focal d'une parabole

#### 2.4 Les centrales à concentrateur parabolique

Un concentrateur parabolique est constitué d'un réflecteur de forme parabolique qui réfléchit le rayonnement solaire sur un récepteur monté sur le point focal. Les composants du système sont présentés sur la Figure 9. La concentration parabolique permet d'atteindre les facteurs de concentration les plus élevés, de 1000 à 3000, et les températures de fonctionnement peuvent atteindre 1500°C. Cependant, la température est limitée par le moteur, de 700°C à 850°C [6], selon les moteurs thermiques, qui se trouvent au point focal de la parabole. Ces concentrateurs sont montés sur une structure avec un système de poursuite ayant deux degrés de liberté. Le flux collecté est généralement utilisé directement par un moteur thermique monté sur le récepteur se déplaçant avec la structure de la parabole. Le cycle de Stirling est généralement utilisé pour la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique.



**Figure 2.10** : Schéma de principe d'une centrale à concentrateur parabolique.



**Figure 2.11** : Photo de la parabole d'Odeillo.

#### 2.4.1 Réflecteur (miroirs)

Généralement les réflecteurs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmittivité atteint 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident.

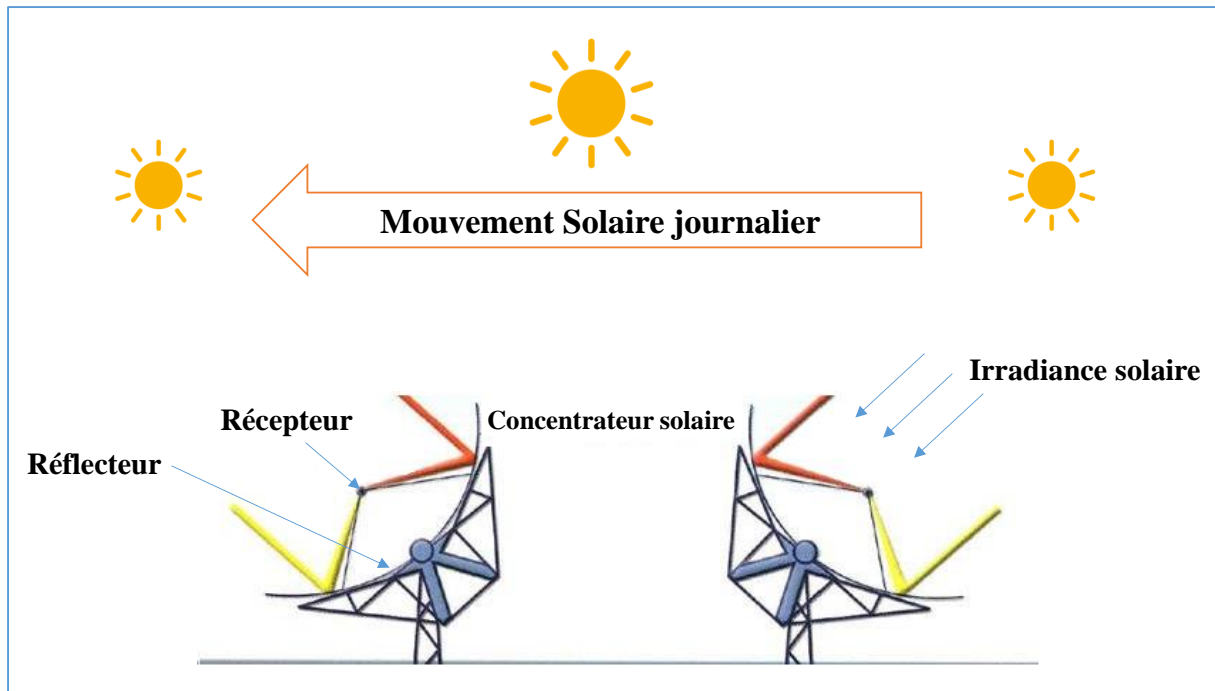


**Figure 2.12** : Réflecteur Parabolique.

### 2.4.2 Mécanisme de poursuite

Ce mécanisme a pour le rôle d'adapter l'inclinaison du capteur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au réflecteur [7.8]. De cette manière, la radiation est réfléchi au foyer de la parabole et concentrée sur un tube récepteur dans lequel circule le fluide caloporteur [9]. Le suivi permet de minimiser l'angle entre la lumière du soleil et la surface du collecteur afin d'augmenter la quantité d'énergie produite. Le concentrateur a deux degrés de liberté (élévation et azimut) pour suivre efficacement le soleil [10].





**Figure 2.13** : Description du système de poursuite.

### 2.4.3 Le collecteur (l'absorbeur)

Doit avoir les caractéristiques suivantes :

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

### 2.4.4 Les fluides caloporteurs

Le fluide caloporteur assure le transport et l'accumulation de l'énergie captée au niveau du collecteur est le plus souvent une variété d'huile et l'eau [11]. L'eau comme simple caloporteur montre ses limites : température peu élevée, échangeur évaporateur pour produire la vapeur. Les huiles avec une température optimale qui est de l'ordre de 400 °C. Lors de l'écoulement dans le circuit de transfert extérieur, la chaleur du fluide réchauffe la vapeur d'un générateur à turbine standard.

## 2.5 Les cycles de conversion énergétique

### 2.5.1 Cycle de Hirn-Rankine

Le cycle de Rankine est un cycle endoréversible<sup>1</sup>, c'est-à-dire que les seules irréversibilités proviennent des échanges, ici de chaleur, avec l'extérieur. Au contraire, les transformations dites fermées sont considérées comme réversibles [12].

Le cycle, parcouru dans le sens moteur, est composé des quatre transformations suivantes :

1→2 : Compression adiabatique et réversible (isentropique).

2→3 : Vaporisation isobare et irréversible.

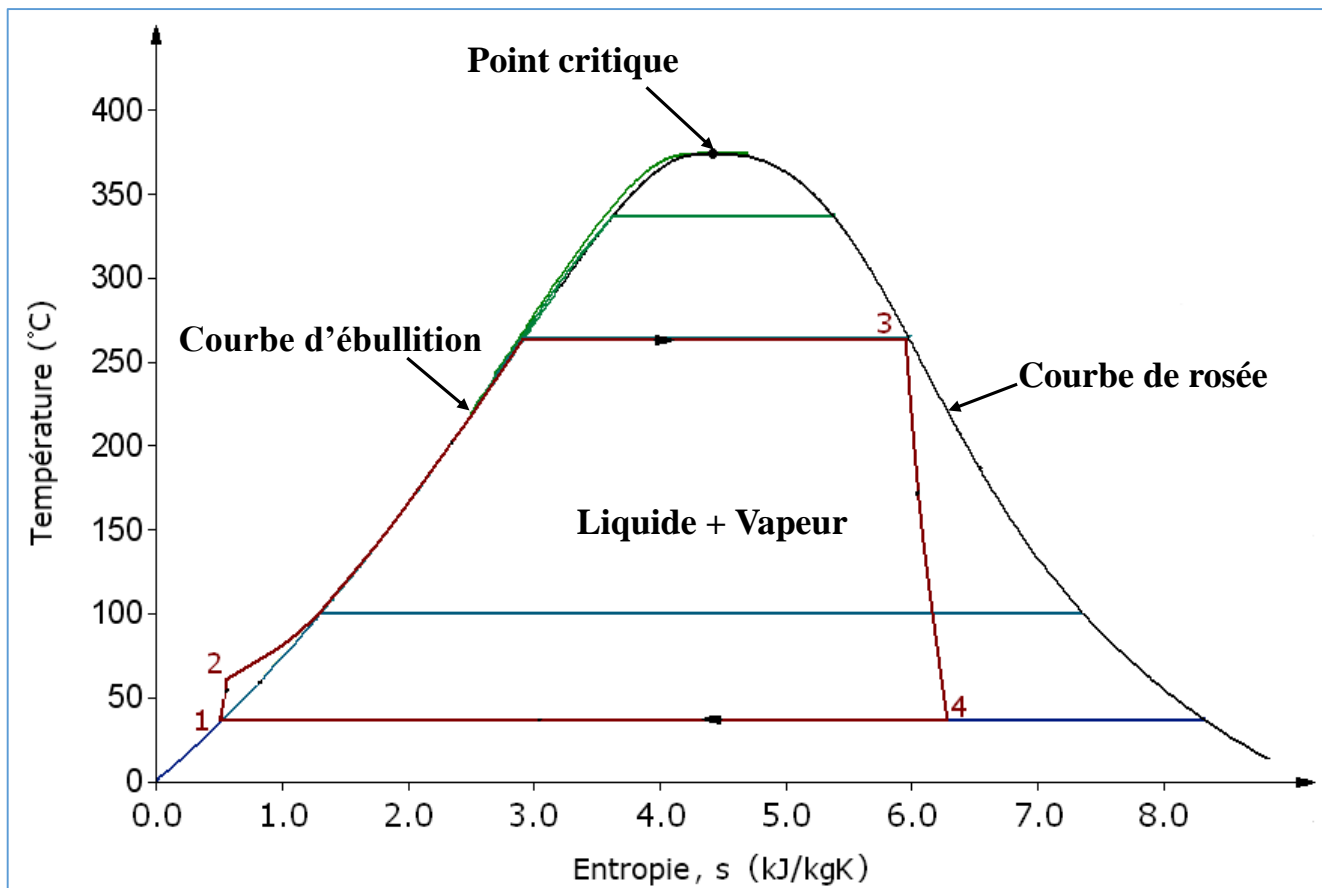
3→4 : Détente adiabatique et réversible (isentropique).

4→1 : Liquéfaction isobare et irréversible.

Le cycle d'Hirn (ou cycle de Rankine avec surchauffe) utilise un fluide condensable (l'eau dans la grande majorité des applications), qui est totalement condensé à l'état liquide en :

- Le travail de compression est négligeable devant le travail de détente, bien que le rapport de compression soit important. La compression peut être considérée comme adiabatique.
- Le liquide sous pression est vaporisé et surchauffé dans la chaudière. On peut considérer ce chauffage comme isobare en première approximation.
- La vapeur surchauffée se détend dans une turbine axiale multi-étagée, de manière pratiquement adiabatique. On observe toujours en fin de détente une condensation partielle, qui doit rester limitée pour ne pas endommager les aubages des derniers étages.
- Le fluide est refroidi pour être totalement condensé dans un condenseur, à pression constante.

Les états diphasiques dans le concentrateur et le condenseur sont très favorables aux échanges de chaleur.



**Figure 2.14** : Diagramme descriptif du cycle de Rankine-Hirn.

### 2.5.2 Cycle de Stirling

Le cycle de Stirling est un cycle thermodynamique réversible, ce qui signifie que si un travail mécanique est fourni, il peut fonctionner comme une pompe à chaleur et fournir de la chaleur ou du froid. Le cycle est fermé. Cela signifie que le fluide travaillant est toujours dans la machine thermodynamique [13].

Le diagramme pression-volume (ou diagramme (P, V) représente les 4 phases du moteur Stirling. Plus précisément, il exprime la pression du gaz (sur l'axe des ordonnées) en fonction du volume occupé par ce même gaz (sur l'axe des abscisses).

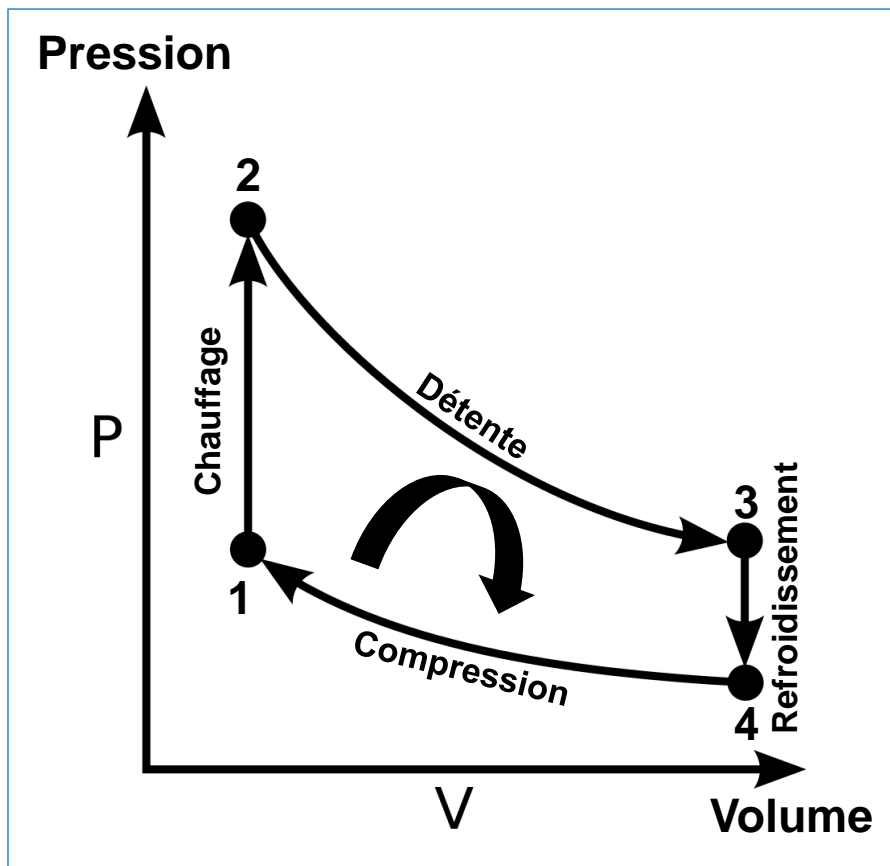


Figure 2.15 : Diagramme descriptif du cycle de Stirling.

1. Un chauffage isochore (à volume constant) ( $1 \rightarrow 2$ ) :

Le brûleur (la source chaude) cède de l'énergie thermique, causant la hausse de la pression et la température du gaz.

2. Une détente isotherme (à température constante) ( $2 \rightarrow 3$ ) :

Le volume s'accroît alors que la pression diminue mais la température reste constante. C'est pendant cette transformation que l'énergie motrice est produite.

3. Un refroidissement isochore ( $3 \rightarrow 4$ ) :

L'eau projetée (la source froide) récupère de l'énergie thermique. La température et la pression diminuent pendant cette phase.

4. Une compression isotherme ( $4 \rightarrow 1$ ) :

La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue. On doit fournir de l'énergie mécanique au gaz pendant cette période.

### 2.5.3 Moteur Stirling

Le moteur Stirling est un moteur à énergie externe. Le fluide principal est un gaz soumis à un cycle comprenant 4 phases : chauffage isochore (à volume constant), détente isotherme (à

température constante), refroidissement isochore puis compression isotherme. On l'appelait au début moteur à air chaud, mais il existe un autre moteur à air chaud.

### 2.5.3.1 Principe de fonctionnement

Le principe est relativement simple : le fluide principal qui produit un travail est un gaz (air, hydrogène ou hélium) à une modeste pression et est soumis à un cycle de Carnot à 4 temps, séparé par deux phases de déplacement : chauffage, détente, déplacement vers la source froide, refroidissement, compression, retour vers la source chaude.

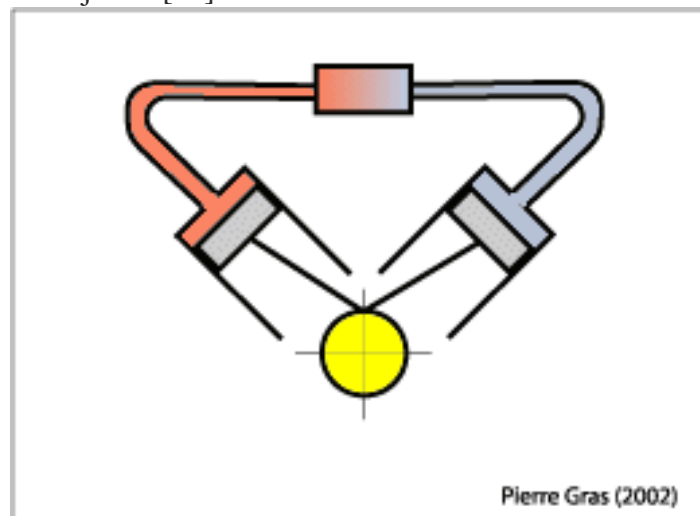
### 2.5.3.2 Alimentation

La source chaude du moteur peut être alimentée par une source quelconque : combustion externe de dérivées du pétrole, le gaz naturel, le charbon, le bois, etc. mais aussi énergies renouvelables comme l'énergie solaire ou l'énergie géothermique.

### 2.5.3.3 Type de moteur Stirling

#### 2.5.3.3.1 Stirling alpha

Contient deux pistons de puissance séparés, un piston " chaud ", et un piston " froid ". Le piston chaud est situé près de l'échangeur à la plus haute température, et le piston froid, est situé près du point d'échange de température la plus basse. Ce type de moteur a un ratio puissance volume très élevé, mais a des problèmes techniques, liés (fréquemment) aux températures trop élevées du piston chaud pour ses joints [13].

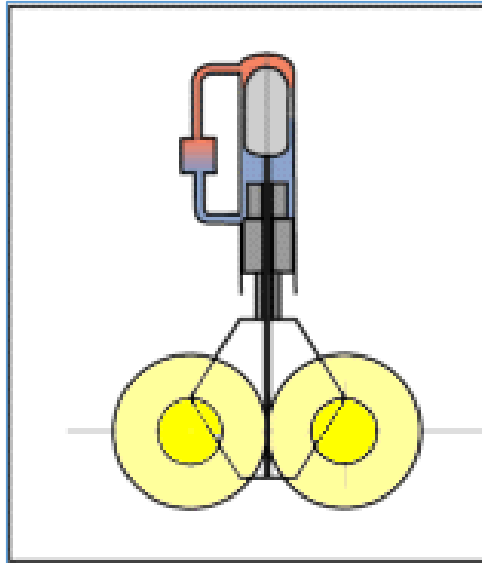


**Figure 2.16** : Coupe d'un moteur Stirling de type alpha.

#### 2.5.3.3.2 Stirling bêta

Contient un simple piston de puissance placée co axialement avec un piston de " déplacement ". Le piston de déplacement sert uniquement à propulser le gaz de l'échangeur de température chaude, vers l'échangeur de température froide. Sur un cycle complet, ce piston ne consomme pas d'énergie. Ce moteur ne requiert pas de " joint " mobile dans la partie chaude du moteur, et peut

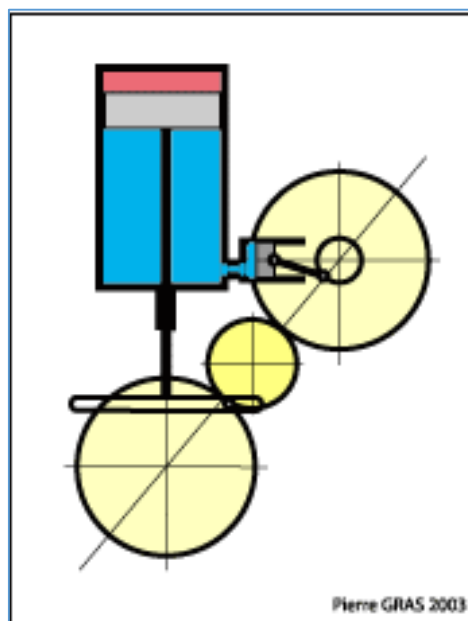
atteindre des rendements élevés de compression, grâce aux pistons qui sont capables de se chevaucher pendant leur déplacement. Il est à noter que des petits moteurs Stirling ont été développés sans piston [13]



**Figure 2.17** : Coupe d'un moteur Stirling de type beta.

#### 2.5.3.3 Stirling gamma

Le Stirling gamma est un Stirling bêta, sur lequel le piston de puissance, n'est pas monté coaxialement avec le piston de déplacement. Cette configuration produit un rapport de compression plus faible, mais est généralement plus simple mécaniquement, et est souvent utilisée dans les moteurs Stirling à plusieurs cylindres [13].



**Figure 2.18** : Coupe d'un moteur Stirling de type gamma.

### 2.5.4 Cycle d'Ericsson

Ce cycle est composé de deux transformations isothermes (échange de chaleur avec l'extérieur) et deux transformations isobares. Il est dans la pratique complexe à mettre en œuvre car les échanges au sein de la paroi du cylindre lors de la détente et de la compression doivent être importants afin de garantir une transformation isotherme. Pour cette raison, les moteurs Ericsson, comprenant un récupérateur, suivent souvent un cycle de Joule (avec une détente et une recompression isentropiques). Ce type de moteur possède des soupapes d'échappement et d'admission [14].

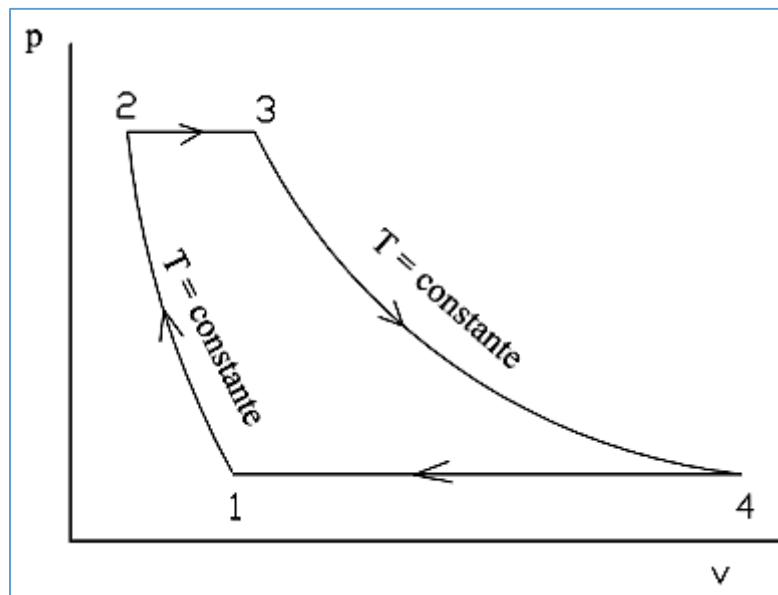


Figure 2.19 : Diagramme descriptif du cycle d'Ericsson.

### 2.5.5 Cycle de Brayton-Joule

Aussi connu sous le nom de cycle de Joule, dans le cycle de Brayton, le gaz est soumis à une compression et une détente isentropiques et à un chauffage et un refroidissement isobares. Il existe deux types de cycles : ouvert ou fermé. Dans le cycle ouvert, les gaz émanant de la combustion sont directement utilisés comme fluides de travail qui entraînent un expandeur (souvent une turbine à gaz). Dans le cycle fermé, un échangeur de chaleur est nécessaire. Les diagrammes température/entropie et pression/enthalpie sont présentés figure 2.20 Une description détaillée du cycle est fournie par Cengel. Les exemples de turbines à gaz chauds sont peu nombreux en microcogénération car ce type de turbine n'est pas adapté à des puissances inférieures à 100 kWe pour des raisons de rendement, de coût et d'inflexibilité à des variations de charge. Cependant, elles présentent l'avantage d'être compactes et silencieuses. Il existe un modèle de microturbine fabriqué par la société MTT B.V. produisant environ 3 kWe et 15 kWt à partir de gaz ou de fioul. Onovwiava présente d'autres modèles allant d'une

puissance électrique de 25 à 80 kW. Singh présente une étude théorique sur la dynamique du couplage d'un cycle de Brayton supercritique au dioxyde de carbone et d'un champ solaire cylindro-parabolique [14].

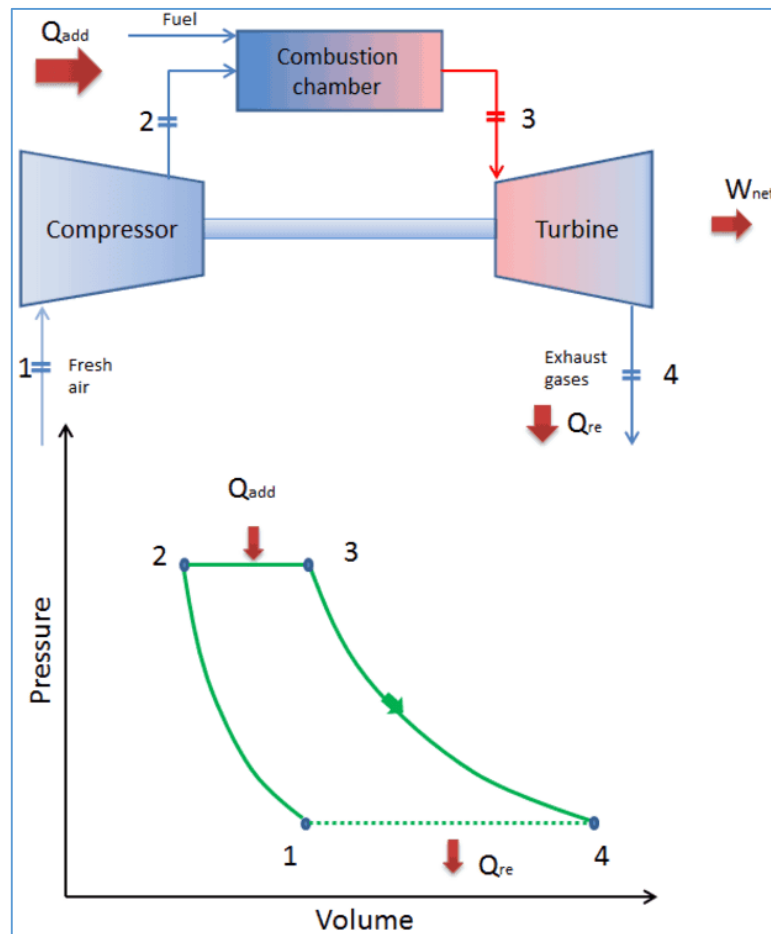


Figure 2.20 : Diagramme descriptif du cycle de Joule-Brayton.

## 2.6 Comparaisons des différentes centrales solaires à concentration

Les quatre principaux types de centrales solaires à concentration sont énumérés ci-dessous :

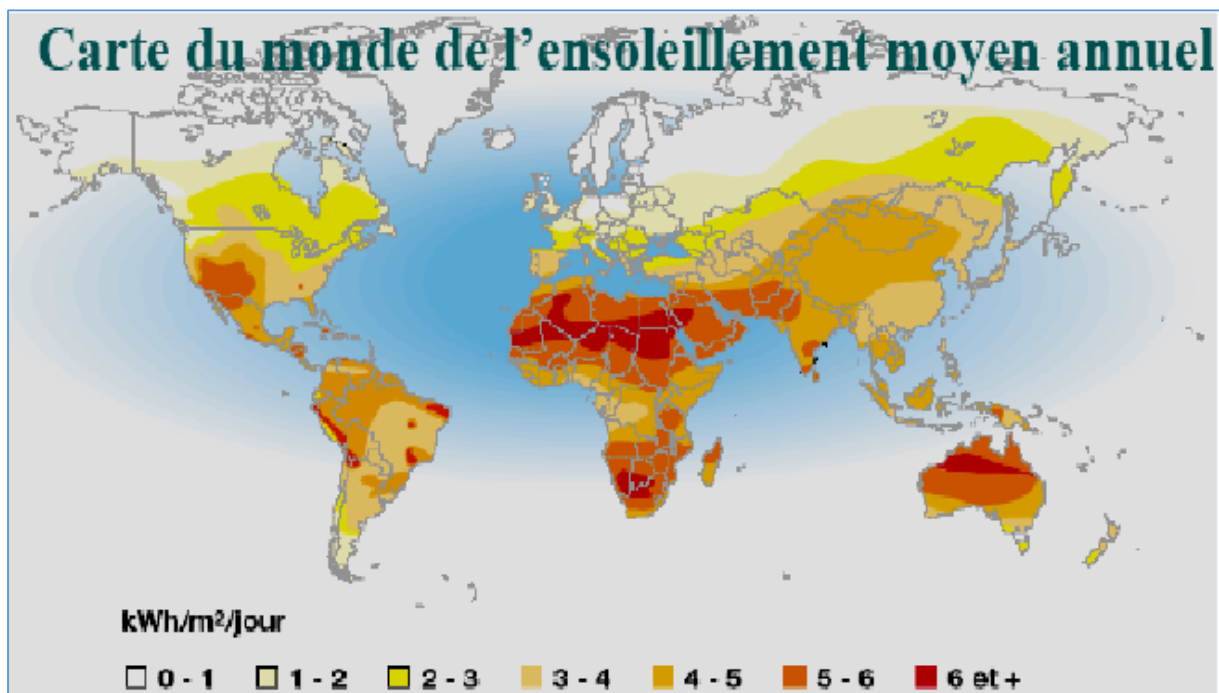
On distingue les concentrateurs ponctuels, c'est-à-dire deux degrés de liberté (hauteur solaire et azimut) et les concentrateurs linéaires avec un degré de liberté. Les centrales à concentrateur parabolique et les centrales à tour sont des concentrateurs ponctuels. Les centrales cylindro-paraboliques et les centrales LFR sont des concentrateurs linéaires [15].

## 2.7 Limitations des procédés solaires

La Figure 2.21 illustre l'ensoleillement direct annuel reçu sur la surface du globe terrestre. Une très forte disparité est visible entre les pôles et la ceinture solaire. La ceinture représente les lieux où l'ensoleillement direct annuel est supérieur à  $2000 \text{ kWh m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ . Mais quelle que soit la situation géographique, l'énergie solaire possède les caractéristiques inhérentes à sa nature même : l'intermittence de la disponibilité, la discontinuité et une faible densité énergétique. Les



intermittences peuvent être prévisibles (fluctuations journalières ou saisonnières) et non prévisibles (nuage ...). La demande peut ainsi être en opposition de phase avec la période de forte disponibilité. De plus, l'utilisation d'une source d'énergie est de fait d'autant plus facile que celle-ci est dense et régulière. Ces problèmes qui se retrouvent dans les principaux types d'énergies renouvelables constituent les handicaps de ces sources d'énergie primaire par rapport aux énergies fossiles.



**Figure 2.21** : Ensoleillement direct annuel mondial en kWh m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> [16].

L'hybridation des centrales peut être une solution [17], un appoint de combustible permet de compenser la diminution ou l'absence de rayonnement solaire. Habituellement, le combustible utilisé est du gaz, du pétrole ou du charbon. Cette solution, à long terme, n'est pas optimale lorsque le but est de produire une énergie propre et décarbonée uniquement à l'aide d'énergie renouvelable. Des centrales solaires avec un système hybride – biomasse voient le jour, comme la centrale Termosolar Borges en Espagne. La variabilité de la ressource induit un besoin de stockage d'énergie performant lorsque l'on désire développer des technologies telles que les centrales CSP basées sur l'utilisation directe de l'énergie solaire. Les centrales solaires thermodynamiques à concentration utilisent le stockage d'énergie thermique. Il est reconnu comme facile d'utilisation et combine de hauts rendements, de grandes capacités de stockage et un relatif faible coût.

### **2.8 Conclusion**

La technologie de concentration est de plus en plus utilisée en raison de grands résultats dans la production électrique et thermique. Actuellement, il est utilisé par les centrales solaires les plus puissantes au monde. Vu le potentiel énergétique solaire de l'Algérie, la conversion de l'énergie par voie de concentration est très prometteuse. Dans notre travail de thèse, le choix est tombé sur l'utilisation d'un concentrateur solaire parabolique.

# **Chapitre 03**

## **Modélisation et les outils d'optimisation**

### 3.1 Introduction

La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender. Il peut s'agir d'un système mathématique ou physique. Le modèle sera alors numérique ou analogique. Celle numérique consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique, et l'analogique consiste à construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier. L'observation du comportement du modèle permet de tirer des enseignements sur le phénomène d'intérêt.

En ingénierie, des systèmes complexes sont élaborés, exigeant une modélisation mathématique précise. L'avènement des calculateurs a rendu possible l'analyse de tels systèmes, tout en faisant craquer les cadres anciens du calcul des variations.

La modélisation mathématique suppose que l'on définisse a priori l'ensemble de toutes les décisions possibles, tandis que le concept d'optimisation s'agit de prendre la meilleure décision possible compte tenu de contraintes imposées du dehors.

L'irradiation solaire annuelle reçue sur la surface terrestre annuellement plafonne à (754 millions de TWh). Sur le long terme (environ 50 ans), la consommation mondiale d'énergie pourrait pratiquement être couverte par le potentiel extractible des différentes sources d'énergie renouvelable: la photosynthèse au premier rond avec 6 Gtep (70 000 TWh), puis avec 1,7 Gtep (20 000 TWh), la grande hydraulique de 14 à 20 000 TWh, dont le potentiel théorique mondial est d'environ 40 000 TWh, le solaire installé sur les toits des structures industriels, commerciaux, tertiaires et domestique 0.25 Gtep (2 900 TWh), enfin la géothermie des couches profondes 0.2 Gtep (2 300 TWh).

### 3.2 Repérage et mesures d'ensoleillement

#### 3.2.1 Repérage du soleil dans le ciel

La hauteur du soleil est une donnée facultative car :

- Cette hauteur contribue essentiellement dans les calculs énergétiques.
- L'installation dans un site donné exige une étude des effets en relation directe à l'environnement.

##### 3.2.1.1 Longitude $\lambda$

La localisation d'un point sur n'importe quel emplacement terrestre nécessite deux coordonnées angulaires : la latitude  $\varphi$  et la longitude  $\lambda$ . C'est la mesure de l'angle entre le méridien du lieu

et le méridien origine des longitudes (Greenwich en Angleterre). Les régions situées à l'Est sont prises le signe +. Le grand arc de cercle qui joint le pôle Nord, Greenwich et le pôle Sud s'appelle méridien originer. Il y a 23 méridiens séparés de  $15^\circ$  qui donnent lieu aux 24 fuseaux horaires.

La fixation de la ligne de modification de date est sur le méridien n° 12 au beau milieu du Pacifique. Quand il est midi le jour J à Greenwich, il est minuit du même jour sur la bordure Ouest de la ligne de changement de date et minuit du jour J-1 sur bordure Est. Pour le comprendre, il suffit de montrer mentalement la projection cylindrique de la sphère terrestre [1].

### 3.2.1.2 Latitude $\varphi$

La latitude  $\varphi$  permet de localiser la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle change de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  au pôle Nord [1].

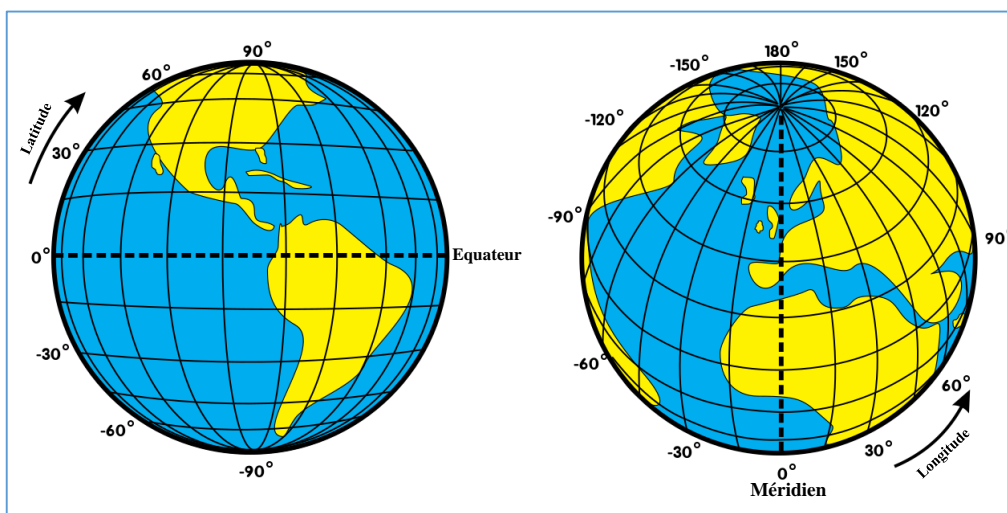


Figure 3.1 : Description de la longitude et latitude.

### 3.2.1.3 Déclinaison solaire $\delta$

La déclinaison solaire  $\delta$  est un angle formé de la direction solaire et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons [1].

Equinoxe de printemps : 21 Mars

$$\delta = 0$$

Solstice d'été : 22 Juin

$$\delta = +23^\circ 27'$$

Equinoxe d'automne : 23 Septembre

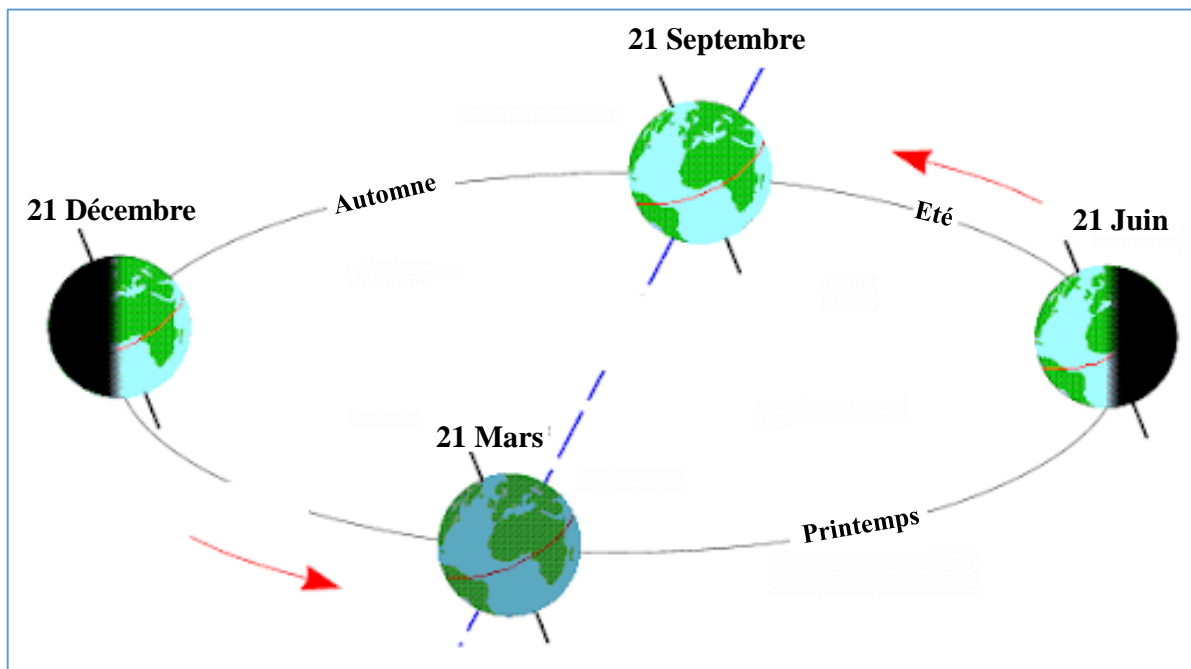
$$\delta = 0$$

Solstice d'hiver : 22 Décembre

$$\delta = -23^\circ 27'$$

Approche maximale : Périhélie 2 Janvier

Approche minimale : Aphélie 2 Juillet



**Figure 3.2 :** Mouvement et rotation terrestre.

Entre ces 4 points remarquables,  $\delta$  prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation :

$$\delta = 0,4 \sin t \tag{3.1}$$

Avec :  $t = N \frac{360}{365}$

N : nombre de jours écoulés depuis l'équinoxe de printemps.

Ou par la relation

$$\delta = 23,45 \left( \frac{284+n}{365} \right) \tag{3.2}$$

Avec n nombre de jours écoulés depuis le 1er Janvier.

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale sa variation est brusque à proximité des équinoxes (0.4 °/ jour) contrairement aux périodes des solstices d'été et d'hiver dans lesquels elle soit presque stationnaire.

### 3.2.1.4 Angle horaire $\omega$ (ou AH)

Le calcul de angle horaire  $\omega$  (noté AH solaire) est donné par la rotation journalière de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu exprimé en ° d'angle exprimé par l'équation :

$$\omega = 15(TSV - 12) \tag{3.3}$$

TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures [1].

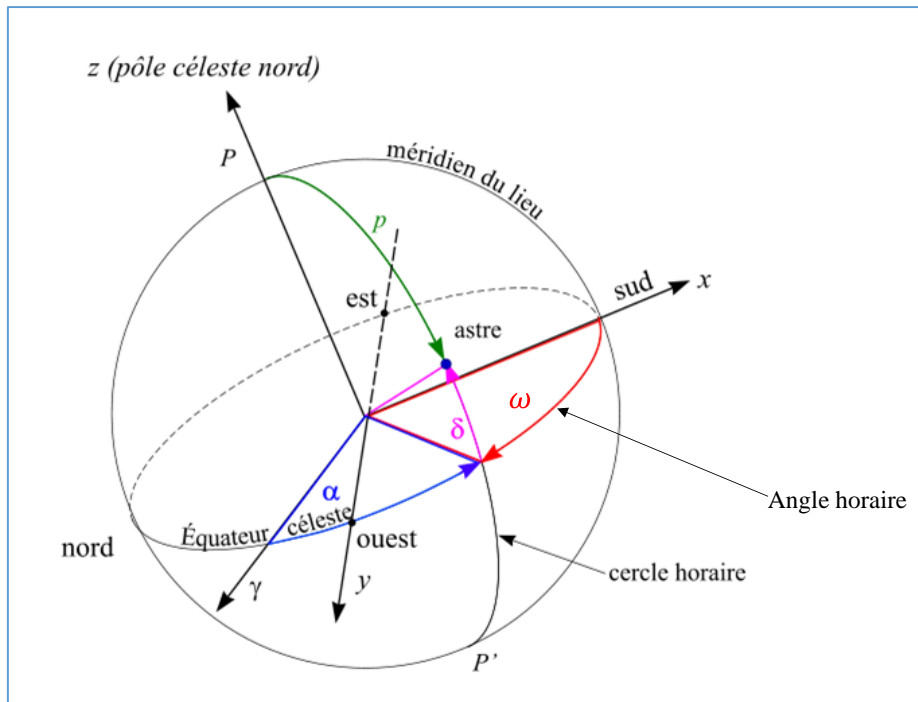


Figure 3.3 : Angle Horaire

A chaque heure qui s'écoule l'angle horaire vari de 15°, soit encore 4 mn de temps par ° de longitude. A la latitude de 45°, une minute de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur.

AH = 90° à 18 h (temps solaire vrai).

### 3.2.2 Les cinq temps

#### 3.2.2.1 Temps universel

Le temps universel est fondé sur la rotation terrestre. C'est le prolongement du temps moyen de Greenwich, qui est le temps solaire moyen au méridien de Greenwich, est défini par l'heure de passage du soleil au méridien origine.

#### 3.2.2.2 Temps solaire local

Fondé sur le jour solaire apparent le temps solaire vrai est la durée entre deux retours successifs du Soleil au méridien local. La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude [2].

La correction de longitude est donnée par la formule :

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \tag{3.4}$$

### 3.2.2.3 Equation du temps

Jusqu'en 1964, la mesure du temps était basée sur la rotation terrestre : le jour était défini comme l'intervalle de temps entre deux passages du soleil par le même méridien. Toutefois, les jours solaires ne sont pas égaux, car l'angle AH que fait le soleil avec le méridien du lieu ne correspond pas exactement au temps solaire local, bien que la terre tourne régulièrement sur elle-même, l'expérience montre que les passages du soleil dans le plan méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas exactement 24 heures d'intervalle et le midi vrai peut atteindre une avance de 16 minutes ou un retard de 14 minutes par rapport 12 heures, selon l'époque de l'année.

Deux facteurs interviennent dans cette variation :

- De l'excentricité de l'ellipse qui décrit la course de la terre autour du soleil, il résulte, d'après la loi de Kepler (loi des aires) que la vitesse orbitale au périhélie (Décembre) est plus grande qu'à l'aphélie (Juin). La terre a donc une variation saisonnière de sa vitesse orbitale qui affecte l'heure de passage du soleil au méridien.
- D'autre part, l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre par rapport au plan de l'écliptique introduit une oscillation supplémentaire de la durée du jour solaire, un jour de Novembre étant plus long d'une demi-minute qu'un jour de Mars.

Cet écart  $\Delta t$  entre temps solaire local (TSL) et temps solaire vrai (TSV) est désigné sous le terme d'équation du temps.

En plus, le mouvement de la terre consommant de l'énergie à la perte de son énergie cinétique, celle-ci diminue, et des mesures précises ont constaté qu'entre 1900 et 1974, la terre a accumulé 44 secondes de retard dans sa rotation annuelle, ce qui signifie que la durée du jour moyen augmente de 1.6 s par an.

L'estimation de la hauteur solaire et de son azimut nécessite un calcul de l'équation solaire, Le midi solaire est le moment où le soleil est à une hauteur maximale. Le midi solaire diffère du midi local. Cette différence est appelée équation du temps, et elle varie en fonction du jour et de la longitude donnée par l'équation [3].

$$E = \frac{9,87 \cdot \sin(2B) - 7,5 \cos(B) - 1,5 \sin(B)}{60} \quad (3.5)$$

$$\text{Avec } B = \frac{2\pi(n-81)}{364}$$



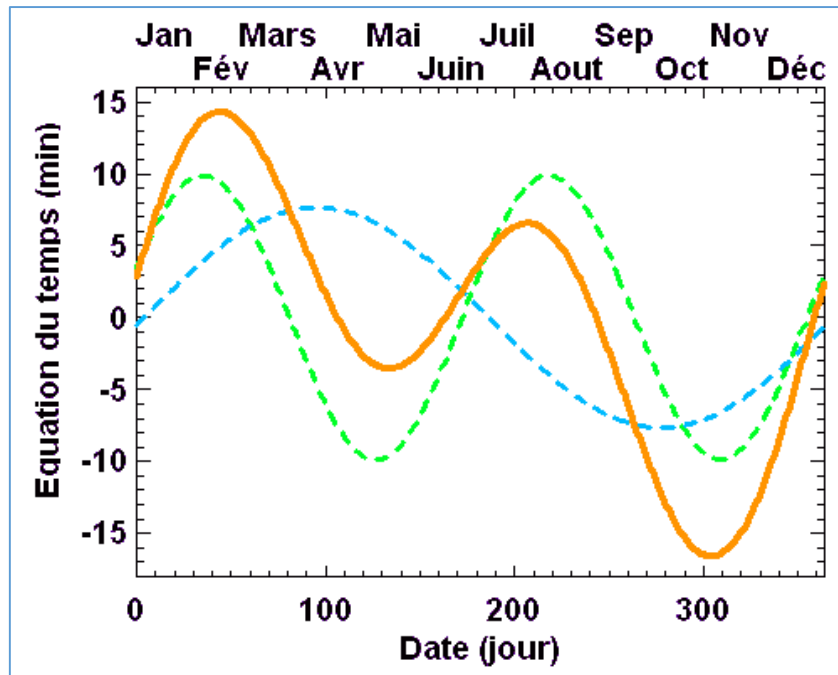


Figure 3.4 : Equation du temps.

#### 3.2.2.4 Temps solaire vrai

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil [4] :

$$TS = TSL + \Delta t \quad (3.6)$$

Pour longitude  $\lambda$  donnée, il existe une correspondance directe entre angle horaire AH, temps solaire vrai TSV, temps solaire local TSL et temps universel TU [4] :

$$TSL = TU = \frac{\Delta}{15} = 15 \left( TU + \frac{\lambda}{15} + \Delta t - 12 \right) \quad (3.7)$$

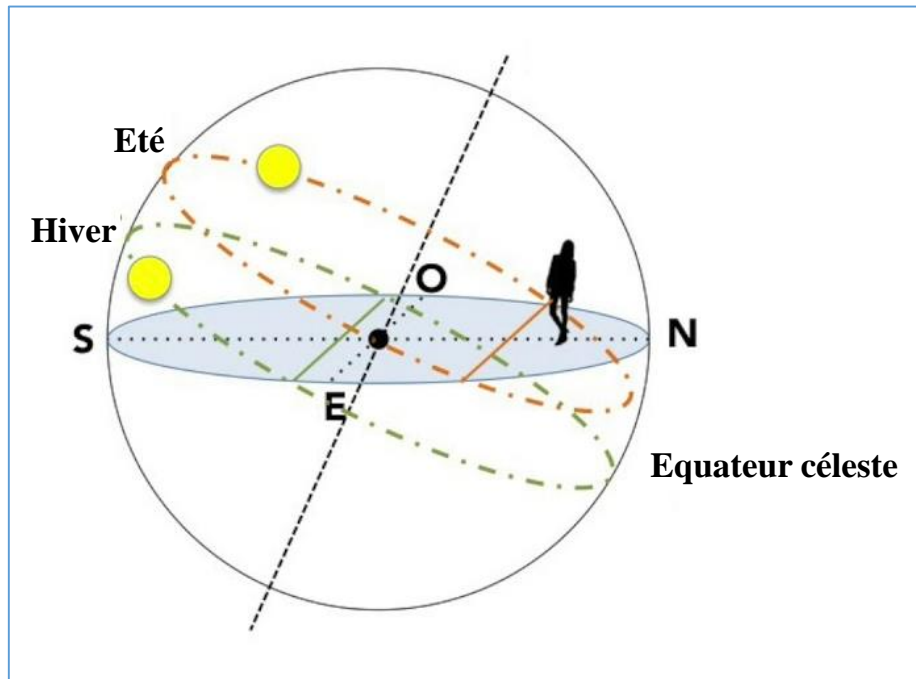
#### 3.2.2.5 Heure légale

Ce terme désigne le temps qui a été mis en usage courant dans un pays, l'heure légale est souvent mentionnée en opposition à l'heure solaire qui est déterminée par le mouvement apparent du soleil [4].

### 3.2.3 Mouvement apparent

Le mouvement apparent du Soleil s'explique par la rotation de la Terre sur elle-même, qui donne l'impression que le Soleil bouge alors que c'est la Terre qui tourne sur elle-même.

La figure 3.5 donne l'aspect de la trajectoire solaire [5].



**Figure 3.5** : Mouvement solaire apparent.

En particulier nous avons :

- Qu'au moment des équinoxes et pour toutes les latitudes le soleil se lève exactement à l'Est et se couche exactement à l'Ouest.
- Que dans la zone intertropicale, la culmination solaire peut s'effectuer soit au Nord soit au Sud, selon la saison.
- Que dans les calottes polaires, le soleil peut rester sous l'horizon pendant plusieurs jours, et six mois plus tard rester visible pendant plus d'un jour.

### 3.2.4 Hauteur angulaire

Lors de sa course journalière, le Soleil change de hauteur depuis le lever jusqu'au coucher en passant par sa culmination à midi solaire. Ces changements solaires sont facilement perceptibles à l'œil nu mais peuvent faire l'objet d'une observation plus approfondie, l'angle  $h$  formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil est donné par la relation [6] :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (3.8)$$

Où  $\varphi$ ,  $\delta$ ,  $\omega$ , sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire.

De la hauteur  $h$ , nous pouvons déduire les heures de lever et de coucher de soleil.

Nous trouvons, en faisant  $h = 0$ ,

$$\cos \omega_0 = -\tan \varphi \tan \delta \quad (3.9)$$

Et la durée astronomique du jour s'obtient tout en faisant :

$$D_0 = \frac{20}{15} \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (3.10)$$

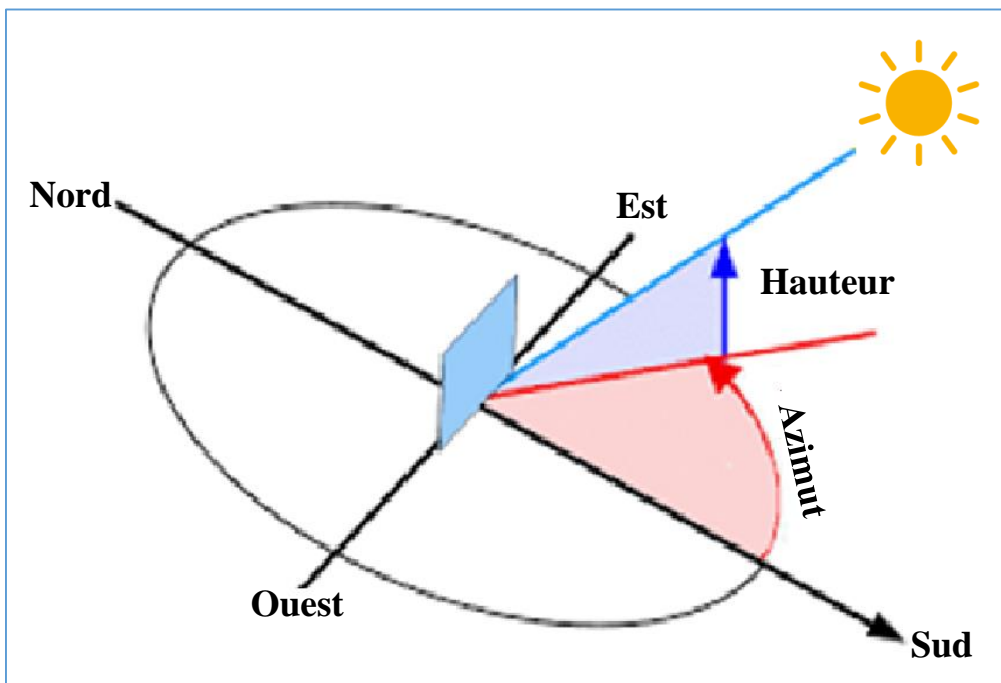


Figure 3.6 : Hauteur angulaire ( $h = \gamma$ )

### 3.2.5 Azimut

C'est l'angle formé par le plan vertical du soleil et le plan méridien (horizontal) du point d'observation. La connaissance de l'azimut est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'origine des azimuts correspond à la direction du Sud dans l'hémisphère Nord. L'angle d'azimut est compté positivement vers l'Ouest [7].

L'azimut est relié à l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison par la relation :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (3.11)$$

Et si nous souhaitons exprimer l'azimut indépendamment de la hauteur  $h$ , nous pouvons utiliser la formule :

$$\tan a = \frac{\sin \omega}{\sin \varphi \cos \omega - \cos \varphi \tan \delta} \quad (3.12)$$

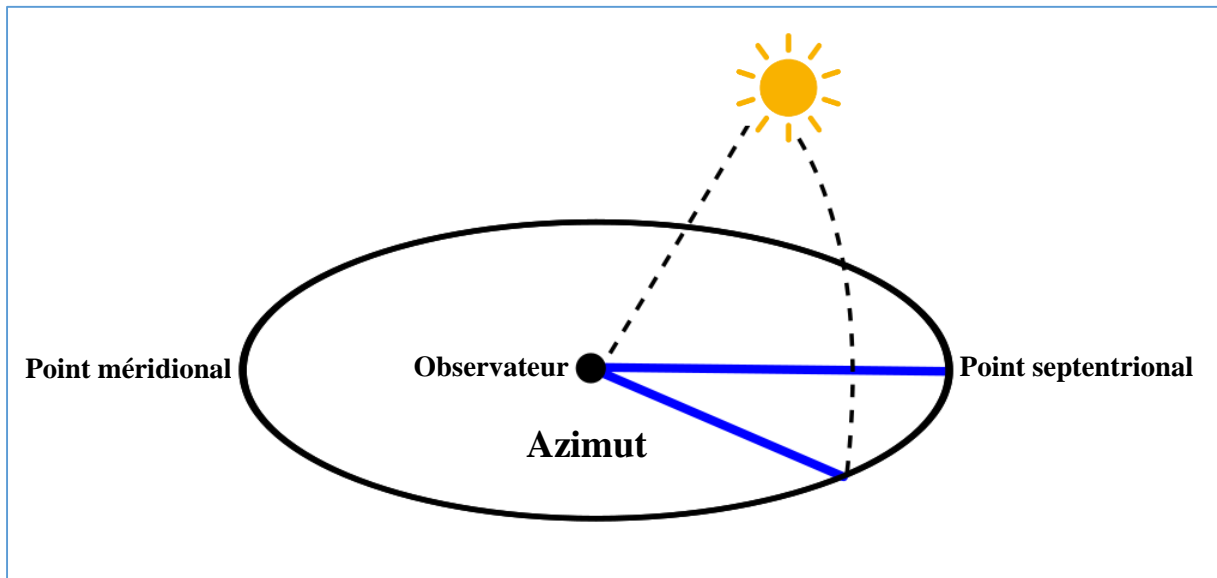


Figure 3.7 : L'angle Azimut.

### 3.2.6 Système de coordonnées équatoriales

La position du soleil en un lieu et en un temps donné peut être représentée par la figure I.6. Le mouvement du soleil sur la sphère céleste consiste à prendre comme centre de la sphère le lieu considéré : le plan équatorial devient l'horizontale du lieu et l'axe de la sphère est la verticale du lieu [8].

Dans le triangle sphérique Pôle-Soleil-Zénith (P-S-S<sub>m</sub>), nous avons les relations :

$$\text{Hauteur du soleil : } \sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$$

La trace du soleil dans le plan horizontal est donné par l'azimut tel que :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (3.13)$$

Où l'angle horaire  $\omega = AH$ .

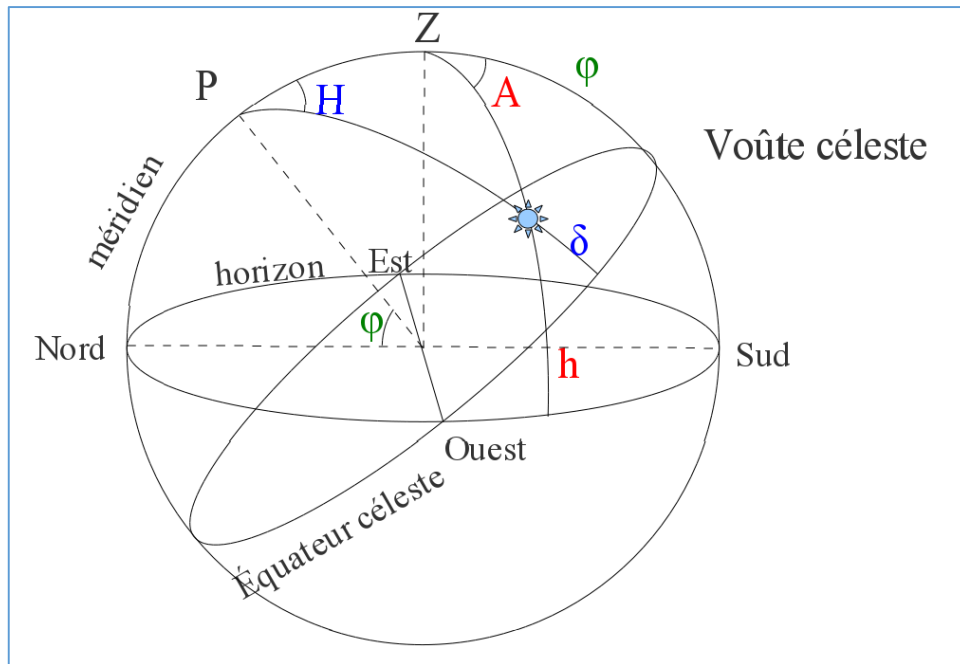


Figure 3.8 : Repérage du soleil dans le ciel.

### 3.2.7 Abaque d'enseillement sur une latitude donnée

La projection stéréographique consiste à reporter la trajectoire du soleil sur la sphère céleste permettant d'établir des diagrammes polaires du type de celui de la figure 3.9.

Ces abaques permettent de déterminer graphiquement la hauteur et l'azimut du soleil pour une latitude donnée à toute heure du jour et pour toute période de l'année [8].

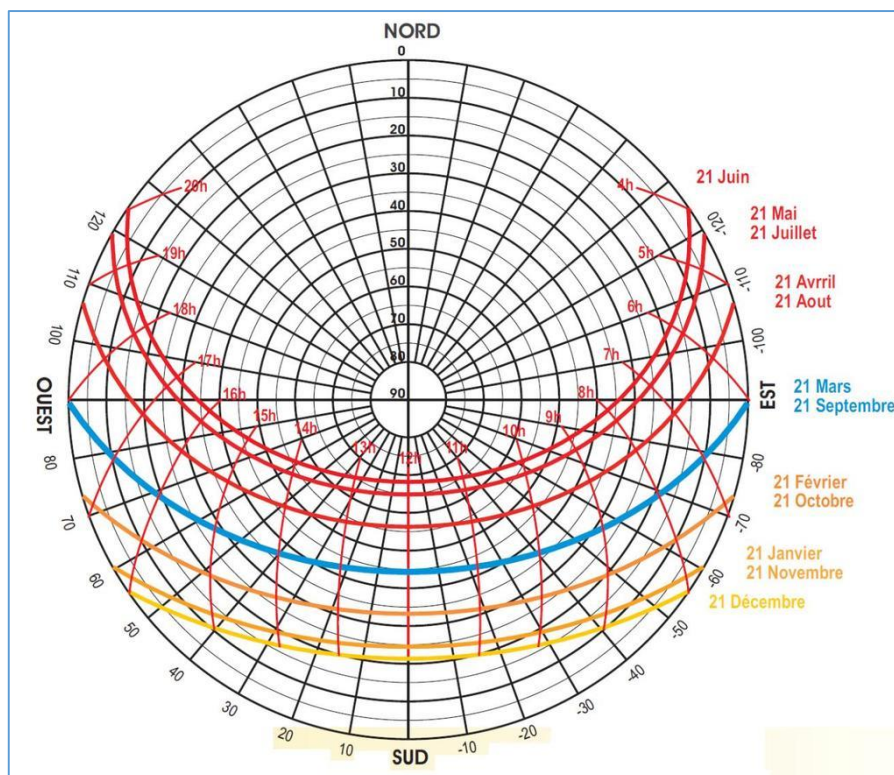


Figure 3.9 : Diagramme polaire.

### 3.3 Mesure sur une surface d'inclinaison quelconque

L'inclinaison  $i$  est désignée par l'angle du plan de l'objet étudié par rapport à l'horizontale.

L'orientation  $\gamma$  est l'angle entre la normale au plan de l'objet étudié et le plan méridien du lieu [8].

#### 3.3.1 Mesure par ciel clair sur une surface horizontale

Le rayonnement global  $G$  reçu par une surface horizontale se décompose en deux termes :

- Le rayonnement direct  $I$  (éclairage corrigé des phénomènes atmosphériques)
- Le rayonnement diffus  $D$  en provenance de toute la voûte céleste.

Sur un plan horizontal l'équation sera comme suite :

$$G_h = I \sin h + D_h = I_h + D_h \quad (3.14)$$

Pour connaître  $D_h$ , nous faisons appel à la fraction d'insolation  $\sigma$  qui représente le nombre d'heures de soleil mesurées par l'héliographe divisé par la durée théorique du jour.

Par ciel clair, nous pouvons utiliser la formule empirique [8, 9] :

$$D_h = G_h(0,9 - 0,8\sigma) \quad (3.15)$$

Valable pour  $0,15 < \sigma < 0,7$

#### 3.4 Expression du rayonnement direct reçu sur un plan quelconque

Si  $i$  est l'angle d'inclinaison de la normale du plan de mesure avec la verticale du lieu,  $h$  la hauteur du soleil,  $a$  l'azimut et  $\alpha$  l'angle d'incidence du rayon direct avec la normale au plan de mesure, nous aurons pour la composante directe  $I_i$  du rayonnement frappant le capteur [9]:

- Soleil à midi (azimut nul) :  $a=0$ 
    - Pour un plan horizontal :  $i=0$  et  $I_i = I \sin h$
    - Pour un plan incliné sur l'horizontale, et orienté Sud :
- $$\alpha = 90^\circ - (h + i) \text{ et } I_i = I \cos \alpha = I \sin(h + i) \quad (3.16)$$

- Azimut quelconque :
  - Pour un plan vertical orienté Sud :  $90^\circ$  et  $I_i = I \cos h \cos \alpha$
  - Pour un plan incliné sur l'horizontale et orienté Sud :

$I_i$  est la résultante de deux composantes projetées sur la normale au plan du capteur :

- L'une perpendiculaire à l'horizon :  $I \cdot \sin(h)$
- L'autre dans le plan de l'horizon, pointant vers le Sud :  $I \cdot (\cos(h) \cdot \cos(a))$  (3.17)
- La somme des projections donne :

- Pour un plan vertical d'orientation quelconque dont la normale fait un angle  $\gamma$  avec le plan méridien :

$$i = 90^\circ \text{ et } I_i = \cos h \cos(\gamma - \alpha) \quad (3.18)$$

- Pour un plan d'inclinaison quelconque  $i$  et d'orientation quelconque  $\gamma$  :

$$I_i = I \cos \beta = I(\sin h \cos i + \cos h \cos(\gamma - \alpha) \sin i) \quad (3.19)$$

Ainsi, la formule la plus générale donnant l'angle d'incidence  $\beta$  du rayonnement solaire direct tombant sur un vitrage d'inclinaison  $i$  et d'orientation  $\gamma$  est :

$$\beta = \text{Arc cos } \beta(\sin(h) \cos(i) + \cos(h) \cos(\gamma - \alpha) \sin(i)) \quad (3.20)$$

### 3.5 Composante diffuse pour une surface d'orientation quelconque

Pour estimer l'apport solaire sur une surface d'orientation quelconque, il faut clairement séparer le calcul de la part du rayonnement diffus puisque seule intervient pour ce dernier l'inclinaison  $i$  de la surface qui permet de voir plus ou moins d'espace et plus ou moins d'albédo en provenance du sol. Par exemple, une surface verticale ne voit que la moitié de l'espace, mais l'albédo du sol peut devenir prépondérant.

$$D = \frac{1+\cos i}{2} \cdot D_h + \frac{1-\cos i}{2} \alpha \cdot G_h \quad (3.21)$$

Où  $\alpha$  est le coefficient d'albédo du sol. Pour un plan vertical, en prenant  $\alpha = 0.2$ , nous

$$\text{aurons : } D_v = 0,5 \cdot D_h + 0,2G_h \quad (3.22)$$

Dans des conditions moyennes de nébulosité, pour connaître  $D_h$ , on utilise la fraction d'insolation  $\sigma$  la composante diffuse est donnée par la relation empirique :

$$D_h = G_h(1 - 0,25\sigma - 0,6\sqrt{\sigma}) \quad (3.23)$$

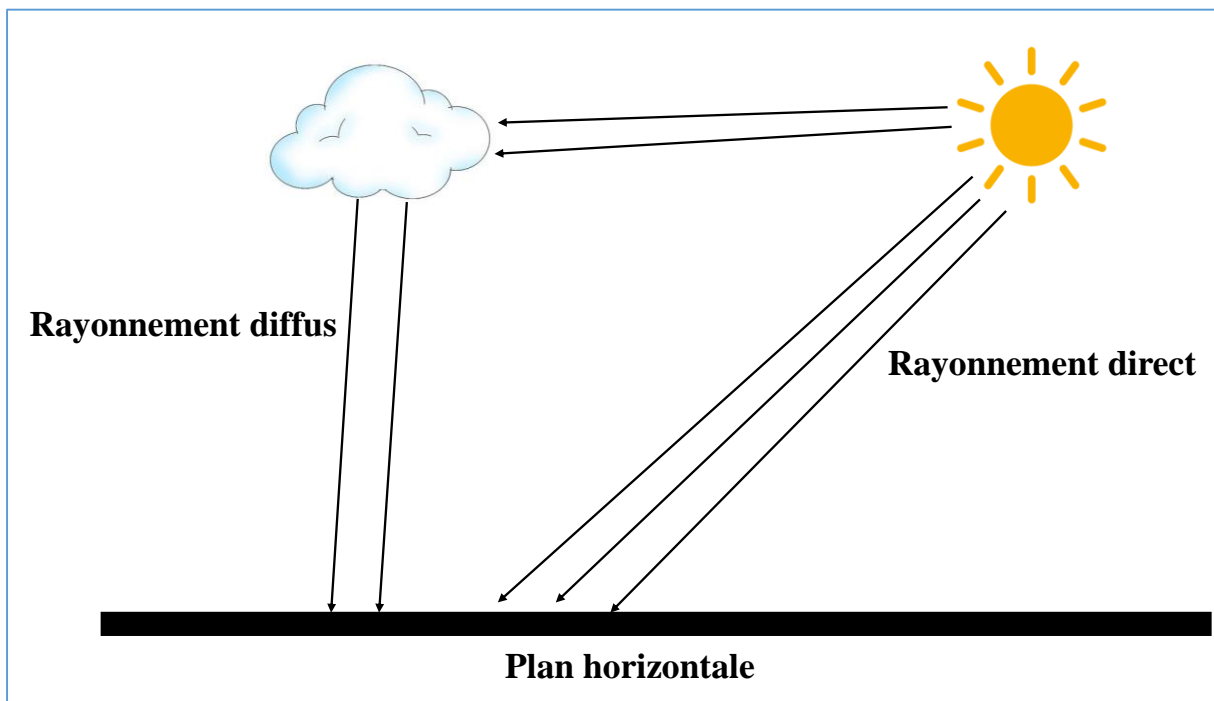


Figure 3.10 : Rayonnement direct et diffus.

### 3.6 Fraction d'insolation $\sigma$

C'est le paramètre distinctif des conditions de nébulosité et le rapport entre la surface du ciel couvert par les nuages et la surface totale du ciel. Cette notion n'étant que descriptive, nous la relierons à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable dès que nous connaissons les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe et qui s'en déduit par le rapport [10] : avec  $S$  = durée d'insolation mesurée et  $S_0$  durée maximale d'insolation. Il est possible de relier le rayonnement global  $G$  sur une surface à la fraction d'insolation et au rayonnement diffus  $D$ . connaissant  $G$ , on peut donc calculer le rayonnement diffus  $D$ .

### 3.7 Rayonnements directs

L'éclairement énergétique ou irradiance est un terme radiométrique qui quantifie la puissance d'un rayonnement électromagnétique exposé sur une surface perpendiculaire à sa direction.

#### 3.7.1 Irradiance directe ciel claire (sans nuages)

L'irradiance (éclairement) directe dans un plan perpendiculaire au soleil est donnée en  $W/m^2$  par la formule de Kasten :=

$$I_l = (I_0 - 31T_L) \exp\left(\frac{-mT_L}{0,9m+9,4}\right) \quad (3.24)$$

$$\text{Avec } T_L = 1,6 + 16\beta_\alpha + 0,5h_{EC} \quad (3.25)$$

Par l'épaisseur d'atmosphère traversée  $m$ , la formule tient compte de la pression atmosphérique en mbar de l'altitude  $z$  en km. Quant au trouble de Link, il dépend du coefficient de diffusion d'Angström et de la hauteur d'eau condensable.

La composante du rayonnement direct sur une surface horizontale est alors, dans tous les cas :

$$I_{lh} = I_l \cdot \sin(h) \quad (3.26)$$

Et la composante directe dans un plan d'inclinaison quelconque  $i$  et d'orientation quelconque  $\gamma$  le soleil à une hauteur  $h$  et un azimut  $\alpha$  :

$$I_{li} = I_l (\sin(h) \cos(i) + \cos(h) \cos(\gamma - \alpha) \sin(i)) \quad (3.27)$$

#### 3.7.2 Irradiation direct ciel quelconque

La dispersion des éclaircissements et les écarts entre valeurs mesurées et calculées ont très sensiblement réduit si l'on procède à une intégration sur des intervalles de temps de l'ordre de l'heure : nous obtenons alors des valeurs moyennes qui correspondent à celles déduites de relevés portant sur plusieurs journées identiques. Nous prenons alors, pour le calcul de la hauteur du soleil. On suppose que les éclaircissements calculés restent constants durant tout cet intervalle, ce qui fait que l'irradiation est égale à l'irradiance multipliée par une heure.

$$I_h = K \cdot I_{lh} \quad (3.28)$$

$$K = \frac{\sigma}{(1+c(1-\sigma))} \quad (3.29)$$



Le rapport  $K$  est donc une fonction de la fraction solaire  $\sigma$  et d'un paramètre de nuage  $c$  compris entre 0 et 2, à déterminer expérimentalement, en fonction du type de nuages et du régime des passages nuageux. L'étude statistique des variations de  $K$  en fonction de  $\sigma$  pour les intervalles horaires de chaque journée, en l'absence de connaissance du climat du site, on prendra  $c = 1$  en toutes saisons.

### 3.7.3 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol. Il s'agit donc d'un rayonnement qui ne suit pas une direction définie par le soleil en direction du point d'observation à la surface de la Terre.

#### 3.7.3.1 Ciel quelconque

Pour calculer l'irradiance diffuse horizontale par ciel quelconque dans le plan horizontal, la formule suivante a été proposée par Bedel :

$$D_h = I_h \frac{f(\sigma)}{(1-f(\sigma))} \text{ Avec } f(\sigma) = 0,9 - \sigma \left( 0,9 - \left( \frac{D_{lh}}{G_{lh}} \right) \right) \quad (3.30)$$

Où  $\sigma$  représentant la fraction d'ensoleillement pour l'intervalle de temps horaire considéré.

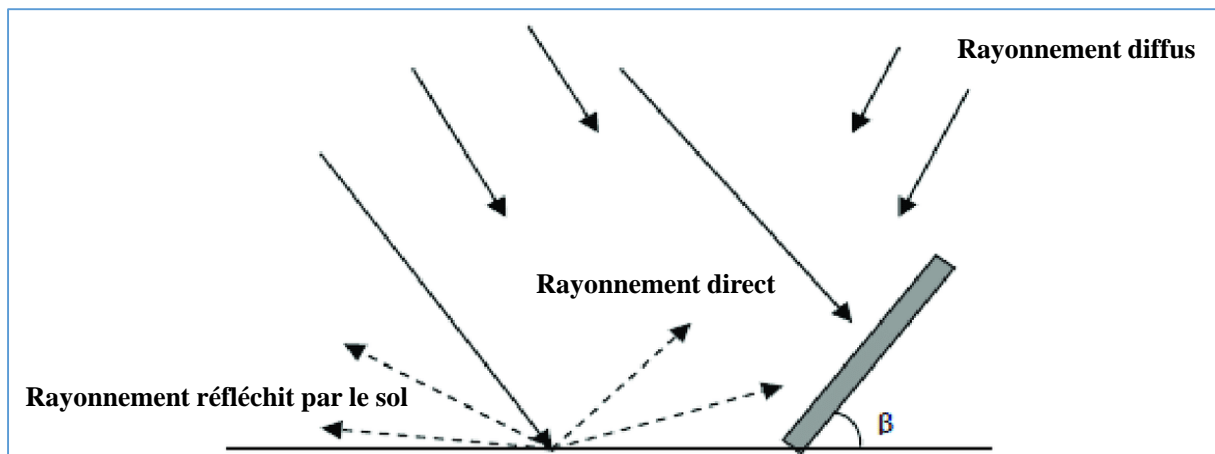


Figure 3.11 : Les types de rayonnement.

### 3.8 Rayonnement global

Ciel quelconque

La formule générale donne pour l'irradiation globale horizontale pour un ciel quelconque :

$$G_h = G_{lh} \cdot (a + (1 - a)(0,5\sigma(\sigma + 1))). 0,5 \quad (3.31)$$

Où  $\sigma$  est la fraction solaire et  $a$  est un coefficient climatique compris entre 0 et 1, déduit des mesures :

- En régions septentrionales, on prendra  $a = 0$ .

- En régions tempérées,  $a = 0.10$ .
- En régions intertropicales,  $a = 0.33$ .
- En régions équatoriales,  $a = 0.5$ .

Cette relation doit bien sûr vérifier à toute heure la condition :  $G_h = D_h + I_h$

**3.9 Etat de l'art sur le domaine de l'optimisation :**

Les problèmes d'optimisation abondent dans la plupart des domaines de la science, l'ingénierie et la technologie. Dans beaucoup de ces problèmes, il est nécessaire de calculer l'optimum global (ou une bonne approximation) d'une fonction de plusieurs variables. Les variables qui définissent la fonction à optimiser peuvent être continues et ou discrètes et, en outre, ils ont souvent à satisfaire certaines contraintes.

Ces problème d'optimisation sous-jacent à la conception de systèmes est généralement multiobjectif et par nature multidisciplinaire. Les techniques d'optimisation multi-objective et multidisciplinaire permettent de parcourir l'espace de conception et fournissent un ensemble de solutions parmi lequel le concepteur choisira, a posteriori, la solution à développer.

**Quel que soit le problème d'optimisation,**

Les étapes à suivre sont représentées dans la figure 3.12 :

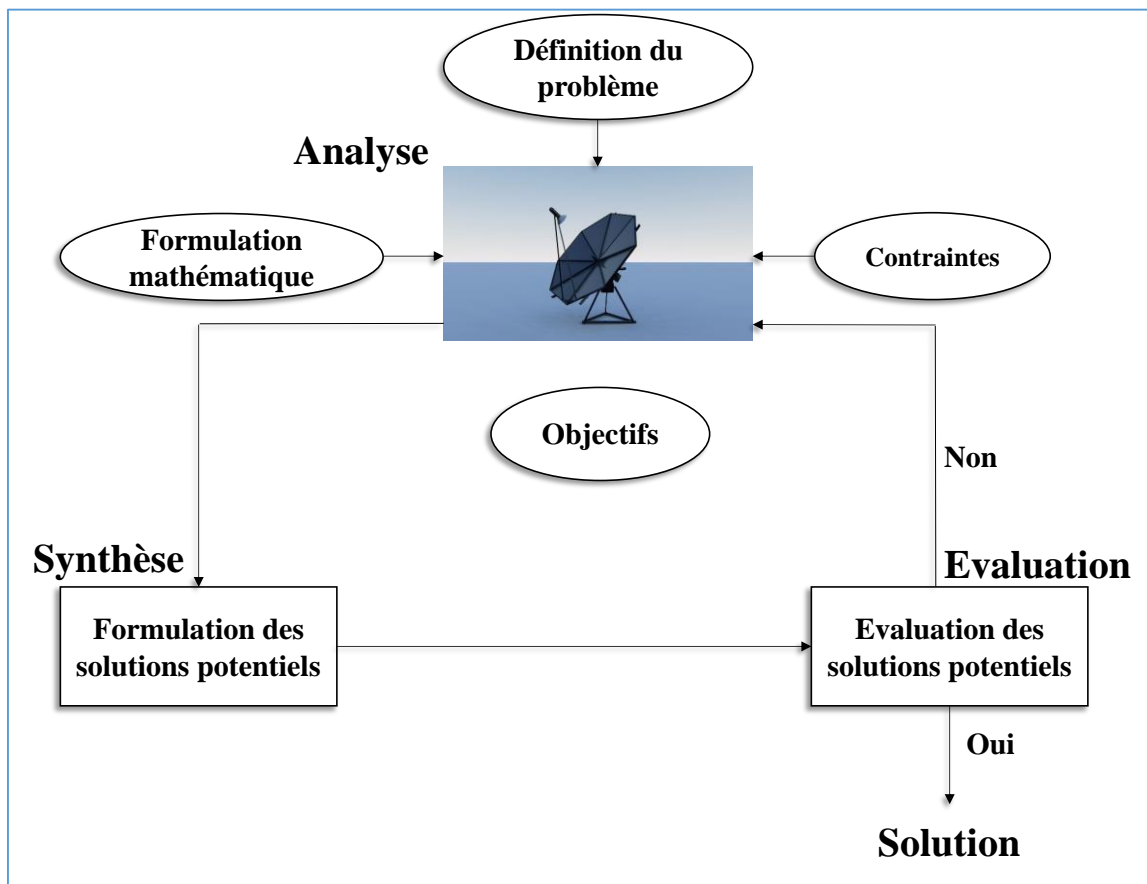


Figure 3.12 : Processus d'optimisation d'un problème.

### 3.9.1 Analyse

La première partie c'est la plus importante qui consiste à définir le problème avec ces contraintes (d'égalité et d'inégalité) par des formules mathématiques, ou on détermine les paramètres suivants :

- **Variables du problème** : quels sont les paramètres intéressants à faire varier ?
- **Espace de recherche** : dans quelles limites faire varier ces paramètres ?
- **Fonctions objectives** : quels sont les objectifs à atteindre ?
- **Méthodes d'optimisation** : quelle méthode choisit ?

Une fois effectués ces différents choix, la méthode choisie synthétise des solutions potentielles qui sont évaluées, éventuellement éliminées jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable [étape 2 et 3].

Les performances des solutions obtenues dépendent en premier temps de la méthode d'implémentation et l'algorithme d'optimisation choisi.

### 3.9.2 Optimisation

L'optimisation se rapporte à l'étude des problèmes par des formulations mathématiques dans lesquels on cherche à réduire au minimum ou maximiser la fonction.

Un problème d'optimisation peut être représenté de la façon suivante :

F : Fonction dans  $\mathbb{R}$ .

A : Sous ensemble dans  $\mathbb{R}$

**Cherchez ou trouvez** : Un élément  $X_0$  dans A tels que  $F(X_0) \leq F(X)$  pour tous X dans A (« minimisation ») ou tels que  $F(X_0) \geq F(X)$  pour tous X dans A (« maximisation »).

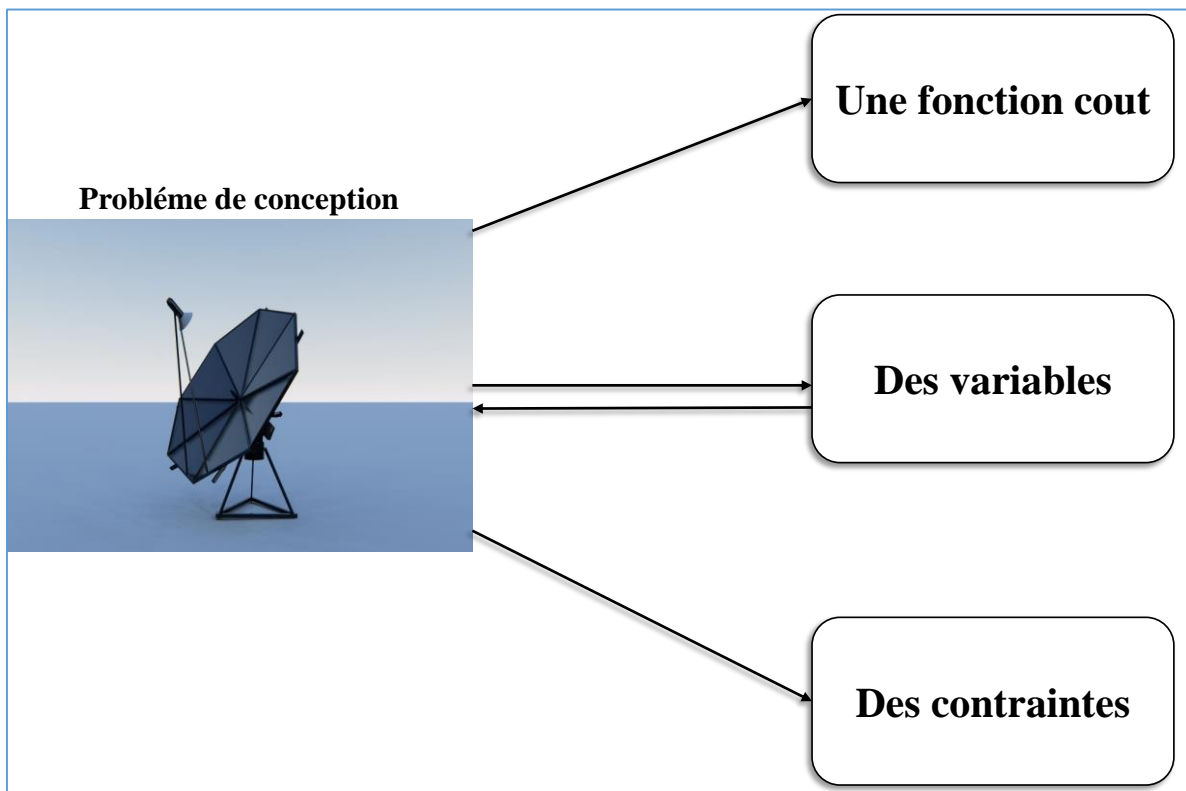
La fonction F s'appelle fonction objective, ou fonction de coût. Une solution faisable qui réduit au minimum (ou maximise, si c'est le but) la fonction objective s'appelle solution optimale.

Le domaine A de F s'appelle l'espace de recherche, tandis que les éléments de A s'appellent solutions de candidat ou solutions faisables. Souvent indiqué par un ensemble de contraintes, égalités ou inégalités.

g: Les contraintes inégalités

h : Les contraintes égalités

La figure 3.13 représente le problème d'optimisation :



**Figure 3.13** : Un problème d'optimisation

### 3.9.3 Algorithmes d'optimisation

Selon la littérature, nous pouvons partager les méthodes d'optimisation en deux catégories. Celles qui permettent de déterminer un optimum local, ces méthodes sont appelées méthodes locales, et celles qui s'efforcent de déterminer un optimum global, ces méthodes sont appelées méthodes de recherche globale.

La classification des algorithmes quelque soit l'optimale obtenue, peut se diviser en deux :

- **Les algorithmes stochastiques**
- **Les algorithmes déterministes**

La Figure 3.14 illustre la classification et les algorithmes d'optimisation.

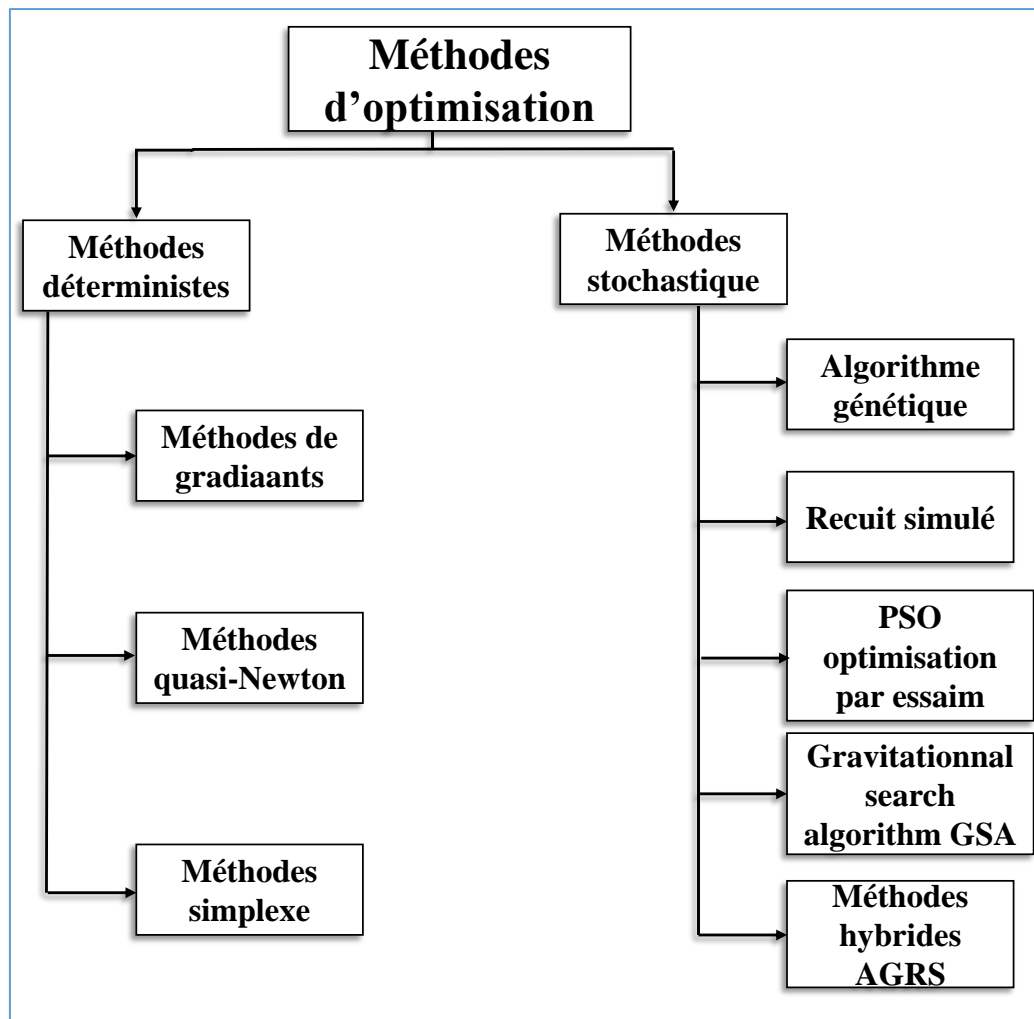


Figure 3.14 : Classification des algorithmes d'optimisation.

### 3.9.4 Gravitational Search Algorithm GSA

L'algorithme de recherche par gravité est construit sur la base des lois de la gravité et la notion de masse des interactions. (Voir figure 3.15) L'algorithme GSA utilise la théorie de la physique newtonienne et ses agents chercheurs sont la collecte des masses. En GSA, nous avons un système isolées masses. Utilisation de la force gravitationnelle, chaque masse dans le système peut voir la situation des masses d'autres. La force gravitationnelle est donc un moyen de transférer des informations entre les différentes masses.

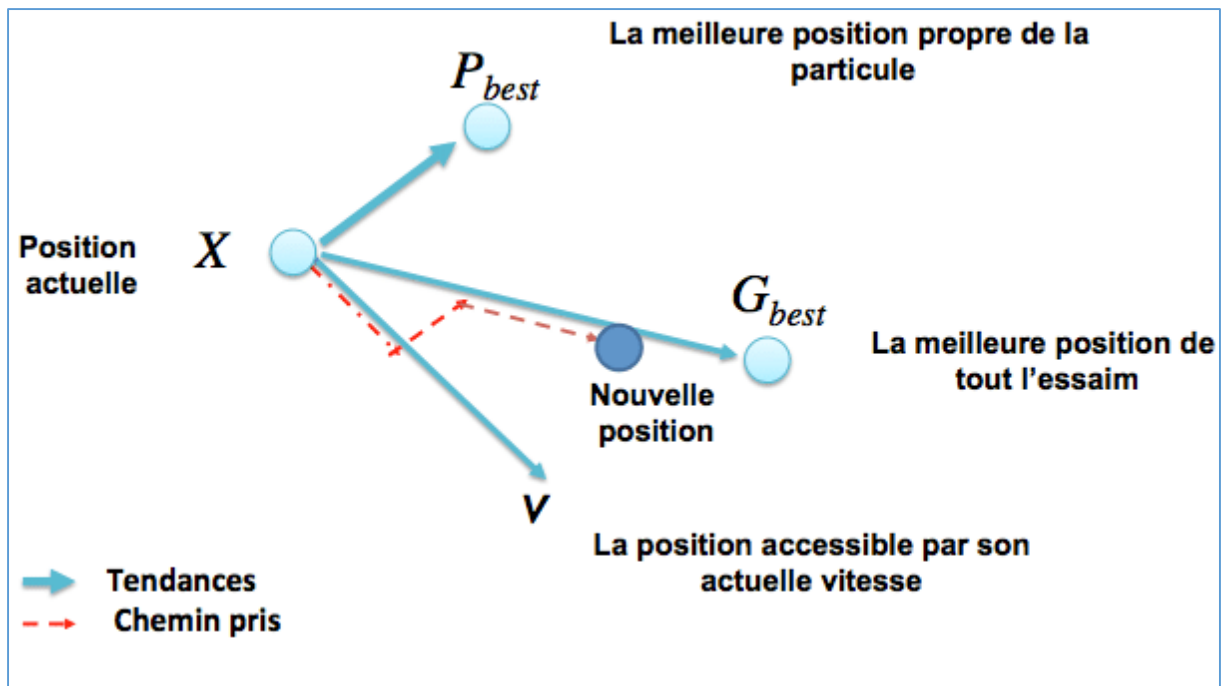


Figure 3.15 : Principe de l'algorithme GSA.

GSA a été introduite par E. Rashedi, 2009 [11], les agents sont considérés comme des objets et leur performance sont mesurés par leurs masses. Tous ces objets s'attirent par la force de gravité, et cette force provoque un mouvement mondial de tous les objets vers les objets plus lourds avec des masses. Par conséquent, des masses de coopérer avec une forme de communication directe, par la force gravitationnelle. Les lourdes masses qui correspondent à de bonnes solutions déplacent plus lentement que les plus légers, ce qui garantit l'étape de l'exploration de l'algorithme [12, 13, 14, 15].

En GSA, chaque masse (agent) a quatre caractéristiques :

Position, masse d'inertie, la masse gravitationnelle active et masse gravitationnelle passive. La position de la masse correspond à une solution du problème.

### 3.9.4.1 Initialisation

Nous considérons un système avec des agents  $N$  (masses). Nous définissons la position de l'agent  $i$  par :

$$X_i = (x_i^1, x_i^d, \dots, x_i^n)_i, \dots, \quad (3.32)$$

Avec  $x_i^d$  la position de l'agent  $i$  dans la dimension  $d$

### 3.9.4.2 Evaluation de tous les agents

Dans cette étape, une évaluation globale pour tous les agents est décrite comme suit.

$$best(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (3.33)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (3.34)$$

Avec  $fit_j(t)$  est la fonction objectif

### 3.9.4.3 La constante de gravité

La constante gravitationnelle, G, est initialisée au début et sera réduit avec le temps de contrôler la précision de recherche.

En d'autres termes, G est une fonction de la valeur initiale( $G_0$ ) et le temps( $t$ ):

$$G(t) = G_0 \exp\left(-a \frac{t}{T}\right) \quad (3.35)$$

Avec  $G_0$  la constante initiale,  $a$  est un constant et T le nombre d'itération.

### 3.9.4.4 Mise à jour de la masse d'inertie et de gravité

Dans cette étape, les masses gravitationnelles et inertielles sont mises à jour comme suit.

$$mg_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best - worst(t)} \quad (3.36)$$

$$Mg_i(t) = \frac{mg_i(t)}{\sum_{j=1}^N mg_j(t)} \quad (3.37)$$

Avec  $Mg_i(t)$  est la masse de la  $i^{ième}$  agent à l'instant  $t$

### 3.9.4.5 calcul de la force totale

Dans cette phase, la force totale agissant sur l' $i^{ième}$  agent ( $F_{id}(t)$ ) est calculée comme suit.

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in kbest, j \neq i} rand_j F_{ij}^d(t) \quad (3.38)$$

Where  $rand_j$  is a random number between interval  $[0, 1]$  and  $kbest$  is the set of first K agents with the best fitness value and biggest mass.

Où  $rand_j$  est un nombre aléatoire entre l'intervalle  $[0, 1]$  et  $kbest$  est l'ensemble des premiers agents K avec la valeur optimale et la plus grande masse.

Lors d'un temps 't' spécifique, nous définis sons la force agissant sur la masse « i » de la masse « j » comme suit :

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_i(t) \times M_j(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (3.39)$$

Avec  $R_{ij}(t)$  est la distance Euclidian entre  $i^{ième}$  et  $j^{ième}$  agents ( $\|x_i(t), x_j(t)\|_2$ ),  $\varepsilon$  est un constant.

### 3.9.4.6 Calcul de l'accélération et de vitesse

L'accélération ( $a_i^d(t)$ ) et la vitesse ( $V_i^d(t)$ ) de chaque agent (masse) sont calculé par les équations suivantes :

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{Mg_i^d(t)} \quad (3.40)$$

$$V_i^d(t+1) = rand_i \times V_i^d(t) + a_i^d(t)$$

Avec  $rand_i$  est un nombre aléatoire entre l'intervalle  $[0, 1]$ .

### 3.9.4.7 Mise à jour de position

Dans ces étapes, la prochaine position des  $i^{\text{ième}}$  agents dans la dimension  $d^{\text{ième}}$  ( $x_i^d(t+1)$ ) est mise à jour comme suit (voir figure 2.18).

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + V_i^d(t+1) \quad (3.41)$$

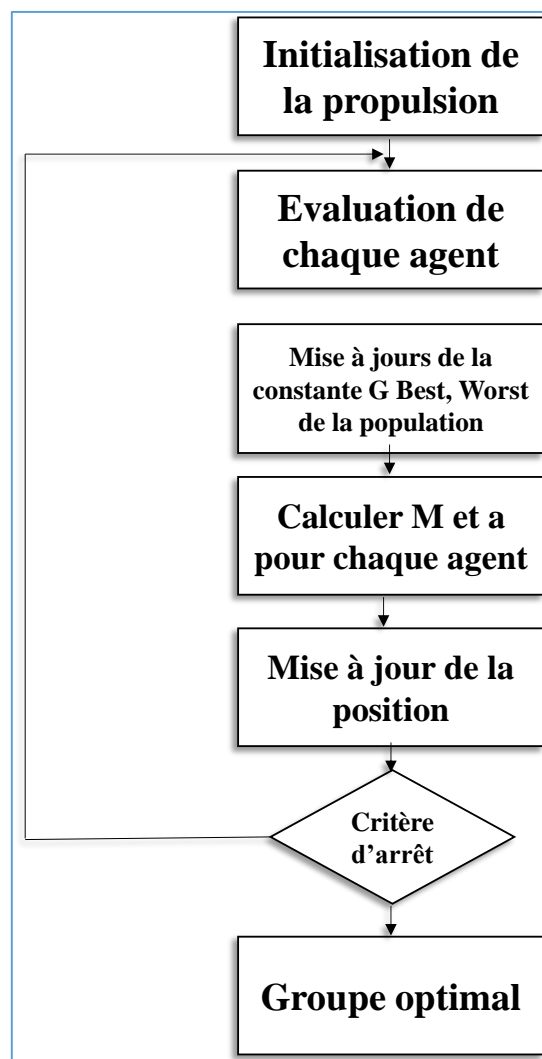


Figure 3.16 : Organigramme de l'algorithme GSA.



**3.10 Conclusion**

Le constat de ce chapitre inclut que pour une bonne quantification de l'énergie solaire reçue sur terre le passage par la modélisation est nécessaire. Les équations solaires décrites dans ce chapitre seront la base pour concevoir le système de poursuite désiré. Ensuite l'introduction de l'algorithme d'optimisation choisit qui a pour but d'opter pour les meilleurs résultats.

# **Chapitre 04**

## **Interprétation des résultats et discussion**

#### 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, les différentes disciplines de la conception du système de concentration ont été modélisées, la stratégie de développement suivi dans cette thèse est de concevoir et d'optimiser, ainsi de réaliser un concentrateur solaire parabolique doté d'un système de poursuite by-axial.

Ce chapitre consiste à évaluer le spectre d'application de cette stratégie qui s'articule autour de plusieurs parties à savoir :

- Présentation de l'intérêt géographique et son impact sur l'énergie solaire reçu.
- Présentation du processus de conception mécanique et électronique.
- Présentation du système de poursuite réalisé.
- Résultats et discussion.
- Paramétrage de l'interface graphique

#### 4.2 Intérêt géographique vis-à-vis de l'énergie solaire

Dans notre pays l'équivalent de 300 milliards de Tep par an en énergie solaire est reçu en terme d'insolation, l'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la quasi-totalité du territoire national, la durée d'insolation quant à elle dépasse les 2000 heures chaque année et peut aller jusqu'à 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara, ce qui représente une moyenne élevée par rapport aux pays du monde.

La figure 4.1 décrit la carte d'enseillement et la disposition des points chauds en Algérie.

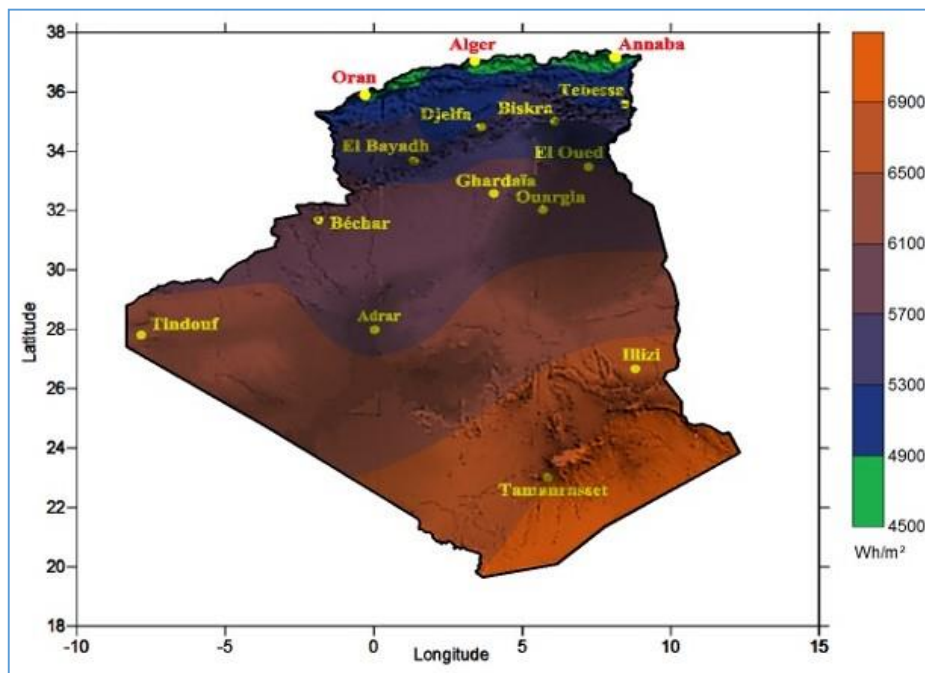


Figure 4.1 : la disposition des points de chaux en Algérie.

Une connaissance précise de la distribution de rayonnement solaire sur un site géographique particulier est d'une importance vitale pour le développement des systèmes solaires, ainsi qu'à l'évaluation de leurs performances.

Le choix du site géographique dépend de l'amont énergétique reçu sur ce site, les figures 4.2, 4.3 décrivent la quantité d'irradiante solaire reçu sur deux sites géographique, l'un au nord d'Algérie (Oran) et l'autre au sud (Adrar).

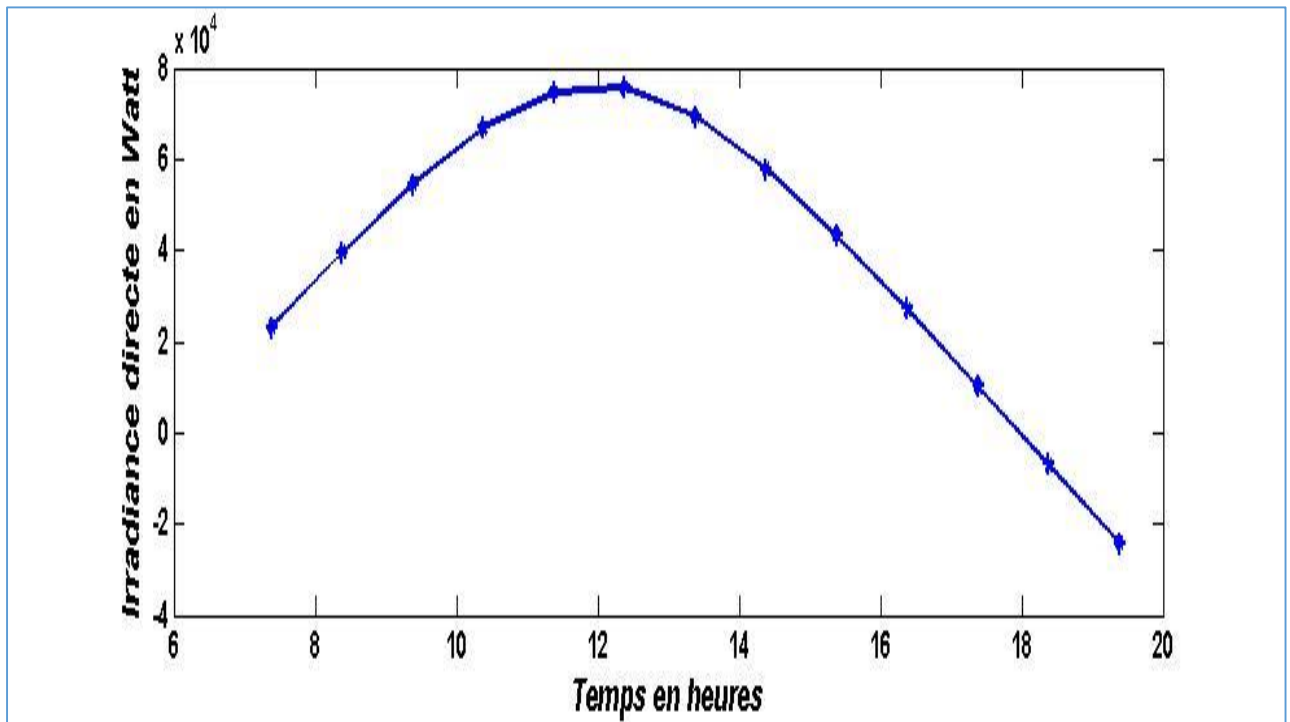


Figure 4.2 : Irradiance solaire reçue sur Oran.

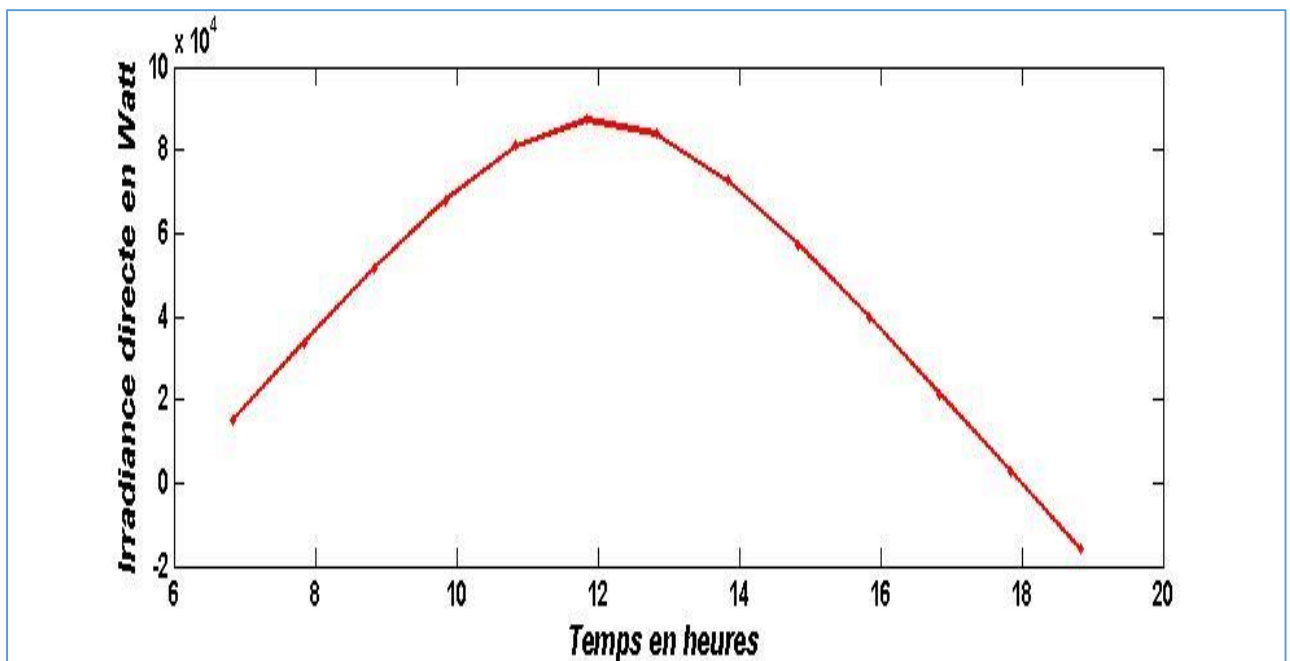
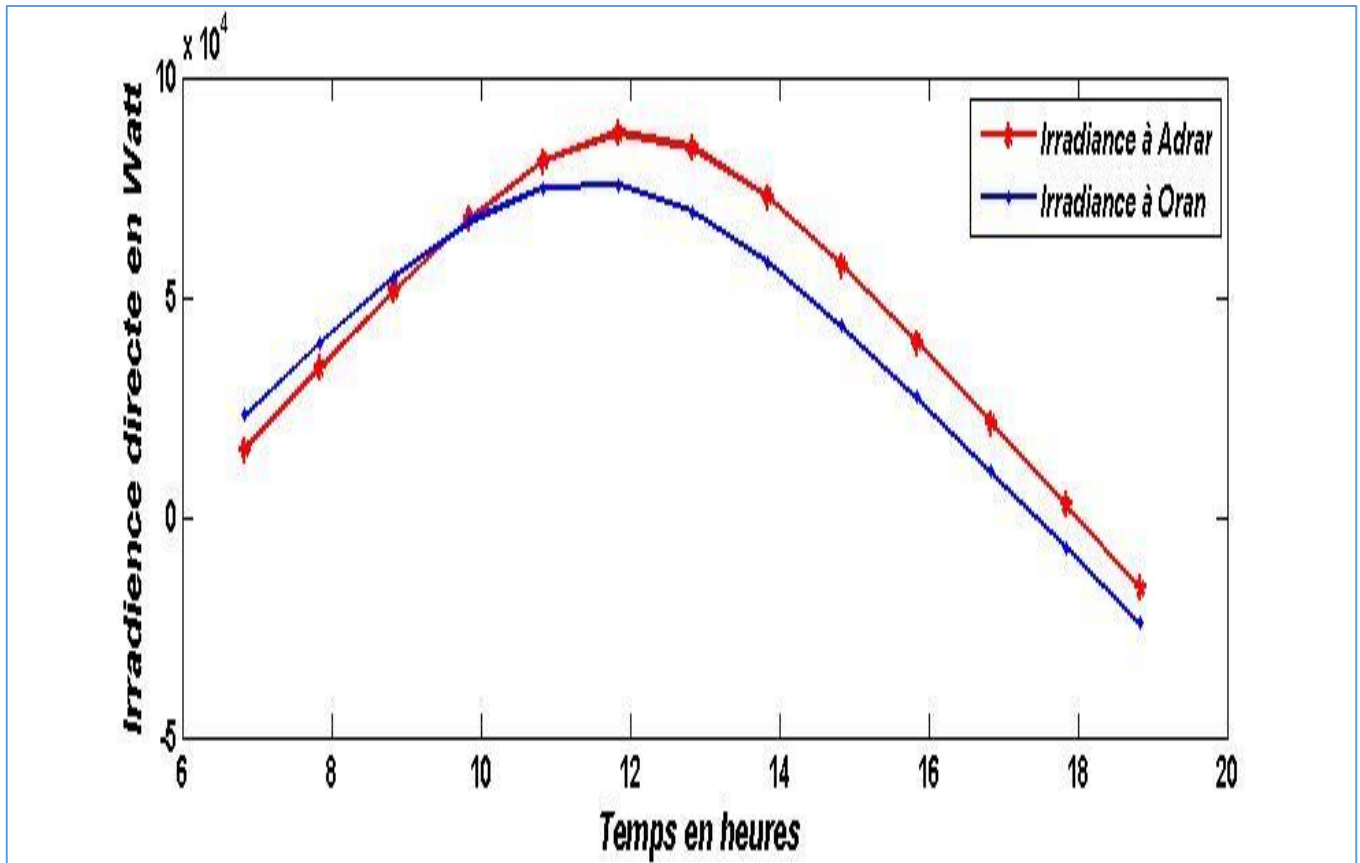


Figure 4.3 : Irradiance solaire reçue sur Adrar.

On remarque qu'il y'a une différence perceptible sur l'amont d'énergie reçu sur les deux sites en notant bien que les calculs sont fait le même jour

La figure 4.4 illustre la différence entre la quantité d'énergie reçue sur les sites



**Figure 4.4** : Comparaison de l'amont énergétique sur les deux sites.

### 4.3 Présentation du processus de conception

Afin de maximiser l'apport en énergie collecter tout en réalisant un système en volume modéré, cela dépend de plusieurs facteurs et contraintes de nature techniques et technologiques.

Cette thèse s'intéresse aux méthodes d'analyse du développement (concentrateur parabolique) et à la présence du nouveau design pour effectuer le processus de conception sur une configuration parabolique; deux contributions sont couvertes. Tout d'abord, un nouveau modèle du problème de conception a été développé à partir d'un sketch Up qui est un logiciel de modélisation 3D interactif, et d'un répartiteur de classeur démonstratif de afin d'améliorer la prise en compte du système d'interactivité ( irradiation solaire et concentrateur parabolique), basé sur un algorithme efficace: l'algorithme de recherche gravitationnelle, ces derniers ont été proposés afin de prendre en compte les contraintes non linéaires, l'outil de fabrication de réalité virtuelle a été développé. Puis un développement, test et fabrication d'une carte électronique

pour concentrateur parabolique, visant à assurer la faisabilité et la robustesse de la solution optimale obtenue et de la piste solaire optimale. Enfin, une construction d'un prototype avec des matériaux modernes, des tests et un raffinement de conception, ce processus est établi avec différentes phases d'ingénierie schématisées dans la figure 4.5.

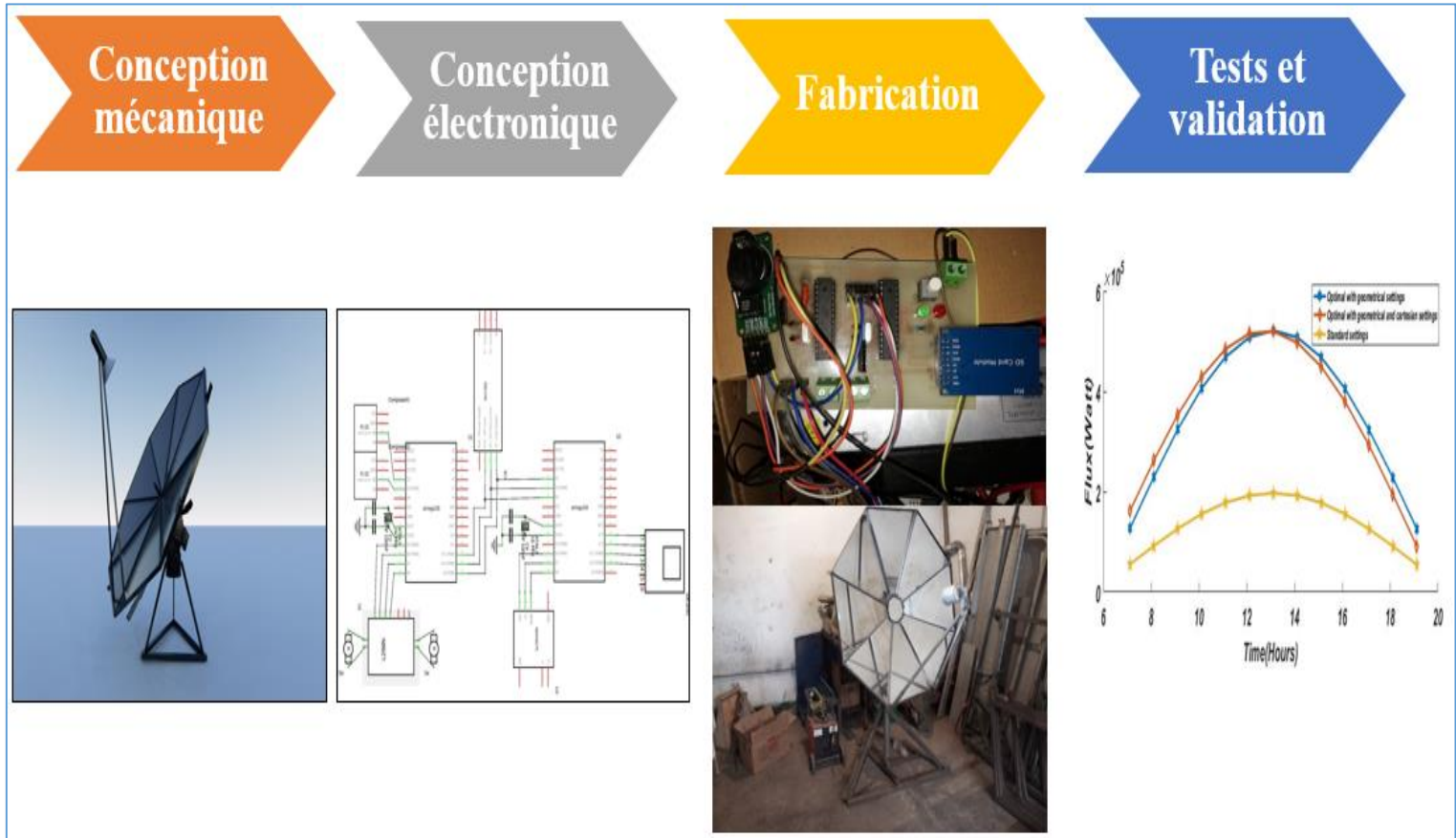
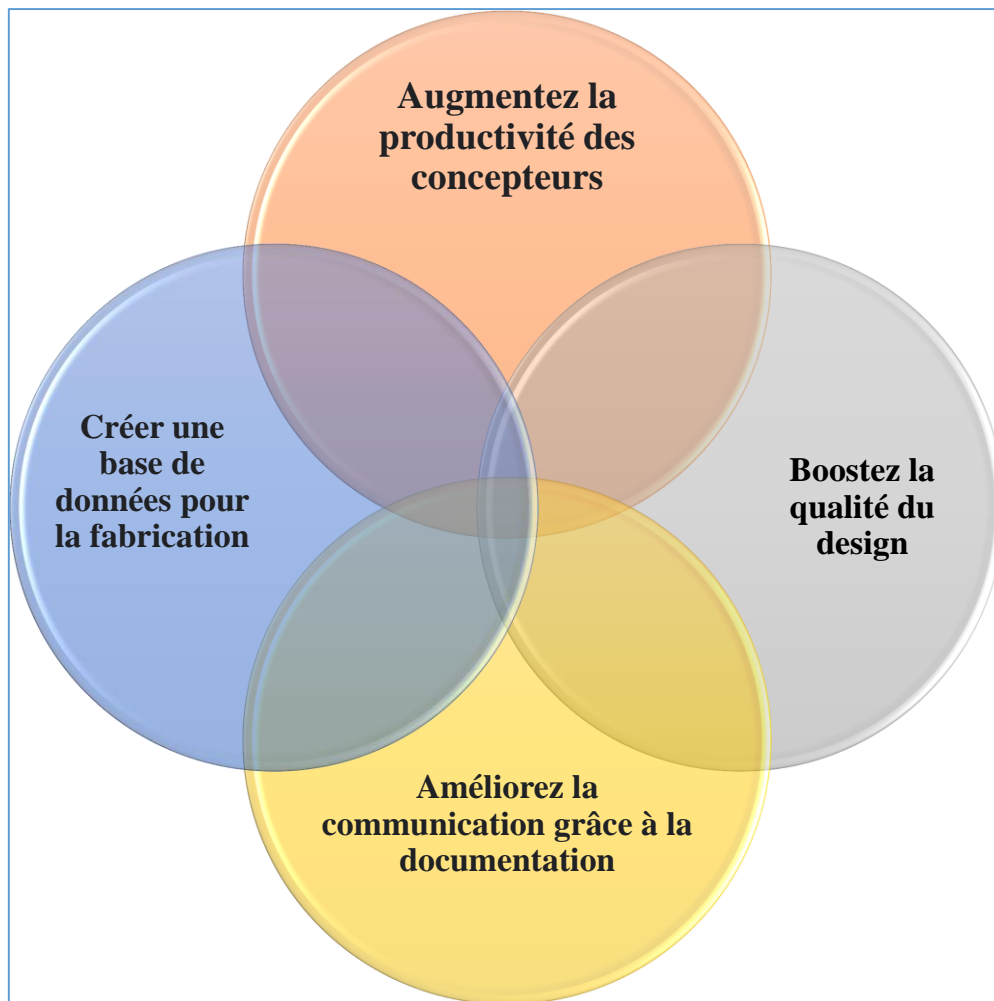


Figure 4.5 : process de conception.

#### 4.4 Conception assisté par ordinateur

La conception de systèmes en génie mécanique tels que motoréducteurs, concentrateurs paraboliques est une opération très compliquée qui nécessite des outils logiciels hautement interactifs il est donc important de diversifier cette simulation interactive pour atteindre les concepteurs de systèmes solaires, et cela permet de mieux comprendre l'aspect réel du système.

Dans la figure 4.6 nous nous intéressant à la présentons le concept et l'approche de la réalité virtuelle.



**Figure 4.6** : Concept de fabrication en réalité virtuelle.

Afin d'avoir des résultats optimaux, l'utilisation de la réalité virtuelle est un atout crucial. Il peut être défini comme l'utilisation de systèmes informatiques pour prendre en charge plusieurs approches de conception telles que la création, la modification, l'analyse et l'optimisation. [1, 2,3]. Le processus implémenté est le résultat de l'interactivité entre les CAO à savoir (SolidWorks, Matlab).

#### **4.4.1 Présentation du logiciel MATLAB**

MATLAB est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert et programmable qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité.

La figure 4. illustre la page d'accueil du logiciel.

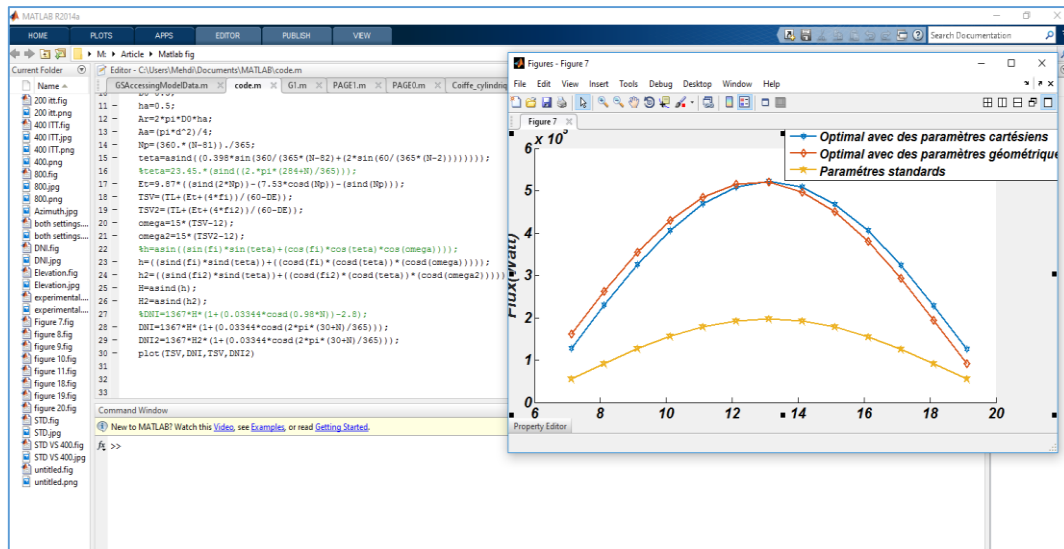


Figure 4.7 : Présentation du logiciel MATLAB

#### 4.4.2 Présentation du logiciel PROTEUS

Proteus Professional est une suite logicielle destinée à l'électronique. Il est développé par la société Labcenter Electronics, les logiciels inclus dans Proteus Professional permettent la CAO (Conception Assistée par Ordinateur) dans le domaine électronique. Cette suite logicielle est très connue dans le domaine de l'électronique.

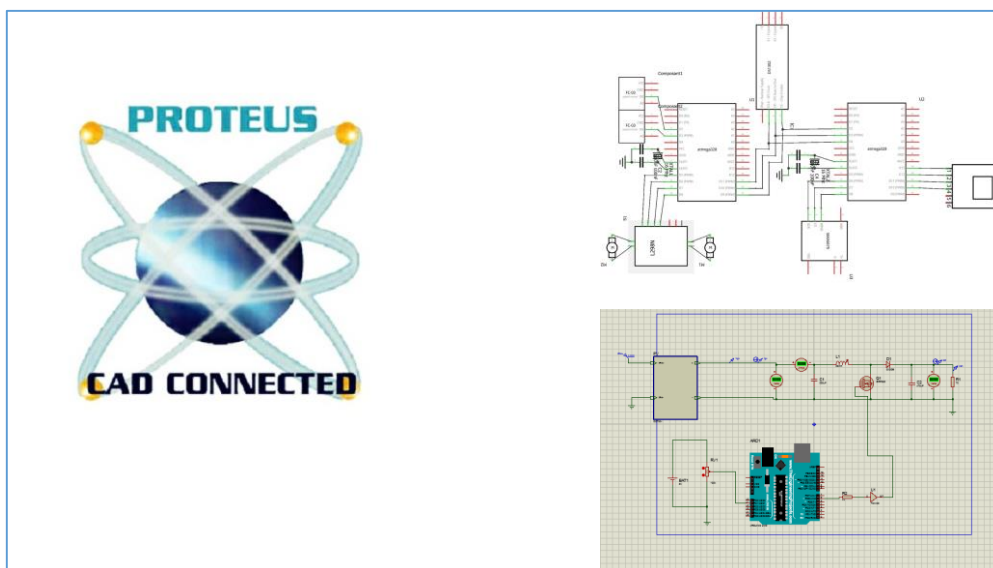


Figure 4.8 : Présentation du logiciel PROTEUS.

#### 4.4.3 Présentation du logiciel ARDUINO IDE

La programmation des microcontrôleurs est basée sur le code machine, qui est connu comme code assembleur, ce code contient les instructions du programme, le code assembleur est bien détaillé et difficile à écrire. Le programme en code assembleur est très long et difficile à comprendre. La création des compilateurs de haut niveau a rendu facile la création et l'édition de programmes. Dans notre projet, nous avons concentré sur le compilateur ARDUINO, qui est



un compilateur de langage C/C++ pour les microcontrôleurs ATmel. ARDUINO IDE est un logiciel avec une grande variété des blocs, supports et d'outils, qui facilitent la création des projets et des applications pour les microcontrôleurs ATmel.

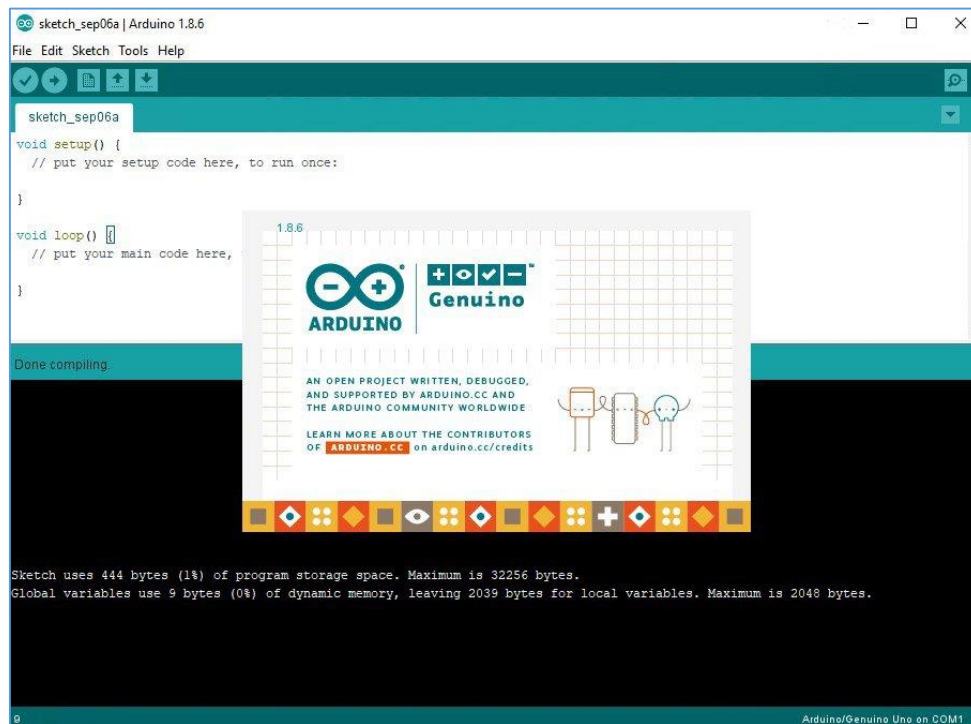


Figure 4.9 : Présentation du logiciel ARDUINO IDE.

#### 4.4.5 Présentation du logiciel SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de modélisation 3D par conception paramétrique assisté par ordinateur. Ce logiciel génère trois types de fichiers qui sont liés : la pièce, l'assemblage, et la mise en plan.

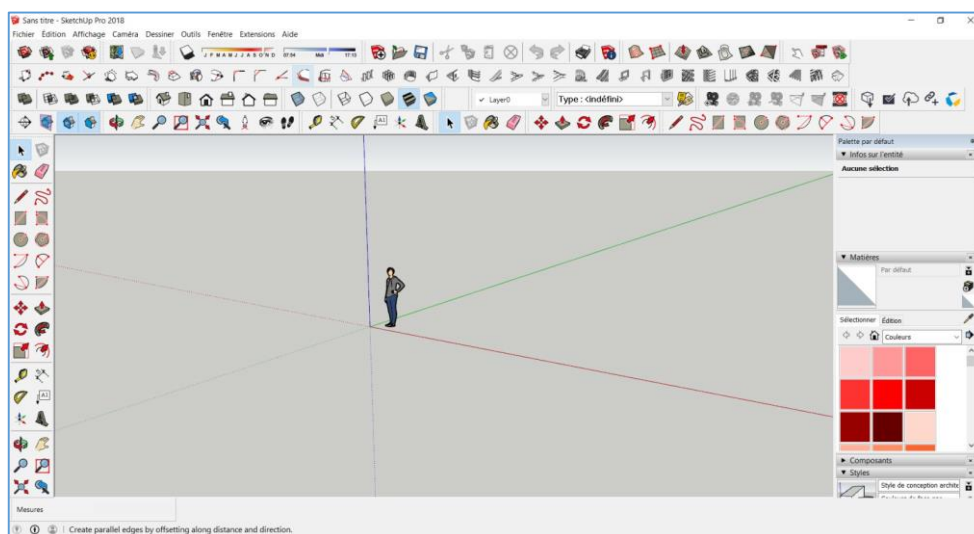
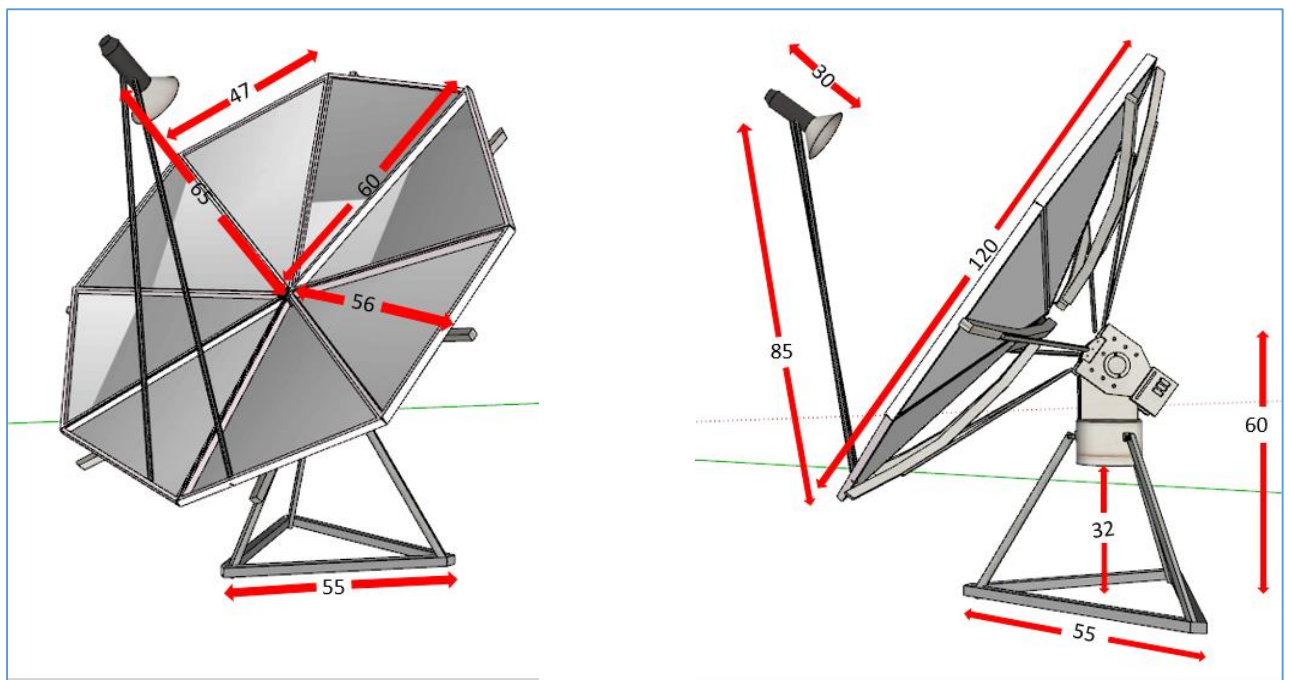


Figure 4.10 Présentation du logiciel SolidWorks.

#### 4.5 Conception mécanique

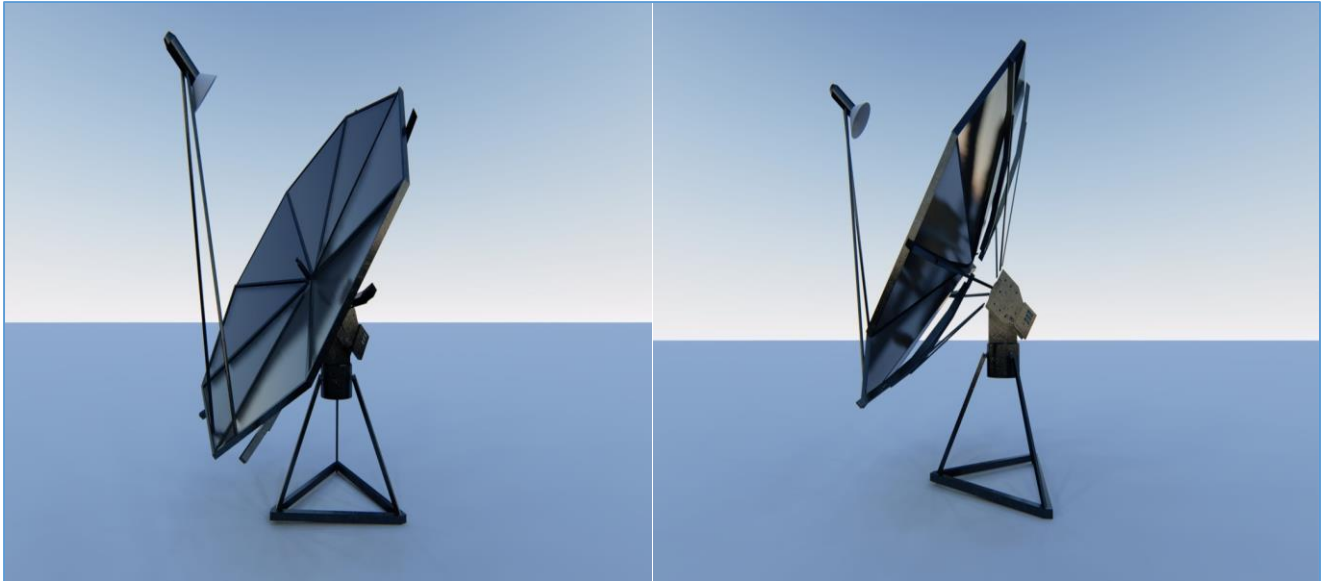
Collecteur à auge parabolique, qui est la technologie la plus établie et qui est en développement continu, l'accent étant mis principalement sur la réduction des coûts d'installation avec des matériaux modernes, accessible à tous. Une approche interactive a été adoptée pour réaliser le concentrateur à moindre coût et le plus simplement possible.

Tout d'abord, nous avons établi une conception de la parabole basée sur le logiciel sketch Up. Cette conception présente notre modèle sous sa forme standard (mesures géométriques standard). La conception mise en œuvre opte pour un système de poursuite bi-axial, l'architecture du système et son design sont tels que le système de poursuite soit libre sur les deux axes. La figure 4.11 illustre la conception sous logiciel



La figure 4.11 : conception mécanique sous logiciel

La figure suivante illustre la conception en 3D



**La figure 4.12** : conception mecanique sous logiciel en 3D.

l'objectif principal étant la réduction des coûts d'installation avec des matériaux present sur le marché. pour la base et le corps de la parabole nous avons opter por le fer, le reflecteur est en verre miroir, et le recepteur est en fonte pour une meilleur prise en chaleur.

La figure 4.13 montrent le concentrateur parabolique realiser sous differents angles



**Figure 4.13** : Le système parabolique réalisé.

#### 4.5 Conception electronique

A fin que la parabole fonctionne en performance optimale, un suivie du soleil à tous moment est exigé queleque soit l'état du ciel et l'emplacement du soleil.

Le cahier de charge exige que la carte électronique conçu soit sur deux volés. Le premier est dédié pour l'exécution du programme et l'autre pour l'aquisition des données en provenance du système

Le choix de l'instrumentation du système est fait comme tels

#### 4.5.1 Thermocouple type K plus convertisseur Max6675

Le MAX6675 effectue une compensation de soudure froide et numérise le signal d'un thermocouple de type K. La les données sont émises dans une résolution de 12 bits. Ce convertisseur résout les températures à  $0,25^{\circ}\text{C}$ , et permet lectures aussi élevées que  $+1024^{\circ}\text{C}$ .

La figure 4.14 presente la schématique du thermocouple type K avec le convertisseur MAX6675

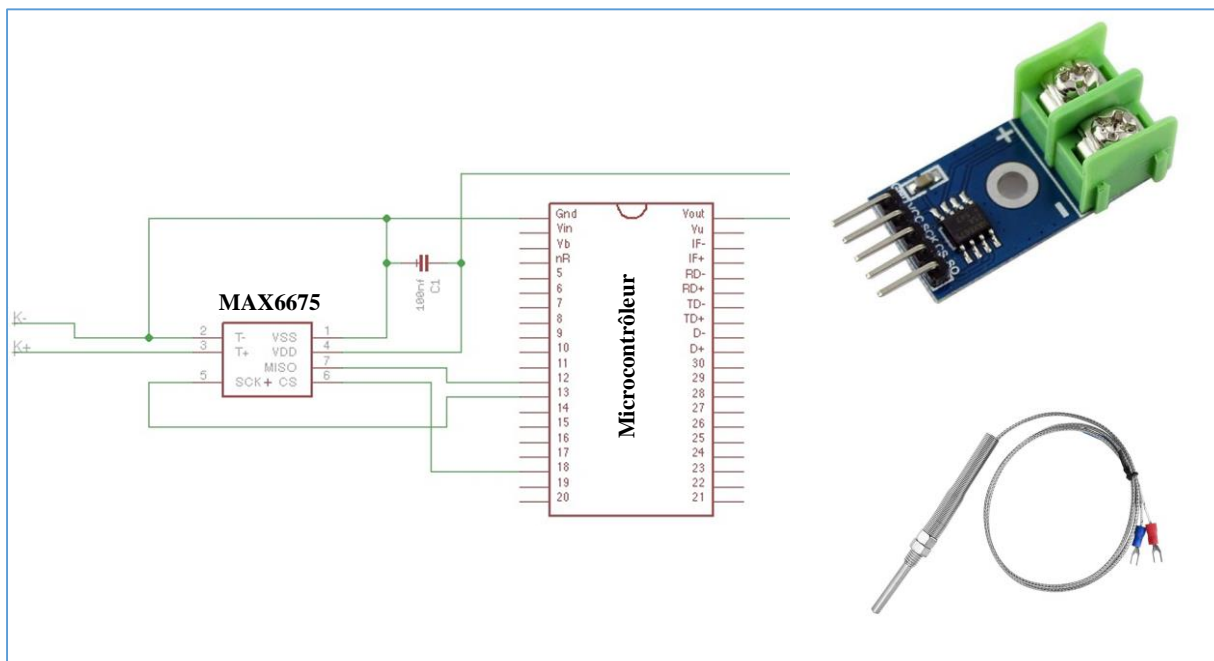


Figure 4.14 : Capteur de température (thermocouple type K)

#### 4.5.2 Horloge DS 1302

Ce module RTC (Real Time Clock) à base de DS1302 est équipé d'une pile (CR2032) lui permettant de compter le nombre de "tic" émis par le quartz 32...., même lorsque que celui ci est débranché. C'est le même principe que le système équipant les cartes mères depuis l'aube de l'informatique, lui permettant de garder en mémoire l'heure et la date, même lorsque celui-ci est éteint ou coupé de toutes sources de courant.

La figure 4.15 decrit la shématique de l'horloge DS1302

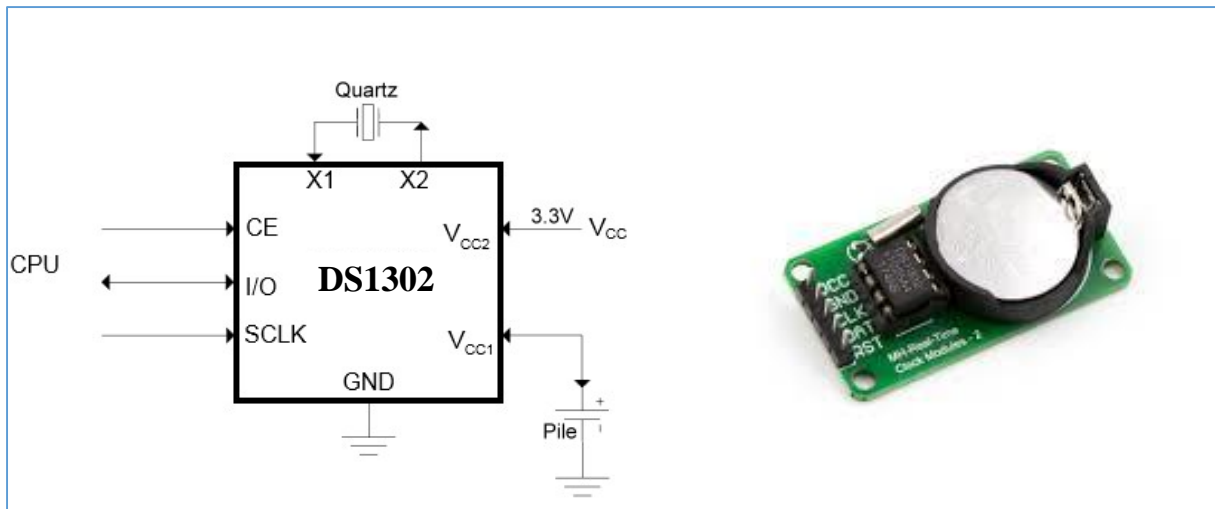


Figure 4.15 : Horloge 1302

### 4.5.3 L'accéléromètre FC03

Le capteur de vitesse moteur, l'objectif principal est de vérifier le taux d'un moteur électrique. Le module peut être utilisé en association avec un microcontrôleur pour la détection de la vitesse du moteur, le comptage des impulsions, la limite de position, etc. En principe, tout compteur de vitesse mesure simplement la vitesse à laquelle un événement se produit. Habituellement, cela se fait en comptant les événements pour une période de temps donnée (intervalle d'intégration), puis en divisant simplement le nombre d'événements par le temps pour obtenir le taux.

La figure 4.16 illustre l'accéléromètre en question.

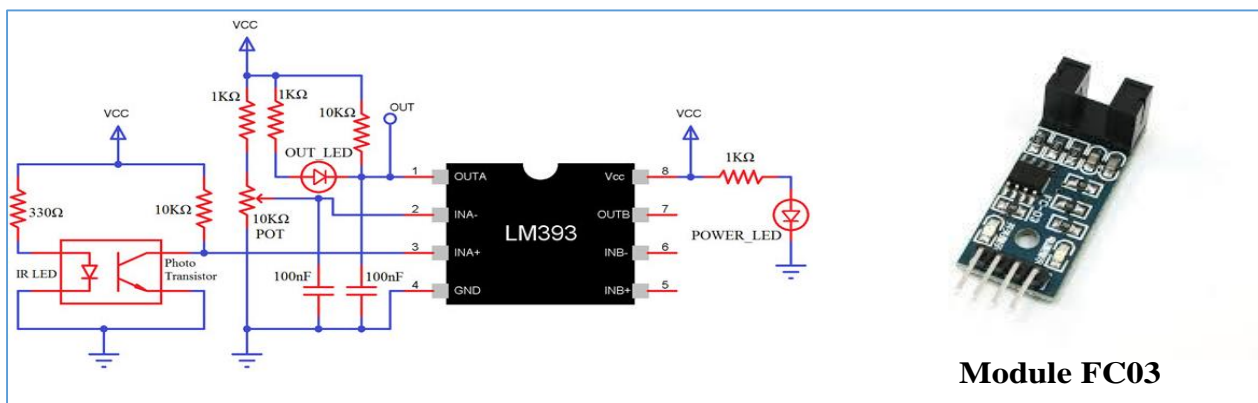


Figure 4.16 : Accéléromètre FC03.

### 4.5.4 Pont en H L298N

Ce circuit offre un bon moyen de piloter jusqu'à deux moteurs à courant continu, ou bien un moteur pas à pas.

- Il peut délivrer jusqu'à 2A en pointe et 20W en continu.

- Il possède son propre circuit d'alimentation logique (permet d'alimenter une carte électronique).

La figure 4.17 illustre le module L298N

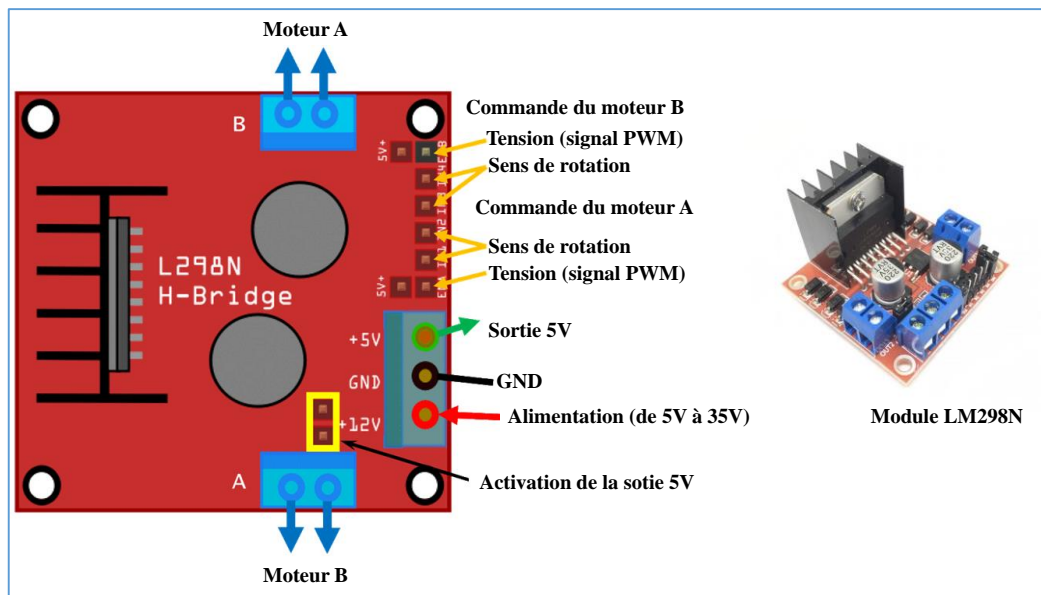


Figure 4.17 : Module L298N

#### 4.5.5 Carte SD

La carte SD étant le sigle de Secure Digital est une carte mémoire amovible de stockage de données numériques. Le but de l'utilisation de tels carte est de stocker les information des paramètres désirés pour ensuite les traiter séparément.

La figure 4.18 montre la schématique de l'adaptateur pour carte SD utiliser.

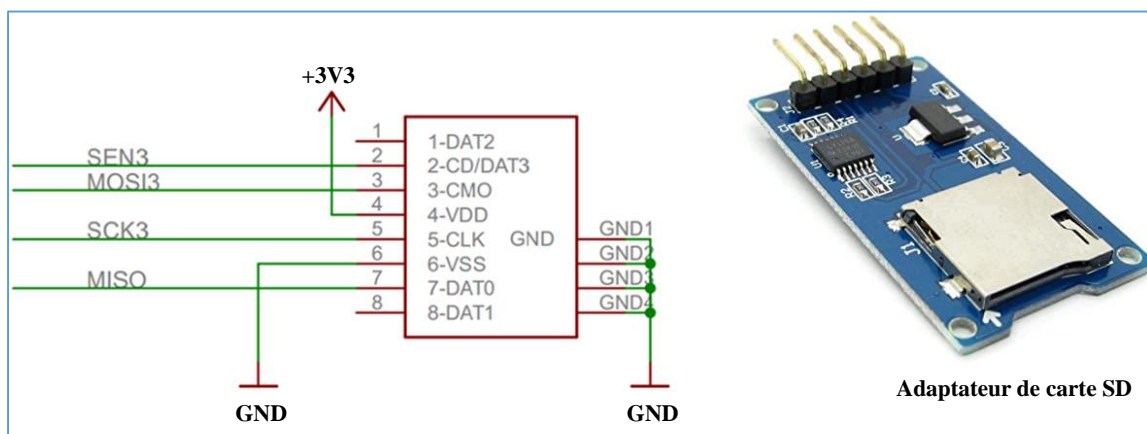
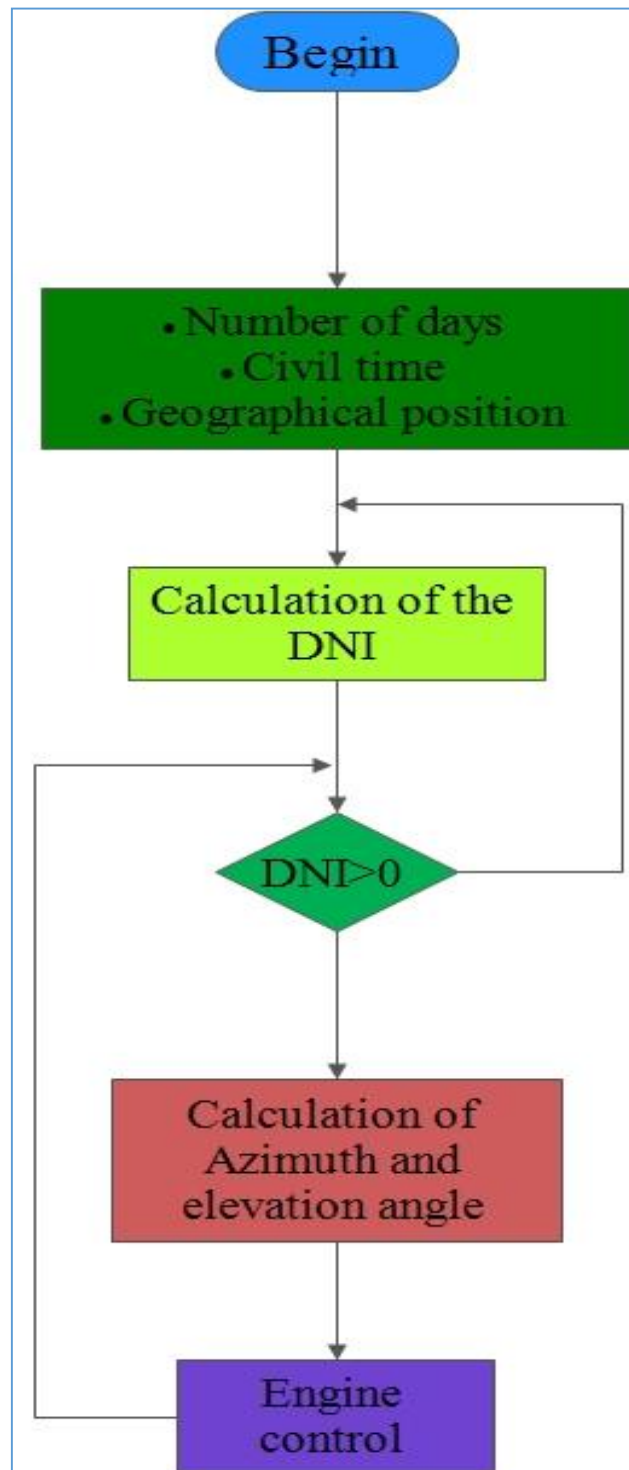


Figure 4.18 : La schématique et l'adaptateur pour carte SD.

Pour le contrôle du moteur et l'acquisition de données, le microcontrôleur ATMEGA328 a été choisi pour sa facilité de programmation via la carte microcontrôleur, une horloge Ds1302 et

pour la liaison moteur du microcontrôleur des accéléromètres FC03. La programmation se fait en langage C.

La figure 4.19 montre l'organigramme de programmation suivi.



**Figure 4.19** : Organigramme de programmation.

La carte conçu assure la commandes du système de poursuite solaire, ainsi l'aquisition des données tels que l'irradiance et l'énergie collecter sur un intervalle de temps defenie.

Le programme en question calcule le DNI et l'utilise comme condition pour exécuter les instructions, puis calcule les angles d'élévation et d'azimut traduits en impulsions comptées par l'accéléromètre FC03 commandant ainsi les moteurs.

La figure 4.20 illustre les résultats de compilation du programme de commande afin d'actionner les moteurs

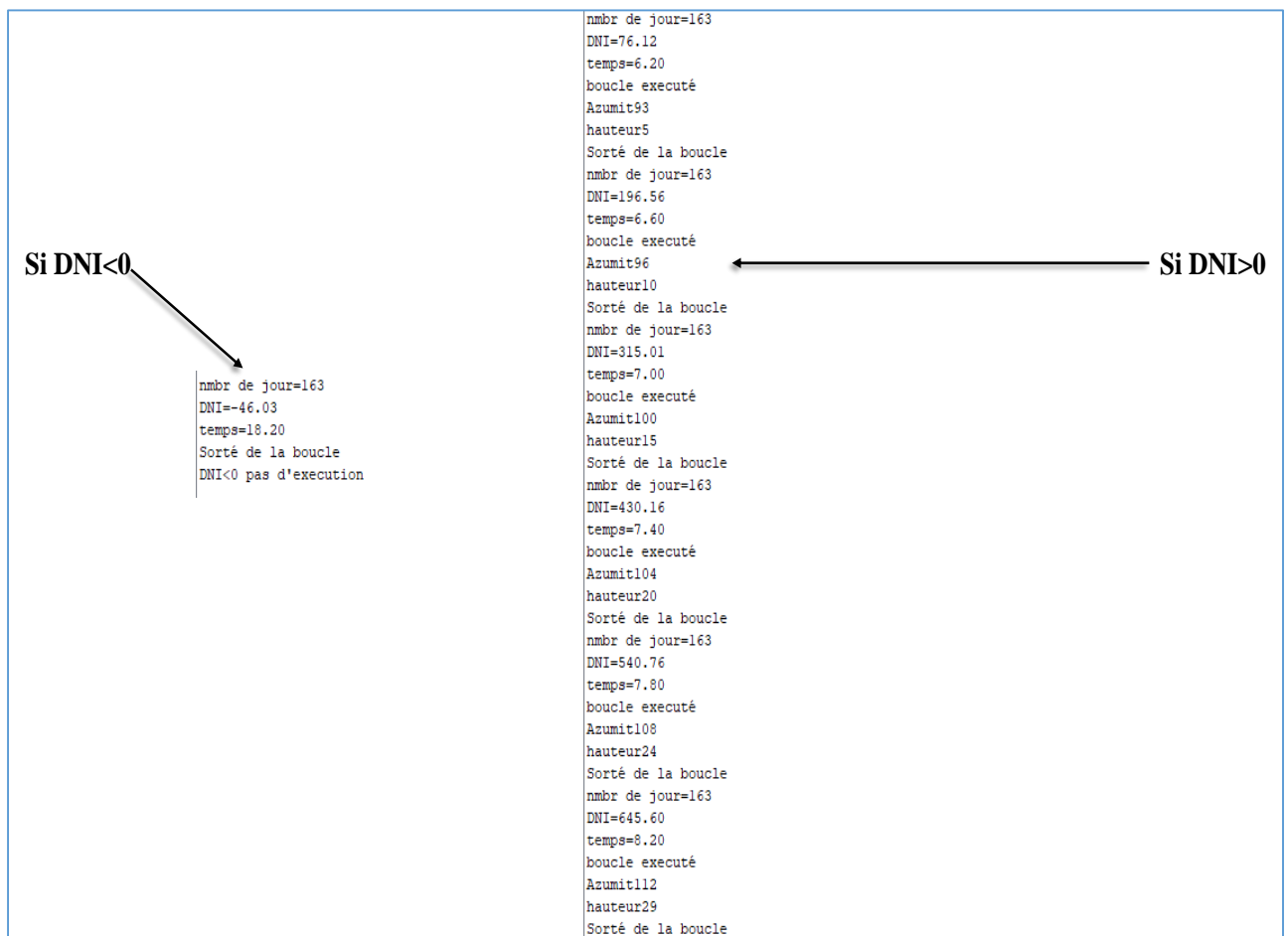


Figure 4.20 : Compilation du programme d'exécution.

La figure 4.21 illustre la schématique de la carte conçu en question.



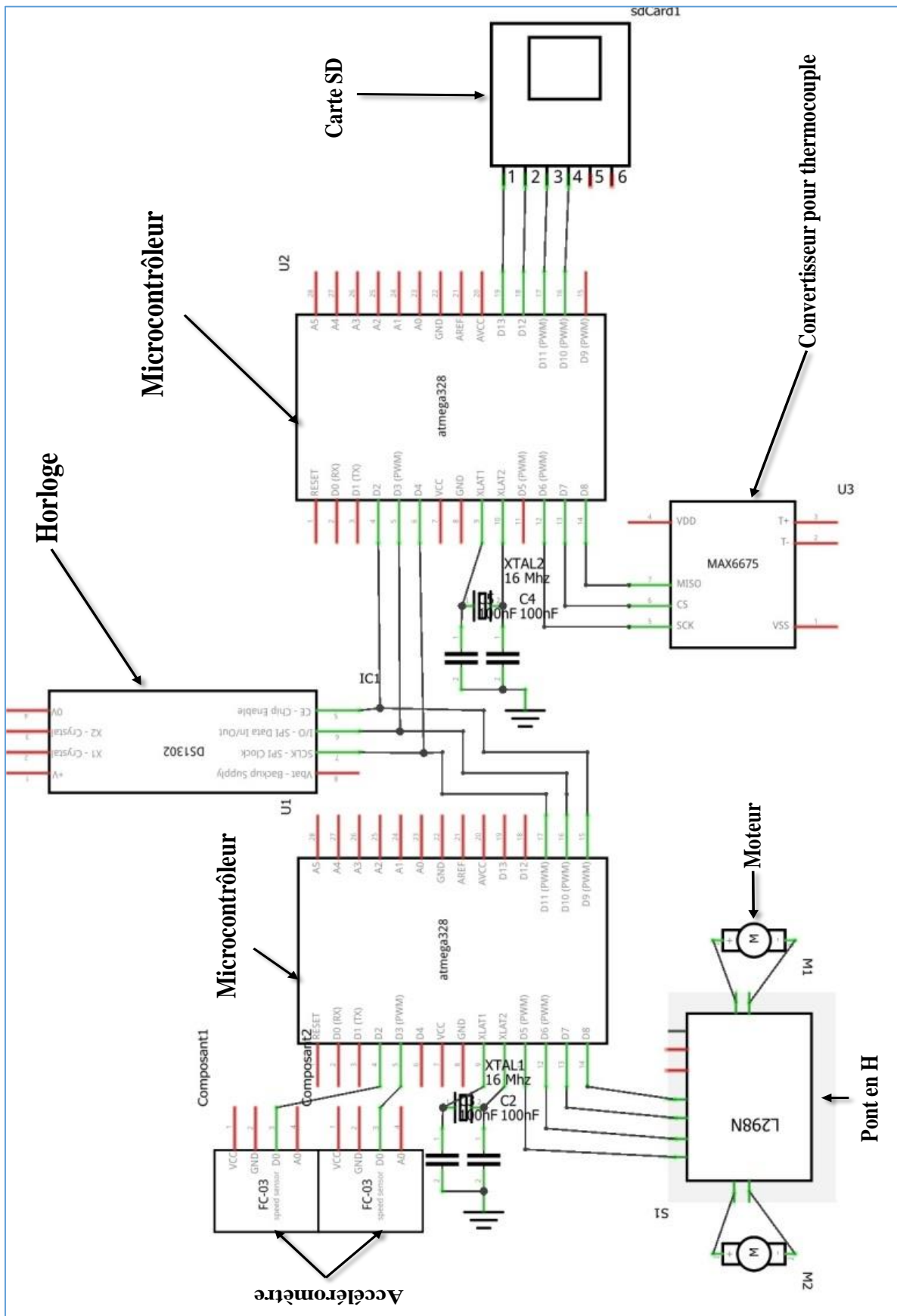
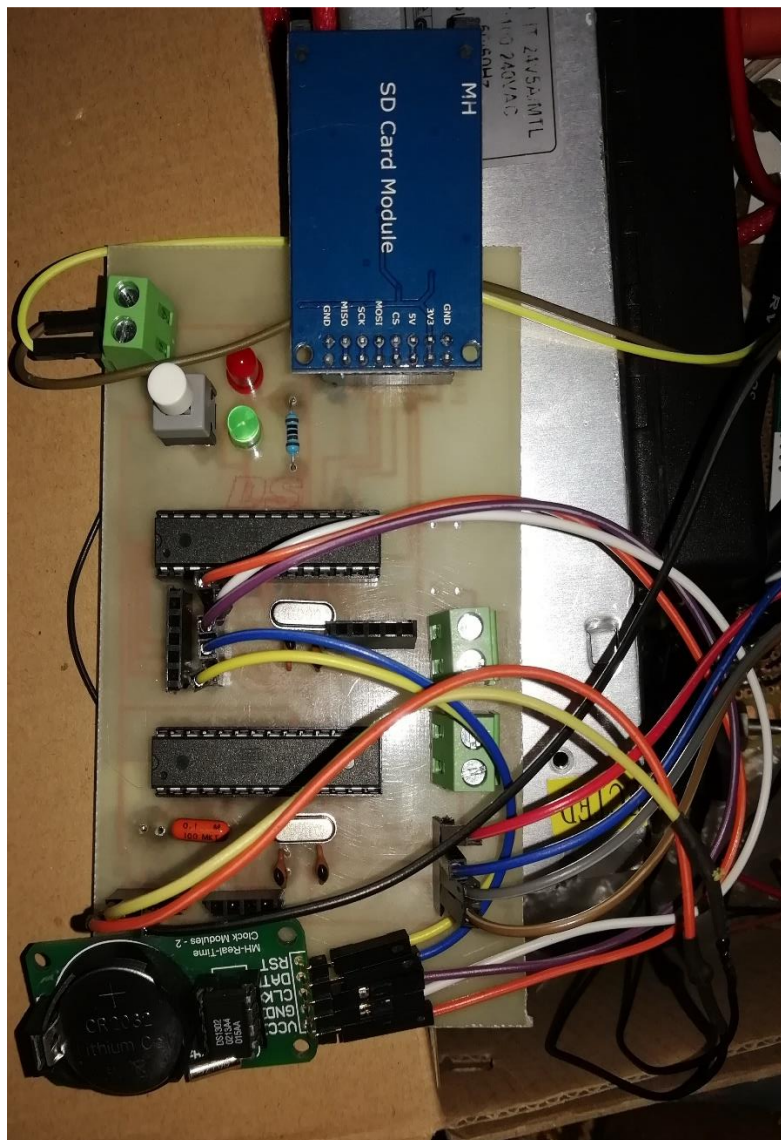


Figure 4.21 : La schématique de la carte électronique.

La carte se compose de deux cartes Atmega intégrées, la première est chargée de la commande du moteur et l'autre du stockage des différentes informations relatives au système. Il est accompagné d'une carte mémoire SD pour le stockage et d'un capteur LM74 pour ne pas mesurer la température du concentrateur. De plus pour assurer la synchronisation entre les deux circuits est reliée par une horloge DS1302.

La figure suivante illustre un photo réelle de la carte réalisée.



**Figure 4.22** : La carte électronique réalisée.

#### 4.6 Le système de tracking

Le système de suivi solaire soutient la surface du capteur solaire normalement au soleil [4]. Tout au long de la journée, le système change de position en suivant le soleil pour maximiser la capture d'énergie. Nous citons deux manières différentes de suivre les systèmes, à savoir une méthode passive pour laquelle il n'y a pas besoin de contrôleurs, de moteurs et d'engrenages, et une autre active, louée par les contrôleurs et utilisant des moteurs et des engrenages. Le suivi

permet de minimiser l'angle entre la lumière du soleil et la surface du collecteur afin d'augmenter la quantité d'énergie produite. Le concentrateur a deux degrés de liberté (élévation et azimut) pour suivre efficacement le soleil. Ce système peut détecter un 180 degrés de rotation (azimut) afin de générer une puissance élevée à la sortie [5].

Dans la figure 4.23 nous traduisons les paramètres d'entrée / sortie du système de suivi.

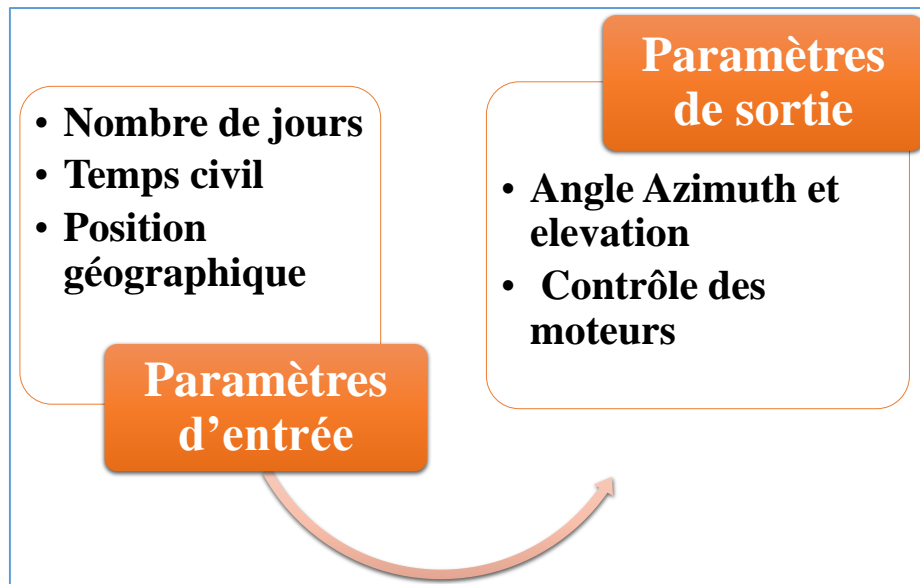


Figure 4.23 : Paramètres du système de poursuite.

Pour un suivi optimal du soleil, l'implémentation d'une boucle de régulation est nécessaire. Ce suivi se fait de manière assez indépendante, contrairement aux capteurs cylindro-paraboliques paraboliques.

La figure 4.24 présente la boucle de régulation du système en question.

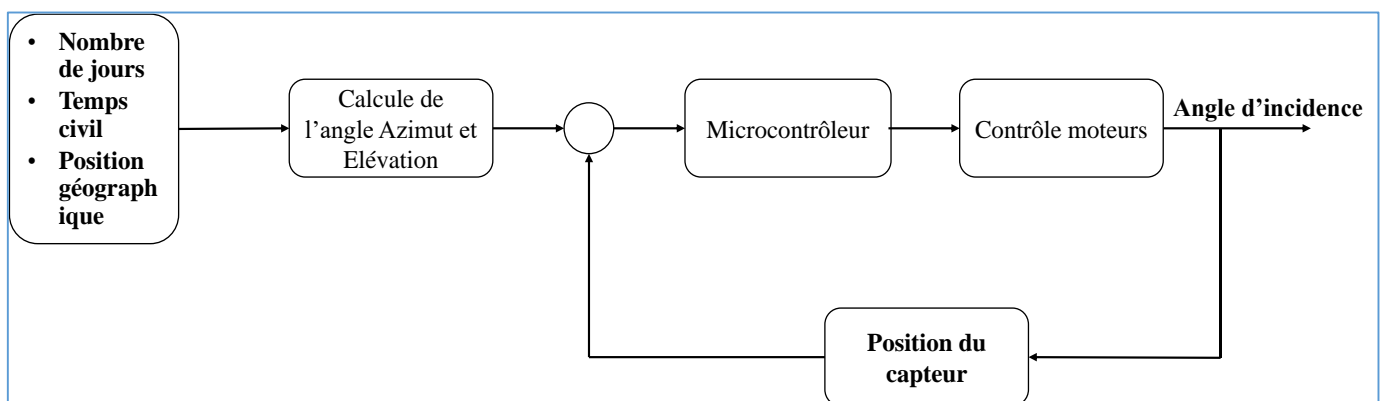
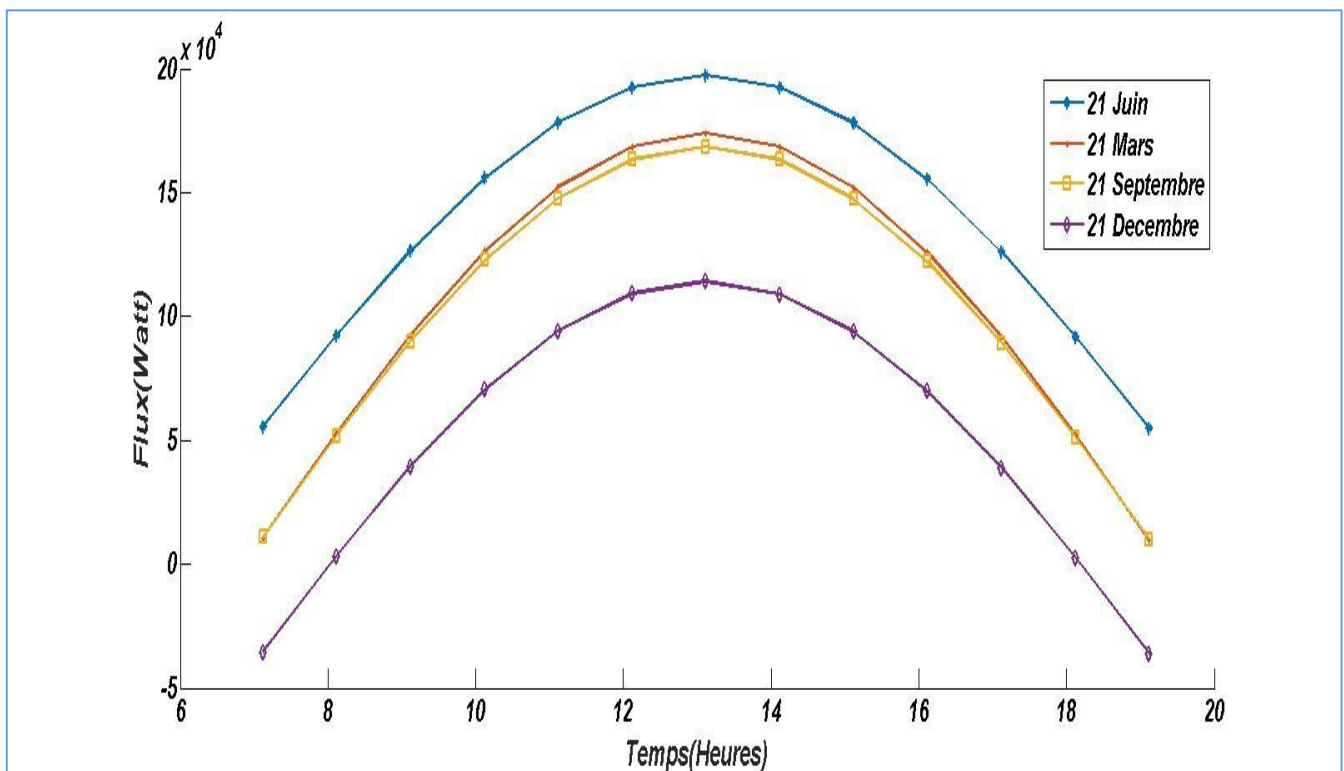


Figure 4.24 : Schéma fonctionnel du système de suivi.

#### 4.7 Interprétation des résultats

Le calcul du rayonnement solaire normal se fait suivant une procédure de calcul et de programmation pour simuler le rayonnement considéré, ce calcul dépend essentiellement des équations qui traduisent la position du soleil à chaque instant pour une concentration optimale obtenant ainsi un flux maximum. La figure 6 traduit la variation du rayonnement direct pendant les quatre jours des solstices des quatre saisons (21 mars, 21 juin, 21 septembre et 21 décembre) du lever au coucher du soleil.

La figure 4.25 montre l'évolution du flux solaire utile.



**Figure 4.25 :** L'évolution du flux solaire utile.

D'un point de vue pratique, le calcul de l'irradiance solaire se rapproche du calcul théorique. C'est fait grâce à la température concentrée tout au long de la journée

Les chiffres suivants traduisent les résultats obtenus à partir des calculs effectués tout au long de notre étude.

La figure 4.26 décrit l'évolution du flux utile expérimental.

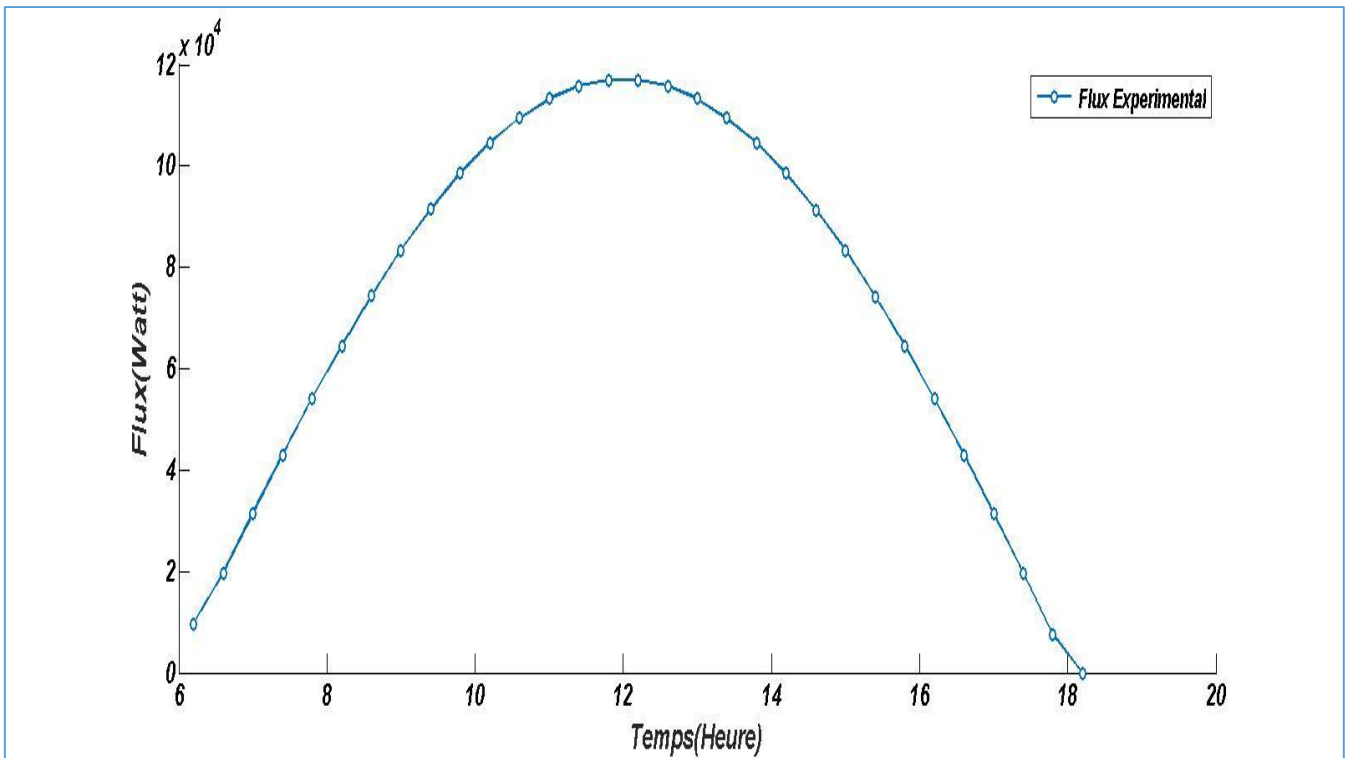


Figure 4.26 : L'évolution du flux utile expérimental.

La figure 4.27 présente l'évolution de l'angle azimutal.

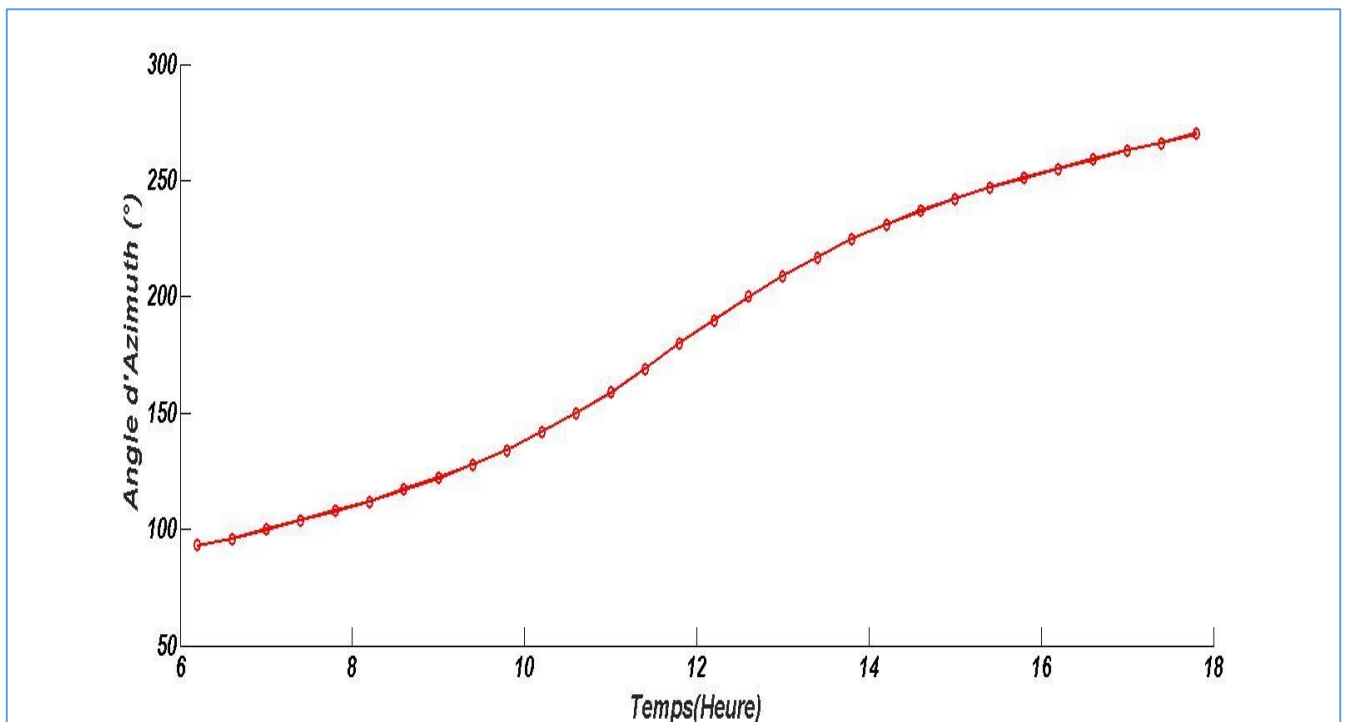
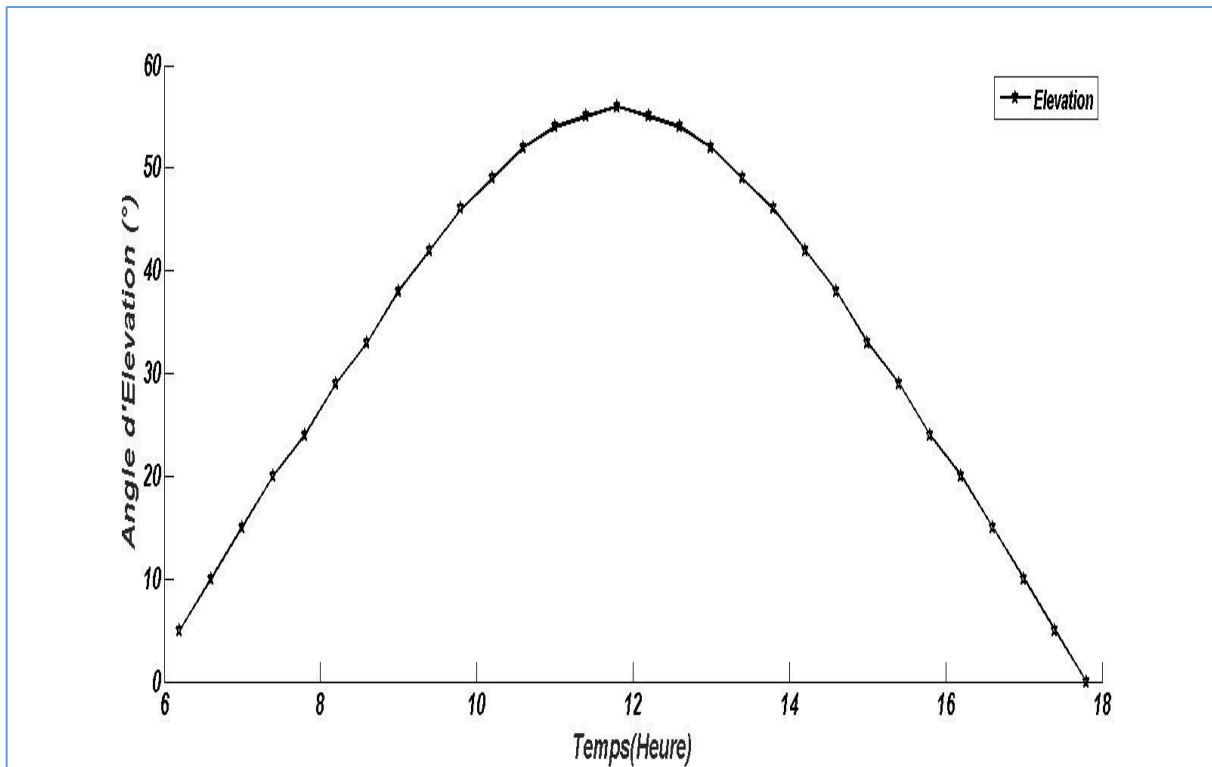


Figure 4.27 : L'évolution de l'angle azimutal.

La figure 4.28 illustre l'évolution de l'angle d'élévation.



**Figure 4.28** : L'évolution de l'angle d'élévation.

#### 4.7.1 Paramétrage de l'algorithme

L'utilisation de l'algorithme de recherche gravitationnelle nous permet de maximiser le flux solaire concentré en optimisant les paramètres géométriques et géographiques les figures suivantes décrivent l'évolution du flux solaire au cours de la journée.

Plusieurs paramètres de contrôle sont proposés dans cet article afin d'atteindre la meilleure valeur, les tableaux suivants présentent les paramètres en question.

Tableau A, B, C suivie des figures 4.29, 4.30, 4.31 illustre les réglages des paramètres GSA ainsi les graphes de convergence pour chaque nombre d'itérations.

(A : 200 itérations.)

---

**GSA**

---

N=200

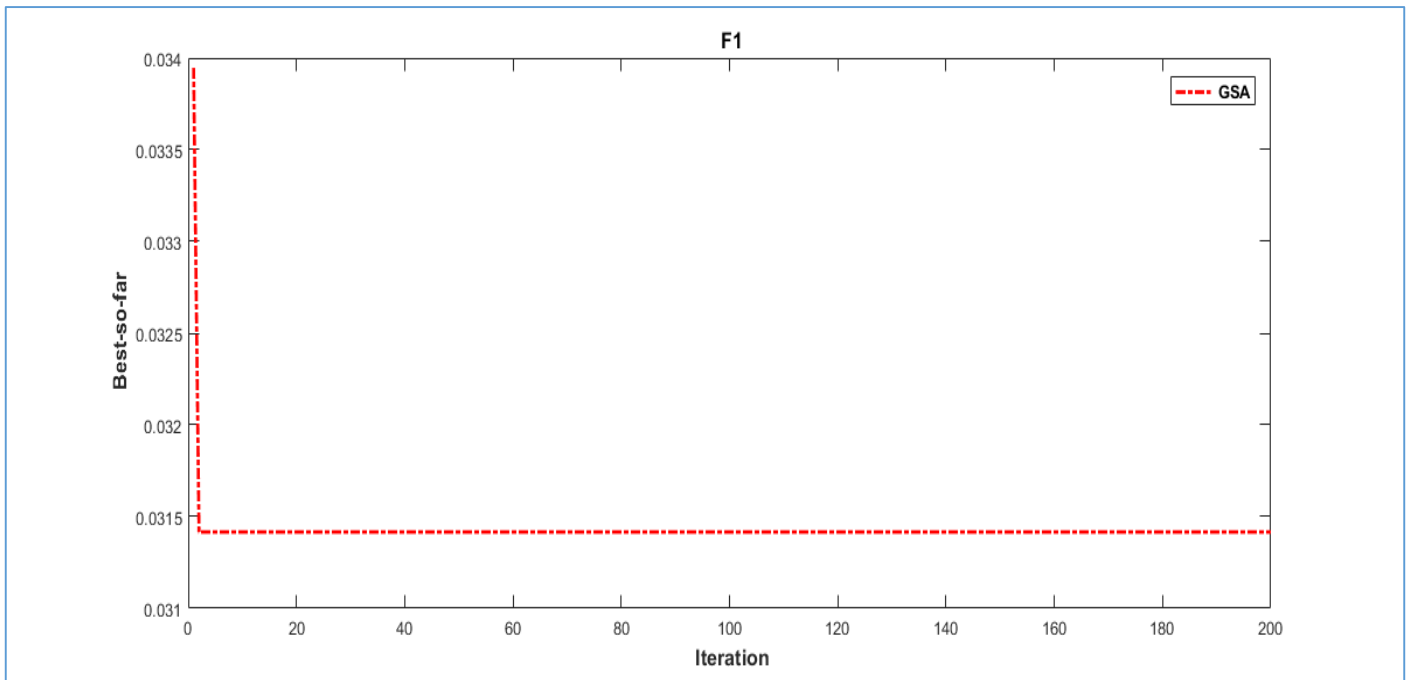
Max itération =200

Elitist Check :

Mass  $M_a=M_p=M_i=M$ :Random

Velocity : Random

---



**Figure 4.29** : Graphe de convergence pour 200 itérations.

(B: 400 iterations.)

---

**GSA**

---

N=200

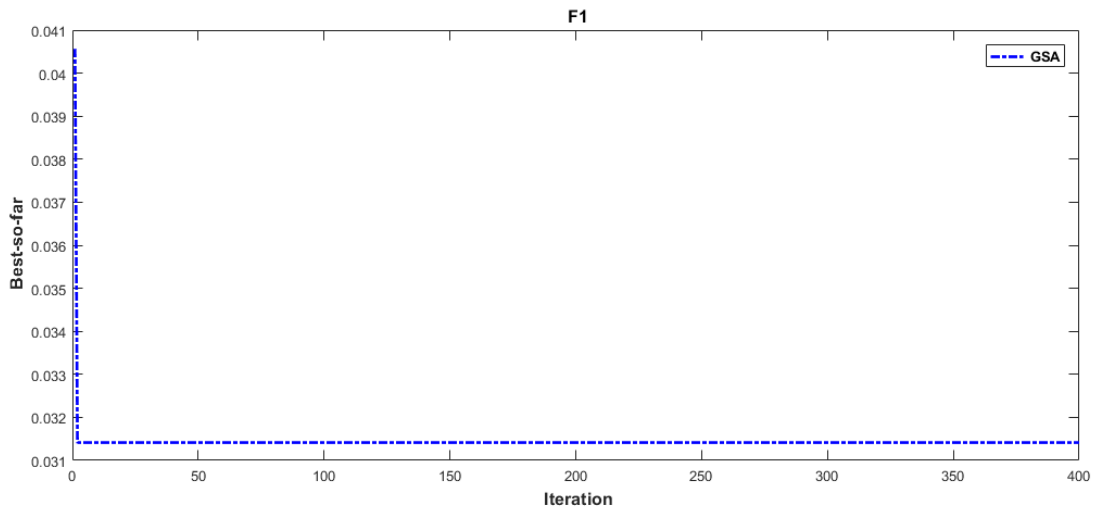
Max iteration =400

Elitist Check:

Mass  $M_a=M_p=M_i=M$ :Random

Velocity : Random

---



**Figure 4.30** : Graphe de convergence pour 400 itérations.

(C: 800 iterations.)

---

**GSA**

---

N=200

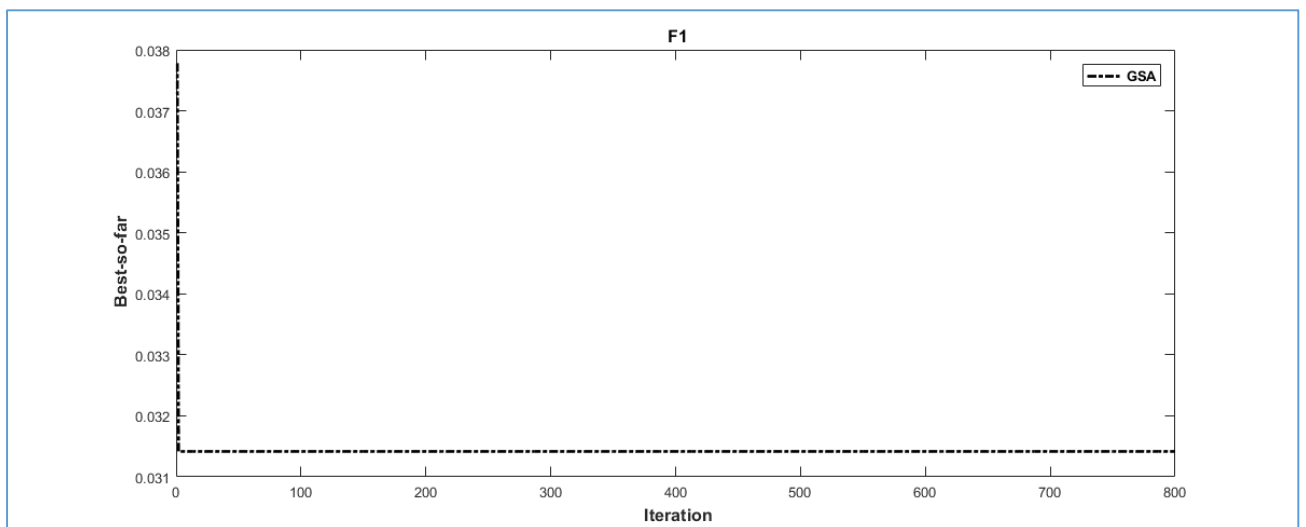
Max iteration =800

Elitist Check:

Mass Ma=Mp=M<sub>i</sub>=M:Random

Velocity : Random

---



**Figure 4.31** : Graphe de convergence pour 800 itérations.



Les résultats sont aléatoires et ne dépendent pas du nombre d'itérations car nous pouvons avoir un résultat plus significatif avec moins d'itérations, plusieurs tests nous ont permis d'avoir les meilleurs résultats dans une plage restreinte. Nous avons remarqué que l'algorithme nous donne approximativement les mêmes résultats sur chaque paramètre de contrôle.

Tableau 4.1 Les résultats obtenus pour chaque test

| Parameters            | Standard values | Minimum value | Maximum value | 200 Iterations | 400 Iterations | 800 Iterations |
|-----------------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>d</b>              | 0.6             | 0.5           | 1             | 0.5            | 1              | 0.5            |
| <b>D<sub>vo</sub></b> | 0.005           | 0.001         | 0.003         | 0.003          | 0.001          | 0.001          |
| <b>h<sub>p</sub></b>  | 1.5             | 1             | 2             | 2              | 2              | 1.5            |
| <b>D<sub>o</sub></b>  | 0.05            | 0.005         | 0.2           | 0.05           | 0.05           | 0.05           |
| <b>h<sub>a</sub></b>  | 0.3             | 0.1           | 0.5           | 0.1            | 0.1            | 0.1            |

À partir de ces résultats, il a été constaté que les meilleures valeurs sont obtenues à 400 itérations, nous avons donc implémenté ces résultats dans notre programme.

Sur les figures 4.32, 4.33, 4.34 nous traduisons les résultats du flux obtenus avec les nouveaux paramètres en les comparant à ceux des résultats standards.

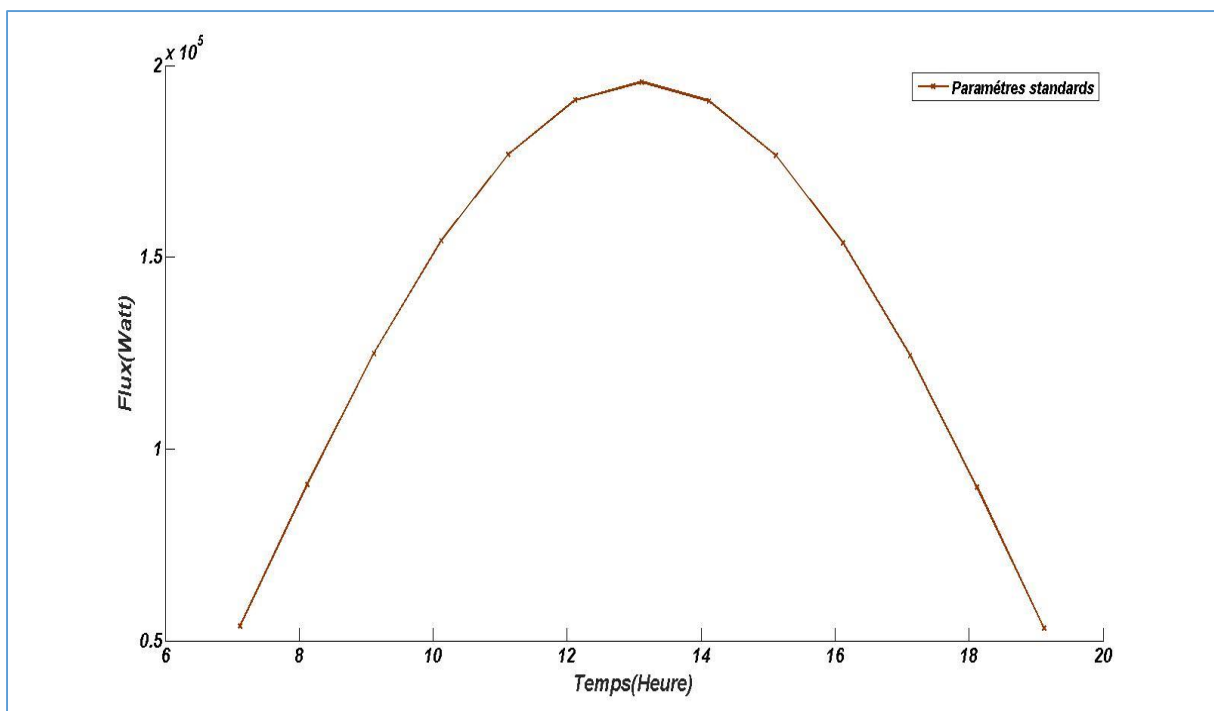


Figure 4. 32 : Évolution du flux solaire utile en les paramètres standard.

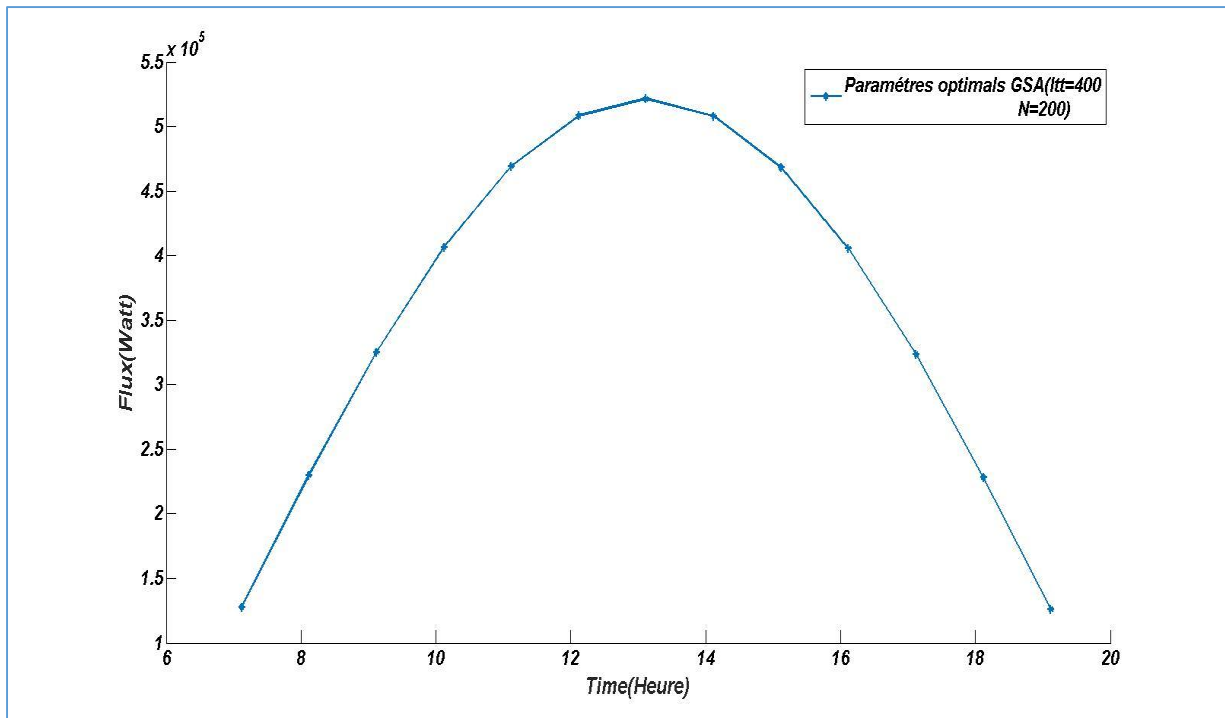


Figure 4.33 : Évolution du flux solaire utile en les paramètres optimaux.

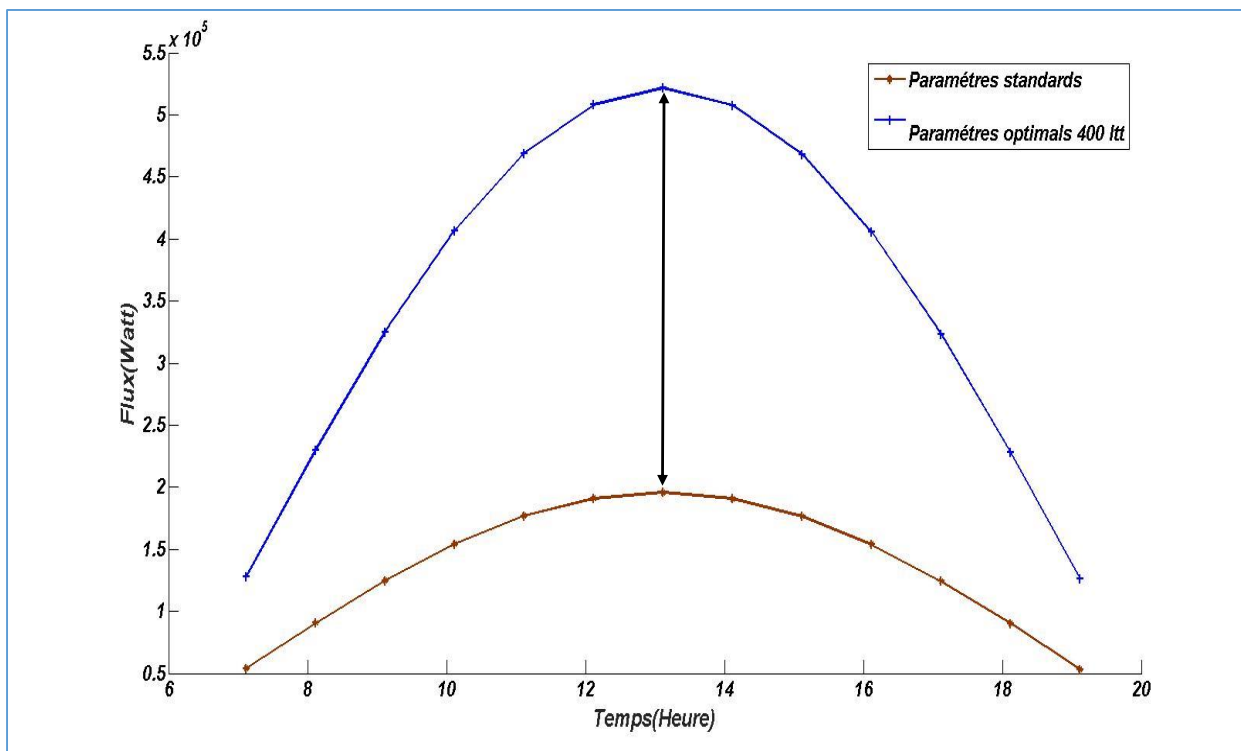


Figure 4.34 : La comparaison entre les différents paramètres.

Nous avons remarqué une augmentation significative du flux solaire qui peut s'expliquer par laquelle s'explique par le changement des valeurs du diamètre de la coupelle et aussi de la hauteur de l'absorbeur (le flux est proportionnel au diamètre tandis que la hauteur de l'absorbeur est disproportionné par rapport au flux).

Plus de résultats ont été prouvés, la mise en œuvre des coordonnées cartésiennes de notre zone d'étude (la ville d'Oran) afin d'avoir le meilleur emplacement possible pour une concentration maximale de flux solaire.

Tableau 4.2 Les résultats obtenus pour chaque test.

| Parameters | Standard values | Minimum value | Maximum value | Optimal value |
|------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| $\rho$     | 35.6911100°     | 35.372700°    | 35.70000°     | 35.6969       |
| $\lambda$  | -0.6416700°     | -0.300000°    | -0.70000°     | -0.3000       |

La figure 4.35 traduit les résultats obtenus.

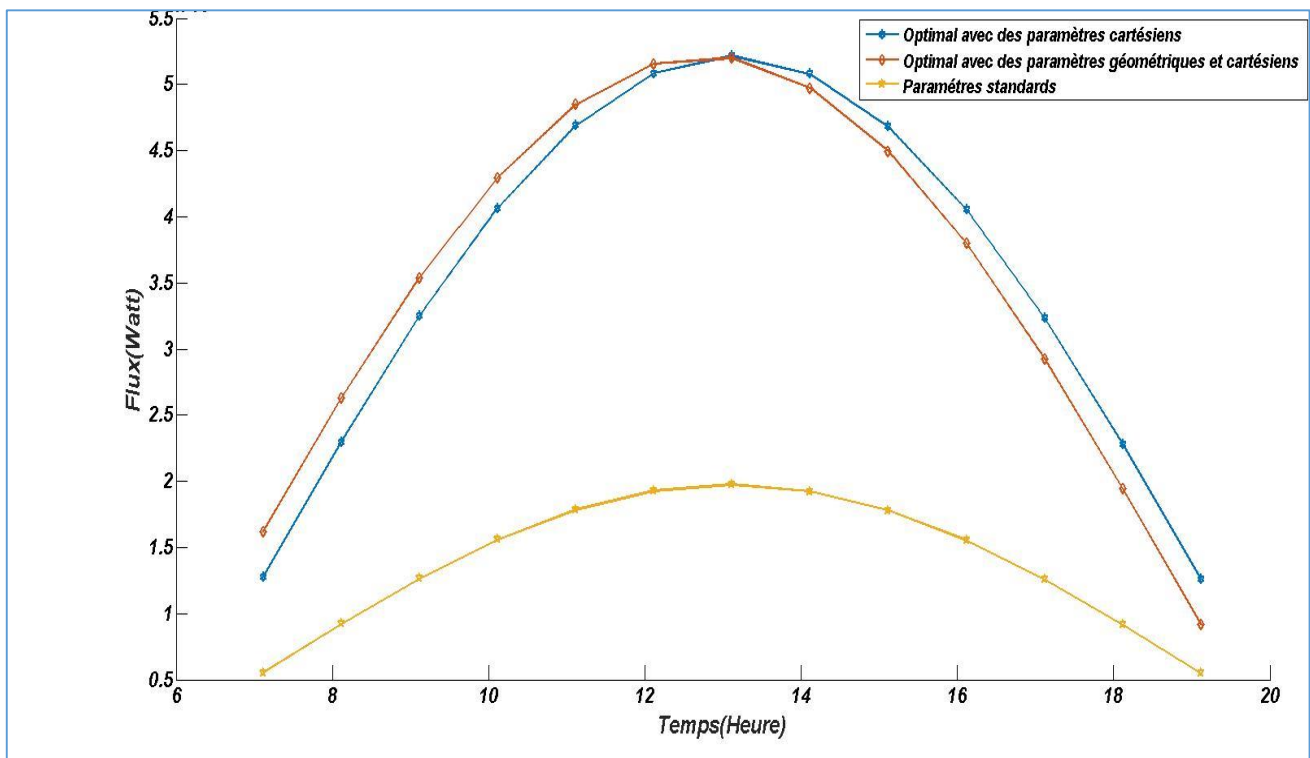


Figure 4. 35 : Comparaison entre les différents paramètres.

De plus, les résultats obtenus montrent clairement que la mise en œuvre des données cartésiennes peut apporter un plus au phénomène de concentration, on constate que dans la première moitié de la journée (avant midi solaire) le flux solaire est légèrement plus élevé tandis que pour la seconde période, il y a une légère diminution du flux solaire. Malgré cette

diminution, les résultats restent satisfaisants car le plus grand taux de flux solaire est concentré dans la première période de la journée.

#### 4.7.2 Paramétrage de l'interface graphique

La conception et l'évaluation de l'interface utilisateur offrent une vue d'ensemble du domaine de la conception centrée sur l'utilisateur. Il illustre les avantages d'une approche centrée sur l'utilisateur pour la conception de logiciels et de systèmes d'aide à la conception.

Une GUI (interface utilisateur graphique) est un système de composants visuels interactifs pour un logiciel informatique. Une interface graphique affiche des objets qui véhiculent des informations et représentent des actions pouvant être entreprises par l'utilisateur. Les objets changent de couleur, de taille ou de visibilité lorsque l'utilisateur interagit avec eux.

Dans cette section des résultats nous exposons le développement d'une interface graphique sous MATLAB, nous permettant de calculer l'intensité énergétique et de dimensionner un concentrateur solaire parabolique, ce petit logiciel nous permettant entre autre d'orienter le développement de nos modélisations.

Les figures 4.36, 4.37, 4.38 présentes l'interface graphique développée sous MATLAB, les paramètres d'entrés de processus de calcul des niveaux d'énergies collecté par la parabole suivant l'emplacement géographique ainsi les paramètres propre à la parabole (la géométrie) sont introduit par l'utilisateur qui doit préalablement les chargé grâce aux boutons dédié à cet effet.

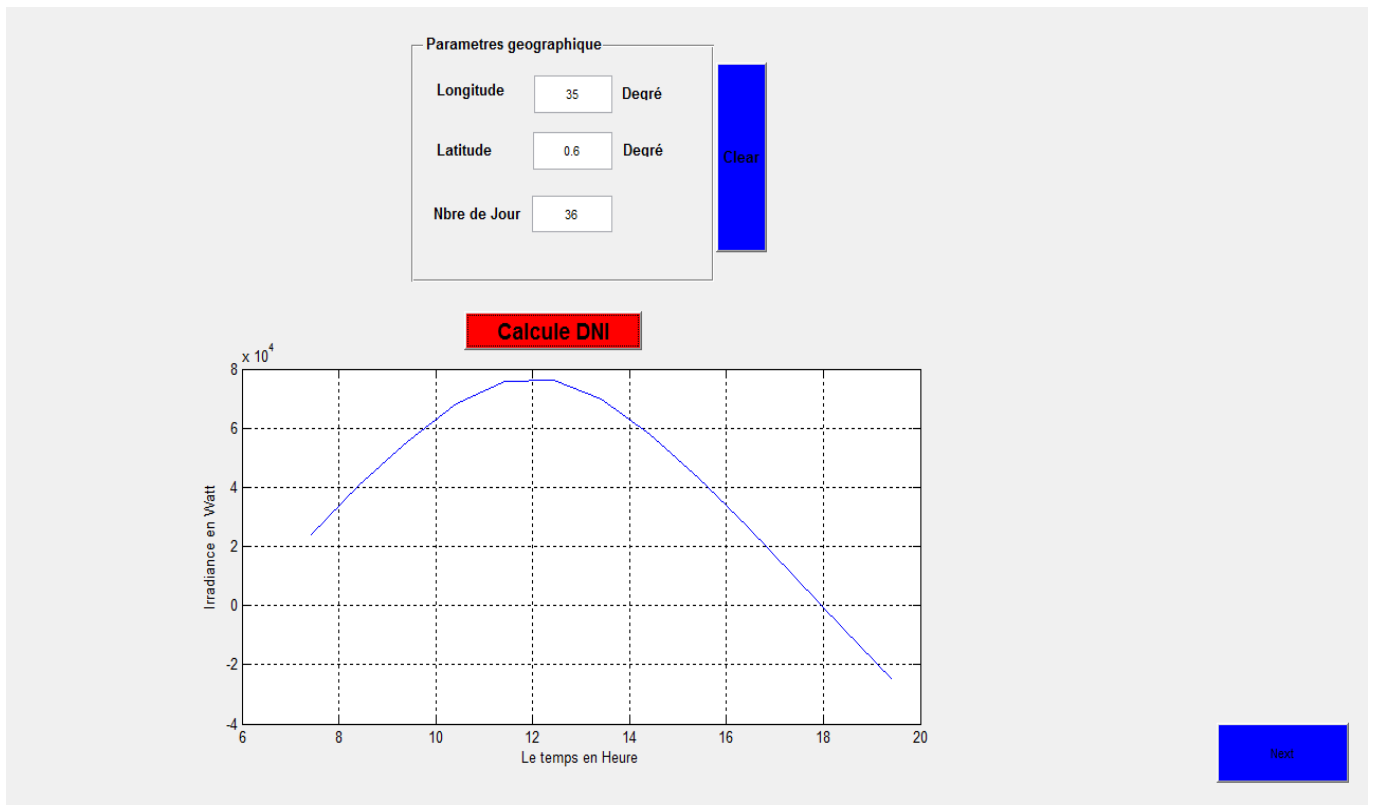


**Figure 4.36 :** La page d'accueil de logiciel.

Un menu nous permet de sélectionner les variables susceptible de calculer l'irradiance solaire dans une région d'étude définie et dans une journée précise

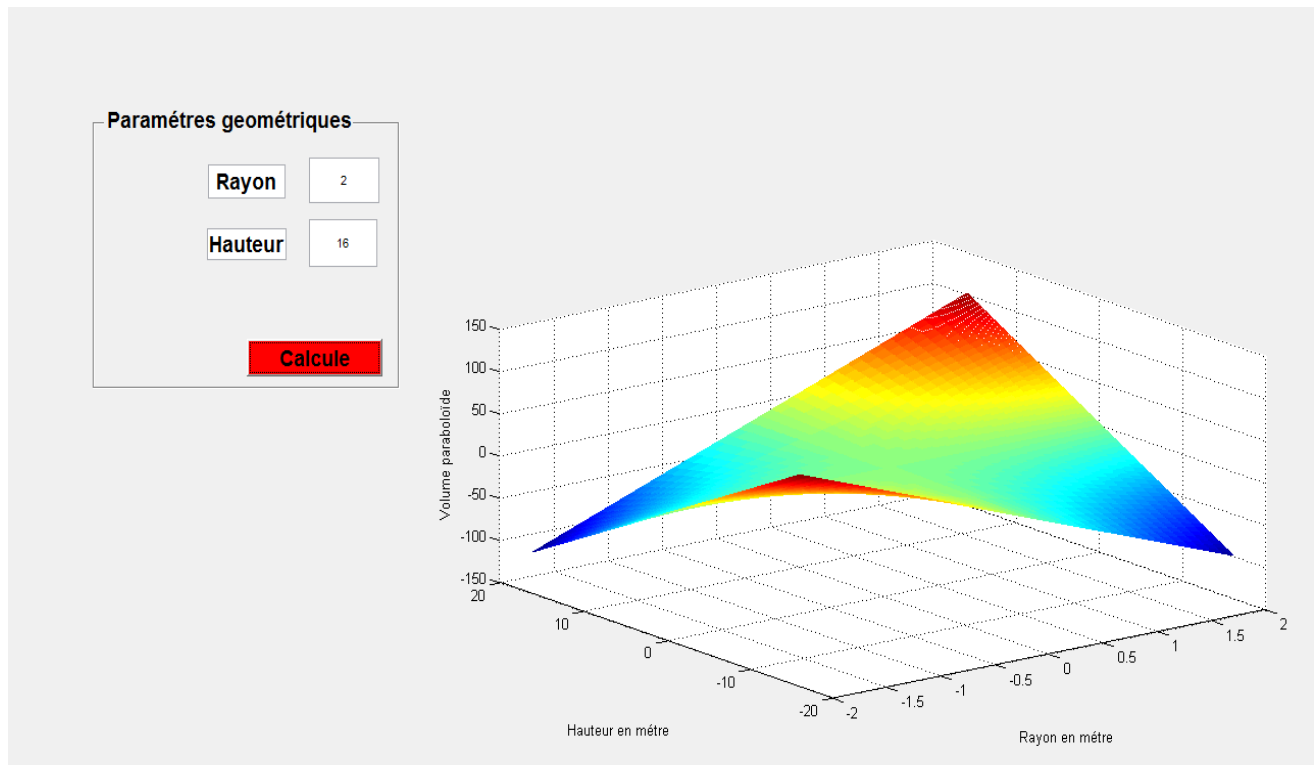
Les paramètres à savoir :

- La longitude.
- Latitude.
- Le nombre de jour depuis le 1<sup>er</sup> Janvier.



**Figure 4.37 :** Le calcul de l'irradiance solaire.

La figure 4. nous présente cette-fois ci les résultats de dimensionnement après avoir saisi les paramètres d'entre qui sont respectivement le rayon et la hauteur de la parabole.



**Figure 4.38 :** Dimensionnement de la parabole.

#### 4.8 Conclusion

L'essentiel de notre travail consiste à implémenter un outil de fabrication virtuel pour une station solaire dans notre cas un concentrateur parabolique. Plusieurs logiciels de CAO ont été utilisés dans notre étude (Matlab, Sketch Up, PROTEUS). L'approche suivie a été démontrée pour les énergies renouvelables et a montré que les outils d'optimisation de conception interactifs apportent une grande contribution au résultat obtenu. L'utilisation de l'algorithme d'optimisation sur les paramètres géométriques de la parabole et la géographie de la zone montre d'excellents résultats dans le flux concentré par rapport aux paramètres initiaux. Nous avons constaté que tant le diamètre du récepteur que la hauteur de l'absorbeur ont une grande influence sur les résultats obtenus.

## Conclusion générale

La recherche de la meilleure performance, de la meilleure qualité, au meilleur coût, est un enjeu majeur dans le domaine d'énergie. La maîtrise de la conception et de la mise en œuvre du système de conversion d'énergie est primordiale. Dans le dimensionnement des grands projets d'énergie, l'erreur peut avoir des conséquences graves d'un point de vue économique ou opérationnel, la méthode d'optimisation multidisciplinaire présente un grand intérêt pour la conception des systèmes de conversion tel que les concentrateurs solaires, ceci est une caractéristique importante en termes de coût pour les systèmes les plus complexes.

L'intérêt de disposer des méthodes d'aspect multidisciplinaire pour résoudre les problèmes en conception concentrateurs solaires est indéniable, le regroupement de différentes disciplines donne une vision assez meilleure sur les qualités et les performances du système.

Les études sont axées sur la conception, l'optimisation et la réalisation d'un concentrateur parabolique intègre d'un système de suivi libre sur deux axes, également permis de définir le fonctionnement de ce système et de prévoir la température atteinte et le taux d'énergie accumulé au niveau de la surface captatrice du récepteur parabolique réalisé. A savoir, ce flux accumulé dépend de plusieurs facteurs, essentiellement :

- ✓ Variation de l'éclairement solaire au cours de la journée et au cours de l'année.
- ✓ Géométrie du réflecteur (diamètre, distance focale, angle d'ouverture).
- ✓ Nature de la matière réfléchissante du réflecteur (Argent, Aluminium, miroir...)
- ✓ Nature du récepteur (acier, cuivre,...), sa géométrie (cylindrique, conique,..) ainsi que ses dimensions.
- ✓ Sélectivité de la surface absorbante.

Les résultats obtenus durant cette étude sont très prometteuse pour nos futurs systèmes d'énergie, puisque l'optimisation multidisciplinaire, consiste en un ensemble d'outils de conception des systèmes d'ingénierie permettant d'exploiter judicieusement les couplages et les synergies entre les différents sous-systèmes de manière à trouver la conception optimale.

L'utilisation des algorithmes récents pour étudier la conception des concentrateurs solaires a l'avantage d'avoir des solutions optimales intéressantes.

Cependant, le choix de la forme physique de fonction est sensible, parce que c'est le seul lien entre le problème physique à optimiser et les algorithmes utilisés.

La conception et l'optimisation multidisciplinaires utilisant des algorithmes d'optimisation heuristique, à savoir GSA, a été mise en œuvre avec succès pour le développement des concentrateurs solaires en tenant compte des objectifs géographiques du pays ainsi que les contraintes de performance. Les résultats des simulations ont prouvé que tous l'algorithme à

générer des solutions finales raisonnables et montrent clairement que l'implémentation de l'algorithme gravitationnel donne un plus significative au amont de l'énergie concentré soit un surplus de 60% que les valeurs obtenus avec les paramètres standard (géométrique et géographique).

Le modèle théorique nous a aidés à estimer l'ensoleillement directe au niveau d'un emplacement géographique de choix ainsi aider à concevoir un système de suivi dynamique by-axial adéquat qui, grâce aux équations solaire, estime les angles azimut et élévation pour le contrôle des moteurs (horizontal, verticale) et calcule l'ensoleillement directe qui est mis comme condition de départ du système en question. Pour la mise en œuvre du système une procédure interactive est élaborée. Tout d'abord, un nouveau modèle du problème de conception a été développé à partir du logiciel sketch Up, afin d'améliorer la prise en compte du système (irradiation solaire et concentrateur parabolique), cette phase a été suivi par un développement, test et fabrication d'une carte électronique pour l'exécution et l'acquisition des données provenant du concentrateur parabolique, visant à assurer la faisabilité et la robustesse de la solution optimale obtenue et de la piste solaire optimale.

Enfin, une réalisation et intégration de différents sous systèmes du prototype à savoir : les sous systèmes de suivi, le sous système d'acquisition et de control et les dispositifs de fixations suivi par une série de tests.

Lors de nos travaux de recherches plusieurs pistes de travaux futurs ont été dégagées.

On envisage comme perspective de :

- Développer une interface LABVIEW permet d'interfacer directement avec l'installation.
- Mettre sous réseaux les resautas de mesure afin de facilité l'accès et le suivi dans le cas des grande centrale de production d'énergies.
- Améliorer le processus de fabrication par l'intégration de l'usinage numérique.



## Références

- [1] Chauprade, A. (2004). Géopolitique de l'énergie. Revue française de.
- [2] Meunier, F. (2008). Les énergies renouvelables. Le Cavalier bleu.
- [3] Zélem, M. C. (2010). Politique de maîtrise de la demande d'énergie et résistances au changement. Une approche socio-anthropologique. Lectures, Les livres.
- [4] Sylvain, Q. (2008). Energie et développement : quels enjeux ? Université de Liège Institut des sciences humaines et sociales.
- [5] Collard, F. (2015). Les énergies renouvelables. Courrier hebdomadaire du CRISP, (7), 5-72.
- [6] Ginocchio, R., & Viollet, P. L. (2012). L'énergie hydraulique. Lavoisier.
- [7] Ouali, S., Khellaf, A., & Baddari, K. (2006). Etude géothermique du Sud de l'Algérie. Revue des énergies renouvelables, 9(4), 297-306.
- [8] Eyraud, M. (2019). Biomasse-Energie, bilan carbone et émissions polluantes.
- [9] Kharchi, R., Messaoudène, N. A., Belhamel, M., & Hamid, A. (2001). Etude expérimentale du comportement thermique d'un plancher solaire direct. Revue des Energies Renouvelables: Journées de Thermique, 115-119.
- [10] Joffre, A. (2004). Énergie solaire thermique dans le bâtiment. Chauffe-eau solaires. revue techniques de l'ingénieur BE, 9164(11).
- [11] Abbaz, D. (2013). Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un plancher solaire direct (PSD).
- [12] Marc, O. (2010). Etude expérimentale, modélisation et optimisation d'un procédé de rafraîchissement solaire à absorption couplé au bâtiment (Doctoral dissertation).
- [13] Imessad, K., & Belhamel, M. (1999). Evaluation des Performances d'un Mur Trombe. Revue Des Energies Renouvelables: Valorisation, 195-198.
- [14] Bagdad, T. L'architecture bioclimatique.
- [15] Lincot, D. (2007). La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. Découverte n0344-345,(2007), 47, 65.
- [16] Brigand, S. (2008). Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque. Complément technique, Techniques de construction.
- [17] Chroufa, M. (2014). Étude et caractérisation du comportement thermomécanique de récepteur d'un système photovoltaïque concentré.
- [18] Gauthier, J. M. (2009). Géoéconomie de la demande et de l'offre énergétique mondiale. Goeconomie, (4), 35-48.
- [19] IEA, World Energy Outlook 2008, scénario de référence.

- [20] Duruisseau, K. (2014). L'émergence du concept de transition énergétique. Quels apports de la géographie? BSGLG.
- [21] Cozzi, L. (2020). Les perspectives énergétiques mondiales, horizon 2040. *Futuribles*, (5), 49-67.
- [22] Cherifi, S., & Haddad, M. (2020). L'énergie solaire: Un moteur du développement durable en Algérie. *Les cahiers du cread*, 35(3), 95-127.
- [23] Farges, O. (2014). Conception optimale de centrales solaires à concentration : application aux centrales à tour et aux installations " beam down " (Doctoral dissertation, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux).
- [24] YOUSFI, M. L. (2009). Performances technico-économiques de centrales cylindro-paraboliques de puissance (Doctoral dissertation, Université de Chlef-Hassiba Benbouali).
- [25] Ko, G. K. (2019). Etude et modélisation dynamique d'un concentrateur à miroir linéaire de Fresnel (Doctoral dissertation, Université de Perpignan; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement).
- [26] Mohamed, M. A. M. M. A. R. (2012). Les types de récepteurs d'une centrale solaire à tour. *Recherche et Développement*, (25), 10-11.
- [27] Zeghib, I. (2005). Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique.
- [28] Sylvain, Q. (2007). Les centrales solaires à concentration. Université de Liège, 4, 33.
- [29] P. N. Patil, M. Khandekar, and S. N. Patil, "Automatic dual-axis solar tracking system for parabolic dish," in *Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*, 2016 2nd International Conference on. IEEE, pp. 699–703, 2016.
- [30] P. D. Medina, et al., "Thermal Energy Generation from A Solar Collector Parabolic Dish Reflector," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 9, no. 3, pp. 1500-1509, 2019.
- [31] J. B. Lasich, "Solar tracking system," U. S. Patent 7,109,461, Sep. 19 2006.
- [32] A. R. Nadia, et al., "Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 82, pp. 2548-2569, 2018.
- [33] MARVILLET, C. (2015). Fluides frigoporteurs—Propriétés.
- [34] Voronca, M. M., Voronca, S. L., & Cruceru, M. (2012). PROMOTION OF THE ORGANIC RANKINE CYCLE BASED COGENERATION: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES. *Journal of Sustainable Energy*, 3(1).
- [35] Bonnet, S. (2005). Moteurs thermiques à apport de chaleur externe : étude d'un moteur STIRLING et d'un moteur ERICSSON (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).

- [36] Bouvier, J. L. (2014). Étude expérimentale d'une installation de micro-cogénération solaire couplant un concentrateur cylindro-parabolique et un moteur à cycle de Hirn (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- [37] ATTAR, S. F. Z. Etude comparative d'une solution énergie renouvelable pour la production d'électricité de 1MW de capacité dans une région du sud algérien : cas d'Ouargla (Doctoral dissertation).
- [38] BP Statistical Review of World Energy juin 2020
- [39] Idda, A., Bentouba, S., & Kada, A. M. (2015). Contribution de l'énergie éolienne à l'hybridation des centrales électriques des réseaux isolés du Sud. *Revue des Energies Renouvelables*, 18(2), 269-278.
- [40] Yaiche, R. (2007). Logiciel de calcul des paramètres astronomiques à l'usage des installations solaires. *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen*, 343-348.
- [41] Moumami, A., Hamani, N., Moumami, N., & Mokhtari, Z. (2006). Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra. *Une*, 3(4).
- [42] M'Raoui, A., Mouhous, S., Malek, A., & Benyoucef, B. (2011). Etude statistique du rayonnement solaire à Alger. *Revue des Energies Renouvelables*, 14(4), 637-648.
- [43] Dankassoua, M., Madougou, S., Aboubacar, A., & Foulani, A. (2017). Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre). *Revue des Energies Renouvelables*, 20(1), 131-146.
- [44] KADRI, I. Etude, Conception et Réalisation d'un Suiveur de Soleil (Doctoral dissertation, 22-10-2018).
- [45] Merle, H., & Munier, V. (2003). Comment conceptualiser la hauteur du soleil en tant qu'angle au cycle 3?: L'enseignement de l'astronomie. Aster.
- [46] Yettou, F., Malek, A., Haddadi, M., & Gama, A. (2009). Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie. *Revue des Energies Renouvelables*, 12(2), 331-346.
- [47] KADDOUR, A. (2013). Modélisation et simulation d'un concentrateur parabolique solaire a moteur Stirling en vue d'un rendement optimal (Doctoral dissertation).
- [48] Yaïche, M. R., & Bekkouche, S. M. A. (2010). Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel. *Revue des énergies renouvelables*, 13(4), 683-695.
- [49] Bensaha, A., Benkouider, F., & Bekkouche, S. M. A. (2017, March). Estimation du rayonnement solaire en ciel clair par des modèles empiriques: Application au site de Ghardaïa (Algérie). In 1st International Seminar on the Apport of the Simulation in Technological Innovation, Ghardaïa (Algeria).

- [50] Nia, M. (2018). Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire (Doctoral dissertation).
- [51] M. Amoozegar and E. Rashedi, "Parameter tuning of GSA using doe," in Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), 2014 4th International eConferenceon, pp. 431-436, 2014.
- [52] S. Duman, et al., "Optimal power flow using gravitational search algorithm," Energy Conversion and Management, vol. 59, pp. 86-95, 2012.
- [53] A. Bahrololoum, et al., "A prototype classifier based on gravitational search algorithm," Applied Soft Computing, vol. 12, no. 2, pp. 819-825, 2012.
- [54] M. Khajehzadeh, et al., "A modified gravitational search algorithm for slope stability analysis," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 25, no. 8, pp. 1589-1597, 2012.
- [55] J. C. Bansal, S. K. Joshi, and A. K. Nagar, "Fitness varying gravitational constant in GSA," Applied Intelligence, pp. 1-16, 2018.
- [56] Sarcar, M. M. M., Rao, K. M., & Narayan, K. L. (2008). *Computer aided design and manufacturing*. PHI Learning Pvt. Ltd..
- [57] Zafrane, M. A., Boudjemai, A., & Boughanmi, N. (2019). Interactive design of space manufacturing systems, optimality and opportunity. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(2), 773-796.
- [58] Zafrane, M.A., Bachir, A., Boudechiche, Z. *et al.* Interactive design and advanced manufacturing of double solar panel deployment mechanism for CubeSat, part 1: electronics design. *Int J Interact Des Manuf* (2020). <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00642-3>
- [59] S. Racharla and K. Rajan, "Solar tracking system—a review," International Journal of Sustainable Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 72-81, 2017.
- [60] W. Nsengiyumva, et al., "Recent advancements and challenges in Solar Tracking Systems (STS): A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81, pp. 250-279, 2018.