

RECHOU Léopold

TOUCHARD Léo

TANGHE Maxime

Solar Cooker BISS



25/01/2014 – Fondation Dar Bellarj – Marrakech - Médina

Comment optimiser la température intérieure du four solaire type «boîte» ?

Lycée Jacques de Vaucanson

1, rue Védrines

37100 TOURS

Sommaire

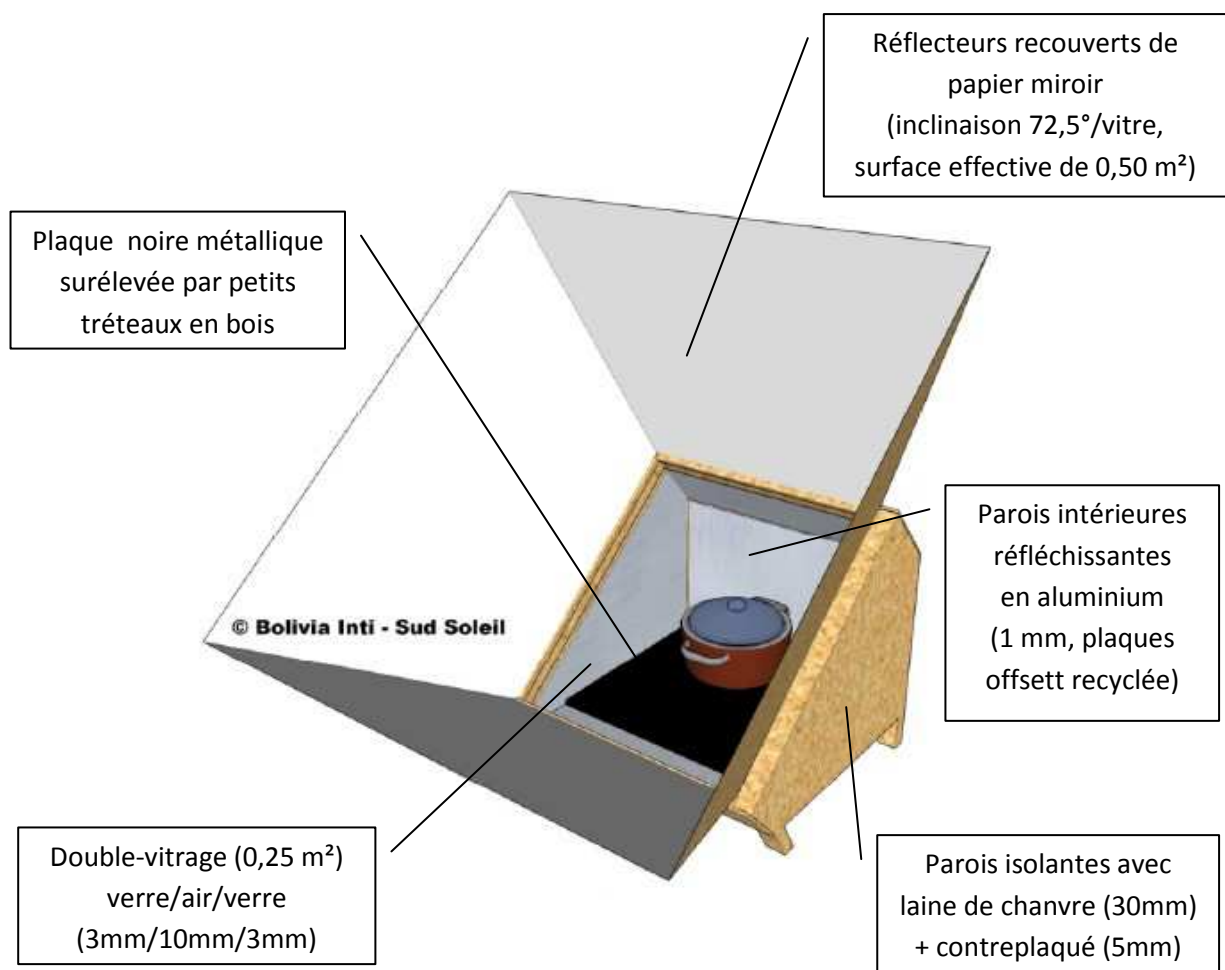
Introduction	3
A. Comment récupérer un maximum d'énergie solaire ?	4
1) L'inclinaison du four ou des vitres	4
a) Position du Soleil	4
b) Réfraction de la lumière	5
2) Comment les réflecteurs permettent-ils d'optimiser l'énergie solaire récupérée ?	8
a) L'intérêt des réflecteurs	8
b) L'inclinaison des réflecteurs	8
c) Les matériaux des réflecteurs	9
3) Le double-vitrage n'est-il pas un obstacle à l'entrée de la lumière ?	9
B. Comment minimiser les pertes d'énergie ?	10
1) Limite des pertes par convection	10
2) Limite des pertes par rayonnement	10
a) La vitre et l'effet de serre	10
b) Les parois en aluminium pour réfléchir	11
c) La plaque noire qui absorbe les rayons solaires	11
3) Limite des pertes par conduction	12
a) Le double vitrage	12
b) Les tréteaux pour surélever	13
c) Les parois en laine de chanvre	14
d) Résistance thermique du four	14
4) Bilan : Rendement du four solaire BISS	16
C. Comment améliorer les performances du modèle BISS ?	17
1) Comment faire entrer plus de lumière dans le four ?	17
a) Taille des réflecteurs	17
b) Forme des réflecteurs	18
c) Récupération de lumière par le bas du four	19
2) Comment limiter les pertes d'énergie vers l'extérieur ?	21
a) Comment limiter les pertes de lumière par réflexion vers l'extérieur ?	21
b) Comment limiter les pertes de chaleur par convection ?	22
c) Comment limiter les pertes de chaleur par conduction ?	22
Conclusion	23
Remerciements	23
Sitographie	23
Annexe 1 : Comment suivre simplement la course du Soleil ?	24
Annexe 2 : Adaptation à la distillation ?	26
Annexe 3 : Adaptation au séchage des aliments ?	27
Annexe 4 : Article journal	28

Introduction

A l'heure où les économies d'énergie mais aussi les problèmes liés à l'écologie sont importants, l'utilisation du four solaire semble un bon compromis dans les pays ensoleillés et en voie de développement. Nous avons décidé de ne pas construire notre propre four solaire car les réflexions autour de ce dispositif ne manquent pas. En effet, nous avons décidé de nous pencher sur les caractéristiques particulières du modèle BISS (Bolivia Inti Sud Soleil) développé par Bolivia Inti, association avec laquelle le lycée a travaillé dans le cadre de l'échange franco-marocain.

Ainsi à travers notre TPE, nous avons décidé de répondre à la problématique suivante : comment optimiser la température atteinte à l'intérieur du four ?

Dans une première partie nous verrons comment le four a été construit pour optimiser l'énergie solaire récupérée pour réchauffer son intérieur. Puis nous verrons quels sont les moyens qui ont été mis en œuvre pour limiter les pertes vers l'extérieur une fois cette énergie captée. Nous nous pencherons enfin sur quelques améliorations possibles pour optimiser son utilisation dans des pays moins ensoleillés comme la France tout en ne perdant pas de vue que ce four a été construit pour des pays en voie de développement, donc son coût et son entretien doivent rester raisonnables.

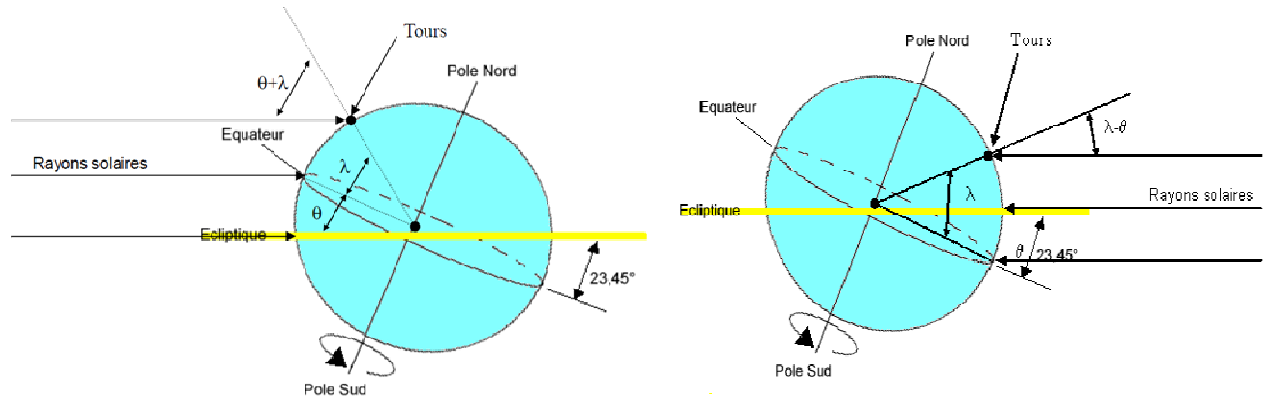


A – Comment récupérer un maximum d'énergie solaire ?

1) L'inclinaison du four ou des vitres

a) Position du Soleil

A première vue, le four possède une certaine inclinaison. Dans un premier temps, cette inclinaison peut sembler logique car le Soleil n'est pas toujours à la même hauteur dans le ciel selon les moments de la journée mais aussi selon la latitude du lieu où nous nous trouvons, ou encore du jour de l'année. C'est ainsi qu'à Tours, le 21 décembre, le Soleil monte au maximum à $19,1^\circ$ par rapport à l'horizon, alors qu'il atteint au maximum $60,1^\circ$ le 21 juin, valeurs que nous avons voulues retrouver grâce aux schémas ci-dessous :



a) solstice d'hiver (21 décembre) puis b) au solstice d'été (21 juin) à 12h GMT à Tours

Dans la même logique, nous pouvons également noter que selon l'heure, et le jour de l'année, les rayons du Soleil auront une inclinaison bien différente. Pour illustrer cela, nous pouvons observer le graphique ci-contre.

Ainsi nous pouvons observer que l'inclinaison du Soleil change selon le mois et le jour de l'année. En juin elle sera plus importante qu'en novembre par exemple. Il serait donc impératif de connaître l'inclinaison propice au moment de la journée afin d'orienter la vitre du four solaire.

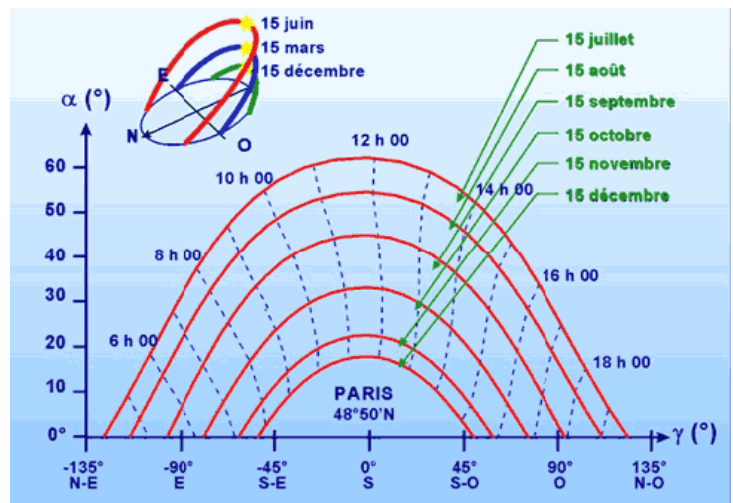


Schéma de la hauteur du Soleil en fonction de l'heure et du jour

Nous avons donc voulu réaliser une première expérience pour voir si l'inclinaison de la vitre avait une réelle importance dans la température maximale atteinte à l'intérieur du four.

Expérience et hypothèse n°1 : Nous avons dans un premier temps vérifié que les deux fours dont nous disposons atteignent des températures voisines dans des conditions identiques, à savoir même orientation par rapport au Soleil, que ce soit dans le plan horizontal que vertical, et avec des réflecteurs identiques pour chacun.

Protocole : Nous avons donc commencé par les placer côte à côte, puis nous les avons orientés de la même façon dans le plan horizontal grâce à leur ombre portée au sol. Nous avons enfin vérifié l'inclinaison de leur vitre, soit $42,5^\circ$ par rapport à la verticale, ou $47,5^\circ$ par rapport à l'horizontale.

Mesures : Réalisées avec thermomètre à alcool
Température extérieur : 21°C

t (en min)	$\theta(^{\circ}\text{C})$ Four n°1	$\theta(^{\circ}\text{C})$ Four n°2
0	50	63
8	71	79
18	84	86
30	97	95
40	102	99
48	105	100
54	105	100

Interprétation/conclusion : En observant les résultats, nous pouvons constater que le four n°1 atteint une température supérieure de 5°C. Cette différence est probablement due à un défaut d'isolation, c'est-à-dire des pertes plus importantes sur le numéro 1 que sur le 2. Par la suite, nous avons donc toléré un écart maximal de 5° C lors de nos mesures.

Expérience et hypothèse n°2 : L'inclinaison du four, du moins de la vitre, a une importance dans la quantité d'énergie qu'il va récupérer et donc la température qu'il va atteindre.

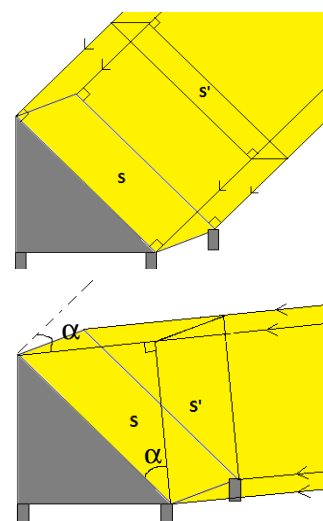
Protocole : Nous avons orienté le four n°1 face au Soleil, c'est-à-dire de telle sorte que les rayons du Soleil arrivent perpendiculairement à la vitre ou parallèlement à un stylet perpendiculaire à la vitre. Après avoir relevé l'angle d'inclinaison de la vitre, nous avons incliné le second avec des cales pour que son inclinaison diffère d'environ 20° par rapport au premier. Nous avons mesuré : $\theta_1 = 58^\circ$ par rapport à la verticale et $\theta_2 = 38^\circ$ par rapport à la verticale à 13h48.

Mesures : thermomètres à alcool et $\theta_{\text{ext}} = 21^\circ\text{C}$

Observations : La différence de température de 20°C atteinte dans les deux fours est très supérieure à 5°C qui est la marge d'erreur que nous nous sommes accordée.

Interprétation/Conclusion: Nous pouvons donc conclure que l'inclinaison a une importance sur la quantité d'énergie solaire que le four va pouvoir récupérer par la suite. Nous nous sommes alors demandé quelle en était la raison ? A première vue comme l'atteste le schéma ci-contre, si les rayons n'arrivent pas à la perpendiculaire sur une surface S de la vitre, la section efficace S' du rayonnement solaire réellement reçu par cette surface diminue. D'après ce schéma $S' = S \cdot \cos\alpha$. Ainsi pour une inclinaison de 20° des rayons par rapport à la normale, la section efficace est 0,94.S, ainsi l'énergie solaire reçue par la surface ne diminue que de 6% ce qui ne permet pas d'expliquer l'écart de température observé de plus de 20°, soit 20% de l'écart de température entre intérieur et extérieur. D'où peut donc venir une telle différence ?

Rayons solaires en incidence normale sur le four et avec un angle α par rapport à la normale



b) Réfraction de la lumière

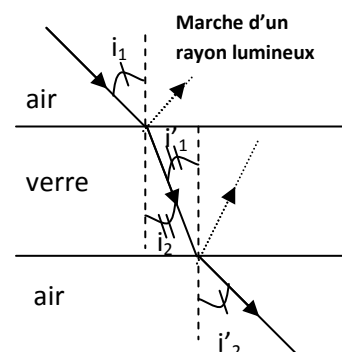
Expérience et hypothèse n°3 : Pour expliquer cette différence, nous avons pensé au phénomène de réflexion totale que nous avons vu en seconde. En effet lorsqu'un rayon arrive sur une surface de séparation entre deux milieux (dioptre) et qu'il passe vers un milieu moins réfringent ($n_2 < n_1$) avec un angle trop important, il peut être totalement réfléchi, et aucun rayon n'est alors réfracté.

Protocole : Avec un laser, nous avons éclairé une vitre en faisant varier son inclinaison.

Observation : Quelque soit l'angle d'incidence du rayon laser, une partie de celui-ci émerge de la vitre.

Interprétation/Conclusion :

Quel que soit l'angle d'incidence des rayons lumineux sur la vitre, ceux-ci peuvent entrer dans le four. En effet, d'après la 2de loi de Snell-Descartes sur la réfraction, $n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$, à l'arrivée, le rayon peut toujours entrer car l'indice du verre est supérieur à celui de l'air, donc le rayon réfracté va se rapprocher de la normale par rapport au rayon incident ($n_{\text{air}} < n_{\text{verre}}$ donc $i_{\text{verre}} < i_{\text{air}}$).



Cependant, à la sortie du rayon, lors du passage verre/air, sachant que n_1 (verre) $>$ n_2 (air), $i_1 < i_2$ autrement dit, comme représenté sur le second schéma 2, le rayon réfracté s'éloigne de la normale. Ainsi, il n'y aura pas de réflexion si i_2 atteint 90° et toute la lumière sera alors réfléchi : on parle du phénomène de réflexion totale.

Dans le cas du passage verre/air, $n_{\text{verre}} = 1,5$, il y a réflexion totale si : $i_1 > i_{1,\text{lim}} = \arcsin(n_2(\text{air})/n_1(\text{verre})) = \arcsin(1/1.5) = \arcsin(0.67)$ soit un angle de 42° .

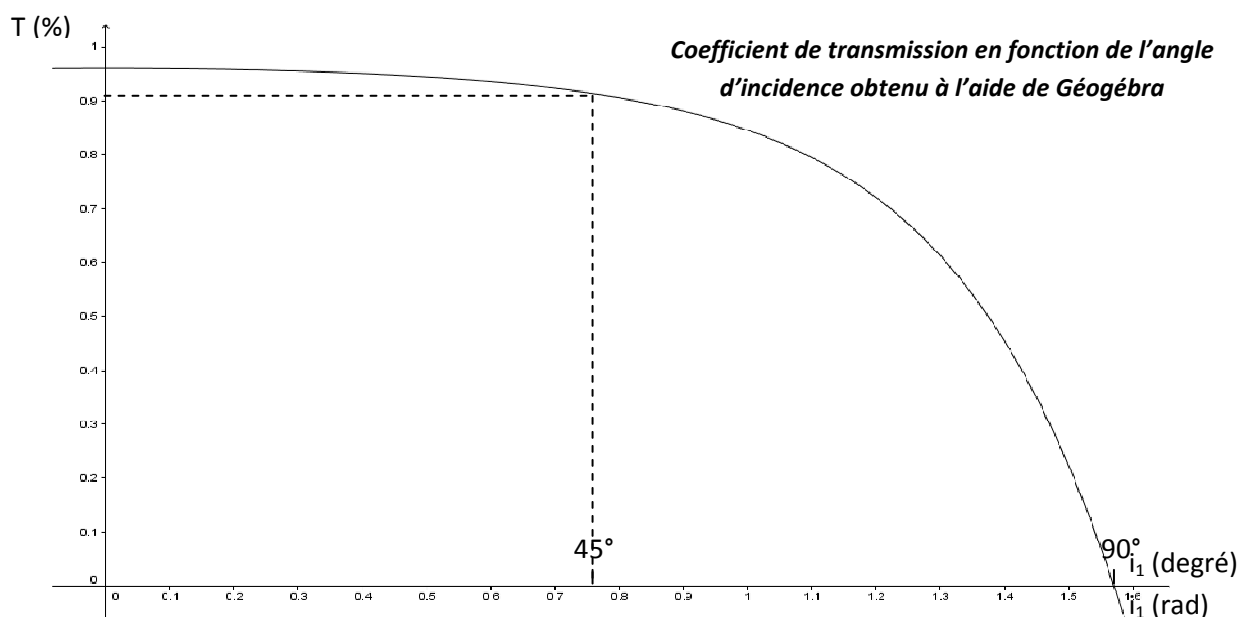
Cependant, comme le rayon est entré en provenance de l'air, cela signifie que i_2 sera inférieur à $41,7^\circ$ d'après la 2de loi de Snell- Descartes, car au maximum $i_1 = 90^\circ$, donc $\sin i_{2,\text{lim}} = n_1/n_2 = 1/1,5$ donc $i_1' = i_2 < 41,7^\circ$.

Ainsi, quel que soit l'angle d'incidence i_1 , sur la vitre, un rayon sera réfracté avec un angle i_2 égale à i_1 . Mais d'où vient alors cette différence ?

Nous avons observé à chaque fois qu'il y avait un rayon réfléchi et que la tache qu'il donnait sur un obstacle était plus ou moins lumineuse. Nous avons découvert que le pourcentage de lumière réfléchi et/ou réfractée dépend de l'angle d'incidence des rayons sur le dioptré. En effet, les pourcentages de lumière réfléchi et transmise ou réfractée sont donnés par les coefficients de Fresnel de réflexion R et de transmission T . Si l'absorption par la vitre est nulle $A=0$, $R+T=1$:

$$R = \left(\frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \right)^2 \quad \text{et} \quad T = 1 - R = 1 - \left(\frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2} \right)^2 \quad \text{avec} \quad i_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin i_1\right)$$

d'après la seconde loi de Snell-Descartes sur la réfraction.



Observation : On constate que tant que l'angle d'incidence est inférieur à 45° , plus de 90% de la lumière est transmise. Ce qui n'est pas cohérent avec nos observations lors de notre expérience 1 pour laquelle nous avons observé qu'avec une incidence de 20° , le four 2 atteignait une température nettement inférieure au four 1 pour lequel nous avons choisi une incidence normale à la vitre soit $i_1 = 0^\circ$. Nous avons voulu confirmer cette observation.

Remarque : Etant donné qu'un rayon rencontre 4 dioptrés dus à la présence du double vitrage, en incidence normale le coefficient de transmission étant la même lors du passage air/verre que verre/air, la transmission globale sera donc $T_{\text{tot}} = T^4 = 0,96^4 = 0,85$. 85 % de l'énergie lumineuse est donc transmise à l'intérieur du four sans compter celle absorbée par la vitre.



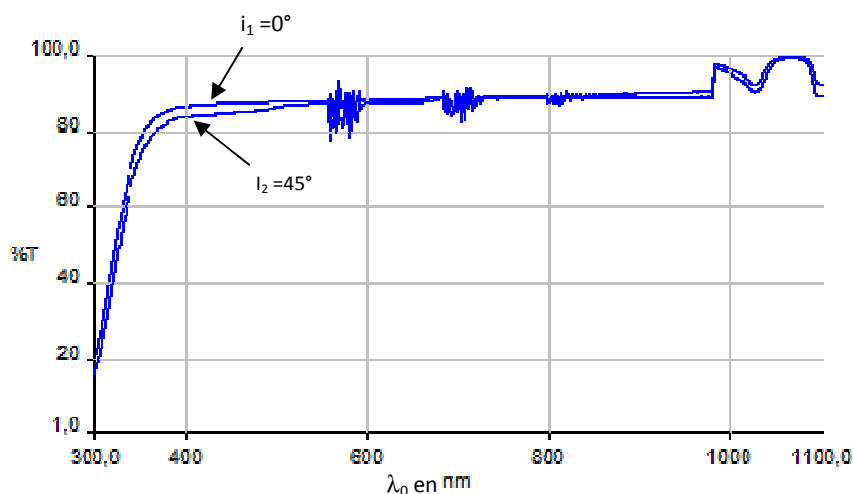
Intérieur du spectrophotomètre avec une vitre à 45°

Expérience et hypothèse n°4 : Au laboratoire d'optique, nous avons voulu confirmer cette hypothèse théorique comme quoi tant que l'angle d'incidence est inférieur à 45° , plus de 90% de la lumière est transmise, ou seulement 10% est réfléchi.

Protocole : A l'aide de socles, nous avons placé dans un spectrophotomètre, en premier lieu, une lame de verre de telle sorte que l'angle d'incidence des rayons lumineux soit de 0° . Nous avons alors mesuré le pourcentage de lumière transmise en fonction de la longueur d'onde dans le vide de la lumière utilisée. Nous avons fait de même avec une inclinaison de 45° .

Mesures :

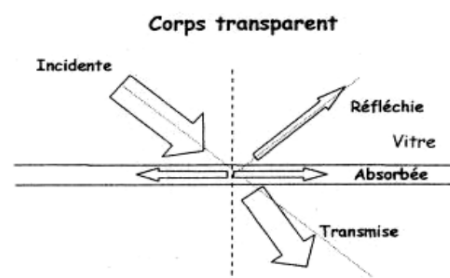
Pourcentage de lumière transmise en fonction de la longueur d'onde



Observations :

- On peut donc noter que le pourcentage de lumière transmise est sensiblement le même quelle que soit la longueur d'onde comprise dans le domaine visible.
- Il est effectivement légèrement inférieur pour une incidence de 45° mais la différence ne dépasse pas 3%.
- On constate que le pourcentage de lumière transmise est bien voisin de 90%. Théoriquement avec deux dioptries pour une vitre, $T_{\text{tot}} = 0,96^2 = 0,92$ en incidence normale, soit 92% de la lumière transmise. Il est légèrement inférieur car un léger pourcentage de la lumière est absorbé par la vitre, entre 2 et 3%.

Conclusion : Ainsi ces mesures valident notre hypothèse comme quoi en dessous d'un angle d'incidence de 45° , le pourcentage de lumière transmise varie peu et est voisin de 90% pour une vitre, 80% pour deux. Ceci n'explique pas que nous ayons observé une différence de température très significative lors de notre première expérience avec une incidence de 20° comparativement à une incidence nulle ou normale à la vitre.

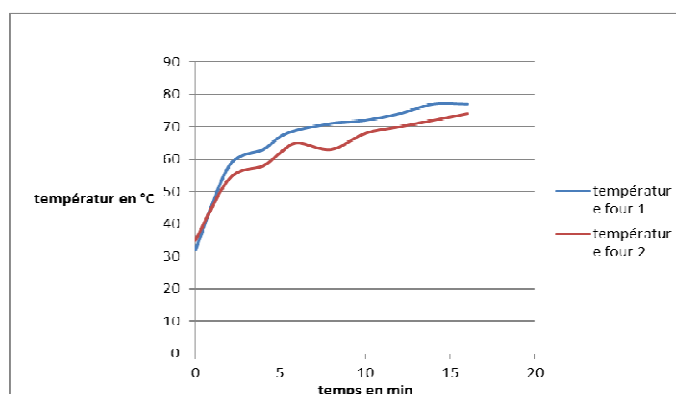


Expérience et Hypothèse n°5 : La différence de température que nous avons observée dans notre première expérience était due à la présence des réflecteurs.

Protocole : Nous avons renouvelé l'expérience 1, mais cette fois-ci sans réflecteurs.

Mesures : *Température en fonction du temps avec une inclinaison différente des fours mais sans réflecteur*

Conclusion : On observe que les températures intérieures des deux fours évoluent sensiblement de la même façon pour les deux incidences, donc que les pourcentages de lumières transmis sont voisins. On en conclut donc que l'écart important trouvé dans la première expérience était bien dû aux réflecteurs extérieurs. On confirme donc le fait que 20° d'inclinaison importe peu pour atteindre des températures maximales lorsque que le four ne dispose pas de réflecteurs.



2) Comment les réflecteurs permettent-ils d'optimiser l'énergie solaire récupérée ?

a) L'intérêt des réflecteurs

Expérience et hypothèse n°6 : Les réflecteurs permettent, lorsque les rayons arrivent perpendiculairement à la vitre, d'augmenter considérablement la quantité d'énergie lumineuse récupérée car captent une « surface solaire » ou un flux plus grand. Ainsi la température intérieure du four sera nettement plus grande que sans.

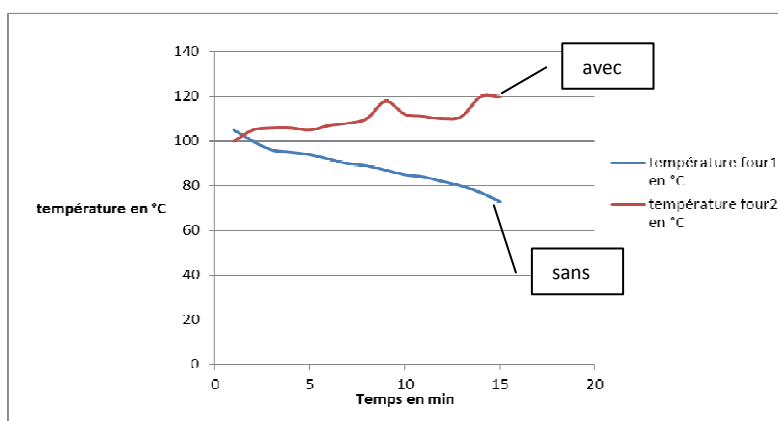
Protocole: Nous avons placé deux fours côte à côte dans les mêmes conditions, c'est-à-dire même inclinaison, incidence normale et avec réflecteurs dans un premier temps pour qu'ils chauffent. Puis à l'instant $t=0$, nous avons retiré les réflecteurs du four n°1.



Mesures :

Température en fonction du temps pour une même inclinaison mais avec et sans réflecteur

Conclusion : On observe que très rapidement les deux fours atteignent des températures très différentes. En effet le four ne disposant pas de réflecteurs, voit sa température chuter fortement. Au contraire celui disposant de réflecteurs voit sa température croître. On peut donc conclure que les réflecteurs fournissent au four un apport indispensable d'énergie.



b) Inclinaison des réflecteurs

Les rayons réfléchis par les réflecteurs doivent toucher la vitre avec un angle d'incidence inférieur à 45° pour qu'un pourcentage intéressant pénètre dans le four. Cela n'était probablement pas le cas dans une des situations de l'expérience 1, c'est-à-dire avec une incidence de 20° par rapport à la vitre pour avoir obtenu une telle différence.

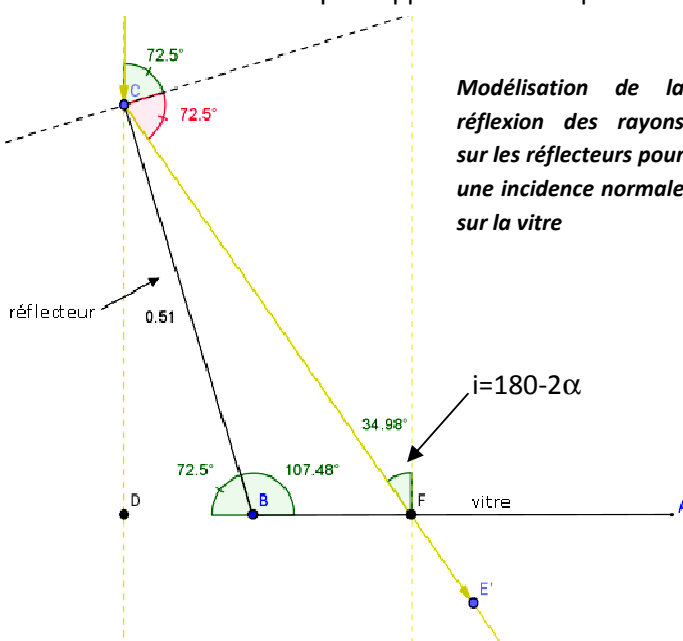
Voici des modélisations, réalisées sur GéoGét, les panneaux ont une hauteur $a = 0,51$ m, et

- En incidence normale sur la vitre :

Dans ce schéma l'angle α , est l'angle entre le un rayon qui vient frapper les réflecteurs et l qui définissent α .

Par application de la loi de la réflexion, c panneaux et la normale car $i=r$.

On peut donc constater sur ce schéma, qu réfléchis sur un plan médian des réflecteurs D'autre part, l'angle d'incidence sur la vitre e



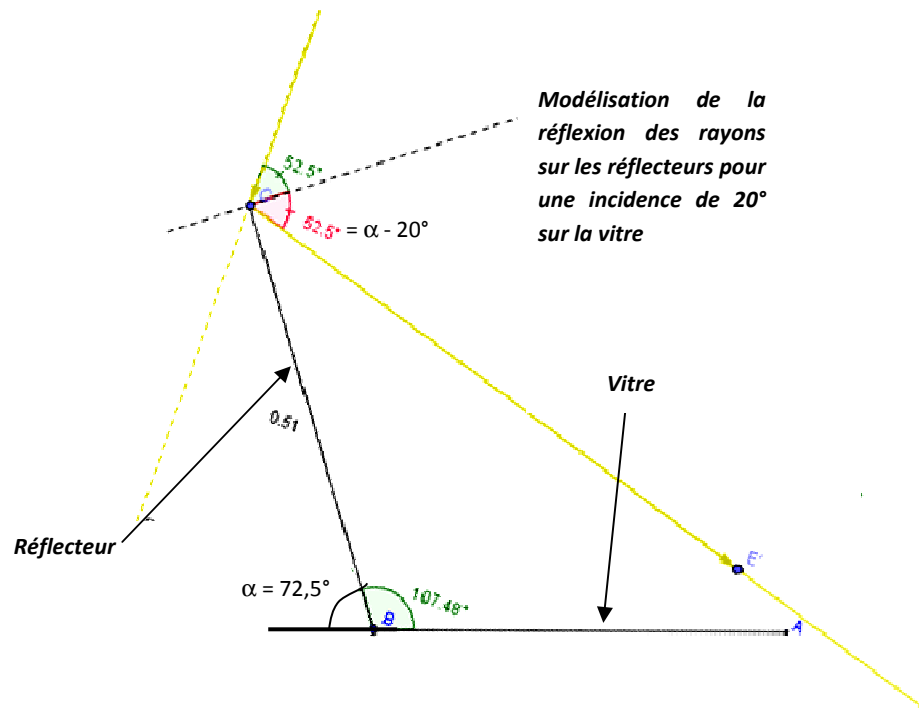
- Avec une incidence de 20° sur la vitre soit un angle d'incidence de $\alpha - 20 = 52,5^\circ$ sur les panneaux :

Ainsi sur ce schéma, on constate que tous les rayons ne sont pas réfléchis en direction de la vitre car réfléchis avec un angle trop faible ($52,5^\circ$). D'autre part, l'angle d'incidence sur la vitre pour les rayons qui y parviennent est de $i = 180 - 2\alpha + 20 = 55^\circ$, donc non favorable car dépasse 45° , donc un pourcentage important sera réfléchi au niveau de la vitre.

Très rapidement, lorsque le Soleil décline, l'angle d'incidence de la lumière réfléchie par les réflecteurs est trop important et donc une faible quantité de lumière va

entrer dans le four. Il faut donc chercher à avoir une incidence la plus proche de la normale par rapport à la vitre pour permettre de récupérer un maximum d'énergie des rayons avec les réflecteurs.

Sachant que l'angle d'incidence sur la vitre augmente d'autant de degrés que le Soleil va décliner par rapport à la normale à la vitre, au delà d'une déclinaison de 10° , les réflecteurs perdent rapidement de leur efficacité. L'angle $\alpha = 72,5^\circ$ entre les panneaux et la vitre choisie par Bolivia Inti est donc un minimum qui permet de récupérer tous les rayons réfléchis par les panneaux et de les envoyer avec un angle d'incidence acceptable sur la vitre.



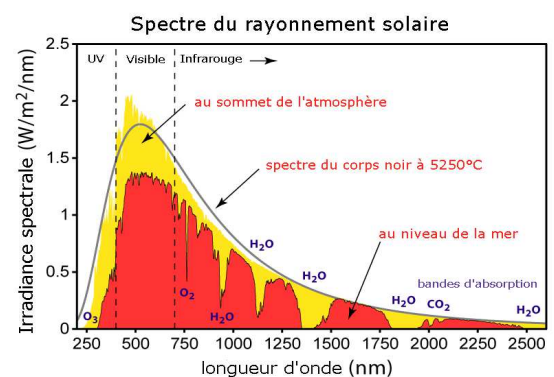
c) les matériaux des réflecteurs

Dans le cadre des matériaux, nous avons choisi de rester dans le choix de matériaux réfléchissants. Ainsi nous nous sommes demandé si la surface du matériel changeait la capacité des réflecteurs. Pour illustrer cela, nous avons pris plusieurs types d'aluminium plus ou moins polis, afin de prouver l'importance d'une surface lisse.

Nous avons pu observer que la diffusion d'un rayon, c'est-à-dire la réflexion de ce rayon dans plusieurs directions et non pas dans une seule comme le prévoit la réflexion spéculaire, était plus ou moins importante en fonction de la surface. Ainsi lors du choix des matériaux réfléchissants, le polissage est très important. Mais son coût est également plus important.

3) Le double-vitrage n'est-il pas un gros obstacle ?

Les rayons arrivant du Soleil sont étendus sur différents domaines. Nous pouvons observer sur le graphique ci-contre que le pic d'énergie se situe dans le domaine visible (400nm à 800nm) et les IR proches. Or nous savons que la vitre dont nous disposons s'avère être transparente pour ces domaines. Nous savons également que lors de la réflexion, elle absorbe environ 3% de l'énergie. On peut donc conclure sur le fait qu'elle n'entrave pas l'arrivée des rayons solaires. Nous verrons plus particulièrement que celle-ci permet une diminution des pertes.



Expérience et hypothèse n°7 : Comme 90% de la lumière était transmise d'après une expérience précédente, si nous avons deux vitres, seuls 80 % de lumière incidente sera transmise.

Protocole : Après avoir retiré les réflecteurs, nous avons mesuré l'éclairement sur les vitres et dessous.

Résultats :

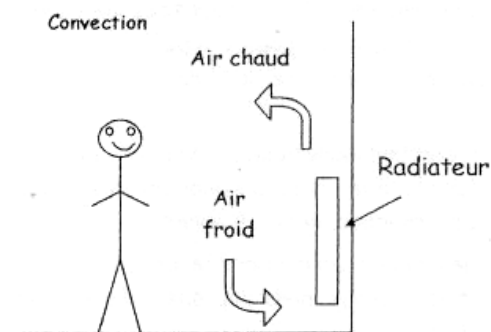
$$E_{\text{ext}} = 72000 \text{ Lux et } E_{\text{int}} = 59\,000 \text{ Lux d'où } \%_{\text{transmis}} = \frac{E_{\text{int}}}{E_{\text{ext}}} \times 100 = 82\%$$

Conclusion : 18% de la lumière n'entre pas dans le four par absorption par les vitres et réflexion. En effet avec 4 dioptries comme nous l'avons déjà stipulé, $T_{\text{tot}} = (0,96)^4 = 0,85$ soit 85% de la lumière réfractée en incidence normale. Ainsi environ 3% de la lumière sont absorbés par les vitres.

B. Comment minimiser les pertes d'énergie ?

Maintenant que nous avons étudié quels étaient les moyens mis en œuvre pour collecter un maximum d'énergie solaire, nous allons étudier les moyens mis en œuvre pour minimiser les pertes d'énergie à l'intérieur du four. Sachant que les transferts de chaleur vers l'extérieur peuvent se faire par rayonnement, conduction et convection, nous aborderons cette seconde partie de façon légèrement différente, en essayant d'analyser comment sont limitées ces trois modes de transfert de chaleur à travers les éléments qui constituent le four.

1) Limite des pertes par convection



Ce mode de transfert de chaleur est réservé aux fluides, à savoir liquide et gaz. En effet, un fluide est d'autant moins dense que sa température est élevée. Ainsi, en se réchauffant, l'air s'élève naturellement laissant place à de l'air froid qui descend : c'est ainsi qu'on peut chauffer l'étage d'une maison sans radiateur. Dans le cas

présent du four, l'air chaud étant moins dense donc plus léger, s'élèvera. Pour empêcher cela, on a tout simplement enfermé l'air à l'aide d'une boîte ainsi qu'une vitre. Ainsi on diminue les pertes par élévation de la température.

Certes la vitre limite les pertes par convection mais elle a également un second rôle pour le four solaire.

2) Limite des pertes par rayonnement

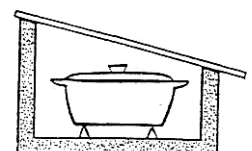
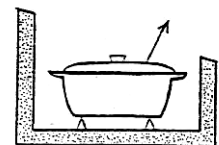
a) La vitre et l'effet de serre

Une observation toute simple nous a intrigués : pourquoi la lumière entre-elle si facilement mais ne ressort-elle pas du four ?

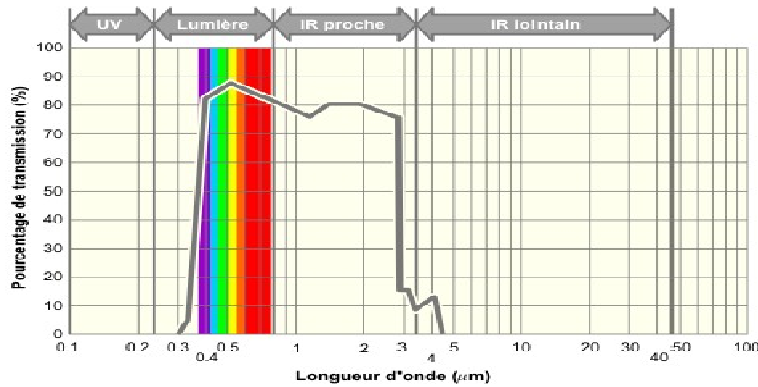
Comme nous pouvons observer le spectre en transmission ci-dessous du verre utilisé dans le bâtiment, il est transparent au rayonnement visible et au proche infrarouge mais opaque à l'infrarouge lointain.

Autrement dit le verre aura les mêmes capacités que l'atmosphère :

- Il laissera passer la lumière visible et le proche infrarouge provenant du Soleil ;
- Par contre il bloquera le rayonnement thermique émis par les objets du fait de leur température.



Limitation des pertes par convection



Spectre de transmission d'une vitre de bâtiment

Expérience et hypothèse n°8 : Nous avons voulu vérifier que le verre qui constitue la vitre est opaque aux infrarouges qui sont émis par un corps chaud.

Protocole : Afin de prouver cette affirmation, il nous a suffi de placer un individu derrière une vitre.

Observation : Cet individu, émettant dans l'infrarouge lointain, n'est plus visible lorsqu'on l'observe à l'aide d'une caméra infrarouge si la vitre est opaque aux infrarouges lointains comme l'atmosphère. Derrière la vitre, on ne distinguait plus l'un d'entre nous.

Conclusion : La vitre est bien opaque au rayonnement infrarouge émis par un corps chaud.

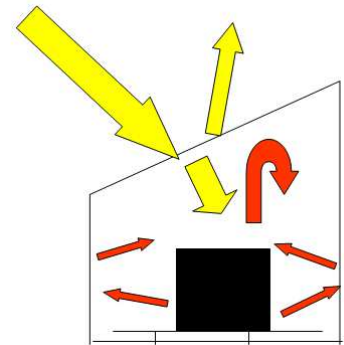
Interprétation : Typiquement, les objets dont la température est comprise entre 20 et 100°C émettent principalement un rayonnement dont la longueur d'onde est entre 7 et 10 μm. En effet la loi de Wien permet de retrouver cette affirmation puisqu'elle permet de relier la longueur d'onde de maximum d'émission d'un corps noir et sa température :

$$\lambda(nm) = \frac{2,898.10^6}{T(enK)}$$

Pour $\theta = 20^\circ\text{C}$, $\lambda = 2,898.10^6 / (20+273) = 9890 \text{ nm} \approx 10 \mu\text{m}$

Pour $\theta = 150^\circ\text{C}$, $\lambda = 2,898.10^6 / (150+273) = 6851 \text{ nm} \approx 7 \mu\text{m}$

Le verre est donc imperméable aux rayons infrarouges lointains émis par les éléments intérieurs, qui se trouvent emprisonnés dans le four. Ainsi la vitre permet la traversée des rayons solaires mais empêche leur sortie après transformation en I.R. comme l'atmosphère pour notre planète.



b) Les parois en aluminium pour réfléchir

Comme nous l'avons dit précédemment, à l'intérieur du four circulent des rayons lumineux qui vont du visibles à infrarouges lointains et qui servent à chauffer le récipient. Pour renvoyer ces rayons, plus qu'importants à la rapidité de la cuisson, des plaques d'aluminium ont été placées sur les parois intérieures du four. Celles-ci étant constituées d'une surface réfléchissante vont renvoyer l'ensemble des ondes électromagnétiques vers l'intérieur et donc vers les récipients. Comme nous l'avons observé sur les réflecteurs, l'aluminium réfléchit la quasi-totalité de la lumière qu'il reçoit quelle que soit sa longueur d'onde (dans le vide). Contrairement aux réflecteurs extérieurs, la surface et la propreté de l'aluminium importe peu ici. En effet les rayons réfléchis n'ont pas absolument besoin d'être envoyés dans une direction, pourvu qu'ils soient plus réfléchis qu'absorbés par les parois, même si comme nous pourrions le voir dans les améliorations, il serait préférable des les renvoyer vers le récipient de cuisson ou la plaque noire pour qu'ils soient absorbés.

c) La plaque noire qui absorbe les rayons solaires

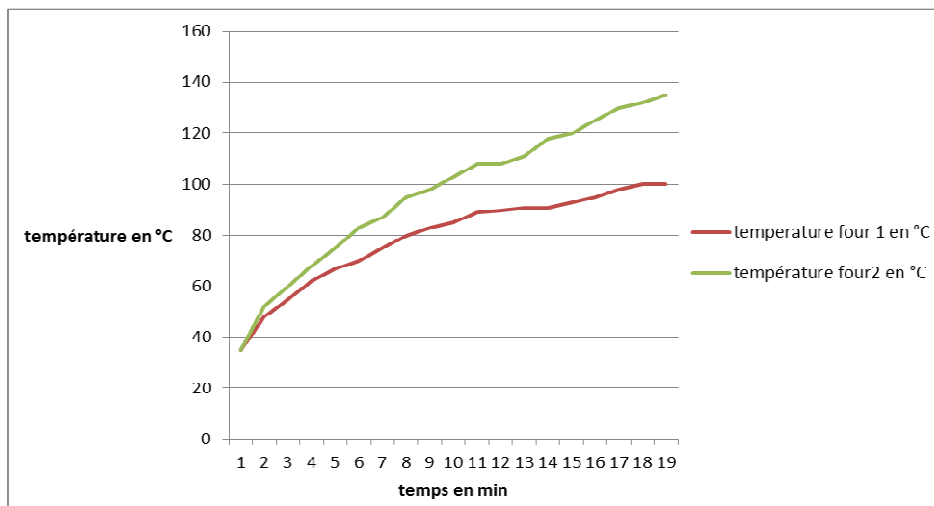
Une plaque noire est déposée dans le fond du four. En effet, la lumière constituée de photon se déplace sous forme d'onde. Un matériau de couleur noire absorbe toutes les longueurs d'ondes (du domaine visible). L'énergie électromagnétique absorbée va donner lieu une agitation particulière qui va se traduire par une augmentation de la température. La plaque noire va donc libérer des rayons infrarouges, ce qui nous a conduits à formuler une hypothèse quant à l'intérêt de cette plaque :

Expérience et hypothèse n°9 : Nous supposons que, du fait de son absorption quasi-totale, la plaque noire permet d'atteindre une température plus élevée et ce plus rapidement limitant les multiples réflexions à l'intérieur du four.

Protocole : Afin de valider notre hypothèse, nous avons placé deux fours côte à côte et chacun dans les mêmes conditions (orientation, réflecteur, ...) sauf que l'un était équipé d'une plaque noire dans le fond tandis que l'autre non. Puis nous avons relevé les températures intérieures des deux fours au cours du temps.

Mesures :

Température en fonction du temps à l'intérieur des fours avec et sans plaque noire



Conclusion : Comme nous pouvons le remarquer, il y a une très nette différence de vitesse de montée de température entre le four 1 sans plaque et le four 2 avec. Ainsi, la plaque noire paraît indispensable dans le four. Sans elle, les rayons lumineux entrants ne sont pas suffisamment absorbés et parviennent à ressortir du four pour certains d'entre eux avant d'être absorbés puis réémis en infrarouges. La plaque noire peut être substituée par un récipient noir.

3) Limite des pertes par conduction

Après avoir résolu le problème du rayonnement, nous nous sommes penchés sur la deuxième contrainte : la conduction.

Définition : La **conduction thermique** (ou **diffusion thermique**) est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact, et se réalisant sans déplacement global de matière (à l'échelle macroscopique) par opposition à la convection. Elle peut s'interpréter comme la transmission de proche en proche de l'agitation thermique directement liée à la température du milieu : un atome (ou une molécule) cède une partie de son énergie cinétique à l'atome voisin. Ainsi plus un milieu est dense, plus la conduction va être favorisée.

Pour limiter les pertes par conduction dans le four, différentes techniques bien connues aujourd'hui ont été mises en place.

a) Le double vitrage

La première est le double-vitrage. En effet le modèle de four développé par Bolivia-Inti est équipé d'un double vitrage, c'est-à-dire deux vitres d'épaisseur 4mm séparées par une couche d'air de 10 à 20 mm. Ce double-vitrage présente-il un réel intérêt ?

Expérience et hypothèse n°10 : Le double-vitrage limiterait les pertes par conduction qui se produiraient dans le cas d'une simple vitre en contact direct avec l'atmosphère.

Protocole : Nous avons placé deux fours côte à côte et dont les conditions (inclinaison, avec plaque noire...) étaient identiques, excepté la présence d'un simple vitrage sur l'un des deux fours à savoir le numéro 1. Par la suite, nous avons décidé de comparer la montée en température dans ces deux fours, mais également la température des vitres extérieures de chacun d'eux, et leur redescente en température en retirant les réflecteurs.

Mesures :

Observation :

On n'observe pas une grande différence au départ. En effet, nous supposons que le double vitrage empêche le four de se réchauffer rapidement. Parti d'une température plus basse, on note cependant que le four avec double vitrage finit par rattraper l'autre et malheureusement, si nous avions attendu un peu, nous pensons que nous aurions pu constater une température plus élevée. Lorsque nous avons retiré les réflecteurs, nous remarquons que la chute de température du four ne possédant pas le double vitrage est plus rapide. De plus les écarts de températures lorsque celles-ci viennent à stagner est

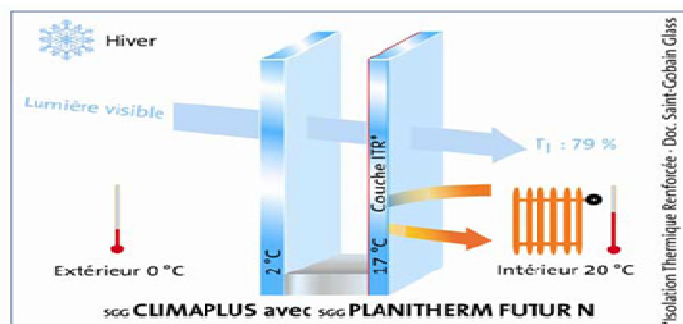
temps (en min)	température four 1(en °C)	température four 2 (en °C)
0	65	45
8	100	95
16	114	111
20	114	114
24	96	102
28	89	98
32	85	93
36	84	90
40	80	89
44	80	89

d'au minimum 9°, voire plus importants si on tient compte de l'écart qu'il y avait déjà dans les mêmes conditions entre four 1 et four 2 (écart de 5°C constaté lors de l'expérience 1).

Conclusion : On peut donc conclure que le double vitrage a une importance dans le four mais semble pouvoir être optimisé.

Interprétation : L'utilisation du double vitrage est essentielle pour atteindre et conserver une bonne chaleur de cuisson. En effet, le double vitrage permet une bonne isolation thermique, il est constitué d'une lame d'air qui sépare les deux vitres. L'air est un très bon isolant, bien mieux que le verre lui-même. Cette technique va permettre d'éviter que l'une des vitres soit directement en contact avec l'intérieur et l'extérieur du four : elle limite donc les échanges de chaleur entre la paroi extérieure et intérieure par conduction.

Certaines techniques consistent à ajouter des gaz moins conducteurs que l'air dans la lame ou bien de remplacer l'air par du vide. Bien que ce dispositif optimise l'isolation, elle présente un désavantage. En effet nous avons vu précédemment que lorsqu'un rayon traverse la vitre, il y a un pourcentage de réflexion et d'absorption, dans le cas du doublage, on en a deux fois plus.



Plus de confort en hiver, moins de dépenses de chauffage

b) les tréteaux pour surélever

Expérience et hypothèse n°11: La plaque noire n'est pas en contact direct avec le fond du four mais surélevée par des tréteaux en bois pour limiter les pertes par conduction par le fond du four.

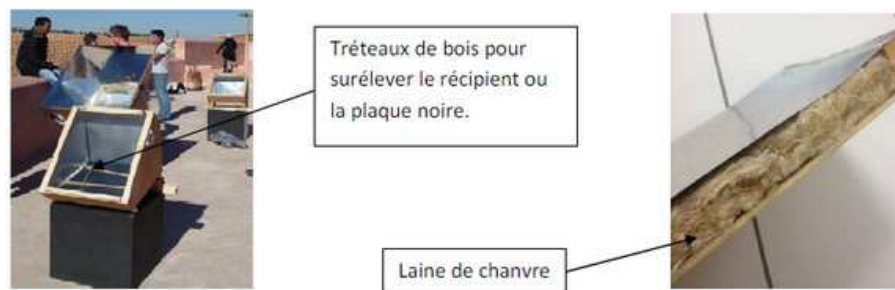
Protocole : Nous avons disposé deux fours dans les mêmes conditions, sans réflecteur, même orientation, avec plaque noire mais l'une déposée directement sur le fond du four pour le four n°1 et l'autre surélevé par des tréteaux. Nous avons relevé la température intérieure des fours après 30 minutes d'exposition, et la température extérieure sous le four.

Mesures : Pour le four 1, la température intérieure atteinte est de 65°C, et la température extérieure sous le four est de 35°. Pour le four 2, la température intérieure est de 85°C, et la température extérieure sous le four est de 20°C. La température extérieure à distance des fours était de 16°C.

Conclusion : Il est donc important que la plaque noire ne soit pas en contact direct avec le fond du four, car sinon elle favorise les pertes par conduction et limite la température atteinte à l'intérieur du four.

Interprétation : Comme nous l'avons vu précédemment, la plaque noire se réchauffe par absorption quasi-totale du rayonnement qu'elle reçoit quelle que soit sa longueur d'onde. Seulement, il ne faut pas que cette chaleur se perde par conduction avec le fond du four. Ainsi, pour régler ce problème, il n'y

a rien de plus simple. En effet, il faut juste surélever cette plaque avec des tréteaux de bois. Le choix du bois se justifie par le fait qu'il est l'un des solides de grande rigidité le moins conducteur qui existe. Effectivement, lorsqu'on compare la conductivité thermique du bois de moyenne $0.7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, elle est bien plus faible que celle d'un métal tel que l'acier qui vaut $46 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ par exemple. D'autre part, on utilise des tréteaux pour limiter les contacts entre la plaque noire ou récipient et le fond en aluminium. On peut donc en conclure que les tréteaux pour surélever la plaque noire ou le récipient sont indispensables et que le bois est l'un des meilleurs solides pour ces tréteaux.



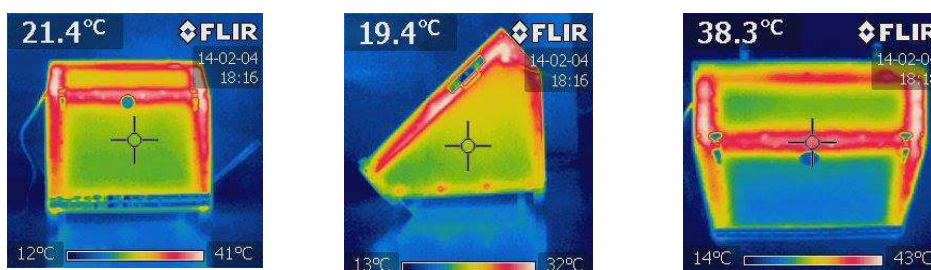
c) Les parois en laine de chanvre

Les parois du four sont constituées par une plaque d'aluminium de 0,5 mm d'épaisseur, 30 mm de laine de chanvre et 5 mm de contreplaqué. La laine de chanvre a-t-elle un réel intérêt ?

Expérience et Hypothèse n°12 : La laine de chanvre est un très bon isolant thermique qui limite les pertes par conduction.

Protocole : Nous avons disposé un four dans lequel était présent une plaque chauffante. Après avoir fait chauffer celle-ci, et atteint une température limite à l'intérieur du four, nous avons pris des photographies des différentes parois du four à l'aide d'une caméra thermique afin d'observer les endroits où la chaleur s'échappe.

Mesures :



Conclusion : Sur ces images, le rouge est utilisé pour représenter des zones de températures élevées, alors que le bleu est utilisé pour des zones plus froides. On constate donc que les bords des parois consolidés par des morceaux de bois sous le contreplaqué sont jusqu'à 20° plus chaud que le centre des parois au niveau duquel, derrière le contreplaqué se trouve l'épaisseur de laine de chanvre. On note également, que les structures métalliques qui constituent le four, comme les charnières ou encore les vis sont des sources de déperdition thermique importantes.

En effet, la laine de chanvre est un très bon isolant thermique puisqu'elle possède une conductivité thermique de $0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ alors que le pin du bois utilisé pour faire la structure du four possède une conductivité de $0,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. On en conclut donc que l'effet recherché avec la laine de chanvre est bien atteint.

d) Résistance thermique du four

Expérience et hypothèse n°13 : Les pertes thermiques par les parois sont proportionnelles à la différence de température entre intérieur et extérieur du four, cette constante de proportionnalité étant la résistance thermique du four.

Lorsque le four atteint une température intérieure constante, l'énergie reçue par l'intérieur du four compense exactement les pertes par ses parois en direction de l'extérieur. Nous pouvons alors écrire que la puissance reçue $P_{\text{reçue}}$ est égale au flux thermique ϕ à travers les parois :

$$P_{\text{reçue}} = \Phi$$

Comme $\Delta T = \Delta \theta = R_{th} \cdot \Phi$, alors connaissant l'écart de température entre extérieur et intérieur, nous pourrions tracer l'écart de température $\Delta \theta$ en fonction du flux thermique ϕ et vérifier ou non qu'il y a proportionnalité entre ces deux grandeurs, et en déduire la valeur de la résistance thermique du four.

Protocole

- Pour apporter une énergie donnée, utiliser une résistance installée à l'intérieur du four alimentée par un générateur de tension alternative réglable ;
- Mesurer l'intensité efficace et la tension efficace à l'aide de deux multimètres en mode alternatif ;
- Attendre que le four atteigne une température constante indiquant qu'il y a équilibre entre les pertes et apports ;
- Mesurer la température intérieure minimale dans le bas du four et maximale dans le haut afin d'en faire une moyenne ;
- Mesurer également la température extérieure du four pour obtenir l'écart de température $\Delta \theta = \theta_{\text{int moy}} - \theta_{\text{ext}}$;
- Renouveler l'expérience pour différentes puissances apportées $P = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$.

Mesures :

I (en A)	U (en V)	$\phi = P$ (en W)	θ_{ext} (en °C)	$\theta_{\text{int mini}}$ (en °C)	$\theta_{\text{int maxi}}$ (en °C)	$\theta_{\text{int moy}}$ (en °C)	$\Delta \theta$ (en °C)	R_{th} (en K/W)
1.10	44.2	48.6	21.8	40.8	50.2	45.5	23.7	0.487
1.59	63.1	100.3	21.9	54.5	70.7	62.6	40.7	0.406
1.94	76.6	148.6	22.9	74.9	94.5	84.7	61.8	0.416
2.32	90.9	210.9	23.1	90.9	118	104.45	81.35	0.386
2.53	99	250.5	23.1	99.4	133.4	116.4	93.3	0.372
2.13	83.7	178.3	22.8	87.2	110	98.6	75.8	0.425

Observations :

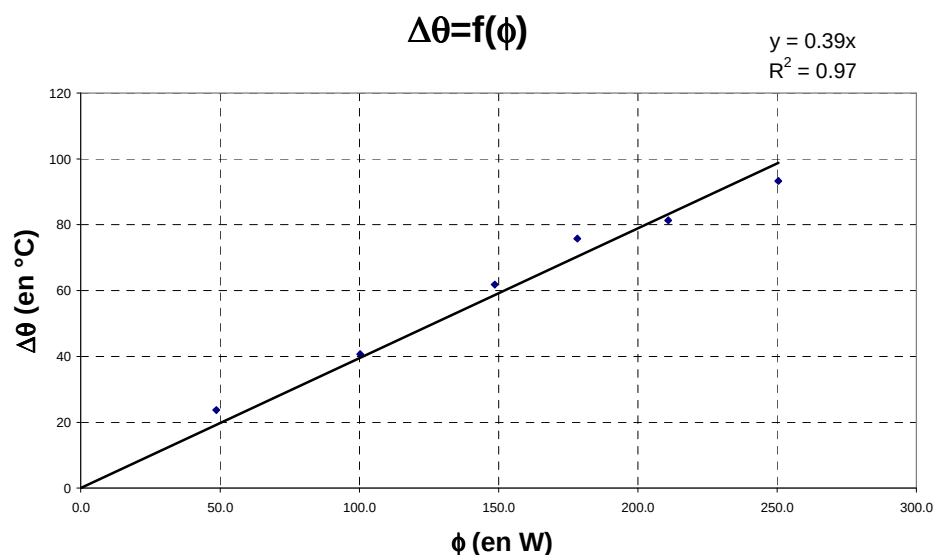
Nous obtenons une droite qui passe par l'origine, donc l'écart de température est bien proportionnel au flux thermique à travers les parois du four.

Interprétation :

Il est possible d'évaluer la résistance thermique équivalente des parois du four en tenant compte de la constitution des parois et de celle du double vitrage.

Par définition : $R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$

e : épaisseur de la paroi en m ; S : surface de la paroi en m^2 et λ : conductivité thermique du matériau en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



Dimensions	Valeurs
Vitre	0,43 * 0.54 m
Surface intérieure en aluminium	0.70 m ²
Epaisseur verre	4,0 mm
Epaisseur air (double vitrage)	1,0 cm
Epaisseur de laine de chanvre	3,0 cm
Epaisseur de l'aluminium	0,50 mm
Epaisseur contreplaqué	5,0 mm

Matériaux	Conductivité thermique en W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Pin/contreplaqué	0,15
Laines de chanvre	0,043
Aluminium	237
Verre	1,0
Air sec immobile	0,0262

Lorsqu'on superpose différents matériaux, les résistances thermiques s'additionnent. Ainsi :

- Pour les parois :

$$R_{th_parois} = R_{th_alu} + R_{th_laine} + R_{th_bois} = \frac{e_{alu}}{\lambda_{alu} \times S} + \frac{e_{laine}}{\lambda_{laine} \times S} + \frac{e_{bois}}{\lambda_{bois} \times S} = \frac{1}{S} \left(\frac{e_{alu}}{\lambda_{alu}} + \frac{e_{laine}}{\lambda_{laine}} + \frac{e_{bois}}{\lambda_{bois}} \right)$$

$$R_{th_parois} = \frac{1}{0,70} \left(\frac{5,0 \cdot 10^{-4}}{237} + \frac{3,0 \cdot 10^{-2}}{0,043} + \frac{5,0 \cdot 10^{-3}}{0,15} \right) = 1,0 K.W^{-1}$$

Remarque : on aurait pu négliger la conductivité de l'aluminium devant celle de la laine de chanvre.

- Pour le verre :

$$R_{th_vitres} = R_{th_verre} + R_{th_air} + R_{th_verre} = \frac{e_{verre}}{\lambda_{verre} \times S} + \frac{e_{air}}{\lambda_{air} \times S} + \frac{e_{verre}}{\lambda_{verre} \times S} = \frac{1}{S} \left(\frac{2 \cdot e_{verre}}{\lambda_{verre}} + \frac{e_{air}}{\lambda_{air}} \right)$$

$$R_{th_verre} = \frac{1}{0,23} \left(\frac{2 \times 4,0 \cdot 10^{-3}}{1,0} + \frac{1,0 \cdot 10^{-2}}{0,0262} \right) = 1,7 K.W^{-1}.$$

Remarque : 1 m² de double vitrage aurait une résistance de 0,70 K.W⁻¹, contre 0,39 KW⁻¹ pour 1 m² de parois.

Pour retrouver la résistance thermique globale ou équivalente du four :

$$\Phi_{tot} = \Phi_{parois} + \Phi_{vitres} = \frac{\Delta T}{R_{th_parois}} + \frac{\Delta T}{R_{th_vitres}} = \Delta T \cdot \left(\frac{1}{R_{th_parois}} + \frac{1}{R_{th_vitres}} \right) = \frac{\Delta T}{R_{th_eq}}$$

$$\text{D'où } \frac{1}{R_{th_eq}} = \frac{1}{R_{th_parois}} + \frac{1}{R_{th_vitres}} \text{ ou } R_{th_eq} = \frac{R_{th_parois} \times R_{th_vitres}}{R_{th_parois} + R_{th_vitres}} \text{ soit } R_{th_eq} = \frac{1,0 \times 1,7}{1,0 + 1,7} = 0,63 K.W^{-1}.$$

Ainsi théoriquement, la résistance thermique du four est de 0,63 K.W⁻¹, alors qu'expérimentalement nous avons trouvé 0,39 K.W⁻¹.

Cette différence de plus de 38% peut s'expliquer.

- Les parois sont rigidifiées par des supports en bois, matériau plus de trois fois plus conducteur que la laine de chanvre. En effet nos images infrarouges, ont pu nous montrer des pertes importantes sur les bords.
- D'autre part, ces mêmes images nous ont montré des pertes importantes par le double vitrage. En effet pour être efficace, un double vitrage nécessite un air sec et immobile, or, il n'y a pas de joint au niveau des vitres, donc des pertes par convection peuvent avoir lieu.
- Nous avons pu constater également des pertes par les vis en inox.

4) Rendement du four solaire modèle BISS

Expérience n°14 : Nous avons voulu connaître le rendement de ce four, c'est à dire le pourcentage de lumière réellement collecté et transformé sous forme de chaleur. Dans un premier temps, nous l'avons évalué sans réflecteur puis avec.

Résultats sans réflecteur :

- Surface solaire récupérée de $L \cdot I = 0,54 \cdot 0,43 = 0,23 \text{ m}^2$;
- Inclinaison du four : incidence normale sur la vitre, soit 53° par rapport à l'horizontale, 37° par rapport à la verticale
- Eclairement sur vitre : $850 \pm 5 \text{ W.m}^{-2}$ (contre 700 sous double vitrage) ;
- Température intérieure atteinte : 95°C ;
- Température extérieure : 18°C ;

Théoriquement : Lors de l'équilibre thermique du four, $\Phi = \frac{\Delta\theta}{R_{th}} = \frac{98-18}{0,47} = 160\text{W}$

Ainsi la puissance qui entre réellement dans le four est de l'ordre de 160 W.

Puissance solaire : $P_{lum} = 850 \times 0,23 = 196 \text{ W}$ soit un rendement : $\eta = \frac{P_{thermique}}{P_{lum}} = \frac{160}{196} = 0,82$ soit 82%

Résultats avec réflecteurs :

- Avec réflecteurs, soit une surface solaire récupérée de $L \cdot I = 0,96 \cdot 0,88 = 0,84 \text{ m}^2$;
- Inclinaison du four : incidence normale sur la vitre, soit 53° par rapport à l'horizontale, 37° par rapport à la verticale
- Eclairement sur vitre : $905 \pm 8 \text{ W.m}^{-2}$ (contre 740 sous double vitrage) ;
- Température intérieure atteinte : 154°C ;
- Température extérieure : 21°C ;

Théoriquement : Lors de l'équilibre thermique du four, $\Phi = \frac{\Delta\theta}{R_{th}} = \frac{154-21}{0,47} = 284\text{W}$

Ainsi la puissance qui entre réellement dans le four est de l'ordre de 280 W.

Puissance solaire : $P_{lum} = 905 \times 0,84 = 760 \text{ W}$

Soit un rendement : $\eta = \frac{P_{thermique}}{P_{lum}} = \frac{284}{760} = 0,37$ soit 37%

Conclusions : Nous constatons que le rendement du four sans les réflecteurs est plutôt conséquent. Il était prévisible que ce dernier chute énormément avec les réflecteurs puisque qu'une partie non négligeable de la lumière est absorbée par le papier miroir (albédo de 0.9). De plus, comme nous le verrons dans la suite, les coins des panneaux ne réfléchissent pas directement vers le four.

Remarque : Les simples pertes par le double vitrage sont $\frac{|905-740|}{905} \times 100 = 18\%$.

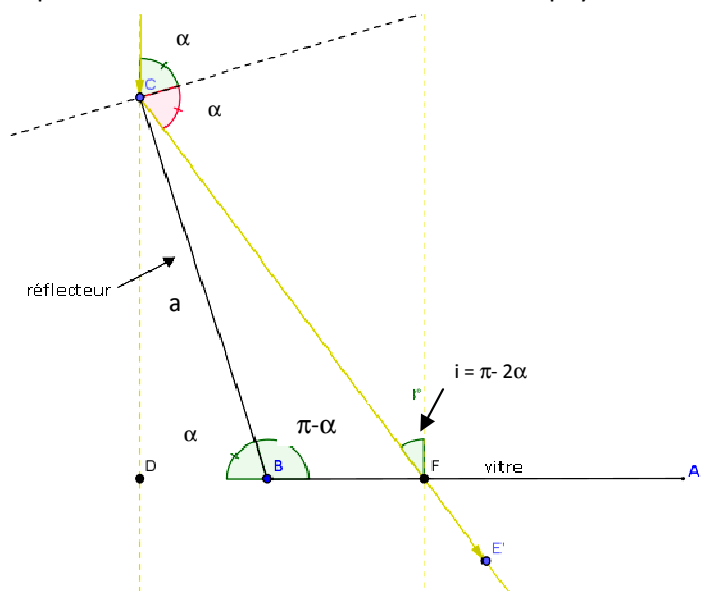
C- Comment améliorer les performances du four ?

Ayant plus ou moins cerné le fonctionnement de ce modèle de four solaire, nous nous sommes penchés sur des pistes d'amélioration dans le but d'optimiser son fonctionnement dans des pays moins ensoleillés comme la France.

1) Comment faire entrer plus de lumière dans le four ?

a) Taille des réflecteurs

Suite à notre modélisation des réflecteurs dans la partie A, nous nous sommes demandé quelle serait la hauteur maximale des panneaux, sans en modifier l'inclinaison puisqu'elle est plutôt favorable à peu de réflexion, qui renverrait tous les rayons vers la vitre dans le cas d'une incidence normale.



En effet lorsque l'angle d'inclinaison des panneaux est modifié, le flux (ou surface solaire apparente) reçu varie.

Soit $AB = b = 0,50$ m la longueur de la vitre et $a = L$ la hauteur des panneaux.

$$\sin \alpha = \frac{CD}{a} \quad \cos \alpha = \frac{DB}{a} \quad \tan \alpha = \frac{CD}{DB}$$

$$\tan \left(2\alpha - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{CD}{AD} = \frac{a \sin \alpha}{a \cos \alpha + 0.5} \quad \leftrightarrow \quad \frac{2 \cos^2 \alpha - 1}{2 \sin \alpha \cos \alpha} = \frac{a \sin \alpha}{a \cos \alpha + 0.5}$$

$$-(2 \cos^2 \alpha - 1)(a \cos \alpha + 0.5) = 2a \sin^2 \alpha \cos \alpha$$

$$-(2 \cos^2 \alpha - 1)(a \cos \alpha + 0.5) = 2a (-\cos^2 \alpha + 1) \cos \alpha - 2a \cos^3 \alpha + a \cos \alpha - \cos^2 \alpha + 0.5$$

$$= -2a \cos^3 \alpha + 2a \cos \alpha - \cos^2 \alpha - a \cos \alpha + 0.5 = 0$$

$$2 \cos^2 \alpha + 2a \cos \alpha - 1 = 0 \quad \Delta = 4a^2 + 8 = 4(a^2 + 2)$$

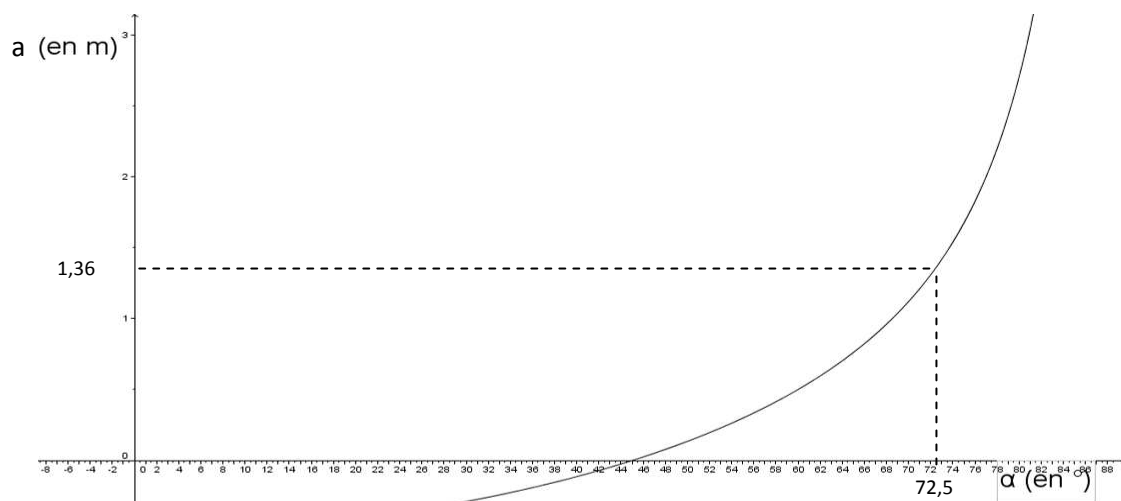
$$\cos \alpha = \frac{-2a + 2\sqrt{a^2 + 2}}{4} = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 2}}{2}$$

Si a est fixé et

$$\alpha = \frac{1 - 2 \cos^2 \alpha}{2 \cos \alpha}$$

Si α est fixé

Avec $\alpha = 72.5^\circ$ donne : $a = 1.362$ m



Longueur maximale a des panneaux en fonction de l'angle qu'ils font avec la vitre

Ainsi on peut noter que les panneaux pourraient être beaucoup plus imposants qu'ils ne sont, à savoir avoir une hauteur de 1,36 m et non seulement de 0,51 m comme actuellement.

En revanche, en lisant la courbe dans l'autre sens, on constate qu'on pourrait gagner en surface solaire en les inclinant plus car avec une hauteur de 0,51 m, les panneaux pourraient être inclinés de 60° par rapport à la vitre. Cependant, l'angle d'incidence des rayons réfléchis serait alors de $i = \pi - 2\alpha = 60^\circ$ ce qui ne serait pas propice à un pourcentage important de réfraction vers le four.

Conclusion : A la fin du calcul, on obtient une inclinaison optimale d'environ 72.5° qui s'avère le plus rentable pour la longueur de nos panneaux.

b) Forme des réflecteurs

Donc les panneaux pouvaient être beaucoup plus imposants qu'ils ne sont, à savoir avoir une hauteur de 1,36 m et non seulement de 0,51 m comme actuellement. Cependant le four deviendrait vite instable et encombrant. Cependant, tous les rayons qui viennent frapper les réflecteurs usuels, ne sont pas renvoyés vers la vitre comme nous avons pu le constater avec un laser. Toutes les surfaces des coins, grisées sur le schéma ci-contre, renvoient vers un autre réflecteur pour finir sur la vitre avec un angle d'incidence non propice voir repartir dans l'atmosphère.

Expérience et hypothèse n°15 : Des réflecteurs équipés de « coins cassés » devraient permettre d'atteindre une température plus importante car ils permettraient de renvoyer plus de lumière vers le four.



Parties grisées des réflecteurs qui ne réfléchissent pas directement vers la vitre

Protocole : Pour tester cette hypothèse, nous avons décidé de poser tout simplement des coins dans les réflecteurs existants, avant de nous lancer dans la construction de réflecteurs plus sophistiqués. Nous avons mis côte à côte deux fours avec les mêmes réflecteurs et dans les mêmes conditions dans un premier temps pour nous assurer qu'ils atteignent la même température moyenne, puis une fois cette température atteinte, nous avons ajouté les coins.



Résultats : Lorsque que nous avons installé les deux fours dans les mêmes conditions, nous avons pu constater que la température maximale atteinte était de 145° pour 21° en extérieur. Cependant lors de la mise en place des coins dans l'un des fours, nous avons observé que sa température maximale atteignait 151.5° . Ainsi, nous sommes passés d'un gradient de température de 124° à $130,5^{\circ}$, soit une augmentation de 5%.

Conclusion : Les coins disposés dans les réflecteurs nous ont permis de renvoyer une quantité de rayons plus importante dans le four et ainsi récupérer plus d'énergie.

c) Récupération de lumière par le dessous du four

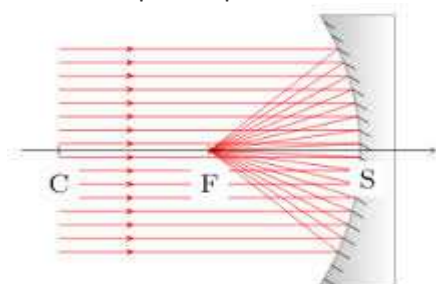
Dans un premier temps, après avoir étudié le sujet sur plusieurs livres de Roger Bernard (un professionnel de la cuisson solaire), nous avons voulu créer un système permettant de capter plus de lumière solaire.



Le premier objectif a été de faire entrer de la lumière par le dessous du four. Pour ce faire, nous avons vitré la base du four, en retirant la paroi isolante. La chaleur montant naturellement, nous avons émis l'hypothèse que les pertes par la base étaient moins importantes, ce que nos images infrarouges avaient prouvé. Nous avons tout de même ajouté un double vitrage et posé la plaque noire par-dessus au moyen de petits tasseaux après l'avoir peinte en noire sur sa face inférieure.

Par la suite, le problème a été de renvoyer des rayons lumineux vers cette vitre. Nous avons souhaité utiliser une parabole télé recouverte de papier miroir, parce qu'elle permettrait de récupérer une surface lumineuse plus importante que des réflecteurs plans.

Avant de poursuivre nos travaux, nous avons recherché la position approximative du foyer F (soit 70 cm du sommet S) de cette parabole, point où convergent des rayons incidents parallèles entre eux et à l'axe optique du miroir concave ainsi constitué. En effet, cela était nécessaire, car il faut éviter de concentrer la lumière en un point de la vitre pour ne pas l'endommager. D'autre part, il est préférable de couvrir une surface plus importante du dessous de la plaque noire pour les mêmes raisons.



Réflexion de la lumière au moyen d'une parabole – Rupture de la vitre suite à une concentration des rayons

Malheureusement lors de nos premiers essais, par manque de surveillance des rayons renvoyés sur la vitre, celle-ci a fini par casser suite à une concentration trop importante de la lumière en un point comme l'atteste la photographie ci-dessus. Après réflexion, nous sommes arrivés à la conclusion, ne trouvant pas de paraboles de focales différentes, qu'il fallait :

- Soit surélever le four, pour éloigner la parabole et éviter que le foyer ne soit trop proche des vitres. La rapprocher n'est pas envisageable car ensuite nous aurions été gênés par l'ombre du four et aurions collecté moins de lumière.

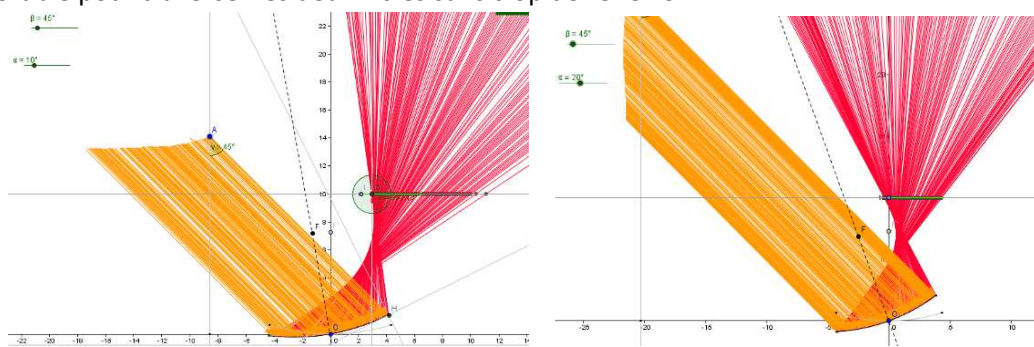
- Soit décaler légèrement la parabole vers l'avant pour augmenter la distance entre la vitre et le sommet S de la parabole. Cependant cette solution diminuera nettement l'efficacité du dispositif, entraînant une inclinaison des rayons sur la vitre qui ne sera pas nécessairement propice mais aussi de la parabole, donc une perte de puissance solaire collectée car la section solaire efficace diminuera.

Nous avons souhaité modéliser ces situations à l'aide de GéoGébra pour pouvoir les envisager et prévoir la tache obtenue dans le fond du four. Nous avons créé trois curseurs pour modifier à la fois l'angle β d'inclinaison des rayons du Soleil (par rapport à la perpendiculaire au sol), l'angle α de la parabole par rapport au sol et un curseur pour modifier la hauteur du four.

Avec un four surélevé d'un mètre, une parabole de focale $f = -70$ cm, inclinée de 10° ou de 20° par rapport au sol et des rayons du Soleil arrivant avec un angle de 45° par rapport à la verticale du lieu, on obtient donc les modélisations ci-dessous. Les rayons du Soleil (en jaune) sont réfléchis (en rouge) par la parabole. On peut s'attendre à avoir une tache qui couvre tout le fond du four car le segment vert représente le fond de notre four. On note qu'avec une parabole inclinée de 20° , celle-ci doit se situer sous le four. Cette situation semble plus favorable car permet de collecter une surface solaire plus importante, et d'envoyer les rayons lumineux avec un angle plus favorable pour traverser les deux vitres sans trop de réflexion.



Dispositif final



Modélisation de la réflexion du rayonnement solaire par la parabole selon son inclinaison

Si les rayons arrivent avec un plus grand angle, il faudra sans aucun doute plus incliner la parabole. Par exemple pour des rayons qui arrivent avec un angle de 60° , un angle de 20° pour la parabole est le plus approprié. Donc la parabole doit être amovible.

Expérience et hypothèse 16 : La parabole va permettre d'augmenter considérablement la température intérieure du four ouvert vers le bas.

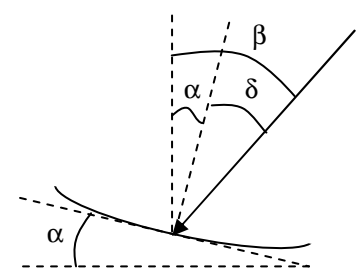
Protocole : Nous laissons monter le four en température jusqu'à stabilisation avec une incidence normale sur la vitre. Puis nous ajoutons la parabole dans les mêmes conditions d'ensoleillement tout en vérifiant que l'éclairement ne varie pas.

Résultats et interprétations :

- Dispositif sans apport vers le bas avec une incidence normale sur la vitre : 145°C ;
- Avec apport vers le bas : 175°C avec une température extérieure de 20°C , soit une augmentation de 30° sur un gradient de température de 125°C , donc un gain de 24%.

La parabole était inclinée de $\alpha=7^\circ$ par rapport au sol, alors les rayons arrivaient un angle de $\beta=37^\circ$ par rapport à la verticale, soit 53° avec l'horizontale. On en déduit donc d'après le schéma ci-dessus que les rayons lumineux arrivaient avec un angle de $\delta=\beta-\alpha=30^\circ$ par rapport à l'axe optique de la parabole. Ainsi, au mieux, la parabole récupère une puissance lumineuse $P_{\text{lum}} = E \cdot S' = E \cdot S \cdot \cos\theta = E \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \cos\theta = 850 \times \pi \times (0,47)^2 \times \cos 30 = 510 \text{ W} = 0,51 \text{ kW}$.

Cette puissance n'est pas entrée en totalité dans le four car l'incidence sur la vitre n'est pas toujours propice à une bonne transmission, ou encore parce qu'il y a absorption par le papier réfléchissant...



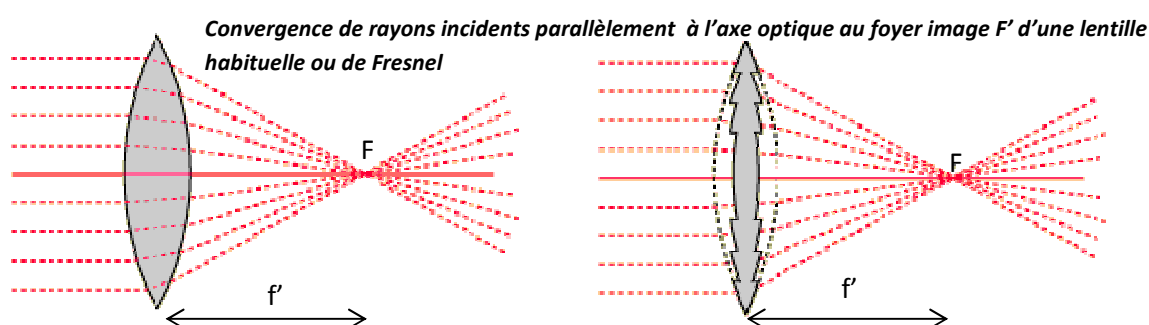
Incidence des rayons solaires sur la parabole

2) Comment limiter les pertes d'énergie vers l'extérieur ?

a) Comment éviter les pertes de rayons solaires par réflexion vers l'extérieur ?

Comme nous venons de le voir, il est possible de faire entrer un grand nombre de rayons visibles et infrarouges proches dans le four, mais ceux-ci ne vont pas tous atteindre le plat à chauffer ou la plaque noire en premier, mais vont peut être subir des réflexions sur les parois avant et voir même ressortir du four sans avoir été absorbés par l'un des deux. Nous avons donc pensé à utiliser une lentille de Fresnel pour concentrer la lumière entrante vers le récipient de cuisson.

Le principe de la lentille de Fresnel est assez simple car il repose sur celui d'une lentille convergente. En effet, lorsqu'elle est traversée par un faisceau de lumière parallèle, elle le fait converger en un point appelé foyer image F' . La distance entre le foyer image et le centre de la lentille est appelée distance focale image f' . L'avantage par rapport à une lentille simple, est que l'épaisseur d'une lentille de Fresnel est nettement réduite en la découpant en un ensemble d'anneaux concentriques de section prismatique connus sous le nom de *zones de Fresnel*. Pour chacune de ces zones, l'épaisseur est réduite, ce qui fait que la surface globale de la lentille n'est plus lisse mais se compose de plusieurs surfaces de même courbure, séparées par des discontinuités.



Expérience et hypothèse n°17 : Ainsi, nous avons pensé qu'une lentille de Fresnel, permettrait de concentrer les rayons vers le récipient de cuisson sans trop absorber d'énergie. Il nous suffirait de la placer sur la première vitre du four pour que celle-ci agisse. Évidemment, il nous a fallu nous poser un certain nombre de questions sur les propriétés de la lentille à choisir :

Certes nous souhaitons faire converger les rayons lumineux entrant vers le récipient, mais ils ne doivent pas être concentrés en un point, au risque de faire fondre le récipient, voir seulement brûler les aliments qu'il contient à ce niveau. C'est pourquoi, une distance focale de 30 cm à disposition dans le commerce, nous a semblé un bon compromis que ce soit pour une cocotte-minute qui est à seulement 10 cm de la vitre ou un plat à gâteau qui lui sera dans le fond du four soit à 50 cm de la vitre.

Protocole : Nous avons exposé un four jusqu'à stabilisation de sa température. Puis nous avons ajouté une lentille de Fresnel concentrant les rayons sur la plaque noire, sur la vitre extérieure.

Résultats : Le four n'a pas gagné en température après ajout de la lentille de Fresnel. Au contraire, il aurait même perdu deux à trois degrés.

Conclusion : La lentille de Fresnel ne permet pas d'augmenter la température intérieure du four, probablement parce qu'elle absorbe une proportion non négligeable de lumière.

Hypothèse et expérience 17 bis : Il est possible que si nous concentrons la lumière sur un récipient noir contenant de l'eau, la température de cette dernière s'élèvera plus vite.

Protocole : Nous avons laissé monter en température deux fours dans les mêmes conditions (incidence normale sur la vitre + réflecteurs), puis nous avons introduit dans chaque 1,00 L d'eau. Sur la vitre du premier, nous avons ajouté une lentille de Fresnel concentrant la lumière sur le bocal peint en noir.

Résultats :

Cas n°1 : En 20,0 min, la température de l'eau est passée de 21,3° à 41,7° avec une température moyenne de 106±2° et une température extérieure de 21°C. Ainsi on peut accéder à la puissance reçue par l'eau :

$$P_{\text{eau}} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m_{\text{eau}} C_{\text{eau}} \Delta T}{\Delta t} = \frac{1000 \times 4,18 \times (41,7 - 21,3)}{20 \times 60} = 71 \text{ W}$$

Cas n°2 : En 20,0 min, la température de l'eau est passée de 21,3 à 36,9° avec une température du four moyenne de $112 \pm 2^\circ$ et une température extérieure de 21°C.

$$P_{eau} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{m_{eau} C_{eau} \Delta T}{\Delta t} = \frac{1000 \times 4,18 \times (36,9 - 21,3)}{20 \times 60} = 54W$$

Conclusion : En concentrant plus les rayons sur le récipient, ce dernier absorbe plus la chaleur, ce qui parallèlement diminue la température intérieure du four, donc les pertes vers l'extérieur.

b) Comment optimiser l'effet du double vitrage ?

Nous avons pu remarquer qu'il s'effectuait de grandes pertes dues au manque d'étanchéité du double vitrage grâce à nos clichés infrarouges.

Expérience et hypothèse n°18 : Dès lors, nous nous sommes demandé si l'utilisation de joints au niveau des vitres ne serait pas un moyen de limiter ces pertes dues à la convection ?

Protocole : Pour vérifier cela nous avons donc renouveler l'expérience du 3)d) destinée à évaluer la nouvelle résistance thermique du four.

Mesures/interprétation : On peut remarquer que le coefficient directeur, donc la résistance thermique, est passé de 0.39 à 0.47 K.W⁻¹. Ainsi, la résistance est plus grande avec les joints qui ont induits des pertes plus faibles donc notre hypothèse est vérifiée.

$$E.R. = \frac{|R_{initiale} - R_{final}|}{R_{initiale}} \times 100 = \frac{|0.39 - 0.47|}{0.39} \times 100 = 20\%$$

c) Comment limiter les pertes par conduction ?

Comme nous pouvons le voir sur les photos prises par la caméra infrarouge, il y a des pertes importantes sur les cotés de notre four. On a remarqué que l'aluminium des parois a été replié sur les coins. Il est donc proche de l'extérieur. L'inconvénient est que l'aluminium possède une grande conductivité thermique (237 W.m⁻¹.K⁻¹).

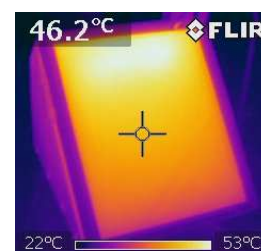
Expérience et hypothèse n°19 : nous pouvons supposer que cet aluminium en trop génère des pertes par conduction. En transformant nos parois pour obtenir seulement l'aluminium souhaité, nous espérons diminuer ces pertes.

Protocole : Nous avons donc renouvelé l'expérience précédente, pour déterminer la nouvelle résistance thermique du four ainsi transformé.

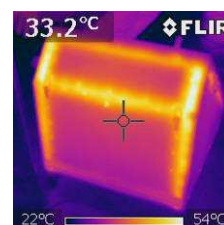
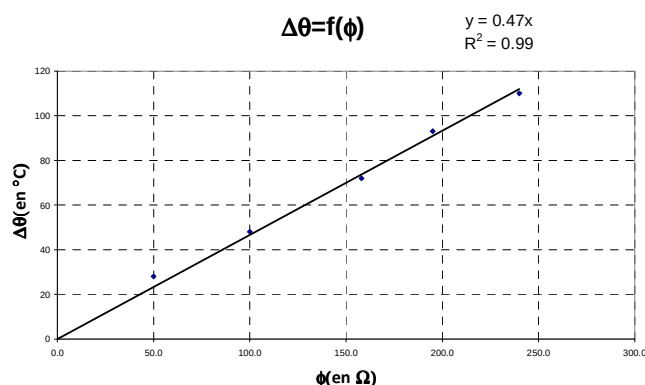
Mesures

Conclusion :

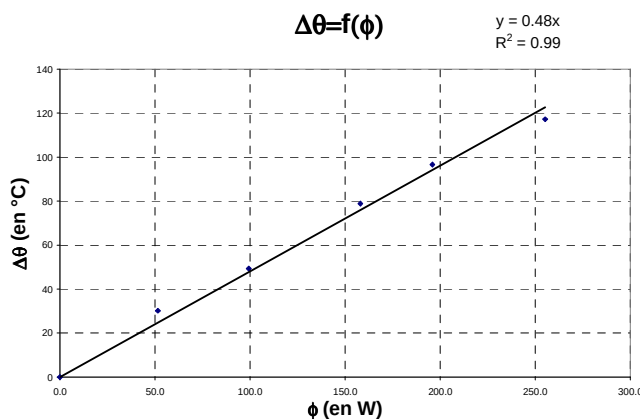
Suite au succès de l'étanchéification du double vitrage, nous nous attendions à une nette amélioration de la résistance thermique du four. Celle-ci ne varie quasiment pas en passant de 0,47 W.K⁻¹ à 0,48 W.K⁻¹, différence qui pourrait être simplement attribuée aux incertitudes de nos appareils de mesures, voir à un positionnement légèrement différent des sondes de température.



Cliché infrarouge de la vitre



Cliché infrarouge de l'arrière du four



Conclusion

Ainsi, nous pouvons affirmer que le four solaire BISS n'a pas été conçu à la va vite mais bien pour atteindre une température intérieure optimale. En effet, nous avons pu voir à travers nos différentes expériences que les matériaux et la géométrie des différentes composantes du four ont leur importance à la fois dans la collecte d'un maximum d'énergie solaire mais aussi dans sa conservation en son sein.

C'est avec une grande curiosité que nous poursuivons aujourd'hui ce projet dans le but d'apporter quelques améliorations au four dont certains tests sont encore en cours. Nous ne devons bien sûr pas perdre de vue que ce four a été avant tout pensé pour avoir un coût minimum et apporter une aide aux pays en voie de développement qui disposent d'un bon ensoleillement.

Remerciements

Nous ne serions jamais arrivés à un tel dossier sans l'aide de beaucoup de personnes. Ainsi, nous voudrions remercier dans un premier temps nos deux professeurs M. Thibault et Mme Letissier qui ont su tout au long de ce projet nous aider, et surtout prendre le temps de lire et relire un certain nombre de fois notre dossier tout en nous suggérant des modifications pour mieux mettre en valeur notre démarche et lier nos différentes expériences. Mais ce n'est pas tout, nous souhaitons dire un Grand Merci à la Fondation Dar Bellarj, et notamment sa directrice Maha Elmadi qui nous a accueillis avec une générosité remarquable. Nous remercions également Maryvonne Grunberg qui nous a logé dans un magnifique Riad au centre de la médina de Marrakech et dont l'hospitalité fut plus grande que nos espérances ; Yves Martin de Bolivia Inti, qui nous a fourni deux nouveaux fours de son stock personnel ; Monsieur Belzanne et Madame Moust, respectivement professeurs de physique-chimie et de mathématiques au lycée Jacques de Vaucanson qui nous ont apporté leurs lumières et qui ne furent pas des moindres ; Pascal Chiron, ancien président de Bolivia Inti, qui nous a aidé à perfectionner nos protocoles lors de nos débuts dans ce projet.

Sitographie

Notre site internet : <http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/four-solaire-et-principe>

Images :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_solaire pour l'image du spectre de la lumière solaire p.17

<http://www.aquaportail.com/definition-5212-gaz-a-effet-de-serre.html> pour l'image de l'effet de serre terrestre p.19.

<http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11631> pour le spectre en transmission du verre utilisé dans le bâtiment p.20.

<http://befr.saint-gobain-glass.com/b2c/default.asp?nav1=pr&nav2=double%20pane&id=1905> pour l'image sur le double vitrage p.24.

Définition :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique pour la conduction thermique ;

Partenaire

<http://www.boliviainiti-sudsoleil.org/>

Notre escapade à Marrakech :

<http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/echange-franco-marocain/665-tests-sur-les-fours-solaires-a-marrakech>

Annexe n°1 : Comment suivre simplement la course du Soleil ?

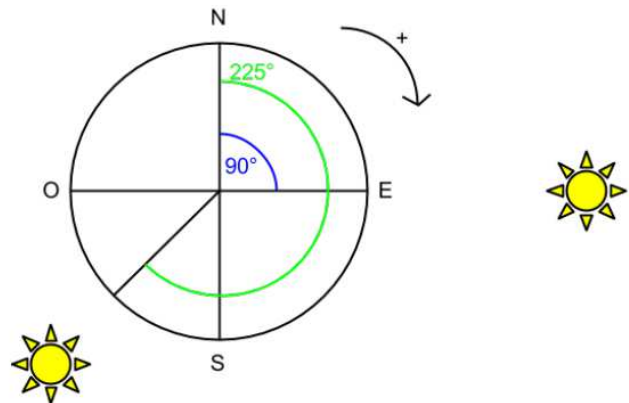
Lors de nos diverses expériences, nous avons constaté qu'il fallait fréquemment réorienter le four solaire par rapport aux rayons solaires. Certes, cela n'est pas pratique car nécessite une présence, mais aussi tourner verticalement ou horizontalement le four n'est pas si facile. Pour gérer l'hélio-synchronisation du four il va falloir avoir quelques notions sur la position du Soleil.

a) La position du soleil

On peut à tout moment repérer le Soleil dans le ciel grâce à deux angles qui sont l'azimut et l'élévation.

- **L'azimut** est l'angle formé par la droite partant de l'observateur et allant vers le Nord et la droite partant de l'observateur et allant vers le Soleil. On se placera dans un repère bidimensionnel.

Sur le schéma ci-contre, l'observateur se trouve au centre du cercle.



L'azimut est donc un angle pouvant prendre toutes les valeurs de 0° à 360° . En effet, nous mesurerons cet angle en partant du Nord, sur le schéma ci-dessus, et tournons dans le sens des aiguilles d'une montre.

Comme montré sur le précédent schéma, l'Est se trouve donc à 90° , le Sud à 180° , l'Ouest à 270° et enfin si on fait un tour complet (donc en revenant au Nord) on a bien 360° .

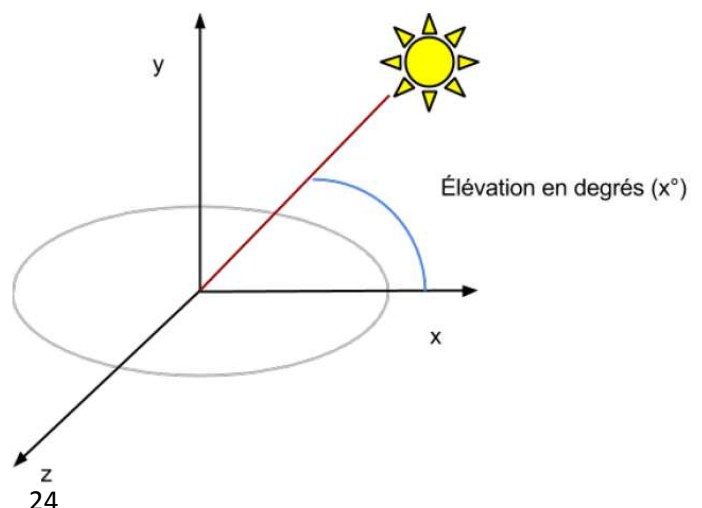
La valeur de l'azimut va dépendre de plusieurs facteurs :

- La position temporelle dans la journée, le Soleil se levant à l'Est et se couchant à l'Ouest, celui-ci va balayer les valeurs d'azimut sur au moins un demi-tour.
- La position géographique de l'utilisateur va modifier son orientation par rapport au Soleil et donc modifier l'azimut.
- La date à laquelle on observe le Soleil, la Terre tournant autour du Soleil en suivant une ellipse et ayant son axe Nord-Sud légèrement orienté, les valeurs d'azimut vont donc changer. Malgré cela, la principale source de modification restera bien sur l'heure de la journée.

- **L'élévation** est l'angle entre la droite partant du regard de l'utilisateur et allant à l'horizon et celle partant du regard vers le Soleil.

Cet angle va pouvoir prendre des valeurs allant de 0° à 90° , comptées positivement lorsque le Soleil monte dans le ciel, sinon par symétrie il peut également descendre jusqu'à -90° (maximum à l'hémisphère opposé).

Une certaine élévation peut être



intéressante à noter : lorsque le Soleil est au plus haut dans le ciel, cette valeur est appelée zénith. Cette-ci est atteinte lorsqu'il est 12h à l'heure solaire. C'est également à cet instant que les rayons du Soleil nous parviendront le plus directement et seront donc moins absorbés par l'atmosphère ce qui entraîne l'apogée de la puissance qu'ils délivrent.

Tout comme l'azimut, l'élévation dépend de quelques paramètres :

- L'heure de la journée : en partant de 0° avant que le Soleil se lève, les valeurs augmentent jusqu'à atteindre le zénith puis redescendent jusqu'au coucher du Soleil.
- La position géographique : un observateur se trouvant à un des pôles n'aura pas une amplitude de 90° alors que celui qui est à l'équateur s'en rapprochera.
- La date de l'observation : en hiver, nous n'avons pas la même amplitude d'élévation qu'en été.

Là encore, le facteur principal de variation de l'élévation est l'heure de la journée.

b) Mise œuvre d'un dispositif

Le but n'est pas de rendre onéreux un système à destination des pays en voie de développement, mais peut être plus pratique. Donc pour l'instant nous nous centrons sur un système mécanique simple. Lorsque le Soleil évoluera dans le ciel, nous orienterons le four en direction du Soleil par simple rotation dans le plan horizontal. De plus ce système nous permet également de positionner le four avec une bonne d'inclinaison.



Dispositifs pour permettre une rotation simple dans le plan horizontal et une inclinaison dans le plan vertical.

Annexe n°2 : Comment adapter le four solaire au séchage des aliments ?

Cette demande a été faite par le président de l'association DARNGH, Ali OUAUZIZ. Cette association a pour but de développer économiquement et socialement les zones rurales et pauvres de la région de Marrakech au Maroc. Le four solaire devait garder sa fonction première, à savoir cuire, mais devait pouvoir être transformé en séchoir solaire grâce à des pièces détachables.

Quel est le principe du séchoir solaire ?

Le séchoir solaire permet comme son nom l'indique de sécher les aliments et de les conserver d'une façon "naturelle" et "saine". Le séchage se fait par un courant d'air chaud ne dépassant pas 60°C sinon les aliments cuisent. Cependant, chaque aliment possède un temps de séchage qui lui est propre, différent en fonction de la quantité d'eau qu'il contient. Par exemple, une figue mettra moins de temps à sécher qu'une tomate qui contient beaucoup d'eau.

Le séchoir solaire possède de nombreux avantages de par sa construction et son utilisation:

- Il est facile à construire
- Il nécessite des matériaux simples et peu chers (bois, contreplaqué...)
- Il est économique et autonome car il ne nécessite que la présence du soleil
- Il est simple d'utilisation
- Il est adaptable au four
- Il n'est ni encombrant, ni lourd

Les étapes de la construction:

Nous avons tout d'abord réfléchi à des plans qui permettaient l'adaptation du séchoir à un four solaire sur la fin de l'année de première après l'arrêt des Travaux Personnels Encadrés. Aidées ensuite par un bénévole proche de la fondation Dar Bellarj au Maroc, suite aux discussions avec les bénévoles de l'association Bolivia Inti et nos camarades, nous avons complété ces plans qui nous ont permis d'arriver à l'idée finale assez rapidement. Pour cela, nous avons dû faire des modifications sur le four solaire. En effet, il fallait que de l'air puisse circuler, c'est pour cela que nous avons créé des ouvertures sur le haut et le bas du four avec un système adaptable constitué d'un grillage.



Transformation du four pour sécher les aliments

Il a ensuite fallu commencer la construction et trouver les matériaux. Nous avons choisi du bois et du contreplaqué pour la fabrication du caisson. Nous avons prévu un caisson constitué de plusieurs grilles à l'intérieur où nous pourrions poser les aliments ainsi qu'une porte pour ouvrir si besoin et avoir accès aux aliments.

Il a également fallu prévoir une sortie d'air en haut du caisson. Pour cela nous avons laissé une ouverture protégée par un grillage fin et réglable pour réguler la sortie d'air en fonction du besoin.



Aménagements finaux pour sécher les aliments

Annexe n°3 : Comment adapter le four solaire à la distillation des huiles essentielles ?

Au Maroc, ou dans d'autres pays en voie de développement, de nombreux agriculteurs cultivent des plantes pour leurs huiles essentielles, cependant faute de moyens, ils ne peuvent acheter le matériel nécessaire à la distillation pour produire les huiles et doivent passer par des entreprises qui distillent à leur place, ce qui réduit leurs maigres marges. Nous avons donc cherché une façon de distiller qui nécessite peu de ressources à la demande de l'association DARNGH. Or pour distiller, il faut faire bouillir de l'eau, et utiliser du bois pour la chauffer serait une très mauvaise idée pour l'environnement. Nous nous sommes donc tournés vers le four solaire. Cependant le soleil n'étant pas au rendez-vous cet hiver, toutes les mesures nécessitant les fours solaires ont été prises à Marrakech. Nous sommes partis avec un autre groupe qui étudie uniquement le fonctionnement du four solaire avec qui nous avons dû partager trois fours.



Dispositif final pour distiller à l'aide du four

Notre montage n'a plus grand chose à voir avec celui du laboratoire, et il a fallu accomplir un travail de recherche des matériaux et de compréhension de la plante elle-même.

Nos résultats ont prouvé qu'obtenir de l'huile essentielle de lavande à partir du four solaire est tout à fait possible. Nous remarquons également qu'en France, notre montage n'est valable qu'en été, puisqu'en hiver l'ensoleillement est trop faible.

Une solution pour distiller pendant toute l'année serait d'utiliser une parabole solaire, connue pour atteindre des puissances supérieures à celles du four solaire.



Distillation au moyen d'une parabole solaire

Annexe n° 4: Vaucanson sur les toits de Marrakech

La Nouvelle République - 05/02/2014

<http://www.lanouvellerepublique.fr/Indre-et-Loire/Communes/Tours/n/Contenus/Articles/2014/02/05/Vaucanson-sur-les-toits-de-Marrakech-1784569>



Le travail studieux des lycéens pour tester les fours solaires installés sur le toit de la fondation.



Emmanuel Thibault, professeur, Chloé Fabre, Justine Morel, Théo Ballu, Maxime Tanghe, Léopold Réchou, Maha Elmadi, directrice de la fondation et Léo Touchard. - (dr)

Dans le cadre de la poursuite de l'échange Franco-Marocain et de leur travail personnel éducatif, six élèves de première scientifique du lycée Jacques de Vaucanson, accompagnés de leur professeur de physique-chimie, Emmanuel Thibault, ont été invités à Marrakech du 24 au 27 janvier pour réaliser des mesures sur les fours solaires installés en 2012 et sur leur adaptation pour distiller des huiles essentielles à partir de plantes. Un groupe de trois élèves a travaillé sur les choix faits par Bolivia Inti dans le modèle de four solaire BISS et l'autre groupe sur une adaptation du four solaire à l'hydro distillation des huiles essentielles de lavande.

Cap sur la médina

Ils ont été accueillis à la fondation Dar Bellarj située dans la médina et dirigée par Maha Elmadi. Ils ont pu réaliser des mesures sur les trois fours qui avaient été installés sur le toit de la fondation. Plusieurs tests ont été nécessaires pour vérifier s'ils répondaient aux attentes techniques à partir de l'inclinaison des fours, vérification des réflecteurs et du double vitrage du four (etc.). Ensuite première tentative de distillation de lavande qui n'a pas donné de l'huile mais une eau parfumée à la lavande. Nos lycéens ont persisté et grâce à des modifications techniques ils ont pu augmenter la température des fours et ont réussi à réaliser une distillation de rose.

Le séjour des six lycéens financé par les parents et organisé sur place par Maryvonne Grunberg, représentante de la Ville de Tours à Marrakech, a été ponctué de visites, de temps de partage et de convivialité avec de jeunes marocains de la fondation et il y aura sûrement une suite pour ce projet de fours solaires.