

I. Dimensionnement de l'installation

Avant de se lancer dans le dimensionnement, il est souhaitable de rappeler les principaux paramètres au point de conception, à savoir :

- Le DNI (w/m^2) au point de conception : 682 w/m^2
- Puissance thermique voulue : 15 MWth
- La température d'entrée et de sortie du fluide caloporteur : $200^\circ\text{C} / 160^\circ\text{C}$
- Température ambiante au point de conception : $21,5^\circ\text{C}$
- Le collecteur choisi : Eurotrough
- Le fluide caloporteur choisi : Huile synthétique
- Angle d'incidence : $10,13^\circ$

Le dimensionnement de l'installation entière passe par le dimensionnement du champ solaire, le dimensionnement des pompes, le dimensionnement de l'échangeur de chaleur, le stockage, ainsi que le suiveur du soleil. Pour ce faire, nous proposons la démarche suivante :

I.1. Dimensionnement du champ solaire

Dans cette partie, nous allons déterminer le nombre de collecteurs en série dans une boucle, le nombre de boucles en parallèles, la distance entre les boucles, ainsi que la configuration convenable pour notre cas de figure.

I.1.1. Paramètre de base d'un seul collecteur:

a) Vitesse de l'écoulement :

La vitesse de l'écoulement du fluide caloporteur dans une boucle dans le point de conception est à la recherche de la valeur du nombre de Reynolds qui doit être le plus grand possible pour que le facteur de frottement (fluide caloporteur-tube absorbeur) soit le plus faible possible.

D'après les données constructeurs des récepteurs, et afin d'assurer une longue longévité de tube et un bon transfert de chaleur à l'intérieur, le facteur de frottement « f » ne doit pas dépasser $4,25 \cdot 10^{-3}$.

Or, dans le régime turbulent, le facteur de frottement s'exprime en fonction de nombre de Reynolds par l'équation suivante :

$$f = 0,046 * Re^{-0,2}$$

Et comme $f \leq 4,25 \cdot 10^{-3}$, donc la valeur minimale du nombre de Reynolds dans le récepteur s'exprime de la façon suivante :

$$Re \geq 1,48 \cdot 10^5$$

Nous choisissons un nombre de Reynolds de valeur $1,5 \cdot 10^5$.

Sachons que le nombre de Reynolds est proportionnel au débit qui circule dans le tube récepteur (et donc à la vitesse par laquelle le fluide caloporteur s'écoule à l'intérieur du tube absorbeur), et que le débit en hiver est d'environ 23 % celui d'été, à cause du faible ensoleillement. Donc pour ramener le nombre de Reynolds au point de conception, il faut le diviser par 0.23. Nous retrouvons la nouvelle valeur du nombre Reynolds (corrigée) :

$$Re = \frac{1,5 \cdot 10^5}{0,23} = 6,53 \cdot 10^5$$

La vitesse de l'écoulement est comme suite :

$$V = \frac{Re \cdot \mu}{d \cdot \rho}$$

Où

μ = viscosité dynamique du fluide, en (kg/ms)

V = vitesse du fluide en (m/s)

d = le diamètre intérieur des tubes de l'absorbeur, exprimé en (m)

ρ = densité du fluide, exprimée en (kg/m³)

La détermination des paramètres physico-chimiques du fluide caloporteur dépendent essentiellement de sa température. Raison pour laquelle nous allons considérer une température moyenne, qui est dans ce cas :

$$T = \frac{200+160}{2} = 180^\circ C$$

Donc, d'après l'équation de la variation de la masse volumique du fluide caloporteur en fonction de la température :

$$\rho(Kg/m^3) = 1132 - 1,065 \cdot T(^{\circ}C)$$

Nous avons :

$$\mu = 182,6 \cdot 10^{-6} Kg/ms \text{ et } \rho = 940,3 Kg/m^3$$

Etant donné que le diamètre interne du tube de l'absorbeur d'un collecteur est de 65 mm. Donc la vitesse de l'écoulement est :

$$V = 1,95 m/s$$

b) Débit massique :

Le débit massique dans le récepteur est donné par l'équation suivante :

$$M = \rho \cdot V \cdot st$$

Où

M = débit massique, en (kg/s)

St = section transversale des tubes absorbeurs, exprimée en (m²)

Etant donné que le tube absorbeur présente une section transversale de 33,18 10⁻⁴ m², le débit massique pour une vitesse de 1,95 m/s est:

$$M = 6 \text{ Kg/s}$$

b) Perte thermique :

Pour quantifier les pertes thermiques globales dans un récepteur, il faut d'abord déterminer le coefficient de perte thermique, donné par l'équation:

$$U_{l/abs} = a + b \cdot (T_{abs} - T_{amb}) + c \cdot (T_{abs} - T_{amb})^2$$

Où:

U_{l/abs} = coefficient global de perte de chaleur, exprimée en W/m². °C

La valeur des coefficients "a", "b" et "c" de l'équation pour une température de travail du fluide caloporteur au-dessus de 300 ° C sont: 2,8954, -0,0164 et 0,000065 respectivement (données constructeur).

AN :

$$U_{l/abs} = 1,93 \text{ W/m}^2$$

Etant donné que la surface totale du tube récepteur ayant une longueur de 148,5 m, est 32,65 m², la perte thermique dans le collecteur dont la température moyenne est de 180 ° C est :

$$Q_{loss} = U_{l/abs} \cdot A_{abs} \cdot (T_{abs} - T_{amb})$$

Où:

Q_{loss} = perte de chaleur dans le collecteur exprimée en W

AN :

$$Q_{loss} = 9\,987,8 \text{ W}$$

c) Quantité d'énergie reçue :

Selon le fabricant, la surface d'ouverture totale d'un collecteur Eurotrough est 817,5 m². Et l'équation de l'énergie solaire incidente sur le collecteur est la suivante:

$$Q_{sol} = Ac \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

Où:

Q_{sol} = énergie solaire incidente sur le collecteur exprimée en W

Ac = surface d'ouverture du collecteur, exprimée en m²

I = Rayonnement Normal Direct, exprimé en W/m²

φ = angle d'incidence, exprimé en °

L'énergie solaire disponible sur le collecteur Eurotrough sera donc :

$$Q_{sol} = 548\,844\text{W}$$

d) L'énergie fournie :

Pour tenir compte des différentes pertes géométriques dans un collecteur, et le blocage de rayonnement concentré par les supports du tube absorbeur, le constructeur a défini un angle d'incidence modificateur K , qui dépend directement de l'angle d'incidence. Le facteur K est donné par l'équation :

$$K(\varphi) = 1 - 2,23073 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi^2 + 3,18596 \cdot 10^{-6} \cdot \varphi^3 - 4,85509 \cdot 10^{-8} \cdot \varphi^4$$

AN :

$$K(\varphi) = 1,00054^\circ$$

L'énergie fournie par le collecteur est donc :

$$Q_{fournie} = Q_{sol} \cdot K(\varphi) \cdot \eta_{th} \cdot \eta_{op} \cdot F_e$$

Où :

$Q_{fournie}$: Energie fournie par un collecteur, exprimée en W

F_e : Facteur d'encrassement

η_{th} : Rendement thermique du collecteur

η_{op} : Rendement optique du collecteur

$K(\varphi)$: Angle d'incidence modificateur, exprimé en °

Ainsi :

$$Q_{fournie} = 413\,305\text{W}$$

e) L'énergie utile :

L'énergie reçue par le fluide caloporteur sera bien évidemment l'énergie fournie par le collecteur moins l'énergie perdue (pertes thermiques globales), d'où :

$$Q_{utile} = Q_{fournie} - Q_{loss}$$

AN :

$$Q_{utile} = 403\,317\,W$$

f) Augmentation de la température :

L'énergie thermique utile reçue par le fluide caloporteur va servir à augmenter sa température selon l'équation suivante :

$$Q_{utile} = M \cdot C_p \cdot \Delta T = M \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$

Or, la capacité calorifique du fluide caloporteur en fonction de la température est donnée par :

$$Cp(Kj/Kg.K) = 1,479 + 0,0028 \cdot T(^{\circ}C)$$

D'où, à 180 °C, la capacité calorifique du fluide caloporteur est de : 1,983 Kj/Kg.K

Ainsi l'augmentation de la température dans un collecteur sera :

$$\Delta T = \frac{Q_{utile}}{M \cdot C_p}$$

AN :

$$\Delta T = 33,897^{\circ}C$$

I.1.2. Nombre de collecteurs dans un rangé & correction des paramètres :

On cherche à augmenter la température du fluide caloporteur de 160 °C à 200 °C, ce qui revient à dire une élévation de température de 40°C. Et comme un seul collecteur permet d'augmenter la température de 33,897°C, le nombre de collecteurs en série sera :

$$\frac{40^{\circ}C}{33,897} = 1,18 \text{ collecteurs}$$

Il serait souhaitable de placer un seul collecteur par rangée, Cependant, d'un point de vue de la construction, une configuration en « U » de type "alimentation centrale" nécessite un nombre de collecteurs pair. Optons donc pour 2 collecteurs en série par rangée.

a) Correction du débit massique :

Comme le nombre de collecteurs en série est augmenté de 1,18 à 2, le débit de la ligne du fluide caloporteur doit être aussi augmenté de la même proportion, de sorte que le nouveau débit d'huile qui doit s'écouler à travers chaque rangée de 2 collecteurs est:

$$6. \frac{2}{1,18} = 10,17 \text{ Kg/s}$$

b) Correction de la vitesse d'écoulement :

Avec le nouveau débit, la vitesse de l'écoulement va être portée à :

$$1,95. \frac{2}{1,18} = 3,3 \text{ m/s}$$

Avec cette vitesse nous obtenons un nombre de Reynolds (11.10^5) plus grand que prévu au départ, ce qui est souhaitable pour un bon transfert d'énergie à l'intérieur du tube absorbeur.

I.1.3. Multiple solaire & nombre de rangés en parallèles :

La puissance thermique nominale fournie par chaque ligne dans le point de conception sera:

$$2. Q_{\text{utile}} = 0,8066 \text{ MWth}$$

A ce stade du calcul, il est essentiel d'expliquer le concept de Multiples solaires, pour pouvoir déterminer le nombre de lignes en parallèles.

a) Le multiple solaire SM :

Pour profiter le maximum possible du champ solaire, et dans le but de réduire la quantité du fuel et de gasoil consommés par la chaudière, surtout dans les heures de pointes qui sont généralement entre 18h et 22h. Un système de stockage s'avère une solution incontournable.

Le système de stockage thermique dans une installation avec des miroirs cylindro-paraboliques présente l'avantage d'équilibrer le fonctionnement, et ce par compensation des conditions transitoires comme un faible ensoleillement (présence de nuages), et une vitesse de vent supérieurs à la consigne de fonctionnement, ce qui oblige les collecteurs à maintenir la position de sécurité.

De plus, l'intégration d'un système de stockage thermique permet à l'installation de produire de l'eau surchauffée à la demande, et plus précisément les heures de pointes, là où les turbines démarrent. Cela est vraiment intéressant, car la tarification de l'électricité dans la pointe est un peu plus supérieure par rapport aux heures creuses ou pleines, Ce qui permet à l'ONEE d'avoir un revenu supplémentaire.

Le multiple solaire est le facteur par lequel le champ solaire est amplifié par rapport à une installation sans stockage thermique. Il existe une relation directe entre le SM et la durée de

stockage. Le tableau suivant donne une idée sur le SM à partir des heures de stockage thermique :

Heures de stockage	0	2,5	5	7,5	10
Multiple solaire	1	1,25	1,5	1,75	2

Tableau : Multiple solaire en fonction de la durée de stockage

Les heures de pointe s'étalent sur une durée de 5 heures en moyenne, Octobre-Mars 17h-22h ; et Avril-Septembre : 18h-23h. Ce qui revient à dire un SM de 1,5.

b) Nombre de rangés en parallèles :

L'installation telle qu'il est mentionné dans les paramètres de début, est conçue pour une puissance thermique de 15 MWth.

Avec le stockage, la nouvelle puissance thermique sera :

$$1,5 * 15 = 22,5 \text{ MWth}$$

Donc le nombre de lignes (rangés) en parallèle est :

$$\frac{22,5}{2.Q_{utile}} = 28 \text{ lignes}$$

Nous aurons besoin de 28 Lignes de collecteurs, pour satisfaire une demande de 22,5 MWth

I.1.4.Surface du l'installation solaire :

Nous nous rappelons que le nombre de collecteurs en série est de 2, et le nombre de rangés en parallèles est de 28, ce qui revient à dire que nous avons un nombre total de collecteur égale à : 56.

a) Surface nette des miroirs :

Étant donner que la surface d'ouverture du collecteur est 817,5m², et que le nombre total des collecteurs et de 56. Donc la surface des miroirs seulement sera :

$$56*817,5 = 45\,780 \text{ m}^2$$

b) Surface du terrain :

La surface totale du terrain du champ solaire, dépende essentiellement de la surface d'ouverture du collecteur. La distance entre les rangées de capteurs est d'environ trois fois la largeur de l'ouverture. Cela signifie que le terrain est au moins trois fois la surface d'ouverture. Et en tenant compte des tuyaux et routes de transport, la superficie totale du champ solaire est d'environ 3,5 fois la surface de l'ouverture.

Nous déduisons donc la surface approximative du terrain dont on aura besoin, qui est de l'ordre de :

$$3,5 \times 45\,780 = 160\,230 \text{ m}^2$$

I.2. Etude de l'implantation

a) Etude des contraintes :

Nous nous rappelons que le collecteur que nous avons choisi est de longueur 150m, la direction que nous avons choisie pour notre installation solaire est Nord-Sud, et la configuration est en U. Ce qui revient à dire que le terrain dans lequel nous allons faire l'implantation de l'installation solaire doit avoir au minimum une longueur de 150 m dans la direction Nord-Sud.

En tenant compte de ce critère, et de l'effet d'ombrage sur les collecteurs dû à la présence des réservoirs de l'eau brute, nous déduisons que le premier terrain n'est pas valable pour l'implantation des collecteurs.

D'autre part, une partie du deuxième terrain est prévue pour la construction des bâtiments de services, ce qui va jouer sur la longueur disponible du terrain, et par la suite sur la configuration de l'installation solaire. Raison pour laquelle nous ne pouvons pas compter sur le deuxième terrain pour l'installation des collecteurs. Cependant nous pouvons profiter du reste du terrain pour l'installation des réservoirs de stockage du fluide caloporteur.

De plus, le terrain requis pour l'implantation de l'installation solaire est $160\,230 \text{ m}^2$, cette valeur est beaucoup supérieure à la surface qui reste disponible dans la centrale ($95\,200^2$).

B) Conclusion :

En se basant sur ces critères, nous concluons que c'est difficile de faire l'implantation d'une installation de 15 MWth avec 5 heures de stockage pour le remplacement des chaudières. Toutefois, nous pouvons profiter du troisième terrain, mais cette fois-ci pour assurer une partie de la production de l'eau surchauffée, et précisément celle consommée par les trois turbines dans les réchauffeurs de fioul avant sa combustion, parce que la température du fioul à l'amont de la chambre de combustion est un facteur décisif dans le prix du KWh produit par la centrale, car un arrêt partiel de la chaudière au moment du fonctionnement

des turbines va causer une chute de la température du fioul, et par conséquent ces turbines qui sont prévues pour fonctionner en fioul passent en gasoil.

II. Redimensionnement de l'installation solaire

Dans cette partie, nous allons refaire le dimensionnement de l'installation solaire pour satisfaire cette fois ci que la demande de l'eau surchauffée au niveau des réchauffeurs de fioul. Pour ce faire, nous allons dans un premier temps déterminer la puissance thermique demandée par un seul réchauffeur, et par la suite nous allons suivre la même démarche de dimensionnement citée auparavant.

a) Etude du réchauffeur :

Le système est un échangeur de chaleur de type tubulaire destiné à réchauffer du fioul. Il fonctionne suivant le principe d'échange de chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Le fluide chaud est de l'eau chaude, et le fluide froid du fioul.

Pour atteindre un équilibre naturel, l'eau chaude rentre à 160°C et il va se refroidir à 130°C en cédant de la chaleur au fioul qui rentre à 50°C et sort à 130°C. Pour réaliser cet échange de chaleur, et comme il n'est pas possible de mélanger l'eau surchauffée et le fioul, les deux fluides sont donc en contact thermique par l'intermédiaire d'une paroi métallique. Dans notre cas, l'eau chaude est placée dans des tubes métalliques qui sont immergés dans le fioul, et l'ensemble est renfermé dans une calandre métallique. Il n'y a pas de contact avec l'extérieur ou l'atmosphère.

D'après les données du constructeur, nous avons pu extraire ce qui suit :

Fluide	Eau	Fioul
Température d'entrée (°C)	130	50
Température de sortie (°C)	160	130
Température de calcul	190	145
Débit (Kg/h)	39184	34000
Pression de calcul (bar)	14	13

Tableau : caractéristiques techniques du réchauffeur Fioul/Eau

b) Puissance thermique :

La puissance thermique cédée par l'eau surchauffée au fioul au niveau du réchauffeur s'exprime par l'équation suivante :

$$Q_{th,eau} = \left| M. (h_{entrée} - h_{sortie}) \right|$$

Où :

$Q_{th,eau}$: La puissance thermique cédée par l'eau, exprimée en W thermique

M : c'est le débit massique de l'eau surchauffée, exprimé en Kg/s

$h_{entrée}$: Enthalpie de l'eau surchauffée à l'entrée du réchauffeur, exprimée en Kj/Kg

h_{sortie} : Enthalpie de l'eau surchauffée à la sortie du réchauffeur, exprimée en Kj/Kg

Sachons que le débit massique de l'eau surchauffée est de 39184 Kg/h, ce qui est équivalent à 10,88 Kg/s. Et l'enthalpie de l'eau à 160°C est de 675,47 Kj/Kg, l'enthalpie à 130°C est de 546,31 Kj/Kg.

D'où la puissance consommée au niveau d'un seul réchauffeur est :

$$Q_{th,eau} = 1,4 \text{ MWth}$$

A noter que chaque turbine est équipée d'un réchauffeur de fioul. Et la centrale est équipée de trois turbines. Ainsi, la puissance thermique dont on aura besoin pour chauffer le fioul de 50°C à 130°C est :

$$Q_{th} = 3. Q_{th,eau}$$

AN :

$$Q_{th} = 4,2 \text{ MWth}$$

c) Champ solaire :

Comme nous l'avons déjà mentionné dans le dimensionnement de 15 MWth, le champ solaire et dimensionner de façon à couvrir les heures de pointe, et nous avons pris un multiple solaire de 1,5.

Avec le même principe de raisonnement, la nouvelle puissance thermique sera :

$$Q_{th,solaire} = 1,5. Q_{th}$$

AN :

$$Q_{th,solaire} = 6,3 \text{ MWth}$$

Ainsi le nombre de lignes en parallèle est :

$$\frac{6,3}{2.Q_{utile}} = 7,8 \text{ lignes}$$

Nous aurons besoin de 8 Lignes de collecteurs, pour satisfaire une demande de 6,3 MWth

La surface nette des miroirs est :

$$16.817,5 = 13\,080\,m^2$$

Et la surface du terrain sera :

$$45\,780\,m^2$$

d) Récapitulation :

Nous récapitulons ici les principaux résultats obtenus :

	Marque	Energie reçue(W)	Energie Fournie(W)
Collecteur	Eurotrough	548 844W	413 305

Tableau : Principaux résultats du collecteur

	Marque	Re	V (m/s)	M (Kg/s)	Q_{loss}(W)	Q_{utile}(W)	ΔT (°C)
Récepteur	SCHOTT	11.10 ⁵	3,3	10,17	9 987,8	403 317	33,897

Tableau : principaux résultat du récepteur

Objectif	Remplacement de la chaudière	Alimentation des réchauffeurs
Puissance thermique du champ solaire sans stockage	15 MWth	4,2 MWth
Multiple solaire	1,5	1,5
Heures de stockage	5 heures	5 heures
Puissance thermique avec stockage	22,5 MWth	6,3 MWth
Nombre de collecteur en série	2	2
Nombre de lignes en parallèles	28	8
Surface du terrain disponible	95 200 m ²	95 200 m ²
Surface du terrain requise pour le champ solaire	160 230 m ²	45 780 m ²
Conclusion	N'est pas réalisable	Réalisable

Tableau : principaux résultats obtenus pour les champs solaires