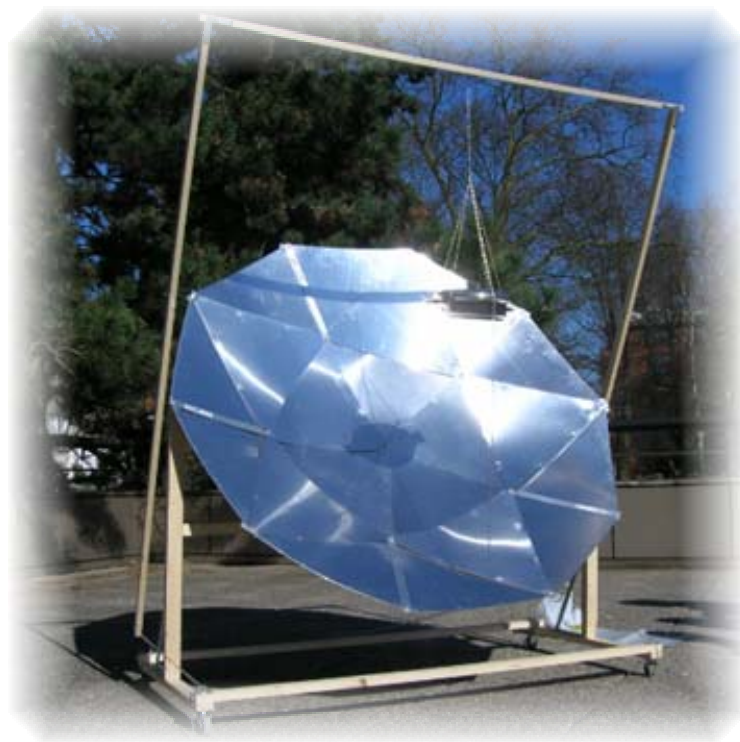


Projet de Deuxième Bachelier

Elaboration et construction d'un four solaire



Projet
2^{ème} Bachelier (Ingénieur civil)
Année académique 2006 - 2007

Sophie DA ROCHA
Xavier DECHAMPS
Maxime DELVAUX
Antonin FOUREZ
Xavier GIRAUD
Laura JACOBS
Superviseur: Pr. Pascal KOCKAERT

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	II
ABSTRACT	IV
REMERCIEMENTS	V
INTRODUCTION	1
I. CAHIER DES CHARGES	2
1 Objectif	2
2 Contraintes	2
II. ETUDE THEORIQUE	3
1 Le four solaire : généralités	3
1.1 Principe général.....	3
1.2 Historique.....	3
1.3 Le four solaire d'Odeillo.....	3
1.4 Le four solaire dans le monde	4
2 Réflexion sur un miroir parabolique	5
2.1 Principe de la réflexion	5
2.2 Caractéristiques d'un miroir parabolique	6
2.3 Réflexion sur une parabole parfaite.....	7
3 Le rayonnement solaire	9
3.1 Caractéristiques du rayonnement solaire.....	9
3.2 Flux solaire arrivant sur Terre	9
4 Les transferts de chaleur	11
4.1 Eclairage d'un matériau	11
4.2 Le rayonnement thermique.....	11
4.3 La conduction.....	12
4.4 La convection.....	13
5 L'effet de serre	14
III. ETUDE PRATIQUE	15
1 Le miroir parabolique	15
1.1 Choix du métal pour la parabole	15
1.2 Détermination des dimensions de la parabole	16
1.3 Méthode d'approximation d'une parabole	17
2 La casserole	19
2.1 Choix du métal.....	19
2.2 Détermination des dimensions de la casserole	19
2.3 Patinage de la casserole.....	20
3 Calcul du temps d'ébullition	22
3.1 Les transferts de chaleur.....	22
3.2 Calcul du temps mis pour faire bouillir un litre d'eau.....	24
3.3 Isolation du système	25
3.4 Influence de l'absorptivité sur le temps d'ébullition.....	28
3.5 Conclusion.....	28
4 La monture	29
5 Sécurité	29

IV. CONSTRUCTION.....	30
1 Le miroir parabolique.....	30
1.1 Changement des dimensions	30
1.2 Construction du support par la méthode des géodésiques	30
1.3 Mise en place de la structure réfléchissante	31
2 La monture.....	31
2.1 Plan de la monture.....	31
2.2 Construction	32
3 La casserole	32
V. ESSAIS ET OBSERVATIONS	33
CONCLUSION.....	35
BIBLIOGRAPHIE	I
ANNEXES	V
1 Démonstration de la convergence d'un miroir parabolique.....	V
2 Programmes Matlab	VII
2.1 Hauteur du soleil dans le ciel	VII
2.2 Modélisation de la réflexion des rayons du soleil sur une parabole parfaite	VII
2.3 Calcul du temps d'ébullition	IX
3 Liste du matériel.....	X

ABSTRACT

Within their engineering second year training, a project had to be achieved by a group of six students. This project consisted in creating a solar furnace that may be used in Belgium. A solar furnace is a simple system catching the solar energy and focussing it on an accurate point, causing a noteworthy heating at this point.

The project is made up of two main parts: the mathematical and physical modelling and then the realisation. The goal of the modelling is - on the basis of the specifications and document searches - to establish the design features and the general principle of the furnace. Many points had to be taken into account : the quantity of solar energy caught, the thermic losses - due to conduction, thermal radiation and convection motion - the different ways of insulating to keep the losses as low as possible - rockwool insulation and greenhouse effect - the characteristics of the parabola, the use of the best materials to guarantee the optimal reflection, the sizes and properties of the pan to make sure it heats as quickly as possible and finally the most stable and practical mount.

After this stage comes the actual assembly of the furnace. The completion of this team work culminated in March 2007 with an official presentation at the “*Printemps des Sciences*” of its capacities of boiling a liter of water in a determined lapse of time.

Dans le cadre de la formation des étudiants de deuxième Bachelier en ingénierie, un projet a dû être réalisé par une équipe de six étudiants. Ce projet consiste en la construction d'un four solaire, utilisable en Belgique. Un four solaire est un système de chauffage qui fonctionne à partir de l'énergie solaire en concentrant cette énergie en un endroit précis sur lequel on pose un contenant dans le but que celui-ci chauffe.

Le projet comporte une première partie de modélisation et une seconde de réalisation. A partir du cahier des charges et sur base de documentation, la modélisation a pour but de déterminer les différentes caractéristiques du four et son principe de fonctionnement. De manière à optimiser l'utilisation du four au maximum, il a fallu étudier les différents aspects suivants : le flux d'énergie solaire arrivant sur la casserole, les pertes thermiques dues à la conduction, au rayonnement thermique et à la convection, les différents types d'isolation possibles pour limiter ces pertes, les caractéristiques d'une parabole, le meilleur matériau à utiliser pour avoir un maximum de réflexion sur celle-ci, les dimensions et le matériau de la casserole afin qu'elle chauffe au plus vite et le type de monture la plus stable et la plus pratique possible. Cette étude théorique permet de déterminer toutes les caractéristiques du four.

Après cela, la deuxième partie du projet – la réalisation proprement dite du four solaire – commence. L'aboutissement de ce projet a été la présentation au « Printemps des Sciences » en mars 2007 lors de laquelle il a été possible de faire bouillir dans le four un litre d'eau en un temps limité.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout d'abord notre superviseur, Pascal Kockaert, qui nous a accompagné dans notre projet et conseillé durant toute cette année. Nous remercions également Pierre-Alexis Douxchamps (assistant dans le service d'Aéro-Thermo Mécanique de l'ULB) pour sa précieuse aide dans le domaine des transferts de chaleur, Freddy Clavie (technicien dans le service d'Optique et Acoustique de l'ULB) qui a accepté de découper nos plaques d'aluminium, ainsi que Joseph Guillaume (chef de travaux à l'Institut Supérieur Industriel de Bruxelles) pour ses conseils pratiques sur le four solaire.

INTRODUCTION

Nous avons choisi comme projet de 2^{ème} Bachelier en Faculté des Sciences Appliquées de construire un four solaire. Pour ce faire, une équipe de six étudiants accompagnés d'un superviseur pour les guider a été mise en place.

Le four solaire est un dispositif qui permet de recueillir et concentrer l'énergie solaire afin de disposer d'une source de chaleur pour, par exemple, chauffer une certaine quantité d'eau. Dans notre cas, c'est un miroir parabolique qui concentre les rayons venant du soleil au foyer où se trouve une casserole remplie d'eau destinée à être chauffée.

Notre projet d'année, qui consiste à construire un tel four solaire, se dissocie en plusieurs étapes. Pendant la première partie de l'année, il y a d'abord les recherches personnelles, ensuite les prises de décisions sur base de l'étude pratique du problème, faisant souvent l'objet de compromis, et qui débouchent finalement sur une modélisation. Enfin arrive la construction proprement dite du four solaire puis les essais qui doivent normalement concorder avec les résultats obtenus théoriquement.

Ce rapport présente, après quelques généralités sur les fours solaires, le résumé de nos recherches théoriques nécessaires à la bonne compréhension et à la réalisation du projet : les propriétés de réflexion d'un miroir parabolique, les caractéristiques du rayonnement solaire et les différents types de transfert de chaleur. Après l'étude théorique, nous détaillons notre démarche pour étudier pratiquement les différentes parties du four solaire, et les résultats et décisions auxquels nous avons abouti.

Ensuite, nous présentons le plan détaillé de notre four solaire ainsi que les principales étapes de sa construction. Nous terminons enfin par une description des essais que nous avons effectués et des observations que nous en avons tirées.

I. CAHIER DES CHARGES

1 Objectif

L'objectif de ce projet est l'élaboration et la construction d'un four solaire basé sur le principe de la concentration des rayons du soleil par un miroir parabolique.

2 Contraintes

Le budget qui nous est accordé pour la réalisation de ce projet s'élève à **150 €**. Cette contrainte est importante et conditionne le choix des matériaux.

Comme aucune autre contrainte ne nous était imposée pour la réalisation du four solaire, nous sommes tombés d'accord sur le choix d'un cahier des charges répondant à nos propres exigences.

- Notre objectif est de chauffer un litre d'eau dans une casserole grâce à la concentration du flux solaire en un minimum de temps en vue d'offrir du thé au Printemps des Sciences ou de faire cuire œuf, riz, pâtes, etc.
- Ce four solaire doit pouvoir fonctionner en Belgique au printemps et en été.
- Les dimensions de notre four solaire doivent optimiser le rendement tout en étant dans la limite du transportable.
- Nous devons utiliser des matériaux adéquats selon les propriétés requises (conductivité, isolation, etc.), tout en tenant compte du poids et du prix.
- Le projet sera présenté de manière ludique au Printemps des Sciences et doit mener à l'éveil des plus jeunes.

II. ETUDE THEORIQUE

Avant de se lancer dans la construction du four solaire, nous devons acquérir les bases théoriques relatives à ce sujet.

Ce chapitre présente un résumé de nos recherches. Après quelques généralités sur le four solaire, nous traiterons le principe de la réflexion, le rayonnement solaire et enfin les différents transferts de chaleur.

1 Le four solaire : généralités

1.1 Principe général

Un four solaire est un système de chauffage qui utilise l'énergie provenant du rayonnement solaire. Il existe deux types de four solaire suivant leur fonctionnement : les fours à concentration et les fours à effet de serre.

Le four solaire à concentration est basé sur la concentration des rayons du soleil sur une petite surface, d'où la possibilité d'obtenir des températures élevées. Les miroirs convecteurs peuvent être soit simplement des miroirs plans bien orientés, soit un miroir parabolique qui converge les rayons du soleil en son foyer.

Le four solaire à effet de serre est basé sur le même principe qu'une serre (voir **page 14**). Il permet de garder la chaleur provenant des rayons du soleil grâce à l'effet de serre provoqué par une vitre.

1.2 Historique

Selon Plutarque, Archimède aurait construit des miroirs concaves, des « miroirs ardents » qui auraient permis, lors de l'invasion de Syracuse par les Romains (215-212 av JC) de concentrer les rayons du soleil sur les navires ennemis, y mettant ainsi le feu.

Beaucoup plus tard, en 1747, Buffon expérimenta un miroir composé de petits miroirs plans. Ce miroir permit à Buffon de brûler une branche d'arbre et, en augmentant le nombre de miroirs, de faire fondre un morceau d'argent.

Durant le même siècle, le chimiste Antoine Laurent de Lavoisier inventa un four solaire composé de lentilles convergentes afin de faire fondre des métaux sans la pollution des combustibles.

En 1767, le naturaliste suisse Horace de Saussure construisit une « boîte chaude » pour démontrer l'effet de serre. Ce four pouvait atteindre une température de 160°C.

1.3 Le four solaire d'Odeillo

Aujourd'hui, le plus grand four solaire du monde est situé à Odeillo dans les Pyrénées-Orientales (France). Ce four solaire, mis en service en 1970, concentre les rayons du soleil grâce à un grand miroir parabolique composé de 9500 miroirs plans de 45 cm de côté. La lumière du soleil arrive sur ce miroir après avoir été réfléchi par 63 miroirs plans, les

héliostats, qui ont chacun une surface de 45 m². Les héliostats s'orientent vers le soleil grâce à un dispositif optique et électronique.

Le four solaire d'Odeillo (**Figure 1**), qui peut atteindre une température de 3800°C à son foyer, a été construit pour permettre la réalisation d'expériences nécessitant des températures élevées et un environnement non pollué.



Figure 1 : Le four solaire d'Odeillo. A gauche, le miroir parabolique qui concentre les rayons du soleil. A droite, les 63 héliostats qui réfléchissent les rayons vers le miroir parabolique

(Source : Wikipédia. *Four solaire d'Odeillo*. [32])

1.4 Le four solaire dans le monde

Le four solaire a de nombreux avantages. Il ne provoque aucune pollution puisqu'il utilise exclusivement l'énergie (gratuite) provenant du soleil. De plus, la réalisation d'un four solaire à usage domestique est tout à fait abordable, que ce soit au niveau du prix ou de la difficulté.

C'est pourquoi l'ONU prône actuellement l'utilisation de four solaire dans les pays en voie de développement, ceci pour enrayer la déforestation massive.

2 Réflexion sur un miroir parabolique

2.1 Principe de la réflexion

La réflexion d'un rayon lumineux sur une surface est depuis l'Antiquité un phénomène connu et appliqué.

2.1.1 Réflexion sur une surface plane

Considérons d'abord le cas de la réflexion d'un rayon sur une surface plane (**Figure 2**). Deux lois permettent de décrire géométriquement (donc sans tenir compte de la nature ondulatoire de la lumière) ce que devient un rayon après réflexion sur une surface plane¹.

- **Première loi** : le rayon incident et la normale à la surface (droite perpendiculaire à la surface passant par le point de contact du rayon incident sur la surface) définissent un plan : le plan incident. Le rayon réfléchi appartient à ce même plan.
- **Deuxième loi** : l'angle (appelé angle incident) entre le rayon incident et la normale est égal à l'angle (appelé angle de réflexion) entre la normale et le rayon réfléchi.

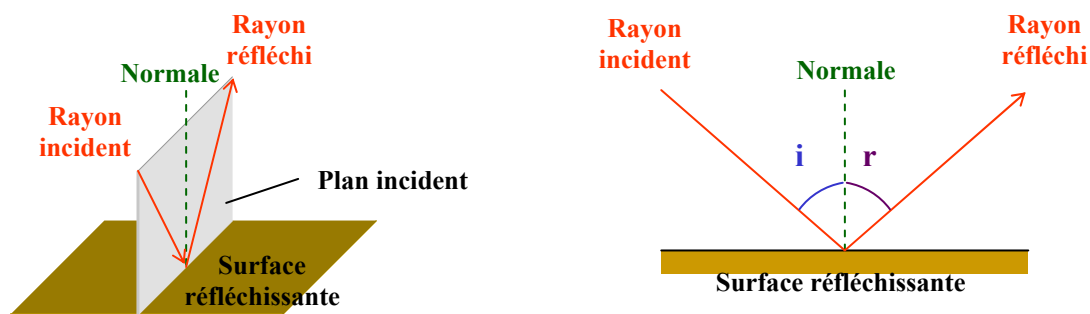


Figure 2 : Réflexion sur une surface plane (d'après Cyberscol. Regard sur la Physique. *La réflexion* [11])

2.1.2 Réflexion sur une surface courbe

Si la surface réfléchissante est courbe (**Figure 3**), celle-ci peut être décomposée en une multitude de plans infiniment petits. Ainsi, au point d'impact du rayon incident sur la surface réfléchissante, il faut considérer le plan tangent en ce point. On obtient ainsi la normale du plan tangent au point d'impact, et les deux lois de la réflexion sont alors d'application pour déterminer le rayon réfléchi.

Il existe deux types de miroirs courbes : les miroirs concaves et les miroirs convexes.

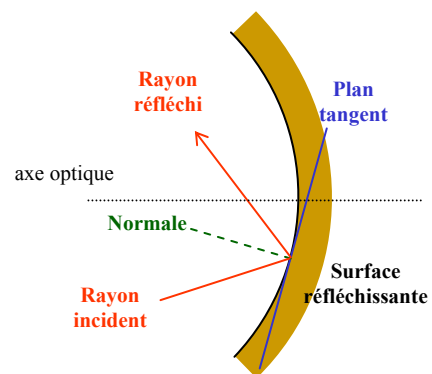


Figure 3: Réflexion sur surface courbe (d'après Techno-Science.net. *Miroir* [27])

¹ Cyberscol. Regard sur la Physique. *La réflexion* [11].

Les miroirs concaves sont des miroirs dont la courbure est orientée dans le sens opposé des rayons incidents. Les miroirs concaves ont la propriété de faire converger les rayons incidents parallèles à l'axe optique approximativement (exactement si le miroir est parabolique) en un point, le foyer.

Les miroirs convexes ont leur courbure orientée dans le même sens que les rayons incidents et font diverger ces rayons. Si les rayons réfléchis sont prolongés au-delà du miroir, ils se coupent approximativement en un point virtuel, le foyer.

Les miroirs courbes les plus utilisés sont ceux obtenus par la rotation d'une conique (parabole, ellipse) autour d'un axe, l'axe optique du miroir. Les miroirs courbes les plus répandus sont les miroirs sphériques, beaucoup plus faciles à réaliser que les autres.

2.2 Caractéristiques d'un miroir parabolique

Pour notre projet, le type de miroir le plus intéressant du point de vue de ses propriétés est le miroir parabolique concave.

Un miroir parabolique est une partie de parabolôïde de révolution, obtenue par la rotation autour d'un axe, qui devient ainsi l'axe optique, d'une parabole d'équation $2py = x^2$.

2.2.1 Rappels sur la parabole

- Une parabole est par définition le lieu des points équidistants d'une droite et d'un point. La droite est la **directrice** de la parabole, le point le **foyer**.
- Si la directrice d'une parabole a pour équation $y = -\frac{p}{2}$ et son foyer pour coordonnée $\left(0, \frac{p}{2}\right)$, alors la parabole aura pour équation : $y = \frac{1}{2p}x^2$
- Le **sommet** d'une parabole est le point de la parabole situé à mi-distance entre le foyer et la directrice.
- L'**axe** d'une parabole est la droite perpendiculaire à sa directrice et passant par le foyer. Cet axe est l'axe de symétrie de la parabole.

2.2.2 Caractéristiques du miroir parabolique

Deux paramètres permettent de décrire complètement un miroir parabolique (**Figure 4**) :

- Le coefficient **p** qui intervient dans l'équation de la parabole génératrice du parabolôïde. Lorsque **p** augmente, la parabole devient plus « plate », et inversement, lorsque **p** diminue, la parabole devient plus profonde. Ce paramètre règle donc la profondeur du miroir parabolique.
- Le diamètre **D** permet, une fois **p** déterminé, de fixer les dimensions de la parabole. Vu de haut, le miroir parabolique présente une ouverture circulaire dont le diamètre est **D**.

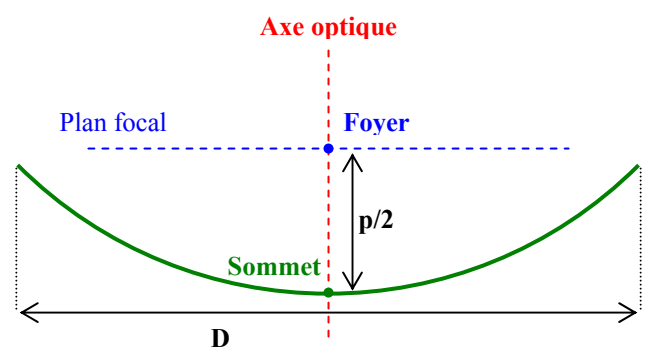


Figure 4 : Caractéristiques d'un miroir parabolique

Il faut donc déterminer ces deux paramètres de manière à avoir un miroir parabolique optimal pour notre four solaire.

Les autres caractéristiques du miroir parabolique peuvent s'exprimer en fonction de p et D .

- L'**axe optique** du miroir est l'axe de symétrie du paraboloïde.
- Le **sommet** est à l'intersection de l'axe optique avec le paraboloïde.
- Le **foyer** est le point situé sur l'axe optique à une distance $p/2$ (**distance focale**) du sommet du miroir.
- Le **plan focal** est le plan perpendiculaire à l'axe optique et passant par le foyer.

2.3 Réflexion sur une parabole parfaite

Voyons maintenant les propriétés de réflexion du miroir parabolique. Si on place une lampe au foyer d'une parabole, on peut remarquer que les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe optique. Inversement, des rayons incidents parallèles à l'axe optique sont réfléchis en un point qui correspond au foyer géométrique de la parabole. Une démonstration de cette propriété se trouve en annexe à la **page V**.

Si la génératrice du miroir parabolique a pour équation $2py = x^2$, les rayons réfléchis coupent l'axe optique au point $(0, p/2)$. Ce point est le foyer du miroir. (**Figure 5**²).

Par contre, des rayons parallèles entre eux, mais non parallèles à l'axe optique, ne convergent pas en un point (**Figure 6**).

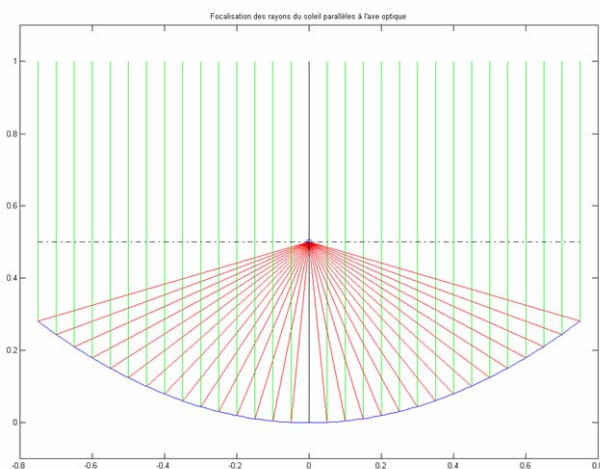


Figure 5 : Réflexion de rayons parallèles à l'axe optique. Les rayons réfléchis convergent en un point : le foyer.

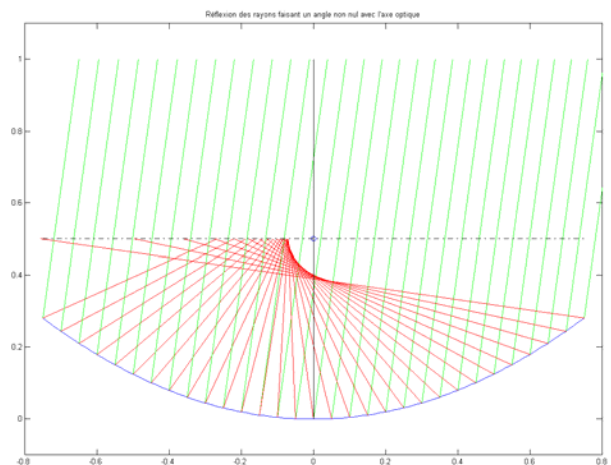


Figure 6 : Réflexion de rayons ne respectant aucune des deux conditions de Gauss. Les rayons réfléchis ne convergent pas en un point

Cependant, si on se place dans les conditions de Gauss, c'est-à-dire si

- L'angle formé entre les rayons incidents et l'axe optique est petit (**Figure 7, p.8**),
- Les points d'impact du rayon incident sur la parabole sont proches de l'axe optique (**Figure 8, p.8**),

on peut dire que les rayons réfléchis convergent approximativement en un point sur le plan focal.

² Les figures 5, 6, 7 et 8 ont été réalisées grâce au logiciel Matlab qui se trouve dans les Annexes à la **p.VII**

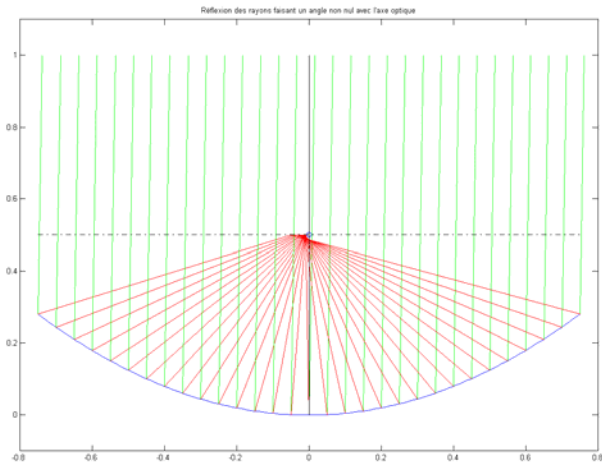


Figure 7 : Réflexion de rayons respectant la première condition de Gauss (faisant avec l'axe un petit angle de 1°). On peut remarquer la quasi-convergence des rayons réfléchis en un point sur le plan focal

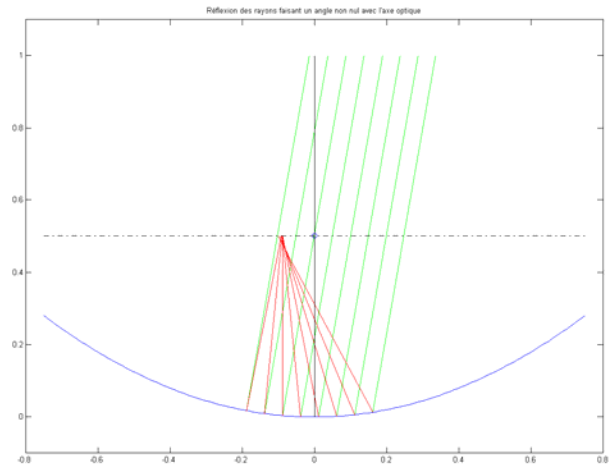


Figure 8 : Réflexion de rayons respectant la seconde condition de Gauss (proches de l'axe optique mais faisant avec cet axe un angle de 10°). On peut remarquer la quasi-convergence des rayons réfléchis en un point sur le plan focal

En conclusion, pour bénéficier de la propriété de focalisation des rayons du soleil, nous avons deux possibilités. Soit nous prenons un miroir parabolique de petit diamètre, de telle manière à ce que les points d'impact des rayons incidents soient proches de l'axe optique (c'est le cas de la **figure 8**). Cette solution n'est pas acceptable vu l'objectif du projet – porter à ébullition un litre d'eau en un minimum de temps. En effet, un four solaire de petit diamètre captera moins de rayons lumineux, donc moins d'énergie sera concentrée.

Soit nous nous arrangeons pour que l'angle entre les rayons incidents et l'axe optique soit le plus petit possible (c'est le cas de la **figure 7**), nul dans l'idéal. Il faut donc que le miroir parabolique pointe le plus exactement possible vers le soleil.

3 Le rayonnement solaire

3.1 Caractéristiques du rayonnement solaire

Le soleil émet différents types d'ondes électromagnétiques, qui peuvent être classées suivant leurs longueurs d'onde. Ces rayons provenant du soleil véhiculent une énergie qui dépend de la longueur d'onde des rayons.

- Les rayons γ , très énergétiques, ont des longueurs d'onde plus petites que 0.01 nm (1 nm = 10^{-9} m).
- Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre 0.01 et 10 nm.

Les rayons X et γ sont absorbés par les couches supérieures de l'atmosphère : ils n'arrivent donc pas sur Terre.

- Les ultraviolets sont classés suivant leurs actions chimiques, physiques et biologiques :
 - Les UV-C compris entre 100 et 280 nm.
 - Les UV-B compris entre 280 et 315 nm.
 - Les UV-A compris entre 315 et 380 nm.

Les UV-C sont, en principe, totalement absorbés par les couches supérieures de l'ozone. De même, les UV-B sont partiellement absorbés par l'ozone. 5 % des UV arrivant sur Terre sont des UV-B et 95 % sont des UV-A.

- La lumière visible a une longueur d'onde comprise entre 380 nm (violet) et 700 nm (rouge).
- Les infrarouges ont des longueurs d'onde comprises entre 700 et 1400 nm. Le soleil émet principalement des infrarouges proches.
- Les ondes radio, peu énergétiques, ont des longueurs d'onde supérieures à 1400 nm. Ces ondes sont presque totalement absorbées par les couches de l'atmosphère.

En conclusion, le rayonnement solaire qui arrive sur la Terre est composé de :

- 10 % d'ultraviolets qui représentent 3 % de l'énergie solaire.
- 40 % de lumière visible qui apportent 43 % de l'énergie solaire.
- 50 % d'infrarouges qui représentent 54 % de l'énergie solaire.

3.2 Flux solaire arrivant sur Terre

Le flux solaire est la quantité d'énergie émise par seconde par le soleil, qui traverse une surface unitaire. Le flux solaire est donc une puissance donnée par unité de surface, en Watt par mètre carré.

Le flux arrivant sur notre four solaire dépend de la position du soleil dans le ciel. En effet, l'angle d'incidence des rayons émis par le soleil sur la Terre change suivant sa position dans le ciel et influence la quantité d'énergie transmise. On remarque d'ailleurs facilement qu'il y a des variations de température dues à la variation de l'inclinaison des rayons solaires par rapport à la Terre (c'est la cause des différences entre les saisons). Le flux venant du soleil doit être multiplié par le cosinus de l'angle entre la position du soleil et la verticale (le zénith) pour obtenir le flux véritable avant qu'il ne traverse l'atmosphère. Il faut donc tenir compte de la longitude, de la latitude du lieu, de la date et de l'heure de l'utilisation du four solaire.

Le flux arrivant au-dessus de l'atmosphère n'est pas égal au flux qui atteint la surface de la Terre. En effet, une grande partie des rayons, et donc de l'énergie, est arrêtée par l'atmosphère.

Pour connaître exactement la quantité de flux qui arrivera dans notre four, nous avons eu recours à un programme en FORTRAN, utilisé par l'Observatoire Royal de Belgique : le **SBDART**³ (Santa Barbara Disort Atmospheric Radiative Transfer).

Ce programme modélise le parcours des rayons dans l'atmosphère : il divise la couche atmosphérique en 6 couches différentes et calcule couche après couche comment se fait la transmission et la dispersion des rayons.

Le programme SBDART intègre différents paramètres pour calculer la valeur du flux :

- **Les nuages** : il y a réflexion d'une partie des rayons sur les nuages. Le programme fait une simulation de la dispersion des photons et de leur manière d'arriver en assimilant un nuage à un ensemble de sphères (gouttes). Pour notre calcul du flux, nous avons considéré qu'il n'y aurait pas de nuages
- **Le type de climat**. Il existe six modèles atmosphériques : été tropical, été en latitude moyenne, hiver en latitude moyenne, été et hiver subarctique. Ces profils tiennent compte de la pression, de la température, de la quantité de vapeur d'eau, de la densité d'ozone et des traces de CO₂ et de CH₄. En effet, toute particule se trouvant dans l'atmosphère modifie la diffusion des rayons de manière différente suivant sa taille et sa concentration. Nous choisissons « été en latitude moyenne », qui correspond très bien au printemps et à l'été en Belgique.
- **L'impact de l'activité au sol**. Le programme tient compte du type d'activité au sol : les gaz émis sont différents et la dispersion et la transmission se font différemment. Il y a trois modèles différents suivant le milieu : rural, urbain et maritime. Nous choisissons « urbain ».
- **L'absorption par les gaz**. Le programme tient compte des particules actives que l'atmosphère contient : il simule comment les ondes sont absorbées ou traversent ces particules par temps clair.
- **Le lieu** : la longitude et la latitude. Pour Ixelles, la longitude vaut 4,37° et la latitude vaut 50,82°.
- **La date et l'heure**. Dans la perspective de la présentation au printemps des Sciences se déroulant du 19 au 25 mars, nous avons calculé le flux à différentes heures (entre 11h et 15h). L'heure demandée étant l'heure à Greenwich, il faut enlever une heure à notre montre si nous sommes à l'heure d'hiver et deux si nous sommes à l'heure d'été.

Le programme calcule le flux solaire qui arrive à Ixelles entre le 19 et 25 mars, entre 11h et 15h. Nous obtenons un flux minimum de **425 W/m²**.

³ Une introduction à ce programme et le programme proprement dit se trouvent à l'adresse : <http://www.crseo.ucsb.edu/esrg/sbdart/>

4 Les transferts de chaleur

L'objectif de ce paragraphe est d'introduire les différents phénomènes de transfert de chaleur intervenant dans la modélisation de notre projet.

4.1 Eclaircissement d'un matériau

Lorsqu'une énergie rayonnante (éclairage E_λ de longueur d'onde λ) atteint un milieu matériel, il se divise en trois parties : la parties réfléchi, transmise (sans altération) et absorbée. Ces trois parties sont plus ou moins importantes selon les caractéristiques du matériau et du rayon incident.

Ces répartitions se font selon trois coefficients, dépendants de la longueur d'onde du rayon incident :

$\rho_\lambda = \frac{q_{r,\lambda}}{E_\lambda}$: la réflexivité monochromatique ($q_{r,\lambda}$ est la quantité réfléchi).

$\tau_\lambda = \frac{q_{t,\lambda}}{E_\lambda}$: la transmittivité monochromatique ($q_{t,\lambda}$ est la quantité transmise).

$a_\lambda = \frac{q_{a,\lambda}}{E_\lambda}$: l'absorptivité monochromatique ($q_{a,\lambda}$ est la quantité absorbée).

avec la propriété que $\rho_\lambda + \tau_\lambda + a_\lambda = 1$

A partir de cela, nous pouvons définir certains corps particuliers :

- Un **corps diathermane** est un corps totalement transparent au rayonnement thermique, c'est-à-dire que sa transmittivité est égale à l'unité ($\tau_\lambda = 1$) tandis que $\rho_\lambda = a_\lambda = 0$. C'est le cas du vide.
Par opposition, un corps athermane ou opaque est un corps dont la transmittivité est nulle.
- Un **corps noir** est un corps qui absorbe la totalité du rayonnement incident, quelles que soient la température et la longueur d'onde. C'est-à-dire que $a_\lambda = 1$ tandis que $\rho_\lambda = \tau_\lambda = 0$.
- Un **corps gris** est un corps pour lequel à une température donnée, l'absorptivité monochromatique est indépendante de la longueur d'onde du rayon incident ($a_\lambda = a$).

4.2 Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un mode de transfert d'énergie thermique sous forme d'ondes électromagnétiques, qui ne nécessite aucun support matériel pour se propager entre les milieux qui participent à l'échange de chaleur. Dès que la température d'un corps dépasse le zéro absolu, l'agitation moléculaire va induire un rayonnement électromagnétique porteur d'énergie calorifique. Ce rayonnement se fait sur l'intervalle de longueurs d'onde $0.3 \leq \lambda \leq 1000 \mu m$ et donc se situe largement dans le domaine de l'infrarouge.

Tout milieu est à la fois récepteur et source : continuellement, il émet vers d'autres corps et reçoit des autres corps un rayonnement électromagnétique.

Une formule permet de calculer la puissance rayonnée par un matériau :

$$P_{RAY} = \varepsilon \sigma S_{RAY} (T_1^4 - T_2^4) \text{ où :}$$

- ε est l'émissivité du matériau.
- $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ est la constante de Stefan-Boltzmann.
- T_1 est la température à la surface du matériau.
- T_2 est la température ambiante
- S_{RAY} est la surface d'échange entre le matériau et le milieu environnant.

4.3 La conduction

La conduction est un transfert de chaleur qui se produit au sein d'un matériau caractérisé par la présence d'un gradient de température entre ses deux extrémités. Il apparaît un flux d'énergie sous forme de chaleur (sans transport de matière) allant de la température la plus chaude vers la température la plus froide (**Figure 9**). Le flux de chaleur se calcule grâce à la loi de Fourier, dans le cas d'un matériau de forme parallélépipédique :

$$P_{COND} = \frac{\lambda S_{COND}}{x} \Delta T \text{ où :}$$

- λ (en W/m.K) est la conductivité thermique du matériau.
- ΔT (en K) est la différence de température entre le bord chaud (température T_C) et le bord froid (température T_F).
- x (en m) est la distance entre les deux points de calcul.
- S_{COND} (en m^2) est la section du matériau dans lequel se produit la conduction.

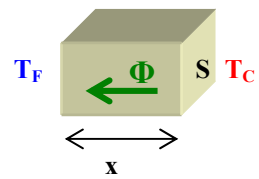
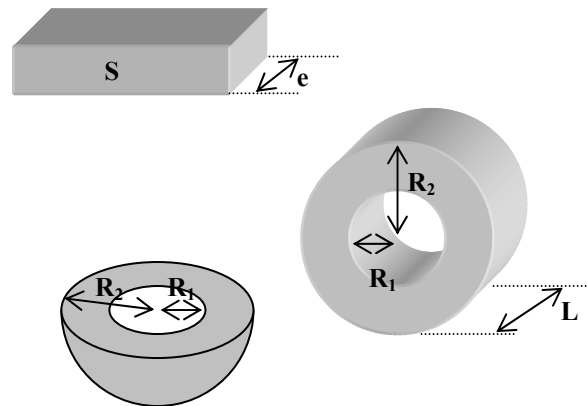


Figure 9 : transfert de chaleur par conduction dans un matériau de largeur dx et de section S

La loi de Fourier peut être généralisée à n'importe quelle forme du matériau :

$P_{COND} = \frac{dT}{R}$ où R (en K/W), la résistivité du matériau, dépend de la conductivité thermique et de la géométrie du matériau :

- Simple « mur » : $R = \frac{e}{\lambda S}$
- Symétrie cylindrique : $R = \frac{1}{2\pi L \lambda} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$
- Symétrie sphérique : $R = \frac{1}{4\pi \lambda} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$



4.4 La convection

Le troisième type de transfert de chaleur est la convection. Il existe deux types de convection : la convection forcée et la convection naturelle.

4.4.1 La convection forcée

Imaginons un matériau porté à une certaine température T_1 . Imaginons également que l'on propulse de l'air ou un fluide quelconque à une température T_2 sur ce matériau. Il y aura alors un transfert de chaleur entre le matériau et l'air (**Figure 10**). Ce type de transfert est fondamentalement différent de la conduction : ici l'air est continuellement recyclé, ce qui fait que le matériau est toujours soumis à de l'air à une température T_2 .

On peut trouver la puissance perdue par la relation :

$$P_{CONV} = h S_{CONV} (T_1 - T_2) \text{ où :}$$

- h est un coefficient qui dépend de plusieurs paramètres relatifs à l'air : température, viscosité, conductivité, diffusivité, masse volumique, etc.
- S_{CONV} est la surface d'échange entre le matériau et l'air.
- T_1 est la température du matériau et T_2 la température de l'air propulsé.

4.4.2 La convection naturelle :

Imaginons à présent un matériau porté à une température T_1 , matériau qui est en contact avec un fluide à une température T_2 (supposée plus petite que T_1). Comme les particules du fluide en contact avec le matériau vont devenir plus « chaudes », par poussée d'Archimède, elles vont remonter car leur masse volumique est plus faible que les particules du fluide restées à la température T_2 . En même temps, les particules « froides » vont descendre, ce qui forme un courant de convection, appelé écoulement de convection naturelle ou encore thermoconvection (**Figure 11**). En résumé, ce mouvement est dû à la variation de la masse volumique en fonction de la température. Le flux de chaleur perdue s'exprime par une expression analogue à la convection forcée :

$P_{CONV} = h S_{CONV} (T_1 - T_2)$ mais h n'a pas la même valeur que dans le cas de la convection forcée.

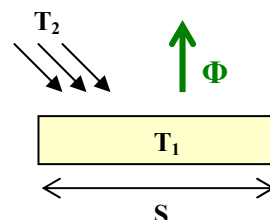


Figure 10 : transfert de chaleur par convection forcée (air à une température T_2 propulsé sur une plaque à une température T_1)

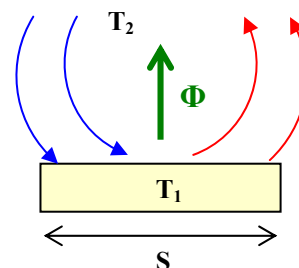


Figure 11 : transfert de chaleur par convection naturelle

5 L'effet de serre

Il existe trois gammes de rayons infrarouges : les proches, moyens et lointains. Le soleil émet principalement, nous l'avons vu, dans le visible, l'infrarouge proche et l'ultraviolet.

Le verre est une matière qui est transparente à la lumière visible et à l'infrarouge proche provenant du soleil, mais est opaque aux rayons infrarouges moyens et lointains (c'est-à-dire qu'il absorbe ces derniers). Imaginons une cuve sur laquelle une plaque de verre est posée. L'intérieur de la cuve, subissant un réchauffement dû à l'apport d'énergie lumineuse, va émettre par rayonnement des rayons infrarouges moyens et lointains, donc de longueur d'onde plus grande que les infrarouges provenant du soleil. La plaque de verre va ainsi absorber ces rayons infrarouges et les retransmettre à l'intérieur et l'extérieur de la cuve. La partie qui est retransmise à l'intérieur de la cuve va contribuer à l'augmentation de la température à l'intérieur de la cuve.

Intéressons nous maintenant à ce qui se passe lorsqu'un rayon arrive sur une plaque de verre. L'énergie solaire provenant du rayon incident est soit absorbée, réfléchi ou transmise à travers le verre, et cela à des taux qui dépendent de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence et de la composition du verre. La transmission est maximale quand l'angle d'incidence est proche de zéro et diminue quand cet angle augmente. Observons le graphique ci-dessous (**Figure 12**) qui donne le coefficient de transmission, de réflexion et d'absorption d'un rayon lumineux lorsque celui-ci passe à travers du verre, par rapport à l'angle incident. La diminution de la transmission est négligeable pour des angles incidents inférieurs à 50°. A incidence normale, la transmission est approximativement de 85 %.

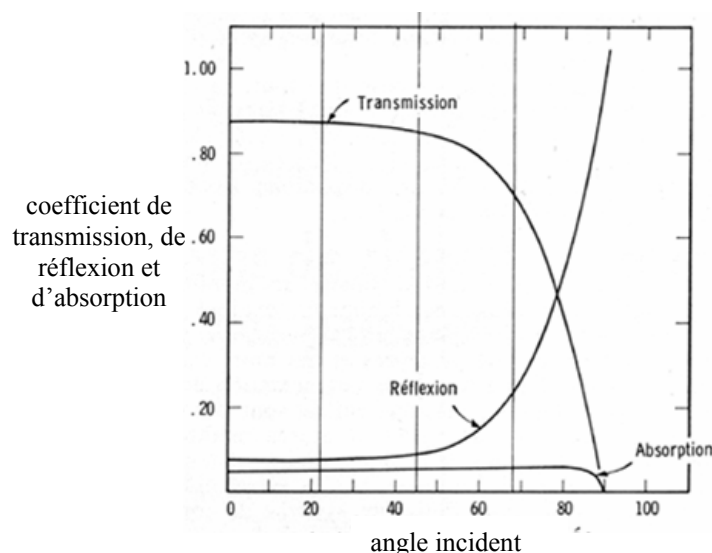


Figure 12 : Absorption, réflexion et transmission de la radiation solaire par une vitre en verre ordinaire
(source : Institut de Recherche en Construction. *Gains de chaleur au travers des fenêtres et des parements vitrés* [16].)

III. ETUDE PRATIQUE

Une fois les notions théoriques bien assimilées, nous pouvons passer à l'étude pratique dans le but de retenir des solutions au problème posé, à savoir l'optimisation du four solaire. Ce chapitre reprend les choix que nous faisons concernant les différentes parties de notre four solaire : le miroir parabolique, la casserole et la monture.

1 Le miroir parabolique

1.1 Choix du métal pour la parabole

Pour notre parabole, il faut utiliser un métal qui réfléchit le mieux les rayons du soleil. La réflexion d'un métal est caractérisée par son coefficient de réflexion, défini comme le rapport entre l'intensité réfléchie et l'intensité incidente. Le coefficient de réflexion, noté R , est donc un nombre adimensionnel compris entre 0 et 1. Le coefficient de réflexion dépend de la longueur d'onde du rayon incident et de l'angle d'incidence. Lorsque l'angle incident augmente, le coefficient de réflexion augmente également. A la limite, lorsque l'angle incident tend vers 90° , R tend vers 1.

Nous avons vu que l'énergie solaire qui arrive sur Terre provient principalement des Ultraviolets (UV-A) (10 %), de la lumière visible (40 %) et des Infrarouges (50%).

Il faut donc choisir un métal qui est caractérisé par un coefficient de réflexion élevé pour des longueurs d'ondes comprises entre 280 et 1400 nm.

Après recherche dans des tables donnant le coefficient de réflexion de différents métaux en fonction de la longueur d'onde du rayon incident⁴, un graphique (**Figure 13**) a été réalisé.

Grâce à ce graphique, on peut remarquer qu'entre 100 et 600 nm, l'aluminium a le meilleur coefficient de réflexion (environ 0.92). Après 600 nm, l'or, l'argent et le cuivre ont un coefficient de réflexion plus élevé. Cependant, l'aluminium conserve un coefficient de réflexion avoisinant 0.9.

En conclusion, l'aluminium est le meilleur métal du point de vue de la réflexion des rayons de longueurs d'onde comprises entre 100 et 1400 nm. Ce métal n'est de plus pas trop cher, contrairement à l'or ou à l'argent.

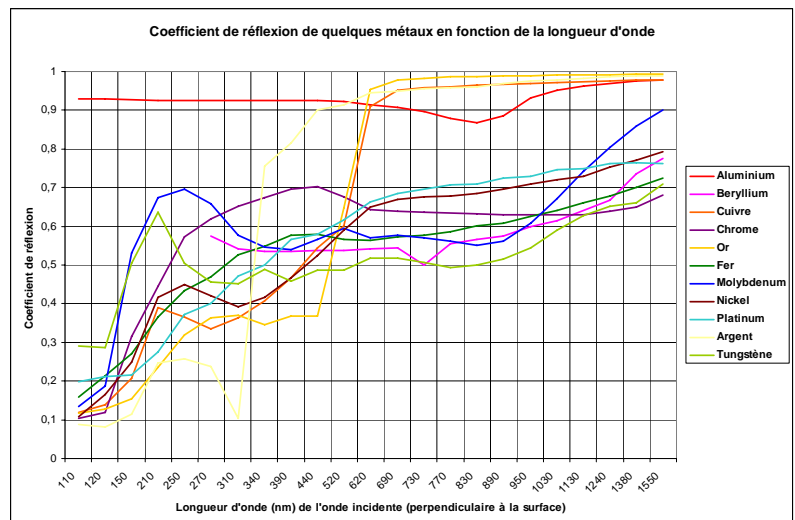


Figure 13 : variation du coefficient de réflexion de quelques métaux en fonction de la longueur d'onde de l'onde incidente perpendiculaire à la surface.

⁴ Optical Society of America. 1995. *Handbook of Optics : Devices, Measurements & Properties (volume II)* [7].

1.2 Détermination des dimensions de la parabole

Deux paramètres doivent être choisis pour décrire entièrement un miroir parabolique : le diamètre et la distance focale.

Il est évident que plus le diamètre de la parabole est grand, plus le flux solaire capté par la parabole est grand, et donc plus l'énergie concentrée au foyer sera important.

Le seul élément qui limite l'augmentation du diamètre est d'ordre tout à fait pratique. Une parabole trop grande est plus difficile à construire, coûte plus cher et pèse plus lourd.

Nous avons donc choisi un diamètre de **1,5 mètres**, ce qui nous semble être un bon compromis entre la quantité d'énergie nécessaire qui doit être concentrée et le confort pratique.

Pour observer comment se comportent les rayons après réflexion sur une parabole parfaite, nous avons élaboré un programme Matlab⁵ qui trace les rayons incidents et réfléchis par le miroir parabolique.

Nous avons vu que des rayons incidents parallèles entre eux mais non parallèles à l'axe de la parabole ne convergent pas exactement en un point, mais en une tache sur le plan focal. Le diamètre de cette tache⁶ dépend du rapport d'ouverture de la parabole (rapport entre la distance focale et le diamètre) et de l'angle α que font les rayons incidents avec l'axe optique. Le programme Matlab calcule également ce diamètre.

Nous avons pu remarquer que plus le rapport d'ouverture est grand, pour un angle α donné, plus le diamètre de la tache sur le plan focal est petit, les rayons réfléchis convergent donc mieux (**Figure 15**). Ceci se voit bien sur le premier graphique (**Figure 14**) réalisé à partir des résultats fournis par Matlab.

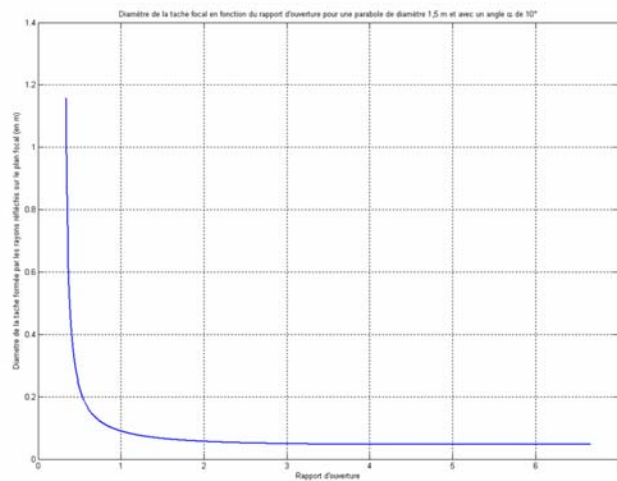


Figure 14 : variation du diamètre de la tache formée sur le plan focal par les rayons réfléchis en fonction du rapport d'ouverture (F/D où $D = 1,5$ m) avec un angle entre les rayons incidents et l'axe optique de 10° .

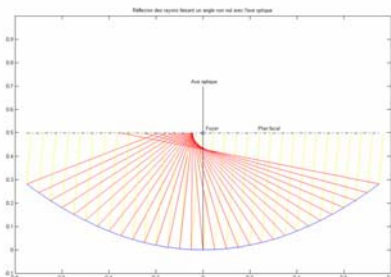
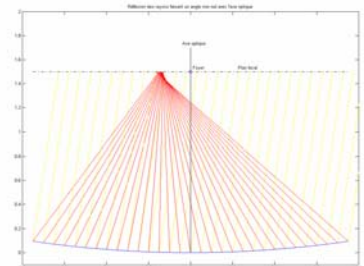


Figure 15 : Réflexion de rayons faisant avec l'axe optique un angle de 5° sur une parabole parfaite de diamètre égal à 1,5 m. Sur le graphique de gauche, la distance focale est de 0,5 m et la tache formée a un diamètre de 30,5 cm. Sur le graphique de droite, la distance focale est de 1,5 m et le diamètre de la tache formée est de 3,5 cm



⁵ Le code de ce programme Matlab se trouve dans les annexes à la p.VII

⁶ Par « diamètre de la tache », nous entendons le diamètre de la surface minimale qui reçoit la totalité du rayonnement réfléchi. La mesure de ce diamètre est très qualitative et n'est pas rigoureusement précise. Cependant, elle permet d'avoir un bon ordre de grandeur de la qualité de la convergence des rayons par le miroir parabolique.

Nous avons donc décidé de prendre un rapport d'ouverture égal à 1, ce qui correspond à une distance focale de **1,5 mètres**. La distance focale ne peut pas être tellement plus grande, ceci encore pour des raisons pratiques : la casserole étant placée sur le plan focal, il faut qu'elle ne soit pas placée trop en hauteur pour être accessible à l'utilisateur du four. De plus, lorsqu'on observe la **figure 14 (p.16)**, on voit que même si le rapport d'ouverture est plus grand que 1, le diamètre de la tache qui se forme sur le plan focal ne devient pas tellement plus petit. Si le rapport d'ouverture tend vers l'infini, le diamètre de la tache converge vers une valeur, ici approximativement égale à 4,6 cm.

Avec un diamètre et une distance focale de 1,5 m, la parabole ne doit pas être dirigée tout le temps vers le soleil. En effet, supposons que l'on prenne une casserole de 15 cm de diamètre. Jusqu'à un angle de 13°, la tache qui se forme sur le plan focal a un diamètre plus petit (égal à 13,5 cm pour être précis) que le diamètre de la casserole, donc la totalité des rayons lumineux réfléchis sont absorbés par celle-ci. Il sera nécessaire de réorienter la parabole vers le soleil seulement toutes les 52 minutes⁷. Au-delà de 13°, une partie des rayons réfléchis n'est plus absorbée par la casserole, ce qui constitue une perte.

Bien sûr, si l'angle α n'est pas nul et augmente, la tache formée par les rayons réfléchis se déplace sur le plan focal et n'est donc plus située sur l'axe optique. A 13°, le milieu de cette tache est à une distance d'environ 40 cm de l'axe optique. Il faudra donc régulièrement repositionner la casserole de manière à ce qu'elle capte tous les rayons.

1.3 Méthode d'approximation d'une parabole

1.3.1 Approximation d'une parabole par une portion de cercle

Afin de pouvoir réaliser le miroir parabolique répondant aux contraintes théoriques que nous nous sommes fixées (foyer et diamètre de 1,5 m), une méthode d'approximation de la parabole par une calotte sphérique peut être utilisée.

La courbure d'une parabole est assez proche de celle d'un cercle aux alentours de son sommet. En effet, le développement de Taylor du deuxième ordre autour de zéro de l'équation d'un demi cercle correspond à l'équation d'une parabole.

Soit H la partie inférieure d'un cercle de rayon r et de centre $(0,r)$: $H \equiv y = -\sqrt{r^2 - x^2} + r$

Par la formule de Taylor d'ordre 2 : $T = H(0) + H'(0)x + H''(0)\frac{x^2}{2} +$ une erreur d'ordre x^3

On obtient alors : $H \equiv y \cong \frac{x^2}{2r}$ ce qui est bien l'équation d'une parabole du type $y = \frac{x^2}{2p}$.

Ainsi, par symétrie de révolution, nous pouvons approcher un paraboloïde de distance focale $p/2$ par une hémisphère de rayon $r = p$.

Observons le graphique (**Figure 16, p.18**) représentant la parabole choisie pour le four solaire (en bleu) de diamètre et de distance focale égales à 1,5 m et la portion de cercle de rayon 3 m (en rouge) obtenue par la formule de développement de Taylor d'ordre 2 de la parabole.

⁷ Le soleil fait le tour de la Terre (360°) en 24 heures. Donc il se déplace de 13° en 52 minutes.



Figure 16 : Approximation d'un paraboloïde (en bleu) (diamètre et distance focale égales à 1,5 m) par une calotte hémisphérique (en rouge). L'échelle des axes est en mètre

Nous pouvons remarquer que l'écart entre les deux courbes augmente lorsqu'on s'éloigne de l'origine, et atteint 7 mm aux extrémités. Avec les moyens de construction dont nous disposons, nous ne pensons pas atteindre une telle précision sur une construction de 1,5 m de diamètre. Cette approche de la parabole par une calotte hémisphérique est donc réaliste et excellente.

1.3.2 Méthode de construction d'une calotte hémisphérique

Le but maintenant est de trouver une méthode relativement simple de construction d'une parabole, offrant des résultats aussi proches que possible de la modélisation.

Une de ces méthodes est d'approcher la parabole par une calotte hémisphérique (nous avons vu que nous pouvions le faire) et de modéliser cette dernière en utilisant les géodésiques.

Une géodésique est toujours définie par rapport à une surface : il s'agit du chemin le plus court entre deux points appartenant à cette surface. Ainsi, en utilisant des lattes relativement fines et flexibles, reliant deux points tels des géodésiques, nous obtiendrons un maillage approchant la surface.

Le problème suivant est de savoir comment obtenir le maillage et en calculer les dimensions et par conséquent les points de percée dans les lattes, points servant à l'assemblage entre elles pour sous-tendre la surface.

En prenant contact avec un radioamateur, webmaster d'un site sur lequel nous puissions diverses informations⁸, nous avons appris qu'un logiciel du nom de « windome » – logiciel n'existant hélas plus – permettait, en introduisant les différentes contraintes, de générer une image représentant le maillage par les géodésiques. Heureusement pour nous, cette personne possédait encore une version du logiciel qu'il nous a fait parvenir.

En entrant les différentes caractéristiques (diamètre = 1,5 m et distance focale = 1,5 m), un maillage approchant la surface a pu être généré (**Figures 17**).

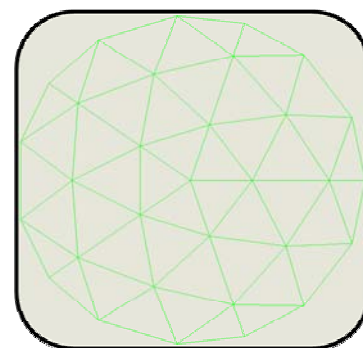


Figure 17 : Maillage approchant une calotte hémisphérique (vue de haut)
(Image générée par le logiciel Windome)

⁸ F4BUC. Réalisation d'une parabole géodésique de 90 cm [13 bis].

2 La casserole

2.1 Choix du métal

Le matériau de la casserole est un paramètre important à prendre en compte car il va influencer le temps d'ébullition de l'eau.

Pour la casserole, nous avons besoin d'un matériau qui conduit bien la chaleur et qui transmet le plus rapidement possible le flux de chaleur à l'eau contenue dans la casserole. Le paramètre qui caractérise cette propriété est la conductivité thermique. Les quatre matériaux les plus conducteurs sont le diamant (990 W/mK), l'argent (429 W/mK), l'or (417 W/mK) et le cuivre (387 W/mK). Bien évidemment, une casserole en diamant est impensable. De même, le budget ne nous permet pas d'avoir une casserole en argent ou en or. Notre choix s'est donc porté sur le **cuivre** dont le prix, même s'il augmente considérablement à l'heure actuelle, reste tout à fait abordable.

On peut également se demander si la conductivité thermique varie en fonction de la température. Le graphique ci-contre (**Figure 18**) nous indique que celle du cuivre varie très peu entre 0 et 100°C.

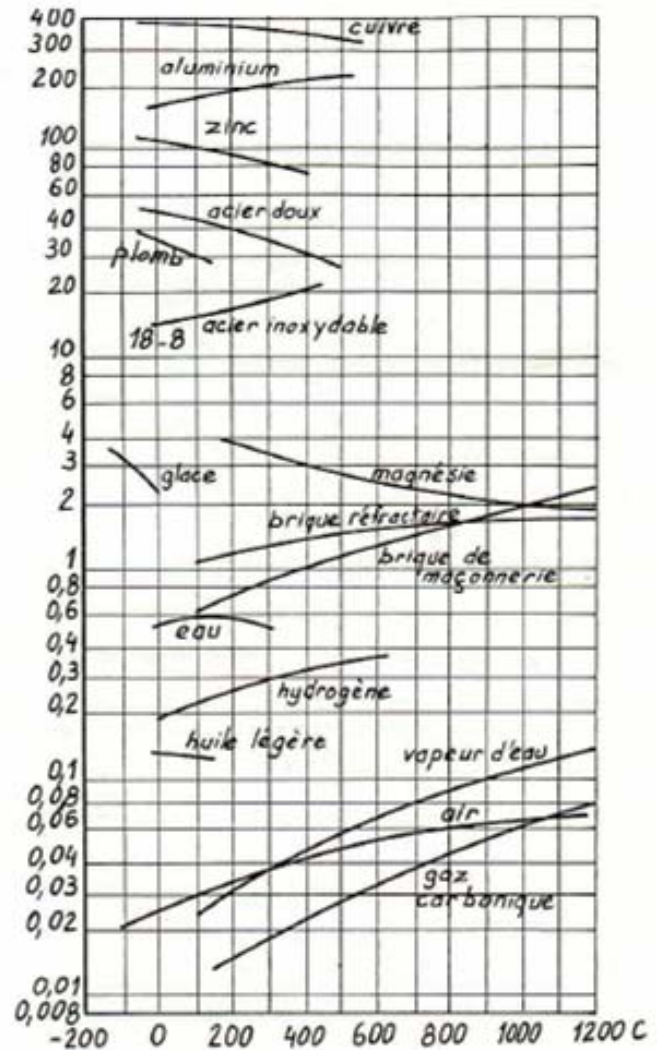


Figure 18 : conductivité thermique de certains matériaux en fonction de la température (source : ROUX Philippe. Cours de thermique [23])

2.2 Détermination des dimensions de la casserole

Nous allons maintenant déterminer la taille de la casserole qui servira à chauffer l'eau.

Il faut trouver une casserole qui peut contenir un litre d'eau, puisque notre objectif est de faire bouillir un litre d'eau en un minimum de temps. Le diamètre de cette casserole a deux impacts.

Tout d'abord, ce diamètre ne doit pas être trop grand sinon davantage de rayons arriveront directement sur la casserole et ne seront donc pas réfléchis et concentrés par la parabole. Même si les rayons du soleil, éclairant directement la casserole, participent au chauffage de l'eau, cet apport énergétique est négligeable par rapport à celui provenant de la concentration des rayons.

Ensuite, le diamètre de la casserole ne doit pas être trop petit. En effet, lorsque le soleil se déplace dans le ciel, le diamètre de la tache formée par les rayons réfléchis sur le plan focal augmente dans le temps, et devient rapidement plus grand que le diamètre de la casserole si celui-ci est petit. Il y a alors une perte d'une partie des rayons.

C'est pourquoi nous avons décidé de chercher dans le commerce une casserole d'environ 15 cm de diamètre. Avec ce diamètre, l'ouverture de la casserole est 1 % de l'ouverture de la parabole (de diamètre 1,5 m). On peut donc dire que 1 % des rayons seront perdus en arrivant directement sur la casserole, ce qui est tout à fait négligeable. Nous pouvons voir également grâce au programme Matlab qu'avec ce diamètre, tous les rayons réfléchis sont absorbés par la casserole jusqu'à un angle entre les rayons incidents et l'axe de la parabole de 13°, à condition bien sûr de déplacer régulièrement la casserole.

Nous cherchons donc une casserole en cuivre de 15 cm de diamètre et d'environ 6 cm de hauteur pour avoir une capacité de 1 litre. Nous avons trouvé – et acheté pour 5 € – une casserole en cuivre chez *Troc International*. Cette casserole a un diamètre de 15 cm et une hauteur de 6,5 cm, la taille que nous recherchions.

2.3 Patinage de la casserole

Le but est de noircir le cuivre de la casserole afin d'absorber le maximum de rayons lumineux provenant du soleil.

D'après une source⁹ tirée d'un forum sur Internet, nous avons appris qu'il était possible d'offrir une patine noire au cuivre grâce à une solution de soude caustique et de persulfate de potassium. N'étant pas sûr de la source, nous avons d'abord réalisé l'expérience avec un petit bout de cuivre. Celle-ci s'avérant concluante, nous avons appliqué la méthode sur la casserole achetée.

Nous avons commencé l'expérience chimique en décapant la casserole en cuivre qui présentait, en surface, certaines impuretés dues à son oxydation (vert-de-gris) ainsi qu'au vieillissement du vernis dont elle était recouverte (**Figure 19**). L'acide chlorhydrique s'est avéré être la meilleure solution pour ce problème, afin d'obtenir une couche superficielle plus uniforme et de mettre le métal à nu avant l'opération de patinage. Nous avons donc trempé notre casserole dans une solution diluée contenant 30% d'HCl. Ensuite, nous l'avons frottée avec du papier de verre afin d'éliminer les dernières impuretés tenaces (**Figure 20**).



Figure 19 : La casserole avant son nettoyage avec une solution d'HCl



Figure 20 : La casserole après son nettoyage.

⁹ Forum « Futura Sciences » : <http://forums.futura-sciences.com/thread38908.html>

Nous avons ensuite créé une solution contenant de la soude caustique (5% en masse) et du persulfate de potassium (1% en masse). Nous l'avons mélangé à l'aide d'un agitateur afin de l'homogénéiser.

Puis nous avons porté la solution à ébullition au moyen de plusieurs becs busen. Une fois la solution bouillante, nous y avons trempé la casserole (**Figure 21**). Le cuivre est rapidement devenu noir (**Figure 22**).

Nous avons ensuite bien agité la casserole dans la solution afin que la réaction soit plus intense.

Voici le résultat de la manipulation chimique qui s'avère très concluante (**Figure 23**), à comparer avec la casserole avant patinage (**Figure 20**).

Ainsi, moins de rayons provenant de la réflexion par la parabole seront réfléchis par la casserole.



Figure 21 : La casserole est plongée dans la solution



Figure 22 : Rapidement le cuivre de la casserole devient noir



Figure 23 : La casserole patinée

3 Calcul du temps d'ébullition

L'objectif de ce paragraphe est, connaissant le flux d'énergie solaire incident initial, de déterminer le temps mis par l'eau placée dans la casserole pour atteindre le point d'ébullition.

3.1 Les transferts de chaleur

Analysons les différents types de transfert de chaleur qui se passent au niveau de la casserole en cuivre. La **figure 24** résume tous les transferts de chaleur qui entrent en jeu.

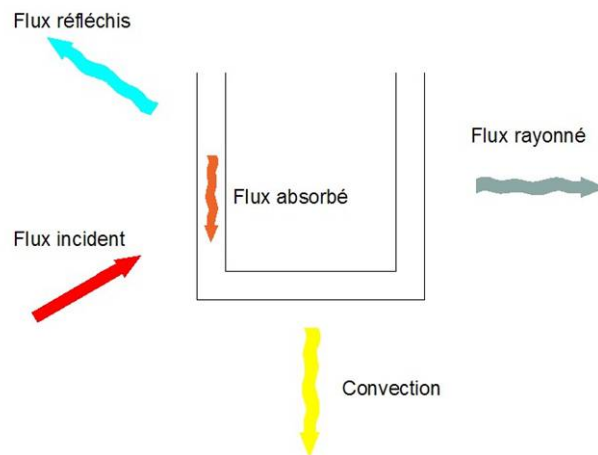


Figure 24 : Transferts de chaleur au niveau de la casserole

3.1.1 Apport d'énergie provenant des rayons du soleil (flux incident)

Soit F (en W/m^2) le flux solaire qui arrive à Ixelles. Le miroir parabolique du four solaire capte une partie des rayons dont la puissance (en W) est donnée par le produit du flux F avec la surface S_p de l'ouverture de la parabole. Pour être rigoureux, il faut retrancher à S_p la surface s de l'ouverture de la casserole (fond de la casserole) qui absorbe une petite partie des rayons, qui ne sont donc pas concentrés par le miroir.

Ces rayons sont ensuite réfléchis par l'aluminium. A ce niveau, il y a une perte de la puissance puisque 10 % des rayons sont absorbés par le métal (le coefficient de réflexion de l'aluminium est égal à 0,9). La puissance qui arrive sur la casserole est donc égale à :

$$P_{CAS} = R F (S_p - s) = R F \pi \left(\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4} \right) \text{ où :}$$

- $R = 0,9$ est le coefficient de réflexion de l'aluminium.
- $D = 1,5$ m est le diamètre du miroir parabolique.
- $d = 0,15$ m est le diamètre de la casserole.
- $F = 425$ W/m^2 est le flux solaire arrivant à Ixelles.

On obtient $P_{CAS} = 669,17$ W

Pour connaître la puissance réellement absorbée par la casserole, nous devons faire appel à l'absorptivité du cuivre. La casserole va ainsi absorber l'énergie et voir sa température augmenter. Par convection de l'eau (donc par mouvement naturel de l'eau), la chaleur va progressivement se transmettre à la totalité du liquide.

La puissance absorbée par la casserole est donnée par : $P_{ABS} = \alpha P_{CAS}$

où :

- α est le coefficient d'absorptivité du cuivre.
- P_{CAS} est la puissance arrivant sur la casserole.

3.1.2 Perte de chaleur due au rayonnement thermique

La casserole va, en chauffant, perdre une certaine quantité de chaleur à cause de son rayonnement thermique.

Nous avons vu que le rayonnement thermique est donné par :

$$P_{RAY} = \varepsilon \sigma S_{RAY} (T_{cuivre}^4 - T_{air}^4) \text{ où :}$$

- ε est l'émissivité du cuivre. Comme nous faisons l'hypothèse du corps noir, nous avons $\varepsilon = \alpha$.
- $\sigma = 5,6696 \cdot 10^{-8}$ est la constante de Boltzmann.
- T_{cuivre} est la température à la surface du métal.
- T_{air} la température de l'air ambiant.
- S_{RAY} est la surface de contact entre la casserole et l'air.

3.1.3 Perte de chaleur due à la convection naturelle

Il y aura également une perte de chaleur due à la convection naturelle entre la casserole en cuivre et l'air ambiant. Nous avons vu que cette puissance perdue par convection pouvait s'écrire : $P_{CONV} = h S_{CONV} (T_{cuivre} - T_{air})$

où :

- S_{CONV} est la surface d'échange entre l'air et la casserole.
- T_{cuivre} est la température de la casserole.
- T_{air} est la température de l'air ambiant.
- h est le coefficient d'échange de surface de l'air. Ce coefficient dépend d'un certain nombre de paramètres tels que la température, la viscosité, la conductivité, la diffusivité, la masse volumique de l'air, etc. Dans notre cas, nous avons déterminé que h est compris entre 4 et 10 W/m²K. Dans les calculs qui suivront, nous prendrons la valeur maximale de h (10 W/m²K) de manière à maximiser les pertes.

3.1.4 Perte de chaleur due à la convection forcée

La convection forcée a lieu au niveau de la casserole lorsque de l'air est propulsé sur celle-ci, ce qui revient à dire que dès que le vent souffle sur la casserole, il y a convection forcée, donc perte de chaleur.

Nous allons ici négliger l'action du vent. En pratique, s'il y a beaucoup de vent lors de l'utilisation du four solaire, nous pouvons mettre un paravent afin de protéger la casserole, et d'éviter ainsi les pertes de chaleur.

3.2 Calcul du temps mis pour faire bouillir un litre d'eau

Nous avons maintenant à disposition toutes les formules permettant de calculer le temps nécessaire pour porter à ébullition un litre d'eau.

3.2.1 Approximations préliminaires

Avant de passer au calcul proprement dit, nous allons faire quelques approximations pour simplifier le problème :

- La température de l'eau est égale à tout instant à la température du cuivre. Ceci est une très bonne approximation car le cuivre a une conductivité thermique élevée.
- Toute l'eau chauffe en même temps, sans qu'il y ait un gradient de température. Ceci est également une bonne approximation vu la grande conductivité de l'eau et le petit volume (1 dm³) chauffé.
- L'épaisseur de la casserole est négligeable et ne va pas subir un gradient de température.
- L'absorptivité α du cuivre normal est égale à 0,04. Ici, notre casserole en cuivre est patinée. Nous ne pouvons pas connaître la valeur exacte de α mais nous allons le supposer égale à 1 (la casserole absorbe toute l'énergie et ne réfléchit donc aucun rayon).
- Lorsque nous parlons de la surface totale de la casserole, nous devons prendre en compte le côté latéral, le fond et également le couvercle. Dans la suite, nous allons nous arranger pour que le couvercle soit totalement isolé. Nous avons donc la surface de la casserole responsable des pertes thermiques :

$$S = \pi \frac{d^2}{4} + \pi d H \quad \text{où } d \text{ est le diamètre de la casserole et } H \text{ sa hauteur.}$$

3.2.2 Equation différentielle du bilan thermique

Pour commencer, nous allons poser l'égalité entre la puissance nécessaire pour porter à ébullition un litre d'eau (P_{NEC}) et les différentes puissances entrante (P_{ABS}) et sortantes (P_{RAY} et P_{CONV}) de la casserole :

$$P_{NEC} = P_{ABS} - P_{RAY} - P_{CONV} \quad \text{où } P_{NEC} = \frac{m C_p (T - T_0)}{t} \quad \text{avec :}$$

- m la masse d'eau à chauffer.
- C_p la capacité calorifique de l'eau.

Pour faire ce calcul, nous devons introduire une équation différentielle puisque, lorsque la température augmente, les différentes pertes thermiques augmentent également. Nous avons donc une équation différentielle non homogène en T :

$$m C_p \frac{dT}{dt} = \alpha P_{CAS} - \varepsilon \sigma S T^4 - h S (T - T_{air})$$

3.2.3 Calcul du temps d'ébullition sans les pertes thermiques

Nous allons d'abord calculer le temps nécessaire pour chauffer l'eau, sans compter les pertes thermiques. Nous avons :

$$\frac{mC_p dT}{dt} = \alpha P_{CAS} \Leftrightarrow mC_p \int_{T_0}^T dT = \alpha P_{CAS} \int dt \Leftrightarrow mC_p (T - T_0) = \alpha P_{CAS} t$$

En isolant t, on obtient :

$$t = \frac{mC_p (T - T_0)}{\alpha P_{CAS}}$$

Appliquons maintenant la formule que nous venons d'obtenir, avec :

- $m = 1$ kg (masse de l'eau à faire bouillir).
- $C_p = 4186$ J/kg.K (capacité calorifique de l'eau).
- $T = 100^\circ\text{C}$ (température d'ébullition).
- $T_0 = T_{\text{air}} = 20^\circ\text{C}$ (température de l'air ambiant).
- $S = \pi \frac{d^2}{4} + \pi d H = 0,0483$ m (surface de la casserole de diamètre $d = 15$ cm et de hauteur $H = 6,5$ cm, sans prendre en compte le couvercle).
- $\sigma = 5,6696$ W/m²K⁴ (constante de Boltzmann).
- $h = 10$ W/m²K (coefficient d'échange de l'air : nous prenons sa valeur maximale)
- $\alpha = 1$ (absorptivité de la casserole patinée).

Nous obtenons un temps d'ébullition sans tenir compte des pertes thermiques de **500 secondes** (8 minutes et 20 secondes).

3.2.4 Calcul du temps d'ébullition avec les pertes thermiques

Pour calculer le temps d'ébullition en tenant compte des pertes thermiques, nous devons résoudre l'équation différentielle complète. Celle-ci n'étant pas simple à résoudre analytiquement, nous la résolvons numériquement grâce à Matlab¹⁰ qui nous fournit la fonction « température en fonction du temps », solution de l'équation différentielle. Un graphique (**Figure 26, p.27**) représente cette fonction (en bleu). Nous pouvons voir que le temps d'ébullition, en tenant compte des pertes thermiques, est de **545 secondes** (9 minutes et 5 secondes)

Bien entendu, ce calcul reste très théorique puisque nous ne pouvons connaître de manière précise la valeur de l'absorptivité du cuivre patiné.

3.3 Isolation du système

Pour améliorer le temps d'ébullition que nous avons obtenu, nous pouvons isoler la casserole. Deux manières sont possibles : créer un effet de serre autour de la casserole ou mettre autour de la casserole un isolant.

3.3.1 Effet de serre

Une solution serait de mettre une « bulle » de verre autour de la casserole afin de créer un effet de serre.

¹⁰ Ce programme Matlab se trouve dans les annexes à la **p.IX**

Le désavantage est qu'environ 15 % des rayons provenant de la réflexion sur la parabole seront réfléchis par le verre, et n'atteindront donc pas la casserole.

L'avantage de l'effet de serre est que les rayons dus au rayonnement thermique de la casserole sont arrêtés par le verre et contribueront donc à chauffer l'air à l'intérieur de la « bulle ». La température de l'air entourant la casserole augmentant, la puissance perdue par convection et par rayonnement diminuera automatiquement. Ainsi, l'air emprisonné dans la bulle de verre jouera le rôle d'un bon isolant (la conductivité thermique de l'air est faible).

3.3.2 Isolant autour de la casserole

Une deuxième solution est de mettre directement autour de la casserole un isolant thermique. Le fond de la casserole, qui est éclairé par les rayons du soleil, ne doit bien sûr pas être recouvert d'un isolant.

Dans ce cas d'isolation, il faut tenir compte du phénomène de conduction à travers l'isolant et du phénomène de convection entre l'isolant et l'air ambiant (**Figure 25**).

Un isolant est un matériau donc la conductivité thermique λ est très

faible, et donc par la loi de Fourier $\Phi = \frac{dT}{R}$ (où R , la résistivité thermique, est inversement proportionnelle à λ , la conductivité thermique), la différence de température entre deux extrémités de l'isolant est très grande. Ainsi, la température à la surface de l'isolant sera plus petite que la température à la surface de la casserole, d'où une diminution de la perte par convection. Quantifions cette diminution.

La puissance perdue par la conduction de l'isolant sera la même que celle créée par convection, c'est-à-dire que $\Phi_{CONV} = h(T_{air} - T_{isolant})$ et $\Phi_{COND} = \frac{T_{isolant} - T_{cuivre}}{R}$ sont égales.

Nous avons considéré que la température du cuivre est égale à la température de l'eau étant donnée l'excellente conductivité thermique du cuivre. Les inconnues dans ces deux équations sont la densité de flux et la température extérieure de l'isolant. Nous aurons donc, en égalant ces deux équations, l'expression de la température à la surface de l'isolant :

$$T_{isolant} = \frac{R h T_{air} + T_{cuivre}}{1 + R h}$$

R est ici la résistivité de l'isolant. L'isolant recouvrant la casserole a une forme cylindrique de hauteur H (hauteur de la casserole), d'épaisseur e et de rayon intérieur égal au rayon de la casserole ($d/2$). Pour calculer la résistivité, nous devons donc utiliser la formule dans le cas de la symétrie cylindrique :

$$R = \frac{1}{2 \pi h \lambda} \ln \left(\frac{d/2 + e}{d/2} \right)$$

Pour être rigoureux, il faudrait ajouter à ce résultat la résistivité du cuivre. Celle-ci étant petite par rapport à la résistivité de l'isolant, nous la négligeons.

La puissance perdue par convection devient donc :

$$\begin{aligned} P_{CONV} &= h S_{isolant} (T_{isolant} - T_{air}) + h S_{nonisolant} (T_{cuivre} - T_{air}) \\ &= h S_{isolant} \left(\frac{R h T_{air} + T_{cuivre}}{1 + R h} - T_{air} \right) + h S_{nonisolant} (T_{cuivre} - T_{air}) \end{aligned}$$

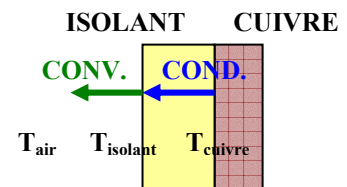


Figure 25 : Isolation de la casserole

où S_{isolant} est la surface de la casserole recouverte d'un isolant et $S_{\text{nonisolant}}$ est la surface qui n'est pas recouverte par l'isolant.

3.3.3 Solution retenue

Nous avons vu que les pertes thermiques dues au rayonnement et à la convection sont négligeables dans le cas où l'on considère l'absorptivité de la casserole patinée égale à 1. C'est pourquoi, nous avons décidé de supprimer l'effet de serre comme isolant, vu la perte de 15 % des rayons due à la réflexion par le verre.

Cependant, nous allons mettre autour de la casserole de la **laine minérale**. Nous avons choisi cet isolant d'abord pour sa petite conductivité thermique (0,04 W/mK). De plus, la laine minérale résiste à la chaleur, ne s'enflamme pas et ne souffre pas de l'humidité et de la condensation.

Si nous choisissons de mettre une épaisseur de 5 cm de cet isolant autour de la casserole, voyons ce que devient le temps d'ébullition. La température à la surface de l'isolant est égale à :

$$T_{\text{isolant}} = \frac{R h T_{\text{air}} + T}{1 + R h} \quad \text{où :}$$

- $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ (coefficient d'échange de l'air).
- $T_{\text{air}} = 293 \text{ K}$ (température ambiante).
- T est la température de l'eau.
- R est la résistivité de la casserole en cuivre qui est égale à : $R = \frac{1}{2 \pi h \lambda} \ln\left(\frac{d/2 + e}{d/2}\right)$.

Avec $d = 0,15 \text{ m}$ (diamètre de la casserole) et $e = 5 \text{ cm}$, nous avons $R = 0,203 \text{ m}^2\text{K/W}$.

A titre d'exemple, si la température de l'eau est de 100°C , nous obtenons $T_{\text{isolant}} = 46,4^\circ\text{C}$, au lieu de 100°C sans isolant. En considérant que S_{isolant} est la surface latérale de la casserole, et $S_{\text{nonisolant}}$ la surface du fond, nous pouvons résoudre numériquement l'équation différentielle avec Matlab. Un graphique (**Figure 26**) reprend la variation de la température de l'eau au cours du temps dans le cas où la casserole est isolée (en rose).

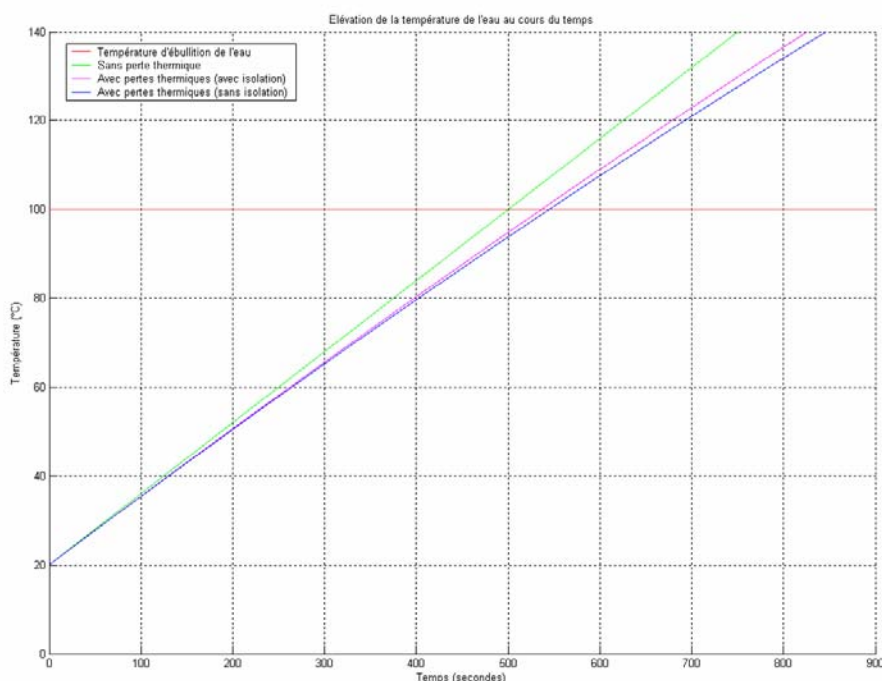


Figure 26 : Elévation de la température de l'eau au cours du temps

Nous trouvons un temps d'ébullition égale à **535 secondes** (8 minutes et 55 secondes). Nous avons donc gagné 10 secondes, ce qui correspond à environ 22 % de la différence entre le temps d'ébullition sans tenir compte et en tenant compte des pertes thermiques.

3.4 Influence de l'absorptivité sur le temps d'ébullition

Jusqu'ici, nous avons considéré l'absorptivité de la casserole égale à 1. En réalité, nous ne pouvons connaître ce coefficient avec précision. Regardons quelle influence a l'absorptivité sur la température d'ébullition. Un graphique (**Figure 27**) montre la variation de la température d'ébullition (sans pertes thermiques) en fonction de l'absorptivité. Lorsque α tend vers 0, le temps d'ébullition est infini, ce qui est logique puisque presque aucune puissance n'est absorbée par la casserole. A partir de $\alpha = 0,417$, le temps d'ébullition sans pertes thermiques devient inférieur à 20 minutes.

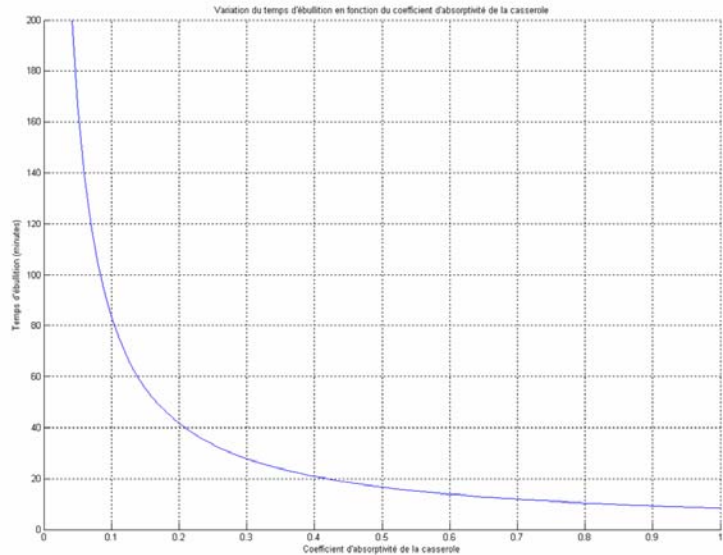


Figure 27 : Variation du temps d'ébullition (sans pertes thermiques) en fonction de l'absorptivité de la casserole

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs de α et les temps d'ébullition correspondant :

Absorptivité de la casserole	Temps d'ébullition sans pertes	Temps d'ébullition avec pertes	
		Avec isolant	Sans isolant
1	8'20	8'55	9'05
0.9	9'16	9'57	10'07
0.8	10'26	11'13	11'26
0.7	11'55	12'52	13'09
0.6	13'54	15'04	15'28
0.5	16'40	18'11	18'47
0.4	20'50	22'55	23'53
0.3	27'48	31'	32'50

3.5 Conclusion

Nous pouvons espérer faire bouillir le litre d'eau en un temps compris entre 10 et 20 minutes. Bien sûr, le calcul que nous avons fait pour connaître ce temps d'ébullition reste extrêmement théorique. Nous avons par exemple complètement négligé l'action du vent sur le refroidissement de la casserole. Nous vérifierons ces résultats lors de l'expérimentation de notre four solaire (voir p. 33).

4 La monture

Nous avons vu que le miroir parabolique doit être orienté le plus précisément possible vers le soleil afin de ne pas avoir une tache lumineuse trop grande sur le plan focal. Une monture pouvant le viser avec une bonne précision et permettant de soutenir la parabole est donc nécessaire.

Pour suivre le soleil, cette monture doit comporter deux degrés de rotation.

Un premier degré de rotation permet de faire varier l'angle vertical de visée, l'angle azimutal. L'utilisation de la parabole étant limitée à la Belgique, la valeur maximum de cet angle dépend de la hauteur maximum qu'atteint le soleil en Belgique. En sachant que le 21 juin, le soleil est au zénith au tropique du Cancer ($23^{\circ}27'$ latitude nord) et que la Belgique est à une latitude d'environ 51° , le soleil atteint une hauteur maximum de 62° [$90^{\circ} - (51^{\circ} - 23^{\circ})$].

La création d'un programme Matlab¹¹ nous donnant l'angle en fonction de la latitude, la date et l'heure, nous a permis de fixer un angle minimum de 15° qui permet l'utilisation du four solaire durant le printemps et l'été, de 10 à 18 h 00.

Un deuxième degré de rotation horizontale (axe de latitude) est également nécessaire afin de viser correctement le soleil.

5 Sécurité

Etant donné la grande concentration des rayons solaires, il est nécessaire de prendre certaines précautions quant à l'utilisation de notre four solaire.

En effet le soleil peut être très dangereux pour l'œil et pourrait causer des dommages irréversibles vu l'intensité des rayons aux alentours du foyer. Il faudra donc ne jamais approcher sa tête du foyer pendant l'utilisation du four et, pour plus de sécurité, prévoir une paire de lunettes de soleil pour l'utilisateur.

Il serait également prudent de ne pas laisser le four sans surveillance car il pourrait enflammer des feuilles ou tissus – une loupe de seulement quelques centimètres carrés en est capable.

Ces précautions¹² devront être bien respectées lors de l'utilisation du four au Printemps des Sciences.

¹¹ Ce programme Matlab qui calcule la hauteur du soleil se trouve dans les annexes à la p.VII

¹² Ces précautions sont reprises sur une pancarte qui sera mise au Printemps des Sciences

IV. CONSTRUCTION

L'étude pratique terminée, nous avons tout en main pour construire notre four solaire¹³. Nous avons séparé le four solaire en deux parties (monture et miroir parabolique), parties qui ont été construites en parallèles.

1 Le miroir parabolique

1.1 Changement des dimensions

Dès le début, nous avons décidé de changer les dimensions de la parabole. Nous avons gardé un diamètre de 1,5 m mais avons pris une distance focale de 0,75 m au lieu de 1,5 m. En effet, nous nous sommes rendus compte qu'avec une distance focale de 1,5 m, le miroir parabolique a une profondeur de 9,4 cm, ce qui est très petit par rapport au diamètre, d'où des difficultés à la construction. Avec une distance focale de 0,75 m, la profondeur devient 18,8 cm, ce qui est plus envisageable pour la construction.

1.2 Construction du support par la méthode des géodésiques

Nous avons d'abord construit à l'aide de lattes flexibles en aluminium une structure ayant la forme d'une calotte sphérique. A l'aide du programme « Windome »¹⁴, la longueur des différentes barres du maillage formant la surface a pu être déterminées (**Figure 28**) :

- 10 barres rouges → 46,352 cm
- 5 barres bleus → 34,788 cm
- 5 barres vertes → 43,039 cm
- 10 barres noires → 49,304 cm
- 5 barres oranges → 50,093 cm

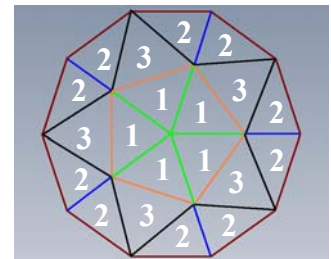


Figure 28 : Structure du miroir parabolique



Figure 29 : Assemblage des lattes pour former la structure du miroir

Les lattes en aluminium ont été coupées aux bonnes dimensions et ensuite assemblées au moyen de boulons. Grâce à leur flexibilité, la structure a pris, ou plutôt approche (le degré de précision est difficilement mesurable), la forme d'une calotte sphérique.

¹³ La liste du matériel acheté pour la construction du four solaire se trouve en annexe à la p. X

¹⁴ Ce programme a été obtenu en prenant contact avec le webmaster du site : http://f4buc.chez-alice.fr/parabole_90cm.htm [13bis].

1.3 Mise en place de la structure réfléchissante

Nous avons commandé par l'intermédiaire du Service d'Onde et Acoustique deux plaques d'aluminium de 2 m² chacune et d'une épaisseur de 0,5 mm. Nous avons pris la plus petite épaisseur possible pour avoir des plaques les plus flexibles afin qu'elles épousent le mieux la structure. Ces plaques ont été découpées, non sans mal car la faible épaisseur rendait la découpe difficile, par le technicien du service, Freddy Clavie, en vingt triangles de trois sortes (1, 2 et 3 sur la **figure 28, p.30**). Les dimensions de ces triangles ont été choisies de telle manière à s'adapter le plus parfaitement possible à la structure. Nous avons ensuite attachés ces triangles sur le support au moyen de petits boulons.



Figure 30 : Mise en place des plaques en aluminium sur la structure au moyen de boulons

2 La monture

2.1 Plan de la monture

La monture que nous avons finalement réalisée se compose d'une base (1) formée par un cadre en bois sur roulettes. Ces roulettes (2) permettent la rotation horizontale et facilitent le transport du four solaire. Sur cette base, deux perches (3), reliées entre eux par une autre perche en bois (4) pour assurer la solidité de l'ensemble, supportent le deuxième axe de rotation constitué d'une tige filetée. Cette tige (5) permet d'abord la rotation du miroir parabolique (6) par l'intermédiaire de deux morceaux de bois reliés entre eux par une grande perche (7). La parabole est fixée en trois endroits : sur les deux morceaux de bois et sur la perche qui les relie. La tige filetée permet également la rotation d'un portique en bois (8) sur lequel est placée une chaîne supportant la casserole (9).

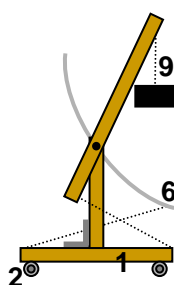


Figure 31 : Four solaire vue de profil

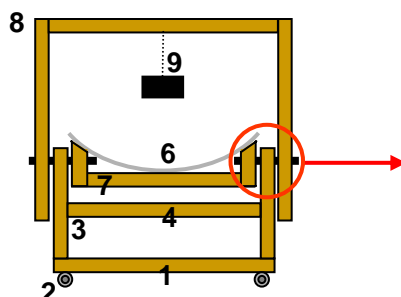


Figure 32 : Four solaire vue de face

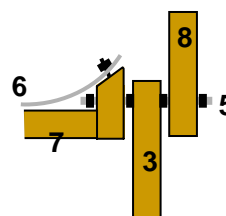


Figure 33 : Détail de la figure 32

Lors de l'utilisation du four solaire, la parabole doit d'abord être orientée vers le soleil. Ceci fait, elle est maintenue en place grâce à une chaîne (10). Ensuite, le portique doit être mis de telle manière à ce que la casserole soit sur le foyer du miroir. De même, le portique est maintenu en place grâce à deux chaînes (11), une à chacun de ses bouts.

2.2 Construction

Nous avons commencé la construction de la monture par la base en assemblant au moyen de plaques et boulons quatre perches en bois. Sur cette base a été fixée d'un côté quatre roulettes (1), et de l'autre côté, grâce à des équerres (2), les deux perches en bois (3) soutenant l'axe de rotation. Ce dernier est une tige filetée (5) passée à travers les extrémités des perches et maintenue grâce à des écrous.

Nous avons ensuite construit le portique en assemblant trois fines perches en bois. Les deux extrémités de ce portique ont été forées pour permettre le passage de la tige filetée (6). Au sommet de ce portique, nous avons accroché une chaîne au bout de laquelle peut être suspendue la casserole.

Pour assembler le miroir à la monture, nous avons foré dans la surface réfléchissante deux trous diamétralement opposés au niveau d'une latte. Ces deux trous permettent de fixer au moyen de deux boulons la parabole à deux bouts de bois traversés chacun par une tige filetée (7), ce qui permet la rotation de la parabole. Cependant, en faisant cela, nous avons remarqué que deux points d'attache n'étaient pas assez pour fixer la parabole, celle-ci se déformant à cause de sa relative flexibilité. C'est pourquoi, nous avons relié les deux bouts de bois par une perche (8) au milieu de laquelle un boulon fixe le sommet du miroir. Ce boulon est suffisamment grand pour pointer parallèlement à l'axe du miroir vers la casserole. Il permet ainsi d'orienter correctement le miroir vers le soleil : lorsque son ombre ne se voit plus, le miroir est orienté.

Nous avons terminé en mettant quatre chaînes : trois qui permettent l'immobilisation du portique (4) et de la parabole, et une fixée sur la barre transversale du portique et à laquelle la casserole peut être suspendue.

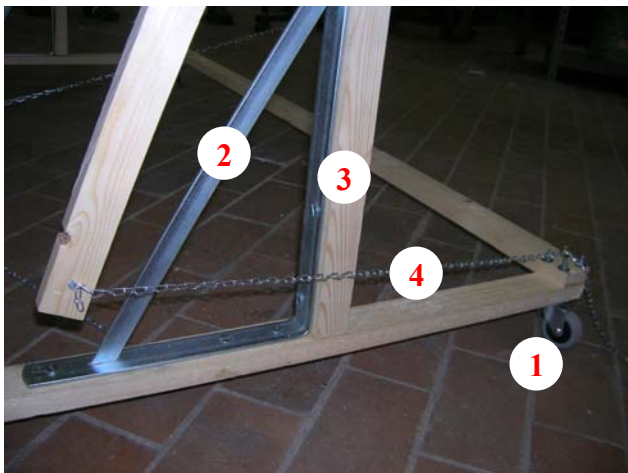


Figure 34 : Base de la monture

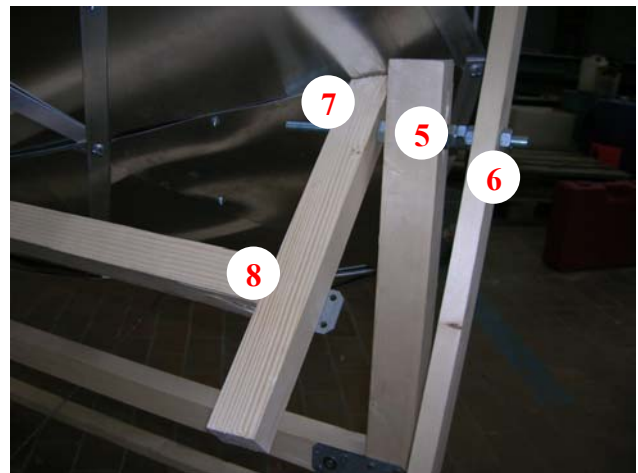


Figure 35 : Axe de rotation du miroir et du portique

3 La casserole

La casserole étant suspendue à une chaîne, sa surface latérale capte également des rayons. Nous avons donc décidé de mettre l'isolant (laine minérale) uniquement sur le couvercle et le côté non éclairé de la casserole afin de ne pas empêcher une partie des rayons d'être absorbée par la casserole.

V. ESSAIS ET OBSERVATIONS

Nous avons profité de deux journées ensoleillées pour tester vers 13 heures notre four solaire. Nous avons retiré de ces tests quelques observations.

Tout d'abord, le transport du four solaire se fait assez facilement grâce à son léger poids et ses roulettes.

Pour viser le soleil, nous devons d'abord effectuer une rotation horizontale de la monture qui se fait très facilement et précisément grâce aux roulettes. Ensuite il faut orienter le miroir dans la direction du soleil en s'aidant d'une tige parallèle à son axe. Ceci fait, le miroir est bloqué dans sa position grâce à une chaîne.

Nous pouvons maintenant positionner la casserole. Nous déterminons l'emplacement du foyer en recherchant l'endroit où l'air est le plus chaud. Cette recherche approximative se fait en promenant sa main aux alentours du foyer théorique. Il ne reste plus qu'à tourner et bloquer le portique, puis suspendre la casserole à la bonne hauteur.

Le premier jour, nous avons chauffé un demi litre d'eau dans la casserole en cuivre patinée. Nous n'avions pas encore eu la possibilité de mettre l'isolant. Un graphique (**Figure 36**) présentant l'élévation de la température au cours du temps a pu être réalisé. Jusqu'à 70°C, la température a augmenté de façon relativement linéaire. Après 32 minutes, la température de l'eau s'est stabilisée à environ 83°C. Nous n'avons donc pas atteint le point d'ébullition. Nous voyons deux raisons pour expliquer ceci. D'abord, un léger vent froid refroidissait considérablement la casserole (perte par convection forcée, voir **page 13**). Nous supposons donc que le flux de chaleur provenant du soleil ne parvenait plus vraiment à compenser cette perte que nous ne soupçonnions pas si importante. Ensuite, la forme du miroir n'étant pas parfaite, il se forme sur le plan focal une tâche plus grande que notre petite casserole patinée. Nous perdons ainsi une proportion non négligeable de l'énergie concentrée.

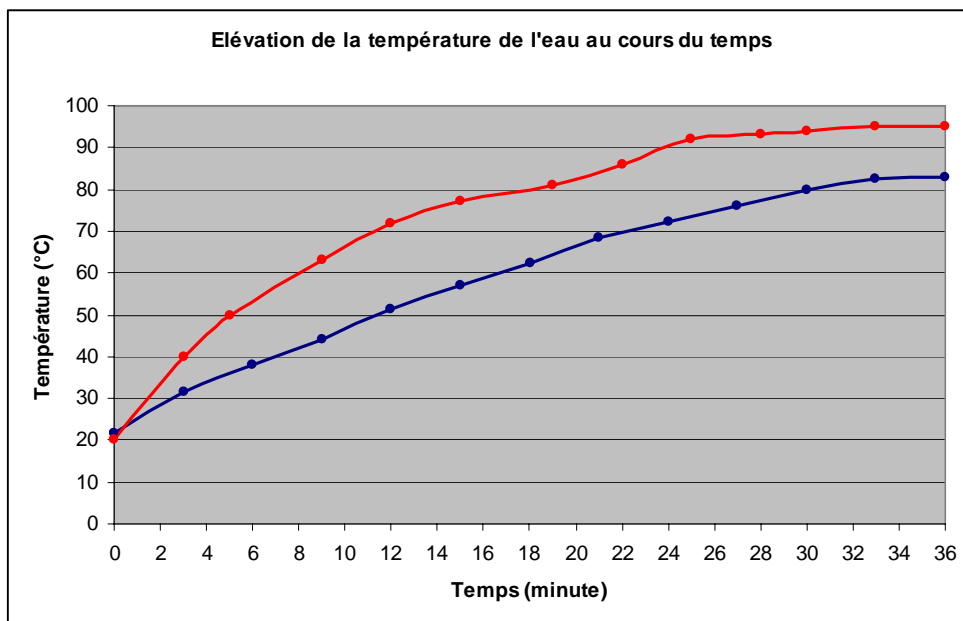


Figure 36 : Élévation de la température de l'eau au cours du temps. En bleu, 50 cl d'eau contenue dans une casserole en cuivre patinée de 15 cm de diamètre. En rouge, 50 cl d'eau contenue dans une casserole de cuisine peinte en noire de 30 cm de diamètre

C'est pour cette dernière raison que nous avons fait un deuxième essai le lendemain avec une casserole de cuisine nettement plus grande (diamètre double de la casserole patinée). Nous l'avons peinte en noire et fait chauffer dedans un demi litre d'eau (**Figure 37**). L'élévation de la température au cours du temps est représentée sur le même graphique (**Figure 36, p.33**) par la courbe rouge. Au bout de seulement 25 minutes, nous avons atteint une température supérieure à 90°C, température qui s'est finalement stabilisée à 95°C. Ainsi, avec une casserole plus grande, donc captant plus de rayons, nous avons obtenu un résultat nettement meilleur. De plus, ce jour là, il n'y avait pratiquement pas de vent. Le temps d'ébullition est sans surprise supérieur à celui que nous avons déterminé théoriquement car l'effet du vent avait été négligé.

Certaines améliorations sont possibles pour diminuer la durée d'ébullition :

- Pour améliorer la convergence des rayons, nous devrions améliorer la forme de notre miroir afin qu'il approche davantage un paraboloïde. Avec les moyens dont nous disposons, nous ne pensons pas pouvoir le faire.
- Une casserole en cuivre patinée plus grande permettrait de capter le maximum de rayons et donc d'énergie. Nous n'aurons malheureusement pas le temps de trouver – et d'acheter – une grande casserole en cuivre, et de la patiner pour le Printemps des Sciences. Nous utiliserons cependant la grande casserole de cuisine.
- Un paravent correctement mis protégerait la casserole du vent responsable d'une grande partie des pertes.
- Une isolation avec de la laine minérale du couvercle et du côté de la casserole non éclairé permettrait de conserver la chaleur. Pour le Printemps des Sciences, nous mettrons cet isolant.

En conclusion, même si pour l'instant nous n'avons pas atteint le point d'ébullition (mais cependant une température suffisante pour faire du thé), nous nous en approchons grâce à notre four solaire en un temps tout à fait raisonnable.



Figure 37 : Chauffage de 50 cl d'eau grâce à l'énergie solaire

CONCLUSION

Bien que nous ayons choisi le sujet de notre projet – la construction d’un four solaire, nous nous demandions au début de l’année comment nous pourrions faire pour le mener à bien. Finalement, étape par étape, nous avons pu progresser jusqu’à pouvoir faire chauffer de l’eau grâce à notre four solaire.

Après avoir défini un cahier des charges pour ce projet, nous sommes passés à l’étude théorique du problème. Nous nous sommes ainsi familiarisés avec les propriétés de réflexion d’un miroir parabolique, les caractéristiques du rayonnement solaire et les différents transferts de chaleur qui se passent au niveau de la casserole.

Après l’étude théorique, nous nous sommes intéressés à l’étude pratique du problème, à savoir l’élaboration et l’optimisation d’un four solaire. Nous avons choisi, sur base des recherches théoriques et des résultats trouvés grâce à Matlab, les caractéristiques du miroir parabolique (dimensions et matériau) et déterminé une méthode pour le construire. Nous avons ensuite pu calculer le temps d’ébullition de l’eau en tenant compte des différentes pertes thermiques et avons cherché à améliorer ce temps en trouvant une solution pour isoler la casserole. Nous avons également réalisé un plan d’une monture destinée à supporter le miroir parabolique et à permettre de l’orienter vers le soleil.

Il nous restait à mettre en œuvre notre étude pratique. La construction du four solaire s’est déroulé assez rapidement et sans incident. Une fois achevée, le four solaire a été testé. Nous avons vu que nous pouvions faire chauffer de l’eau relativement rapidement, et ce en utilisant exclusivement l’énergie gratuite du soleil.

Le couronnement de notre projet d’année sera la présentation et la démonstration de notre four solaire au Printemps des Sciences en mars 2007. Nous tenterons d’y expliquer le plus simplement possible le fonctionnement d’un four solaire et la démarche qui nous a permis d’en construire un.

Grâce à ce projet, nous avons pu développé des qualités dont un ingénieur civil a besoin dans son métier. Tout d’abord, la capacité d’analyser un problème et d’en rechercher les causes et les solutions optimales. Ensuite, l’aptitude à travailler en équipe, ce qui nécessite une implication de tous les membres, un respect de l’autre et de ses idées, ainsi qu’une bonne organisation.

Après ces six mois passés ensemble, nous sommes devenus un groupe soudé dans lequel chacun s’est impliqué pour la bonne marche du projet. Nous pouvons dire que le projet d’année nous a préparé à notre futur métier d’ingénieur.

Nous tenons maintenant à remercier tout d’abord notre superviseur, Pascal Kockaert, qui nous a accompagné dans notre projet et conseillé durant toute cette année. Nous remercions également Pierre-Alexis Douxchamps (assistant dans le service d’Aéro-Thermo Mécanique de l’ULB) pour sa précieuse aide dans le domaine des transferts de chaleur, Freddy Clavie (technicien dans le service d’Optique et Acoustique de l’ULB) qui a accepté de découper nos plaques d’aluminium, ainsi que Joseph Guillaume (chef de travaux à l’Institut Supérieur Industriel de Bruxelles) pour ses conseils pratiques sur le four solaire.

BIBLIOGRAPHIE

Livres

- [1] BIANCHI Ana-Maria, Yves FAUTRELLE, Jacqueline ETAY. sd. *Transferts thermiques*. Agence Universitaire de la Francophonie. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- [2] BUCHLIN Jean-Marie, Bernard LEDUC. 2006. *Phénomènes de transport*. Cours dispensé en 3^{ème} année de Bachelier de la Faculté des Sciences Appliquées – Service d'aéro-thermo-mécanique – Université Libre de Bruxelles. Bruxelles. Presses Universitaires de Bruxelles.
- [3] KUTATELADZE S.S. 1963. *Fundamentals of Heat Transfer*. Second edition. Londres: Edward Arnold (Publishers) Ltd.
- [4] MÖLLER Karl Dieter. 1988. *Optics*. Mill Valley (California) : University Science Book. 644p.
- [5] MOUROULIS Pantazis, John Mac DONALD. 1997. *Geometrical Optics and Optical Design*. New York: Oxford University Press. 354p.
- [6] Optical Society of America. 1995. *Handbook of Optics: Fundamentals, Techniques & Design (volume I)*. Second edition. New York: Mac Graw-Hill. (p42.102-110).
- [7] _____. 1995. *Handbook of Optics: Devices, Measurements & Properties (volume II)*. Second edition. New York: Mac Graw-Hill. (p35.28-40).
- [8] ROY Maurice. 1964. *Thermodynamique macroscopique, notions fondamentales*. Sciences de l'ingénieur. Paris: Dunod. 154p.

Sources tirées d'Internet

- [9] BROUSSE Benoît. 2004. « Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique ». <http://www.unilim.fr/theses/2004/sciences/2004limo0042/brousse_b.pdf#search=%22%22indice%20de%20r%C3%A9flexion%22%20aluminium%22>. Faculté de Sciences et Technique. Université de Limoges. Site Web sur INTERNET. (p33-38). Dernière consultation : le 10-10-2006.
- [10] Centre d'Enseignement Supérieur et d'Initiation à la Recherche par l'Expérimental. Unité de Formation et de Recherche en Physique. Université Joseph Fourier de Grenoble. Mise à jour : le 16 février 2006. *Transfert de chaleur*. Site Web sur INTERNET. <<http://web.ujfgrenoble.fr/PHY/intra/Organisation/CESIRE/TTE/installees/TransfertChaleur.pdf>>. Dernière consultation : le 17 octobre 2006.

- [11] Cyberscol. Regard sur la Physique. Mise à jour : le 24-04-2002. *La réflexion*. Site Web sur INTERNET. <http://galileo.cyberscol.qc.ca/optique/chap2html/6_mircourbes3.html>. Dernière consultation : le 09-11-2006.
- [12] DANIEL Vincent. *Le rayonnement thermique et la loi du corps noir*. Laboratoire de Météorologie Dynamique. Université Pierre & Marie Curie (Jussieu – Paris). Site Web sur INTERNET. <http://www.enslyon.fr/PlanetTerre/Infosciences/Climats/Rayonnement/Cours/partie1/partie1_2.html>. Dernière consultation : le 11-11-2006.
- [13] DUFRESNE Jean-Louis. Mise à jour : le 15-09-2001. *L'effet de serre : rayonnement solaire et rayonnement tellurique*. Laboratoire de Météorologie Dynamique. Université Pierre & Marie Curie (Jussieu – Paris). Site Web sur INTERNET. <<http://www.enslyon.fr/PlanetTerre/Infosciences/Climats/Rayonnement/Effetserre/effetserrehtml>>. Dernière consultation : le 10-10-2006.
- [13 bis] F4BUC. Mise à jour : 12-11-2006. *Réalisation d'une parabole géodésique de 90 cm*. Site Web sur INTERNET. <http://f4buc.chez-alice.fr/parabole_90cm.htm>. Dernière consultation : le 10-12-2006.
- [14] Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne (Suisse). Mise à jour : le 17-03-2004. *Phénomène des transports : la conductivité thermique (Chapitre 7)*. Site Web sur INTERNET. <http://mxsg3.epfl.ch/ltp/Cours/Ph_trans_chapitre_7.pdf>. Dernière consultation : le 25-11-2006.
- [15] GUENA Geoffroy. Mise à jour : le 22-02-2006. *Propriétés physiques de quelques fluides*. Université Pierre & Marie Curie (Jussieu – Paris). Site Web sur INTERNET. <<http://www.edp6.jussieu.fr/etudiants/guena/Documents.dir/Annexe.pdf>>. Dernière consultation : le 03-12-2006.
- [16] Institut de Recherche en Construction. *Gains de chaleur au travers des fenêtres et des parements vitrés*. Site Web sur INTERNET. <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/cbd039_f.html>. Dernière consultation : le 03-12-2006.
- [17] LAFRENIERE Gabriel. Mise à jour : le 04-05-2004. *La matière est faite d'onde : la tache d'Airy*. Site Web sur INTERNET. <<http://www.glafreniere.com/optique/airy.htm>>. Dernière consultation : le 09-11-2006.
- [18] LECHIEN Matt. Mise à jour : le 04-05-2005. *Fabriquer une parabole solaire en carton*. Site Web sur INTERNET. <<http://www.surrealiste.org/modules/wiwimod/index.php?page=Parabole+carton&op=history>>. Dernière consultation : le 11-10-2006.
- [19] Météo France. Mise à jour : 2003. *Le rayonnement solaire*. Site Web sur INTERNET. <<http://www.meteofrance.com/FR/sante/rayonnement.jsp>>. Dernière consultation : le 10-10-2006.

- [20] Outils Pédagogiques Utiles en Sciences. Faculté des sciences et de génie. Université de Laval (Canada). Mise à jour : le 19-08-2003. *La réflexion*. Site Web sur INTERNET. <<http://www2.fsg.ulaval.ca/opus/physique534/resumes/12a.shtml>>. Dernière consultation: le 09-11-2006.
- [21] PERRIN Ludovic, Francis MICHELI, Philippe REULET, Pierre MILLAN. *Caractérisation dynamique d'un écoulement de convection naturelle en espace confiné par LDV et PIV*. 10^{ème} Congrès Francophone de Techniques Laser (Toulouse – 19-22 septembre 2006). Site Web sur INTERNET. <<http://www.cert.fr/colloques/cftl2006/programmeCFTL2006/session6/S6-P1-Perrin.pdf>>. Dernière consultation : le 03-12-2006.
- [22] RICCHIAZZI Paul, Shiren YANG, Catherine GAUTIER. *SBDART: A Practical Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere*. Earth Space Research Group. Site Web sur INTERNET. <<http://www.crseo.ucsb.edu/esrg/sbdart/>>. Dernière consultation : le 03-12-2006.
- [23] ROUX Philippe. Mise à jour : le 09-11-2006. *Cours de thermique*. Site Web sur INTERNET. <<http://rouxphi3.perso.cegetel.net/Resourses/Cours%20thermique.pdf>>. Dernière consultation : le 25-11-2006.
- [24] RIVOIRE Bruno. *Le solaire thermodynamique*. Site Web sur INTERNET. <http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie/websfp/rivoire.htm>. Dernière consultation : le 11-10-2006.
- [25] SAINT-BLANQUET Claude. Mise à jour : le 31-05-2006. *Loi de Fourier : équation de conduction de la chaleur*. Département de Physique. Université de Nantes. Site Web sur INTERNET. <<http://www.sciences.univnantes.fr/physique/perso/blanquet/conducti/11intro/11intro.htm>>. Dernière consultation : le 25-11-2006.
- [26] Sciences & Techniques. *Notions de transfert thermique par convection*. Site Web sur INTERNET. <http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/notions_de_transfert_thermique_par_shy_convection/A1540_08_1990>. Dernière consultation : le 03-12-2006.
- [27] Techno-Science.net. Mise à jour : 08-11-2006. *Miroir*. Site Web sur INTERNET. <<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=2985>>. Dernière consultation : le 09-11-2006.
- [28] VANDEWALLE Nicolas. *Thermodynamique : Equation de la chaleur*. Group for Research and Applications in Statistical Physics. Université de Liège. Site Web sur INTERNET. <<http://www.grasp.ulg.ac.be/cours/2cm/thermo13.pdf>>. Dernière consultation : le 25-11-2006.
- [29] Wikipédia. Mise à jour : le 04-10-2006. *Le rayonnement électromagnétique*. Site Web sur INTERNET. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_électromagnétique>. Dernière consultation : le 10-10-2006.

- [30] _____. Mise à jour : 01-11-2006. *Focalisation (Optique)*. Site Web sur INTERNET. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Focalisation_%28optique%29>. Dernière consultation : le 09-11-2006.
- [31] _____. Mise à jour : 18-11-2006. *Conduction thermique*. Site Web sur INTERNET. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique>. Dernière consultation : le 25-11-2006.
- [32] _____. Mise à jour : 13-11-2006. *Four solaire d'Odeillo*. Site Web sur INTERNET. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique>. Dernière consultation : le 09-12-2006.
- [33] ZIMMERMANN L. *La tache d'Airy*. Computer Algebra Division. Université Libre de Bruxelles. Site Web sur INTERNET. <<http://cso.ulb.ac.be/~jlcolot/udep/jlc/Documents/Zimmermann/Zimmermann150601/Airy1.pdf>>. Dernière consultation : le 09-11-2006.

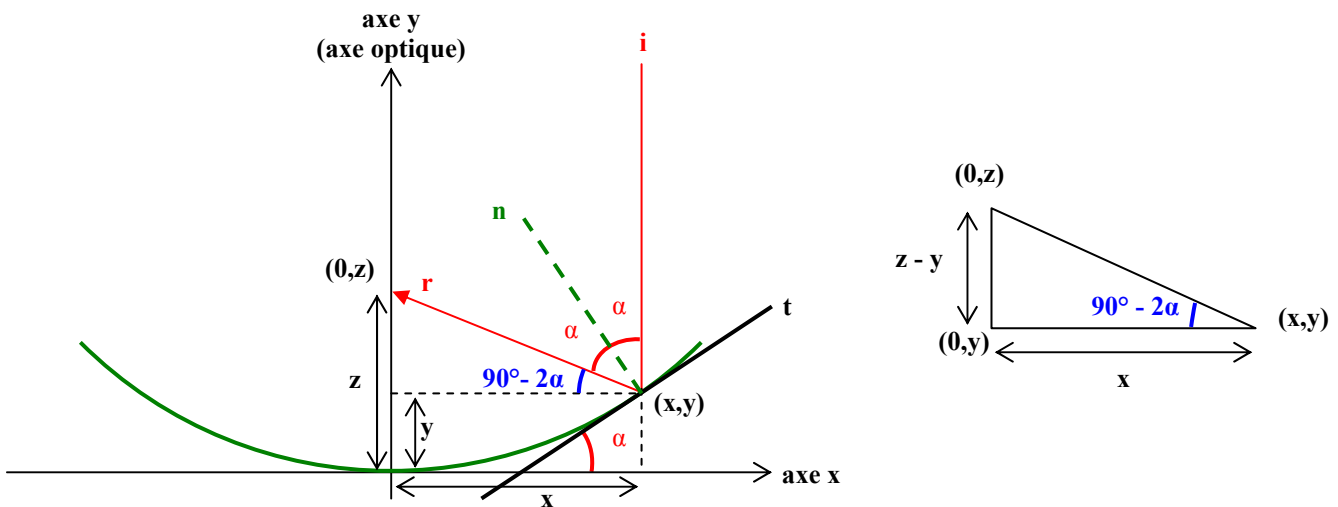
Ressources extérieures

- DOUXCHAMPS Pierre-Alexis. Assistant du service d'Aéro-Thermo-Mécanique de l'Université Libre de Bruxelles (ULB).
- GUILLAUME Joseph. Chef de travaux à l'Institut Supérieur Industriel de Bruxelles (ISIB).

ANNEXES

1 Démonstration de la convergence d'un miroir parabolique

Soit une parabole d'équation $2py = x^2$. Nous nous limitons donc à deux dimensions, sachant bien que les propriétés d'un parabolôïde de révolution sont les mêmes que celles de sa génératrice.



Soit un rayon incident i , parallèle à l'axe y , qui touche la parabole au point (x, y) .

Par définition, la tangente t au point (x, y) fait avec l'axe x un angle α donné par la relation :
 $\tan \alpha = f'(x) = x/p$

Traçons la normale n , perpendiculaire à t et passant par (x, y) . On peut observer que l'axe x est perpendiculaire à i , t est perpendiculaire à n et que l'angle entre t et x est α . Donc, l'angle incident (entre la normale n et le rayon incident i) est égal à α .

Traçons maintenant le rayon réfléchi r qui fait un angle α avec la normale et qui coupe l'axe optique au point $(0, z)$. Il faut maintenant déterminer z , considérant que si les rayons réfléchis convergent, ils convergeront, par symétrie, sur l'axe optique de la parabole.

Le rayon réfléchi forme avec l'axe x un angle (aigu) de $90^\circ - 2\alpha$. Considérons le triangle rectangle dont les sommets sont les points de coordonnées (x, y) , $(0, y)$ et $(0, z)$.

On a :

$$\tan(90^\circ - 2\alpha) = \frac{z - y}{x}$$

$$\Leftrightarrow z - y = \frac{x}{\tan(2\alpha)} = \frac{1 - \tan^2 \alpha}{2 \tan \alpha} x \quad \text{où } \tan \alpha = \frac{x}{p}$$

$$\Leftrightarrow z = y + \frac{1 - \left(\frac{x}{p}\right)^2}{2\left(\frac{x}{p}\right)} x = y + \frac{p}{2} \left(1 - \frac{x^2}{p^2}\right) \quad \text{où } y = \frac{1}{2p} x^2 \text{ (} y \in \text{parabole d'équation } 2py = x^2 \text{)}$$

$$\Leftrightarrow z = \frac{p}{2}$$

Les rayons réfléchis coupent donc l'axe optique au point $(0, p/2)$. Ce point ne dépend pas du point d'impact (x, y) du rayon incident sur la parabole : il est donc valable pour tous les rayons incidents parallèles à l'axe optique qui convergent ainsi en un point, le foyer, correspondant au foyer géométrique de la parabole.

2 Programmes Matlab

2.1 Hauteur du soleil dans le ciel

% Calcul de la hauteur dans le ciel en fonction de la latitude, de la date
% et de l'heure

```
function Hauteur_soleil=soleil(Latitude,Jour,Heure)
```

```
L=Latitude*(pi/180); % Latitude du lieu exprimé en radian  
AH=(Heure-12)*(pi/12); % Angle horaire  
d=0.398*sin(2*pi*(Jour-82+2*sin(2*pi*(Jour-2)/365))/365); % Déclinaison
```

```
H=asin((cos(L)*cos(d)*cos(AH))+sin(d)*sin(L)); % Hauteur du soleil en radian  
Hauteur_soleil=H*(180/pi); % Hauteur du soleil en degré
```

2.2 Modélisation de la réflexion des rayons du soleil sur une parabole parfaite

% Modélisation de la réflexion des rayons du soleil sur une parabole parfaite.

```
clear;clc
```

```
% Paramètres
```

```
Diametre=1.5; % Diamètre de la parabole (en m)  
p=3; % Paramètre de la parabole ( $2py=x^2$ )  
adeg=13; % Angle (en degré) entre les rayons incidents du soleil et l'axe de la parabole  
a=adeg*(pi/180); % Pour avoir l'angle en radian  
d=0.15; % Diamètre de la casserole (en m)  
h=0.1; % Hauteur de la casserole (en m)
```

```
Focale=p/2; % Distance focale de la parabole  
Profondeur=(1/(2*p))*((Diametre/2).^2); % Profondeur de la parabole  
Surface_captée_sans_casserole=pi*(Diametre/2)^2;  
Surface_captée_avec_casserole=(pi*(Diametre/2)^2)-(pi*(d/2)^2);
```

```
% Tracé de la parabole, de son axe et de son foyer
```

```
x=-Diametre/2:0.01:Diametre/2;  
y=(1/(2*p))*(x.^2);  
plot(x,y)  
grid on  
hold on  
axis equal  
axis([-0.8 0.8 -0.1 2])
```

```
% Tracé des rayons
```

```
j=1;  
for x2=-Diametre/2:0.05:Diametre/2  
    % Rayons incidents  
    y2=(1/(2*p))*(x2.^2);  
    y1=p/2;  
    x1=x2+(abs(y1-y2))*tan(a);  
    X1=[x2 x1];  
    Y1=[y2 y1];  
    plot(X1,Y1,'y')
```

```

% Rayons réfléchis
b=atan(x2/p); % angle entre la tangente en un point de la parabole et l'axe x
i=a+b; % angle incident
r=-i; % angle réfléchi
aprim=r-b; % angle entre les rayons réfléchis du soleil et l'axe de la parabole
y3=p/2;
x3=x2+(y3-y2)*tan(aprim);

XX(j)=x3;
j=j+1;

X2=[x2 x3];
Y2=[y2 y3];
plot(X2,Y2,'r')
end

% Tracé de l'axe optique du foyer et du plan focal
plot(0,p/2,'o') % Foyer
plot([0 0],[0 p/2+0.2],'k') % Axe de la parabole
plot([-Diametre/2 Diametre/2],[p/2 p/2],'k-') % Plan focal

% Tracé de la "casserole"
m=(max(XX')+min(XX'))/2;
plot([-d/2+m d/2+m],[p/2 p/2],'co-')
plot([-d/2+m -d/2+m],[p/2 p/2+h],'co-')
plot([d/2+m d/2+m],[p/2 p/2+h],'co-')

% Calcul du diamètre de la tache d'Airy
lambda=1000*10^(-9); % longueur d'onde moyenne de l'infrarouge
Diametre_Airy=2.44*lambda*Focale/Diametre;

% Calcul du diamètre du foyer (tache sur le plan focal)
Diametre_foyer=abs(max(XX')-min(XX'));

% Affichage des paramètres
Diametre_parabole=Diametre
Distance_focale=Focale
Diametre_casserole=d
Diametre_foyer
Distance_casserole_axe=m
Diametre_Airy
Surface_captee_sans_casserole
Surface_captee_avec_casserole

% gtext('Plan focal')
% gtext('Axe optique')
% gtext('Foyer')

```


2.3 Calcul du temps d'ébullition

```
% Données
m=1;           % Masse d'eau à chauffer
T0=293;       % Température initiale de l'eau
T=373;        % Température d'ébullition de l'eau
Tair=293;     % Température ambiante
D=1.5;        % Diamètre de la parabole
d=0.15;       % Diamètre de la casserole
hauteur=0.065; % Hauteur de la casserole
F=425;        % Flux arrivant à Ixelles
r=0.9;        % Coefficient de réflexion de l'aluminium
Cp=4186;      % Capacité calorifique de l'eau
h=10;         % Coefficient d'échange de l'air
alpha=1;      % Absorptivité de la casserole en cuivre
eps=alpha;    % Emmissivité de la casserole
sigma=5.6696e-8; % Constante de Boltzmann

% Calcul des surfaces
Sp=pi*(D/2)^2; % Ouverture de la parabole
s=pi*(d/2)^2; % Surface du fond de la casserole
S=pi*(d/2)^2+pi*d*hauteur; % Surface totale de la casserole

% Calcul de la puissance arrivant sur la casserole
P=F*r*(Sp-s);

% Calcul de la puissance absorbé par la casserole (Pabs)
Pabs=alpha*P;

% Calcul du temps d'ébullition
% Sans pertes thermiques
t=m*Cp*(T-T0)*Pabs.^(-1);
Temps_sans_pertes=t/60

% Avec pertes thermiques
A=m*Cp;
B=-eps*sigma*S;
C=-h*S;
DD=Pabs+h*S*Tair;

t0=0;         % temps initial
tf=1000;     % temps final
N=1000;

% Sans isolant
Temps_Temperature=euler(@fex1,t0,tf,T0,N); % Fonction qui calcule l'équation différentielle

% Avec isolant
Temps_Temperature_isolant=euler(@fex2,t0,tf,T0,N);

% Représentations graphiques
figure(1); hold on; grid on
plot([0 tf],[100 100], 'r')
plot(Temps_Temperature(:,1),(Temps_Temperature(:,1)*Pabs/(m*Cp))+T0-273, 'g-')
plot(Temps_Temperature_isolant(:,1),Temps_Temperature_isolant(:,2)-273, 'm-')
plot(Temps_Temperature(:,1),Temps_Temperature(:,2)-273, 'b-')
axis([0 tf 0 140])
xlabel('Temps (secondes)'); ylabel('Température (°C)')
title('Élévation de la température de l'eau au cours du temps')
```

3 Liste du matériel

Objet	Quantité	Matière	Dimension	Acheté à	Prix
Crochet S	1 sachet	laiton	26mm	Brico Boondael	0.89
Ecrou hexagonal	1 sachet	métal	M 10	Brico Boondael	1.25
Vis à bois	2 sachets	métal	L=30mm	Brico Boondael	2.50
Connecteur plat	4	métal	100×35×3mm	Brico Boondael	1.80
Chaîne	1	métal	3m	Brico Boondael	4.48
Casserole	1	cuivre	D=15cm / H=7.5cm	Troc International	5.00
Tige filetée + écrou	2	métal	M 10 / L=200mm	Brico Boondael	2.85
Perche	4	sapin raboté	34×34×1800mm	Brico Boondael	13.20
Perche	1	sapin raboté	18×36×1800mm	Brico Boondael	1.76
Equerre plate	4	métal galvanisé	70mm	Brico Boondael	0.80
Crochet d'armoire	1 sachet	laiton		Brico Boondael	1.40
Tige filetée + écrou	2	métal	M6 / L=200mm	Brico Boondael	2.60
Pointe ardoise	1 sachet	métal		Brico Boondael	1.40
Tôle	2	aluminium	1×2m / épaisseur=0.5mm	via le Service d'Optique et Acoustique	36.00
Profil plat	1	aluminium brut	2×25×1000mm	Brico (Auderghem)	3.29
Boulon à tête fraisée	30	métal		Brico Boondael	4.47
Profil plat	5	aluminium brut	2×25×1000mm	Mathurin	23.10
Profil plat	8	aluminium brut	2×20×1000mm		
Vis à bois	10	métal		Brico (Kraainem)	3.78
Boulon	10	métal		Brico (Kraainem)	4.95
Boulon	2	métal		Brico (Kraainem)	1.79
Boulon hexagonal	6	métal		Brico (Kraainem)	4.95
Chaîne nouée		métal		Brico (Kraainem)	2.99
Perche	2	bois brut		Brico (Kraainem)	3.72
Perche	1	bois raboté	L=180cm	Brico (Kraainem)	3.26
Console renforcée	2	métal galvanisé		Brico (Kraainem)	7.18
Roulette	4			Brico (Kraainem)	13.20
				TOTAL	152.61 €