

Rèmerciements

*Nous remercions infiniment tout d'abord notre ALLAH pour nous avoir
donner la force et le courage pour faire ce modeste travail*

*Je tiens a remercier spécialement Dr .Laïd MESSAOUDI pour nos avoir
propose ce sujet,pour son encadrement et l'aide.*

*Nous adressons également nos remerciements à tous nos collègues de la
promotion 2014 surtout ceux qui nous ont encourages*

*Finalement,nous remercions tous les gents qui nous aide pour réaliser
ce mémoire de fin d'étude*

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

La mémoire de Ma mère ;

La mémoire de Mon père ;

Mes frères et sœur et leurs familles ;

Tous mes amis et collègues ;

K.MOURAD

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
S	Aire de surface d'échange	m^2
A, A_1	Constante	
Bessel	fonction de Bessel	
X	abscisse	
V	Volume	m^3
B, B_1	Constante	
C_1, C_2	Constante	
He	Paramètre = $h/k.m$	
e	Epaisseur	m
h	Coefficient d'échange de chaleur	$W/m^2 K$
r, R	rayon	m
L	Longueur	m
l	Largeur	m
m	Coefficient d'anisothermie = $(hP/kA)^{1/2}$	m^{-1}
P	Périmètre	m
Φ_{diss}	le flux de Chaleur dissipé	W
Φ_{max}	le flux de chaleur idéale dissipé	W
Φ_x	Flux de chaleur transmis par conduction à l'abscisse x	W
Φ_{x+dx}	Flux de chaleur transmis par conduction à l'abscisse $x+dx$	W
T	Température	K
T_a	Température ambiante	K

T_p	Température de la paroi	K
T_f	Température du fluide	K
ΔT	Ecart de température	K
t	Temps	S
R_{th}	résistance thermique	K/W
K_1	Fonction modifiée de Bessel de deuxième type, d'ordre 1	
K_0	Fonction modifiée de Bessel de deuxième type, d'ordre 0	
I_1	Fonction modifiée de Bessel de premier type, d'ordre 1	
I_0	Fonction modifiée de Bessel de premier type, d'ordre 0	
r_e	le rayon extérieur de l'ailette	m
r_0	le rayon intérieur de l'ailette	m

Symboles Grec

θ	Différence de température (T-Ta)	K
η_{ail}	Efficacité de l'ailette	
λ	Conductivité thermique	W/m K
ρ	Masse volumique	Kg/m ³

Fonctions

Cosh	Cosinus hyperbolique
e^x	Exponentiel
sinh	Sinus hyperbolique
Tanh	Tangente hyperbolique

Indices

a	air
P	paroi
Cond	Conduction.

Conv	Convection
Max	Maximum
S	Surface
i	intérieur
e	extérieur
1	Indice face extérieur
2	Indice face intérieur
T	total
f	fluide
moy	moyenne
épi	épine
ail	ailette
tran	transversale
long	longitudinale

Introduction générale

Selon des études faites par certains instituts de recherche au niveau mondial, la consommation en énergie des pays en voie de développement va connaître une augmentation très importante, surtout après la mondialisation du commerce et des échanges entre les états.

Le dernier choc pétrolier et la catastrophe des déchets nucléaire de Tchernobyl, ont beaucoup stimulé la recherche et le développement de nouvelles sources d'énergies renouvelables et particulièrement solaires. Cette énergie peut être transformé en chaleur à basse température, par des capteurs utilisant conjointement l'absorption par une surface sélective, ces capteurs ne permettent pas en général de dépasser la température de 100°C.

Pour travailler à température élevée, il faut accroître le flux optique incident qui pourrait être réalisé par concentration de rayonnement solaire. Cette opération est réalisée à l'aide des capteurs appelés concentrateurs solaires. Ce type de concentrateurs destinée à concentrer l'énergie solaire sur une surface absorbante, ce qui permet d'avoir une forte augmentation de chaleur.

L'objectif de cette étude, qui rentre dans le cadre d'un nouveau projet de recherche, est de chercher le moyen le plus efficace pour refroidir une partie (conique 3D) d'un concentrateur solaire utilisé pour la récupération de l'énergie solaire dont la température est très élevée. Cette étude sera faite sous la plateforme Ansys Workbench sous Windows.

Ce mémoire comporte quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est consacré uniquement aux généralités sur les concentrateurs solaires et le transfert thermique.
- ❖ Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique des ailettes. Nous nous sommes uniquement limités aux cas dont nous aurons besoins par la suite de ce travail.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré au refroidissement d'un concentrateur solaire.
- ❖ Le quatrième chapitre est consacré à l'optimisation du refroidissement de ce concentrateur solaire. C'est-à-dire, nous essayons de trouver le meilleur moyen de le refroidir.
- ❖ On termine ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

I.1 Introduction

La conversion de l'énergie solaire en chaleur thermique à moyenne et à haute température est obtenue par des techniques différentes en fonction des besoins. Elle peut fournir directement à l'industrie, une partie de ses besoins en chaleur, elle peut aussi être transformée en énergie électrique pour l'alimentation des réseaux. La conversion à moyenne et à haute température a recours à une technologie plus élaborée, par l'idée de concentration des rayonnements solaires pour augmenter l'intensité de flux solaire au moyen de capteurs optiques plus élaborés appelés concentrateurs solaires.

Dans ce chapitre nous allons montrer les types de capteurs solaires d'une manière générale et particulièrement les concentrateurs, puis nous passerons en revue les différents modes de transfert de chaleur.

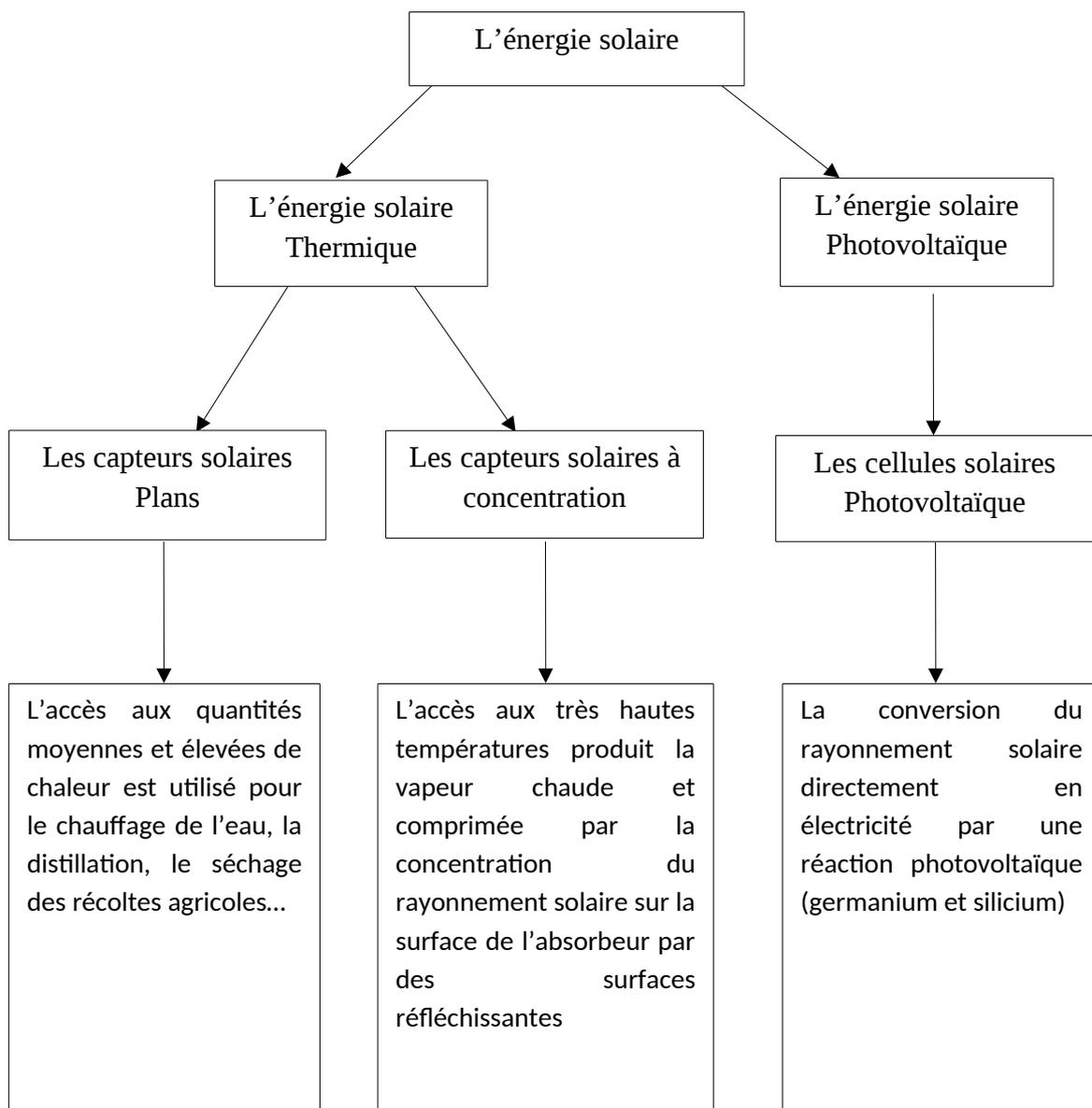


Figure I-1: Utilisation de l'énergie solaire.

I.2 Différents types des capteurs solaires

Les capteurs solaires peuvent être classés en plusieurs catégories, on distingue selon les types de captations d'énergie solaire:

- 1- Capteurs solaires plans.
- 2- Capteur solaire à eau (chauffe-eau).
- 3- Capteur à ruissellement.
- 4- Capteur à air.
- 5- Capteur à tubes évacués.
- 6- Concentrateurs.

I.2.1 Capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est constitué des parties principales suivantes :

La partie avant qui est exposé au rayonnement, c'est une couverture que est généralement en verre simple ou double destinée à réduire les pertes vers l'avant de l'absorbeur par rayonnement (effet de serre), et par convection (effet de lame d'air immobile). Elle doit résister aux changements de la température aux intempéries et recevoir le rayonnement sans réflexion ni diffusion importante. L'absorbeur est un panneau noir pourvu d'un réseau de tube de forme spirale où le fluide caloporteur circule.

Dans la partie arrière qui est le boîtier contenant le tout et les parois sont tapissés d'une couche isolante destinée à réduire les pertes de l'absorbeur vers l'arrière ou les cotés.

Les capteurs les plus utilisés sont les capteurs plans orientés le plus souvent vers le sud et inclinés par rapport à l'horizontale d'un angle pouvant être adapté à chaque saison.

I.2.2 Capteur solaire à eau

Dans ce type de capteur on distingue deux formes de systèmes :

Les systèmes à basse et à haute pression de circulation. On emploie les systèmes à basse pression pour le chauffe-eau industrielle dans le cas d'un système à circulation ou dans les foyers domestiques de certaines régions du monde. Dans ces systèmes, il suffit d'utiliser une bande plastique mince comme réservoir d'eau. Le plastique doit cependant être suffisamment épais pour supporter les conditions atmosphériques.

I.2.3 Capteur à ruissellement

Dans ce type de capteur, l'absorbeur a le meilleur contact avec l'énergie incidente, donc le rendement thermique est meilleur (mais avec des pertes de charge importantes). Ce type d'isolateur est utilisé pour le chauffage de l'eau.

I.2.4 Capteur à air

Ce type de capteur est constitué d'une couche absorbante à dos isolé, refroidie par un courant d'air circulant entre l'absorbeur et un absorbeur poreux. On peut employer à cet effet du tissu noir, de la fibre de verre noircie, des écrans rainurés et étirés, de la laine d'acier ou des assemblages de lamelles.

I.2.5 Capteur à tube évacués

Le capteur est constitué de plusieurs tubes en verre dans lesquels sont placés les absorbeurs. Ils sont montés en série. Les tubes sont mis dans les vides ce qui permet de réduire les pertes thermiques par convection et par conduction.

Le capteur est composé d'un récipient rempli d'une certaine quantité de fluide volatile qui fonctionne comme milieu caloporteur à fois que le fluide s'évapore et se condense. Plus précisément, le rayonnement solaire fait évaporer le fréon qui se charge de chaleurs latentes, laquelle est transmise au liquide caloporteur lors de sa condensation. Il existe également des capteurs à tubes évacués qui fonctionnent plus simplement en circuit direct.

I.2.6 Concentrateurs

Le capteur à concentration est un capteur solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement reçu (d'où le nom de capteur à concentration).

Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. En utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur l'absorbeur d'un capteur solaire, cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente le rendement de chauffage et son efficacité à hautes températures. Un autre avantage de ce système est que les réflecteurs sont sensiblement moins coûteux par unité de surface que les capteurs.

- Ils existent quatre types de capteurs à concentration :

- A- Concentrateur centrale à tour.
- B- Capteurs solaires fixes à concentration.
- C- Concentrateur parabolique.
- D- Concentrateur cylindre-parabolique.

Les capteurs à concentration permettent d'obtenir une température élevée au foyer, cependant ils n'utilisent que les rayons directs du soleil et il faut que les capteurs soient orientés en permanence vers le soleil (en utilisant en général des systèmes asservi).

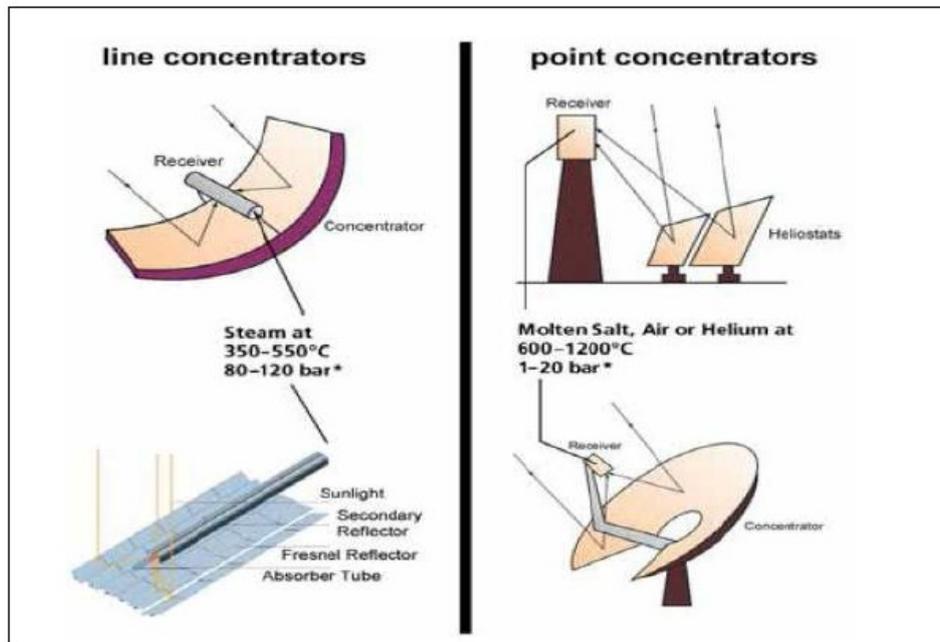


Figure I-2: Systèmes à concentration.

I.2.6.1 Concentrateur Centrale à tour

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaires à double axe qui dirige l'énergie du soleil vers un grand absorbeur situé dans une tour. A ce jour, la seule application du capteur héliostat est la production d'énergie dans un système dénommé «centrale à tour».

Une centrale à tour possède un ensemble de grands miroirs qui suit le mouvement du soleil, les miroirs concentrent les rayons du soleil sur le récepteur en haut de la grande tour. Un ordinateur garde les miroirs alignés afin que les rayons du soleil qui sont réfléchis, visent toujours le récepteur où la température peut dépasser 1000 °C. De la vapeur à haute pression est générée afin de produire de l'électricité.

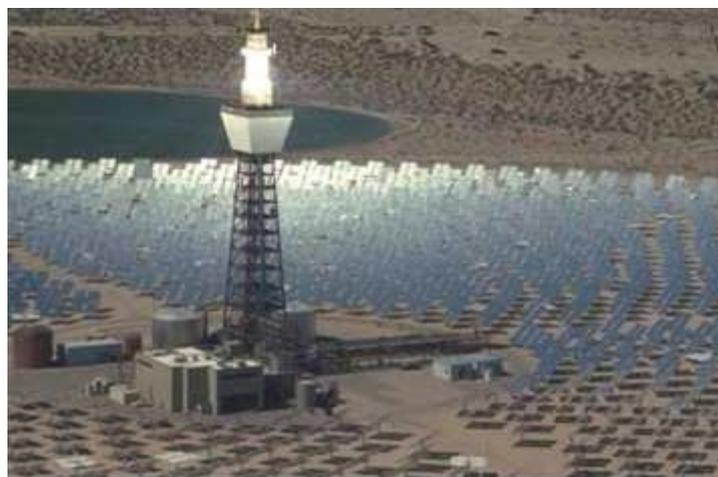


Figure I-3: Concentrateur centrale à tour.

I.2.6.2 Capteurs solaires fixes à concentration

Les capteurs fixes à concentration utilisent des réflecteurs à composés paraboliques ainsi que des réflecteurs plans afin d'orienter l'énergie solaire vers un absorbeur d'accompagnement ou une fente à travers un important angle. L'important angle d'admission pour ces réflecteurs élimine la nécessité d'avoir un système de pointeur solaire. Ce type de capteur comprend des capteurs plans à réflecteurs cylindro-paraboliques, des capteurs plans, avec des réflecteurs paraboliques de surpression.

I.2.6.3 Concentrateur parabolique

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeur) qui capte la chaleur ainsi concentrée. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500 °) sur le récepteur.

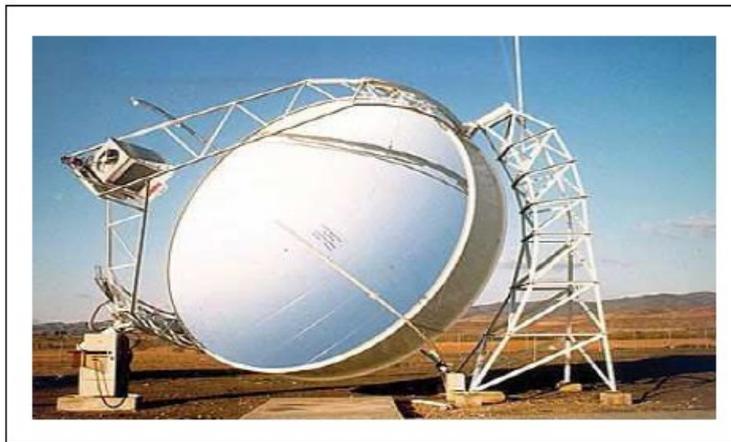


Figure I-4: Concentrateur parabolique.

I.2.6.d Concentrateur cylindro-parabolique

Les réflecteurs cylindro-paraboliques sont des systèmes en forme de « U ». Ils concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de réduire les pertes de chaleur.



Figure I-5: Concentrateur cylindro- parabolique

Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur solaire à simple axe ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C. Est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique. Les miroirs cylindro-paraboliques alignés concentrent la chaleur. Le circuit du fluide caloporteur passe au centre de chaque miroir et traverse l'ensemble du champ de capteurs. C'est la technologie la plus répandue aujourd'hui.

I.3 Utilisation mondiale du concentrateur

Les concentrateurs cylindro-paraboliques représentent 94 % des concentrateurs utilisables. C'est la meilleure technologie des centrales en construction et en projet. Cette technologie bénéficie en effet du retour d'expérience des centrales SEGS en Californie, en opération depuis bientôt 30 ans.

La technologie des centrales à tour est présente uniquement en Espagne où les centrales PS10 et PS20 à Séville, de puissances respectives de (10 M W et 20 M W) sont les seules centrales commerciales de ce type en opération à ce jour. Elles sont conçues avec un champ d'héliostats et de la vapeur saturée comme fluide de transfert. Une autre centrale à tour de 17 M W, Gemasolar, est en construction. Située dans la province de Séville, elle disposera d'un champ circulaire équipé d'un récepteur à sels fondus et bénéficiera d'une capacité de stockage de 15h

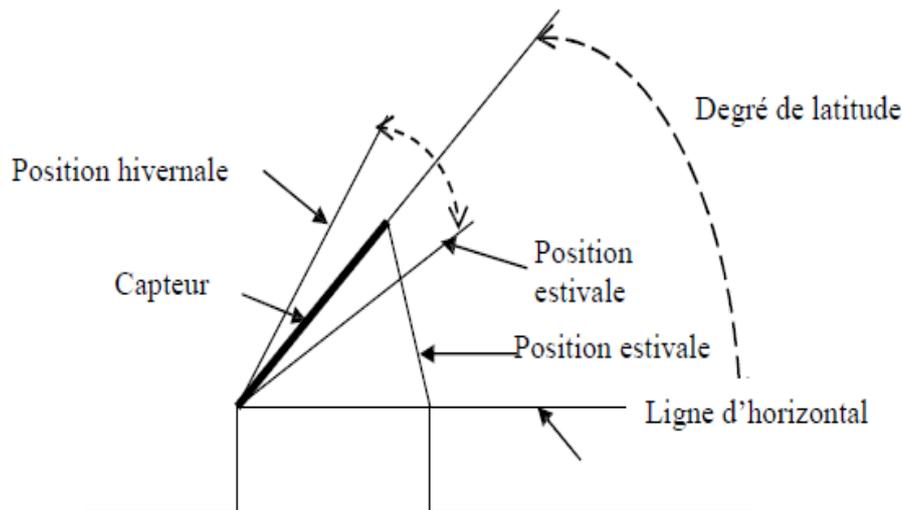


Figure I-6 : Installation d'un capteur solaire

I.4 Systèmes à concentration

En utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur l'absorbeur d'un capteur solaire, cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente son efficacité à hautes températures voir la figure (II.11), un autre avantage de ce système est que les réflecteurs sont sensiblement moins coûteux, par unité de surface, que les capteurs.

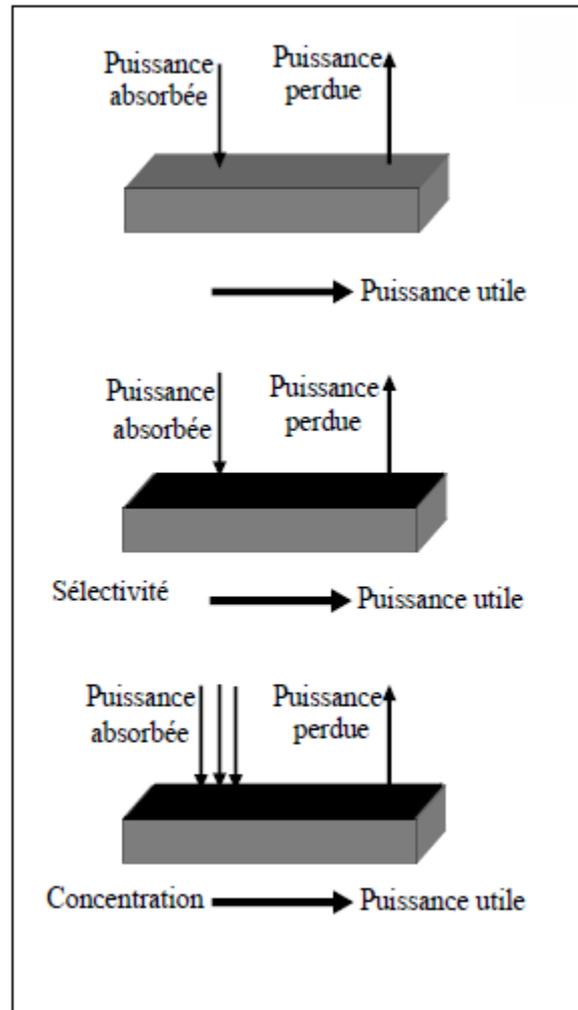


Figure I-7: Concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur.

I.5 Avantage d'utilisation des systèmes à concentration

Les avantages d'utilisation des systèmes à concentration sont :

- Pour une température donnée de l'absorbeur, celui-ci étant plus petit, les pertes thermiques sont moindres que pour les capteurs plans de même ouverture le rendement de captation peut donc être amélioré.

- Les températures obtenues sont plus élevées. L'utilisation de surfaces sélectives permet d'augmenter la température dans les capteurs plans mais il est difficile de dépasser quelques centaines de degrés. Au contraire, avec les systèmes à concentration, il est possible d'atteindre des températures de l'ordre de 4000°C.

- Le poids ou le coût d'un système peut être réduit en remplaçant un capteur plan par un système à concentration et un absorbeur plus petit. Ceci peut être intéressant pour les cellules photovoltaïques dont le prix demeure très élevé.

I.6 Inconvénients d'utilisation des systèmes à concentration

Les systèmes à concentration présentent un certain nombre d'inconvénient :

- Le rayonnement diffus est très mal utilisé. Dans les systèmes à concentration, seul le rayonnement direct est concentré.
- Les pertes optiques peuvent être importantes. Elles sont dues aux phénomènes de réflexion et de réfraction et aux caractéristiques géométriques des systèmes.
- Les systèmes à forte concentration nécessitent des montages optiques précis et donc chers.
- Dans la plus part du temps le flux n'est pas distribué de façon uniforme sur l'absorbeur.

I.7 Transfert de chaleur

I.7.1 Définition

On appelle « transfert de chaleur » le déplacement de la chaleur d'une région à une autre suite à une différence de température, ce déplacement peut se produire entre deux corps en contact (solide-solide, solide-fluide, fluide-fluide) ou entre deux parties d'un même corps. L'énergie interne du système change au cours du déplacement de la chaleur en produisant :

- Le flux thermique transmis.
- La répartition de la température à l'intérieur du milieu considéré.

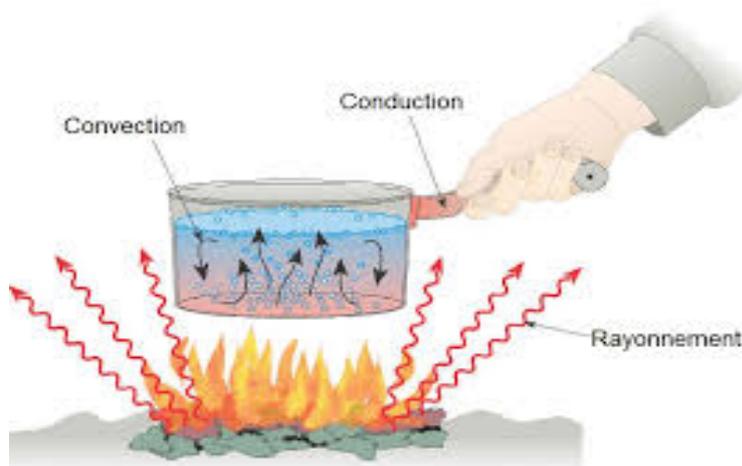


Figure I-8: Les trois modes de transfert de chaleur.

Encore c'est l'échange d'énergie sous forme de chaleur entre deux systèmes à des températures différentes peut se faire suivant trois modes de transmission fondamentaux: par conduction, par convection et par rayonnement.

I.7.1 Transfert de chaleur par conduction

I.7.1.1 Définition

La conduction est le transfert de chaleur des parties chaudes vers les parties plus froides, d'un même corps ou de deux corps en contact sans mouvement apparent de matière.

Ce mode peut s'effectuer dans les solides et les fluides. Cependant, c'est le seul mécanisme par lequel la chaleur peut se déplacer dans les solides opaques à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations atomiques ou moléculaires, diffusion électronique, etc...).

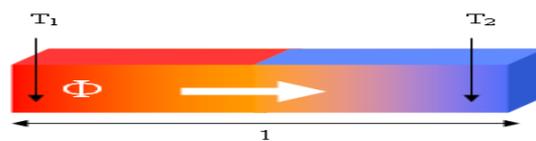
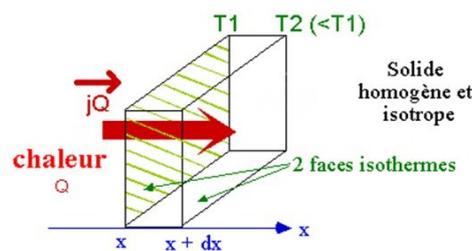


Figure I-9: Transfert de chaleur par conduction.

- La conduction est régie par la loi de Fourier :

L'équation de Fourier :

$$\Phi = -\lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right)$$



(I-1)

avec
$$\vec{j}_Q = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}$$

Figure I-10: Schéma expliquant la loi de Fourier.

Cette formule donne la valeur du flux de chaleur dans la direction x , avec :
Le signe (-) intervient puisque la chaleur s'écoule vers le décroissement de la température.

I.7.1.2 Conduction en régime permanent

a- Cas d'un mur

Hypothèses en conduction axiale :

- 1) La chaleur se propage principalement le long de l'axe x ;
- 2) nous supposons un régime permanent;
- 3) la conductivité thermique est constante;
- 4) il n'y a pas de terme source.

La distribution de température est :

$$T(x) = (T_2 - T_1) \frac{x}{L} + T_1 \quad (\text{I-2})$$

$$\Phi_{\text{cond}} = -\lambda A \left(\frac{dT}{dx} \right) = \frac{(T_1 - T_2) \lambda A}{L} \quad (\text{I-3})$$

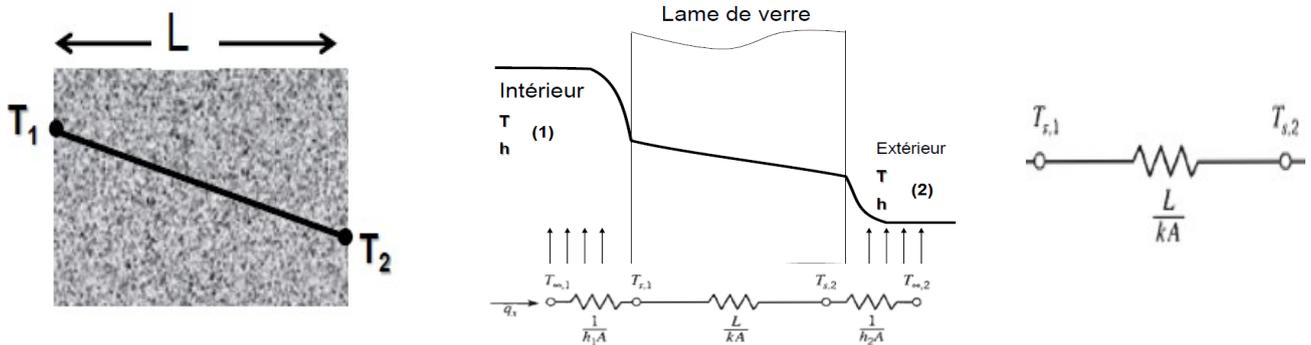


Figure I-11: Transfert de chaleur par conduction et résistance thermique du mur.

b- Cas d'un cylindre creux

Hypothèses en conduction radiale (coordonnées cylindriques) :

- 1) La chaleur se propage principalement dans la direction radiale ;
- 2) nous supposons un régime permanent;
- 3) la conductivité thermique est constante;
- 4) il n'y a pas de terme source;
- 5) le cylindre est creux ($r > 0$).

L'équation de diffusion de la chaleur se résume à :

$$\frac{\lambda}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (\text{I-4})$$

La distribution de température est :

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_2} + T_{s,2} \quad (\text{I-5})$$

$$\Phi_{cond} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln \frac{r_2}{r_1} \frac{1}{2\pi\lambda L}} \quad (I-6)$$

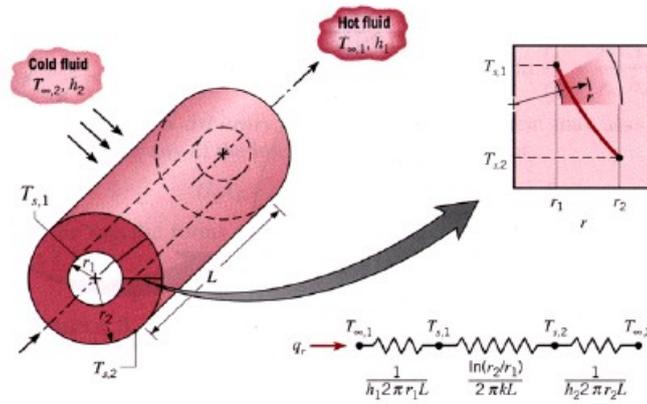


Figure I-12: Transfert de chaleur par conduction et résistance thermique du cylindre.

c- Cas d'un cône creux

Le flux de chaleur par conduction pour un cône :

Nous allons établir la théorie nécessaire au calcul du flux de chaleur conductif puisque nous en aurons besoin par la suite.

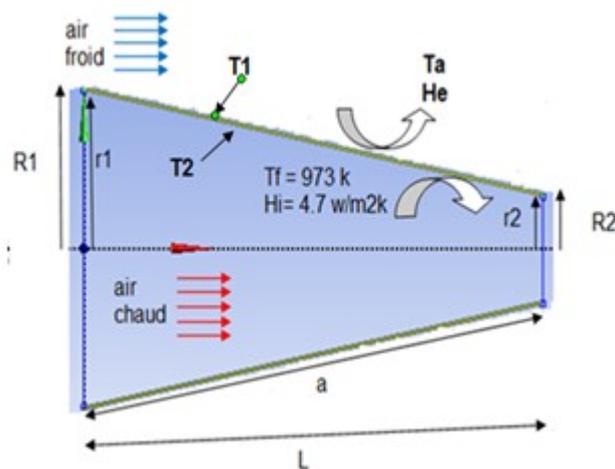


Figure I-13: Transfert de chaleur par conduction dans une géométrie conique.

$$d\Phi = -\lambda S grad T$$

$$\dot{Q} - \lambda S [\pi (R_1 + R_2) a] \frac{dT}{dR}$$

$$d\dot{Q} \frac{dR}{(R_1 + R_2)} = - \lambda S [\pi (R_1 + R_2) a] \frac{dT}{dR} \frac{dR}{(R_1 + R_2)}$$

$$\int_{\dot{Q}_i}^{\dot{Q}_e} \dot{Q} \frac{1}{(R_1 + R_2)} dR = \int_{T_i}^{T_e} - \lambda \pi dT$$

$$\dot{Q} \int_{\dot{Q}_i}^{\dot{Q}_e} \frac{1}{(R_1 + R_2)} dR = - \lambda \pi (T_2 - T_1)$$

$$\dot{Q} \ln \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_i}$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{cnd} = \frac{\lambda \pi a (T_2 - T_1)}{\ln \frac{(R_1 + R_2) \dot{Q}_e}{(R_1 + R_2) \dot{Q}_i}} \quad (\text{I-7})$$

7)

-On suppose que : $(R_1 + R_2)_{int} = (r_1 + r_2) \rightarrow \dot{Q}_{cnd} = \frac{\lambda \pi a (T_2 - T_1)}{\ln \frac{(R_1 + R_2) \dot{Q}_e}{(r_1 + r_2) \dot{Q}_i}}$

$$\dot{Q}_{cnd} = \frac{T_2 - T_1}{Rt h} \rightarrow Rt h = \frac{\ln \frac{(R_1 + R_2)}{(r_1 + r_2)}}{\lambda \pi a} \quad (\text{I-8})$$

I.7.2 Transmission de chaleur par convection

I.7.2.1 Définition

De façon générale, la convection est le transport d'une grandeur physique d'un fluide d'un point à un autre par le mouvement de ses molécules. Les différences de températures dans les fluides entraînent des différences de densités et donc un mouvement des particules du fluide, ce mouvement a pour effet de véhiculer la chaleur du fluide et d'égaliser les températures par substitution réciproque des molécules froides à des molécules chaudes.

Le phénomène de convection intervient à chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes (murs, plaques, tubes, ...etc.) à des températures différentes de celle du fluide ou lorsque deux fluides à des températures différentes sont mis en contact.

On dit que il ya deux formes de transfert de chaleur par convection :

I.7.2.2 Convection naturelle

La convection est dite naturelle si le mouvement des masses fluides responsables du transfert de la chaleur est provoqué par des différences de densités provenant elles mêmes des différences de températures à l'intérieur du fluide.

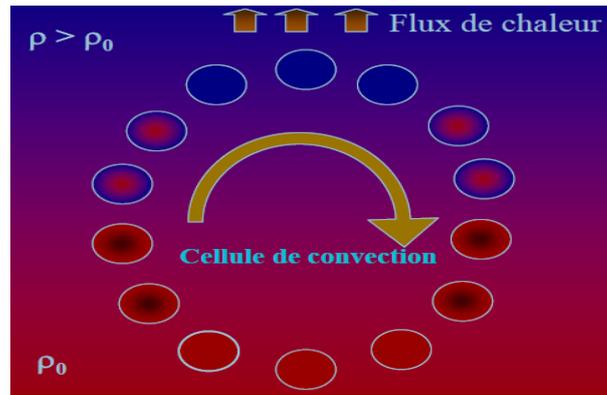


Figure I-14: Transfert de chaleur par convection naturelle.

I.7.2.3 Convection forcée

La convection est dite forcée si le mouvement des fluides est créé par une action extérieure (ventilateurs, pompes, ...etc.).

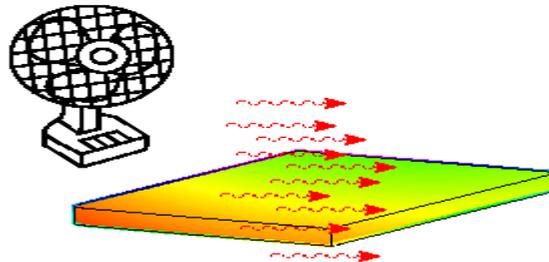


Figure I-15: Transfert de chaleur par convection forcée.

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

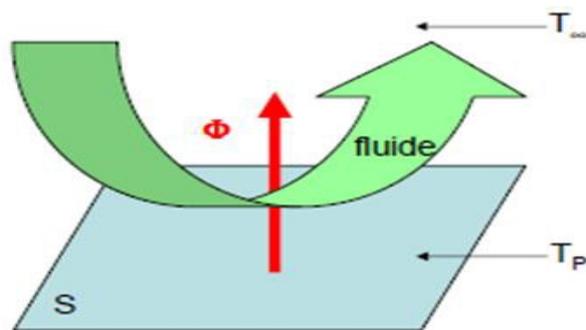
- La quantité de chaleur ΔQ qui traverse pendant l'intervalle de temps (dt), peut s'écrire :

$$\Phi_{cnv} = h S (T_p - T_\infty)$$

$$\Phi_{cnv.i} = h_i S_i (T_f - T_2)$$

$$\Phi_{cnv.e} = h_e S_e (T_1 - T_a)$$

T1, T2 et Ta ????



(I-9)

Figure I-16: Représentation schématique de la loi de Newton.

I.7.3 Transmission de la chaleur par rayonnement

I.7.3.1 Définition

Le Rayonnement est un échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent ou semi-transparent. Les matériaux ont la propriété d'absorber ou d'émettre des photons (ou des quantités d'énergie). L'énergie emportée par le photon est prélevée sur l'état d'énergie du corps et réciproquement l'énergie d'un photon absorbée est souvent transformée en chaleur. Cette propriété d'émission dépend donc de la température du milieu. Il s'agit d'un transfert à distance quasi-instantané sans nécessité de support matériel.

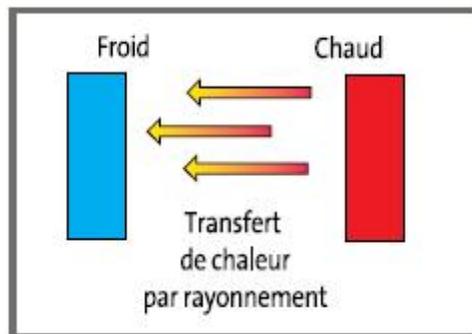


Figure I-17: Représentation schématique de transfert de chaleur par rayonnement.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents types de concentrateur solaire ainsi que les différents modes de transfert de chaleur. Nous nous sommes limités uniquement aux cas dont les équations seront utilisées dans la suite de notre travail.

Dans le chapitre suivant nous allons aborder les différents types d'ailettes, leur théorie et voir comment choisir une ailette avec une bonne efficacité.

II.1 Introduction

Pour augmenter le transfert thermique entre un fluide et un solide, il faut utiliser des ailettes de différents types.

Dans ce chapitre nous allons montrer les différentes formes d'ailettes et nous allons expliciter la théorie de quelque type d'ailettes qui seront utilisées dans nos calculs dans le prochain chapitre.

II.2 Ailettes

II.2.1 Définition

Une ailette est un dispositif thermique qui permet de créer des perturbations et de la turbulence au niveau de l'écoulement du fluide entourant l'ailette, elle permet d'augmenter le niveau de la turbulence dans la couche limite, mais surtout la surface de contact pour augmenter les échanges convectifs et donc le transfert de chaleur.

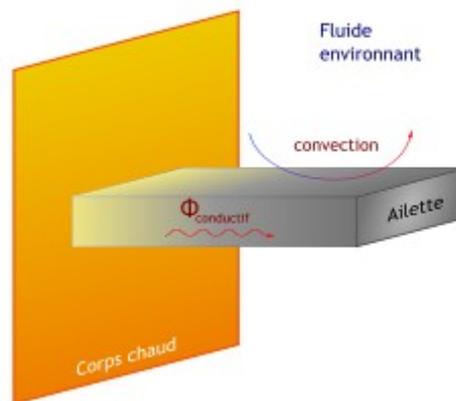


Figure II-1: Schéma d'une ailette.

L'ailette est en contact avec le corps chaud, la chaleur se propage par conduction à travers l'ailette qui est refroidie par convection par le fluide environnant.

II.2.2 Différentes formes d'ailettes

Les différents types d'ailettes sont regroupés en deux grandes parties :

II.2.2.1 Ailettes continues

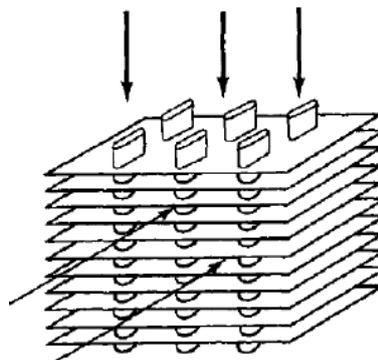


Figure II-2: Exemple typique d'une surface étendue continue.



Ailettes indépendantes

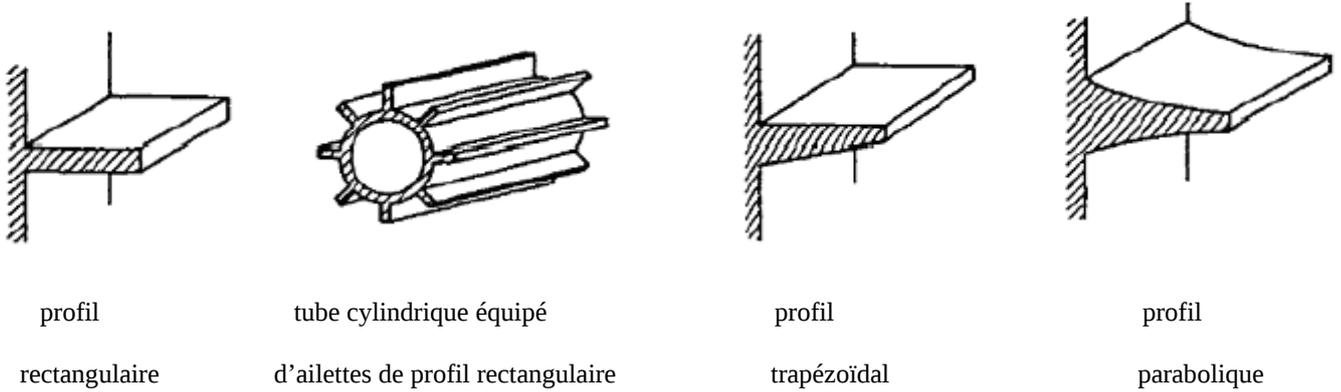


Figure II-3: Ailettes longitudinales de différentes formes de profil.

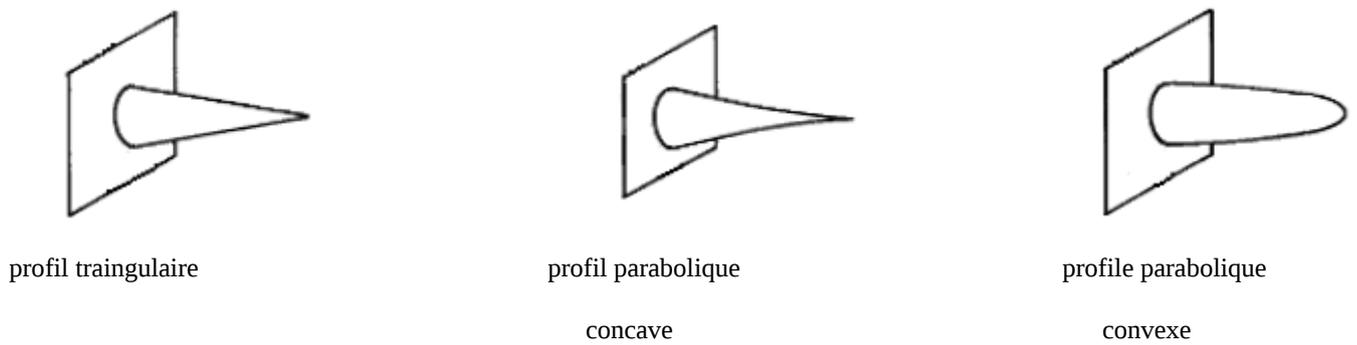


Figure II-4: Ailettes pointes ou épinesde différentes formes de profil.

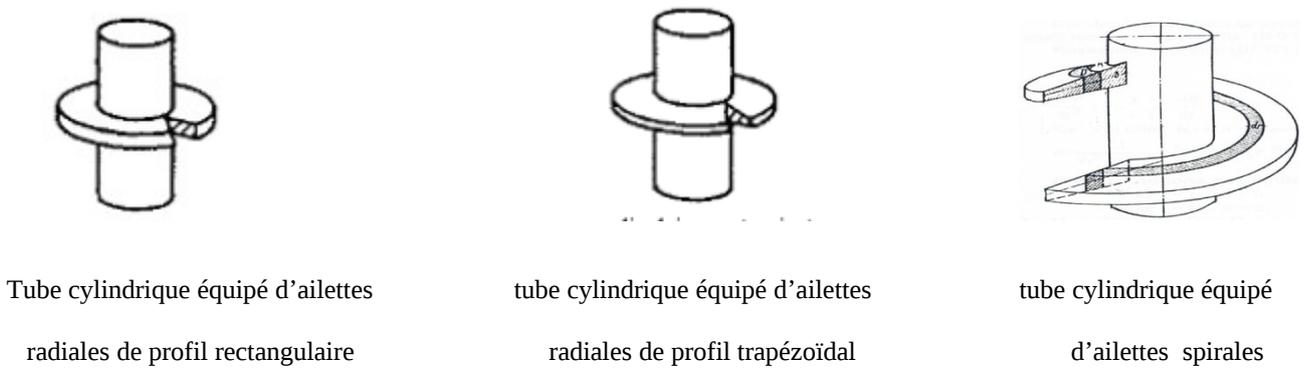


Figure II-5: Ailettes transversales de différentes formes de profil.

II.3 La théorie des ailettes

II.3.1 Equation de la barre

Le problème de la barre encastrée schématise le problème pratique important du refroidissement d'un solide par des ailettes.

Considérons une barre de section constante (épaisseur e et largeur ℓ) encastrée entre 2 surfaces à température T_p et baignant dans un fluide à température T_a .

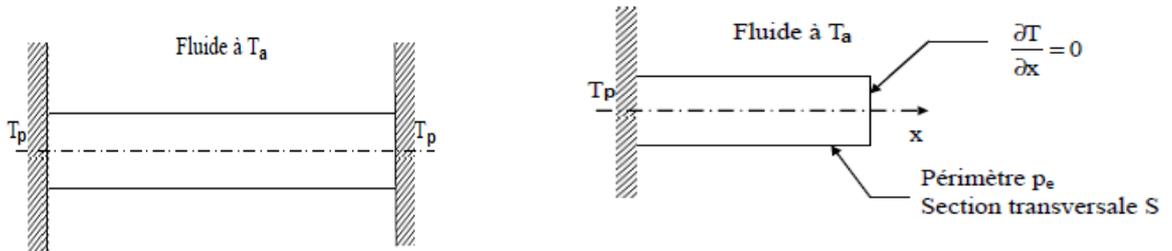


Figure II-6: Représentation d'une barre encastrée et schéma simplifié.

La symétrie du problème montre l'existence d'un extrémum de la température au milieu de la barre, ce qui permet de simplifier la géométrie et de ne considérer qu'une demi-barre avec condition de flux nul à l'extrémité située en contact avec le milieu à T_a .

La barre est supposée de section suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas de variation de température dans une même section droite à une distance x de l'encastrement dans la paroi à T_p .

Effectuons un bilan d'énergie sur le système constitué par la portion de barre comprise entre les abscisses x et $x+dx$ (nous retenons l'hypothèse du régime permanent et nous négligeons le rayonnement):

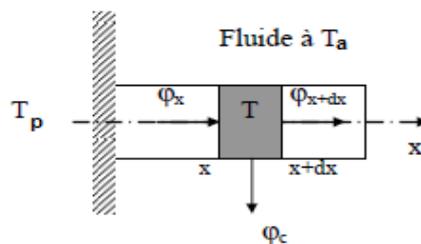


Figure II-7: Représentation des flux élémentaires sur une barre encastrée

Avec :

$$\phi_x = -\left(\lambda S \frac{dT}{dx}\right)_x \quad (\text{II-1})$$

$$\phi_{x+dx} = -\left(\lambda S \frac{dT}{dx}\right)_{x+dx} \quad (\text{II-2})$$

$$\Phi_{\text{cnv}} = h p \, dx [T(x) - T_a] \quad (\text{II-3})$$

Le bilan d'énergie s'écrit :

$$\Phi_x = \Phi_{x+dx} + \Phi_{\text{cnv}} \quad (\text{II-4})$$

Soit :

$$\left(\lambda S \frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} - \left(\lambda S \frac{dT}{dx} \right)_x = h p \, dx [T(x) - T_a] \quad (\text{II-5})$$

Si λ et S sont indépendants de l'abscisse x , nous obtenons :

$$\lambda S \frac{\left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} - \left(\frac{dT}{dx} \right)_x}{dx} = h p \, dx [T(x) - T_a] \quad (\text{II-6})$$

Donc T est solution de l'équation différentielle suivante appelée équation de la barre :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{hp}{\lambda S} (T - T_a) = 0 \quad (\text{II-7})$$

II.3.2 Flux extrait par une ailette

C'est la chaleur dissipée par une ailette, qui est un milieu bon conducteur de la chaleur dont une dimension est grand devant les autres, exemple: Barre d'épaisseur e et de longueur L , avec $e \ll L$. Elles sont utilisées à chaque fois que des densités de flux élevées sont à transmettre dans un encombrement réduit: refroidissement de composants électroniques, refroidissement d'un moteur par air ...etc.

On a établi l'équation différentielle vérifiée par la température $T(x)$ d'une ailette encastrée dans un mur à la température T_p et baignant dans un fluide à la température T_a en utilisant l'équation (II-7) :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - m^2 (T - T_a) = 0 \quad (\text{II-8})$$

En posant : $m^2 = \frac{hP}{\lambda S}$

- si la section $S = cts$, c'est une équation différentielle du deuxième ordre à coefficient constant, elle est appelée **équation de l'ailette en régime permanent**.

$$m = \sqrt{\frac{hp}{\lambda S}} \quad (\text{II-9})$$

et la solution générale est de la forme :

$$T - T_a = A \exp(mx) + B \exp(-mx) \quad \text{ou} \quad T - T_a = A_1 \text{ch}(mx) + B_1 \text{sh}(mx) \quad (\text{II-10})$$

II.3.3 Ailette circulaire de section rectangulaire

Ces d'ailettes destinées à améliorer le transfert de chaleur entre la paroi externe d'un tube et le milieu ambiant (exemple: tubes de radiateur d'automobile) peuvent être schématisées de la manière suivante :

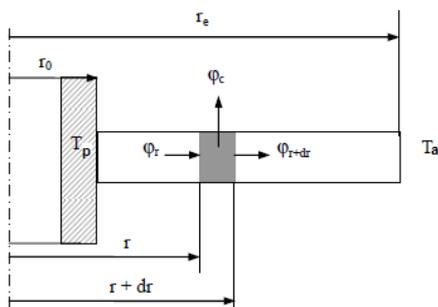


Figure II-8-a: Représentation du flux circulaire élémentaire sur une barre encastrée.

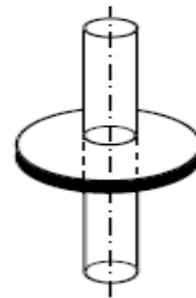


Figure II-8-b: Schéma d'une ailette.

Effectuons un bilan thermique sur l'élément d'ailette compris entre les rayons r et $r+dr$:
Le bilan d'énergie s'écrit:

$$\Phi_r = \Phi_{r+dr} + \Phi_{\text{cnv}} \quad (\text{II-11})$$

Avec :

$$\Phi_r = -\lambda 2\pi r e \left(\frac{dT}{dr} \right)_r \quad (\text{II-12})$$

$$\Phi_{r+dr} = -\lambda 2\pi (r+dr) e \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r+dr} \quad (\text{II-13})$$

$$\Phi_{\text{cnv}} = h 2\pi r dr [T(r) - T_a] \quad (\text{II-14})$$

Si $\frac{dT}{dr}$ est indépendant du rayon r , nous obtenons :

$$\frac{1}{r} \frac{(r+dr) \left(\frac{dT}{dx} \right) - r \left(\frac{dT}{dx} \right)}{dr} = \frac{2h[T(x)-T_a]}{\lambda e}$$

(II-15)

Soit encore : $\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\theta}{dr} - \frac{2h}{\lambda e} \theta$ ou $\theta = T - T_a$

C'est une équation de Bessel (annexe) dont la solution s'écrit sous la forme :

$$\Theta = C_1 I_0(mr) + C_2 K_0(mr)$$

(II-16)

où $m = \sqrt{\frac{2h}{\lambda e}}$

C_1 et C_2 étant déterminées par les conditions aux limites :

En $r = r_0$: $\theta = T_p - T_a$

En $r = r_e$: $h \theta(r_e) = -\lambda \frac{d\theta}{dr}(r_e)$ (cas le plus général : transfert de chaleur à l'extrémité)

On en déduit les valeurs de C_1 et de C_2 :

$$C_1 = \frac{K_1(mr_e) - K_0(mr_e) \frac{h}{\lambda m}}{I_1(mr_e) K_0(mr_0) + I_0(mr_0) K_1(mr_e) + \frac{h}{m\lambda} [I_0(mr_0) K_0(mr_e) + I_0(mr_e) K_0(mr_0)]}$$

(II-17)

$$C_2 = \frac{1 - C_1 I_0(mr_0)}{K_0(mr_0)}$$

(II-18)

- Dans le cas où l'on peut faire l'hypothèse du flux nul à l'extrémité : $\sqrt{\frac{he}{\lambda}} \ll 1$, on aboutit à l'expression simplifiée suivante :

$$\frac{T(r) - T_a}{T_p - T_a} = \frac{I_1(m r_e) K_0(m r) - K_1(m r_e) I_0(m r)}{I_1(m r_e) K_0(m r_0) + I_0(m r_0) K_1(m r_e)} \quad (\text{II-19})$$

et le flux total dissipé par l'ailette a alors pour expression :

$$\Phi_{diss} = \lambda 2 \pi r_0 e m (T_p - T_a) \frac{I_1(m r_e) K_1(m r_0) - K_1(m r_e) I_0(m r_0)}{I_1(m r_e) K_0(m r_0) + I_0(m r_0) K_1(m r_e)} \quad (\text{II-20})$$

II.3.4 Ailette longitudinale de section rectangulaire

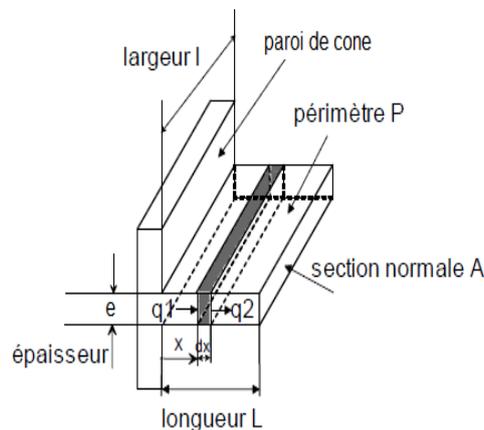


Figure II-9: Ailette rectangulaire.

$$A(x) = e.l$$

$$dS(x) = 2 \cdot (l+e).dx = 2.l.dx \rightarrow dS(x)/dx = 2.l$$

En remplaçant dans l'équation les valeurs de A(r) et S(r), on obtient :

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{1}{e.l} \frac{d\theta}{dx} - \frac{h}{\lambda} \left(\frac{1}{e.l} \cdot 2.l \right) \theta = 0 \quad (\text{II-21})$$

On trouve :

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hp}{\lambda A} (T - T_a) \quad (\text{II-22})$$

avec la section $A=l.e$ et le périmètre $P=2 \cdot (l+e)$

Donc la forme d'équation est :

$$\frac{d^2\theta(x)}{dx^2} - m^2\theta(x) = 0 \quad (\text{II-23})$$

Sa solution est donnée par :

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \tag{II-24}$$

avec :

$$m = \sqrt{\frac{hp}{\lambda A}}$$

Pour les deux cas suivant la chaleur idéale dissipée par l'ailette est:

$$\Phi_{max} = h(2l)L(T_1 - T_a) \tag{II-25}$$

Cas 1 : Convection imposée à l'extrémité (longueur finie)

Conditions aux limites: $x=0, \theta=\theta_0; x=L, -\lambda \frac{d\theta}{dx} = h_e \theta$

- Chaleur dissipée par l'ailette: $\Phi_{diss} = \lambda A \theta_0 m \frac{(\lambda m \sinh(mL) + h_e \cosh(mL))}{(\lambda m \cosh(mL) + h_e \sin h(mL))}$ (II-26)

- Efficacité de l'ailette : $\eta_{ail} = \frac{(\sinh(mL) + H_e \cosh(mL))}{mL(\cosh(mL) + H_e \sin h(mL))}$ (II-27)

où: $He = h_e l / \lambda m$

Cas 2: Convection nulle à l'extrémité (isolation thermique, $h_e = 0$)

On a: $x=0, \theta=\theta_0; x=L, -\lambda \frac{d\theta}{dx} = 0$

- Chaleur dissipée par l'ailette: $\Phi_{diss} = \lambda A \theta_0 m \tanh(mL)$ (II-28)

Tableau des efficacités des ailettes longitudinales de profil rectangulaire			
Cas	Conditions aux limites	Efficacité par méthode de dérivation	Efficacité par méthode d'intégration
1 : convection imposée à l'extrémité	$x = 0, \theta = \theta_0;$ $x = L, -k \frac{d\theta}{dx} = h_e \theta$	$\frac{\sinh(mL) + He \cdot \cosh(mL)}{mL(\cosh(mL) + He \cdot \sinh(mL))}$	$\frac{-H_e + \sinh(mL) + H_e \cosh(mL)}{mL(\cosh(mL) + H_e \sinh(mL))}$
2: isolation thermique, $h_e=0$	$x = 0, \theta = \theta_0;$ $x = L, k \frac{d\theta}{dx} = 0$	$\frac{\tanh(mL)}{mL}$	$\frac{\tanh(mL)}{mL}$
3 : ailette très longue	$x = 0, \theta = \theta_0;$ $x \rightarrow \infty, \theta(x) \rightarrow 0$	$\frac{1}{mL}$	$\frac{1 - e^{-mL}}{mL}$
4 : à l'extrémité : $x=L, \theta=\theta_L$	$x=0, \theta = \theta_0 ;$ $x=L, \theta = \theta_L$	$\frac{1}{mL} \frac{\cosh(mL) - \frac{\theta_L}{\theta_0}}{\sinh(mL)}$	$\frac{\tanh(\frac{mL}{2})(1 + \frac{\theta_L}{\theta_0})}{mL}$

le profil

Tableau II-1: Efficacités des ailettes longitudinales.

II.4 Efficacité d'une ailette

II.4.1 Définition

L'efficacité d'une ailette est définie comme étant le rapport entre le taux de transfert de chaleur réel et le taux de transfert thermique idéal de l'ailette qui existerait si elle était toute à la température de la base.

$$\eta_{\text{ail}} = \frac{\Phi_{\text{réel}}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (\text{II-30})$$

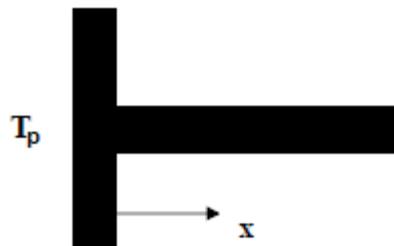
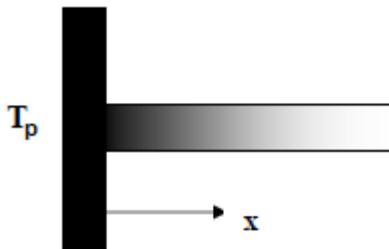


Figure II-10-1: Situation réelle.

Figure II-10-2: Situation idéale.

$\Phi_{\text{réel}}$: Taux de transfert de chaleur réel, Figure 10-1.

Φ_{max} : Taux de transfert de chaleur idéal, Figure 10-2.

$$\eta_{\text{ail}} = C_2 \frac{I_1(mr_e)K_1(mr_0) - K_1(mr_e)I_1(mr_0)}{I_1(mr_e)K_0(mr_0) + I_0(mr_0)K_1(mr_e)} \quad (\text{II-31})$$

avec :

$$\varnothing_{\max} = 2 h \pi (r_e^2 - r_0^2) (T_p - T_a)$$

(II-32)

$$C_2 = \frac{2 r_0 / m}{r_e^2 - r_0^2}$$

$$\Rightarrow \varnothing_{\text{réel}} = \eta_{\text{ail}} \cdot \varnothing_{\max}$$

$$= \frac{2 r_0 / m}{r_e^2 - r_0^2} \frac{I_1(m r_e) K_1(m r_0) - K_1(m r_e) I_1(m r_0)}{I_1(m r_e) K_0(m r_0) + I_0(m r_0) K_1(m r_e)} 2 H \pi (r_e^2 - r_0^2) (T_p - T_a)$$

(II-

33)

II.5 Résistance thermique d'une ailette

Des relations (II-30) et (I-7) on déduit :

$$\varnothing_{\text{réel}} = \frac{(T_p - T_a)}{\frac{1}{\eta S H}}$$

La résistance thermique globale entre la base de ailette à la température T_p et le fluide à la température T_a s'écrit donc :

$$R_{\text{ail}} = \frac{1}{\eta h S}$$

(I-7)

II.6 Choix des ailettes

Les ailettes sont utilisées lorsqu'il faut extraire une densité de flux importante dans un encombrement réduit, exemples: radiateur d'automobile, carter de moteur refroidi par air, évaporateur de climatiseur,... etc. D'une façon générale, l'usage des ailettes est :

- *peu utile pour les liquides car h est grand,
- * utile dans le cas des gaz car h est faible.

*choisir une géométrie convenable d'une ailette exige un compromis aussi bien entre :

- le prix.
- le poids.

- l'espace disponible et la chute de pression qu'entre les propriétés du transfert de la chaleur des surfaces étendues.

*Les ailettes très minces.

*Les ailettes étroites et rapprochées sont meilleur au point de vue transmission de la chaleur que les ailettes espacées et épaisses.

*Evidemment, les ailettes formées d'un matériau ayant une conductivité thermique élevée sont souhaitables.

Remarque :

- Dans le cas ou il ya un flux à l'extrémité, on peut utiliser l'équation de l'efficacité d'une ailette.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu quelques types d'ailettes, le bilan énergétique du transfert de chaleur dans ces dernières et comment calculer le flux réel et idéal dissipé avec différentes conditions aux limites. Nous avons aussi vu comment choisir une ailette avec une bonne efficacité.

Le prochain chapitre décrira le travail du laboratoire Elioslab ainsi que notre travail de simulation avec Ansys Workbench pour le refroidissement d'un concentrateur solaire.

III-1 Introduction

Nous allons, dans ce chapitre, décrire le travail du laboratoire Elioslab sur lequel nous nous sommes basés puis les étapes de nos calculs des températures et des flux de chaleur du concentrateur solaire avec différent nombre d'ailettes. Puis nous présenterons nos étapes des simulations effectuées sous la plateforme Ansys Workbench afin de valider notre travail.

III-2 Travail du labo-Elioslab [9]

III-2-1 Résumé

L'analyse numérique en trois dimensions et l'optimisation d'un système de dissipateur de chaleur à ailettes pour le contrôle thermique d'un Concentrateur Parabolique Composé (CPC) lié avec un récepteur solaire à haute température (Fig.III.1). Les simulations sont effectuées pour un système constitué par un récepteur solaire couplé avec un (CPC) à ailettes pour évaluer les distributions de température. Quatre configurations avec différentes ailettes autour du (CPC) sont étudiées pour chercher la meilleure performance thermique en termes de températures les plus basses de la paroi (CPC) avec le nombre minimal d'ailettes. Parmi les quatre configurations considérées avec une, trois, sept et treize ailettes, le système avec sept ailettes est par conséquent choisi comme un bon compromis entre les performances et les coûts.

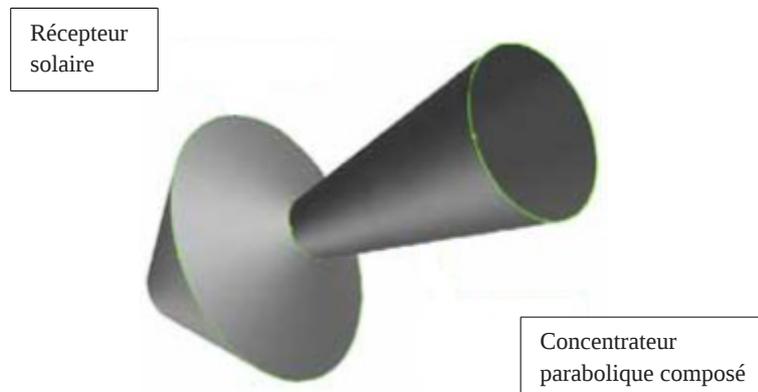


Figure III-1: Schéma d'un concentrateur solaire avec récepteur.

Le système dans la figure (III-27) est constitué par un récepteur solaire en acier couplé avec un concentrateur parabolique composé en aluminium.

III-2-2 Données

1- Le récepteur solaire est constitué par deux troncs de cône en acier creux à l'intérieur :

Les diamètres du cône inférieur sont de **180 mm** et **900 mm**; il a **450 mm** de longueur.
 Les diamètres du cône supérieur sont de **900 mm** et **200 mm**; il a **200 mm** de longueur.
 Une lentille semi-transparente quartz est situé dans la bouche du récepteur.

2- Le concentrateur parabolique composé est constitué par un aluminium tronc de cône.

Les diamètres de la base sont **200 mm** et **600 mm**; elle a **1000 mm** de longueur.

Propriétés thermo-physiques de l'acier du récepteur solaire, du CPC en aluminium, de la lentille en quartz et de l'air sont rapportées dans le tableau (III.1) ci-dessous.

Propriétés	Récepteur en acier	Cpc en aluminium	Lentille quartz	Air à 300 k
Conductivité thermique (w/m k)	16,3	202,4	8,00	0,0242
Chaleur spécifique (J/kg k)	502,5	871,0	741,0	1006,4
Masse volumique (kg/m ³)	8030	2719	2650	1,78
Viscosité (pa s)	1,79.10 ⁻⁵

Tableau III-1: Propriétés thermo physiques.

3- Le coefficient de transfert de chaleur uniforme sur la surface externe du récepteur solaire $h_e = 150 \text{ w} / \text{m}^2 \text{ k}$ et la température du fluide de travail $T_f = 973 \text{ K}$.

4- Le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle uniforme du CPC et le système de dissipateur de chaleur à ailettes, $h_e = 10 \text{ w} / \text{m}^2 \text{ k}$ sur les surfaces externes et une température $T_a = 300 \text{ K}$ de l'air ambiant ont également été supposés.

5- Un taux de chaleur solaire absorbée de 30 kW par le système. Il a été simulé au moyen d'un taux de chaleur volumétrique sur le récepteur interne et les surfaces du CPC.

** La distribution du taux de génération de chaleur volumétrique a été évaluée. La répartition réelle du taux de chaleur absorbée par les parois du récepteur solaire a été simulée au moyen d'une génération d'énergie interne appropriée sur une épaisseur optique de 0,01 mm et le taux de flux chaleur absorbée indiqué dans le tableau (3) ont été calculés.

Ø absorbé par le CPC	27.10 ² W
Ø absorbé par le fond du récepteur	9.10 ² W
Ø absorbé par le cône supérieur	31.10 ² W
Ø absorbé par le bas du cône	23.10 ³ W
Ø total absorbé	30.10 ³ W

Tableau III-2: Flux chaleur absorbés [9].

6- Quatre configurations avec différents nombre d'ailettes ont été étudiées afin de déterminer la meilleure performance thermique. Elles sont esquissées sur la figure (III.2).

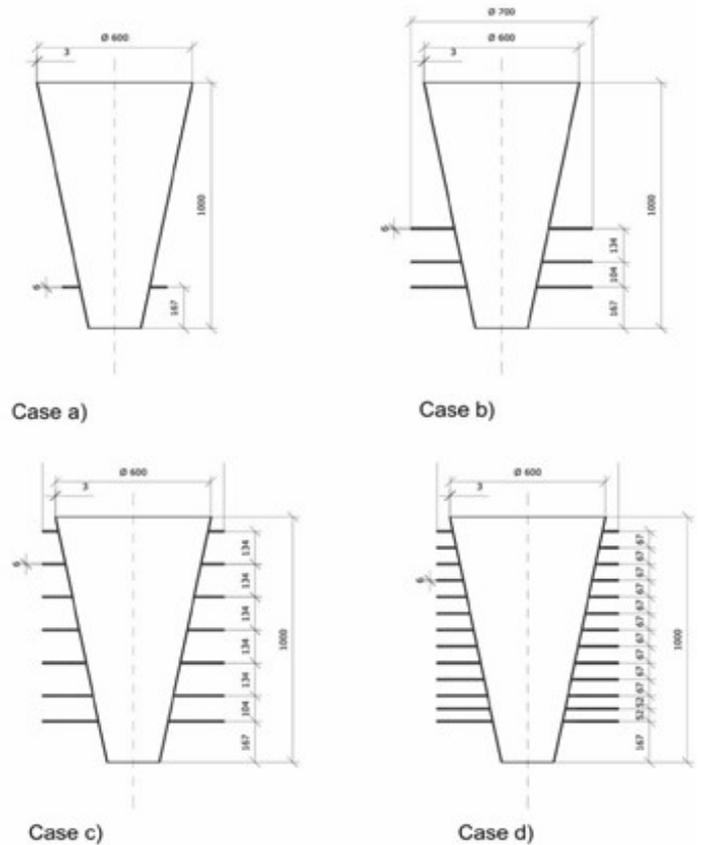
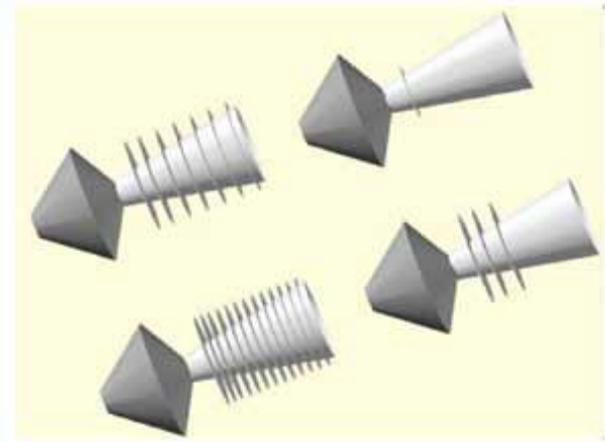


Figure III-2: Schéma du CPC avec différents nombre d'ailettes [9].

où:

- **cas a)** Une ailette, rayon extérieur = 200 mm, épaisseur = 6 mm;
- **cas b)** trois ailettes, rayon extérieur = 350 mm, épaisseur = 6 mm, divers emplacements;
- **cas c)** sept ailettes, rayon externe = 350 mm, épaisseur = 6 mm, divers emplacements;
- **cas d)** treize ailettes, rayon extérieur = 350 mm, épaisseur = 6 mm, divers emplacements.

III-2-3 Résultats

- L'analyse numérique a été réalisée au moyen du code commercial Fluent.

Le résultat du calcul des températures, des flux de chaleur et des efficacités pour le cône avec 7 ailettes est donné par tableau III.3 :

	Première ailette	Troisième ailette	Cinquième ailette	Septième ailette
T_p (K)	370	358	361	368
S (m ²)	0,666	0,564	0,423	0,246
$\varnothing_{diss.ail}$ (W)	345	275	240	164
η_{moy} (%)	74	85	93	98

Tableau III-3: Résultats pour le cône avec 7 ailettes [9].

Les profils de température de paroi du cône en fonction des différentes positions, pour les quatre configurations (cas a, b, c et d) et pour le CPC sans ailettes, sont présentés dans la figure (III.3).

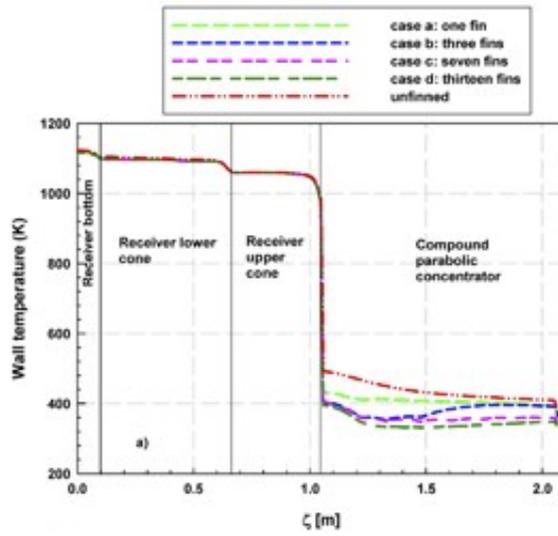


Figure III-3: Profils de température du cône pour différent nombre des ailettes [9].

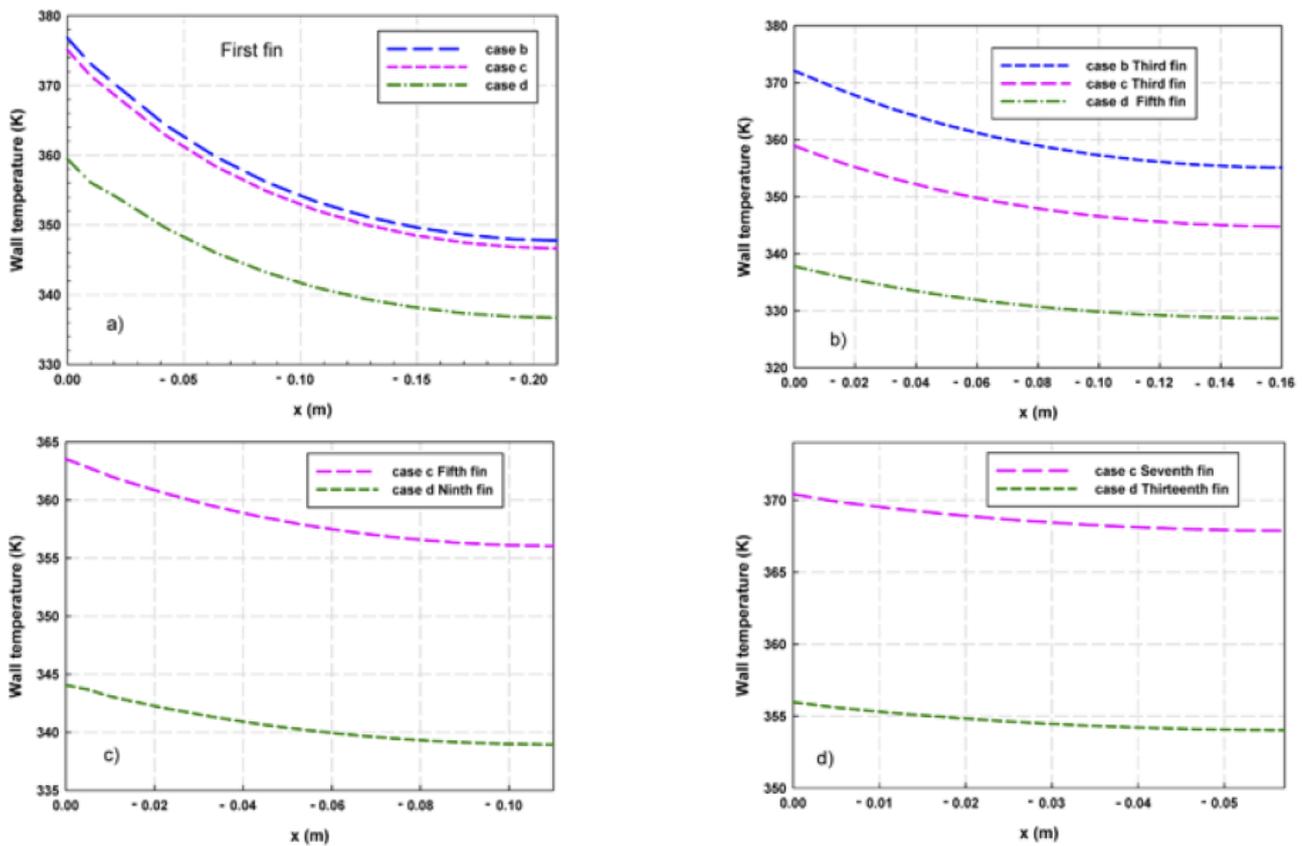


Figure III-4: Profils de température des ailettes [9].

III-3 Calcul des performances thermiques du CPC

Nous allons maintenant faire nos propres calculs des performances thermiques du cône afin de valider les résultats du laboratoire EliosLab.

III-3-1 Calcul des températures du cône sans ailettes

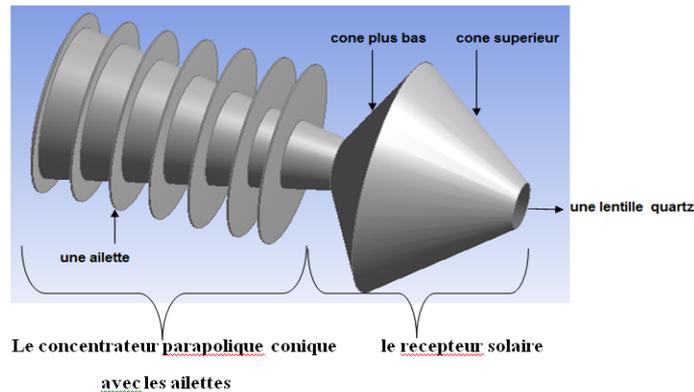


Figure III-5: Conception d'un système de concentration solaire.

- **Données :** $L = 1.0 \text{ m}$; $a = 1.02 \text{ m}$. $R_1 = 0.3 \text{ m}$; $r_1 = 0.294 \text{ m}$.
 $R_2 = 0.1 \text{ m}$; $r_2 = 0.094 \text{ m}$. $\Phi_{\text{diss}} = 27.10^2 \text{ W}$

- Hypothèses :

- 1- Le régime est permanent : tous les paramètres et les variables sont constants dans le temps.
- 2- La conductivité thermique de l'ailette ne change pas avec la température ou la direction (matériau homogène).
- 3- Coefficient de transfert thermique de l'ailette de l'environnement est constant et uniforme.
- 4- Pas de source d'énergie : c'est-à-dire qu'il n'y a pas une génération.
- 5- La longueur de l'ailette est grande par rapport à son épaisseur, ce qui nous permet de supposer que la température est uniforme dans chaque section de l'ailette.
- 6- Il n'y a pas de résistance de contact entre l'ailette et le cône.
- 7- Le flux de chaleur est conservé : $\Phi_e = \Phi_s$

- Calcul de T_1 , T_2 et h_i

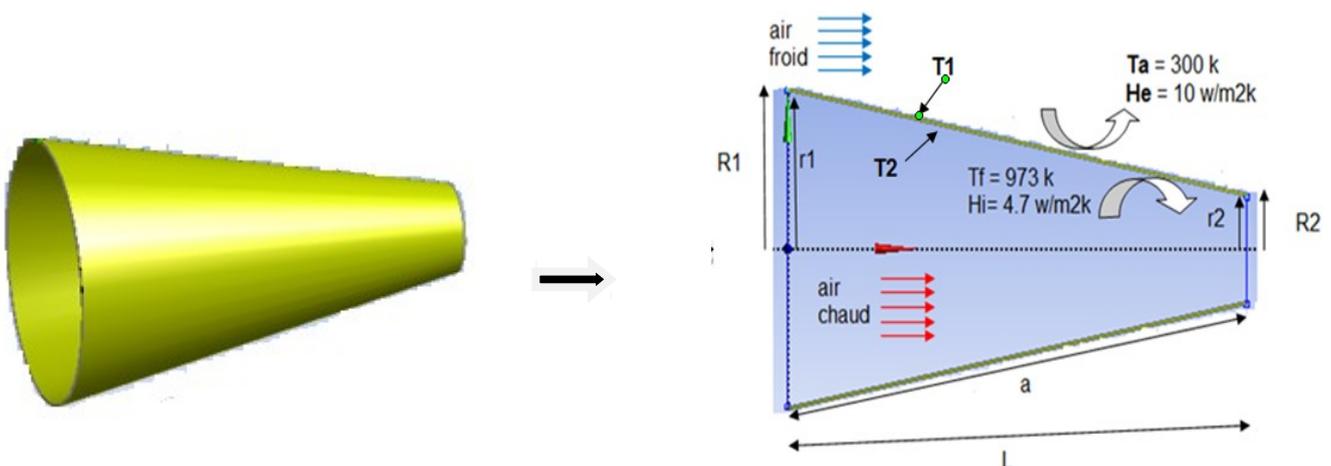


Figure III-6: Représentation schématique de cône.

En utilisant l'équation (I-9) on a:

$$\Phi_{cnv.i} = \Phi_{cnv.e} = \Phi_{cnd} = 2700 \text{ W}$$

$$\rightarrow T_1 = T_a + \frac{\Phi}{He Se}$$

$$\rightarrow T_1 = 300 + \frac{2700}{10.1,28}$$

$$\rightarrow T_1 = 510.93 \text{ k}^\circ$$

En utilisant l'équation (I-7) on a:

$$\rightarrow R_{th} = 0,000046 \frac{\text{k}^\circ}{\text{w.m}}$$

$$\rightarrow T_2 - T_1 = \Phi R_{th} \rightarrow T_2 = \Phi R_{th} + T_1$$

$$\rightarrow T_2 = 2700 \cdot 0,000046 + 510,93$$

$$\rightarrow T_2 = 511.05 \text{ k}^\circ$$

En utilisant l'équation (I-9) :

$$\rightarrow Hi = \frac{2700}{1,243(973 - 511.05)}$$

$$\rightarrow Hi = 4,70 \frac{\text{w}}{\text{m}^2 \cdot \text{k}^\circ}$$

III-3-1 Calcul des températures du cône avec ailettes

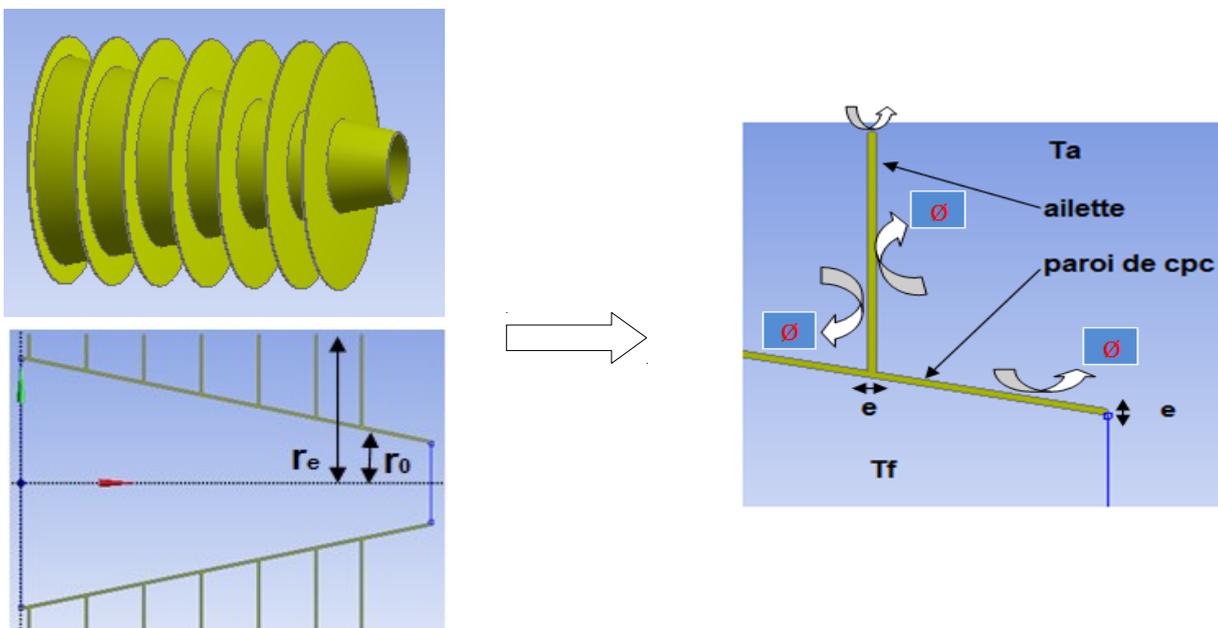


Figure III-7: Représentation schématique des flux de chaleur dans les ailettes.

En utilisant l'équation (I-9) et les équations :

$$A(r) = 2 \pi r e$$

$$S(r) = 2 \pi (r_e^2 - r_0^2)$$

$$S = S_T = S_{\text{ailettes}} + S_{\text{entre ailettes}}$$

Nous aurons donc les résultats ci-dessous :

	01 ailette	03 ailettes	07 ailettes	13 ailettes
$S_T (m^2)$	1,94	3,52	4,15	7,44
$T_1 (K)$	439,17	377,14	365,06	336,30

Tableau III-4: Surface d'échange et température extérieure pour différents nombres d'ailettes.

III-3-3 Calcul du flux dissipé par les sept ailettes avec le cône

En utilisant les équations (II-30) et (II-31) on aura les résultats suivants :

	Première ailette	Deuxième ailette	Troisième ailette	Quatrième ailette	Cinquième ailette	Sixième ailette	Septième ailette
$r_0 (m)$	0,133	0,155	0,183	0,211	0,239	0,267	0,295
$\Phi_{\text{diss}} (W)$	308,04	304,48	301	291,5	253,53	200,68	142,41
$\eta_{\text{ail}} (\%)$	72	75	82	91	95	96	99

Tableau III-5: Flux dissipés et efficacités pour différents nombres d'ailettes.

$$\Phi_{\text{Total diss}} = \sum_1^7 \Phi_{\text{diss}} = 1803.64 W$$

$$\Phi_{\text{diss entre les ailettes}} = \Phi_{\text{entrée}} - \Phi_{\text{Total diss}} = 2700 - 1803.64$$

$$= 896.38 W$$

III-4 Simulation numérique

Pour la simulation numérique de ce problème, il faut passer par quatre étapes importantes :

- 1- Modélisation du cône (*pré-processing*).
- 2- Maillage (*pré-processing*).
- 3- Introduction des conditions aux limites et résolution (*processing*).
- 4- Sortie des résultats (*post-processing*).

III-4-1 Modélisation du cône

Cette modélisation sera faite en utilisant le module **Ansys Désigne Modeler** (Fig.III.8). Ce module est automatiquement lancé quand on choisit l'outil *géométrie* dans *systèmes de composants*.

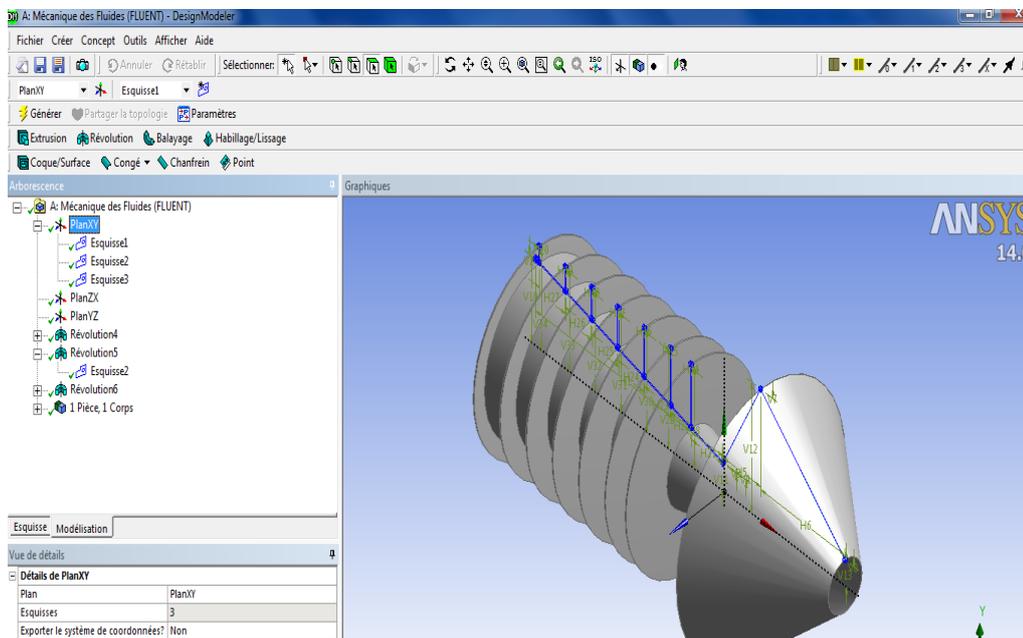


Figure III-8: Interface d'Ansys Design Modeler.

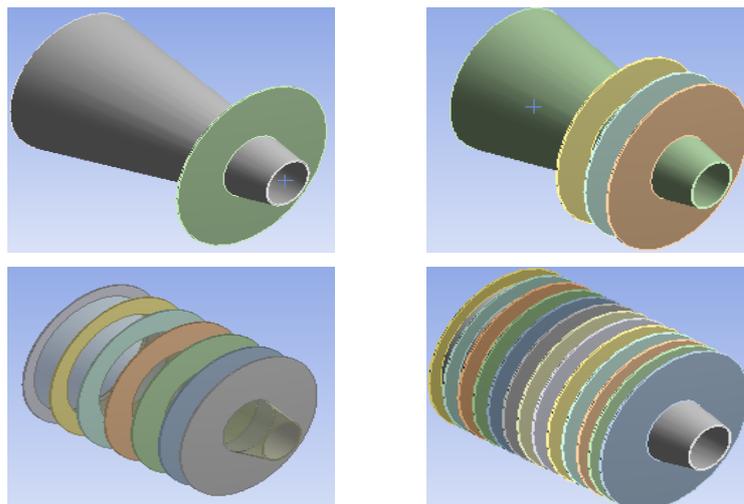


Figure III-9: Les quatre configurations du cône (1,3,7 et 13 ailettes).

Les détails d'utilisation de Ansys Design Modeler sont en annexe (N°2).

III-4-2 Maillage

L'étape du maillage est une étape clé pour s'assurer de la validité des simulations. C'est l'étape de découpage du volume étudié en petits volumes élémentaires. Le maillage en général n'est pas régulier: les mailles doivent être plus petites (maillage fin) dans les zones où les gradients de température vont être les plus importants. Si ces zones ne peuvent pas être prédites, il convient de faire quelques essais itératifs avec ajustement du maillage.

L'outil utilisé pour le maillage est le module **Ansys Meching** qui est un outil très performant. On note qu'il existe aussi sous la plateforme Ansys Workbench d'autres modules de maillage (exemple : ICEM CFD). Cet outil est lancé en choisissant *maillage* dans *systèmes des composants*.

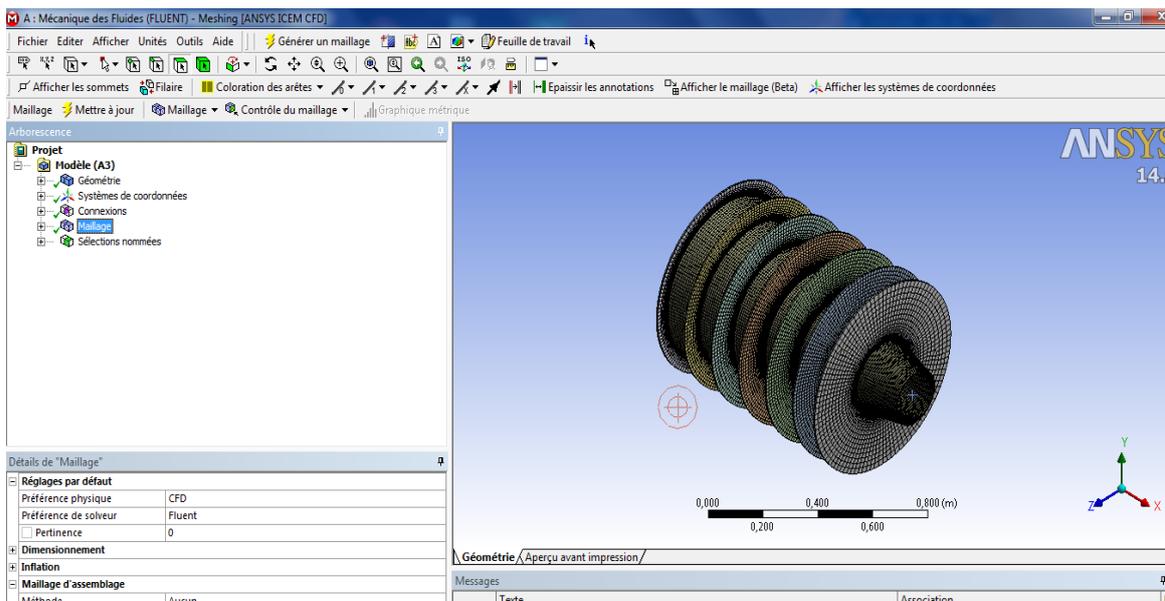


Figure III-10: Interface d'Ansys Meshing (maillage).

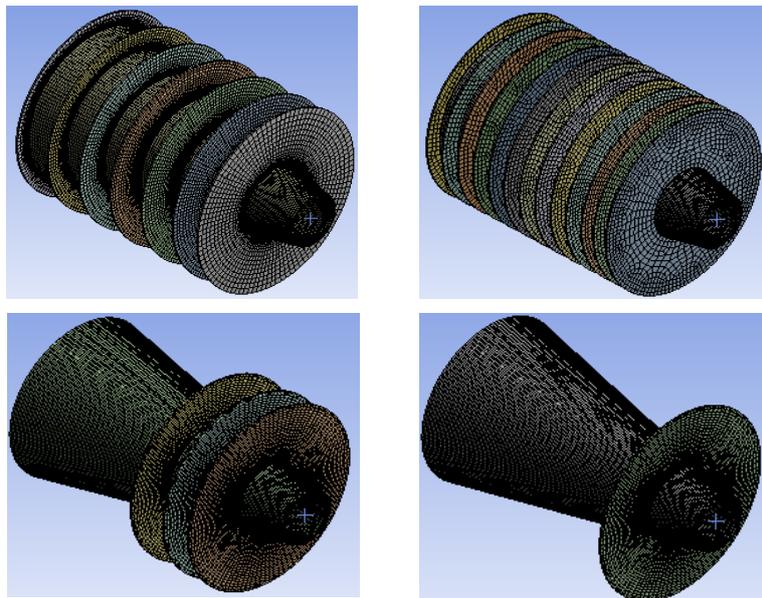


Figure III-11: Maillage structuré du cône avec différents nombres d'ailettes.

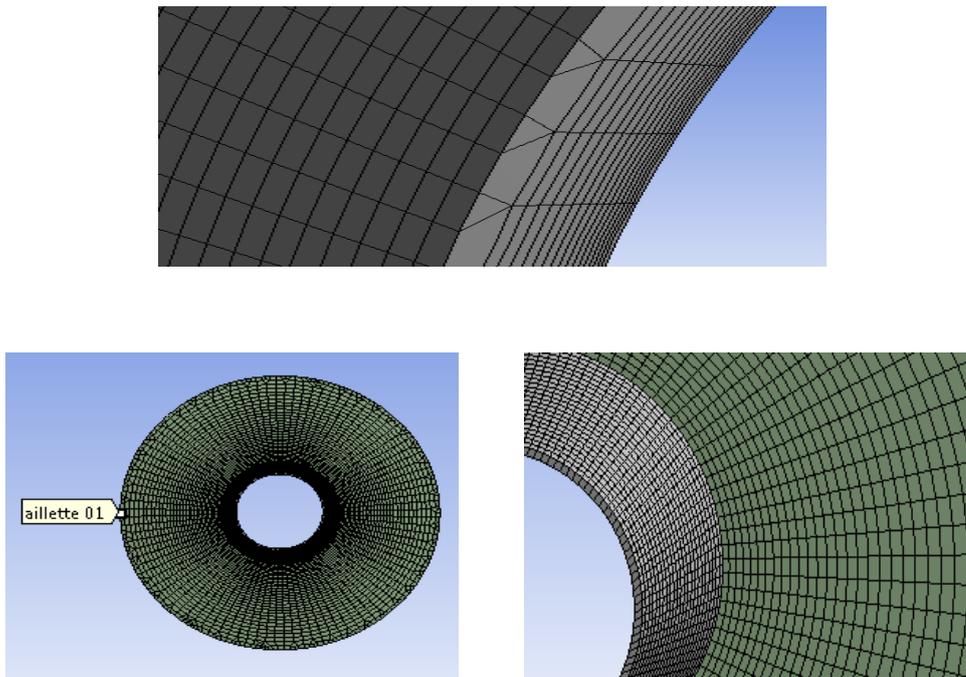


Figure III-12: Maillage structuré et bien raffinée à proximité de la base des ailettes.

III-4-3 Conditions aux limites

On impose une température et une convection sur la paroi d'entrée et la sortie du cône, sur les parois interne et externe du cône avec les ailettes:

*On impose aussi une convection naturelle à la sortie, à l'entrée du cône (la bouche de cône) et sur la surface externe du cône avec toutes les ailettes :
pour $X=0$, $X=L$

$$T_a = 300 \text{ K}$$

$$h_e = 10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

*Température de la surface interne de cône : $T_2 = 439 \text{ K}$

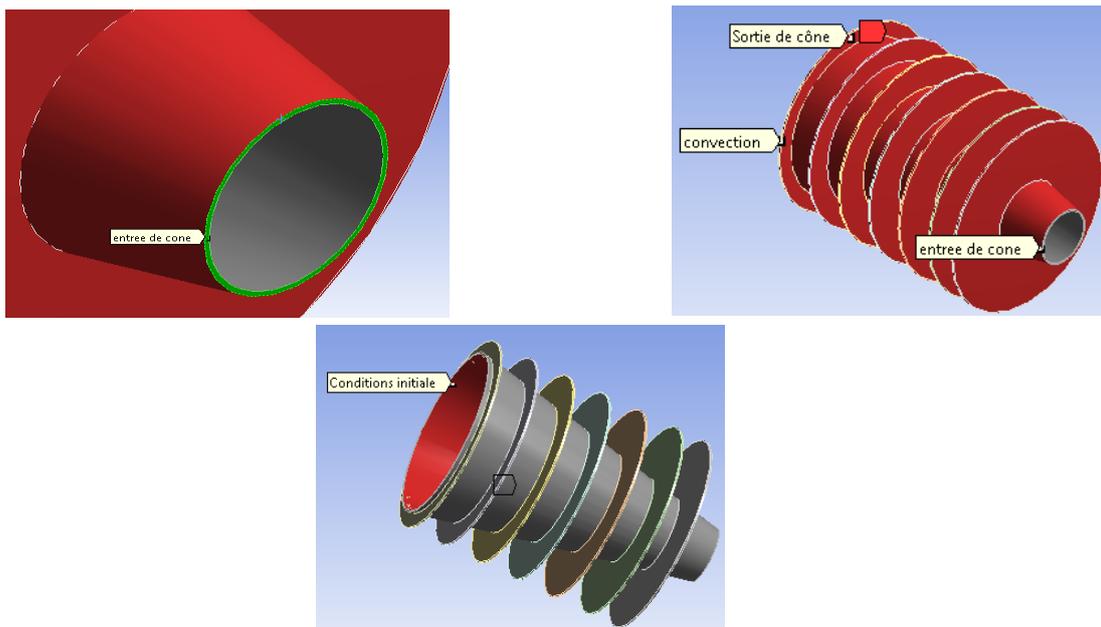


Figure III-13: Conditions aux limites.

III-5 Résultats

III-5-1 Champ de température et flux de chaleur

III-5-1-1 Configuration avec une ailette

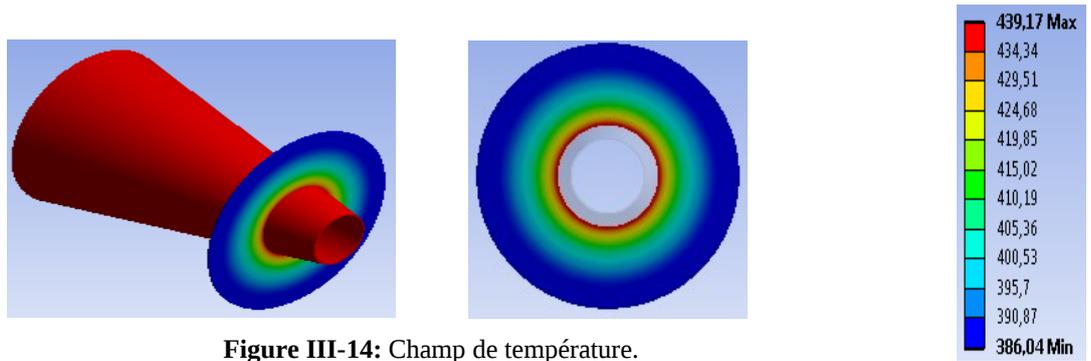


Figure III-14: Champ de température.

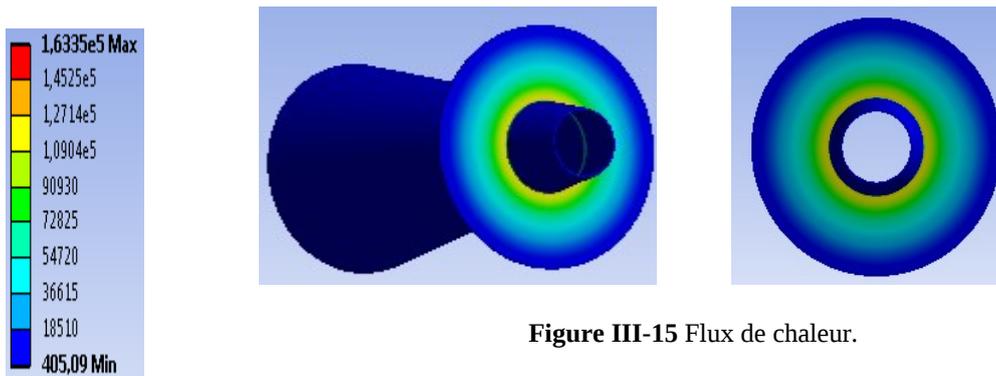


Figure III-15 Flux de chaleur.

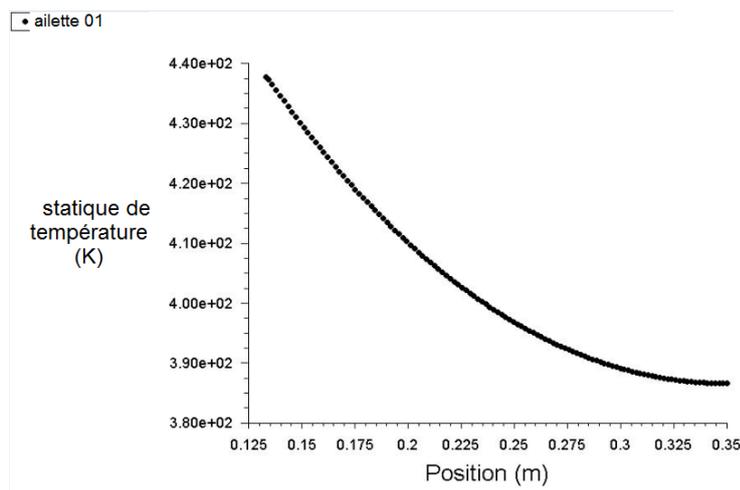


Figure III-16: Variation de la température dans l'ailette.

III-5-1-2 Configuration avec trois ailettes

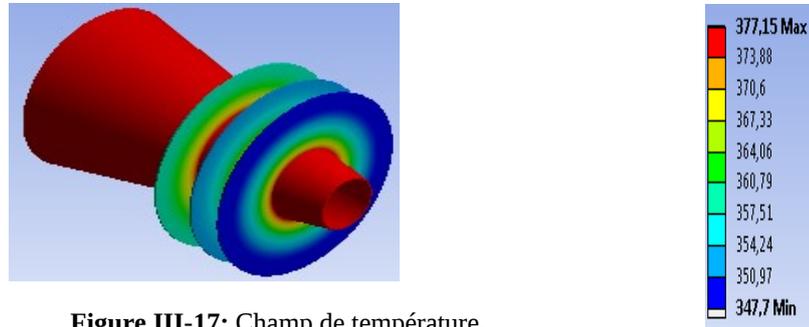


Figure III-17: Champ de température.

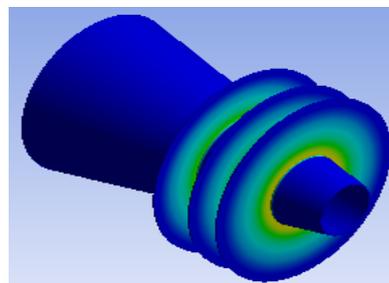
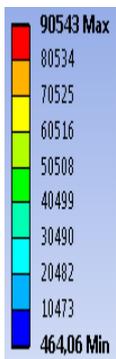


Figure III-18: Flux de chaleur.

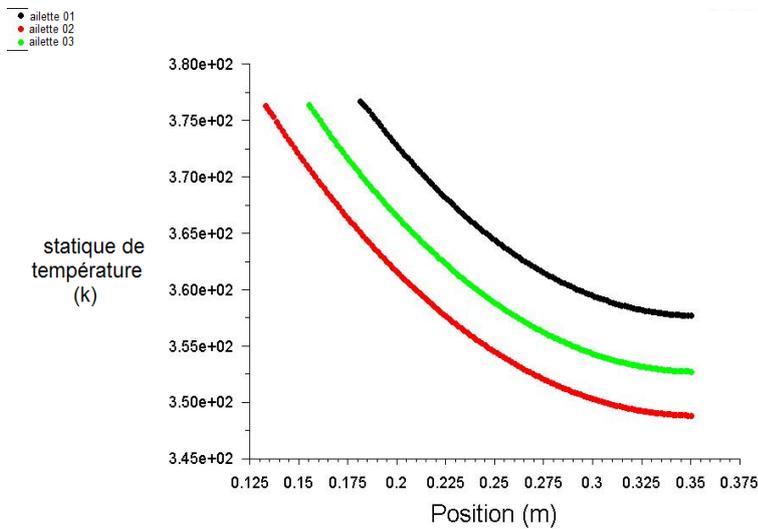


Figure III-19: Variation de la température dans les trois ailettes.

III-5-1-3 Configuration avec sept ailettes

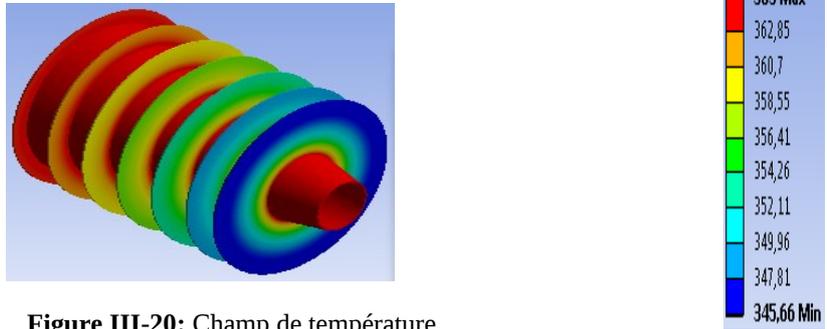


Figure III-20: Champ de température.

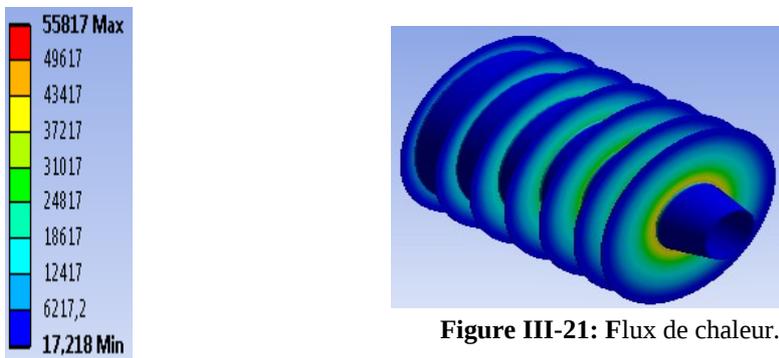


Figure III-21: Flux de chaleur.

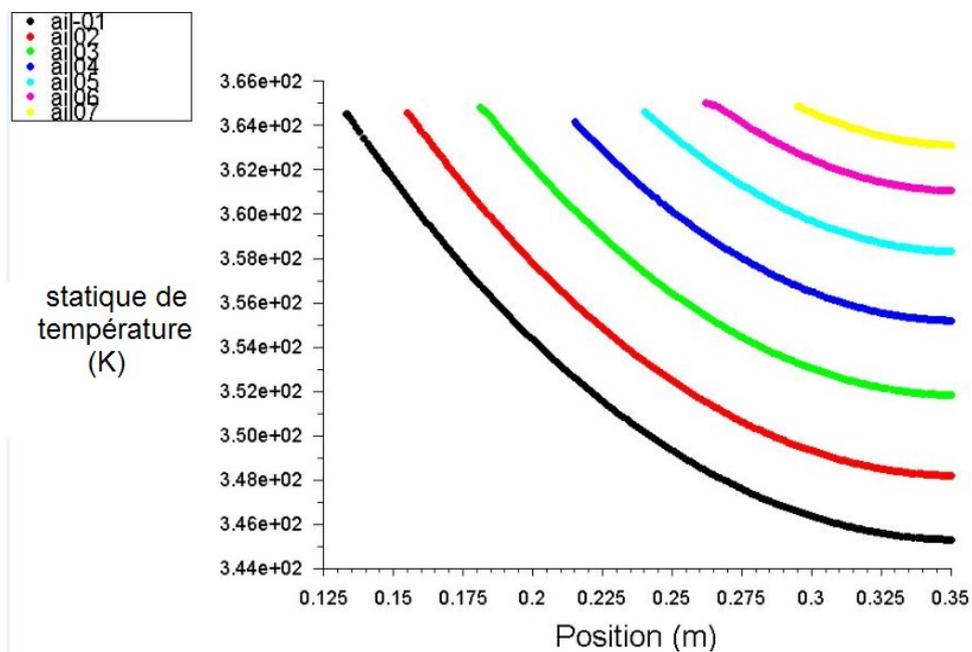


Figure III-22: Variation de la température dans les sept ailettes.

III-5-1-4 Configuration avec treize ailettes

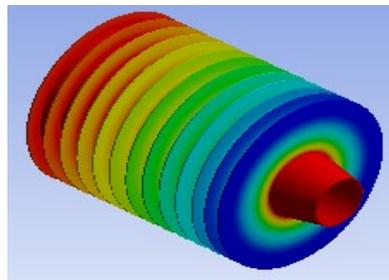


Figure III-23: Champ de température.

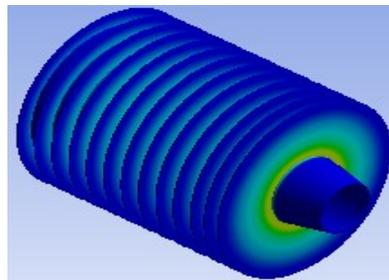
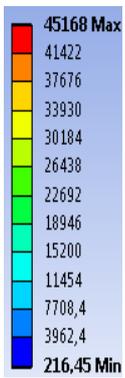
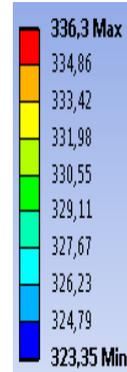
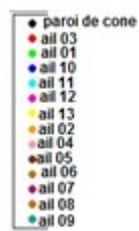


Figure III-24: Flux de chaleur.



statique de température (K)

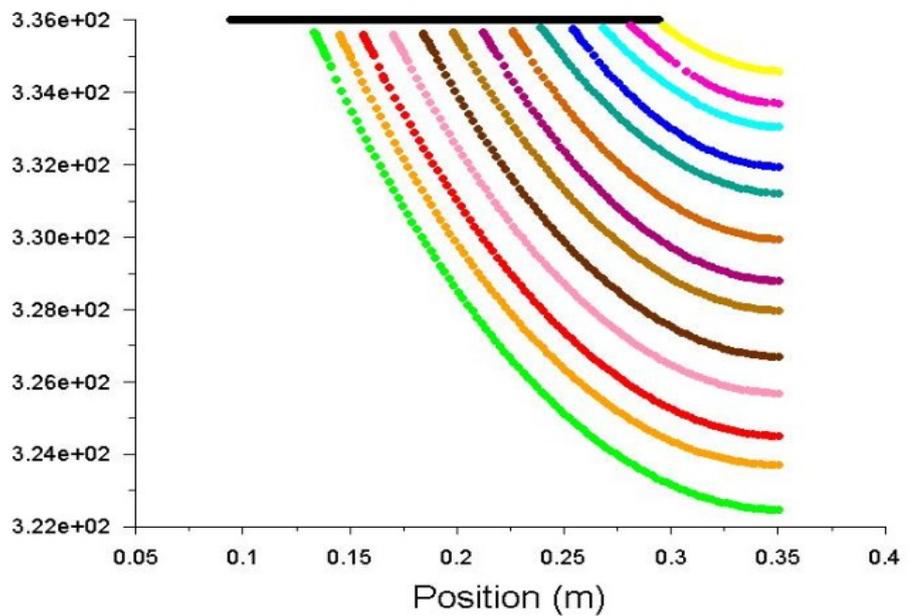


Figure III-25: Variation de la température dans les treize ailettes.

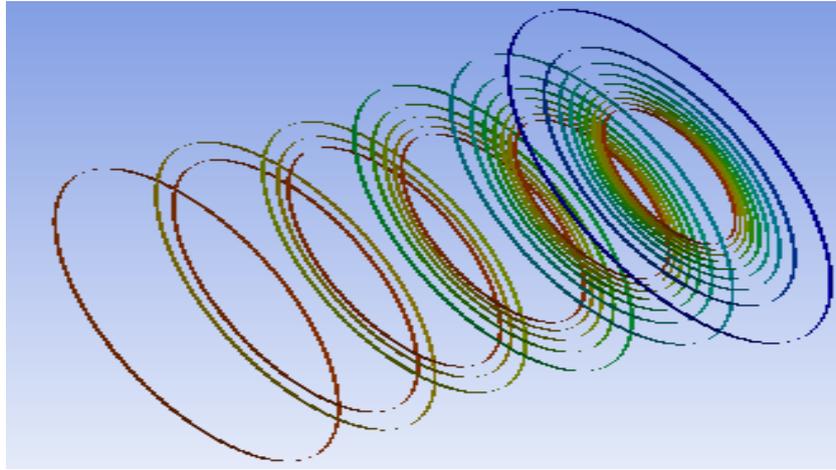


Figure III-26: Isothermes pour les sept ailettes.

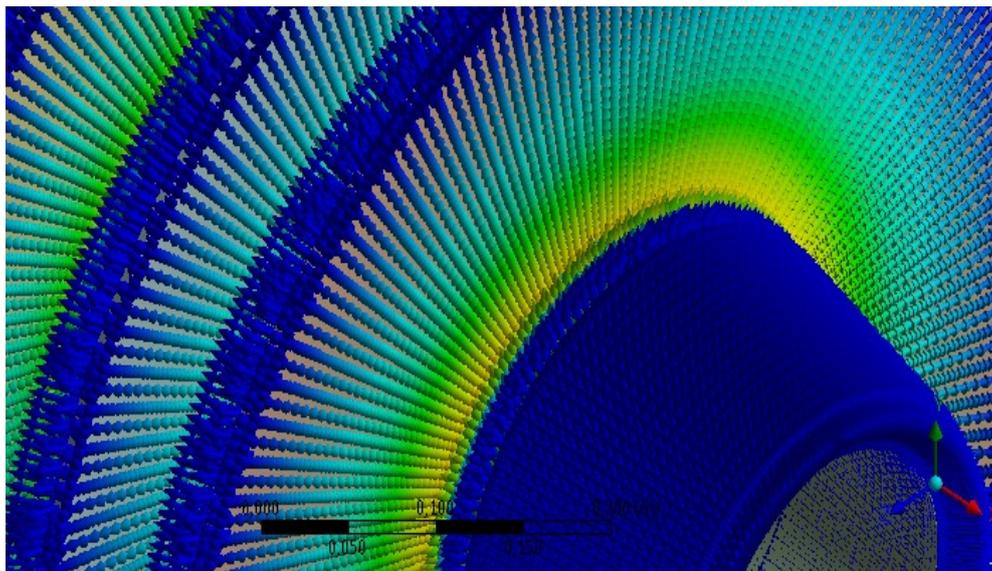
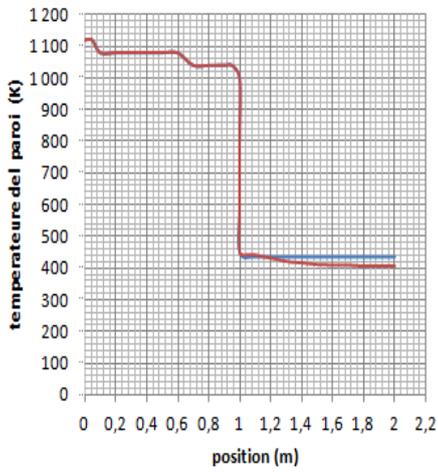


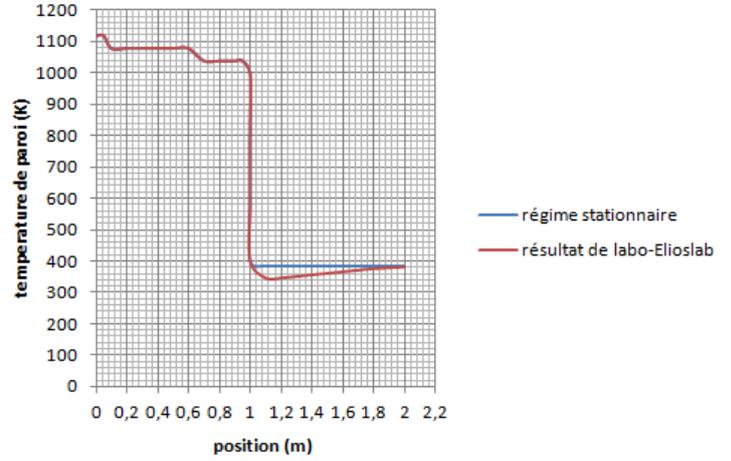
Figure III-27: Direction et diffusion du flux de chaleur.

III-6 Comparaison

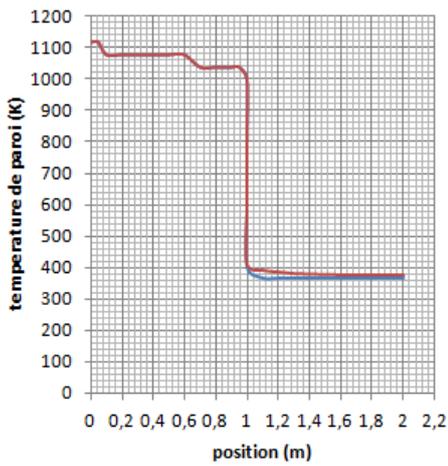
Nous allons maintenant confronter nos résultats avec ceux du laboratoire ElisLab.



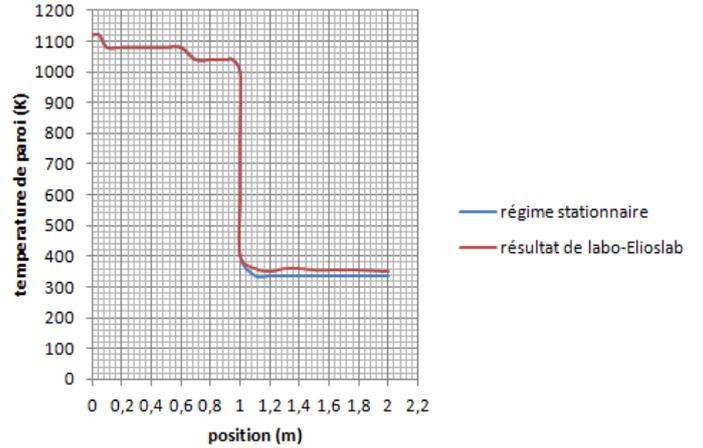
a) cône avec une seule ailette



b) cône avec trois ailettes



c) cône avec sept ailettes



d) cône avec treize ailettes

Figure III-28: Comparaison de la température du cône pour différentes configurations.

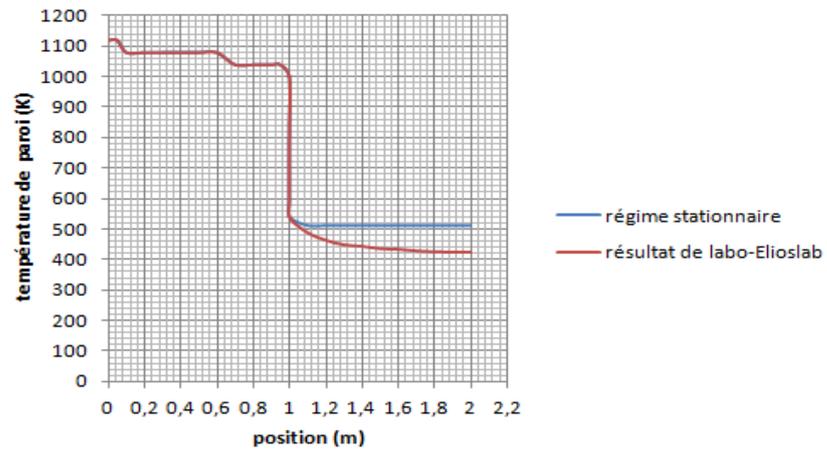


Figure III-29: Variation de la température du cône sans aucune ailette.

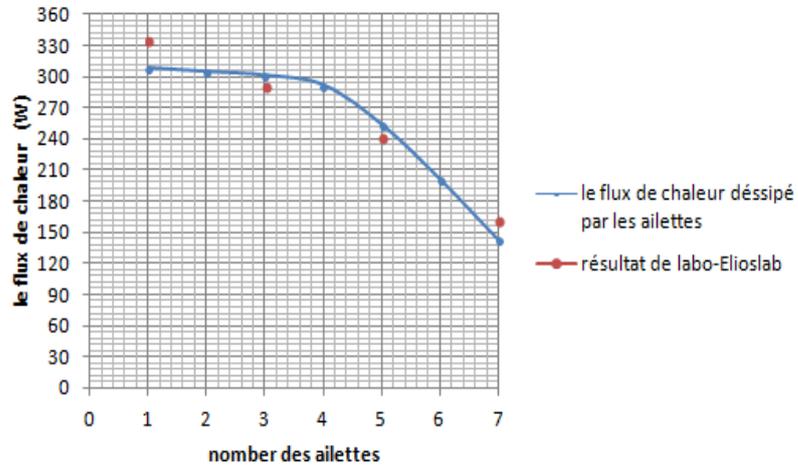


Figure III-30: Variation de flux de chaleur. Cas de sept ailettes.

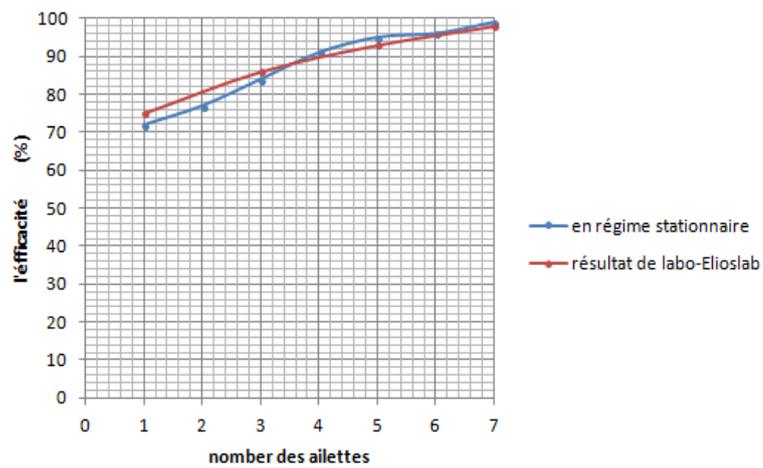


Figure III-31: Variation de l'efficacité. Cas de sept ailettes

IV.1 Introduction

Après avoir validé nos résultats avec ceux du laboratoire « ElisLab », notre objectif maintenant est de chercher d'autres formes et dispositions d'ailettes afin de rendre plus efficace le refroidissement du cône que nous avons vu dans le chapitre précédent.

Nous allons donc proposer deux types d'ailettes et voir leurs efficacité sur le refroidissement du cône.

IV.2 Optimisation du transfert de chaleur dans les ailettes

Pour optimiser le transfert de chaleur → diminue la température de la paroi du cône à moins de 365 K et en utilise la même surface d'échange (poids du matériau) ou un peut supérieur, avec conservation :

- température ambiante est constant $T_a = \text{cst} = 300 \text{ K}$.
- température de la paroi du cône dans le cas avec 13 ailettes $T_1 = 336 \text{ K}$.
- coefficient d'échange à l'extérieur du cône est constant $h_e = \text{cst} = 10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.
- même propriété de l'aluminium $\lambda = 202.4 \text{ w/m}\cdot\text{K}$.

Et pour optimiser le transfert de chaleur et choisir une géométrie convenable d'une ailette exige → donc il faut suivre les conditions de choix des ailettes d'optimisation (voir II-6).

- Dans cette étude nous avons choisi deux conceptions des ailettes qui sont les plus utilisées dans l'industrie, à savoir :

- Ailettes longitudinales de profil rectangulaire.
- Ailettes épines de profil rectangulaire.

IV.2.1 Ailettes longitudinales de profil rectangulaire

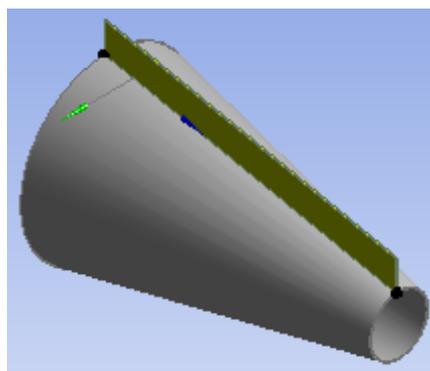


Figure IV-1: Ailette longitudinales de profil rectangulaire .

IV.2.1.1 Calculs

$$e = 0,004 \text{ m}, \quad l = C^{te} = 1,02 \text{ m}, \quad L = 0.1 \text{ m}, \quad n = 29,$$

$$h_e = 10 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \lambda = 202,4 \text{ W/mK}, \quad T_1 = 336 \text{ K}.$$

- Calcul de l'aire et du volume des ailettes :

$$S_{T,7\text{ail.tran}} = 3,41300 \text{ m}^2 < S_{T,\text{ail long}} = 5,605 \text{ m}^2 < S_{T,13\text{ail.tran}} = 6,270 \text{ m}^2$$

$$V_{T,7\text{ail.tran}} = 0,0098 \text{ m}^3 < V_{T,\text{ail, long}} = 0,0120 \text{ m}^3 < V_{T,13 \text{ail.tran}} = 0,0183 \text{ m}^3$$

*puisque $e \lll 1 \implies$ isolée à l'extrémité \implies utilise le 2^{ème} Cas 2: convection nulle à l'extrémité.

IV.2.1.2 Calculer de l'efficacité de l'ailette

1 - Calculer du flux max (équations (II-30) et (II-25)) :

$$\Phi_{max} = 10(2.1,02)0,1(336 - 300)$$

$$\dot{=} 73,44 \text{ W}$$

2- Calcul du flux dissipé par l'ailette (équation (II-28)) :

$$\Phi_{diss} = 202,4 \cdot 0,004 \cdot 1,02 \cdot 36 \cdot 4,97 \cdot \tanh(4,97 \cdot 0.1)$$

$$\dot{=} 67,94 \text{ W}$$

$$\implies \frac{\Phi_{diss}}{\Phi_{max}} = \frac{67,94}{73,44} \rightarrow \eta_{ail} = 0,925$$

$$\eta_{ail} = 92,5\%$$

IV.2.1.3 Simulation numérique

Pour la simulation numérique de ce problème il faut passer par les quatre étapes déjà énoncées au chapitre III.

IV.2.1.3.1 Configuration géométrique

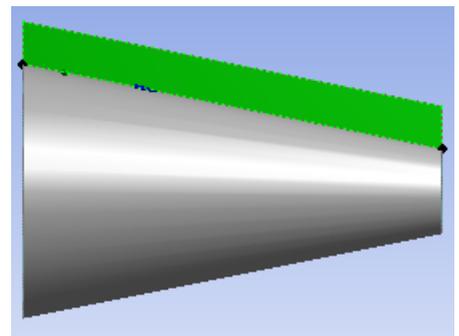
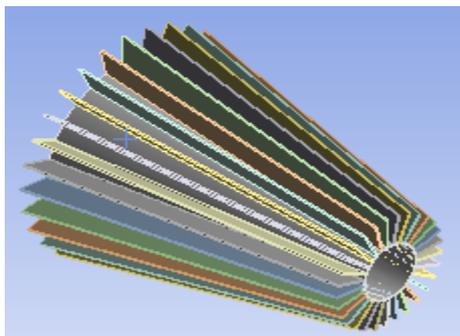


Figure IV-2: Cône avec une ailette longitudinale de section rectangulaire.

IV.2.1.3.2 Maillage

En utilisant toujours le mailleur Ansys Mesh, nous aurons :

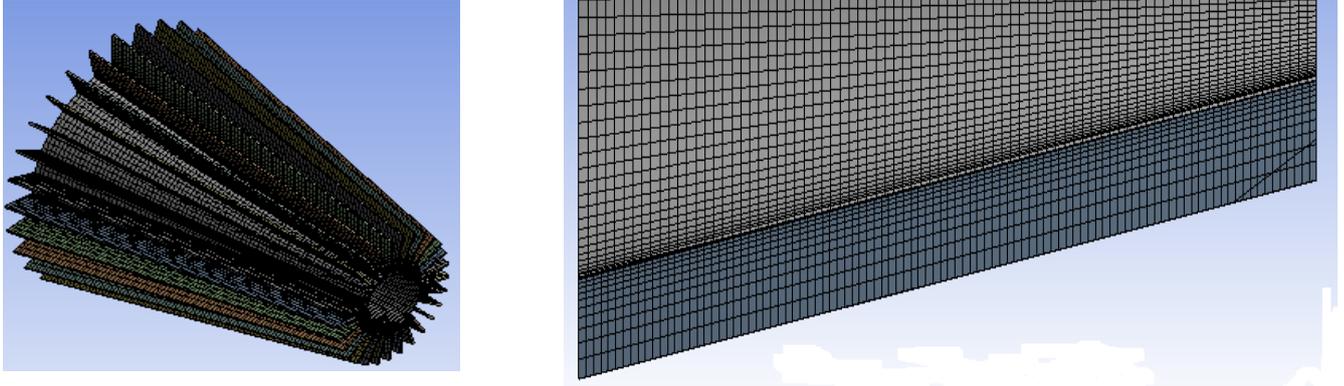


Figure IV-3: Maillage raffiné des ailettes de profil rectangulaire.

IV.2.1.3.3 Conditions aux limites

En utilisant les mêmes conditions aux limites des ailettes longitudinales de profil rectangulaire comme le montrent les schémas suivants :

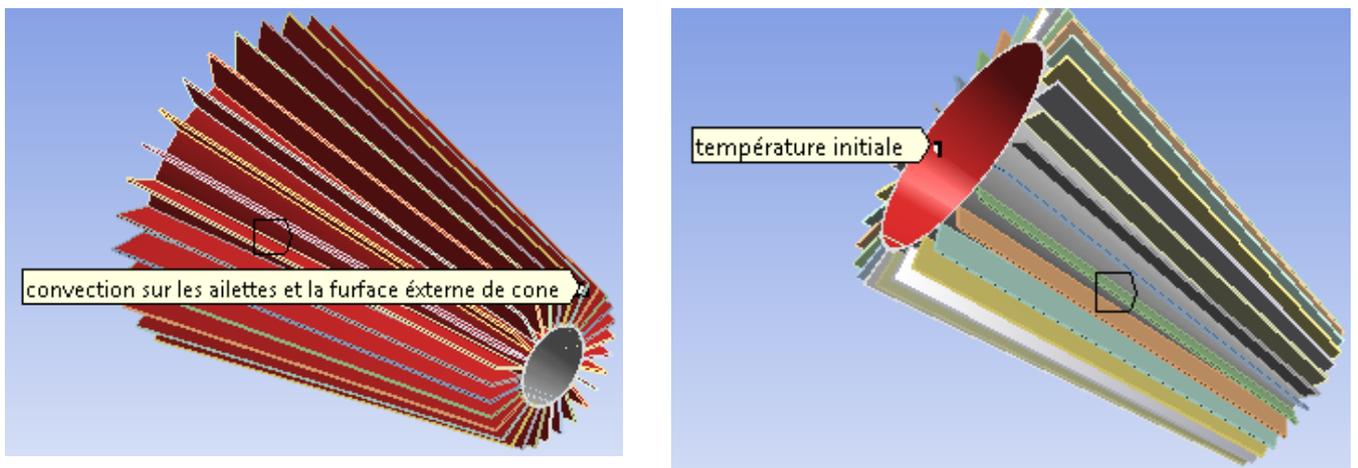


Figure IV-4 Conditions aux limites.

IV.2.1.3.4 Résultats

IV.2.1.3.4.1 Champs de température et flux de chaleur des ailettes

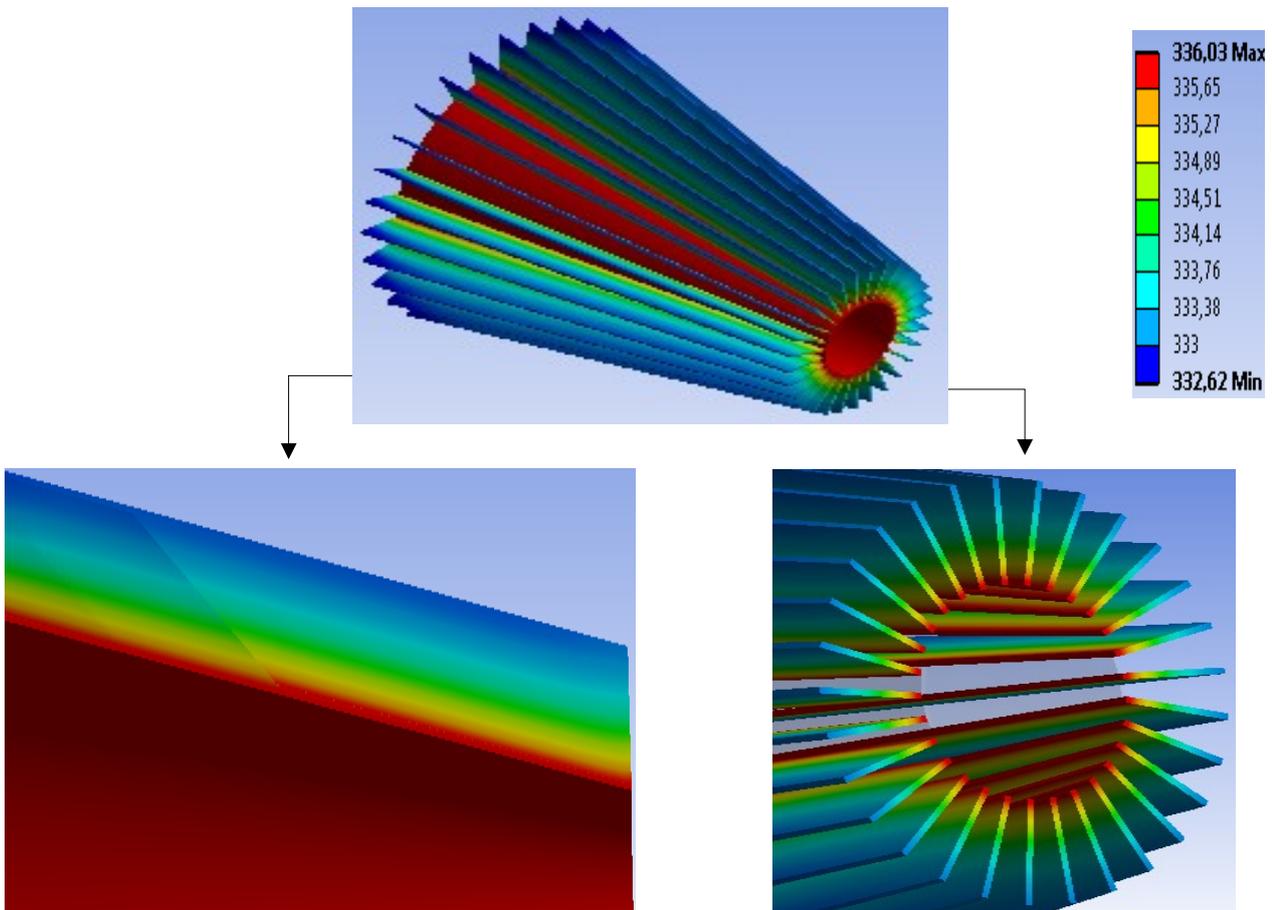


Figure IV-5: Champ de température.

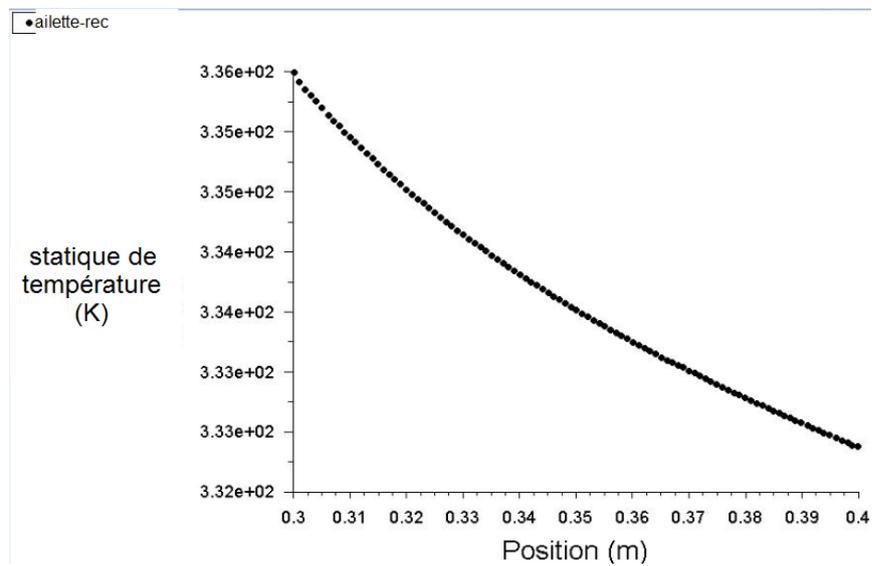


Figure IV-6: Variation de température de l'ailette.

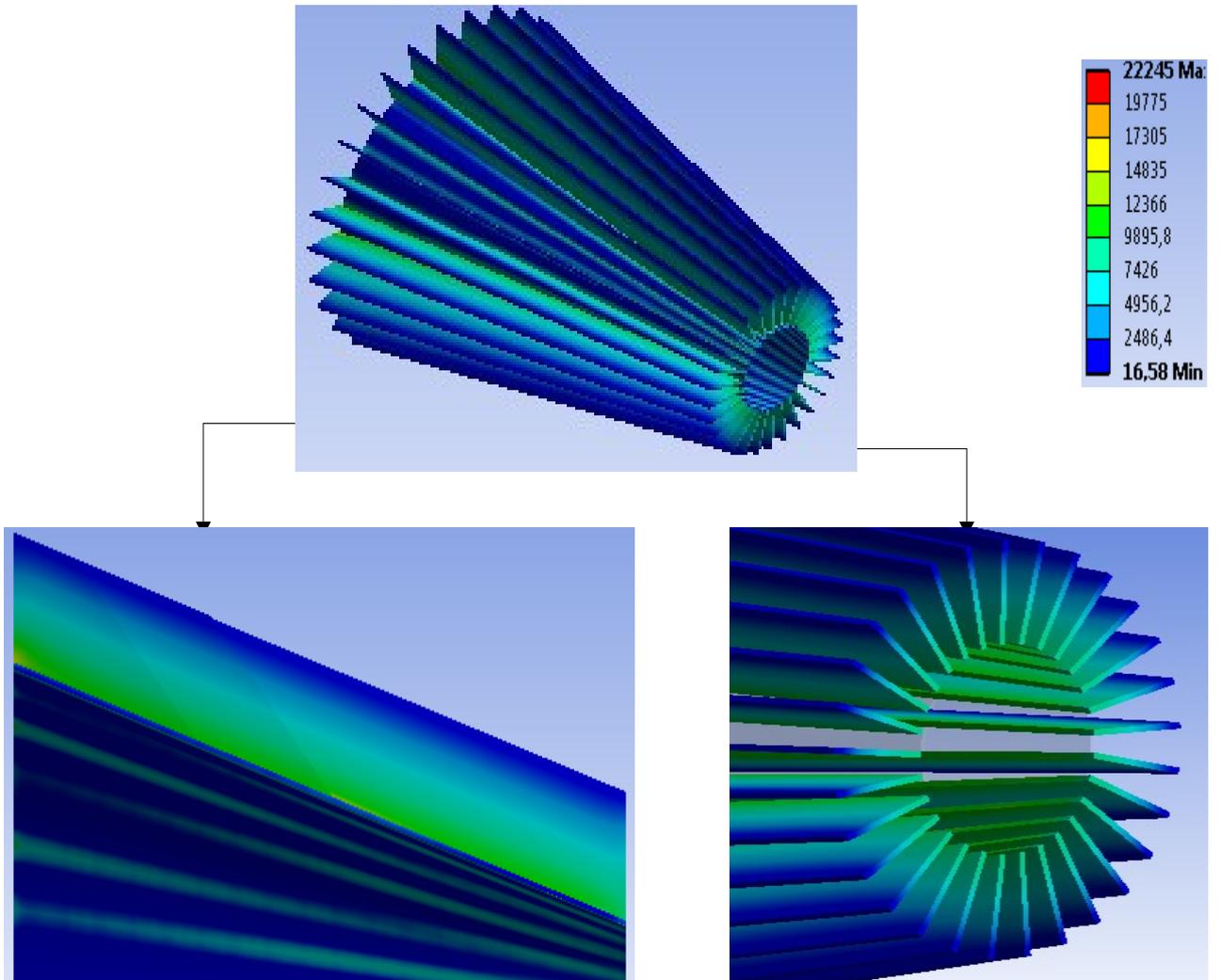


Figure IV-7: Flux de chaleur.

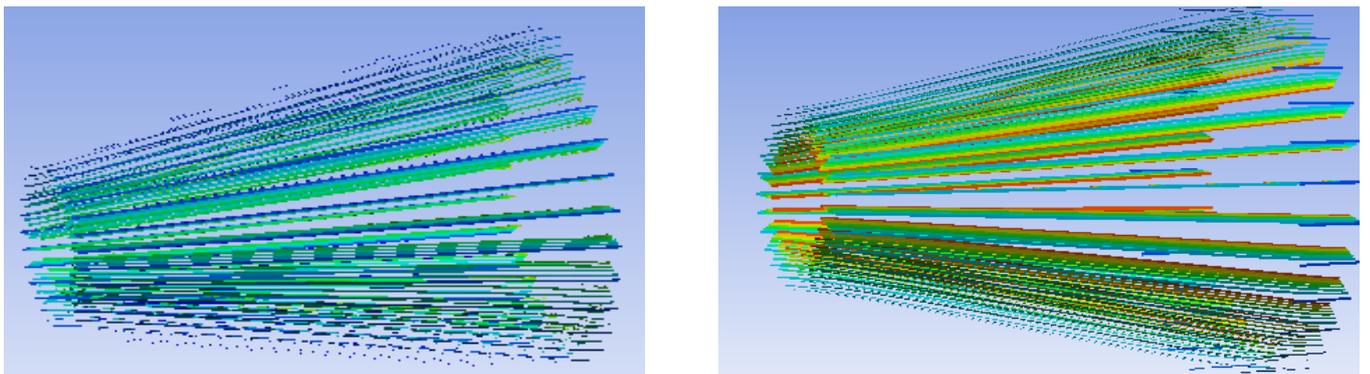


Figure IV-8: Isosurfaces des température et flux de chaleur.

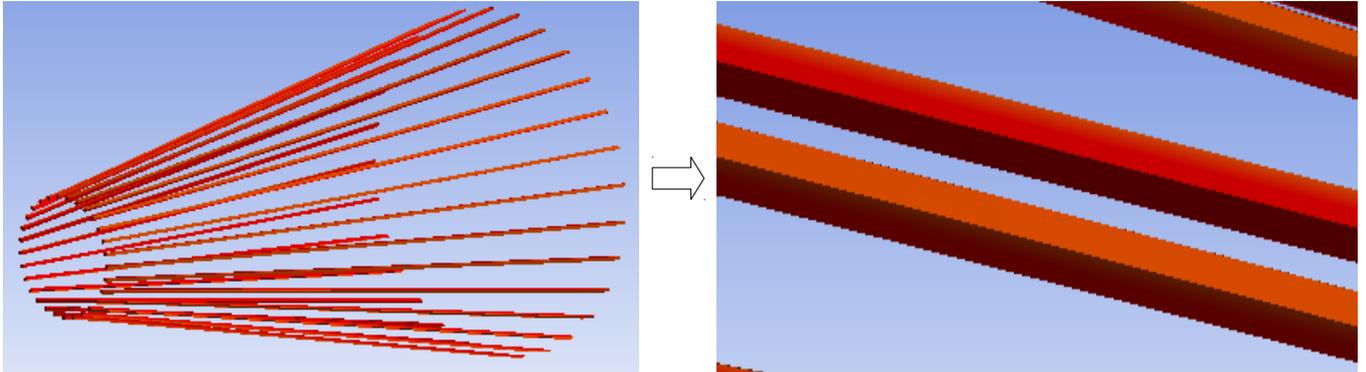


Figure IV-9: IsoSurfaces montrant la différence de température de la surface avec et sans ailettes.

IV.2.2 Ailettes épines de profile rectangulaire

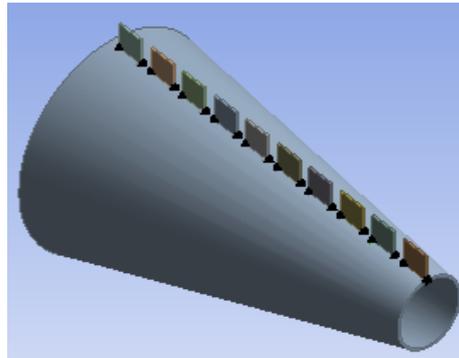


Figure IV-10: ailettes épines du profil rectangulaire avec un cône.

IV.2.2.1 Calculs

$$e = 0,002 \text{ m}, \quad l = \text{cst} = 0,06 \text{ m}, \quad L = 0.1 \text{ m}, \quad n = 500,$$

$$h_e = 10 \text{ W/m}^2\text{K}, \quad \lambda = 202,4 \text{ W/mK}, \quad T_1 = 336 \text{ K}.$$

-Aire et volume des ailettes :

$$S_{T,\text{ail épil}} = 0,906 \text{ m}^2 < S_{T,7\text{ail.tran}} = 3,41300 \text{ m}^2 < S_{T,\text{ail long}} = 5,605 \text{ m}^2$$

$$V_{T,\text{ail,épi}} = 0,00210 \text{ m}^3 < V_{T,7\text{ail.tran}} = 0,0098 \text{ m}^3 < V_{T,\text{ail,long}} = 0,0120 \text{ m}^3$$

*puisque $e \lll 1$ \implies isolée à l'extrémité \implies utilise le 2^{ème} Cas 2: convection nulle à l'extrémité.

IV.2.2.2 Calcul de l'efficacité de l'ailette

1 – Calcul du flux max (l'équation (II-30)et (II-25)) :

$$\Phi_{max} = 10(2.0,06)0,1(336 - 300) = 4,32 W$$

2- Calcul du flux dissipé par l'ailette (équation (II-28)) :

$$\Phi_{diss} = 202,4 \cdot 0,002 \cdot 0,06 \cdot 36.7,03 \cdot \tanh(4,97 \cdot 0.1)$$

$$\rightarrow = 3,73 W$$

$$\implies \frac{\Phi_{diss}}{\Phi_{max}} = \frac{3,73}{4,32} \rightarrow \eta_{ail} = 0,8622$$

$$\eta_{ail} = 86,22 \%$$

IV.2.2.3 Simulation numérique

On suit les mêmes étapes que pour le cas précédent.

IV.2.2.3.1 Géométrie

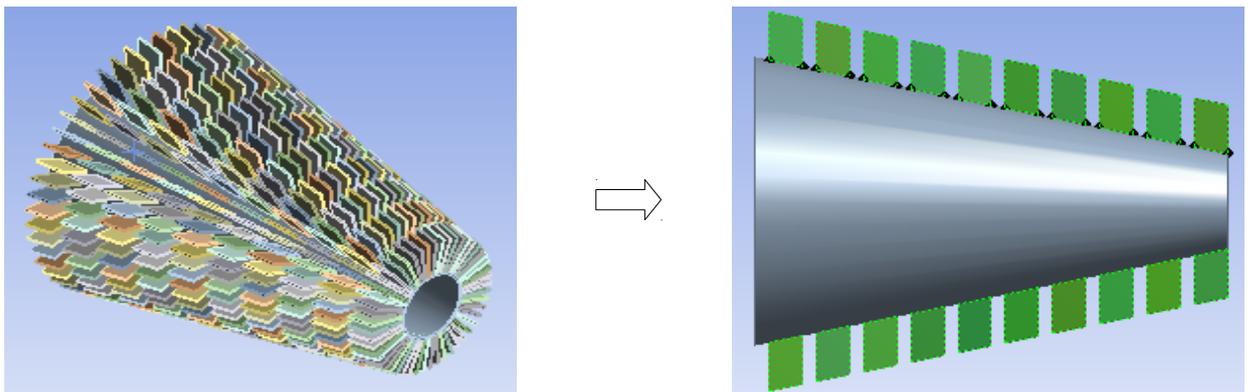


Figure IV-11: Cône avec des ailettes épines de section rectangulaire.

IV.2.2.3.2 Maillage

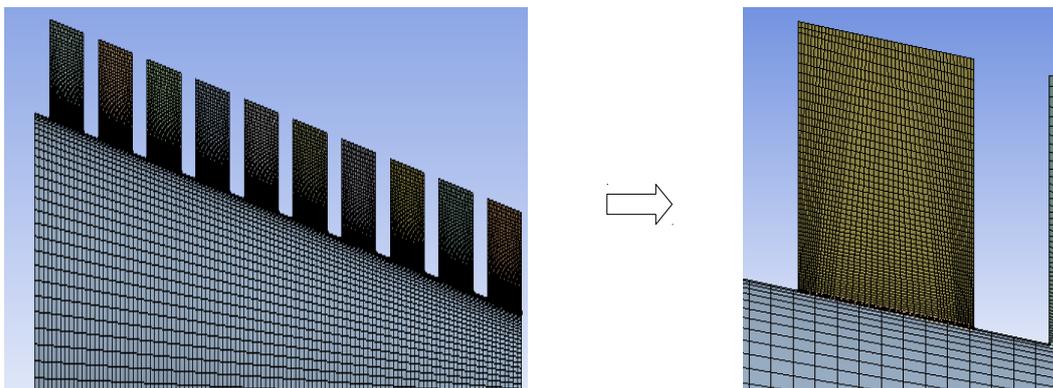


Figure IV-12: Maillage raffiné dans la couche de contact entre les ailettes et la paroi du cône.

IV.2.2.3.3 Conditions aux limites

En utilisant les mêmes conditions que le cas précédent comme le montrent les schémas suivants :

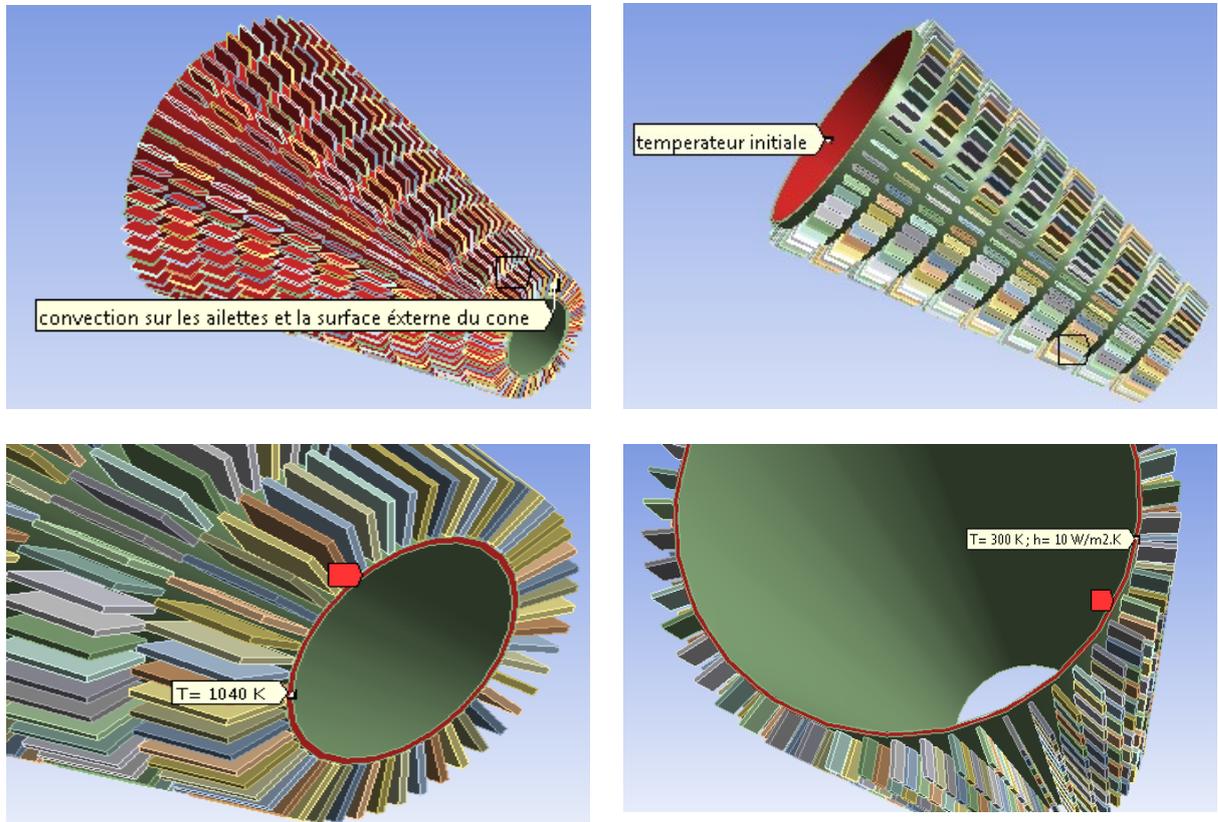


Figure IV-13: Conditions aux limites des ailettes épines.

IV.2.2.3.4 Résultats

IV.2.2.3.4.1 Champs de température et flux de chaleur

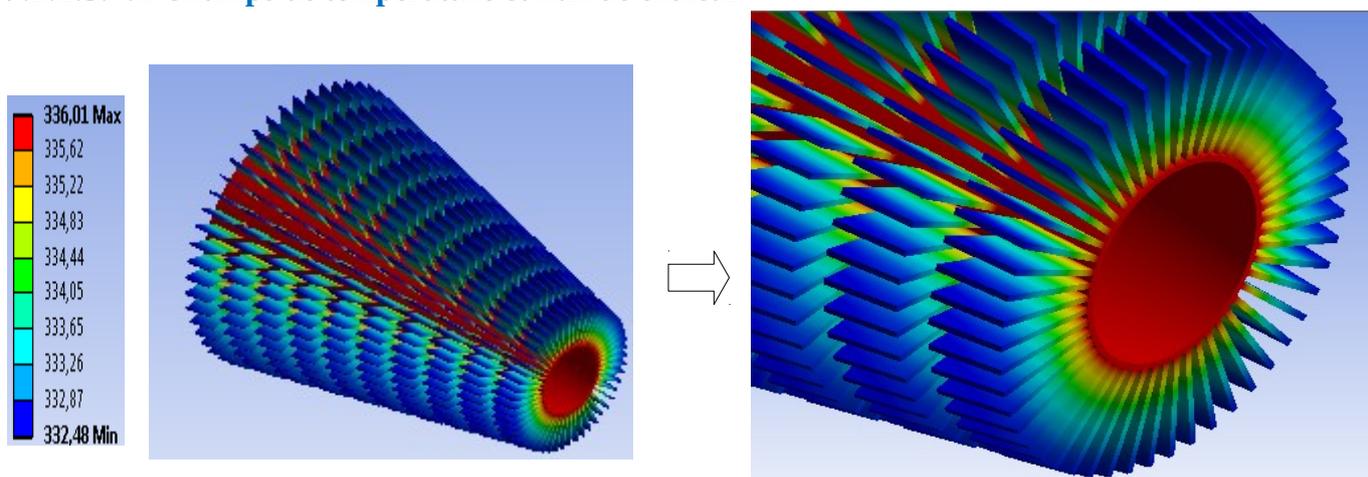


Figure IV-14: Champ de température de cône dans les ailettes épines.

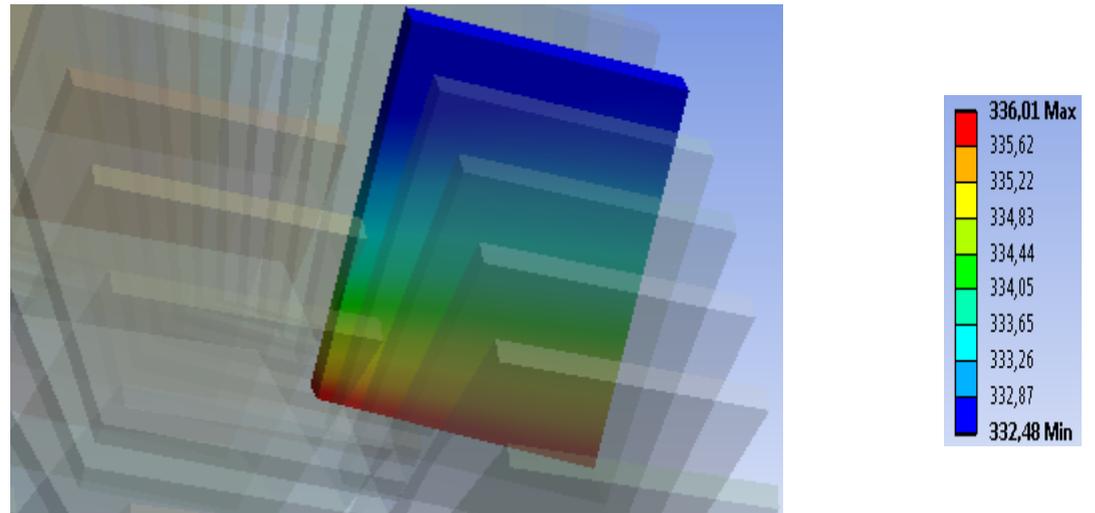


Figure IV-15: Distribution de température dans un ailette épine à L=0.1m.

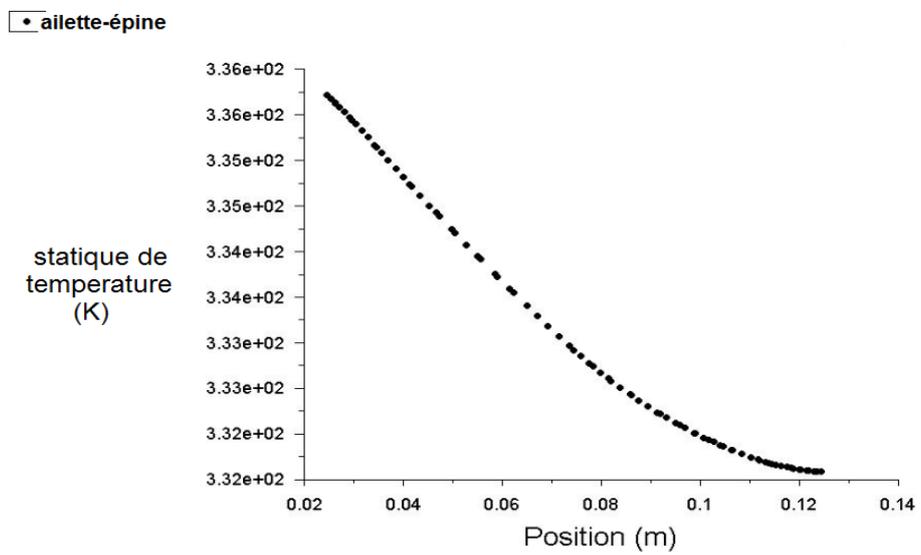


Figure IV-16: Profile de température dans une ailette épine.

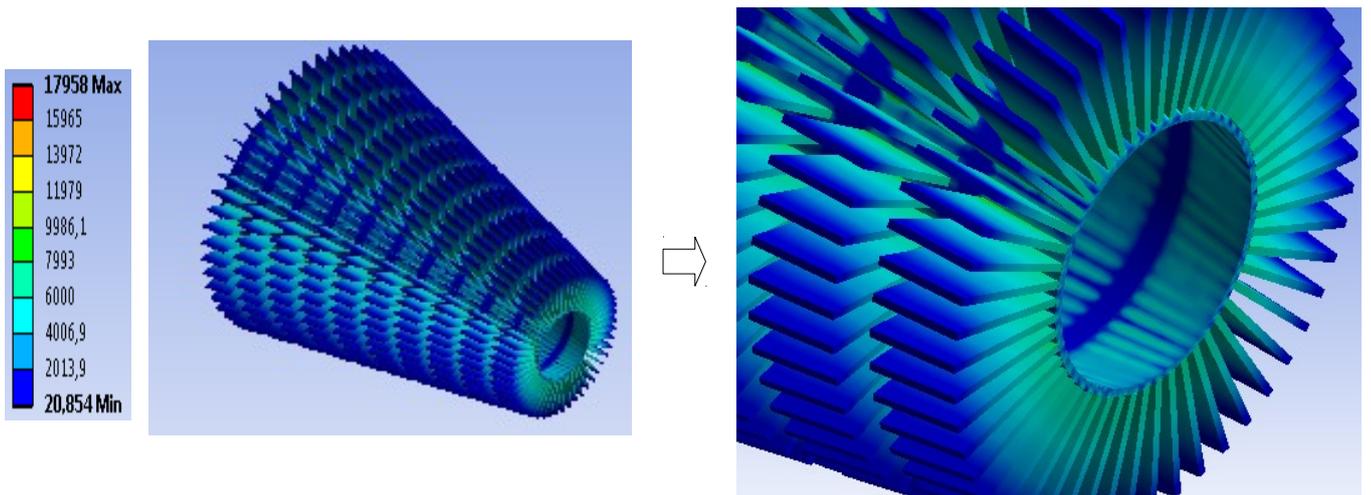


Figure IV-17: Flux de chaleur du cône et des ailettes épines.

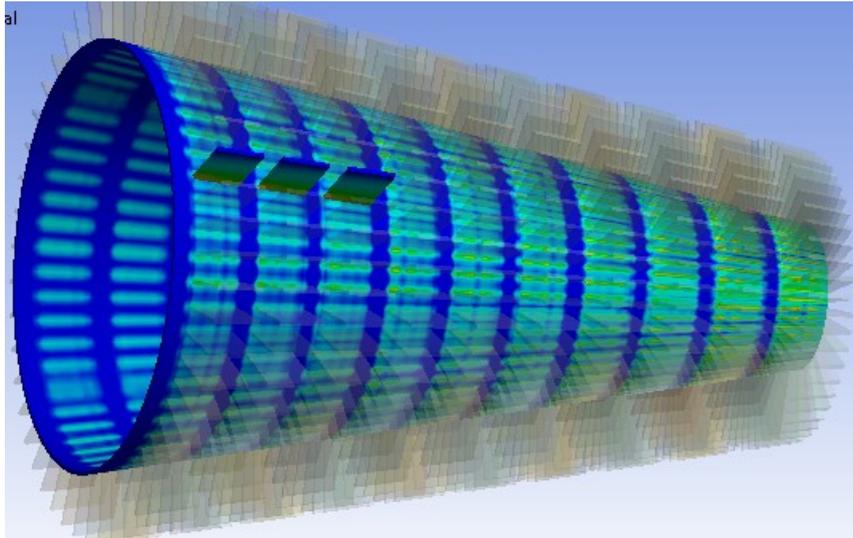


Figure IV-18: Variation du flux de chaleur entre les surfaces du cône avec et sans ailettes.

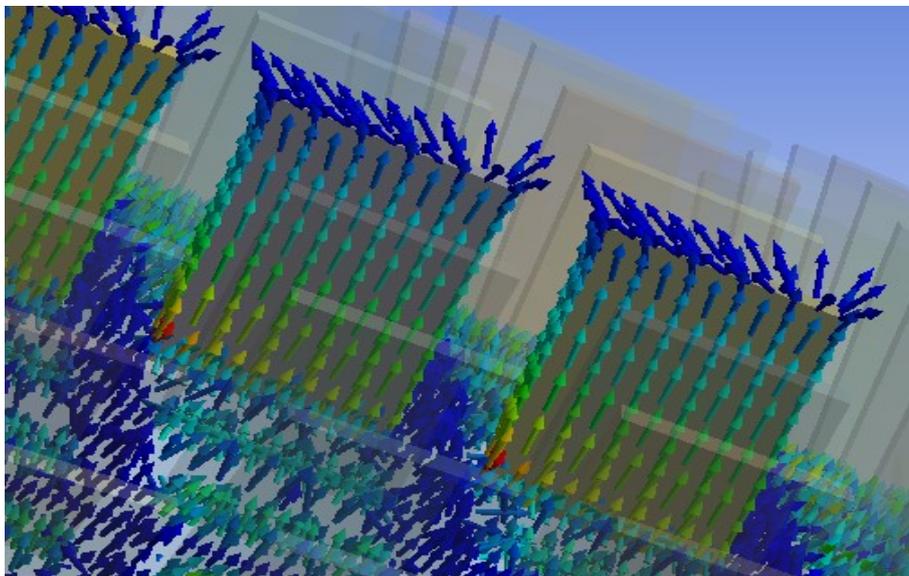


Figure IV-19: Champ de distribution de la température sur les ailettes et sur le cône.

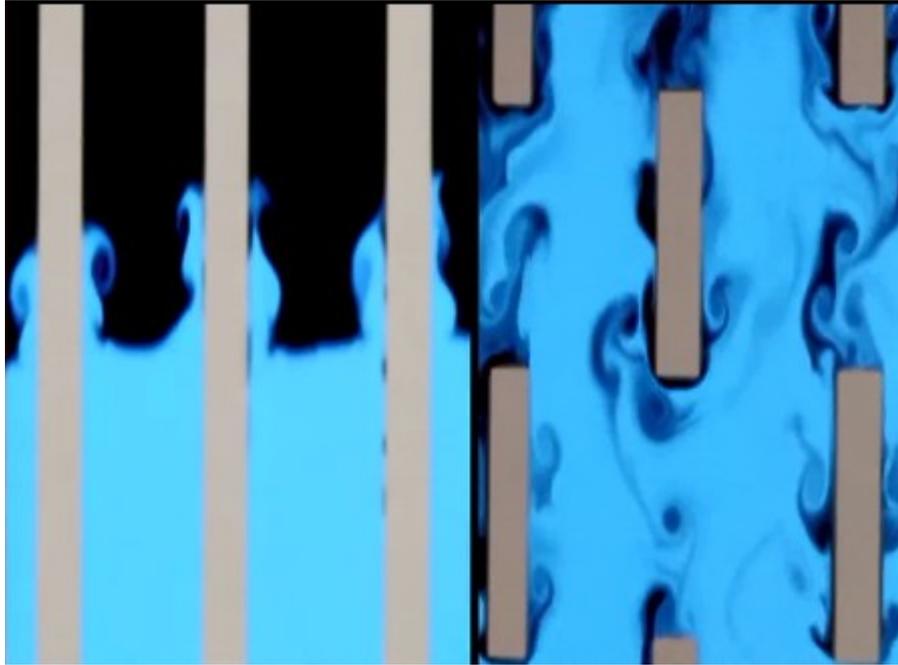


Figure IV-20: Comparaison entre la quantité de flux de chaleur dissipée par les ailettes épines et longitudinales.

IV.3 Interprétations des résultats

Nous présentons, dans cette partie, les résultats finaux sous forme remarques et comparaisons des résultats obtenus en deux volets : généraux et particuliers :

IV.3.1 Résultats généraux

1. L'efficacité des ailettes diminue quand le coefficient d'anisothermie $m=(hP/kW)^{1/2}$ augmente.
2. L'efficacité des ailettes diminue avec l'augmentation de la longueur (L) et du coefficient d'échange de chaleur par convection (h), et augmente avec l'augmentation de la conductivité thermique (k).
3. Le coefficient d'anisothermie (m) augmente avec l'augmentation du coefficient d'échange de chaleur par convection (h) et diminue avec la conductivité thermique (k) et l'épaisseur d'ailettes (e).
4. Quand le coefficient d'échange de chaleur par convection (h) augmente, l'ailette se refroidit et le gradient de température augmente au sein de l'ailette, ce qui fait chuter l'efficacité des ailettes.

IV.3.2 Résultats particuliers

1- Dans les tableaux III-6-4 et les figures III-31-32 :

a- nous remarquons que le flux de chaleur augmente avec l'augmentation de la surface d'échange des ailettes.

b- Les résultats l'efficacité des sept ailettes qui nous avons calculé en régime stationnaire et les ceux obtenus par laboratoire « Elioslab » sont presque les mêmes. On remarque aussi que l'efficacité augmente progressivement avec l'augmentation de la surface d'échange.

2- La figure III-14 montre bien l'influence de la température (1040 K) du récepteur solaire sur la paroi d'entrée du cône, et cette influence est faible puisque la surface d'échange entre le récepteur et le cône est petite.

3- Pour les figures III-15-18-21-24 :

a- montre que la variation de champ de température dans les ailettes qui diminue progressivement avec l'augmentation de longueur de l'ailette.

b- La température de la paroi externe du cône diminue avec l'augmentation du nombre d'ailettes.

4- Pour les figures III-16-19-22-25, il ya une relation entre le flux de chaleur et le nombre des ailettes où la dissipation de la chaleur augmente avec l'augmentation de nombre des ailettes (ou la surface d'échange entre l'air et les ailettes).

5- Les figures III-20-23-26 représentent la comparaison et la variation des profils de température des ailettes avec différentes positions où on a une différence claire entre la diminution des températures dans chaque ailette. Ce résultat est dû à la variation de la surface d'échange d'une ailette à l'autre.

6- La Figure III-29 montre la variation de la température du récepteur solaire et du concentrateur solaire (cône) avec différents nombres d'ailettes. La comparaison entre nos résultats en régime stationnaire et les résultats du laboratoire « EliosLab » où nous remarquons que le meilleur système de refroidissement du concentrateur est le système qui contient treize (13) ailettes mais qui revient beaucoup plus chère. Nous avons alors choisi le système qui contient sept (07) ailettes comme un bon compromis entre les performances et le coût.

Références bibliographiques

- [1] **B. Kari**, '*Energies nouvelles et renouvelables*'. Cours Master Génie Energétique, 2014. Département de Mécanique. Université de Batna.
- [2] **Y. Jannot**, '*Transferts thermiques*'. 2^{ème} année Ecole des Mines. Nancy 2002.
- [3] **M. Younes**. '*Etude Numérique Comparative Entre deux types de chicanes et ailettes (trapézoïdale et triangulaire) utilisées pour améliorer les performances des capteurs solaires plans à air*'. Mémoire de Magistère en physique option énergies renouvelables. Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen.
- [4] **A. Benderradji**, '*Transfert de chaleur*'. Cours de Licence Génie Energétique, 2010. Département de Mécanique. Université de Batna.
- [5] **J François Sacadura**, '*Initiation au transfert thermique*'.
[6] **M. GUERAICHE** et **L. BOUZIDI**, '*Bilan énergétique d'une ailette rectangulaire. Etude théorique et expérimentale*'. Mémoire de Licence 2010 en Génie Energétique. Département de Mécanique. Université de Batna.
- [7] **M. Mehemmai**. '*Analyse des caractéristiques de l'écoulement et des transferts thermiques des échangeurs de chaleur des tubes à ailettes*'. Mémoire de Magistère, 2013, Département de Mécanique. Université de Batna.
- [8] **S. Jurgen**, '*transmission de la chaleur*'. Collection de cours 3^{ème} année électrotechnique.
- [9] **di A. Andreozzi, N. Bianco et al.**, '*Three Dimensional Numerical Analysis and Optimisation of a Fin Heat Sink System*', La Termotecnica, avril 2012, p75-80.

1/-Equations et fonctions de Bessel

Equations particulieres de Bessel et leurs solutions

$$\begin{aligned}
 y'' + \frac{y'}{x} + m^2 y &= 0 & \Rightarrow & y = k_1 J_0(mx) + k_2 Y_0(mx) \\
 x^2 y'' + x y' + (x^2 - n^2) y &= 0 & \Rightarrow & y = k_1 J_n(x) + k_2 Y_n(x) \quad (n \text{ entier}) \\
 y'' + \frac{y'}{x} - m^2 y &= 0 & \Rightarrow & y = k_1 I_0(mx) + k_2 K_0(mx) \\
 x^2 y'' + x y' - (x^2 + n^2) y &= 0 & \Rightarrow & y = k_1 I_n(x) + k_2 K_n(x)
 \end{aligned}$$

J_n Fonction de Bessel de 1ère espèce non modifiée d'ordre n

I_n Fonction de Bessel de 1ère espèce modifiée d'ordre n

Y_n Fonction de Bessel de 2ème espèce non modifiée d'ordre n

K_n Fonction de Bessel de 2ème espèce modifiée d'ordre n .

Principales propriétés des fonctions de Bessel

Récurrance

$$\begin{aligned}
 J_{n+1}(u) &= -J_{n-1}(u) + \frac{2n}{u} J_n(u) & Y_{n+1}(u) &= -Y_{n-1}(u) + \frac{2n}{u} Y_n(u) \\
 I_{n+1}(u) &= I_{n-1}(u) - \frac{2n}{u} I_n(u) & K_{n+1}(u) &= K_{n-1}(u) - \frac{2n}{u} K_n(u)
 \end{aligned}$$

Dérivée

$$\frac{dJ_0(u)}{du} = -J_1(u) ; \quad \frac{d[u J_1(u)]}{du} = u J_0(u) ; \quad \frac{dI_0(u)}{du} = I_1(u) ; \quad \frac{dK_0(u)}{du} = -K_1(u) ; \quad \frac{dY_0(u)}{du} = -Y_1(u)$$

Limites des fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1

Si $u \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned}
 J_0(u) &\rightarrow 1 & J_1(u) &\rightarrow 0 & Y_0(u) &\rightarrow -\infty & Y_1(u) &\rightarrow -\infty \\
 I_0(u) &\rightarrow 1 & I_1(u) &\rightarrow 0 & K_0(u) &\rightarrow +\infty & K_1(u) &\rightarrow +\infty
 \end{aligned}$$

Si $u \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned}
 J_0(u) &\rightarrow 0 & J_1(u) &\rightarrow 0 & Y_0(u) &\rightarrow 0 & Y_1(u) &\rightarrow 0 \\
 I_0(u) &\rightarrow +\infty & I_1(u) &\rightarrow +\infty & K_0(u) &\rightarrow 0 & K_1(u) &\rightarrow 0
 \end{aligned}$$

Comportement asymptotique des fonctions de Bessel d'ordre 0 et 1

Si $u \rightarrow 0$:

$$\begin{aligned}
 J_0(u) &\rightarrow 1 & J_1(u) &\rightarrow u/2 & Y_0(u) &\rightarrow (2/\pi) \ln(u) & Y_1(u) &\rightarrow 2/\pi u \\
 I_0(u) &\rightarrow 1 & I_1(u) &\rightarrow u/2 & K_0(u) &\rightarrow -\ln(u) & K_1(u) &\rightarrow 1/u
 \end{aligned}$$

Si $u \rightarrow \infty$

$$\begin{aligned}
 J_0(u) &\rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \cos\left(u - \frac{\pi}{4}\right) & J_1(u) &\rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \cos\left(u - \frac{u}{2} - \frac{\pi}{4}\right) & Y_0(u) &\rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \sin\left(u - \frac{u}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \\
 Y_1(u) &\rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \sin\left(u - \frac{\pi}{4}\right) & I_0(u), I_1(u) &\rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \exp(u) & K_0(u), K_1(u) &\rightarrow \sqrt{\frac{\pi}{2u}} \exp(-u)
 \end{aligned}$$

x	I ₀ (x)	I ₁ (x)	K ₀ (x)	K ₁ (x)	x	I ₀ (x)	I ₁ (x)	K ₀ (x)	K ₁ (x)
0	1,0000	0,0000	□	□	3,0	4,881	3,953	0,035	0,041
0,1	1,0025	0,0501	2,427	9,849	3,1	5,294	4,326	0,031	0,036
0,2	1,01	0,1005	1,753	4,775	3,2	5,747	4,734	0,028	0,031
0,3	1,0226	0,1517	1,373	3,057	3,3	6,243	5,181	0,025	0,028
0,4	1,0404	0,204	1,115	2,185	3,4	6,785	5,67	0,022	0,025
0,5	1,0635	0,2579	0,924	1,656	3,5	7,378	6,206	0,019	0,022
0,6	1,092	0,3137	0,778	1,302	3,6	8,028	6,793	0,017	0,020
0,7	1,1263	0,3719	0,660	1,051	3,7	8,739	7,436	0,016	0,017
0,8	1,1665	0,4329	0,565	0,862	3,8	9,517	8,14	0,014	0,016
0,9	1,213	0,4971	0,487	0,716	3,9	10,369	8,913	0,013	0,014
1,0	1,2661	0,5652	0,421	0,602	4,0	11,3	9,76		
1,1	1,3262	0,6375	0,366	0,509	4,1	12,32	10,69		
1,2	1,3937	0,7147	0,319	0,435	4,2	13,44	11,71		
1,3	1,4693	0,7973	0,278	0,372	4,3	14,67	12,82		
1,4	1,5534	0,8861	0,243	0,320	4,4	16,01	14,05		
1,5	1,6467	0,9817	0,214	0,278	4,5	17,48	15,39		
1,6	1,75	1,0848	0,188	0,240	4,6	19,09	16,86		
1,7	1,864	1,1963	0,165	0,209	4,7	20,86	18,48		
1,8	1,9896	1,3172	0,146	0,182	4,8	22,79	20,25		
1,9	2,1277	1,4482	0,129	0,160	4,9	24,91	22,2		
2,0	2,28	1,591	0,113	0,140	5,0	27,24	24,34		
2,1	2,446	1,746	0,101	0,123	5,1	29,79	26,68		
2,2	2,629	1,914	0,090	0,108	5,2	32,58	29,25		
2,3	2,83	2,098	0,079	0,094	5,3	35,65	32,08		
2,4	3,049	2,298	0,071	0,083	5,4	39,01	35,18		
2,5	3,29	2,517	0,063	0,074	5,5	42,7	38,59		
2,6	3,553	2,755	0,055	0,066	5,6	46,74	42,33		
2,7	3,842	3,016	0,049	0,058	5,7	51,17	46,44		
2,8	4,157	3,301	0,044	0,050	5,8	56,04	50,95		
2,9	4,503	3,613	0,039	0,046	5,9	61,38	55,9		

-Efficacité des ailettes

Straight fins	① Rectangular $y = \delta$		$e = \frac{1}{m l} \tanh ml, \quad m = \sqrt{h/k\delta}$ $P = 2\delta l$
	② Parabolic $y = \delta_1(1 - x/l)^2$		$e = \frac{1}{m l} \frac{I_2(\frac{2}{3}m_1 l)}{I_1(\frac{2}{3}m_1 l)}, \quad m_1 = \sqrt{h/k\delta_1}$ $P = \frac{4}{3}\delta_1 l$
	③ Triangular $y = \delta_1(1 - x/l)$		$e = \frac{1}{m_1 l} \frac{I_1(2m_1 l)}{I_0(2m_1 l)}$ $P = \delta_1 l$
	④ Parabolic $y = \delta_1(1 - x/l)^2$		$e = \frac{2}{\sqrt{4(m_1 l)^2 + 1} + 1}$ $P = \frac{2}{3}\delta_1 l$
Circular fins	⑤ Rectangular $y = \delta$		$e = \frac{2}{m l (r_2/r_1 + 1)} \left[\frac{I_1(m r_1) K_1(m r_2) - I_1(m r_2) K_1(m r_1)}{I_0(m r_1) K_1(m r_2) + I_1(m r_2) K_0(m r_1)} \right]$ $P = 2\delta(r_2 - r_1)$
	⑥ Hyperbolic $y = \delta_1(r_2/r_1)$		$e = \frac{2}{m_1 l (r_2/r_1 + 1)} \left[\frac{I_2(\frac{2}{3}m_1 r_1) I_2(\frac{2}{3}m_1 r_2 \sqrt{r_2/r_1}) - I_2(\frac{2}{3}m_1 r_2 \sqrt{r_2/r_1}) I_2(\frac{2}{3}m_1 r_1)}{I_1(\frac{2}{3}m_1 r_1) I_2(\frac{2}{3}m_1 r_2 \sqrt{r_2/r_1}) - I_2(\frac{2}{3}m_1 r_2 \sqrt{r_2/r_1}) I_1(\frac{2}{3}m_1 r_1)} \right]$ $P = 2\delta_1 r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}$
Spines (circular cross-section)	⑦ Rectangular $y = \delta$		$e = \frac{1}{\sqrt{2} m l} \tanh \sqrt{2} m l$ $V = \pi \delta^2 l$
	⑧ Parabolic $y = \delta_1(1 - x/l)^2$		$e = \frac{2}{(\frac{2}{3}\sqrt{2} m_1 l)} \frac{I_1(\frac{2}{3}\sqrt{2} m_1 l)}{I_0(\frac{2}{3}\sqrt{2} m_1 l)}$ $V = \frac{\pi}{2} \delta_1^2 l$
	⑨ Triangular $y = \delta_1(1 - x/l)$		$e = \frac{4}{(2\sqrt{2} m_1 l)} \frac{I_2(2\sqrt{2} m_1 l)}{I_1(2\sqrt{2} m_1 l)}$ $V = \frac{\pi}{3} \delta_1^2 l$
	⑩ Parabolic $y = \delta_1(1 - x/l)^2$		$e = \frac{2}{\sqrt{\frac{8}{9}(m_1 l)^2 + 1} + 1}$ $V = \frac{\pi}{3} \delta_1^2 l$

2/-Plateforme Ansys workbench

Présentation des logiciels Ansys workbench

C'est une suite de plusieurs logiciels de simulation numérique multiphysique et de génération de maillage. Elle permet de concevoir des géométries en 2D ou 3D, de construire le maillage et de faire la résolution des équations modélisant le phénomène physique. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

Les différentes étapes d'utilisation d'Ansys workbench sont définies dans la notice suivante.

Interface d'Ansys workbench (AW)

Après avoir lancé le logiciel, l'interface d'utilisation apparaît :

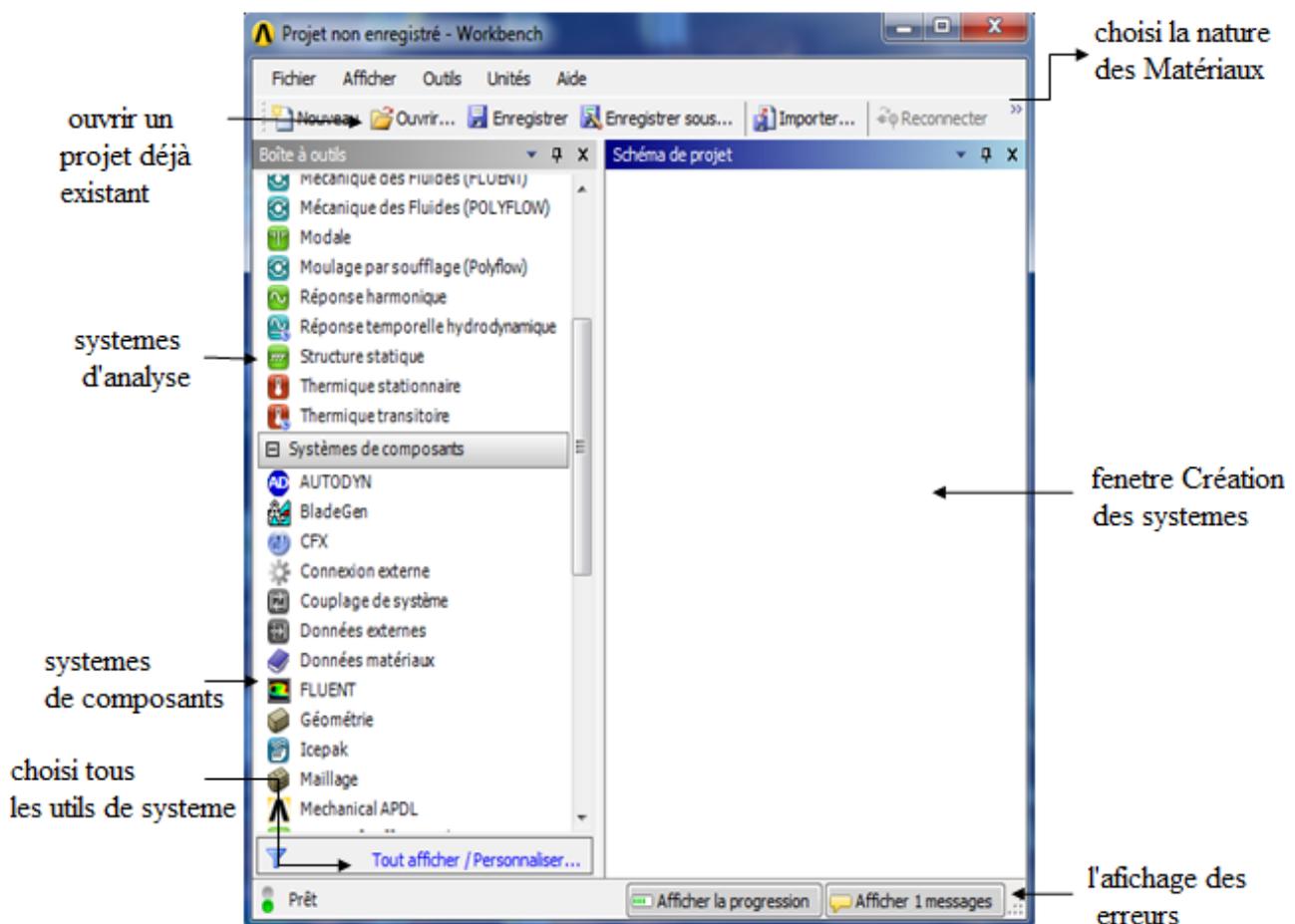


Figure 01 : Vue globale de l'interface Ansys Workbench (AW).

La première chose à faire quand on entre dans AW est de nommer le système qu'on va construire de telle manière de ne pas le perdre.

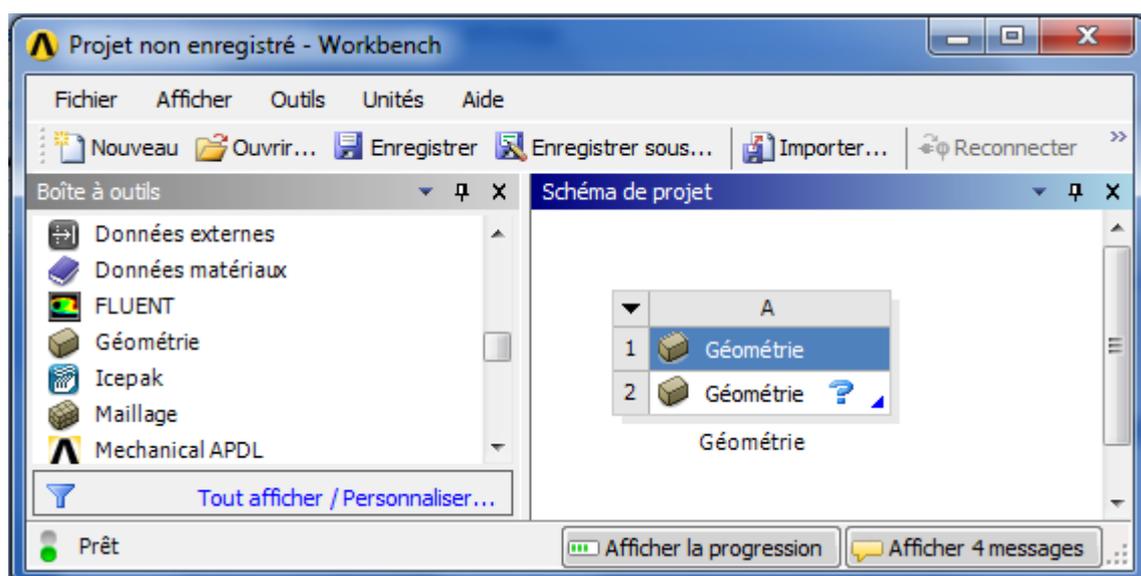
Si on désire ouvrir un projet déjà existant, utiliser le menu *ouvrir* ou import dans le cas d'un maillage ou une géométrie.

---Dans l'étude précédente sur les ailettes, nous sommes passé par quatre étapes essentielles :

- 1- Concevoir la géométrie.
- 2- Créer le maillage.
- 3- Imposer les conditions aux limites.
- 4- Exploiter les résultats.

Conception de la géométrie

La géométrie c'est la base essentielle dans une simulation numérique. Elle est créée à partir de points, de cotés, de surfaces, de volumes ou d'un groupe de tous ces éléments. On peut effectuer des opérations d'union, d'intersection, de séparation d'effacement de décomposition...etc.



Double clique

Figure 02 : Choisi l'outil de la géométrie: **Ansys Design Modeler**.

- Cliquer deux fois sur la géométrie pour ouvrir la fenêtre de conception suivante :

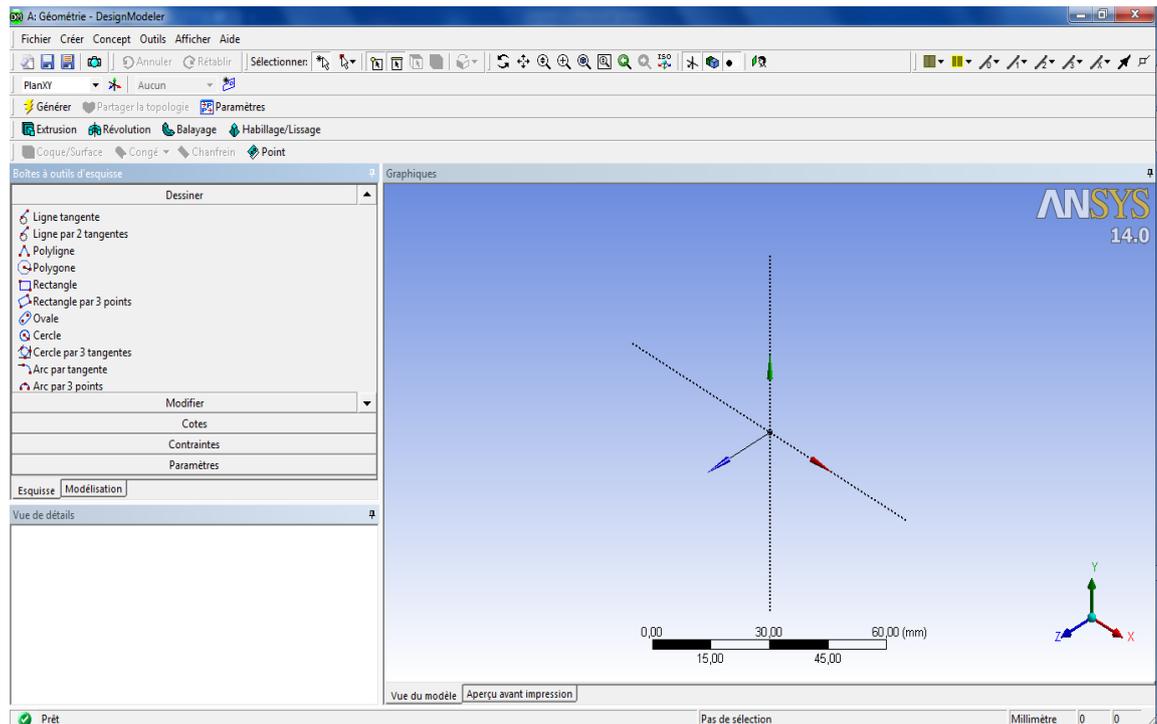


Figure 03 : Interface de Ansys Design Modeler.

Etapes de la conception du récepteur solaire :

Deux possibilités se présentent :

- Créer point par point (extrémités) le système, ligne, face, volume (conseillé pour des géométries complexes) ;
- Créer des surfaces simples existantes (cube, cylindre, sphère...) puis extruder ou faire des opérations booléennes pour obtenir les volumes ou les surfaces voulus.

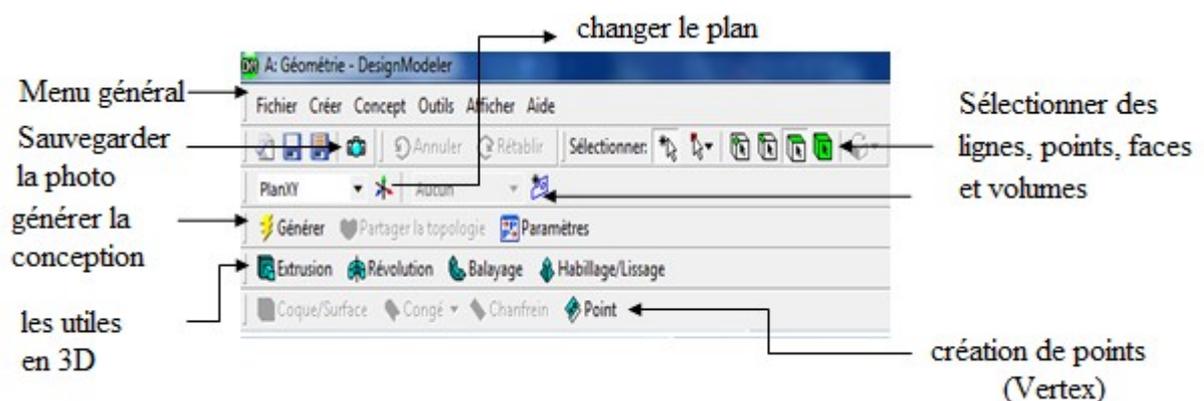


Figure 04-a : Menu création des éléments de la géométrie.

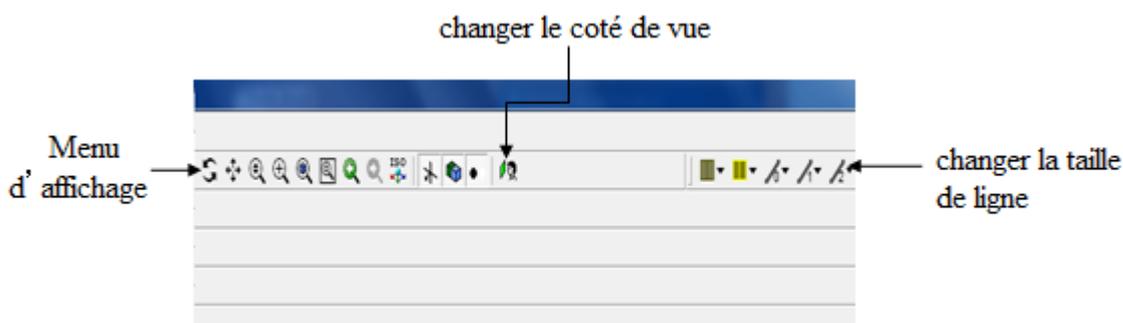


Figure 04-b : Menu création des éléments de la géométrie.

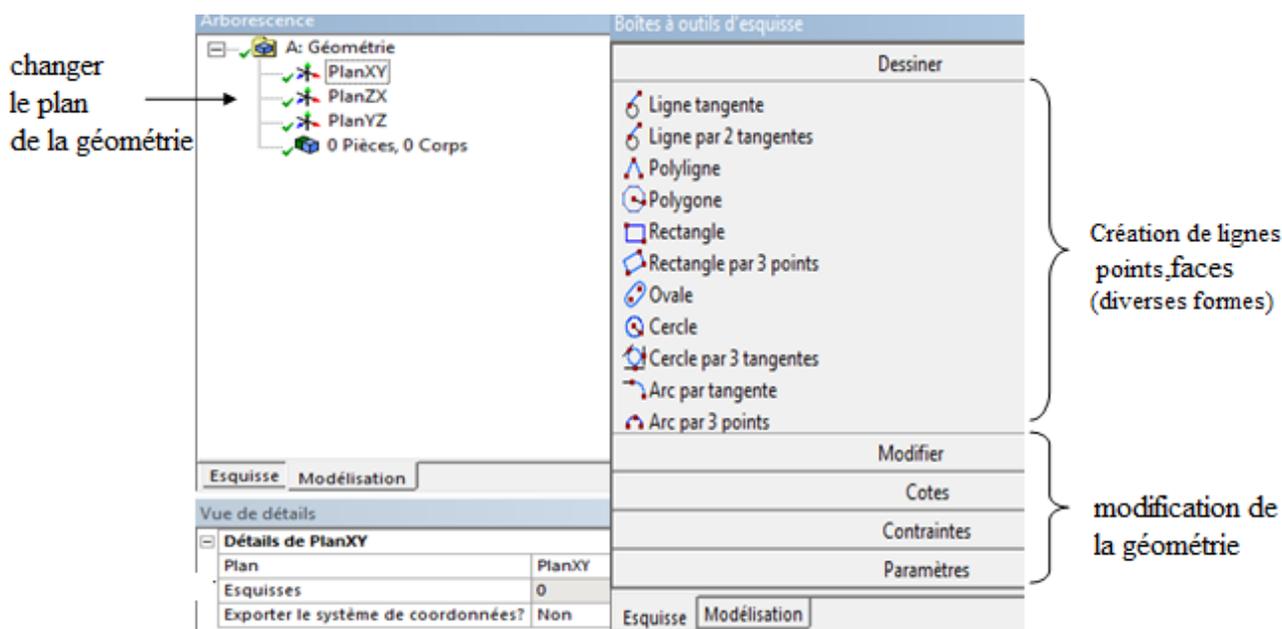


Figure 05 : Menu de commandes pour la construction de la géométrie.

Le maillage

L'étape du maillage est une étape clé pour s'assurer de la validité des simulations. C'est l'étape de découpage du volume étudié en petits volumes élémentaires. Le maillage en général n'est pas régulier : les mailles doivent être plus petites (maillage fin) dans les zones où les gradients de vitesse, de température ou de concentration vont être les plus importants. Si ces zones ne peuvent pas être prédites, il convient de faire quelques essais itératifs avec ajustement du maillage. Dans le cas d'une étude des frottements ou du transfert thermique en paroi, il faut résoudre les équations dans la couche limite près de la paroi.

Une étude de sensibilité au maillage doit toujours être faite. Cela consiste à faire des simulations avec un nombre de mailles différent (par exemple 30 % de plus) : si les résultats de simulation dépendent du maillage, il convient de resserrer celui-ci jusqu'à obtenir une indépendance entre maillage et solution. Si le maillage n'est pas assez dense, certains phénomènes locaux ne seront pas capturés (recirculations, décrochements de l'écoulement, points chauds, ...etc).

Choix du maillage

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, parmi ces paramètres, on peut citer :

- Le nombre de mailles ;
- La distance entre les mailles (concentration des mailles) ;
- La forme de la maille ;
- Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

Nous distinguons plusieurs types de maillages, définis par le nombre de nœuds associés à chaque élément, figure (III.4) et par le nombre de liaisons pour chaque nœuds

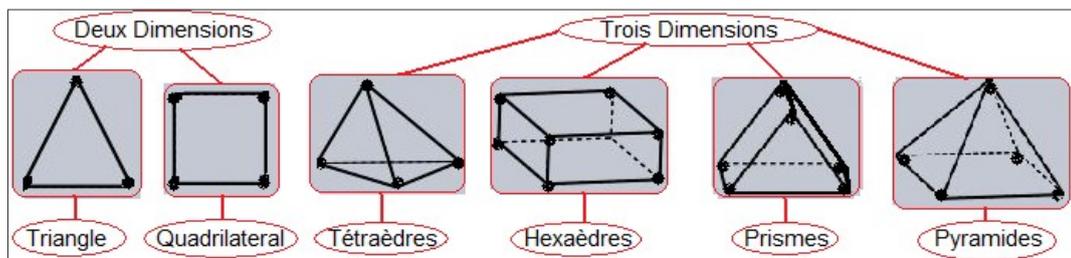


Figure 06: Exemples de mailles utilisées en Volumes Finis.

Composants du maillage

Les composants sont définis dans un processeur :

- Cell = volume de contrôle divisant la géométrie
- Face = frontière d'une cell
- Edge = frontière d'une face
- Node = point de maillage
- Zone = groupe de nœuds, face et/ou cell

Les conditions limites sont assignées aux faces zones.

Les données des matériaux et les termes sources sont assignés aux cell zones.

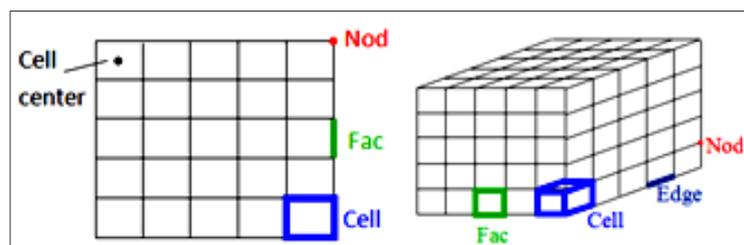
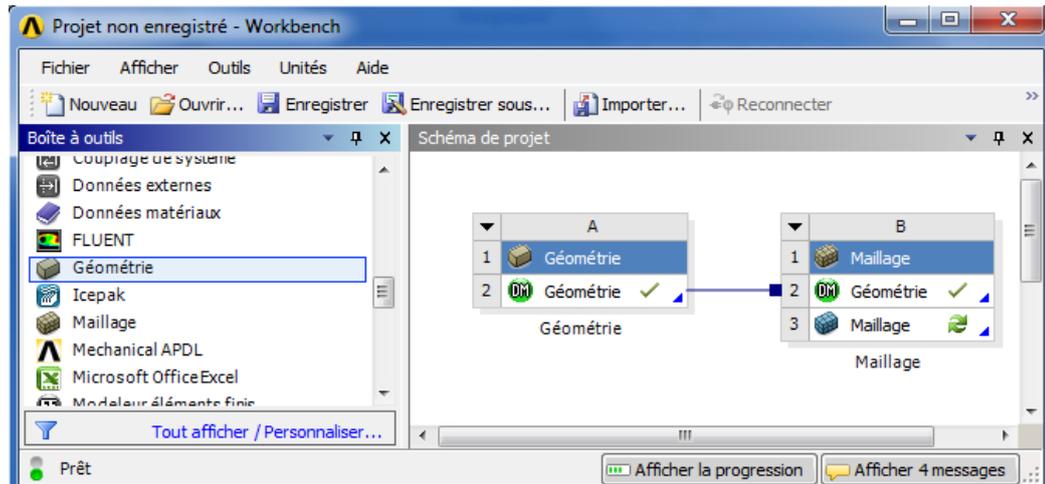


Figure 07: Composant d'un maillage.

-Avant même de créer le maillage il faut choisir le type de système des composants et choisi l'outil de maillage :



Double clique

Figure 08 : Interface pour choisir l'outil de maillage.

- Nous aurons alors la fenêtre :

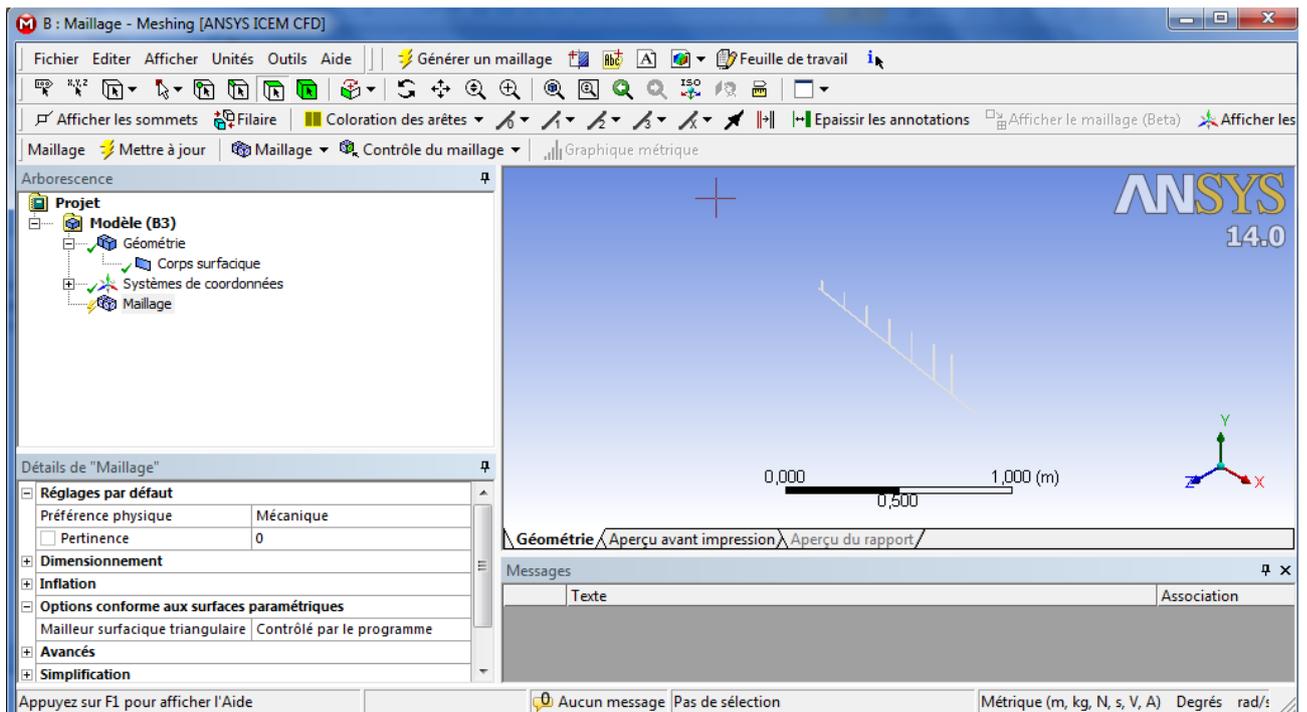


Figure 09 : Interface de maillage (Ansys Meshing).

Commandes de maillage

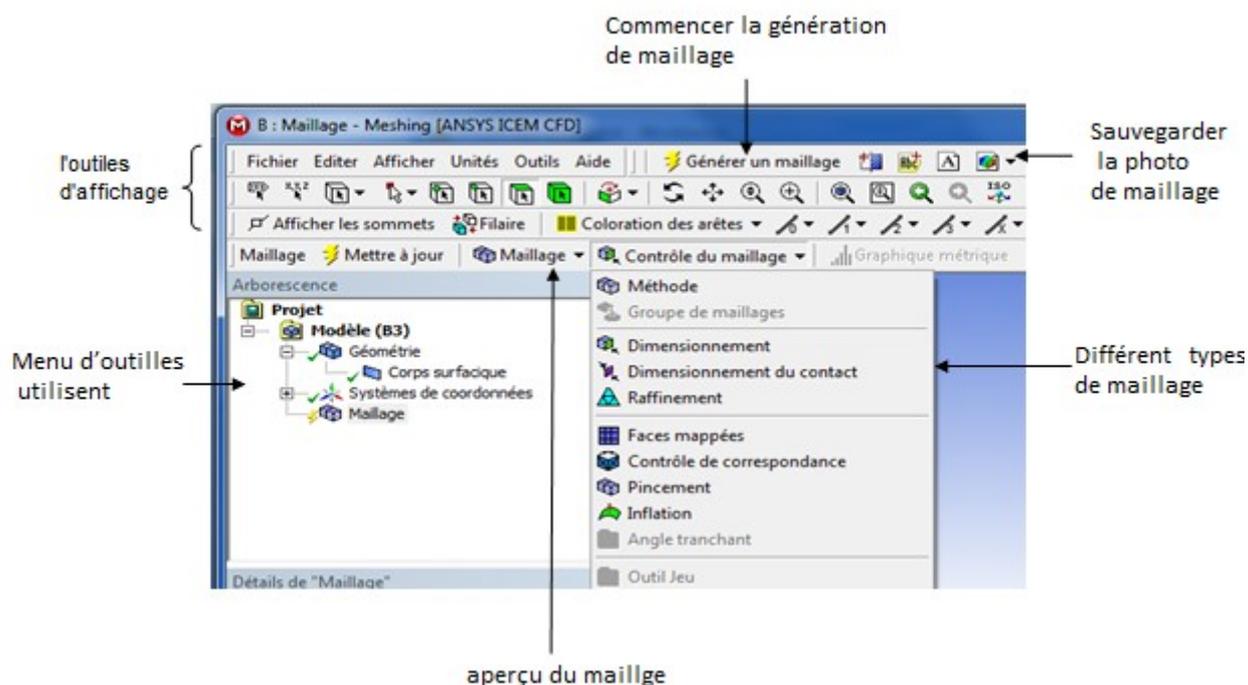


Figure 10 : Menu maillage d'une face et d'un volume.

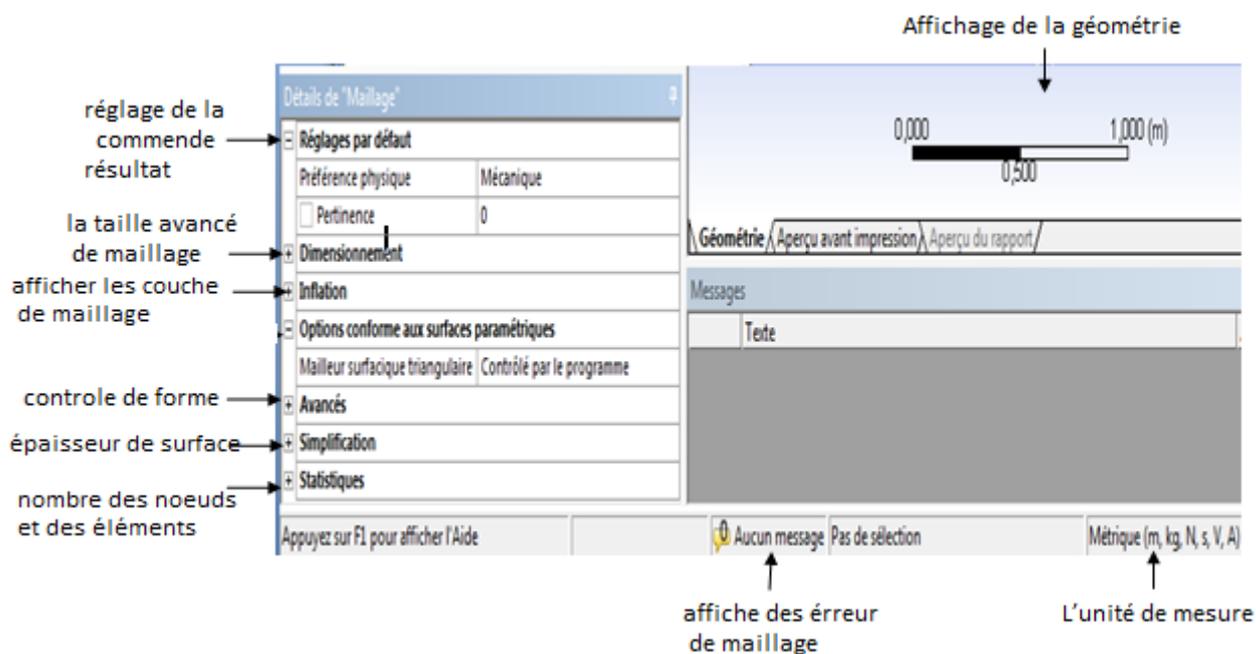


Figure 11 : Paramètres d'un maillage.

Conditions aux limites et résultats

Ce menu permet de définir les conditions physiques aux limites du domaine, à savoir si les lignes (en 2D) ou les faces (en 3D) sont des entrées, des sorties de fluide, des surfaces libres, des axes de symétries, des murs...

Avant même de créer les **Conditions aux limites et les résultats**, il faut choisir le type de système des composants et systèmes d'analyse. Le programme que nous avons utilisé pour montrer les conditions aux limites et les résultats c'est le **thermique stationnaire** :

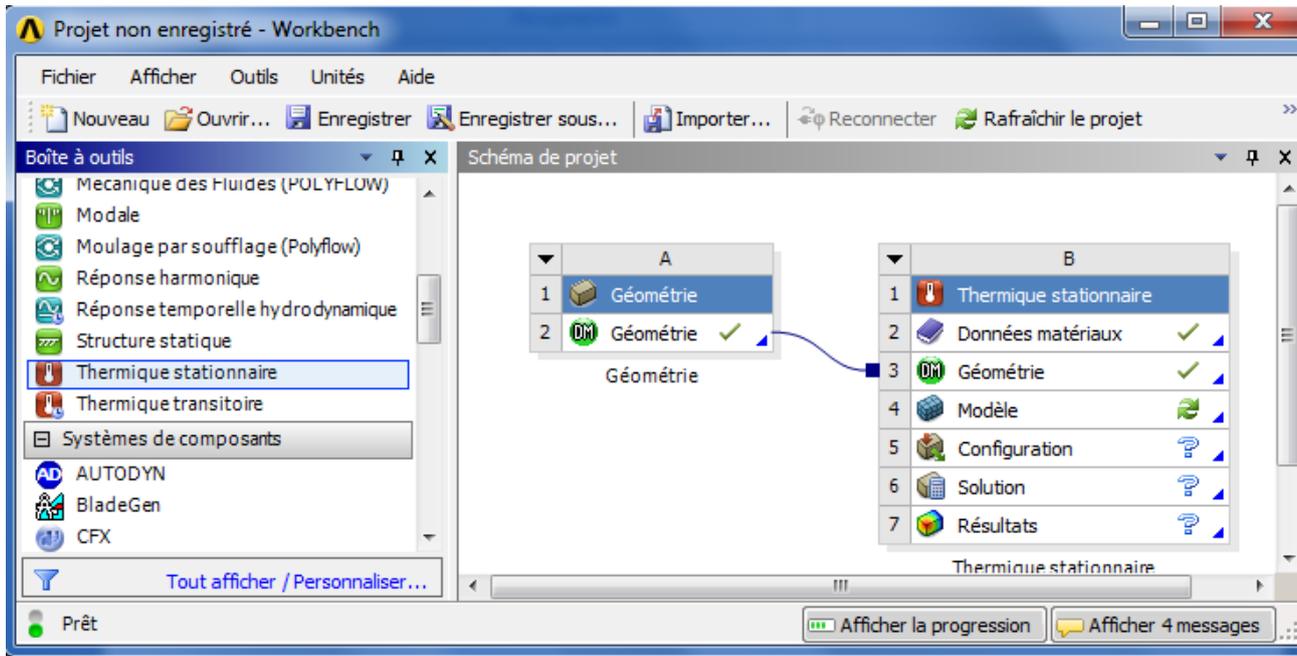


Figure 12 : Interface pour choisir l'outil **thermique stationnaire**.

- En cliquant deux fois sur le Model 'thermique stationnaire' on aura la fenêtre suivante:

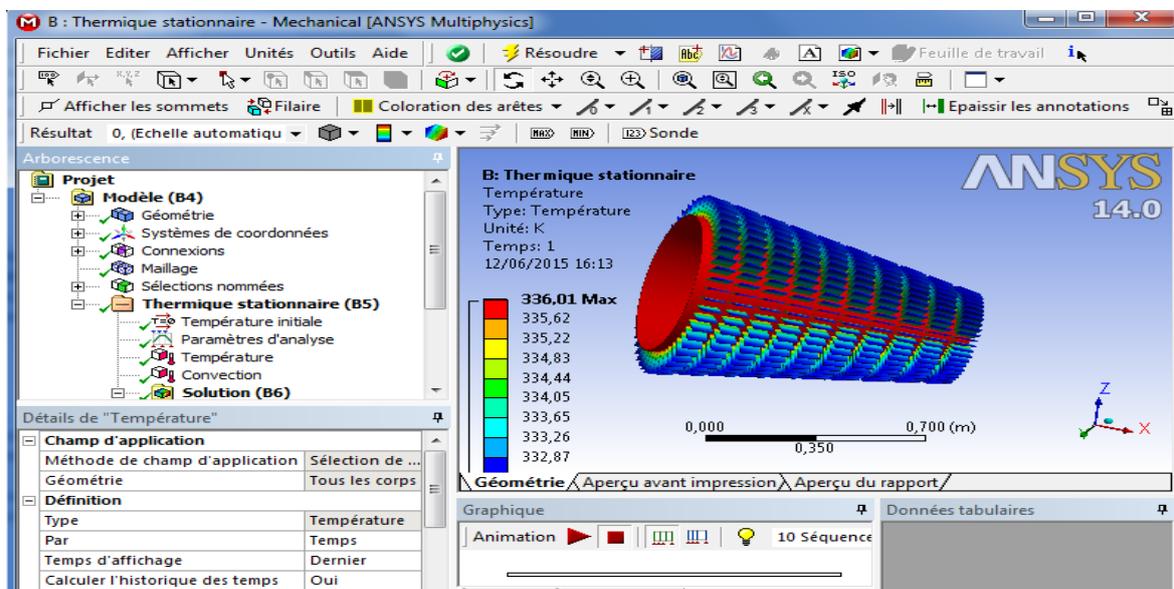
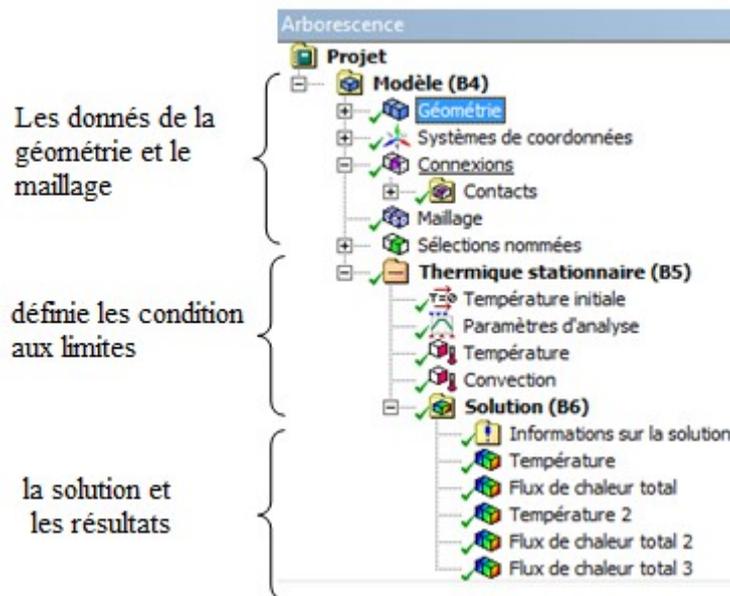
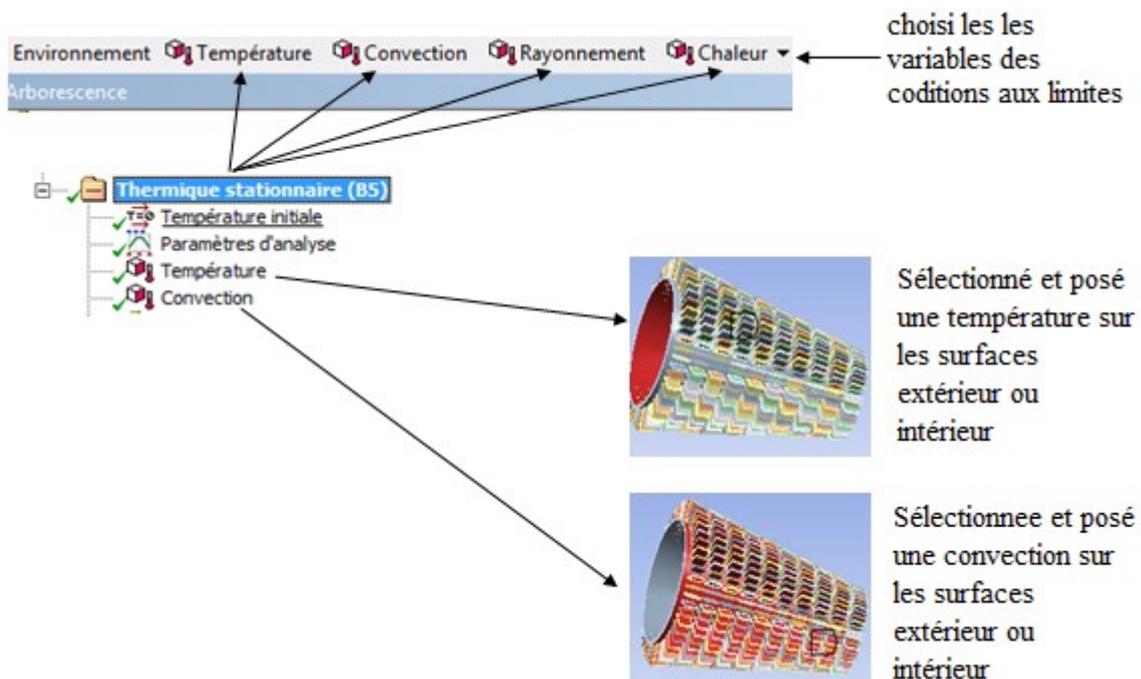


Figure 13: Interface du module **thermique stationnaire**.

- Commandes de conditions aux limites et résultats :



Commandes des conditions aux limites :



Commandes de résultats :