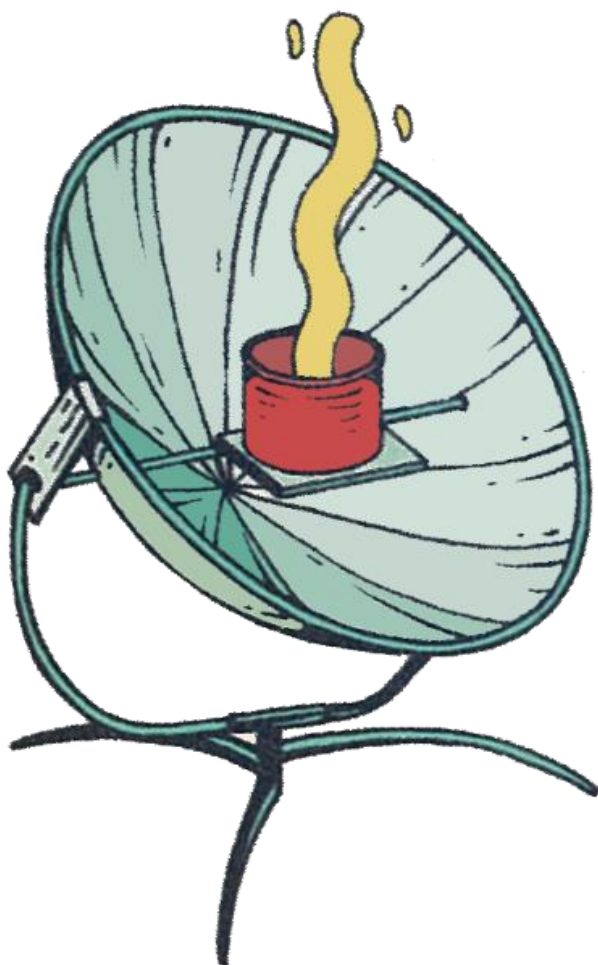


# Four Solaire autonome



## Table des matières

Présentation générale .....	5
Energie et Alimentation .....	5
Un projet Low-Tech.....	6
Avantage de la cuisson solaire.....	7
Les Types de fours solaires .....	8
Fonctionnement.....	10
Pourquoi une vitre sur notre four ? .....	10
Pourquoi une inclinaison à 45°.....	11
Outils de calcul de l'azimut et zénith du soleil en fonction d'un lieu : .....	13
Les Rayons incidents.....	14
Les principes de la thermique.....	16
Energie et puissance : .....	17
La capacité thermique.....	17
La conductivité thermique .....	18
La résistance thermique.....	18
La conduction thermique.....	19
La convection thermique .....	20
Le rayonnement thermique .....	21
Résumé des définitions .....	22
Analogie avec l'électricité .....	23
Simulation thermique.....	24
Représentation d'une cloison .....	25
Modèle Volumique du caisson .....	26
Détermination des Dimensions – Surfaces – Volumes .....	26
Mesure d'une surface avec FreeCad .....	26
Astuces.....	26
Etude de l'isolation .....	27
Les isolants biosourcés .....	28
Cuisson des aliments .....	29
Positionnement des réflecteurs .....	30
Les réflecteurs : nord et Sud .....	31
Les réflecteurs : Est et ouest.....	33
Cas des fours solaires Paraboliques.....	33
Four solaire combinant les deux systèmes .....	34
Bilan énergétique : Puissance et rendement .....	35

Energie Solaire .....	35
Éclairage énergétique .....	37
Quantité d'énergie à partir de l'irradiance.....	39
Energie Thermique .....	40
Problématique.....	41
Programmation par carte Micro:bit.....	41
Les entrées/sorties.....	45
1 <sup>er</sup> Programme : Afficher du texte sur l'écran LCD.....	46
2 <sup>e</sup> Programme : Le capteur de température et Buzzer .....	47
Travail à faire .....	48
Four solaire connecté.....	49
Afficher une variable depuis la Micro:bit.....	53
Pour aller plus loin... ..	56
Conclusion.....	58
La carte Arduino, qu'est-ce que c'est ?.....	60
Présentation d'Ardublock.....	62
L'IDE Arduino.....	62
Vérification et connexion de la carte .....	63
Mon premier programme ! Hello World.....	63
L'initialisation .....	64
Gestion des sorties .....	64
Digital Vs Analogique .....	64
Les conditions .....	65
Les variables .....	66
.....	66
Exercice : Capteur de lumière .....	66
Motorisation.....	67
Sortie PWM.....	67
Bloc .....	68
Faire varier l'intensité d'une led.....	68
Les moteurs à courant continu .....	68
Shield Arduino L293.....	69
Montage Electronique .....	70
Algorithme .....	71
Transmission du mouvement.....	73
Alimentation des composants.....	75
Caractéristiques du panneau .....	75

Comment fonctionne le photovoltaïque.....	75
Etude d'un panneau photovoltaïque .....	76
Identifier la <i>technologie de cellules</i> photovoltaïques.....	76
Caractéristiques électriques du panneau solaire.....	77
Rendement du panneau solaire avec la lampe .....	79
Puissance et rendement en extérieur.....	80
Quantité d'énergie à partir de l'irradiance.....	81
Valider la Simulation d'un panneau photovoltaïque .....	82
Problématique.....	82
Simulation d'un module photovoltaïque.....	82
Influence de l'irradiance sur un module photovoltaïque.....	83
Influence de la température sur un module photovoltaïque .....	83
Optimisation.....	84
Irradiance et stockage dans une batterie .....	84
Configuration du bloc « Irradiance » .....	84
Configuration du Maximum power point tracker .....	85
Caractéristiques de la batterie 12V LiFePo <sub>4</sub> .....	86
Caractéristique du panneau solaire.....	86
Influence de l'irradiance.....	88
La régulation de tension .....	89
Convertisseur DC-DC .....	89
Les impacts environnementaux liés à la production du silicium .....	94
Questions documentées .....	96
Matériel .....	98
Outillage .....	98
Plans .....	99
Cadre de la vitre .....	102



## Présentation générale

### Energie et Alimentation

L'énergie est au cœur du fonctionnement de notre société industrialisée. **Les combustibles fossiles en sont la source privilégiée**, puisque pétrole, gaz et charbon représentent à eux seuls plus de **80 % de la consommation énergétique primaire mondiale**<sup>1</sup>. Le système alimentaire n'échappe pas à cette dépendance aux énergies fossiles : **pétrole** pour le transport des produits d'un intermédiaire à l'autre, **électricité** pour faire tourner les usines agroalimentaires et les systèmes de réfrigération, **gaz** pour préparer les repas, **pétrole, gaz et électricité** à nouveau pour gérer les déchets, traiter les eaux usées...

Les chercheurs Heller et Keoleian<sup>2</sup>, ont calculé que, pour le système alimentaire occidental, il fallait dépenser 7,3 calories (une unité de mesure de l'énergie) sous forme d'énergie fossile pour récupérer 1 calorie sous forme de nourriture soit un EROI<sup>3</sup> de seulement 0,14 ! **Autrement dit, nous mangerions davantage du pétrole que de la nourriture.**

Concernant la cuisson des aliments, selon l'Atlas de la Cuisine Solaire, un Européen va dépendre à plus de **80 % des énergies fossiles**, de manière directe ou indirecte en consommant soit de l'énergie électrique, soit du gaz.

Selon la même source, utilisé en France de temps en temps en remplacement de la cuisson au gaz ou électrique, un four solaire permet d'éviter le rejet au cours de sa vie de quelques tonnes de CO<sub>2</sub> et de réaliser une économie d'énergie. Durant la vie d'un four solaire, son empreinte écologique et son prix sont donc largement amortis.



De plus les fours solaires sont loin d'être une solution marginale. Les trois principaux pays dans lesquels ce type de four est particulièrement bien implanté sont la Chine où quelque 140 000 unités sont écoulées par an, l'Inde qui présente la plus grande concentration d'entreprises qui fabriquent ce type de four, et, enfin, le Maroc où une unité de production a récemment été installée à Marrakech par P-Solar8 afin de produire en série des fours afin de fournir toute l'Afrique.

<sup>1</sup> <https://resiliencealimentaire.org/lempreinte-energetique-du-systeme-alimentaire/>

<sup>2</sup> Heller MC, Keoleian GA. 2003. Assessing the sustainability of the US food system: a life cycle perspective. Agricultural Systems 76: 1007-1041.

<sup>3</sup> EROI (« Energy Return On Investment ») ou en français TRE : taux de retour énergétique, est le ratio d'énergie utilisable acquise à partir d'une source donnée d'énergie, rapportée à la quantité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie.

## Le grand four solaire d'Odeillo, 1 000 kW

Le four solaire d'Odeillo dans les Pyrénées-Orientales, permet de concentrer l'énergie solaire pour obtenir l'équivalent de « 10 000 soleils » et 1 000 kilowatts ce qui permet d'atteindre des températures supérieures à 3 500 °C. C'est une installation du CNRS qui abrite le laboratoire PROMES14, dont les principaux axes de recherches sont les matériaux et conditions extrêmes ainsi que la conversion, le stockage et le transport de l'énergie.



## Un projet Low-Tech

Le four solaire présenté ici s'inscrit dans une démarche **Low-Tech**<sup>4</sup>. Les « low-tech » sont des technologies, services et savoir-faire qui répondent aux critères suivants :

- **Utile.** Une low-tech répond à des besoins essentiels dans les domaines de l'énergie, l'alimentation, l'eau, la gestion des déchets, les matériaux de construction, l'habitat, les transports, l'hygiène ou la santé.
- **Durable.** Robuste, réparable, recyclable, elle est pensée pour que son impact écologique et social soit optimal depuis la production, la distribution, l'usage et jusqu'à la fin de vie, ainsi qu'à tendre vers une sobriété numérique.
- **Accessible.** À l'inverse des high-tech, son coût et sa complexité technique ne sont pas prohibitifs pour une large tranche de la population.

Ainsi, le projet « **Four solaire autonome** » répondra aux problématiques suivantes :

- Comment consommer, produire et manger de manière **simple** et **responsable** ?
- Comment faire des choix **technologiques adaptés** ?
- Comment faciliter et contribuer concrètement à la **transition énergétique**, notamment dans le secteur de l'alimentation.



<sup>4</sup> Le Low-tech Lab est un programme de recherche et de documentation Open-Source visant à valoriser l'innovation : <https://lowtechlab.org/>

## Avantage de la cuisson solaire

Les cuiseurs solaires permettent de gagner du temps et de l'argent

- La lumière du soleil est gratuite. La cuisson solaire permet de conserver une énergie précieuse.
- Les casseroles sont faciles à nettoyer, la nourriture n'accroche pas.
- Un cuiseur solaire est facile à construire à partir de matériaux de récupération divers et peu coûteux.

Les cuiseurs solaires sont sûrs, pratiques et sains

- Ils ne causent aucun risque d'incendie.
- Ils ne dégagent aucune fumée lors de la cuisson.
- La plupart des cuiseurs solaires cuisent à des températures comprises entre 82°C et 121°C, idéales pour préserver les nutriments, la saveur et le goût des aliments et éviter qu'ils ne brûlent. La cuisson au bois ou au gaz, au contraire, dépasse les 260°C.
- La pasteurisation de l'eau est aussi possible grâce au cuiseur solaire. C'est une technique que chacun devrait connaître en cas d'urgence.

La cuisson solaire permet de sauver des vies dans les régions pauvres en énergie mais riches en soleil

- La cuisson solaire contribue à résoudre deux des problèmes majeurs dans le monde : l'aggravation du manque d'énergies pour la cuisson et le fléau des maladies liées à l'eau. La moitié de la population mondiale cuisine à l'aide du feu de bois.
- La pasteurisation de l'eau et du lait grâce au cuiseur solaire aide à réduire la contamination par le choléra et autres maladies liées à la consommation d'eau impropre, qui causent la mort de 50000 personnes par jour. L'OMS estime qu'environ 80% des maladies prolifèrent à cause d'une eau contaminée.

La cuisson solaire aide à préserver les forêts et les richesses de la terre

- Chaque cuiseur solaire peut sauver une tonne de bois par an dans les régions ensoleillées mais arides.
- Le four solaire ne connaît pas d'obsolescence programmée.



## Les Types de fours solaires

### Cuiseurs boîte

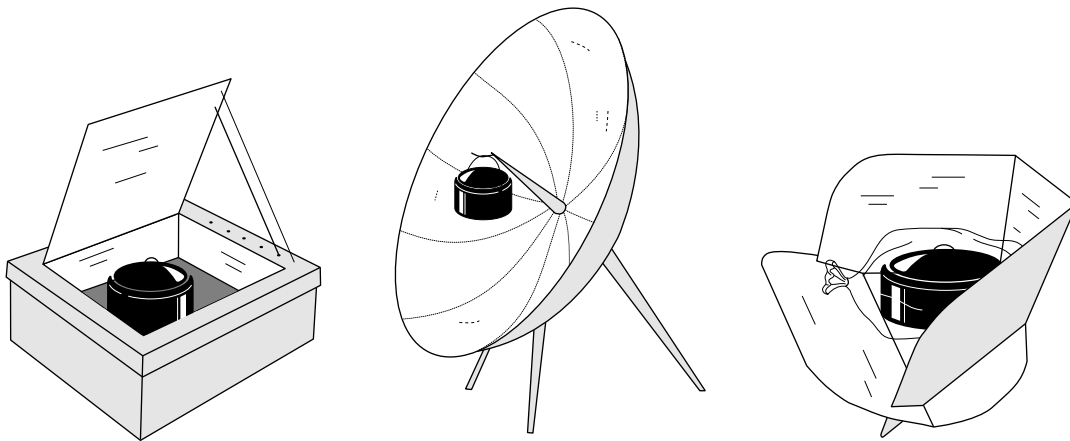
Les cuiseurs boîte sont les plus utilisés par les ménages. Plusieurs centaines de milliers de maisons en Inde en sont équipées.

### Cuiseurs à concentrateur incurvé

Souvent appelés cuiseurs paraboliques, ils atteignent rapidement de très hautes températures mais nécessitent un ajustement plus fréquent et des précautions plus nombreuses concernant la sécurité. Leur construction n'est pas mentionnée dans cette brochure. Cependant, plusieurs centaines de milliers de foyers en Chine occidentale les utilisent.

### Cuiseurs combinant les deux systèmes

Il s'agit des cuiseurs à panneaux. Ils combinent des éléments du cuiseur boîte et du cuiseur parabolique. Le CookIt est le plus utilisé d'entre eux.

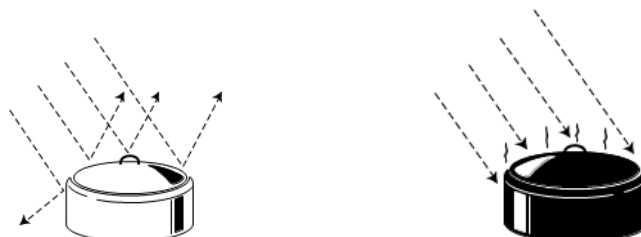


### Seule énergie utilisée : la lumière du soleil

La lumière du soleil est utilisée comme énergie de cuisson. Pour fonctionner, le cuiseur solaire a besoin d'être placé à l'extérieur, dans un endroit ensoleillé et protégé des vents violents. Le cuiseur solaire ne fonctionne pas la nuit ou les jours trop nuageux ou venteux.

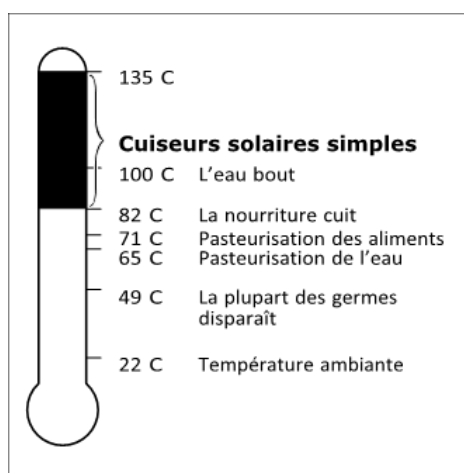
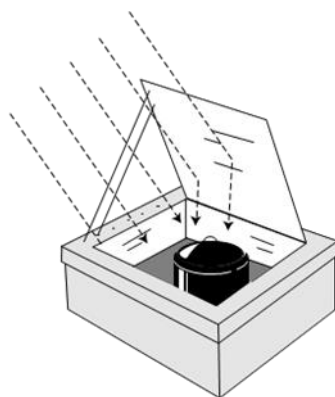
### Conversion du rayonnement solaire en chaleur

Les surfaces foncées absorbent mieux la lumière du soleil que les surfaces claires. C'est pourquoi les aliments cuisent mieux dans des récipients en métal foncé, peu profonds, fermés par des couvercles adaptés afin de maintenir la chaleur et l'humidité.





Nous retiendrons dans ce document la solution du four type « Boîte », mieux adapté à notre zone géographique.



Les cuiseurs solaires boîtes simples, utilisés dans des conditions normales, atteignent des températures allant de 82°C à 121°C, voire plus. Les aliments commencent à cuire entre 82°C et 91°C, ce qui est suffisant mais pas assez pour qu'ils ne brûlent ou perdent leurs nutriments. C'est pourquoi l'utilisation de ces types de cuiseur ne demande aucune surveillance : vous pouvez préparer le repas tôt le matin, le placer dans le cuiseur et l'y laisser jusqu'au moment du repas sans vous en soucier.

1-2 heures	3-4 heures	5-8 heures
Oeufs Riz Fruits Légumes Poissons Poulets	Pomme de terre Légumes (racines) Haricots Viandes Pain	Rôtis Soupes, Ragoûts

## Fonctionnement

Le four solaire est une boîte bien isolée thermiquement, au couvercle transparent et aux faces intérieures réfléchissantes : les rayons du soleil entrent par la vitre et se réfléchissent sur les bords de la boîte jusqu'à heurter la surface sombre de la marmite. L'énergie de ces rayons est alors transformée en chaleur, chaleur qui est emprisonnée dans la boîte. Pour augmenter le flux solaire capté, deux oreillettes recouvertes d'aluminium sont fixées de part et d'autre de la boîte afin de réfléchir la lumière sur la vitre qui doit être la plus perpendiculaire possible aux rayons du soleil. Sous les latitudes de la France métropolitaine, l'inclinaison du soleil par rapport à l'horizon est d'environ 60 ° l'été et de 30° l'hiver. Ainsi l'inclinaison optimale de la vitre en été sera de 30 ° et en hiver de 60°.

Le four solaire ne fonctionne qu'avec le rayonnement direct du soleil : nuages, brumes, poussière réduisent donc le rayonnement et prolongent le temps de cuisson

### Pourquoi une vitre sur notre four ?

La vitre sur le four a pour objectif de reproduire un effet connu qui augmente la température : **l'effet de serre**.

#### PRINCIPE DE L'EFFET DE SERRE



#### Qu'est-ce que l'effet de serre ?

Sans l'effet de serre, la température à la surface du globe n'excéderait pas -18°C. Autrement dit, heureusement qu'il existe, sans quoi il ferait plutôt frisquet sur Terre. En quoi consiste-t-il ?

On pourrait résumer les choses ainsi :

- Les rayons du soleil qui parviennent à traverser l'atmosphère atteignent la Terre et réchauffent le sol qui émet des rayons infrarouges ;
- Ce rayonnement repart vers l'espace, mais une partie de cette chaleur est bloquée par les gaz à effet de serre
- Cette énergie thermique est ensuite réémise vers le sol. Cette réaction en chaîne permet à l'atmosphère de se réchauffer et d'atteindre globalement 15°C.

Autrement dit, l'effet de serre est parfaitement naturel et sans lui, la Terre serait beaucoup moins accueillante !

#### Réchauffement planétaire et gaz à effet de serre.

L'utilisation massive d'énergies fossiles dégage une immense quantité de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane etc...), ce qui conduit à une augmentation des températures moyennes sur la surface du globe. Dans son dernier rapport<sup>5</sup> (2018), le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) décrit les effets dévastateur sur les écosystèmes et le monde vivant pour un réchauffement prévu entre 1,5°C et 2°C vers l'horizon 2100. Dans le pire des scénarios considérés, la hausse de température moyenne globale devrait atteindre 6,5 à 7 °C en 2100.

#### L'effet de serre en cuisson solaire

Transposons ce phénomène naturel à un cuiseur solaire. La surface de la Terre représente le fond du four et les gaz à effet de serre le vitrage.

<sup>5</sup> GIEC : Réchauffement planétaire de 1,5°C - Résumé à l'intention des décideurs :

[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf)

Comme dans la nature, le soleil frappe le fond du cuiseur. Bombardé par le rayonnement solaire, les atomes de la tôle d'acier se mettent en mouvement, générant une énergie que nous percevons comme de la chaleur.

Le rayonnement infrarouge libéré par cette réaction s'échappe vers l'extérieur. Mais la vitre le retient en majeure partie et le renvoie vers le fond du four, comme le font gaz à effet de serre de l'atmosphère. Ainsi, la chaleur est conservée et augmente progressivement dans l'appareil qui devient une véritable fournaise.

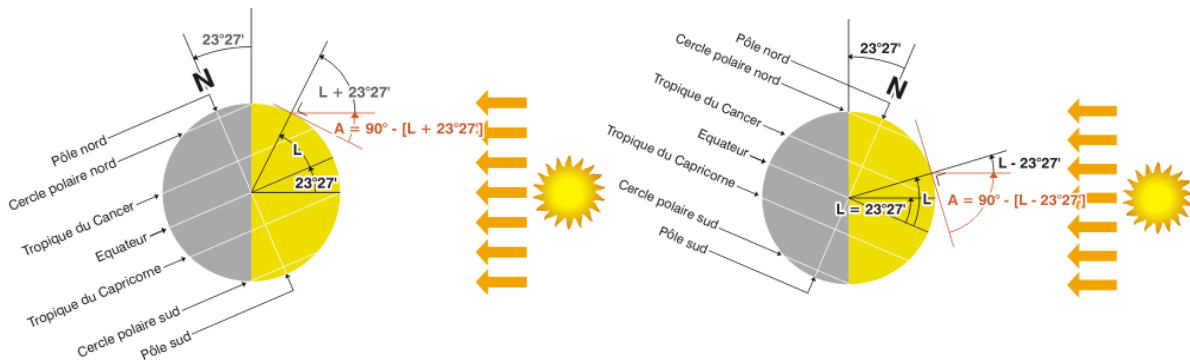
**C'est contre-intuitif, mais les rayons du soleil ne réchauffent pas directement l'air. C'est le revêtement (ou le sol) qui transmet, par conduction, son énergie thermique aux corps environnants.<sup>6</sup>**

## Pourquoi une inclinaison à 45°

Le soleil est une source offerte de chaleur et de lumière dont il faut profiter. Mais pour utiliser au mieux l'énergie solaire, il faut comprendre comment elle fonctionne.

### Inclinaison de la terre par rapport au plan orbital

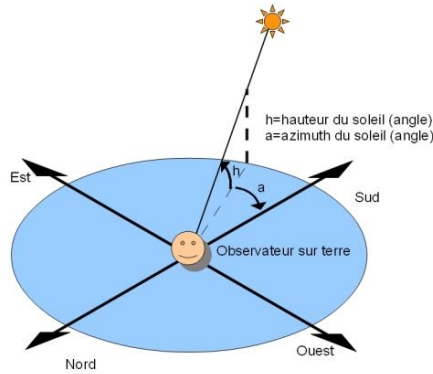
L'axe de la Terre est incliné d'environ 23,5 degrés par rapport au plan orbital correspondant à la rotation de la Terre autour du Soleil.



Selon le moment de l'année et l'endroit où l'on se trouve, les rayons du soleil atteignent donc un même endroit de la terre avec des inclinaisons différentes.

Un observateur se trouvant sur terre repère la localisation du soleil par deux paramètres appelés l'**azimut** et la **position** (hauteur ou zénith) du Soleil. La **position** est un angle qui varie de 0 à 90°, tandis que l'azimut varie de -45° à +45° (par convention l'angle est négatif à l'est et positif vers l'ouest). On peut ainsi représenter la hauteur du soleil en fonction de l'azimut pour un jour donné. Il s'agit d'une représentation paramétrique à **2 dimensions de la course du soleil**.

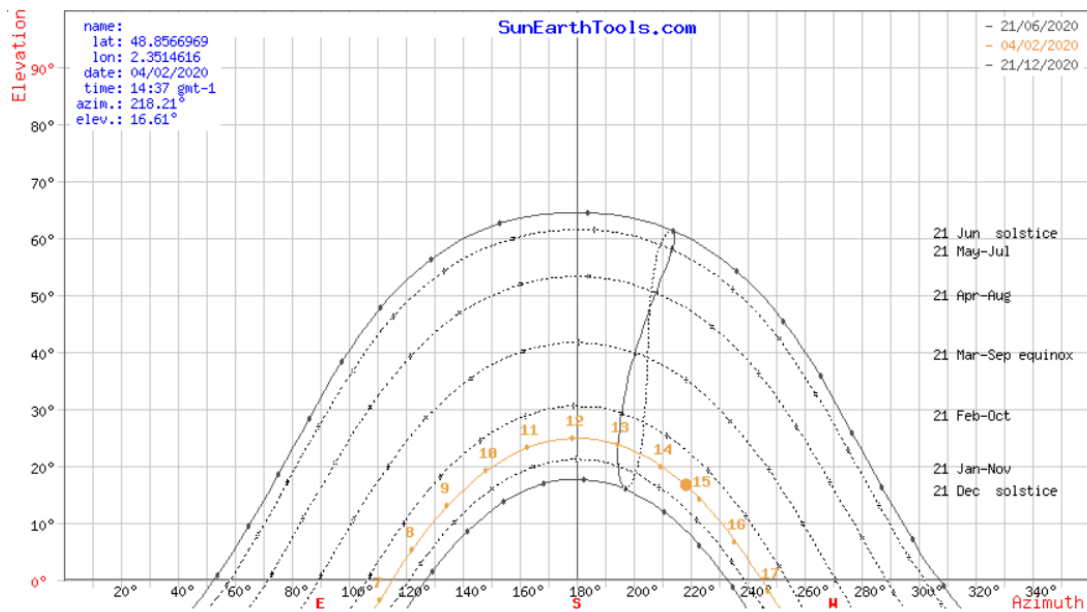
<sup>6</sup> <https://www.cuiseur-solaire.com/four-solaire-effet-serre/>



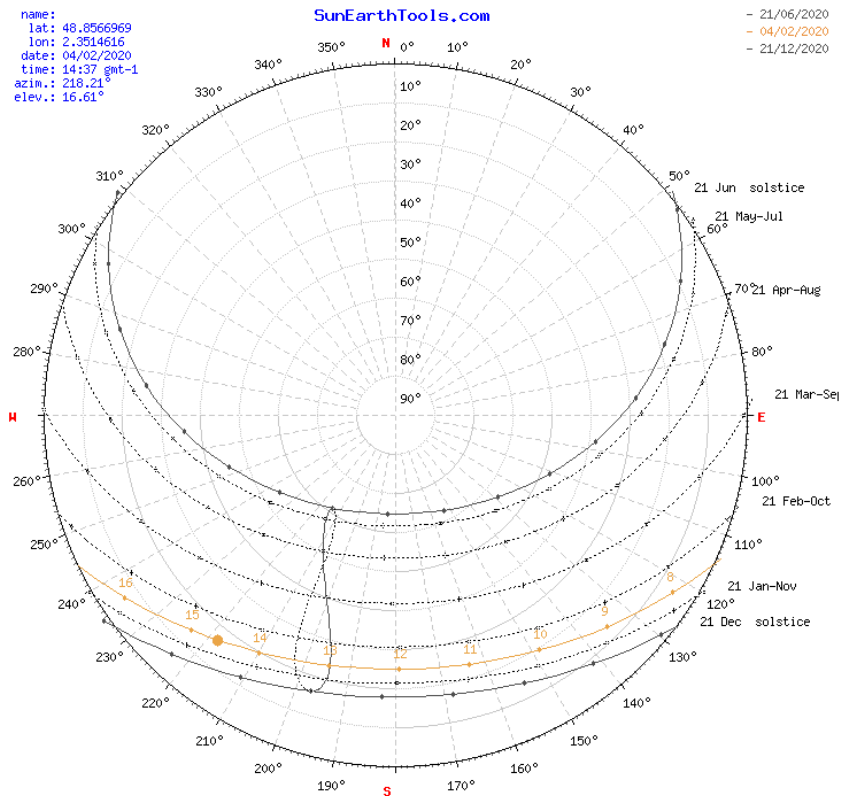
Nous pouvons supposer que compte-tenu de l'éloignement du Soleil par rapport au diamètre de la Terre, les rayons solaires arrivent parallèlement entre eux. Par rapport à l'équateur, les rayons arrivent donc avec un angle  $\theta$  par rapport à la normale au sol ou verticale d'un lieu, donc avec un angle  $\theta + \lambda$  en un lieu de latitude  $\lambda$  dans l'hémisphère nord.

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.

Exemple :







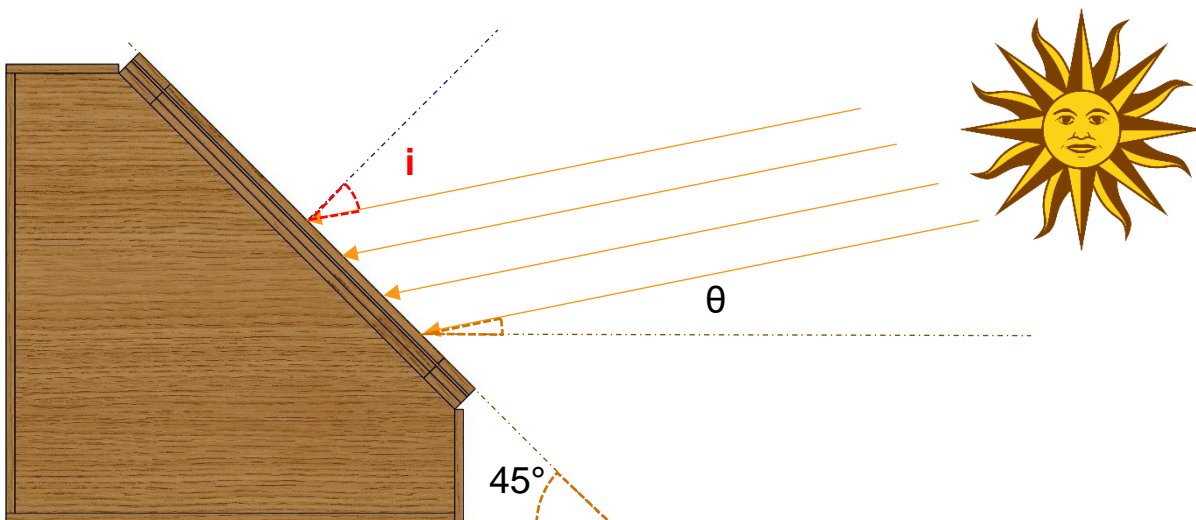
Outils de calcul de l'azimut et zénith du soleil en fonction d'un lieu :

<http://www.solartopo.com/orbite-solaire.htm>

[https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=fr](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr)

Calcul des rayons incidents sur le four

Nous supposons que notre four est posé à plat sur le plat terrestre à une latitude  $\lambda$  dans l'hémisphère nord. La vitre du four fait un angle de  $45^\circ$  avec l'horizontale.



A partir des ressources ci-dessus, complétez le tableau en fonction de votre position (ville) :

Position	Jour et heure	Latitude (degré°)	Zénith (degré°)	Angle d'incidence sur la vitre (degré°)
	Solstice d'été à midi			
	Solstice d'hivers à midi			
	Equinoxe de Printemps à midi			
	Equinoxe d'Automne à midi			

## Les Rayons incidents

La vitre de notre four a un effet déterminant comme nous l'avons vu avec l'effet serre. Mais toute surface vitrée n'est pas totalement transparente aux rayons lumineux. La vitre et l'air sont en effet deux **milieux** différents. En effet lorsqu'un rayon arrive sur une surface de séparation entre deux **milieux** avec un angle trop important, il peut être totalement réfléchi, et aucun rayon n'est alors réfracté.

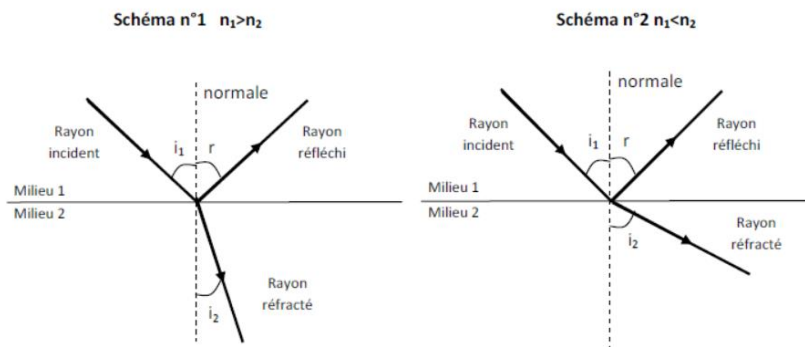
### Loi de Snell-Descartes

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 loi de Snell-Descartes :

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$

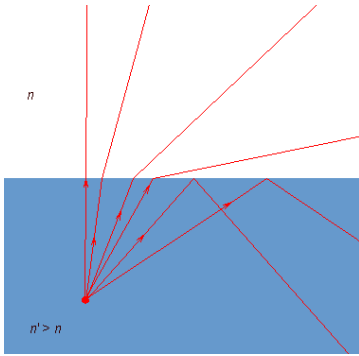
Avec

- $i_1$  : angle d'incidence
- $i_2$  : angle de réfraction
- $n_1$  : indice du milieu 1
- $n_2$  : indice de réfraction du milieu 2.



Pour  $n_1 > n_2$  (et respectivement  $n_1 < n_2$ ) le rayon réfracté (ou incident) se rapproche plus rapidement du dioptre que le rayon incident (ou réfracté). Quand le rayon réfracté (ou incident) se retrouve mathématiquement sur le dioptre (sa limite) il y a alors **réflexion totale**.

De plus le pourcentage de la lumière réfractée varie selon l'angle d'incidence. En effet, les pourcentages de lumière réfléchi et transmise ou réfractée sont donnés par les coefficients de Fresnel.



Les **coefficients de Fresnel**, introduits par Augustin Jean Fresnel (1788-1827), interviennent dans la description du phénomène de réflexion-réfraction des ondes électromagnétiques à l'interface entre deux milieux, dont l'indice de réfraction est différent. Ils expriment les liens entre les amplitudes des ondes réfléchies et transmises par rapport à l'amplitude de l'onde incidente. Pour simplifier le coefficient de Fresnel nous donne un pourcentage  $R(\%)$  de la puissance des rayons lumineux traversant deux milieux différents

$$R(\%) = \frac{n_1 \cos i_1 - n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2}$$

## Travail demandée

A l'aide de vos recherches et des documents ressources répondez aux questions suivantes :

- Tracez sur Excel la courbe de  $i_2$  en fonction de  $i_1$ .
- Tracez sur Excel la courbe de  $R(\%)$  en fonction de  $i_2$ .
- Quels avantages et inconvénients apporte un double-vitrage.
- Mettez en place un protocole de mesure expérimental permettant de vérifier le passage des rayons lumineux à travers la vitre en fonction de l'angle d'incidence.
- Justifiez à l'aide de l'ensemble de vos calculs, de votre protocole expérimental et des documents, le choix d'une inclinaison de vitre à  $45^\circ$
- Conclure sur le fait que les rayons incidents doivent arriver sur la vitre du four avec un angle inférieur à  $45^\circ$  par rapport à la normale de la vitre
- Pourquoi les fours solaires des pays équatoriaux sont inclinés à  $30^\circ$  et ceux des pays scandinave et anglo-saxon à  $60^\circ$

# Isolation du Four Solaire

Nous allons étudier dans cette partie les moyens mis en œuvre pour minimiser les pertes d'énergie à l'intérieur du four et conserver une haute température.

## Les principes de la thermique

### Introduction : Chaleur et température

On confond souvent chaleur et température

**La température** : Dans un objet, quel qu'il soit, les molécules, les atomes qui le constituent ne sont pas immobiles. Cette agitation désordonnée des particules de l'objet est appelée agitation thermique. La température mesure le degré d'agitation des particules : plus les molécules d'un objet sont agitées, plus il est chaud. Moins elles bougent, plus il est froid. On mesure la température en degrés Celsius, ou Kelvin. Ou même Fahrenheit.

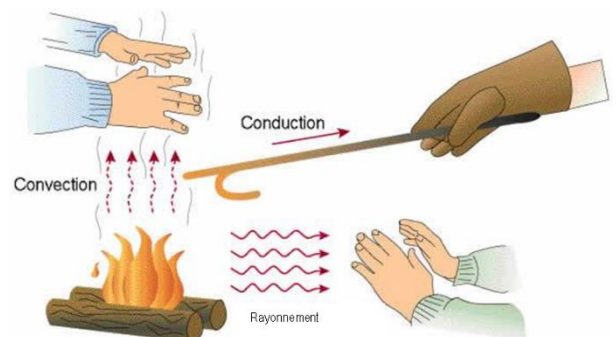
**La chaleur** : c'est la quantité de **transfert** de l'agitation thermique. C'est différent de la température. Les deux objets, en s'échangeant de la chaleur, changent de température. Est une énergie exprimée en joule

**Le flux de chaleur ou flux thermique (Watt)** : C'est un transfert de chaleur et donc d'énergie. La chaleur descend les températures (de la plus chaude vers la plus froide, comme un liquide qui descend les altitudes). Le flux thermique est un débit de chaleur.

**La chaleur** désigne l'énergie apportée à un corps qui a pour conséquence une augmentation de sa température. La chaleur va toujours de la température la plus chaude vers la température la plus froide.

La chaleur peut se propager :

- **par conduction**
- **par convection**
- **par rayonnement.**



La **conduction** est la transmission d'énergie ou de chaleur par la matière même de la paroi (sa partie solide). Plus le matériau est isolant, moins il y a de conduction.

La **convection** est l'échange entre un corps gazeux et un autre corps, qu'il soit liquide, solide ou gazeux. Au niveau d'une paroi, c'est le mouvement de l'air provoqué quand la température de ce dernier est différente de celle de la paroi. Le local chauffé cède de la chaleur à la paroi par convection.

Le **rayonnement** se manifeste quand des corps chauds émettent des rayons porteurs d'énergie (rayons infrarouges) qui sont absorbés par d'autres corps et alors transformés en chaleur. Plus le rayonnement est absorbé, plus il y a d'échanges thermiques.



## Energie et puissance :

**L'énergie** est la capacité d'un système à modifier un état, à produire un travail entraînant un mouvement, de la lumière, de la chaleur. L'énergie est une manière d'exprimer l'intensité de nombreux phénomènes : énergie électrique, énergie chimique, énergie solaire, énergie thermique, etc. Quelle que soit sa forme, l'énergie est une quantité qui s'exprime en **Joule**. L'énergie est une quantité indépendante du temps.

La **puissance**, quant à elle, est la capacité à mobiliser une quantité d'énergie en un temps donné. La puissance se mesure en **Watt** qui est équivalent à **1 Joule par seconde** (1 Watt = 1 Joule / 1 seconde).

## La capacité thermique

La capacité thermique (ou anciennement capacité calorifique) d'un corps est une grandeur qui mesure la **chaleur** qu'il faut lui transférer pour **augmenter sa température d'un kelvin**. Inversement, elle permet de quantifier la possibilité qu'a ce corps d'absorber ou de restituer de la chaleur au cours d'une transformation pendant laquelle sa température varie.

Elle s'exprime en **Joule/Kelvin [J/K]** et se note **C**

C'est une grandeur extensive : plus la quantité de matière est importante, plus la capacité thermique est grande.

Ainsi :

$$C = c_p * m$$

$$C = c_p * \rho * V$$

Avec

- C = Capacité thermique [J/K]
- m = masse du corps [Kg]
- $\rho$  = masse volumique [Kg.m<sup>-3</sup>]
- V = Volume [m<sup>3</sup>]
- $c_p$  = **capacité thermique massique** (anciennement appelée **chaleur spécifique**) en [J.K<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>]

Chaque matériau possède une valeur propre de capacité thermique massique :

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9\\_thermique\\_massique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Capacit%C3%A9_thermique_massique)

## La conductivité thermique














**La conductivité thermique** indique la quantité de chaleur qui se propage au travers un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de 1 degré entre les deux faces.

Elle s'exprime en **Watt/mètre.Kelvin [W/m.K]** et se note  $\lambda$

Plus  $\lambda$  est petit, plus le matériau est isolant.

L'air est un très bon isolant mais à condition d'être immobilisé. L'air en mouvement évacue la chaleur.

### Quelques exemples de valeurs de conductivité

Conducteurs	$\lambda$ W/(m.K)	
Cuivre	380,000	
Acier	52,000	
Granit	3,500	
Béton courant	1,750	
Plâtre enduit	0,460	
Pierre, marbre	0,290	
Bois dur	0,230	
Bois tendre	0,220	
Béton cellulaire	0,120	
Liège comprimé	0,100	
Verre	1,000	
Isolants	$\lambda$ W/(m.K)	
Laines minérales	0,030 à 0,040	
Air sec immobile	0,025	

## La résistance thermique

**La résistance thermique** représente la capacité d'un matériau isolant à s'opposer au flux de chaleur en prenant en compte son épaisseur, elle est exprimée en Kelvin par Watt (K/W)

$$R = \frac{e}{\lambda \cdot S}$$

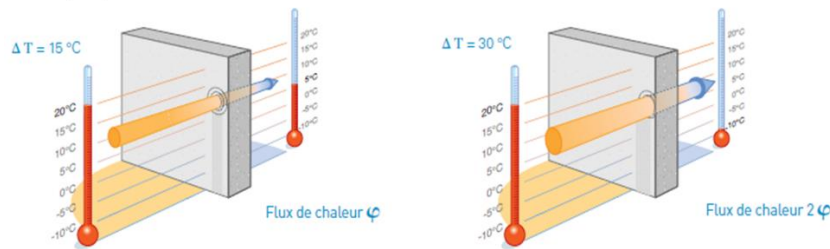
- R = résistance thermique [K/W]
- e = épaisseur du matériau exprimé [m]
- $\lambda$  = La conductivité thermique  $\lambda$  [W/m.k]
- S = surface d'échange thermique [m²]

Pour perdre moins d'énergie, il faut choisir un matériau isolant ayant **une faible conductivité thermique** et/ou **augmenter l'épaisseur de la paroi isolante**.\*

## La conduction thermique

**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 qui est un autre transfert thermique.

Elle peut s'interpréter comme la transmission de proche en proche de l'agitation thermique : un atome (ou une molécule) cède une partie de son énergie cinétique à l'atome voisin.

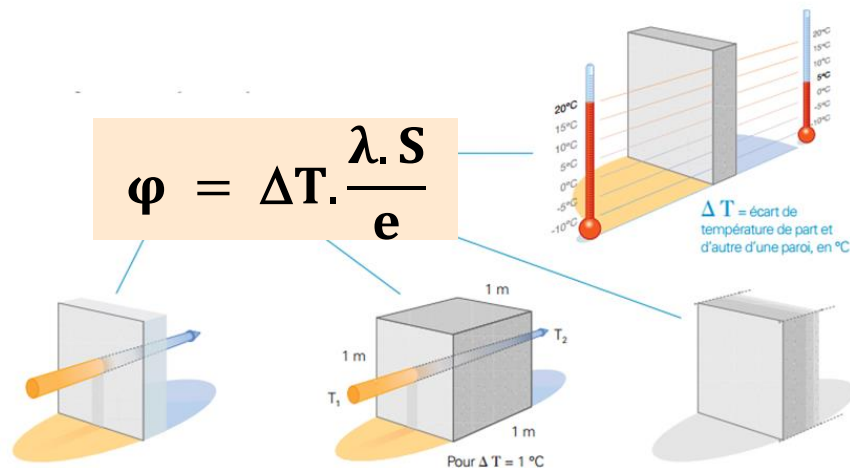


### Calcul du Flux de chaleur

Quand la température extérieure est de 5 °C et la température intérieure de 20 °C, la différence entre ces deux niveaux de température crée un phénomène physique de transfert d'énergie qui provoque la fuite de la chaleur. Cette fuite d'énergie ou de chaleur est appelée flux de chaleur et est symbolisé par  $\phi$  (phi).

Si, pour un écart de température de 15 °C, le flux de chaleur est égal à  $\phi$ , pour un écart de température de 30 °C (double), le flux de chaleur sera alors égal à  $2 \phi$ .

**Le flux de chaleur  $\phi$  en watt** qui passe à travers une paroi dépend de plusieurs paramètres :



- **$\Delta T$  = La différence de température** entre l'extérieur et l'intérieur : plus la différence de température est importante et plus il y a de déperditions.  **$\Delta T = T_1 - T_2$  avec  $T_1 > T_2$**
- **$e$  = L'épaisseur**  $e$  de la paroi : plus l'épaisseur est importante plus la paroi est isolante.
- **$\lambda$  = La conductivité**  $\lambda$  du matériau : plus la conductivité  $\lambda$  est faible et plus la paroi est isolante.
- **$S$  = La surface**  $S$  : plus la surface du mur est grande et plus le flux de chaleur augmente

Pour perdre moins d'énergie il faut :

- **Choisir un bon matériau isolant.**
- **Augmenter l'épaisseur de la paroi.**

## La convection thermique

La **convection thermique** est l'échange entre un corps gazeux et un autre corps, qu'il soit liquide, solide ou gazeux. Au niveau d'une paroi, c'est le mouvement de l'air provoqué quand la température de ce dernier est différente de celle de la paroi. Le local chauffé cède de la chaleur à la paroi par convection.

La **résistance thermique de convection** entre une paroi et le fluide à grande distance de la paroi, pour une surface d'échange  $S$  en mètres carrés ( $m^2$ ) s'exprime :

$$R_c = \frac{1}{h \cdot S}$$

- $R_c$  = Résistance thermique de convection
- $h$  = Coefficient de convection thermique [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
- $S$  = surface d'échange thermique [ $m^2$ ]

Le **coefficient de convection thermique** ou coefficient de transfert par convection est un coefficient de transfert thermique. Il permet de quantifier un transfert de chaleur réalisé par un phénomène de convection au sein d'un fluide en mouvement (contre une paroi froide ou chaude, ou au-dessus d'une étendue d'eau par exemple). Le coefficient  $h$  n'est pas une propriété thermodynamique

Le tableau ci-dessous indique quelques valeurs type du coefficient de transfert thermique par convection:

	Coefficient de transfert thermique $h$ ( $W/m^2 \cdot K$ )
Air (convection naturelle)	5-25
Air/vapeur surchauffée (convection forcée)	20-300
Huile (convection forcée)	60-1800
Eau (convection forcée)	300-6000
Eau (bouillante)	3000-60,000
Vapeur (en condensation)	6000-120,000



## Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique se manifeste lorsqu'un matériau accumule de l'énergie, puis la rejette sous forme de radiations infrarouges. Plus un matériau accumulera de la chaleur, plus il rayonnera. Ce rayonnement, rendu possible grâce à l'émission d'ondes infrarouges, permet de **transmettre de la chaleur** d'un objet à un autre, sans contact direct.

En fonction de sa composition, un matériau peut plus ou moins absorber et renvoyer de l'énergie thermique. On parle alors de **degré d'émissivité du matériau**. L'émissivité d'un matériau représente donc sa capacité à absorber et à renvoyer de l'énergie selon une température et une longueur d'ondes infrarouges donnée.

**L'émissivité d'un matériau** (notée  $\epsilon$ ) est comprise entre 0 et 1. Plus l'émissivité d'un matériau est faible et proche de 0, plus le matériau sera isolant ( $\epsilon = 1$ , si le corps absorbe tout le rayonnement (= corps noir).  $\epsilon = 0$ , si le corps réfléchit tous les rayonnements et n'en absorbe aucun.

Le rayonnement d'un matériau permet de mesurer son émissivité. Il est ainsi possible de **connaître son pouvoir isolant**. Par exemple, l'installation de matériaux peu émissifs, tels que les métaux réfléchissants comme l'aluminium, le cuivre ou le zinc, sont à privilégier pour limiter la propagation de chaleur.

Au contraire, si l'objectif est d'accumuler de la chaleur naturelle, produite par les UV du soleil ou par d'autres sources de chaleur, les matériaux en verre ou en plastique présentent une forte émissivité thermique. Cela leur permet de rejeter une importante partie de la chaleur qu'ils ont pu accumuler.

**Gr** est la **conductance du rayonnement**. Pour des cas simples, Gr peut être calculé analytiquement. Les équations analytiques utilisent **émissivité du matériau**.

$$G_r = \epsilon * S$$

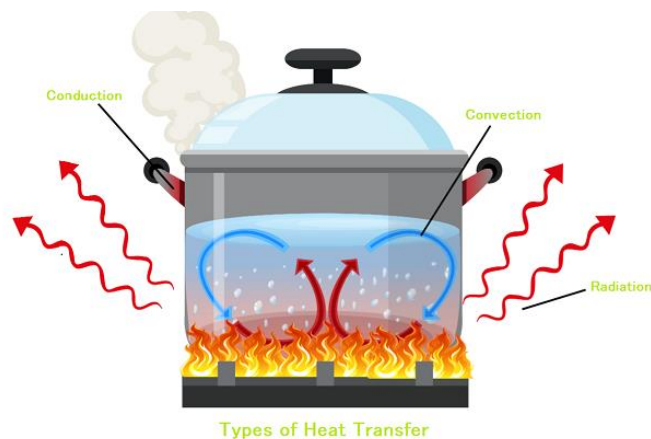
- Gr = conductance du rayonnement [m<sup>2</sup>]
- $\epsilon$  = L'émissivité d'un matériau
- S = surface d'échange thermique [m<sup>2</sup>]

Matériaux émissifs	émissivité d'un matériau (sans unité >1)
Verre	0.92
Plastique	0.84 à 0.94
Plexiglas	0.96
Quartz ou porcelaine vitrifiée	0.92
Tuile	0.97
Polypropylène	0.86
Plâtre	0.86
Caoutchouc	0.95
Brique	0.94

Matériaux isolant	émissivité d'un matériau (sans unité >1)
Aluminium	>0.10
Acier	de 0,16 à 0.70
Argent	0.03
Cuivre	entre 0,006 et 0,88
Zinc	de 0,04 à 0.20
Plomb	0,28
Brique	0.94

## Résumé des définitions

Grandeur	Définition	Symbole	Unité
<b>Chaleur</b>	Quantité de <b>transfert</b> de l'agitation thermique	T	K ou C°
<b>Flux thermique ou flux de chaleur</b>	Le flux thermique est un débit de chaleur.	$\phi$	Watt
<b>Capacité thermique</b>	La capacité thermique (ou anciennement capacité calorifique) d'un corps est une grandeur qui mesure la <b>chaleur</b> qu'il faut lui transférer pour <b>augmenter sa température d'un kelvin</b>	C	J/K
<b>Capacité thermique massique</b>	<b>Capacité thermique</b> d'un matériau rapportée à sa masse	Cp	J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup>
<b>Conductivité thermique</b>	<b>La conductivité thermique</b> indique la quantité de chaleur qui se propage au travers un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de 1 degré entre les deux faces.	$\lambda$	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
<b>Résistance thermique</b>	<b>La résistance thermique</b> représente la capacité d'un matériau isolant à s'opposer au flux de chaleur en prenant en compte son épaisseur	R	K.W <sup>-1</sup>
<b>Conduction thermique</b>	<b>La conduction thermique</b> (ou diffusion thermique) est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu		
<b>Convection thermique</b>	<b>La convection thermique</b> est l'échange entre un corps gazeux et un autre corps, qu'il soit liquide, solide ou gazeux.		
<b>Résistance thermique de convection</b>	La <b>résistance thermique de convection</b> entre une paroi et le fluide à grande distance de la paroi	Rc	K.W <sup>-1</sup>
<b>Coefficient de convection thermique</b>	<b>Le coefficient de convection thermique</b> ou coefficient de transfert par convection est un coefficient de transfert thermique	h	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
<b>Rayonnement thermique</b>	Le <b>rayonnement thermique</b> se manifeste lorsqu'un matériau accumule de l'énergie, puis la rejette sous forme de radiations infrarouges.		
<b>Emissivité</b>	L'émissivité d'un matériau représente sa capacité à absorber et à renvoyer de l'énergie	$\epsilon$	>1
<b>Conductance du rayonnement</b>	Capacité d'un matériau à rayonner	Gr	m <sup>2</sup>



Types of Heat Transfer

## Analogie avec l'électricité

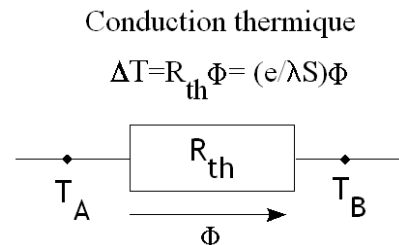
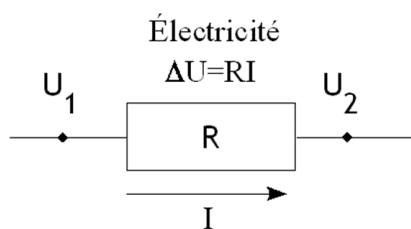
Il existe une analogie entre **le transfert d'énergie thermique et le transfert d'énergie électrique**. Le déplacement de charges électriques peut s'effectuer par deux modes : soit par contact et l'énergie électrique se transporte sous forme de courant, soit à distance sous forme d'onde électromagnétique. Le transfert de chaleur peut, lui aussi, se produire sous deux formes semblables :

- par contact : c'est la **conduction thermique**
- à distance : c'est le **rayonnement thermique**

Ainsi :

- La **tension** est remplacée par la **température**
- Le **courant** remplacé par la **conduction thermique  $\Phi$  (flux de chaleur)**
- La **résistance électrique** remplacée par la **résistance thermique**

	Thermique	Electrique
<b>Flux</b>	Flux de chaleur $\phi$	Courant $i$
<b>Résistance</b>	Résistance thermique $R$	Résistance électrique $R$
<b>Conditions limites</b>	Différence de température $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$	Différence de potentiel $\Delta V = V_2 - V_1$
<b>Équations</b>	$\Delta T = R \cdot \phi$	Loi d'Ohm $U = R \cdot i$



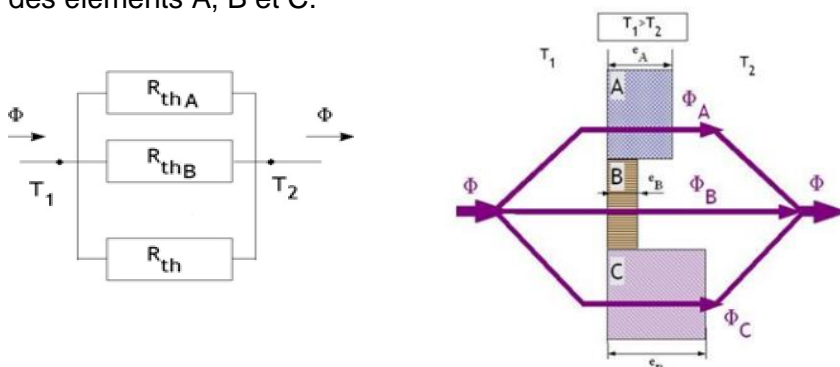
Association série

Soit un mur composé de  $n$  couches de matériaux différents :  $R_{\text{serie}} = R_{\lambda}^1 + R_{\lambda}^2 + R_{\lambda}^3 + \dots + R_{\lambda}^n$

La résistance thermique totale du mur est égale à la somme des résistances thermiques de chaque matériau.

Association parallèle

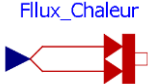
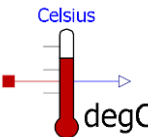
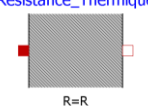
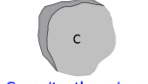
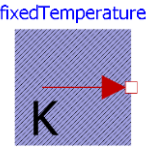
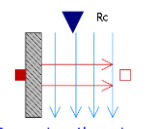
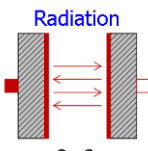
On considère des matériaux plans juxtaposés. Chaque matériau est homogène et limité par deux plans parallèles. C'est par exemple le cas d'un mur avec une fenêtre. Soit  $SA$ ,  $SB$  et  $SC$  les surfaces respectives des éléments  $A$ ,  $B$  et  $C$ .



$$\Phi = \left( \frac{1}{R_{thA}} + \frac{1}{R_{thB}} + \frac{1}{R_{thC}} \right) \Delta T$$

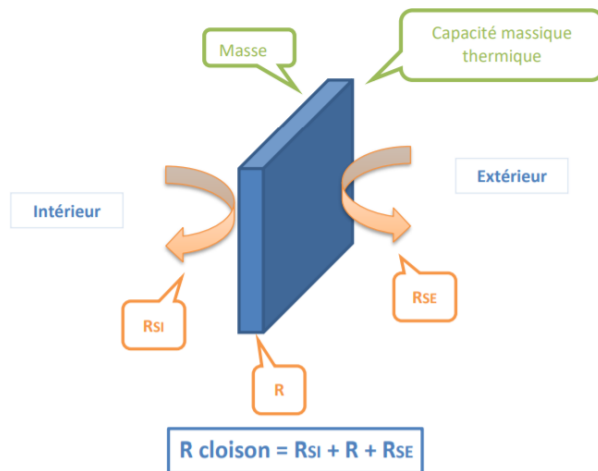
## Simulation thermique<sup>7</sup>

La bibliothèque *Thermal.HeatTransfer* d'OpenModelica possède un certain nombre de blocs permettant la simulation des transferts thermiques :

Bloc	Désignation	Chemin	Formule	Unité
	Flux de chaleur	<i>Modelica.Thermal.HeatTransfer.Sources.FixedHeatFlow</i>	<b>A configurer avec un bloc « Signal »</b>	<b>W</b>
	Température	<i>Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components.TemperatureSensor</i>	<b>Capteur de température</b>	<b>°C</b>
	Résistance Thermique	<i>Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components.ThermalResistor</i>	$R = \frac{e}{\lambda \cdot S}$	<b>K/W</b>
	Capacité thermique	<i>Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components.HeatCapacitor</i>	$C = cp * m$	<b>J/K</b>
	Température fixe	<i>Modelica.Thermal.HeatTransfer.Sources.FixedTemperature</i>	<b>Constante</b>	<b>°C ou K</b>
	Convection thermique	<i>Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components.ConvectiveResistor</i>	$R_c = \frac{1}{h \cdot S}$	<b>K/W</b>
	Rayonnement thermique	<i>Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components.BodyRadiation</i>	$G_r = \varepsilon * S$	<b>m²</b>

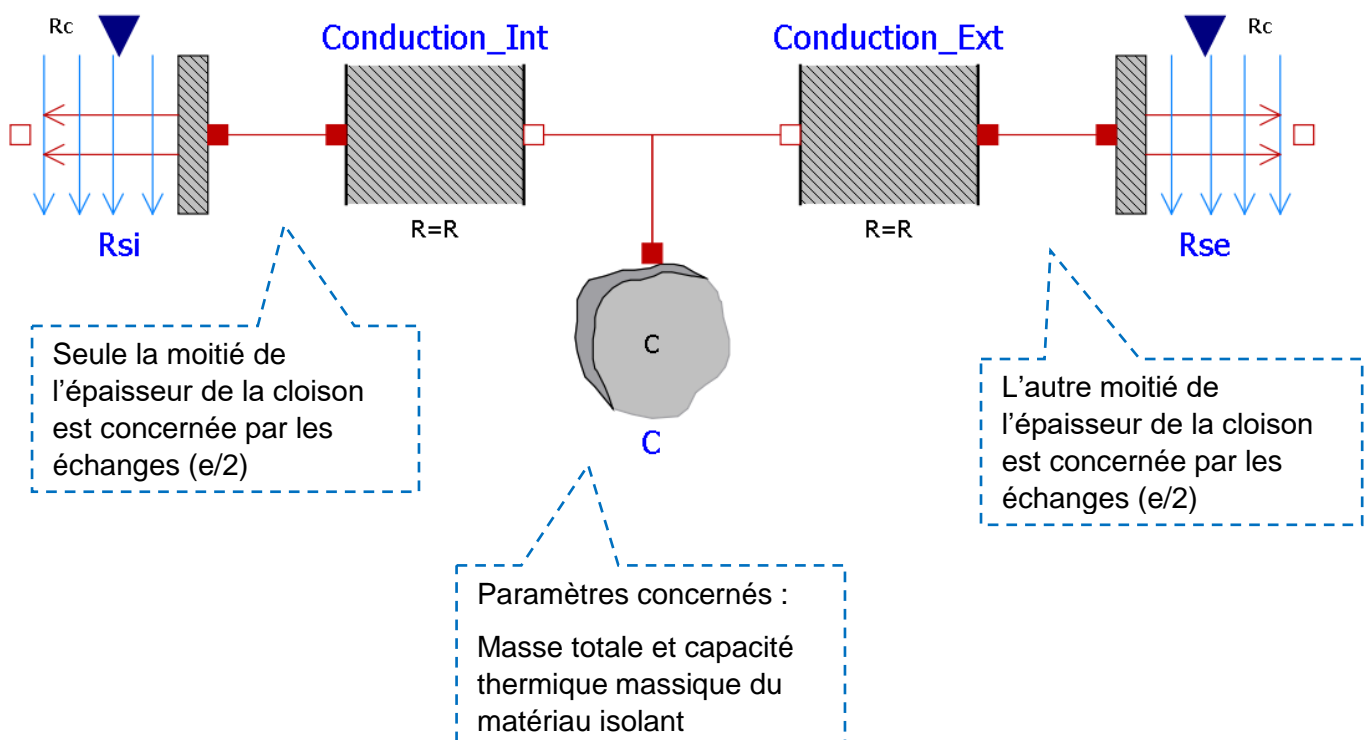
<sup>7</sup> Ressources SSI Lycée Claude Leblois : <http://ssilebois.e-monsite.com/pages/etude-de-cas-thermique/modelisation-matlab-thermique.html>

## Représentation d'une cloison

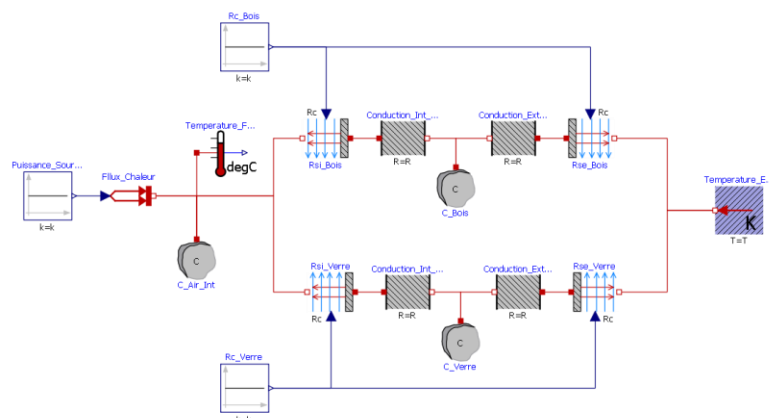


La résistance superficielle d'une paroi caractérise la part des échanges thermiques qui se réalise à la surface des parois par convection:  **$R_{Si}$**  pour les échanges sur la surface de paroi interne et  **$R_{Se}$**  pour les échanges sur la paroi externe.

On partage le donc modèle en 2 parties :



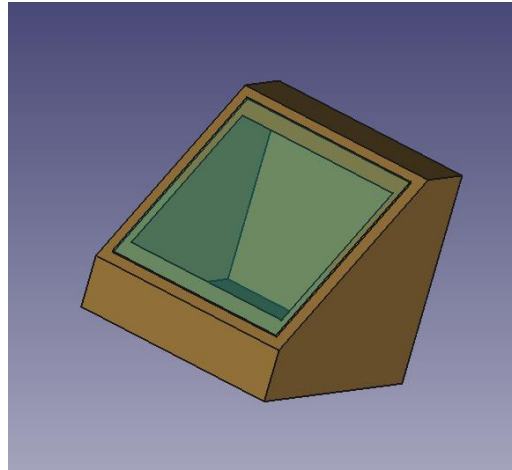
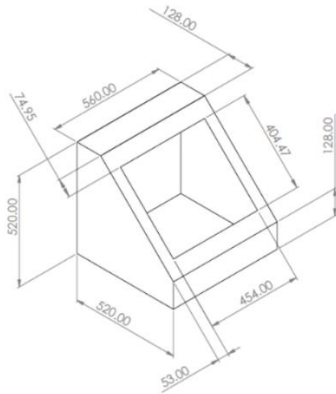
Ouvrez le modèle [Four Solaire Isolation.mo](#) :



## Modèle Volumique du caisson

### Détermination des Dimensions – Surfaces – Volumes

Ouvrez dans FreeCad le modèle [Four\\_Solaire3D](#)



Le modèle est constitué de 3 corps :

- Le caisson.
- La vitre
- Un volume d'Air intérieur



Vous pouvez « cacher » les corps en cliquant sur le nom du corps dans l'arborescence puis cliquer sur la **barre espace**

### Mesure d'une surface avec FreeCad

- Dans Outil → Gestionnaire d'Addon → Macro, installer la Macro **FCInfo**
- Dans Macro → Macro, cliquer sur **FCInfo** puis « Lancer »
- Une boîte de dialogue va s'ouvrir et vous donner tout un ensemble d'informations sur la pièce.
- Si votre connexion ne vous permet pas d'accéder aux Addons, cliquez sur Macro puis dans la boîte de dialogue en bas, allez chercher le dossier de l'activité puis cliquer sur FCInfo.FCmacro

Emplacement des macros de l'utilisateur :

Pablo/Lycees/Spécialité Science de l'Ingénieur/11 - Voyage dans la chaîne d'énergie/8 - Isolation du four solaire



### Astuces

#### Surface and Volume

Surface of the form	2005083.0 mm2
Surface of the face	0.0 mm2
Volume of the form	46864800.0 mm3
Unit	kilo gram
Weight	46.9 kg
Density	1.000 kg (by dm3)

Cliquer sur la surface que vous voulez calculer, le résultat apparaît dans « Surface of the face ». **Attention vous ne pouvez calculer qu'une face à la fois.**

Double-Cliquer sur « Caisson » ou « Vitre » dans l'arborescence pour connaître son volume. N'oubliez pas de renseigner la **densité** du matériau dans la boîte de dialogue pour connaître sa masse !

## Etude de l'isolation

**Question 1 :** Compléter le tableau ci-dessous des dimensions du four solaire :

Calcul du volume d'air à l'intérieur du caisson	
$V_{\text{air}} =$	(m <sup>3</sup> )
Masse d'air contenu dans le caisson	
À la température $T_{20} = 293,15 \text{ K}$ (20°C), où $\rho_{\text{air}20} = 1,204 \text{ kg/m}^3$	
$m_{\text{air}} =$	(Kg)
Surfaces mise en jeu dans les échanges thermiques avec l'extérieur	
$S_{\text{ext\_parois}} =$	(m <sup>2</sup> )
$S_{\text{ext\_vitre}} =$	(m <sup>2</sup> )
Surfaces mis en jeu pour les échanges thermiques avec l'intérieur	
$S_{\text{int\_parois}} =$	(m <sup>2</sup> )
$S_{\text{int\_vitre}} =$	(m <sup>2</sup> )
Volumes	
$V_{\text{parois}} =$	(m <sup>3</sup> )
$V_{\text{vitre}} =$	(m <sup>3</sup> )
Masses	
$m_{\text{parois}} =$	(kg)
$m_{\text{vitre}} =$	(kg)

On considèrera le four comme ayant une épaisseur constante  $e = 50\text{mm}$

**Question 2 :** Relever la **température extérieure** au thermomètre et renseigner la valeur dans le modèle OpenModelica.

**Question 3 :** Relever la **Puissance** de la source de chaleur et renseigner la valeur dans le modèle OpenModelica.

**Question 4 :** Trouver sur internet la **capacité thermique massique  $C_p$**  du bois et du verre et de l'air

**Question 5 :** Déterminer les **capacités thermiques  $C_{\text{Air}}$ ,  $C_{\text{bois}}$ ,  $C_{\text{verre}}$**  et renseigner les valeurs dans le modèle. Attention, pensez à renseigner également la valeur de la température initiale de ces capacités thermique

**Question 6 :** Trouver la **conductivité thermique  $\lambda$**  du bois et du verre.

**Question 7 :** Déterminer les **résistances thermiques  $R$  interne et externe** des cloisons de bois et de la vitre (n'oubliez pas l'épaisseur  $e/2$ )

**Question 8 :** Déterminer les **résistances thermiques de convection  $R_{\text{si}}$  et  $R_{\text{se}}$**  pour le bois et le verre. On considèrera le **coefficient de convection thermique comme de l'air en convection naturelle**

**Question 9 :** Lancer la simulation pour 3600s. Comparer la valeur de la **température** du four entre le modèle de simulation et la réalité. Commenter les écarts.

**Question 10 :** A l'aide de la caméra thermique, déterminer la température de la vitre et du bois. Comparer la valeur de ces températures entre celle de la simulation et celles données par la caméra thermique. Commenter les écarts.

**Question 11 :** A l'aide de la caméra thermique, déterminer **les zones de déperditions thermiques**. Colorier ces zones sur la mise en plan [MEP\\_FourSOlaire.pdf](#) (papier ou capture d'écran numérique)

Nous allons maintenant rajouter un isolant pour éviter les déperditions thermiques.



## Les isolants biosourcés

Les isolants **biosourcés** sont des isolants issus de matières renouvelables, comme la **biomasse végétale** ou **animale**, ainsi que d'autres **éco-matériaux**, ou de matériaux recyclés. L'emploi de ces isolants doit contribuer à la **réduction de l'émission des gaz à effet de serre**, leur production doit donc se faire de manière peu polluante. Toutes les caractéristiques des matériaux sont vérifiables sur leur **fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES)**. Un isolant biosourcé est en effet reconnu comme tel par le **Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)** qui recense les matériaux biosourcés. Il existe également un label « bâtiment biosourcé » depuis 2012 dans le code de la construction et de l'habitation.

**Les isolants biosourcés** présentent à la fois des performances thermiques comparables aux autres isolants mais aussi des atouts sur le plan environnemental.



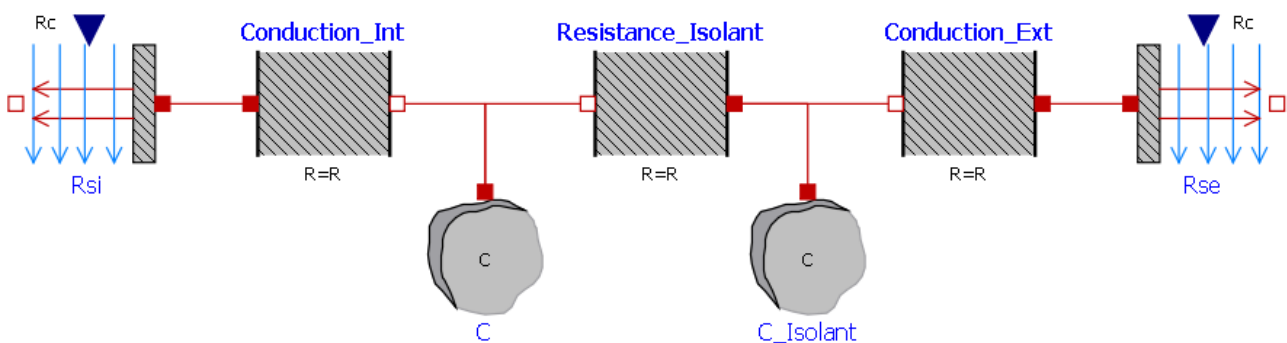
**Question 12 :** A partir de recherches sur internet, donnez les avantages et inconvénients d'un isolant biosourcé.

**Question 13 :** Etablissez une liste de 6 isolants biosourcés en renseignant leurs caractéristiques dans le tableau suivant :

Matériaux	Densité (kg/m³)	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.k)	Chaleur spécifique (J/kg.k)	Energie grise (kWh/m³)	Impact environnemental (kg eq CO2/m³)	Facilité d'obtention (échelle de 1 à 5)
Fibre de bois	560	0.036	2100	60	420	5
Verre	2500	1	720	8 400		5

**Question 14 :** A votre avis, quel serait le meilleur isolant biosourcés qui pourrait convenir au four solaire ?

**Question 15 :** Améliorer le modèle multiphysique du four solaire en rajoutant l'isolant biosourcé entre les parois de bois. Commenter les nouvelles valeurs des températures. Que penser de l'ajout de l'isolant ?

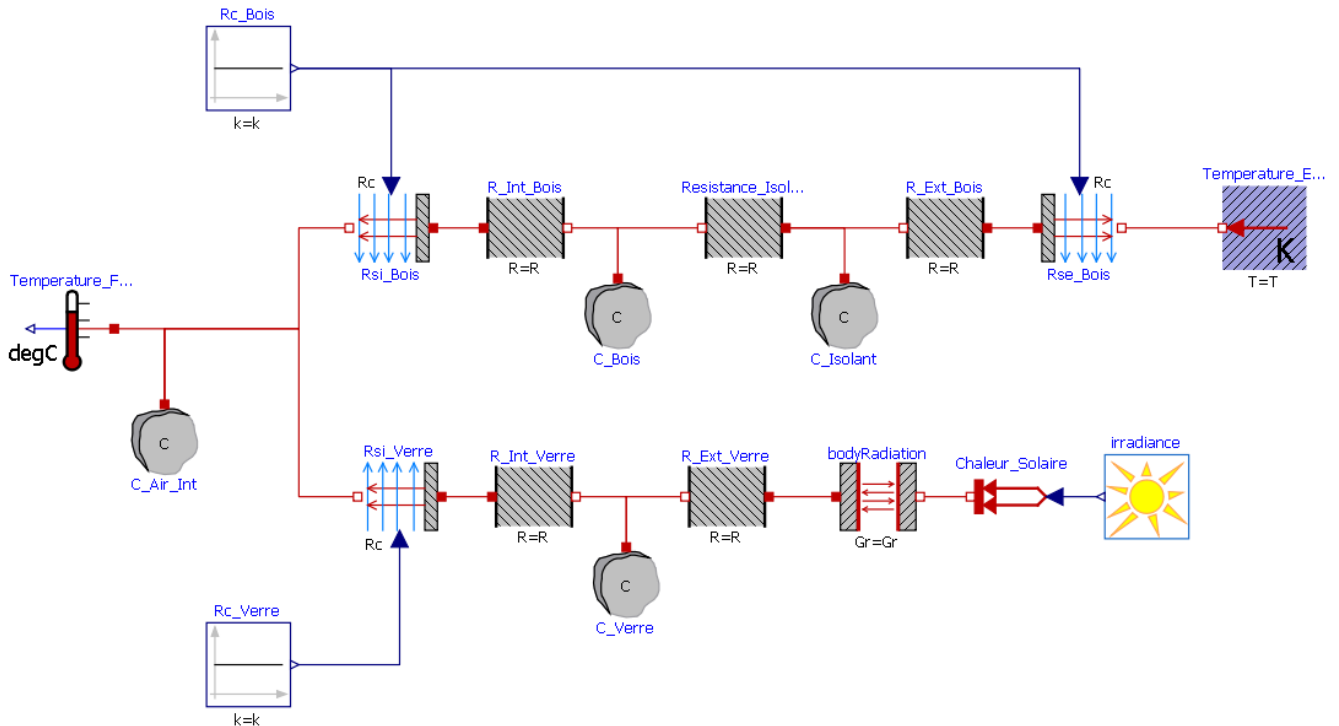




## Cuisson des aliments

Nous allons dans cette partie simuler le fonctionnement du four solaire sur une journée.

Ouvrir le modèle **Four\_solaire\_cuisson.mo** et la bibliothèque de composants **Photovoltaics.mo**



**Question 16 :** Combien y-a-t-il de secondes dans une journée. Remplir cette valeur dans les paramètres de simulation.

**Question 17 :** Considérant que les rayons du soleil frappent la vitre, calculer la **conductance du rayonnement Gr** de la vitre.

### Mise en situation :

Né un **19 juin**, Athanase souhaite organiser un goûter d'anniversaire avec ses amis **au Plateau du moulin à vent, 04870**. Pour que la fête soit une véritable réussite, il décide d'utiliser son four solaire pour faire un **fondant au chocolat** !

**Question 18 :** A partir des données de [PVGIS](#) et des données du problème, configurer le bloc *Irradiance* (Vous utiliserez l'irradiance **direct**).

Lancer la simulation sur une journée.

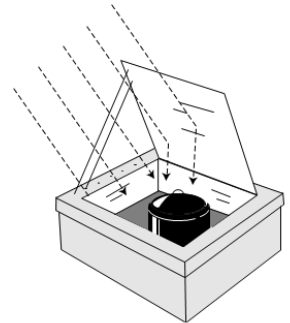
**Question 19 :** D'après le [Livret des recettes de cuisine du four solaire](#), quelle est la plage horaire qui permet de faire cuire le fondant au chocolat.

**Question 20 :** Commenter les résultats ? Quels sont les paramètres physiques qui ont été négligés dans cette simulation. Que proposez-vous pour améliorer le modèle ?

# Réflecteurs

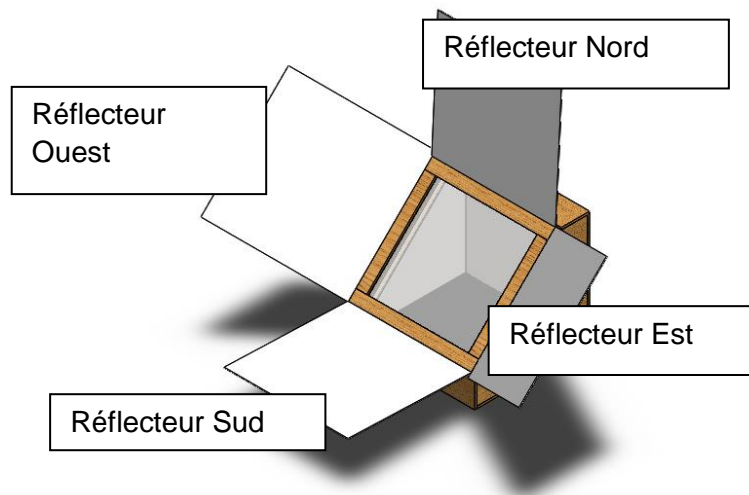
## Positionnement des réflecteurs

Comme nous l'avons vu dans la partie 1, la première chose à savoir est la latitude du lieu où votre four solaire sera utilisé. En effet, si vous vous trouvez au tropique au solstice d'été, le soleil monte rapidement pour être à la verticale au moment du zénith de la journée. Si l'on est au tropique au solstice d'hiver, le soleil monte beaucoup moins vite pour être à  $44^\circ$  environ au moment du zénith de la journée. À Nantes, par exemple le soleil va culminer à  $68^\circ$  environ, au zénith du solstice d'été, et à  $22^\circ$  environ au zénith du solstice hiver. Voilà quelques autres exemples par ville.



Ville	Hauteur solstice d'été	Hauteur solstice d'hiver
Lille	63	16
Paris	65	18
Lyon	68	21
Bordeaux	69	22
Marseille	70	23
Ajaccio	71	25

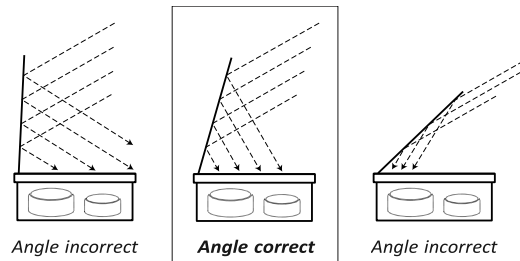
C'est pourquoi, suivant la latitude du lieu et la saison, le four solaire aura un fonctionnement différent. L'inclinaison de la vitre étant fixe et configuré sur  $45^\circ$ , l'ajustement des réflecteurs aura pour but de maximiser l'apport de rayons solaires dans le four.



## Les réflecteurs : nord et Sud

Les réflecteurs permettent, lorsque les rayons arrivent perpendiculairement à la vitre, d'augmenter considérablement la quantité d'énergie lumineuse récupérée et donc d'augmenter la température intérieure du four.

**Rappel : Les rayons réfléchis par les réflecteurs doivent toucher la vitre avec un angle d'incidence inférieur  $45^\circ$  pour qu'un pourcentage intéressant pénètre dans le four.**



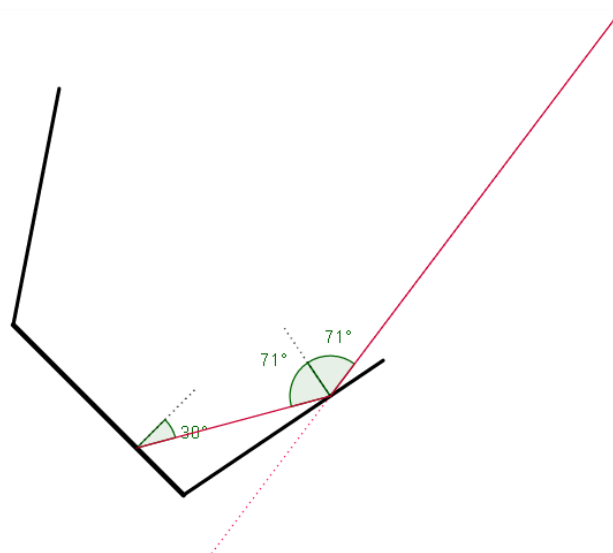
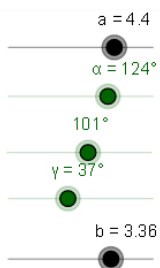
Nous allons nous intéresser aux deux réflecteurs principaux :

- Réflecteur Nord
- Réflecteur Sud

Ces réflecteurs sont influencés par le paramètre de position en **élévation** du soleil.

### Problématique

**A l'aide du modèle Géogebra, déterminer la position angulaire des réflecteurs pour les conditions suivantes en fonction de votre localisation.**



Modèle géogébra :

- Curseur a = Taille du four.
- $\alpha$  = Orientation en degré du réflecteur Nord
- $\beta$  = Orientation en degré du réflecteur Sud
- $\gamma$  = Position angulaire des rayons solaire par rapport à l'horizontal
- Curseur b = Positionnement du rayon solaire

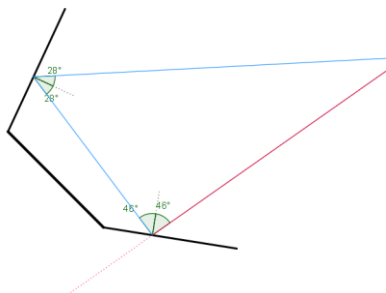
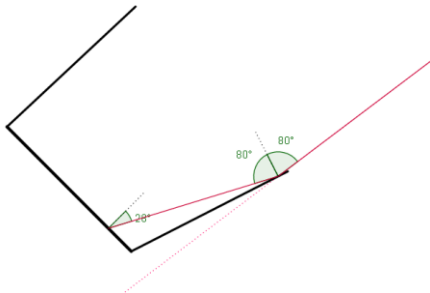
Outils pour l'obtention de la position du soleil :

[https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos\\_sun.php?lang=fr](https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr)

<http://www.solartopo.com/orbite-solaire.htm>

Ville :		Latitude :
Moment	Angle du réflecteur Nord	Angle du réflecteur Sud
8h : solstice d'été		
12h : solstice d'été		
18h : solstice d'été		
10h : solstice d'hiver		
12h : solstice d'hiver		
16h : solstice d'hiver		
9h : Equinoxe de printemps		
12h : Equinoxe de printemps		
17h : Equinoxe de printemps		
9h : Equinoxe d'automne		
12h : Equinoxe d'automne		
17h : Equinoxe d'automne		

Exemples :

	
Mauvaise orientation du réflecteur Sud : Les rayons du soleil ne frappent pas la vitre du four	Bonne orientation : les rayons frappent la vitre avec un angle $< 45^\circ$ par rapport à la normale.

Calcul

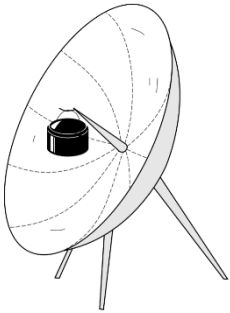
**Exercice : Déterminez l'équation géométrique de l'angle  $\theta$  (angle d'impact de rayon solaire par rapport à la normal de vitre) en fonction de l'angle d'inclinaison des rayons du soleil  $\gamma$  et des angles des réflecteurs.**

## Les réflecteurs : Est et ouest

Les réflecteurs Est et Ouest sont quant à eux influencé par la position en azimut du soleil pendant la journée.

**Travail : proposer un modèle géogébra permettant le positionnement des réflecteurs est et ouest en fonction de la position en azimut du soleil.**

## Cas des fours solaires Paraboliques



Cuiseurs à concentrateur incurvé, souvent appelés cuiseurs paraboliques, ils atteignent rapidement de très hautes températures mais nécessitent un ajustement plus fréquent et des précautions plus nombreuses concernant la sécurité. Leur construction n'est pas mentionnée dans cette brochure. Cependant, plusieurs centaines de milliers de foyers en Chine occidentale les utilisent

Les miroirs sphériques

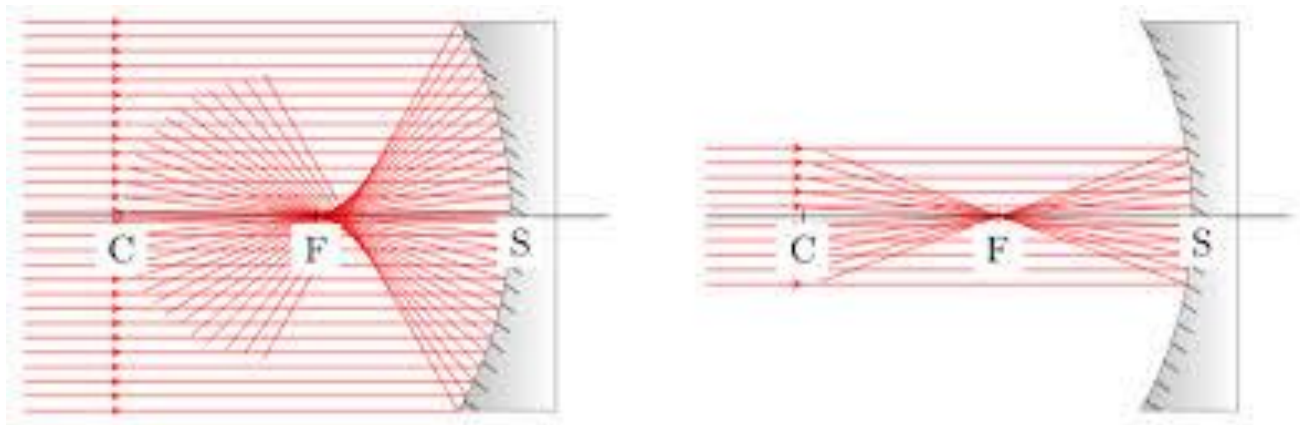
Un **miroir sphérique** est une portion de sphère réfléchissante. Il s'agit généralement d'une calotte sphérique limitée par une base circulaire dont le diamètre AB est appelé diamètre d'ouverture du miroir.

Le centre **C** d'un miroir sphérique est évidemment le centre de la sphère sur laquelle il s'appuie; son sommet est le pôle de la calotte. L'axe CS qui contient le centre et le sommet du miroir est l'axe principal du miroir; les autres rayons, tels que CD, représentent ses axes secondaires. Comme CS constitue un axe de symétrie pour le miroir, tout plan qui le contient est dit plan de section principale du miroir sphérique. On appelle par ailleurs angle d'ouverture d'un miroir sphérique le demi-angle au sommet  $w$  du cône de sommet C, ayant pour directrice le contour du miroir.

Les **miroirs concaves**, appelés aussi convergents; ce sont des calottes sphériques dont la surface réfléchissante est tournée vers le centre C. C'est le cas des fours solaires paraboliques.

Le **foyer du miroir**, car foyer principal image et foyer principal objet sont confondus : les rayons qui arrivent sur le miroir parallèlement à l'axe optique se coupent en F ; et inversement, les rayons qui passent par F et frappent le miroir se réfléchissent parallèlement à l'axe optique.

Dans le cas du miroir stigmatique, le foyer F se situe au milieu de SC.



## Questions

- Quels sont les 2 risques principaux, constatés lors de l'utilisation de ces fours et quel est le plus dangereux ?
- Calculer la distance du foyer pour un miroir sphérique de rayon de courbure de 6m et de diamètre 1m.

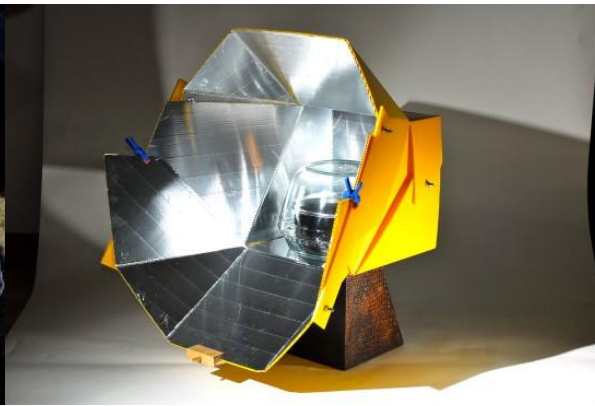
## Four solaire combinant les deux systèmes

**Proposez une amélioration des panneaux permettant de combiner les avantages d'un cuiseur boîte et d'un cuiseur parabolique.**

Vérifiez vos expérimentations en mesurant la température à l'intérieur du four.

## Quelques exemples

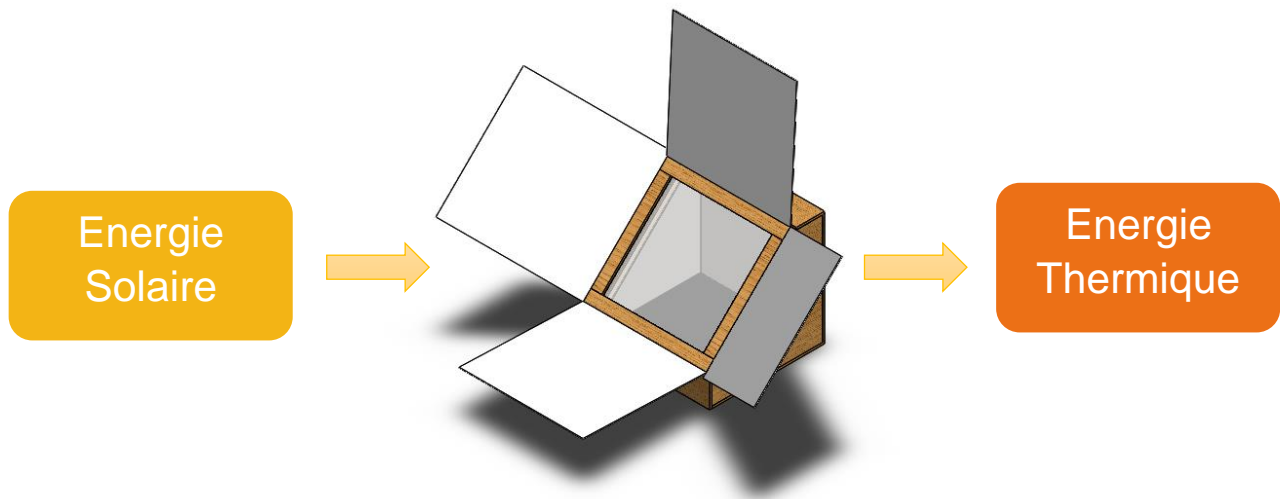
Il s'agit des cuiseurs à panneaux. Ils combinent des éléments du cuiseur boîte et du cuiseur parabolique. :





## Bilan énergétique : Puissance et rendement

Le four solaire agit comme un convertisseur d'énergie :



Nous allons donc étudier le transfert de cette énergie et son rendement.

### Energie Solaire

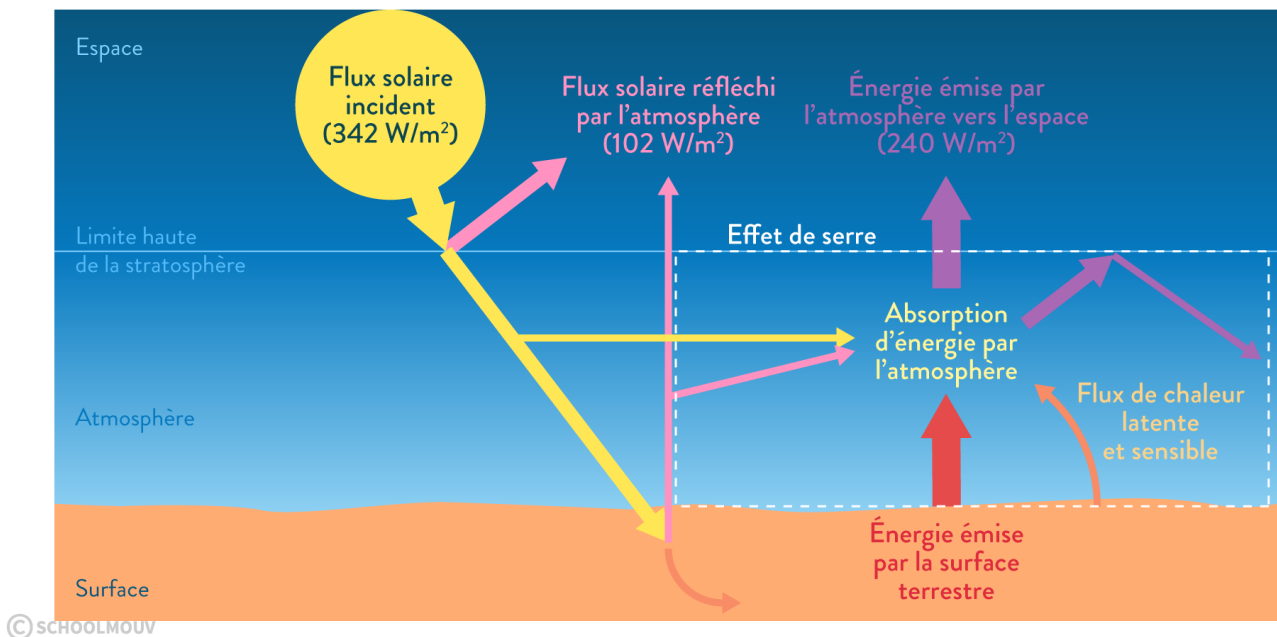
L'énergie solaire est la principale source d'énergie du système Terre. Si l'on dresse l'inventaire de toutes les sources d'énergie perdu et reçu sur terre on parle alors de **bilan radiatif**.

**L'énergie thermique** provient principalement du rayonnement solaire, les autres entrées énergétiques étant négligeables. Le rayonnement solaire reçu par les couches les plus élevées de l'atmosphère est d'environ **340 W/m<sup>2</sup>** en moyenne annuelle. Le Soleil étant une étoile de type G2, son spectre d'émission s'étend de 0,2 à 4 micromètres, c'est-à-dire de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le visible.

La puissance totale entrante dans le système sol-atmosphère-océan est estimée à **174 pétawatts (PW)**. Ce flux est composé de :

- Rayonnement solaire (99,97 %, soit 173 PW) : L'énergie ainsi reçue, répartie sur l'ensemble du globe terrestre, correspond à une puissance moyenne d'environ 340 watts par mètre carré. Le système sol-atmosphère-océan n'absorbe pas toute cette énergie incidente, une partie est réfléchi (effet albédo, fonction du sol, des océans, des nuages, des glaces et donc du climat). Environ 30 % de l'énergie solaire reçue est réfléchi sans être absorbée,
- Géothermie : la puissance issue de l'activité radioactive à l'intérieur de la Terre représente à peu près 0,025 % de la puissance totale reçue, environ 44,2 térawatts<sup>3</sup> ;
- Combustibles fossiles et fission radioactive réalisées par l'homme : ils représentent 0,009 %, soit 15 térawatts<sup>4</sup>. L'énergie totale utilisée à partir des sources commerciales d'énergie entre 1880 et 2000, y compris le pétrole fossile et l'énergie nucléaire, est estimée à  $13,9 \times 10^{21}$  joules<sup>5</sup> ;
- Les frictions dues aux marées : 0,002 % soit 3 térawatts.

## Bilan radiatif de la Terre (globe terrestre + atmosphère)

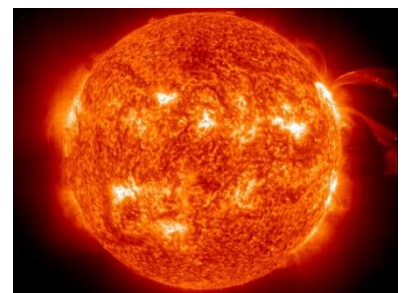


Le phénomène de réchauffement climatique constaté est dû à l'augmentation de la concentration en **gaz à effet de serre**, qui accentue à la fois l'absorption directe de la lumière infrarouge émise par le Soleil (mais pas forcément l'absorption globale Terre-atmosphère) et le forçage radiatif consécutif à l'absorption de l'énergie provenant de la Terre. L'augmentation globale de la température est entraînée par un léger déséquilibre du bilan radiatif : la quantité d'énergie absorbée par le système Terre/océan-atmosphère devient légèrement supérieure à celle réémise vers l'espace, si bien que la température moyenne augmente tant que perdure ce déséquilibre, en vertu du principe de conservation de l'énergie.

L'augmentation du forçage radiatif anthropique entre 1750 et 2011 est évaluée à 2,29 (1,13 à 3,33) W/m² par le cinquième rapport du GIEC

Les chiffres du soleil :

- Distance Terre-Soleil : environ 150 millions de kilomètres
- Diamètre : environ 1,4 million de kilomètres (Terre = 12 700 km)
- Masse : environ  $2 \cdot 10^{30}$  kg (Terre =  $6 \cdot 10^{24}$  kg)
- Masse volumique : 1,41 g/cm³ (eau = 1 g/cm³, Terre = 5,5 g/cm³)
- Puissance rayonnée par le Soleil : 1023 kW
- Énergie solaire reçue par la Terre : 1353 J/m²/s
- Température au centre du Soleil : environ 14 millions de Kelvins (0 K = -273,15 °C)
- Température de la " surface " du Soleil : environ 5 800 K - Composition : hydrogène (94 %), hélium (6 %), et des traces d'oxygène, de carbone, d'azote, de silicium, de néon, de fer et de soufre essentiellement ; mais tous les atomes sont présents.





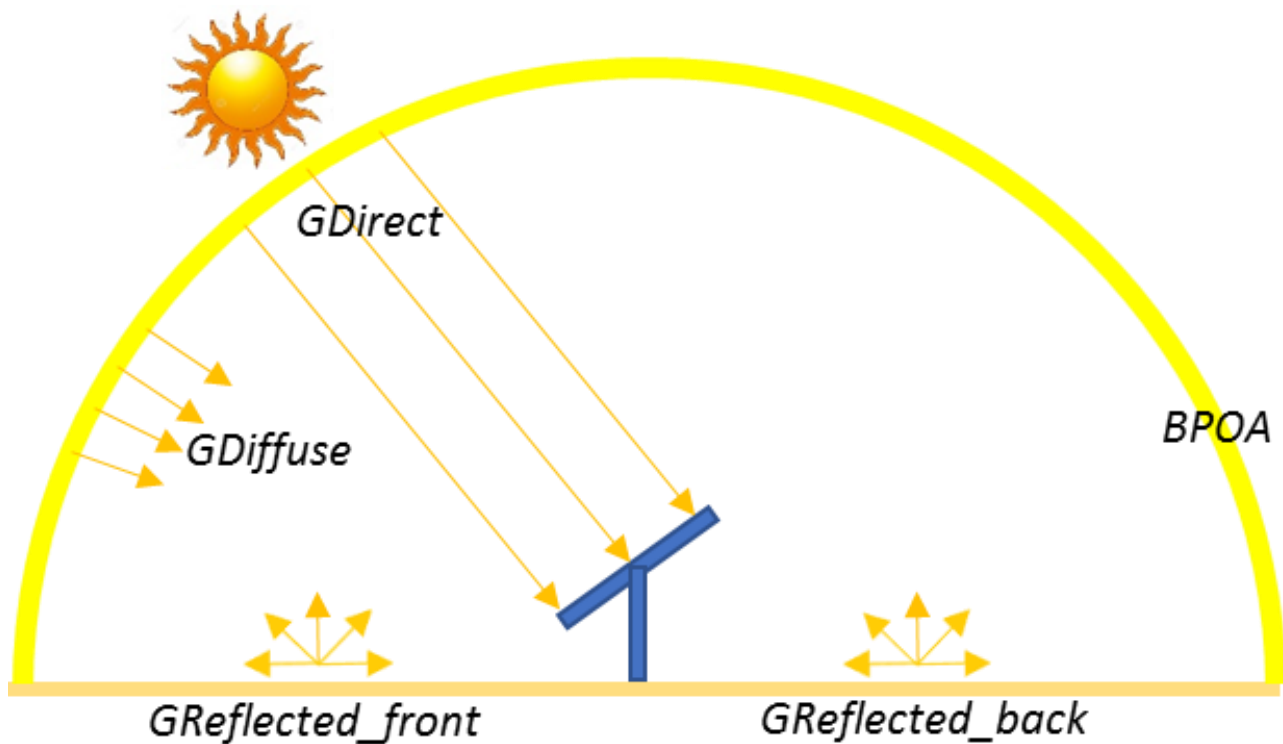
## Éclairement énergétique

Afin de calculer l'énergie en entrée de notre four solaire, nous allons introduire la notion **d'irradiance** ou **d'éclairement énergétique**.<sup>8</sup>

**L'irradiance** quantifie la puissance d'un rayonnement solaire frappant par unité de surface perpendiculaire à sa direction. C'est la densité surfacique du flux énergétique arrivant au point considéré de la surface. Dans le Système international d'unités, elle s'exprime en watts par mètre carré ( $\text{W/m}^2$  ou  $\text{W m}^{-2}$ ).

Il existe 3 types d'irradiance :

- **L'irradiance directe** : les rayons du soleil frappent directement le four
- **L'irradiance diffuse** : Issue du rayonnement global de l'atmosphère terrestre
- **L'irradiance réfléchie** : les rayons sont renvoyés depuis les objets et les corps



L'irradiance va nous servir d'énergie d'entrée pour le calcul du rendement de notre panneau solaire. Nous devons avant tout avoir une estimation de l'irradiance solaire dans la zone où sera positionner notre four. Car l'irradiance solaire varie énormément selon la zone géographique.

<sup>8</sup> <https://www.encyclopedie-energie.org/energie-solaire-les-bases-theoriques-pour-la-comprendre/>

## PVGIS

L'application en ligne gratuite PVGIS est un excellent outil de simulation qui permet de calculer gratuitement la production de systèmes photovoltaïques et de déterminer l'irradiance.

A l'aide de son interface Google Maps intégré, il est très facile d'obtenir les données de production d'un système PV à partir des données d'ensoleillement précises du site (intégrant notamment les masques lointains liés au relief, collines, montagnes).

Par ailleurs PVGIS propose des cartes d'ensoleillement (irradiation en kWh/m<sup>2</sup>) et de température précises haute définition de la plupart des Pays du monde.

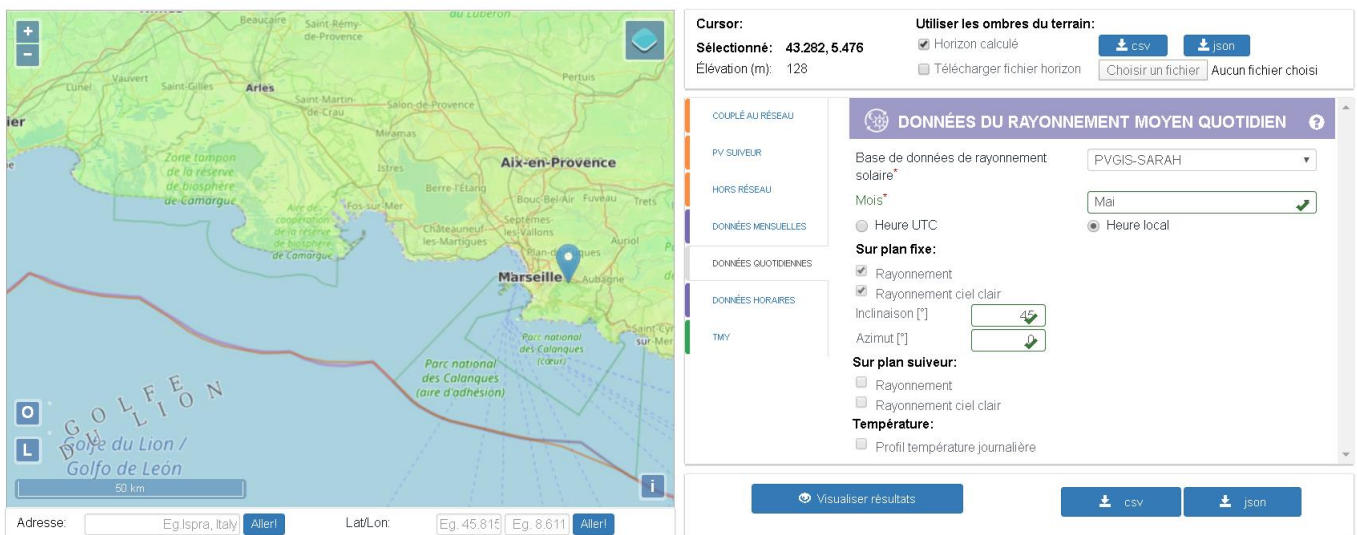
[https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/fr/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html)

Ce logiciel a été développé par le centre de recherche de l'institut pour l'environnement et le développement durable de la commission européenne.

### Comment utiliser PVGIS

Une fois sur PVGIS, la première chose à faire est de naviguer sur la carte pour trouver le site où sera implantée votre installation solaire.

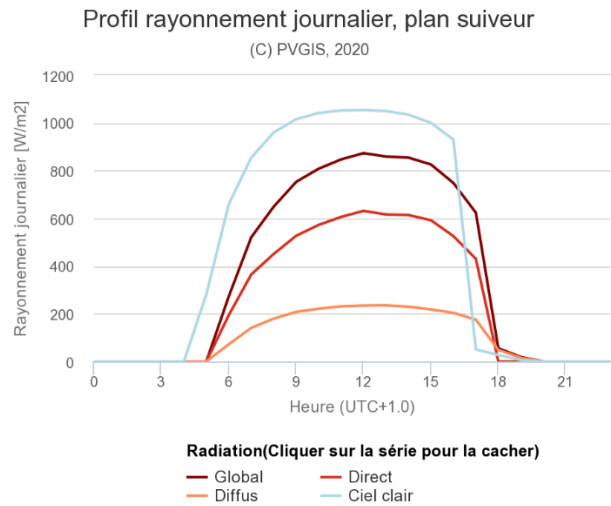
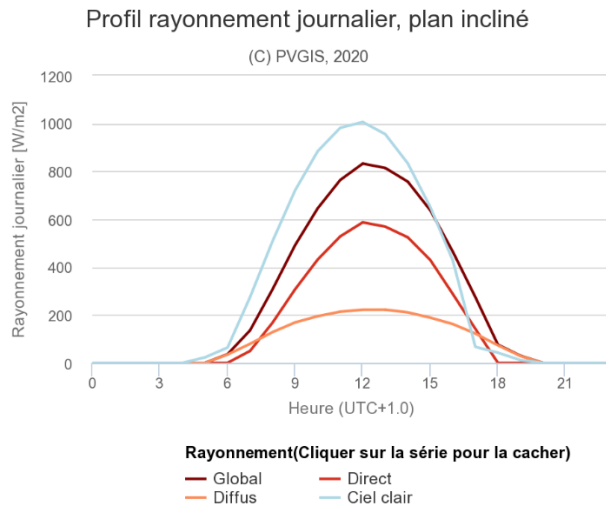
Allez dans l'onglet « données quotidiennes » et sélectionnez votre endroit :



The screenshot shows the PVGIS web interface. On the left is a map of the Mediterranean region, including parts of France, Italy, and the Gulf of Lion. A location is marked near Marseille. On the right is the settings panel titled 'DONNÉES DU RAYONNEMENT MOYEN QUOTIDIEN'. The 'Cursor' section shows 'Sélectionné: 43.282, 5.476' and 'Élévation (m): 128'. The 'Utiliser les ombres du terrain' section has 'Horizon calculé' checked. The 'Base de données de rayonnement solaire' is set to 'PVGIS-SARAH'. The 'Mois' is set to 'Mai'. The 'Sur plan fixe' section has 'Rayonnement' and 'Rayonnement ciel clair' checked, with 'Inclinaison [°]' set to 45 and 'Azimut [°]' set to 0. The 'Sur plan suiveur' section has 'Rayonnement' and 'Rayonnement ciel clair' unchecked. The 'Température' section has 'Profil température journalière' unchecked. At the bottom are buttons for 'Visualiser résultats', 'csv', and 'json'.

N'oubliez pas de renseigner une inclinaison de 45° et un azimut de 0° (on considère que le four ferra face au soleil). Cliquer sur visualiser les résultats. Il apparait en bas la courbe de l'évolution moyenne de l'irradiance de la journée pour le mois sélectionné.

Vous pouvez aussi télécharger les résultats sous tableur ou sous PDF.



Heure	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>G(i)</b>	0	0	0	0	0	0	36	136	308	492	645	764	832	814	757	637	464	274	76	30	0	0	0	0
<b>Gb(i)</b>	0	0	0	0	0	0	0	50	168	307	431	528	587	569	524	429	287	142	0	0	0	0	0	0
<b>Gd(i)</b>	0	0	0	0	0	0	35	79	129	169	195	214	222	222	211	189	162	122	73	29	0	0	0	0
<b>Gcs(i)</b>	0	0	0	0	0	23	64	275	509	721	884	982	1006	955	833	651	427	67	42	11	0	0	0	0

G(i): Rayonnement global sur plan fixe [W/m²].  
 Gb(i): Rayonnement direct sur plan fixe [W/m²].  
 Gd(i): Rayonnement diffus sur plan fixe [W/m²].  
 Gcs(i): Rayonnement global ciel clair sur plan fixe [W/m²].

## Quantité d'énergie à partir de l'irradiance

Nous allons calculer la quantité d'énergie perçue par le four sur un temps d'utilisation

$$E_{\text{solaire}} = \text{Irradiance} * \text{Surface Utile} * \text{Temps}$$

- $E_{\text{solaire}}$  (Wh)
- Irradiance ( $\text{W/m}^2$ )
- Surface Utile ( $\text{m}^2$ )
- Temps (h)

La surface utile est la surface permettant la réflexion et l'absorption des rayons du soleil dans le four. Il ne s'agit donc pas que de l'ouverture du four avec la vitre mais aussi des 4 panneaux qui vont permettre l'augmentation du nombre de rayons solaires à l'intérieur du four et donc augmenter son irradiance.

$$\text{Surface Utile} = \text{Surface de l'ouverture} + \text{Surface des panneaux réflecteurs}$$

**Travail :** Calculez l'énergie solaire en Wh perçue par le four solaire pendant 2h.



## Energie Thermique

L'énergie solaire perçue va permettre l'élévation en température de l'air contenu dans le four.

Tout matériau peut stocker de l'énergie (ici thermique). Pour calculer cette énergie thermique stockable on utilise la **capacité calorifique massique** (ou chaleur massique) :

**Cp en Joule par kilogramme par °C (J/kg.°C)**

La chaleur massique (symbole c ou s), qu'il convient d'appeler capacité thermique massique est déterminée par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance

De ce fait pour déterminer l'énergie nécessaire pour faire monter en température l'air du four nous allons utiliser la formule suivante :

$$E_{\text{thermique}} = M_{\text{air}} * C_{\text{pair}} * \Delta T$$

- $E_{\text{thermique}}$  en Wh
- $C_{\text{pair}} = 1000 \text{ J/Kg.}^{\circ}\text{C}$
- $M_{\text{air}} = V * \rho$ 
  - Avec  $V$  = volume d'air à l'intérieur du four en m<sup>3</sup>
  - $\rho_{\text{air}}$  = masse volumique de l'air (1,225 kg/m<sup>3</sup>)

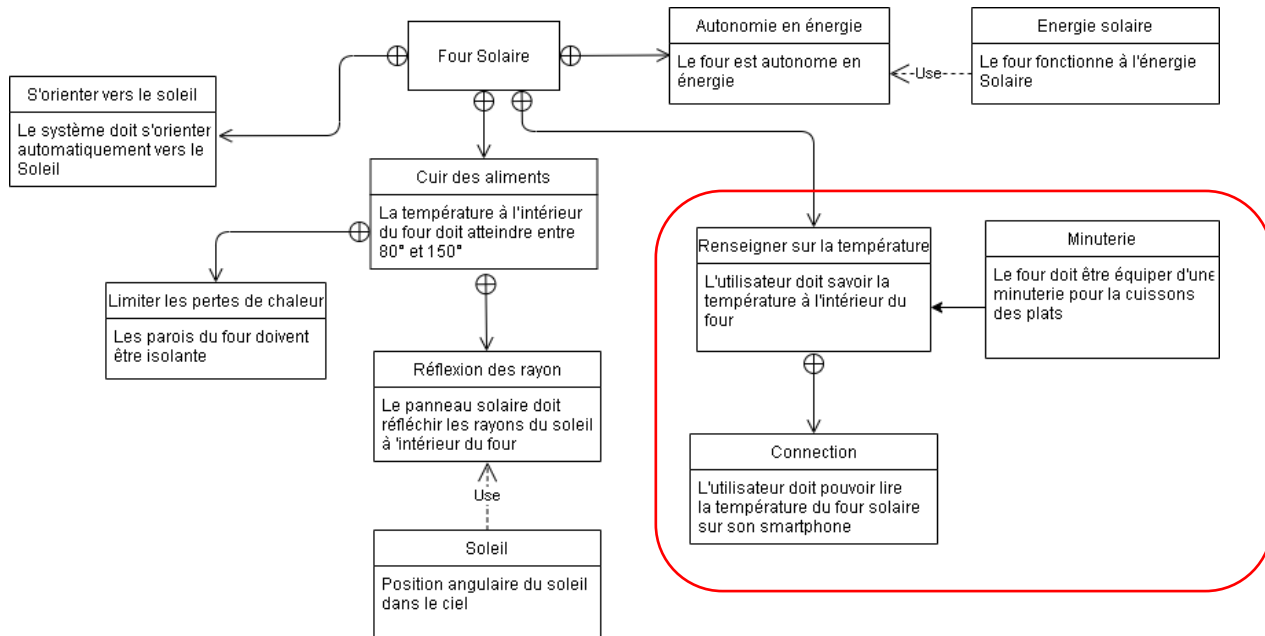
Travail à faire :

1. Mettre le four au soleil et laisser le fonctionner pendant 2h.
2. A intervalle régulier, relever la température à l'intérieur du four à l'aide d'un thermomètre à mercure ou du système d'affichage de la température.
3. Tracer la courbe de l'évolution de la température en fonction du temps
4. Déterminer le volume d'air à l'intérieur du four et calculer la masse d'air.
5. Relever la température du four au bout de 2h
6. Calculer l'énergie thermique
7. Calculer le rendement du four
8. Que s'est-il passé avec l'énergie perdu ? Conclure sur l'intérêt de l'isolation thermique.

# Affichage

## Problématique

**Comment connaître la température à l'intérieur du four et la renseigner à l'utilisateur ?**



## Programmation par carte Micro:bit

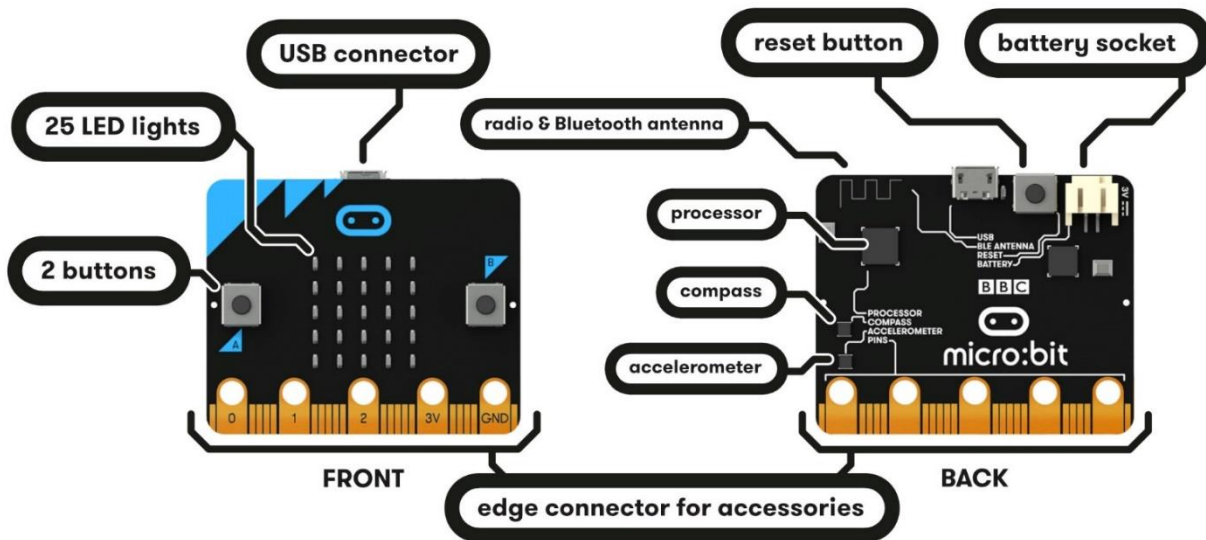
Le four solaire sera instrumenté d'une carte micro :bit ainsi que des capteurs et écrans qui permettront l'affichage de la température :

<https://microbit.org/fr/>

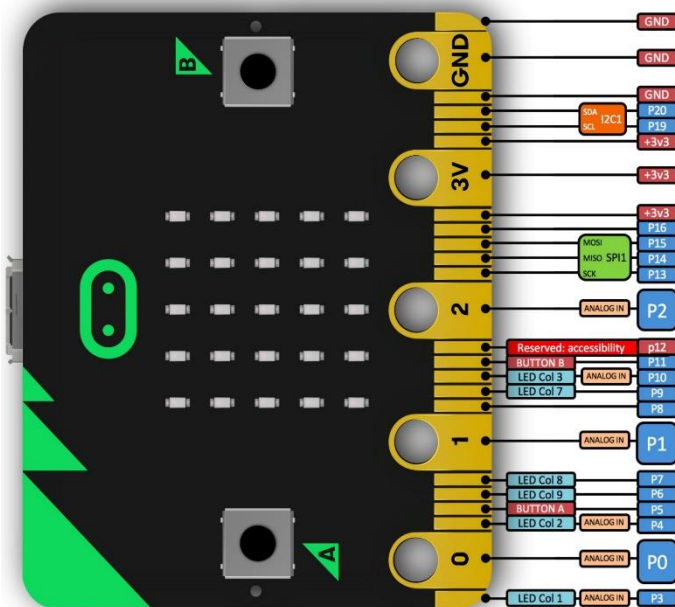
BBC micro:bit est un mini-ordinateur programmable de poche (un microcontrôleur) conçu pour développer votre créativité avec la technologie.

Ce petit appareil intègre beaucoup de fonctionnalités : il a 25 LED rouges qui peuvent afficher des messages, et deux boutons programmables pouvant être utilisés pour contrôler des jeux, ou, par exemple, faire une pause et sauter des chansons sur une liste de lecture ; le BBC micro:bit peut détecter le mouvement, la température, la luminosité, et vous dire dans quelle direction vous vous dirigez ; il peut aussi utiliser une connexion Bluetooth à faible énergie pour interagir avec d'autres appareils et Internet.

Vous pouvez consulter le site internet de la fondation pour toutes les informations nécessaires à la maîtrise de la carte.



Le BBC micro:bit dispose de 25 connecteurs externes sur le connecteur latéral de la carte :



Le BBC micro:bit possède 25 connexions externes sur le connecteur latéral de la carte : nous les appellerons 'broches'. Le connecteur latéral est la zone grise sur la droite de la figure ci-dessus. Il existe cinq grandes broches, qui sont également connectées à des trous dans la carte nommés : 0, 1, 2, 3V et GND. Et sur le même bord, 20 petites broches peuvent être utilisées pour brancher le BBC micro:bit à un connecteur latéral.



## Grandes broches

Vous pouvez facilement attacher des pinces crocodiles ou des fiches bananes de 4mm aux cinq grandes broches.

Les trois premières, marquées 0, 1 et 2, sont flexibles et peuvent être utilisées pour différentes choses. C'est pourquoi elles sont souvent appelées 'entrées et sorties à usage général' (raccourci en ESUG). Ces trois broches ont aussi la possibilité de lire les tensions analogiques grâce à un système appelé convertisseur analogique/digital (ADC). Elles ont la même fonction :

- **0 : ESUG** (entrée/sortie à usage général) avec convertisseur analogique/digital (ADC).
- **1 : ESUG** avec ADC
- **2 : ESUG** avec ADC

Les deux autres grandes broches (3V et GND) sont très différentes !

### Astuce

Attention ! Les broches marquées 3V et GND sont liées à l'alimentation de la carte et ne doivent JAMAIS être connectées l'une à l'autre.

*Alimentation* : si le BBC micro:bit est alimenté en USB ou par une pile, vous pouvez utiliser la broche AV comme *source d'alimentation* pour alimenter vos périphériques.

- **3V** : *sortie* ou *entrée* d'alimentation 3 volts. (1) *sortie d'alimentation* si le BBC micro:bit est alimenté par USB ou par une pile, alors vous pouvez utiliser la broche 3V pour alimenter vos périphériques ; (2) *entrée d'alimentation* : si le BBC micro:bit n'est pas alimenté par USB ou par une pile, vous pouvez utiliser la broche 3V pour alimenter le BBC micro:bit
- **GND**: se connecte à la terre pour fermer un circuit (nécessaire quand vous utilisez la broche 3V)

Si vous maintenez la broche 'GND' d'une main, vous pouvez programmer le BBC micro:bit pour qu'il détecte si vous touchez les broches 0, 1 ou 2 avec l'autre main, ce qui vous donne trois boutons supplémentaires pour faire vos expériences (vous utilisez simplement votre corps pour fermer le circuit électrique).



## Petites broches

20 petites broches sont numérotées dans l'ordre de 3 à 22 (ces broches ne sont pas marquées sur le BBC micro:bit, mais elles le sont sur l'image ci-dessus).

Contrairement aux trois grandes broches dédiées aux connexions externes, certaines des petites broches sont partagées avec d'autres composants de la carte du BBC micro:bit. Par exemple, la broche 3 est partagée avec certaines des LED de l'écran du BBC micro:bit, donc si vous utilisez cet écran pour faire défiler des messages, n'utilisez pas cette broche en même temps.

- **broche 3** : ESUG partagé avec LED Col 1 de l'écran ; peut être utilisée pour ADC et E/S digitale quand l'écran LED est éteint.
- **broche 4** : ESUG partagé avec LED Col 2 de l'écran ; peut être utilisée pour ADC et E/S digitale quand l'écran LED est éteint.
- **broche 5** : ESUG partagé avec le bouton A. Cela vous permet de déclencher et de détecter en externe un clic sur le bouton "A". Cette broche possède une résistance éleveuse de tension, ce qui veut dire qu'elle a par défaut une tension de 3V. Pour remplacer le bouton A sur le micro:bit par un bouton externe, connectez une extrémité du bouton à la broche 5 et l'autre à la broche GND. Lorsque le bouton est pressé, le voltage de la broche 5 est abaissé à 0, ce qui génère un événement clic de bouton.
- **broche 6** : ESUG partagé avec LED Col 9 de l'écran ; peut être utilisée pour ADC et E/S digitale quand l'écran LED est éteint.
- **broche 7** : ESUG partagé avec LED Col 8 de l'écran ; peut être utilisée pour ADC et E/S digitale quand l'écran LED est éteint.
- **broche 8** : dédiée à l'ESUG, pour envoyer et capter les signaux digitaux.
- **broche 9** : ESUG partagé avec LED Col 7 de l'écran ; peut être utilisée pour ADC et E/S digitale quand l'écran LED est éteint.
- **broche 10** : ESUG partagé avec LED Col 3 de l'écran ; peut être utilisée pour ADC et E/S digitale quand l'écran LED est éteint.
- **broche 11** : ESUG partagé avec le bouton B. Cela vous permet de déclencher et de détecter en externe un clic sur le bouton "B".
- **broche 12** : dédiée à l'ESUG, pour envoyer et capter les signaux digitaux.
- **broche 13** : ESUG conventionnellement utilisé pour le signal Serial Clock (SCK) du bus Serial Peripheral Interface (SPI) à 3 fils.
- **broche 14** : ESUG conventionnellement utilisé pour le signal Master In Slave Out (MISO) du bus SPI.
- **broche 15** : ESUG conventionnellement utilisé pour le signal Master Out Slave In (MOSI) du bus SPI.
- **broche 16** : ESUG dédié (conventionnellement également utilisé pour la fonction 'Chip Select' du SPI).
- **broches 17 et 18** : ces broches sont reliées à l'alimentation 3V, comme la grande broche '3V'.
- **broches 19 et 20** : implémente le signal d'horloge (SCL) et la ligne de données (SDA) du protocole de communication de bus I2C. Grâce à l'I2C, plusieurs appareils peuvent être connectés au même bus et envoyer/lire des messages venant et allant au CPU. En interne, l'accéléromètre et la boussole sont connectés à l'I2C.
- **broches 21 et 22** : ces broches sont reliées à la broche GND et n'ont aucune autre fonction

## Les entrées/sorties

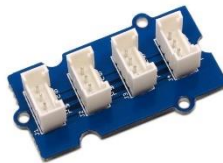
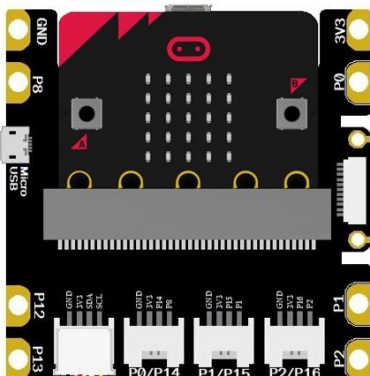
Pour notre système, nous allons réunir des accessoires permettant d'améliorer les fonctionnalités de base de la micro:bit.

Tous ces accessoires sont disponibles sur le site : <https://fr.vittascience.com/shop>. Ou facilement sur d'autres sites de vente d'électronique.

Nous allons utiliser la gamme d'accessoire Grove pour plus de facilité.

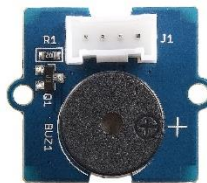
### Carte et support

Le shield Grove permet de connecter des accessoires Grove facilement sur les ports de la carte. Le hub I2C permet de brancher plusieurs composant I2C sur ce port



### Sorties

Un écran LCD et un Buzzer



## Capteurs

### Capteur haute Température Grove

Les thermocouples sont très sensibles, nécessitant un bon amplificateur avec une référence de compensation de froid. Le capteur de température Grove utilise un thermocouple de type K. Détection de température, avec thermistance pour détecter la température ambiante comme compensation de température. La gamme détectable de ce capteur est -50 à 600 °C, et la précision est de  $\pm (2.0\% + 2\text{ °C})$



## Connectivité

### Un module grove UART Wifi



Ce module Grove est un émetteur-récepteur Wifi basé sur un ESP8285 avec antenne intégrée. Il communique avec un microcontrôleur ou compatible via une connexion UART.

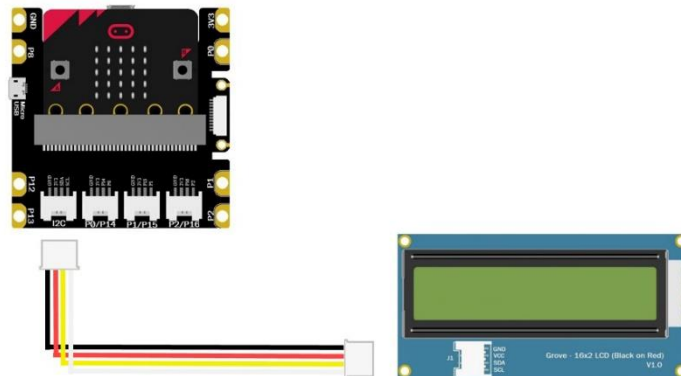
L'ESP8285 embarqué est compatible DHCP et inclut les sécurités WEP, WPA/WPA2. Ce module se raccorde sur un port série UART du Grove Base Shield ou du Mega Shield via un câble 4 conducteurs.

## 1<sup>er</sup> Programme : Afficher du texte sur l'écran LCD

Ce tutoriel explique comment afficher du texte sur un écran LCD contenant 2 lignes et 16 colonnes.

### Schéma du montage

Brancher l'afficheur LCD avec la carte électronique en suivant le schéma suivant :



## Utilisation de l'afficheur LCD

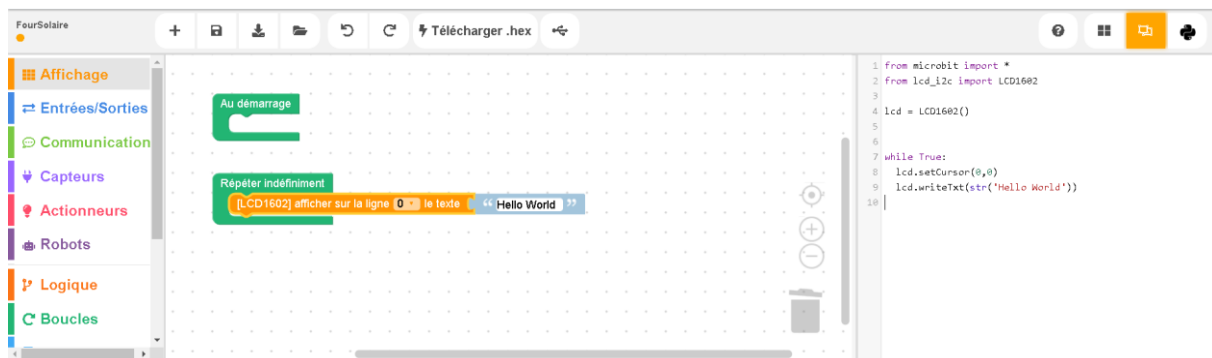
Brancher la carte micro:bit au shield Grove ainsi que l'afficheur LCD sur le port I2C, puis transférer le code suivant pour afficher un premier texte sur l'écran LCD (en utilisant le site l'outil Python du site micro :bit ou d'autre IDE comme MU) :

```
from microbit import *
from lcd_i2c import LCD1602
lcd = LCD1602()
while True:
    lcd.setCursor(0,0)
    lcd.writeTxt(str('Hello World'))
```

L'alphabet est stocké dans la mémoire EEPROM de l'écran LCD. Dès qu'on souhaite écrire un caractère, celui-ci est traduit en une adresse mémoire, et c'est ainsi que le LCD parvient à l'afficher.

L'afficheur disposant de 2 lignes, il est possible de choisir la ligne sur laquelle sera affichée la chaîne de caractères (0 pour la ligne du haut – 1 pour la ligne du bas).

Sur le site de Vittascience vous pouvez aussi utiliser la fonction codage par blocks :



## 2<sup>e</sup> Programme : Le capteur de température et Buzzer

La bibliothèque de Vittascience permet d'utiliser directement un bloc de programmation pour le capteur de température.

Exemple :



Dans ce cas, le module Grove Température est branché sur la broche P1 du shield Grove.

**Exercice :**

**Faites un programme affichant la température du four sur l'écran LCD**

## Le Buzzer

Bloc de control du buzzer :



## Travail à faire

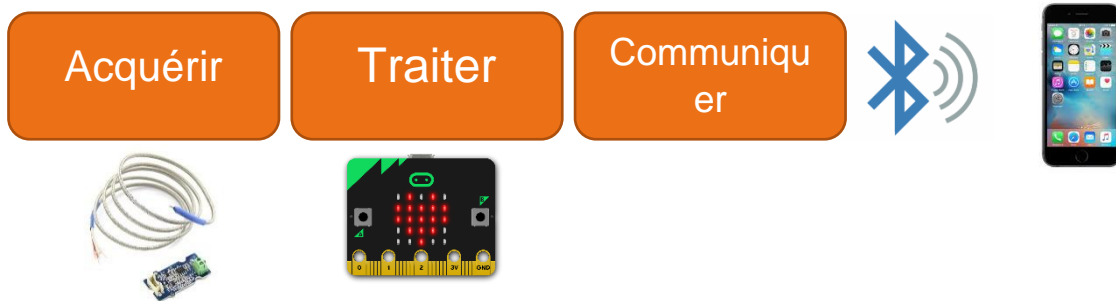
Ecrire un programme qui réalise les opérations suivantes :

- Afficher la température sur la première ligne de l'écran LCD
- Minuteur :
  - Choisir les heures avec le bouton A
  - Choisir les minutes avec le bouton B
  - Lancer le minuteur avec les boutons A+B
  - Arrêter le minuteur avec les boutons A+B
- Faire sonner le buzzer à la fin du minuteur



## Four solaire connecté

Nous allons maintenant rajouter un peu de connectivité dans le four solaire et afficher la température sur un smartphone.



Connection Bluetooth/Micro:bit par APP Inventor



App Inventor est un outil de développement en ligne gratuit pour les téléphones et les tablettes sous Android. App Inventor est un OS créé par Google, et concurrent de l'OS d'Apple qui équipe l'iPad, iPodTouch et iPhone.

La plateforme de développement est offerte à tous les utilisateurs possédant un compte Gmail. La programmation est réalisée sans taper une seule ligne de code, mais simplement en associant et en paramétrant des briques logicielles toutes faites.

### À quoi ressemble un programme App Inventor ?

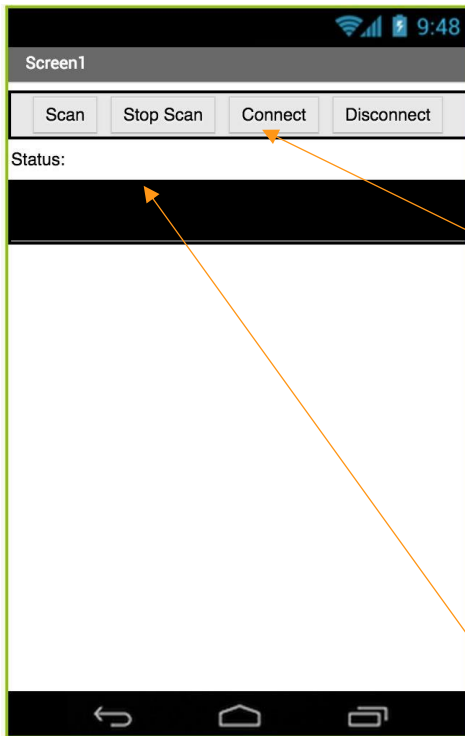
La programmation se réalise en ligne, à l'aide de son navigateur préféré, et sous l'environnement logiciel de son choix (Mac, Linux ou Windows). Seules contraintes : **avoir un compte Gmail** pour pouvoir y accéder, et un accès à internet évidemment. Les informations sont stockées sur des serveurs distants.

3 fenêtres sont proposées pendant le développement :

- Une pour la création de l'interface homme machine : ce sera l'allure de votre application ;
- Une pour la programmation par elle-même : elle permettra, par l'assemblage de blocs de créer le comportement de l'application ;
- Et une pour l'émulateur qui permettra de tester l'application. L'émulateur permet de remplacer un terminal réel pour vérifier le bon fonctionnement du programme.

La connexion d'un terminal réel sous Android permettra ensuite d'y télécharger le programme pour un test réel. Ce terminal pourra aussi bien être un téléphone qu'une tablette, le comportement du programme sera identique.

## Tutoriel



Démarrez un nouveau projet dans App Inventor et nommez-le TempMicroBit.

- Tout d'abord, nous avons besoin de mettre en place des boutons à « trouver » et « connectez-vous » à notre Micro:bit sur Bluetooth.
- Faites glisser un « Arrangement Horizontal » à partir de la disposition tiroir dans la Palette et ajouter 4 Buttons.
- Renommer les boutons : ButtonScan, ButtonStopScan, ButtonConnect et ButtonDisconnect.
- Modifier leur texte à "Scan", "Stop Scan", "Connecter" et "Déconnecter".
- En dessous de l'arrangement horizontal, ajoutez une étiquette.
- Renommez-le LabelStatus et modifiez son texte en "Statut: ".
- Faites glisser dans un ListView sous LabelStatus et renommer ListBLE.

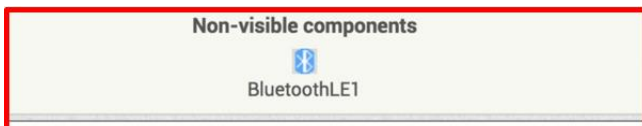
Ensuite, nous devons installer l'extension **BluetoothLE**.

- Dans les dossiers du projet, vous devriez trouver le fichier :

[edu.mit.appinventor.ble.aix](http://edu.mit.appinventor.ble.aix)

- Dans le menu de gauche, cliquez sur Extension en bas et puis sur "Import extension" puis "Choose File".
- Trouvez l'extension sur votre ordinateur et téléchargez-la.

Ajoutez l'extension BluetoothLE en la faisant glisser sur l'espace de travail. Une fois fais, l'extension bluetooth devrait apparaitre en bas du smartphone et non-pas à l'intérieur de l'application. En effet ce module n'est pas visible par l'interface Homme-machine.



Palette
User Interface
Layout
Media
Drawing and Animation
Sensors
Social
Storage
Connectivity
LEGO® MINDSTORMS®
Experimental
Extension
<a href="#">Import extension</a>



## Basculer vers le mode éditeur de blocs

Nous voulons configurer l'application pour analyser les périphériques Bluetooth disponibles. Pour ce faire, nous allons utiliser le bouton **ButtonScan** pour rechercher des appareils connectés, et modifier l'étiquette d'état si nous sommes appairé avec un appareil.

- Dans le volet Blocs, cliquez sur **ButtonScan** et faites glisser **when ButtonScan.Click**
- Dans l'onglet **BluetoothLE1**, ajoutez **Call BluetoothLE1.StartScanning**.
- Dans l'onglet **LabelStatus**, ajoutez **set LabelStatus.Text to**
- Dans l'onglet texte, ajoutez un bloc de texte « **Status : Scanning** »
- Dans l'onglet **ListBLE**, ajoutez **set ListBLE.Visible** et faites passer l'état logique à « **True** »

*Note: Nous faisons cela afin que nous puissions cacher la liste plus tard*



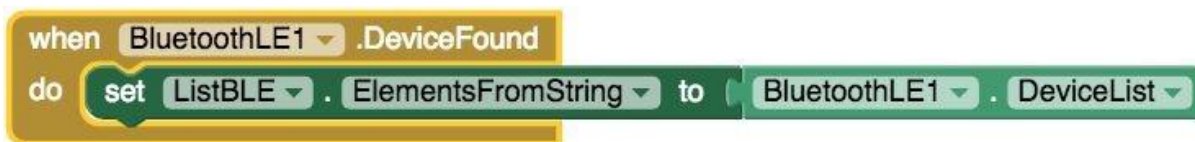
Ensuite, nous allons arrêter de scanner et changer l'étiquette de statut lorsque nous appuyons sur **ButtonStopScan**.

- À partir de l'interface homme-machine, cliquez sur **ButtonStopScan**, et faites glisser **When ButtonStopScan.Click**.
- À partir de l'onglet **BluetoothLE1**, ajoutez **Call BluetoothLE1.StopScanning**.
- À partir de **LabelStatus**, ajoutez **set LabelStatus.Text to** et ajoutez un bloc de texte "**Status: Stopped Scanning**"



Nous devons remplir la liste des appareils avec tous les appareils Bluetooth disponibles.

- À partir de l'IHM, cliquez sur **BluetoothLE1** et faites glisser **When BluetoothLE1.DeviceFound**.
- À partir de **ListBLE**, ajoutez **Set ListBLE.ElementsFromString to** et ajoutez **BluetoothLE1.Devicelist**.



Maintenant, nous allons configurer notre application pour se connecter à la Micro :Bit via Bluetooth.

- À partir de l'interface, cliquez sur **ButtonConnect** et faites glisser **When ButtonConnect.Click**.
- À partir de **BluetoothLE1**, ajoutez **Call BluetoothLE1.Connect Index**. Puis dans **ListBLE**, ajoutez **ListBLE.SelectionIndex**.

- À partir de **LabelStatus**, ajouter **Set LabelStatus.Text to** et ajouter un bloc de texte "**Status: Connecting**".

```

when ButtonConnect .Click
do
  call BluetoothLE1 .Connect
  index ListBLE . SelectionIndex
  set LabelStatus . Text to "Status: Connecting"
  
```

Configurons le bloc quand l'application a réussi à se connecter à la Micro:bit

- Cliquez sur **BluetoothLE1** et faites glisser **when BluetoothLE1.Connected**.
- À partir de **LabelStatus**, ajouter **set LabelStatus.Text to** et le bloc de texte à "**Statut: Connecté**"
- À partir de **ListBLE**, ajouter **set ListBLE.Visible to** et ajoutez un état logique « **False** »

Remarque : Nous le faisons pour masquer la liste quand l'appairage fonctionne.

```

when BluetoothLE1 .Connected
do
  set LabelStatus . Text to "Status: Connected"
  set ListBLE . Visible to false
  
```

Ensuite, nous voulons être en mesure de déconnecter de l'appareil Bluetooth :

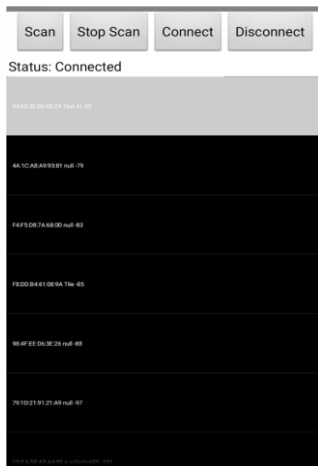
```

when ButtonDisconnect .Click
do
  call BluetoothLE1 .Disconnect
  
```

Nous voulons également savoir quand le dispositif Bluetooth déconnecte avec succès (être sûr que le bouton Disconnect à bien fonctionné)

```

when BluetoothLE1 .Disconnected
do
  set LabelStatus . Text to "Status: Disconnected"
  
```



Maintenant, nous allons tester notre application en utilisant le MIT AI2 Companion. Une fois que vous avez connecté votre périphérique sur votre ordinateur, testez l'application à l'aide des étapes suivantes :

- Cliquez sur le bouton **Scan**.
- Vous devriez voir une liste de dispositifs Bluetooth.
- Lorsque vous voyez votre appareil, cliquez sur **StopScan**
- Cliquez sur le nom de votre périphérique dans la liste.
- Cliquez sur **Connexion**.
- Si votre périphérique relie avec succès votre LabelStatus doit passer à "**Statut: Connecté**".

## Afficher une variable depuis la Micro:bit

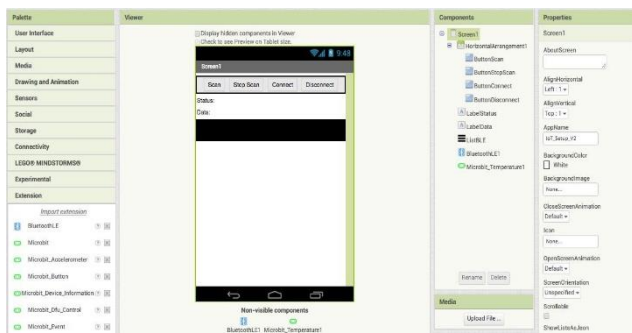
Exemple avec la température

Avant tout nous devons connecter la carte micro:bit avec le smartphone en suivant ce tutoriel :

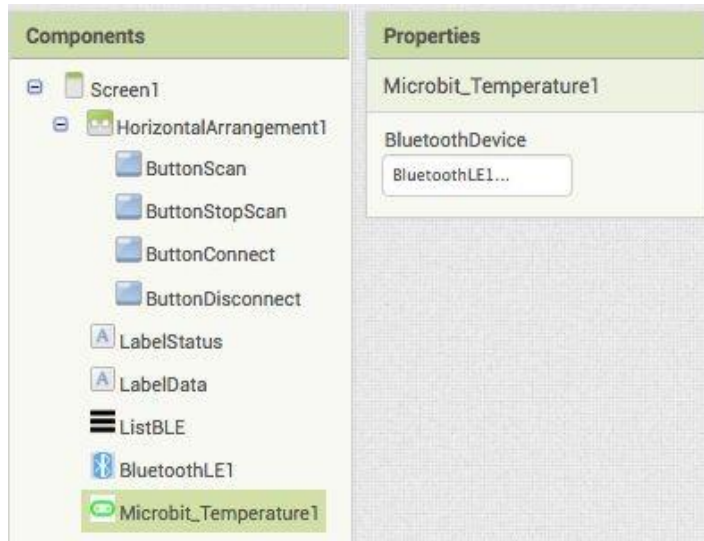
Toutes les étapes suivantes s'accumulent au code de connexion vu plus haut.

Tout d'abord, nous devons ajouter l'extension nécessaire.

- Dans la fenêtre de gauche, cliquez sur Extension en bas, puis sur "Importer extension" et cliquez sur "URL".
- Coller dans cette URL: <http://iot.appinventer.mit.edu/assets/com.bbc.microbit.profile.aix>
- Ajoutez l'extension **Microbit\_Temperature** à votre application en la faisant glisser sur l'affichage.



Cliquez sur **Microbit\_Temperature1** dans le volet Composants. Dans l'onglet Propriétés de la Microbit\_Temperature1, définir **BluetoothDevice** sur "Bluetooth LE1"



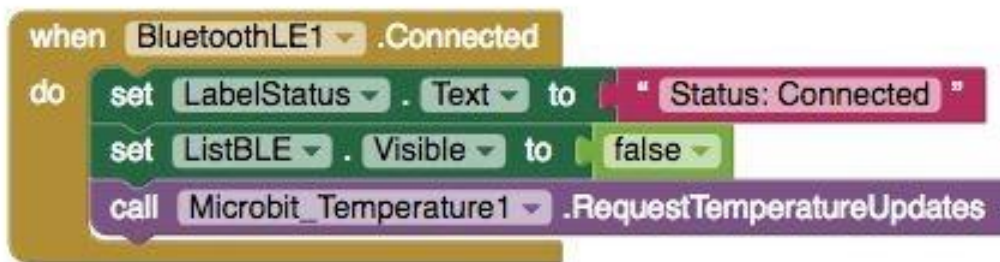
- Faites glisser un label à partir de la palette d'interface utilisateur et déposez-la entre **LabelStatus** et **ListBLE**
- Renommer le Label en « **LabelData** ».
- Changez son texte en "Data"

Maintenant, basculez en mode blocs.

Tout d'abord, nous voulons que les données s'actualisent quand le capteur change ses valeurs.

A partir de **Microbit\_Temperature1** dans le volet Blocs, ajoutez

**Call.Microbit\_Temperature1.RequestTemperatureUpdates** sur le bloc existant **when.BluetoothLE1.Connected**.



Ensuite, nous avons besoin de stocker les données que nous recevons du capteur. Initialisez une nouvelle variable « Temperature » à 0



Affichons ces valeurs dans le **LabelData** lorsque nous obtenons de nouvelles données. Vous pouvez créer une procédure en faisant glisser un bloc violet. Renommez le : **updateDataLabel**.

```

to updateDataLabel
do
  set LabelData . Text to
  join (
    " Temperature: "
    get global Temperature
  )

```

Enfin, nous devons appeler la procédure lorsque ces données sont reçues :

```

when Arduino101Humidity1 .TemperatureReceived
  temperature
do
  set global Temperature to get temperature
  call updateDataLabel

```

Dans votre micro:bit le code va être très simple. Sur Vittascience, utilisez le code qui permet d'envoyer une donnée sur le Bluetooth

```

Répéter indéfiniment
[Bluetooth] envoyer sur les broches RX P0 TX P14 message température (°C)

```

Votre application devrait maintenant fonctionner! Connectez votre appareil micro:bit. Testez-le en fermant votre main autour du micro:bit. Si elle fonctionne, vous devriez voir le changement du label de données (mais probablement très lentement).

## Travail à faire

- Réaliser une IHM et l'affichage du capteur haute température du four solaire.
- Vous pouvez aussi configurer la minuterie à partir de votre smartphone.



## Pour aller plus loin...

**L'Internet des objets**, ou IdO (en anglais (the) Internet of Things, ou IoT) est l'interconnexion entre l'**Internet** et des **objets**, des **lieux** et des **environnements physiques**. L'appellation désigne un nombre croissant d'objets connectés à l'Internet permettant ainsi une communication entre nos biens dits physiques et leurs existences numériques. Ces formes de connexions permettent de rassembler de nouvelles masses de données sur le réseau et donc, de nouvelles connaissances et formes de savoirs.

Considéré comme la troisième évolution de l'Internet, baptisé Web 3.0 qui fait suite à l'ère du Web social, l'Internet des objets revêt un caractère universel pour désigner des objets connectés aux usages variés.

L'Internet des objets est en partie responsable d'un accroissement exponentiel du volume de données généré sur le réseau, à l'origine du **big data**. La croissance exponentielle du nombre d'objets connectés dans la première moitié des années 2020 aura un impact durable sur l'environnement.

Nous allons étudier en quoi l'instrumentation numérique du four solaire est incompatible avec son caractère **low tech**.

### Impact environnemental et numérique

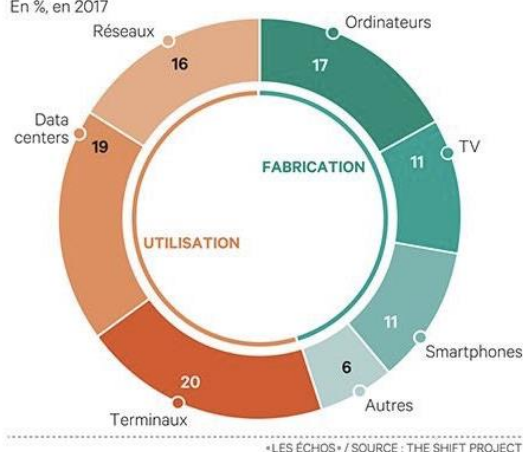
La consommation d'énergie du numérique est aujourd'hui en hausse de **9 % par an**<sup>9</sup>. La transition numérique est en outre souvent considérée comme un moyen de réduire la consommation d'énergie dans un grand nombre de secteurs. Pourtant, les impacts environnementaux directs et indirects (« **effets rebond** ») liés aux usages croissants du numérique sont systématiquement sous-estimés.

Si le numérique était un pays, il serait le 3ème plus gros consommateur d'électricité au monde, derrière la Chine et les Etats-Unis. D'après le CNRS<sup>10</sup>, le numérique consomme **10% de l'électricité mondiale**.

En 2030, le secteur numérique sera le plus gros consommateur électrique de la planète

#### La distribution de la consommation d'énergie du numérique

En %, en 2017



« LES ÉCHOS » / SOURCE : THE SHIFT PROJECT

En 2019, la production d'électricité dans le monde représente **19 800 Twh**. En moyenne la production a une **croissance de 2%** par an depuis 1990.

Le facteur d'émission de CO<sub>2</sub> au vu du mix électrique en vigueur dépend de la zone géographique :

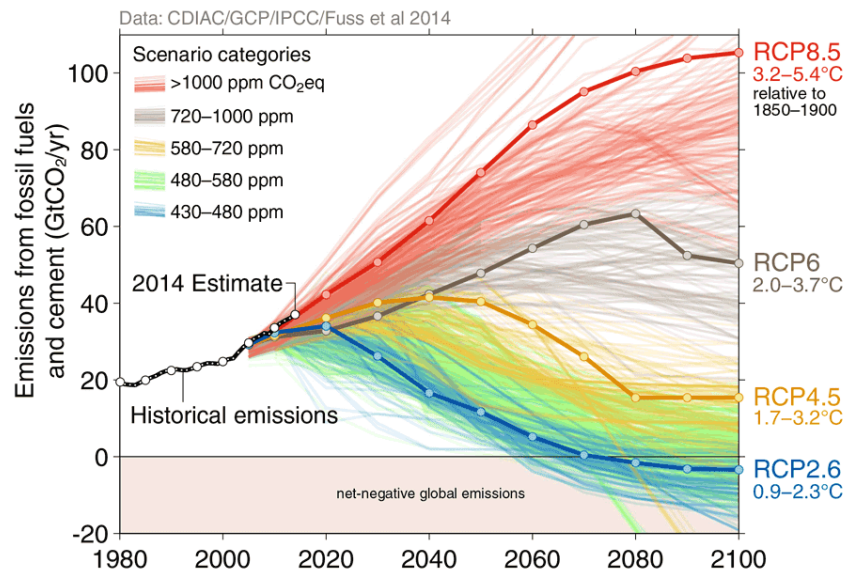
- Union Européenne : 0,276 kgCO<sub>2</sub>e/kWh
- France : 0,035 kgCO<sub>2</sub>e/kWh
- Etats-Unis : 0,493 kgCO<sub>2</sub>e/kWh
- Chine : 0,681 kgCO<sub>2</sub>e/kWh
- Moyenne mondial : 0,519 kgCO<sub>2</sub>e/kWh

<sup>9</sup> <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>

<sup>10</sup> <https://lejournel.cnrs.fr/articles/numerique-le-grand-gachis-energetique>

## Budget Carbone et hausse de la température

Parmi les quatre scénarios principaux du Giec, seul le plus ambitieux, RCP2.6, donne une probabilité supérieure à 50 % de limiter la hausse à 2 °C à l'horizon 2100. Le scénario tendanciel, RCP8.5, a plus de 50 % de probabilité d'aboutir à une hausse supérieure à 4 °C.





Le **budget carbone** correspond à une quantité maximale d'émissions de GES pour laquelle il y a une probabilité raisonnable d'éviter la hausse moyenne des températures au-dessus d'un certain niveau. Ainsi, les simulations du Giec indiquent que pour avoir une probabilité supérieure à 66 % de limiter à 2 °C l'augmentation moyenne des températures par rapport à l'ère préindustrielle, les émissions cumulées depuis 1870 ne devraient pas dépasser **2 900 Gt CO<sub>2</sub>**. Or, les émissions anthropogéniques<sup>11</sup> entre 1870 et 2016 se sont déjà élevées à **2 090 Gt CO<sub>2</sub>**<sup>12</sup>. Si les émissions continuent au même rythme, le budget carbone, qui respecterait une probabilité de 66 % de limiter la hausse des températures à 2 °C, sera épuisé d'ici une vingtaine d'années. La combustion de toutes les réserves actuelles d'énergies fossiles libérerait une quantité de CO<sub>2</sub> bien supérieure (**d'un facteur 4 à 7**) au budget carbone cohérent avec la limite de 2 °C.

## Questions

1. Quel est le pourcentage total de la consommation d'énergie lié à la fabrication des appareils numériques.
2. Calculer en Twh la quantité d'énergie que nécessite le numérique à l'échelle globale. Dans un tableur Excel, tracez jusqu'en 2100, la courbe d'évolution de la production électrique et celle de la consommation du numérique. Que remarquez-vous ?
3. Dans votre tableur, calculez en Giga Tonne, la quantité de CO<sub>2</sub> émis à partir de la moyenne mondiale des émissions de CO<sub>2</sub> par kwh d'énergie électrique produit.
4. Calculer en Gt CO<sub>2</sub>, le budget carbone restant pour éviter une hausse de 2° de la température moyenne. En quelle année le numérique, à lui seul, va dépasser ce budget (en supposant que l'apport énergétique puisse suivre...) ?

## Conclusion.

Conclure sur l'avenir du numérique et des objets connectés dans les prochaines décennies.



<sup>11</sup> Causé ou généré par l'être humain

<sup>12</sup> Source : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-05/datalab-46-chiffres-cles-du-climat-edition-2019-novembre2018.pdf>

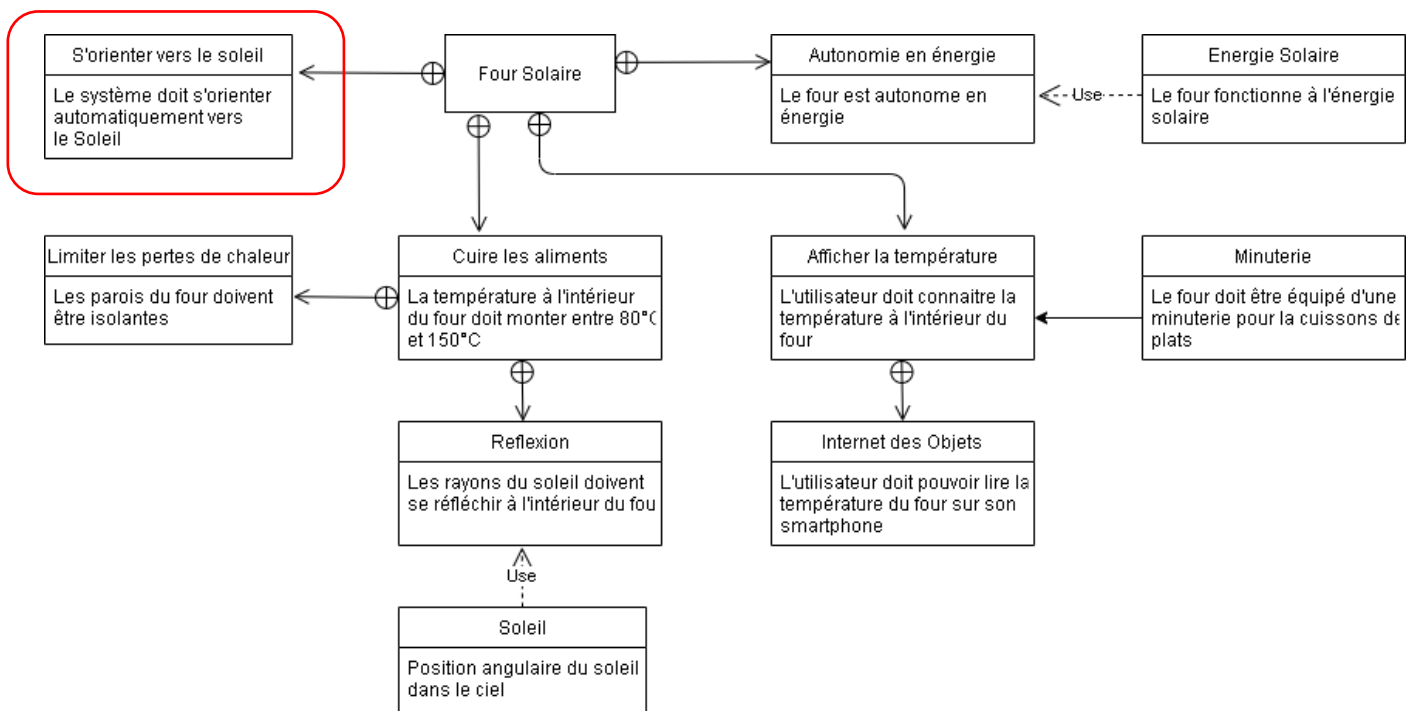
# Orientation vers le soleil

Afin d'optimiser la puissance solaire, notre four doit-être capable de s'orienter de manière autonome vers le soleil.

Ce comportement **biomimétique** est inspiré du déplacement des tournesols.



Il répond aussi aux exigences du cahier des charges :



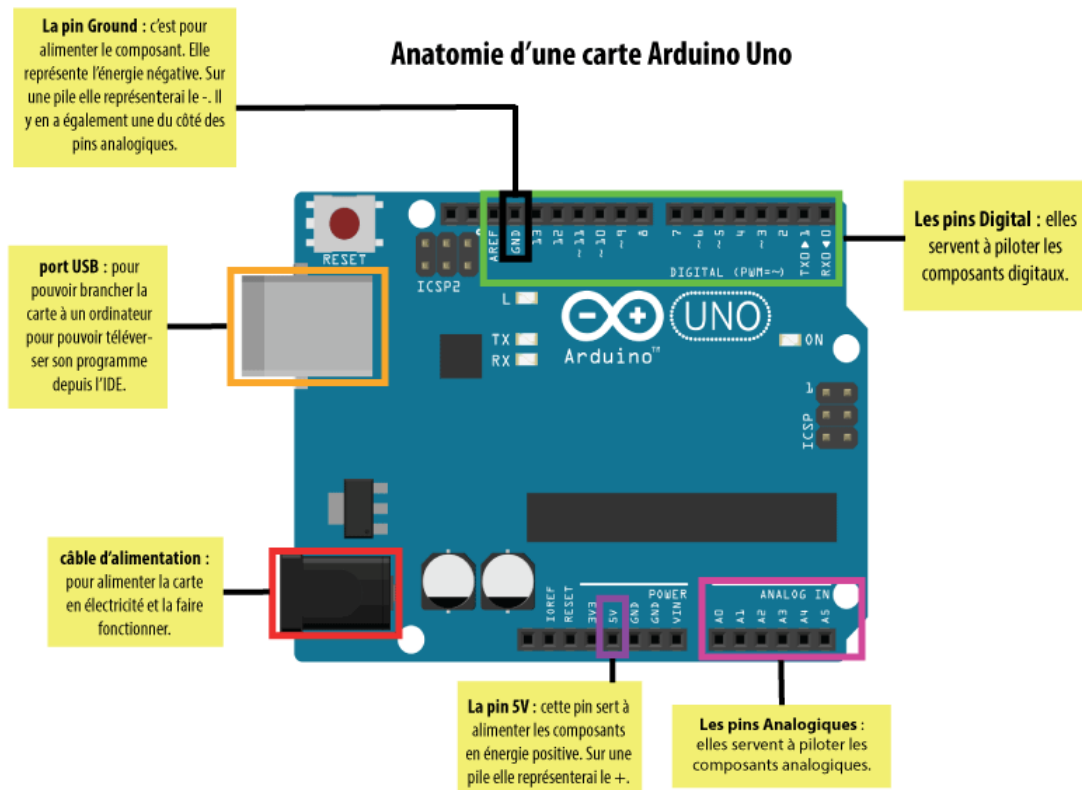
## La carte Arduino, qu'est-ce que c'est ?

Arduino c'est une **petite carte électronique programmable** et un **logiciel multiplateforme** qui permettent à tout le monde de **créer facilement un système électronique**.

C'est un ordinateur de poche, capable de générer des **signaux électriques**.

Vous allez pouvoir effectuer deux actions :

- **Agir** : piloter le courant électrique
- **Récupérer une information** : savoir l'état de la pin (le courant passe-t-il ou non?)

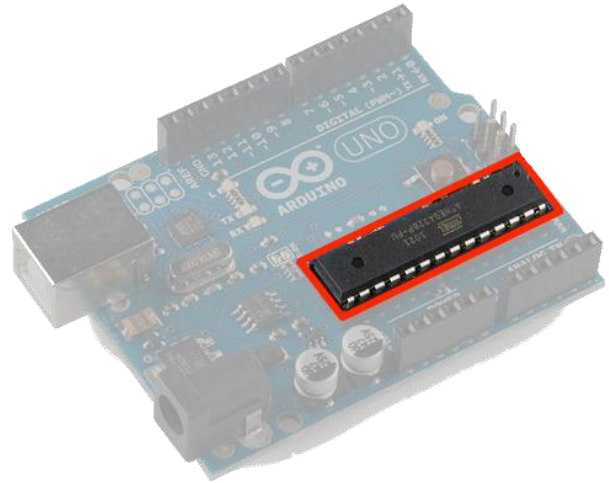
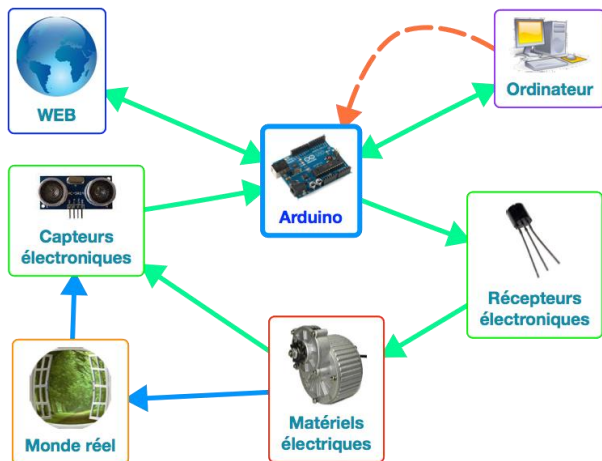


- Arduino est un **circuit imprimé en matériel libre** sur lequel se trouve un **microcontrôleur** qui peut être programmé pour analyser et produire des **signaux électriques**.



**Microcontrôleur :** C'est le cœur de la carte Arduino. C'est un d'ordinateur minuscule et c'est lui que nous allons programmer. Une fois lancé et alimenté en énergie, il est autonome. La force de l'Arduino est de nous proposer le microcontrôleur, les entrées/sorties, la connectique et l'alimentation sur une seule carte.

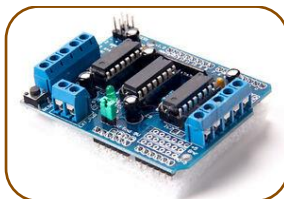
- Permet de créer tout type de montage électronique et d'en écrire le comportement en codant.



## Votre matériel



Carte Arduino



Shield Motor



Câble de connexion



Moteur à courant continu



Photorésistance



Ordinateur



Câble UBS



## Présentation d'Ardublock

La programmation visuelle par blocs est un atout majeur dans l'apprentissage de l'algorithmique et du codage d'applications

Historiquement, le MIT a développé un atelier très pédagogique : Scratch, qui permet de créer des applications et d'interagir avec elles

Plus tard, avec le développement de l'Arduino, une version adaptée permettant de piloter un microcontrôleur, S4A (Scratch for Arduino) a été mise au point par une équipe de chercheurs espagnols. Toutefois, le contrôle de l'Arduino nécessite une liaison constante avec l'environnement Scratch

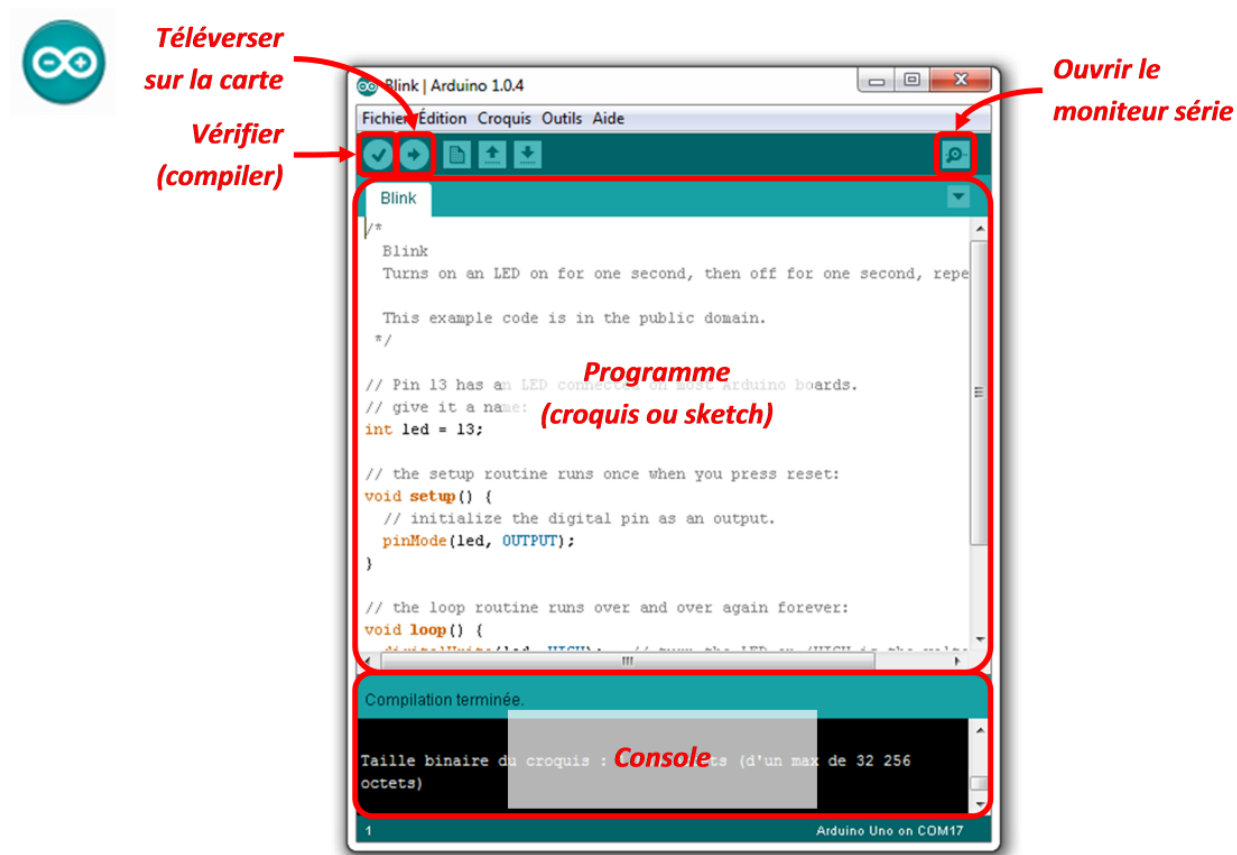


**L'environnement Ardublock constitue un nouveau développement qui permet de réaliser des programmes avec Scratch et d'en dériver une variante téléversable dans l'Arduino, qui fonctionne alors de façon autonome**

### L'IDE Arduino

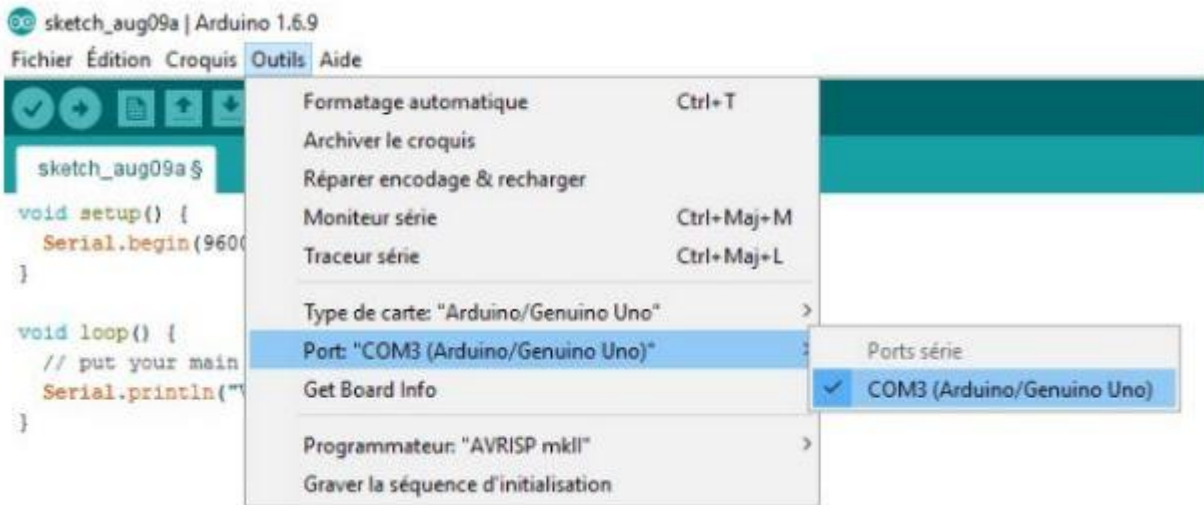
Ouvrez le logiciel Arduino depuis le fichier « ArduinoAug\_0.67.5\_STA » => Arduino.exe

Le logiciel Arduino se présente sous cette forme :





## Vérification et connexion de la carte



Dans l'onglet outils, vérifiez dans Port et cliquez sur le port qui reconnaît votre carte arduino.

## Mon premier programme ! Hello World

Hello world (traduit littéralement en français par « bonjour le monde ») sont les mots traditionnellement écrits par un programme informatique simple dont le but est de faire la démonstration rapide d'un langage de programmation (par exemple à but pédagogique) ou de tester un compilateur.

Au xxie siècle, les programmes affichent plus souvent Hello world! comme une phrase, avec majuscule et point d'exclamation final.

Réalisez ce premier programme :

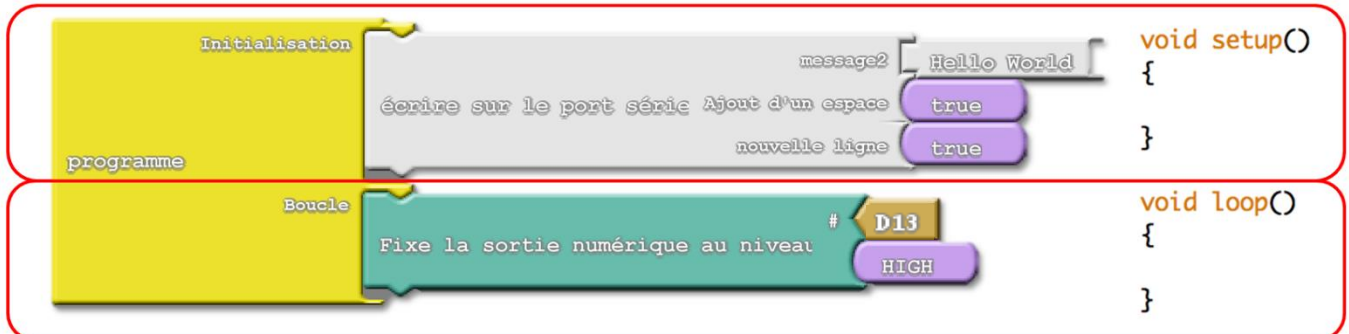




## L'initialisation

Réalisez ce code.

Que se passe-t-il ?



Pour ne lancer qu'une fois certain paramètre, il faut rajouter une étape d'initialisation :

- Le code se trouvant dans le **void setup()** ne va s'exécuter qu'une fois au démarrage
- Le code se trouvant dans le **void loop()** s'exécute à l'infini.

## Gestion des sorties

Le pin 13 de votre carte est relié à la led L sur la carte. Lorsque vous fixez la sortie numérique 13 vous allumez la led

- Exercice : Réaliser un programme qui permet de faire clignoter la LED de la carte Arduino



## Digital Vs Analogique

### Les pins digitaux :

Celles-ci vont agir de manière binaire avec le courant électrique, **c'est à dire qu'elles ne peuvent être que dans deux états différents** : le courant passe (la tension électrique est à 5 Volts) ou ne passe pas (elle est à 0 Volt). C'est les pins D0 à D13

Vous allez pouvoir effectuer deux actions :

- **Agir** : piloter le courant électrique
- **Récupérer une information** : savoir l'état du pin (le courant passe-t-il ou non?)

### Les pins Analogique :

Les pins analogiques sont utilisés dès qu'on cherche à **récupérer une information** qui est plus complexe que du simple binaire. Il s'agit des pins d'A0 à A5

Coder sur 10 bits : 1023 valeurs possible

$$5V = 1023$$



## Les pins digital :

Fixe la sortie numérique au niveau # D2 HIGH

- Agir sur le pin DX
- Mettre à l'état Haut ou Bas

Valeur de la broche Entree numérique # D2

- Lire la valeur sur le pin DX
- 0 ou 1

## Les pins Analogique :

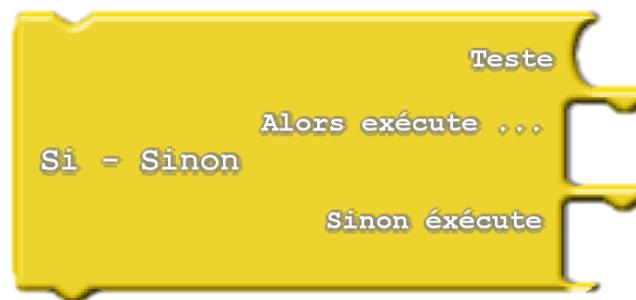
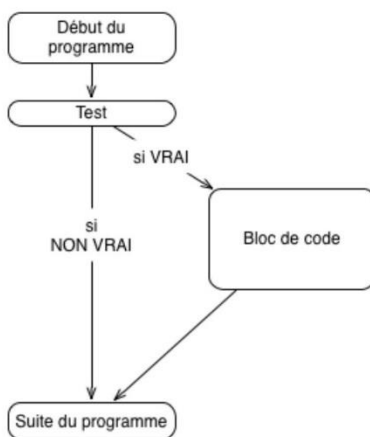
Valeur de la broche Entree Analogique # A0

- Lire la valeur sur le pin DX
- Valeur entre 0 et 1023

**Question : Si je reçois un courant électrique de 1.7V sur le port A0, quelle est la valeur rendu dans le logiciel**

## Les conditions

La condition est un test que va réaliser le programme en se posant une question. S'il peut y répondre 'vrai' alors il exécute un bloc d'action, sinon il ne l'exécute pas



Code	Condition testée
==	égal
>=	supérieur ou égal
<=	inférieur ou égal
>	supérieur
<	inférieur
!=	différent (non égal)

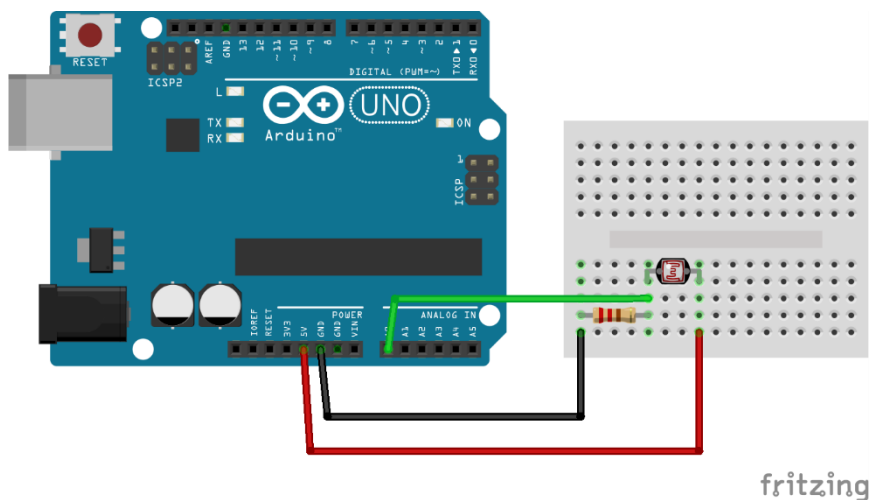
## Les variables

- Une variable est un tiroir permettant de stocker une donnée pour s'en resservir plus tard
- Il faut « déclarer » une variable
- Il existe plusieurs types de variables :
  - Boolean, char, byte, int...



## Exercice : Capteur de lumière

- Réaliser le code d'un capteur de lumière et afficher la valeur sur le port série.

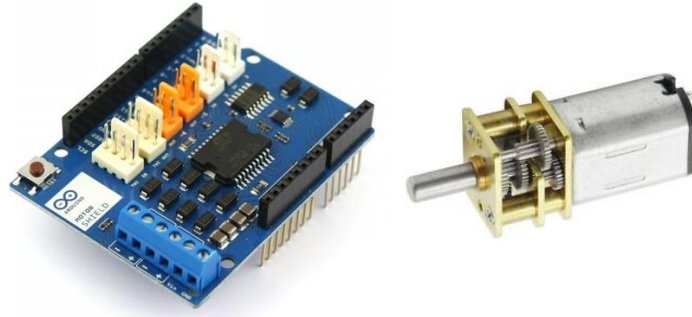


La diode doit s'allumer lors qu'un changement de lumière

Attention, il faut vérifier l'état du capteur photosensible sur le port analogique A0

## Motorisation

Nous allons maintenant pouvoir piloter un moteur à courant continu pour provoquer la rotation du plateau en fonction de l'intensité lumineuse. Pour cela nous utiliserons un motoréducteur.



Le pilotage d'un moteur à courant continu utilise des **sorties PWM**

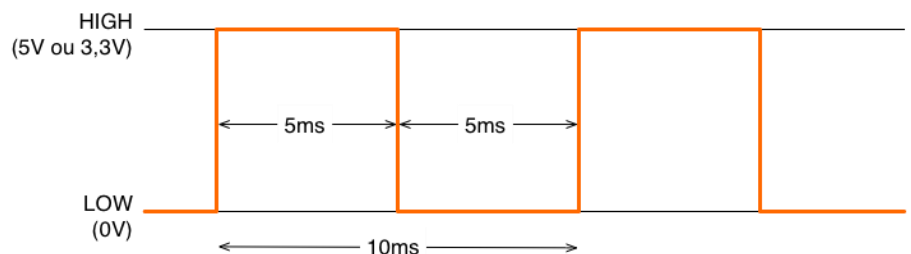
### Sortie PWM

-Une sortie PWM sur une carte Arduino est une sortie Numérique dont les signaux ont toujours une valeur LOW ou HIGH. Mais le principe est de construire un signal qui est alternativement LOW et HIGH et de répéter très vite cette alternance en faisant varier la fréquence du signal.

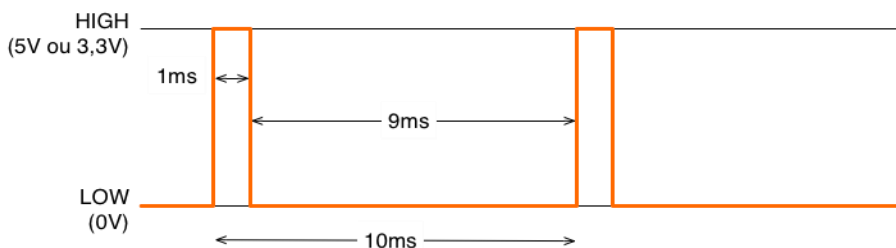
Dans le cas d'une **DEL**, elle est alternativement allumée et éteinte mais le cycle est tellement rapide que la persistance rétinienne nous donne l'illusion d'une DEL allumée en permanence. Prenons par exemple une période de 10ms, soit une fréquence de 100Hz. Si la DEL est allumée pendant 5ms et éteinte pendant 5ms, comme sur la figure ci-dessous, l'impression sera une **luminosité** de 50% de la luminosité maximum.

#### PMW à 50%

La fréquence est de 100Hz, le rapport cyclique de 50%



Si la DEL est allumée pendant 1ms et éteinte pendant 9ms, l'impression sera une luminosité de 10% comme sur la figure ci-dessous.



Le pourcentage de temps passé à l'état HIGH sur la période du signal est appelé le **rapport cyclique**. Il varie donc de 0% (le signal est tout le temps LOW) à 100% (le signal est tout le temps HIGH).

## Les sorties PWM sur une Arduino UNO : 3, 5, 6, 9, 10 et 11

**Attention : toute les sorties ne peuvent pas générer de signal PWM !**

Rapport Cyclique %	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Valeur sur 8 bits	0	13	26	38	51	64	77	89	102	115	128	140	153	166	179	191	204	217	230	242	255

### Bloc



### Faire varier l'intensité d'une led



### Les moteurs à courant continu

Pour contrôler des moteurs, il nous faut un shield moteur.

Shield en anglais signifie bouclier, mais pourquoi l'Arduino aurait-il besoin d'un bouclier ?

Il faut plutôt entendre le mot shield comme une **couche hardware supplémentaire qui vient compléter la carte Arduino**. En effet, les pattes du shield vont venir se connecter exactement et complètement sur la carte Arduino, en la recouvrant. Le shield est aussi conçu pour vous permettre de continuer à avoir accès aux entrées et sorties de l'Arduino. Vous profitez donc des fonctionnalités du shield et de celles de l'Arduino. Bien sûr, certains pins de l'Arduino vont être réservés pour le shield (donc pas utilisables...).

Il suffit de monter le shield sur la carte arduino (un peu comme un sandwich)

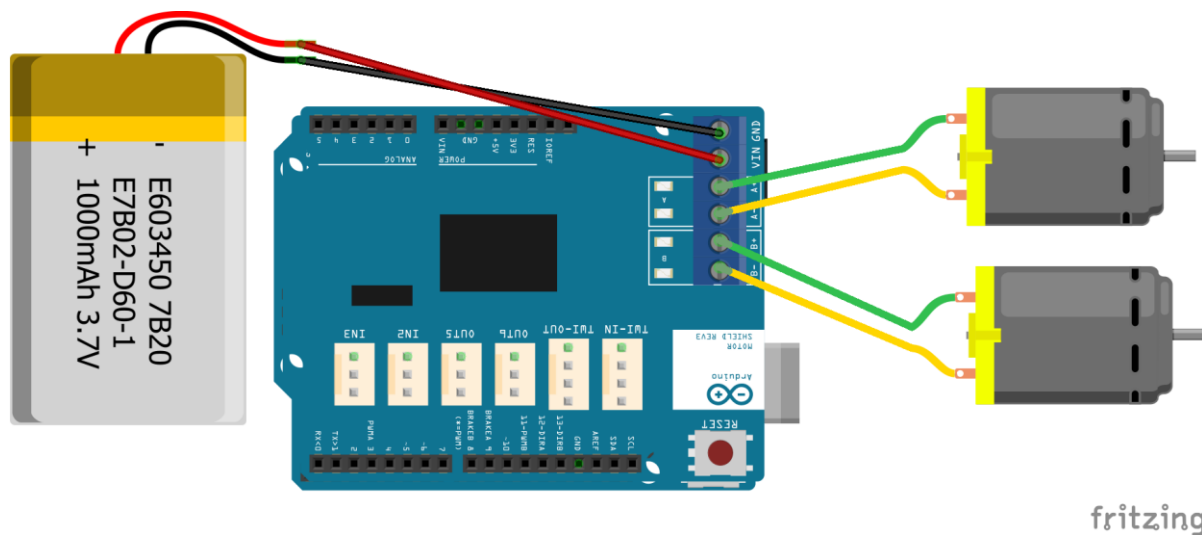
Le shield permet de distribuer l'énergie aux moteurs : **il s'agit d'un circuit de puissance !**



Le moteur se pilote en générant un signal **PWM** sur les broches dédié.

Il suffit de monter le moteur dans les dominos et de générer un signal PWM sur chaque port dédié

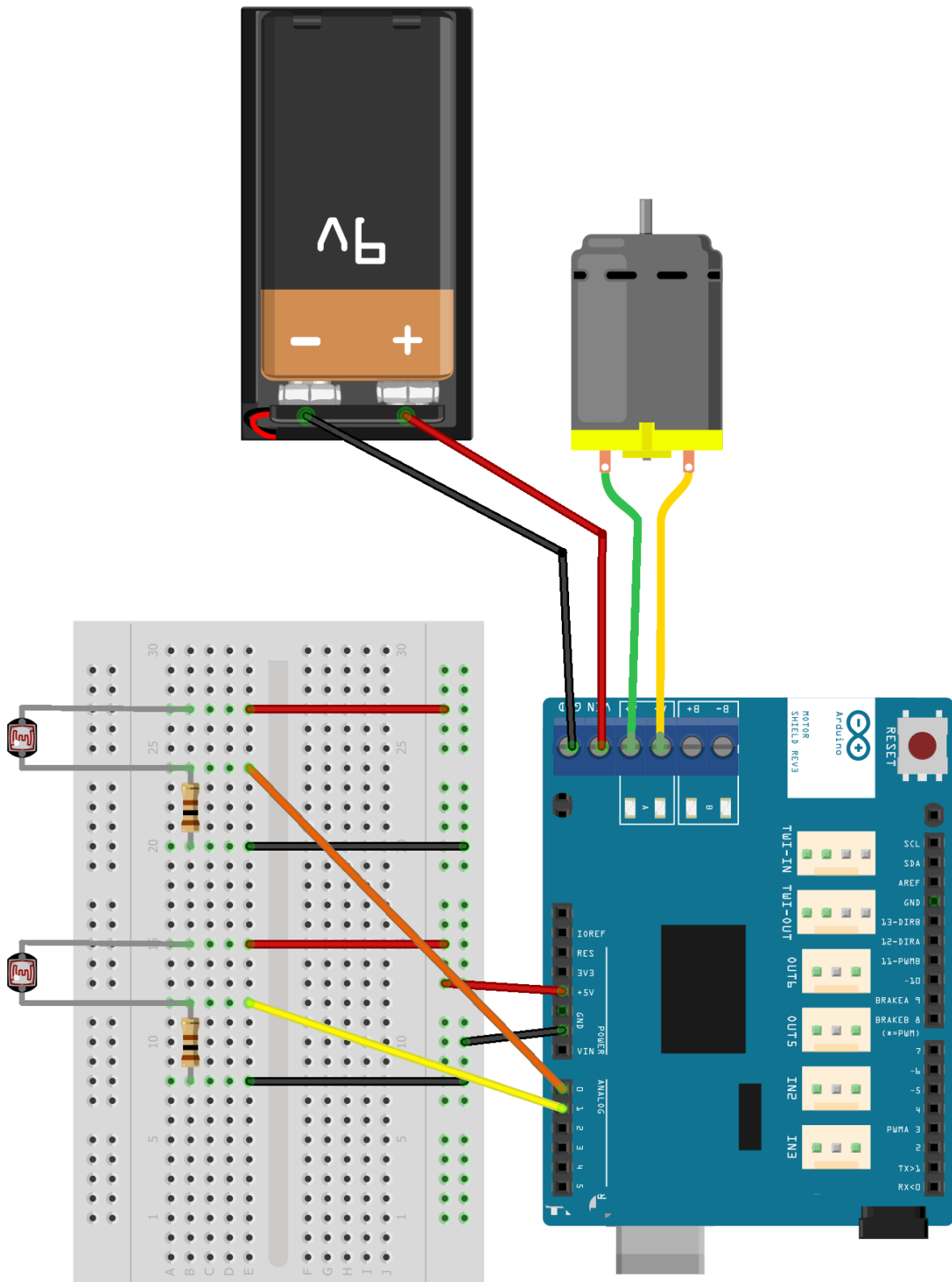
Chaque shield possède son propre système de connexion :



## Shield Arduino L293

Fonction	Shield	Pin arduino
<b>Moteur A</b>	Sens du Moteur A (1 avancer, 0 reculer)	Pin 12
	Vitesse Moteur A (vitesse entre 0 et 255)	Pin 3 (PWM)
<b>Moteur B</b>	Sens du Moteur B (1 avancer, 0 reculer)	Pin 13
	Vitesse Moteur A (vitesse entre 0 et 255)	Pin 11 (PMW)

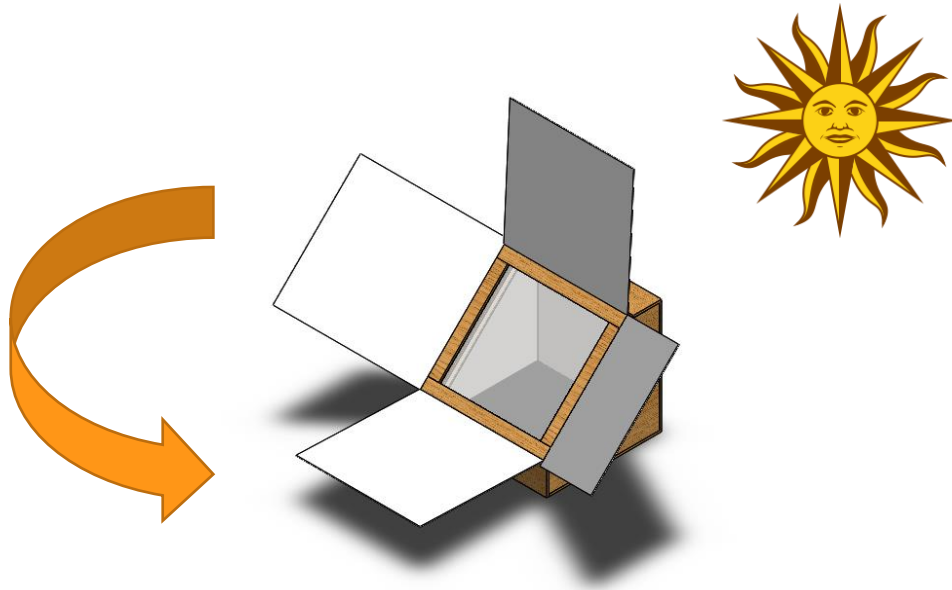
## Montage Electronique



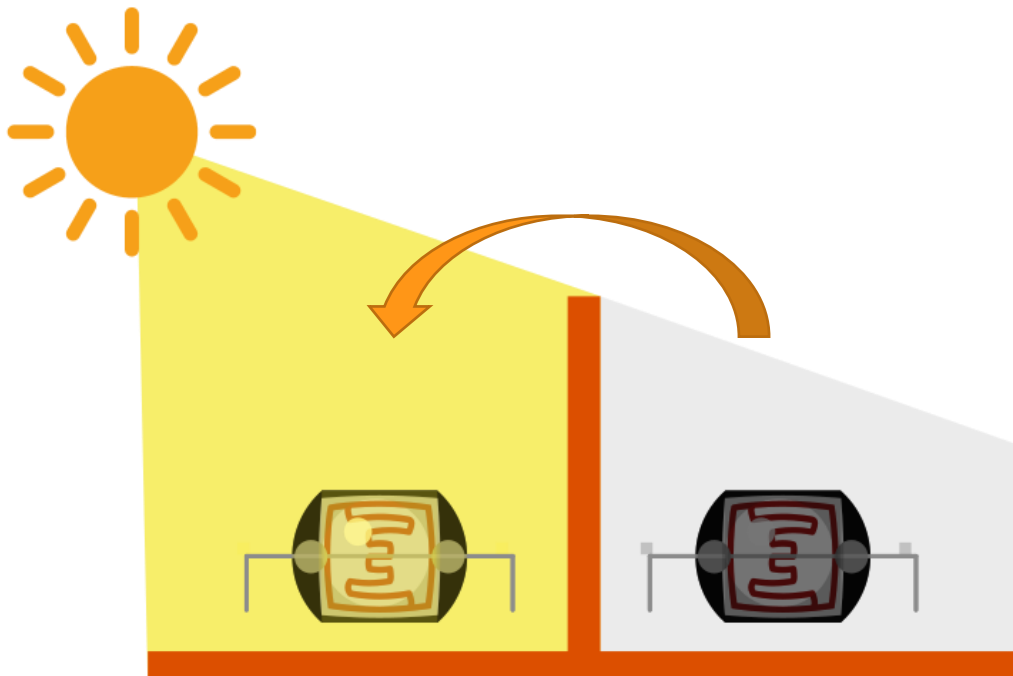
fritzing

## Algorithme

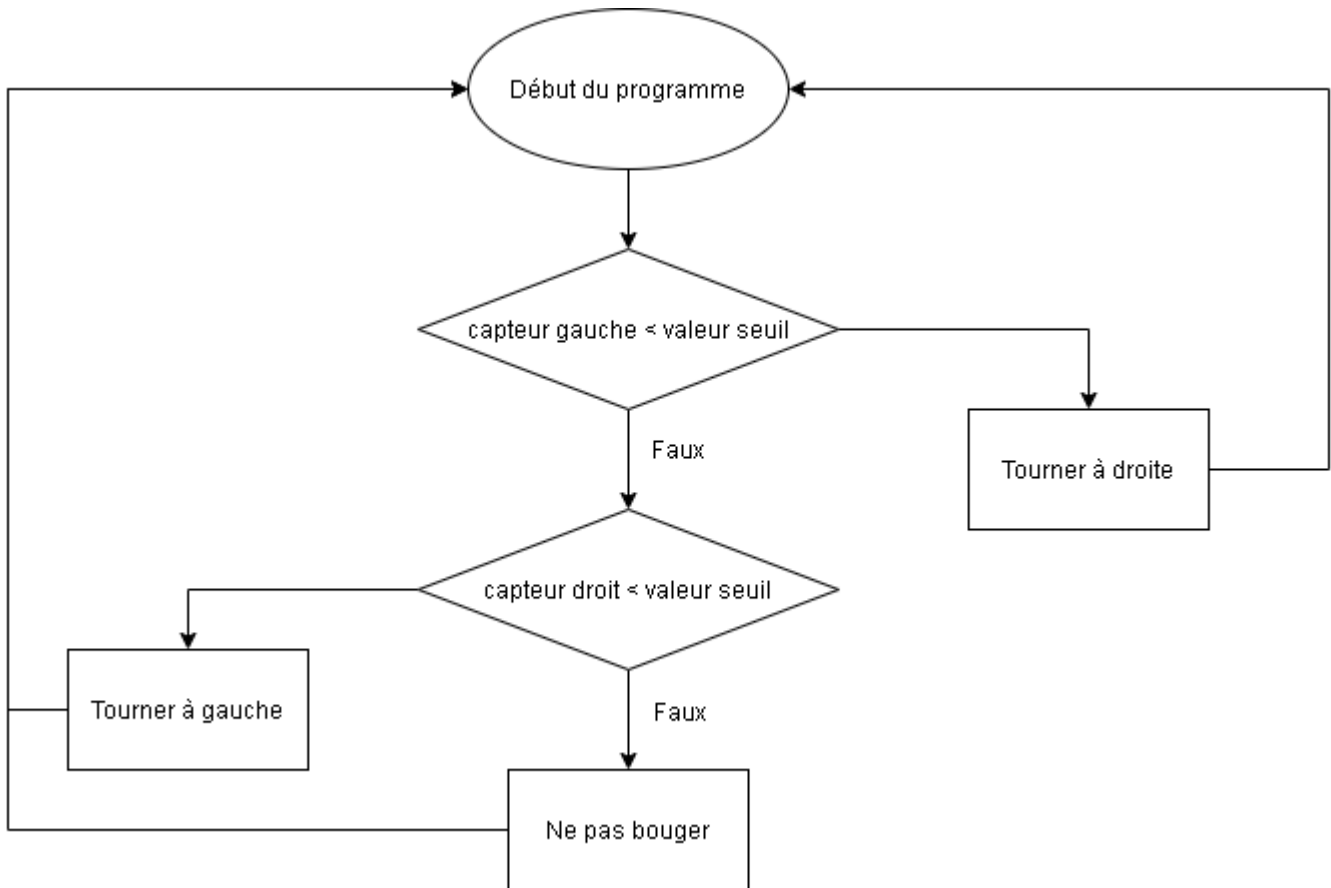
Le four doit s'orienter en face du soleil



Pour cela nous allons tester la valeur sur deux capteurs photosensibles qui seront situés sur une tige solidaire du four. Les deux capteurs seront séparés par une cloison. Lorsque le soleil se déplace, l'un des deux capteurs va se retrouver un peu plus à l'ombre et il sera donc temps pour le système de se repositionner.







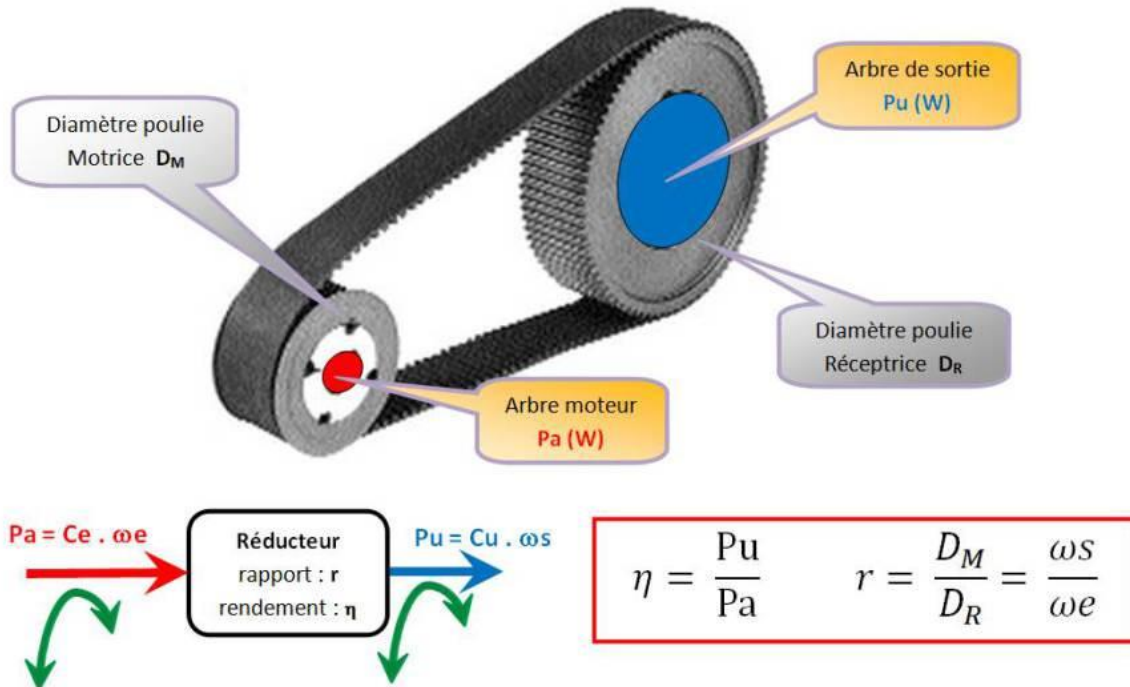
## Travail à faire

1. Traduire l'algorithme en langage C++ interprétable par l'Arduino.
2. Faites un test sur vos photorésistances pour déterminer la valeur seuil qui convient pour mettre le moteur en mouvement.
3. Faire le montage électronique en suivant le plan.
4. Tester votre montage.



## Transmission du mouvement

Afin de transmettre le mouvement du moteur à la structure du four nous allons utiliser un système de poulie-courroie :



### Questions

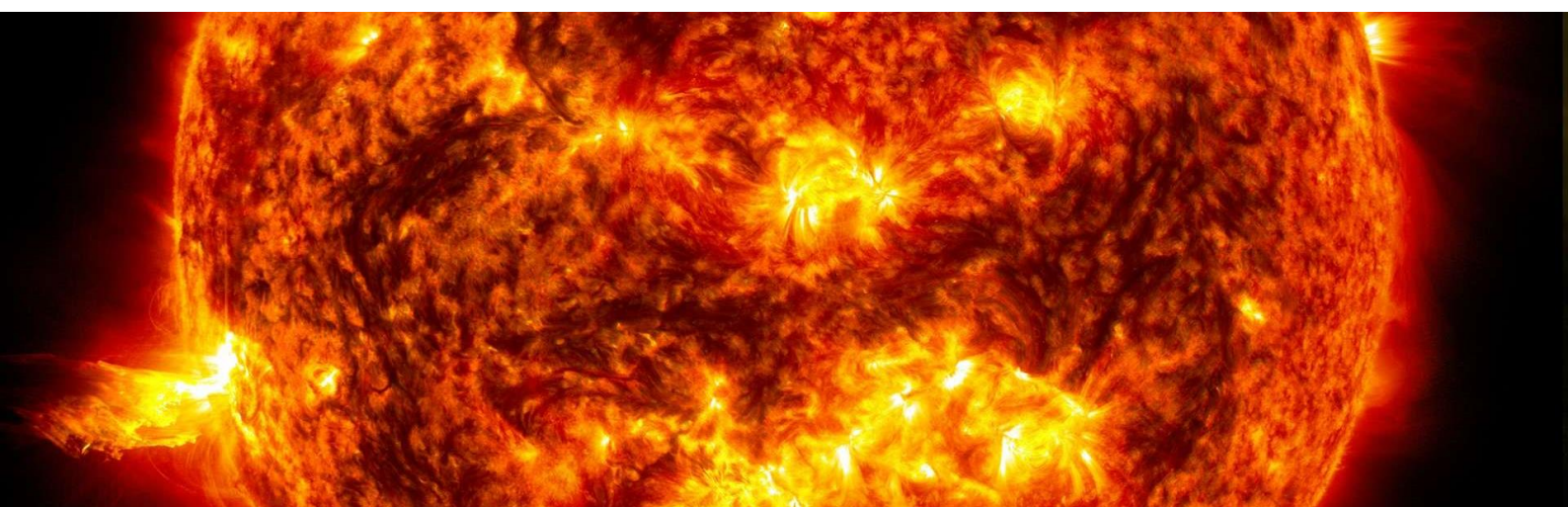
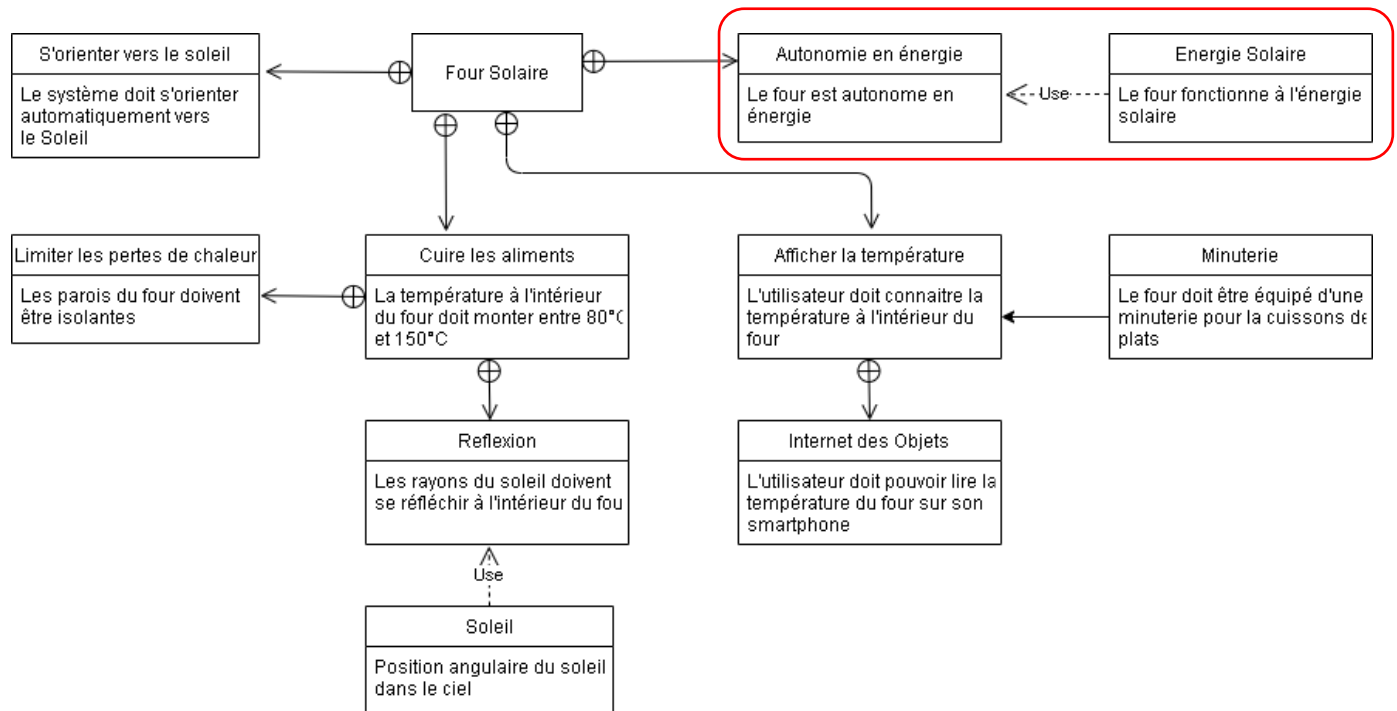
1. Déterminer les diamètres des deux poulies pour transmettre le couple nécessaire à la rotation du four ?
2. Quel sera le rapport de réduction ?
3. Concevez ces deux poulies sur SolidWorks afin de les imprimer en 3D.
4. Imaginez une structure permettant la rotation du four.

# Alimentation en énergie solaire

La cuisson des aliments fonctionnant déjà à l'énergie, il paraît évident pour le système que le système électronique et la motorisation du plateau tournant s'effectue avec l'énergie solaire également.

Nous allons donc voir dans cette partie comment alimenter le four grâce à des panneaux photovoltaïques.

Il répond aussi aux exigences du cahier des charges :



## Alimentation des composants

Le four solaire autonome possède trois systèmes qui nécessitent une alimentation

Système d'affichage : Carte Micro:bit	5V
Plateau tournant	5V
Shield Moteur Arduino	entre 9V et 24V

Le panneau photovoltaïque choisi pour notre système est ce modèle :

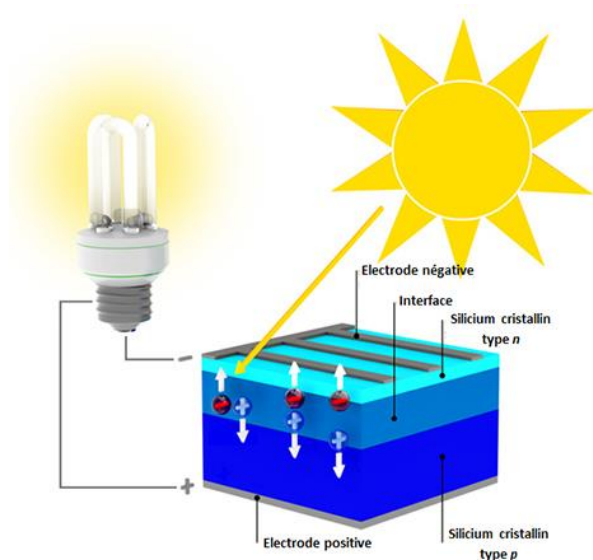
<https://www.velleman.eu/products/view?id=438018&country=us&lang=fr>

### Caractéristiques du panneau

- puissance max. (Pmax): 10 W
- tension à Pmax (Vmp): 17.6 V
- courant à Pmax (Imp): 0.58 A
- tension en circuit ouvert (Voc): 21.8 V
- courant de court-circuit (Isc): 0.61 A
- température de service: de -40 °C à +85 °C
- tension max. du système: 600 VCC
- tolérance de puissance:  $\pm 3 \%$
- cellules: cellules au silicium polycristallin
- nombre de cellules et connexions: 36 (4 X 9)
- dimensions: 356 mm x 253 mm x 30 mm
- poids: 1.16 kg



## Comment fonctionne le photovoltaïque



Les panneaux solaires sont composés de cellules photovoltaïques, qui transforment les rayons du soleil en électricité.

Les particules de lumière, ou photons, heurtent la surface du matériau photovoltaïque disposé en cellules ou en couches minces, puis transfèrent leur énergie aux électrons présents dans le matériau, qui se mettent alors en mouvement dans un sens précis. Un flux électrique est alors généré. **Plus la lumière est intense, plus le flux électrique est important.**



Le courant électrique continu se crée ainsi par le déplacement des électrons dans les couches qui composent les panneaux photovoltaïques. Il est recueilli par des fils métalliques connectés les uns aux autres, pour être acheminés à la cellule suivante. Le courant électrique s'additionne en passant d'une cellule à l'autre ; la somme de l'électricité générée par les panneaux est ensuite raccordée au sein de l'installation, et l'électricité est ainsi générée.

## Etude d'un panneau photovoltaïque

Dans cette activité vous aurez comme matériels :

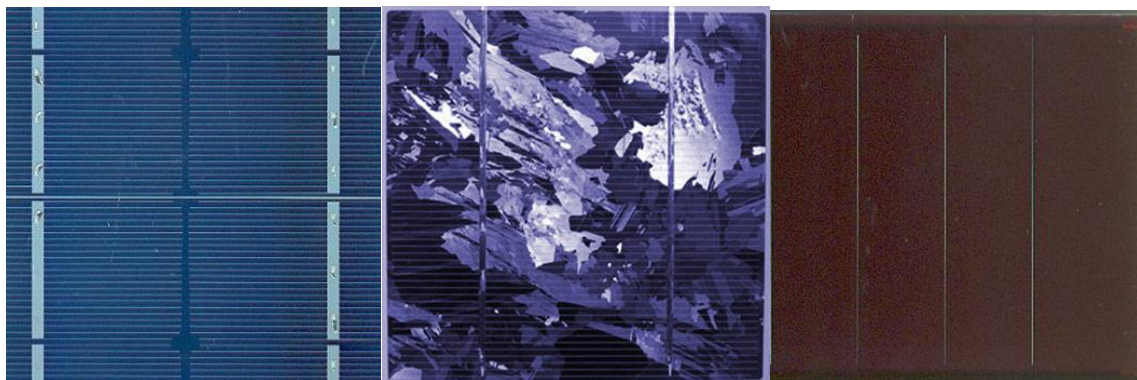
- Un panneau photovoltaïque
- Un multimètre
- Un oscilloscope
- Un Rhéostat 0-1050Ohms
- Une lampe halogène
- Des câbles de connexion
- Un ordinateur
- Un générateur de tension alternatif
- Un Luxmètre



### Objectifs : définir les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque

**Avant tout câblage appelez le professeur pour valider votre montage !**

Identifier la *technologie de cellules photovoltaïques*



Monocrystallin

Polycristallin

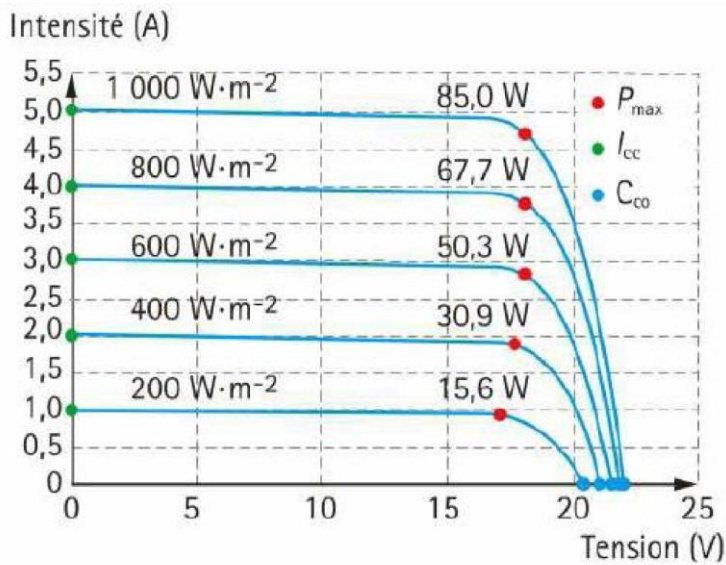
Cellule Amorphe

**Question 1 :** Quel sont les différences notable entre ces trois types de cellules photovoltaïques ?

**Question 2 :** Quelle est la technologie utilisée sur le panneau solaire mis à votre disposition ?

**Question 3 :** Quelles sont les conditions de positionnement pour avoir un fonctionnement optimal d'un panneau solaire ?

## Caractéristiques électriques du panneau solaire



On veut tracer la courbe caractéristique « **intensité-tension** » d'un module solaire photovoltaïque.

### Objectifs de l'activité :

- Établir les conditions de fonctionnement optimal d'un panneau solaire.
- Mesurer les performances d'un panneau solaire.

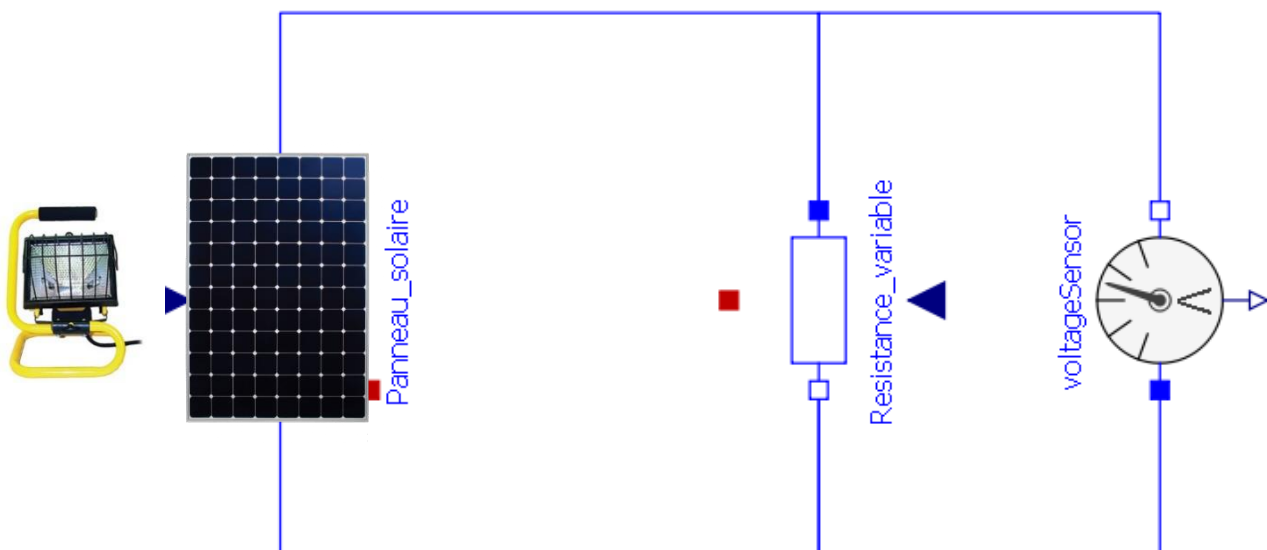
### Données constructeur

La caractéristique constructeur intensité du courant-tension d'un panneau solaire quelconque est donnée ci - dessous pour une température de 25 °C

On veut tracer la courbe caractéristique «

intensité-tension » d'un module solaire photovoltaïque.

Pour ce faire, branchez le module solaire sur une charge résistive variable (rhéostat 0-1050 ohms de 300 Watts) avec un voltmètre aux bornes de la résistance variable.



### Expérience : Situation 1

Éclairer le panneau solaire à l'aide de la lampe halogène placée à 150 cm du panneau solaire.

Patience au moins une minute afin d'obtenir un fonctionnement en régime permanent et d'éviter toute erreur due à des variations de température.

Mesurer la valeur de l'éclairement lumineux  $E$ , en lux (lx) avec le luxmètre, à l'emplacement du panneau solaire.

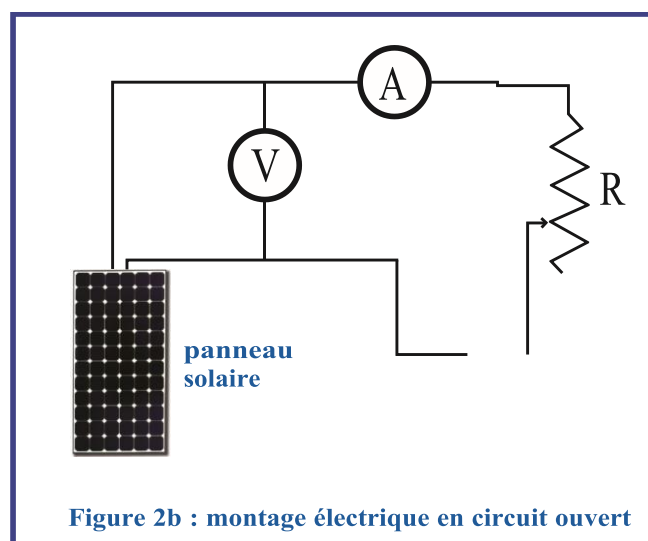
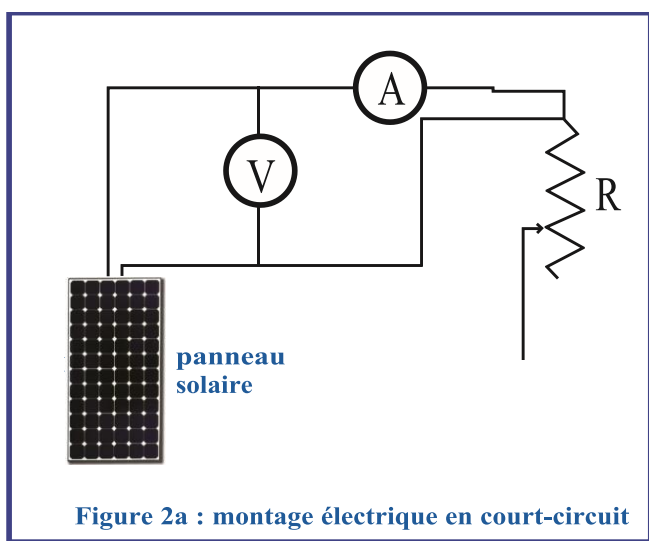
**Précaution : Durant toute la phase de mesure, il faut veiller à ne pas modifier les conditions d'éclairement du panneau solaire.**

Mesurez les valeurs de la tension électrique et de la résistance sur plusieurs positions du rhéostat régulièrement réparties et reportez-les sur 20 points dans le tableau EXCEL [Mesures panneauPhotovoltaïcs](#) :

NB : il est important que l'irradiance (luminosité) ne varie pas pendant la mesure des différents points (module fixe).

Effectuez également les mesures pour les deux points particuliers suivants :

- Court-circuit : Lorsqu'on relie directement un fil d'une borne du rhéostat sur l'autre borne du rhéostat.
- Circuit ouvert : en débranchant une borne du rhéostat.



Point	Court-Circuit	Circuit Ouvert
Tension (V)		
I (A)		

À l'aide du logiciel Excel ou Calc, compléter votre tableau de mesures en calculant la puissance  $P_{\text{élec}}$  fournie par le panneau solaire

**Question 4 :** À l'aide de la fonction courbe d'Excel, tracer les graphes  $I = f(U)$  et  $P_{\text{élec}} = f(U)$ .

**Question 5 :** Indiquer sur le graphe  $I = f(U)$  les points de fonctionnement à vide et en court-circuit.

**Question 6 :** Quelle est la puissance maximale  $P_{\text{élec\_max}}$  délivrée par le panneau solaire dans cette situation ?

**Question 7 :** Comparer et commenter vos résultats avec les données constructeurs (généralement notées au dos de votre panneau)



## Expérience situation 2 (si le soleil est là...)

Refaites cette expérience mais cette fois-ci en débranchant la lampe halogène et en prenant vos mesures en extérieur.



Vous mesurerez également les valeurs de tension et d'intensité en court-circuit et en circuit ouvert.

**Question 8 :** Tracer les graphes  $I = f(U)$  et  $P_{\text{élec}} = f(U)$ .

**Question 9 :** Indiquer sur le graphe  $I = f(U)$  les points de fonctionnement à vide et en court-circuit.

**Question 10 :** Quelle est la puissance maximale  $P_{\text{élec\_max}}$  délivrée par le panneau solaire dans cette situation ?

## Rendement du panneau solaire avec la lampe

### Objectif de l'activité :

Déterminer l'ordre de grandeur du rendement d'un panneau solaire.

### Ressource :

- Le *flux lumineux*  $F$ , exprimé en **lumen** (en lm), est la quantité d'énergie émise par la lampe sous forme de rayonnement :

$$F = E \times S$$

(Avec  $E$ , *éclairement lumineux* en lux (en lx) et  $S$ , *surface* du panneau solaire en  $m^2$ ).

- L'**éclairement énergétique** (en W) est le rapport du *flux lumineux*  $F$  en lumen (lm) (reçu par le panneau solaire d'une *surface*  $S$ ) par l'*efficacité lumineuse*  $K$  en lumen par watt ( $lm \cdot W^{-1}$ ) de la lampe :

$$\Phi_E = F / K$$

K = Efficacité lumineuse en lm/W		
Catégorie	Type	lm/W
<u>Lampes à incandescence</u>	Lampe halogène 20 W (2700 K)	11,8
	Lampe halogène 116 W (2800 K)	18,4
	Lampe halogène 400 W (2900 K)	21,9
	Lampe halogène 2000 W (3200 K)	26,0
	Lampe halogène 5000 W (3200 K)	27,0
<u>Lampes fluorescentes</u>	Tube fluorescent	60 à 11
	Lampes fluo compactes	55 à 70
<u>Lampes à arc</u>	<u>Lampe au xénon</u>	13 à 47
<u>Lampes à décharge</u>	<u>Lampe à vapeur de sodium haute pression</u>	81 à 150
	<u>Lampe à vapeur de sodium basse pression</u>	167 à 206
	Lampes aux halogénures métalliques	67 à 110
<u>Lampes à diode électroluminescente</u>	LED blanche	80 à 200
	LED blanche (2014) (5 100 K)	303

Le *rendement*  $\eta$  du panneau solaire est donné par la formule :

$$\eta = \frac{P_{\text{electrique\_max}}}{\Phi E}$$

**Question 11 :** Calculer le rendement de votre panneau solaire dans cette configuration

**Question 12 :** Rechercher l'ordre de grandeur du rendement des panneaux photovoltaïques utilisés sur les toits des maisons individuelles et conclure

## Puissance et rendement en extérieur

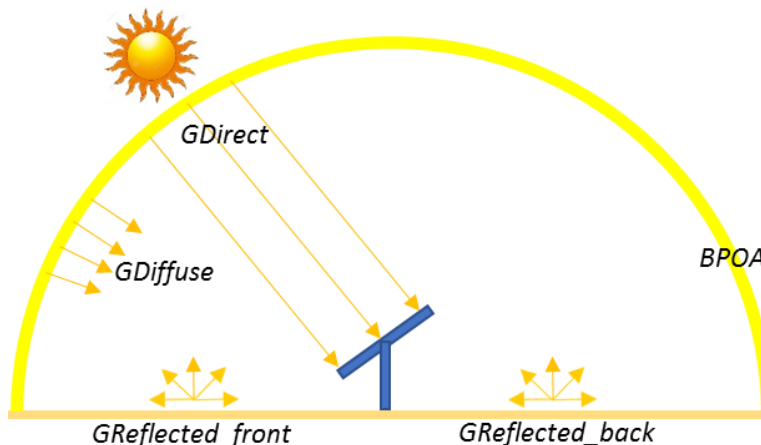
### Éclairement énergétique

Afin de calculer l'énergie en entrée de notre panneau solaire, nous allons introduire la notion **d'irradiance** ou **d'éclairement énergétique**.<sup>13</sup>

**L'irradiance** quantifie la puissance d'un rayonnement solaire frappant par unité de surface perpendiculaire à sa direction. C'est la densité surfacique du flux énergétique arrivant au point considéré de la surface. Dans le Système international d'unités, elle s'exprime en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup> ou W m<sup>-2</sup>).

Il existe 3 types d'irradiance :

- **L'irradiance directe** : les rayons du soleil frappent directement le panneau
- **L'irradiance diffuse** : Issue du rayonnement global de l'atmosphère terrestre
- **L'irradiance réfléchie** : les rayons sont renvoyés depuis les objets et les corps



L'irradiance va nous servir d'énergie d'entrée pour le calcul du rendement de notre panneau solaire. Nous devons avant tout avoir une estimation de l'irradiance solaire dans la zone où sera positionné notre panneau. Car l'irradiance solaire varie énormément selon la zone géographique.

### PVGIS

<sup>13</sup> <https://www.encyclopedie-energie.org/energie-solaire-les-bases-theoriques-pour-la-comprendre/>

L'application en ligne gratuite PVGIS est un excellent outil de simulation qui permet de calculer gratuitement la production de systèmes photovoltaïques et de déterminer l'irradiance.

A l'aide de son interface Google Maps intégré, il est très facile d'obtenir les données de production d'un système PV à partir des données d'ensoleillement précises du site (intégrant notamment les masques lointains liés au relief, collines, montagnes).

Par ailleurs PVGIS propose des cartes d'ensoleillement (irradiation en kWh/m<sup>2</sup>) et de température précises haute définition de la plupart des Pays du monde.

[https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/fr/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/fr/tools.html)

Ce logiciel a été développé par le centre de recherche de l'institut pour l'environnement et le développement durable de la commission européenne.

## Quantité d'énergie à partir de l'irradiance

Nous allons calculer la puissance perçue par le panneau.

$$P_{\text{solaire}} = \text{Irradiance} * \text{Surface Utile}$$

- $P_{\text{solaire}}$  (W)
- Irradiance (W/m<sup>2</sup>)
- Surface Utile (m<sup>2</sup>)

**Question 13 :** Déterminer le rendement du panneau solaire lors de son utilisation pendant l'activité en utilisant les données de PVGIS



## Valider la Simulation d'un panneau photovoltaïque

### Problématique

Valider le modèle simulé d'un panneau photovoltaïque utilisé dans une installation de production d'énergie électrique autonome et renouvelable. La simulation de ce modèle pourra alors permettre de dimensionner l'installation souhaitée sans avoir à faire des essais avec le produit réel.

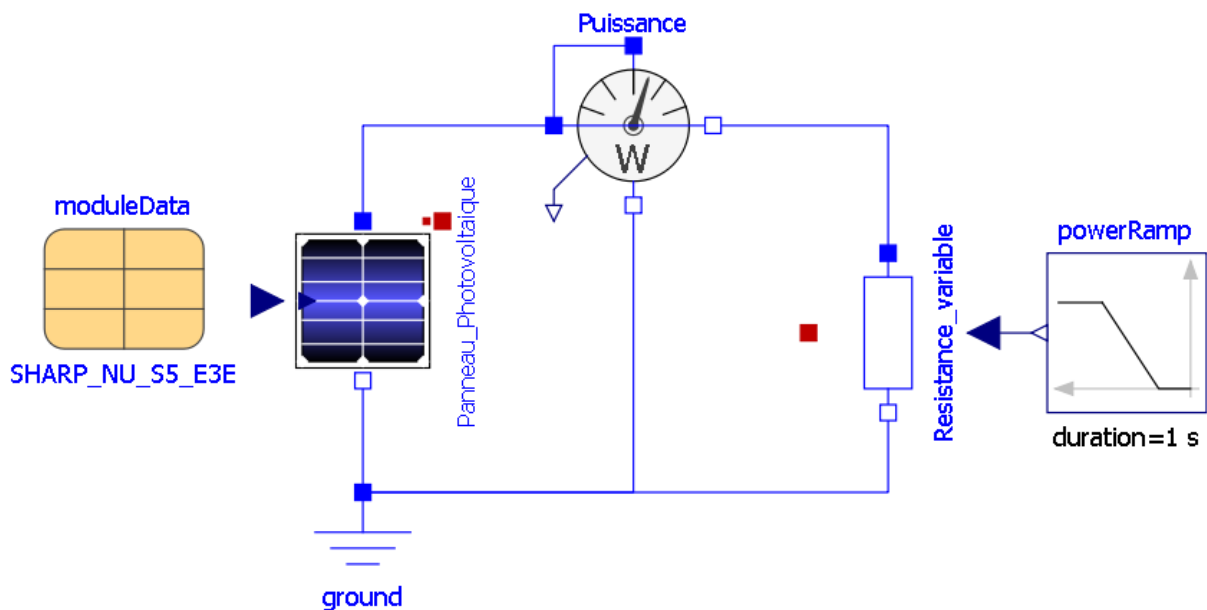
### Simulation d'un module photovoltaïque

Noter les valeurs de la tension de circuit ouvert  $V_{OC}$  et de l'intensité du courant de court-circuit  $I_{SC}$  du module photovoltaïque utilisé dans l'activité précédente « Etude d'un panneau photovoltaïque ».

Point	Court-Circuit	Circuit Ouvert
Intensité (A) $I_{SC}$		
Tension (V) $V_{OC}$		

Ouvrir **OpenModelica** présent sur le bureau. Puis ouvrir dans le dossier « ModelesOM » puis « PhotoVoltaics » puis **package.mo** pour charger la librairie de composants photovoltaïques

Ouvrir le fichier « **Puissance\_PanneauSolaire.mo** »



Le modèle ci-dessus permet de simuler le comportement du panneau photovoltaïque.

Dans « moduleData », faire un double clic et renseigner les deux paramètres précédemment trouvés pour qu'ils correspondent bien aux caractéristiques du module à modéliser.




Breakthrough data

BvCell	<input type="text" value="18"/>	V Breakthrough cell voltage
Ibv	<input type="text" value="1"/>	A Breakthrough knee current
Nbv	<input type="text" value="0.74"/>	Breakthrough emission coefficient

Vocabulaire :

- *Breakthrough cell Voltage* = Tension de circuit ouvert
- *Breakthrough knee current* = Courant de court circuit

Lancer la simulation et observer les courbes en double cliquant sur l'onglet « Tracé »

**Question 14 :** Afficher la courbe paramétrique  de l'intensité  $I$  en fonction de la tension  $V$ ,  $I = f(V)$ . Exporter l'image de cette courbe dans votre compte-rendu.

*Rappel : maintenir Shift+ valeur pour les abscisses puis sélectionner les ordonnées.*

Comparer cette courbe avec celle de l'activité 1

**Question 15 :** A l'aide du *Power\_sensor*, déterminer la puissance max du panneau solaire. Déterminer l'intensité et la tension  $V$  pour cette puissance max. Annoter ce point de fonctionnement particulier sur votre courbe  $I = f(V)$

## Influence de l'irradiance sur un module photovoltaïque

Dans les paramètres du Panneau\_Photovoltaïque, modifier l'irradiance reçu par le panneau (paramètre : *constantIrradiance*). Faites une simulation pour des valeurs d'irradiance de **200, 400, 600, 800, 1000 et 1200 W/m²**

**Affichez les courbes  $I = f(V)$  et  $P = f(V)$  pour chacune des valeurs d'irradiance**

**Question 16 :** Compléter alors le document réponse. Pour chaque courbe indiquer les valeurs de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_{mpp}$ ,  $V_{mpp}$  et  $I_{mpp}$ .

**Question 17 :** Que remarquez-vous ?

## Influence de la température sur un module photovoltaïque

**Question 18 :** Toujours avec la simulation, visualiser les courbes  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  pour différentes températures **-25, 0, 25, 50 et 75°C** avec une irradiance constante de **1000 W/m²**.

**Question 19 :** Que remarquez-vous ?

## Optimisation

Avec la simulation, compléter dans le tableau ci-dessous la valeur de la puissance Max pour les conditions d'Irradiance et de température données

	Irradiance W/m <sup>2</sup>			
Temp °C	Puissance Max	200 W/m <sup>2</sup>	500 W/m <sup>2</sup>	1000 W/m <sup>2</sup>
20°C				
30°C				
40°C				

**Question 20 :** Pour quelles conditions la puissance d'un panneau photovoltaïque est-elle optimale

## Irradiance et stockage dans une batterie

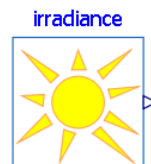
Nous allons utiliser l'irradiance fournie par PVGIS pour la journée d'aujourd'hui à votre position. Une fois sur PVGIS, la première chose à faire est de naviguer sur la carte pour trouver le site où sera implantée votre installation solaire. Puis, aller dans l'onglet « **données quotidiennes** ». Naviguer sur la carte pour trouver le site où sera implantée votre installation solaire

**Question 21 :** Déterminer l'irradiance max de votre position et votre journée actuelle.

### Configuration du bloc « Irradiance »

Le bloc « Irradiance » permet de simuler l'ensoleillement sur une journée

- Créer un nouveau modèle.
- Faites glisser le bloc « Irradiance » depuis la librairie « Photovoltaic »
- Remplir les paramètres du bloc avec les données que vous avez recueilli sur PVGIS sur la date d'aujourd'hui
- Dans *irradianceRef*, renseigner la valeur max de l'irradiance global du jour de PVGIS.
- Décocher l'ensemble des paramètres « Initialization »



Parameters			
startDay	<input type="text" value="10"/>	Day	
startMonth	<input type="text" value="9"/>	Month	
startYear	<input type="text" value="2016"/>	Year	
TimeZone	<input type="text" value="1"/>	Time zone	
longitude	<input type="text" value="16.369"/>	<input type="text" value="deg"/> Longitude	
latitude	<input type="text" value="48.237111"/>	<input type="text" value="deg"/> Latitude	
irradianceRef	<input type="text" value="1000"/>	W/m2	Reference solar irradiance
gamma	<input type="text" value="10 * pi / 180"/>	<input type="text" value="rad"/> Angle of PV module with w.r.t. horizontal plane	
azimuth	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="deg"/> Azimuth of the PV module orientation	

**Question 22 :** Combien de secondes y-a-t-il dans une journée ? Renseigner cette valeur dans les paramètres de la simulation.

**Question 23 :** Lancer la simulation et comparer la courbe de l'irradiance sur une journée avec la courbe de PVGIS.

## Configuration du Maximum power point tracker

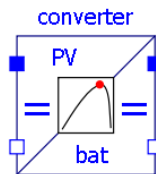
Un **Maximum Power Point Tracking** (abrégé MPP, **suivi du point maximal de puissance**), est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques.

Les premières utilisations de MPPT remontent à 1968 dans le cadre d'applications spatiales ayant pour générateur électrique des panneaux solaires photovoltaïques.

Un système MPPT est un ensemble de composants incluant des onduleurs, des chargeurs de batteries, et des panneaux solaires. L'objectif est d'obtenir la puissance maximale possible depuis un (ou plusieurs) panneau(x) photovoltaïque(s), typiquement un panneau solaire.

Le principe de fonctionnement du système est d'analyser en permanence la sortie du panneau solaire, afin d'appliquer la résistance la plus appropriée pour un environnement et des conditions donnés. Typiquement, les systèmes MPPT sont intégrés dans les convertisseurs électriques qui incluent la conversion de l'intensité  $I$  ou de la tension  $U$ , le filtrage, et la régulation pour les adapter à la résistance du circuit électrique correspondant à chaque usage, comme un réseau électrique, des batteries ou des moteurs.

Le bloc « **convertir** » permet la combinaison d'un **convertisseur DC/DC** et d'un **MP**



Configuration du bloc à respecter

Convertir	
VRef	48 V Reference DC source voltage
Ti	1E-6 s Internal integration time constant

MP tracker	
startTime	0 s Start time
samplePeriod	1 s Sample period
VmpRef	moduleData.VmpRef V Reference maximum power power of plant
ImpRef	moduleData.ImpRef A Reference maximum power current of plant
n	100 Number of voltage and power discretizations

Aujourd'hui, la meilleure solution pour stocker l'énergie produite est la batterie à décharge lente, communément appelée **batterie solaire**. Ce type de batterie peut être utilisé pour une installation isolée (logement) dans une démarche de maison solaire passive, mais aussi pour un camping-car ou un bateau.



Un régulateur, placé entre la batterie et le panneau solaire, est nécessaire pour que le niveau de charge ne soit ni trop bas ni trop élevé.

## Caractéristiques de la batterie 12V LiFePO<sub>4</sub>

La batterie utilisée dans notre exemple sera une PowerBrick+ 12V battery pack - Lithium Iron-Phosphate (LiFePO<sub>4</sub>) - 12Ah. Document technique dans les fichiers de l'activité.

Electric	Nominal voltage	12.8V
	Nominal capacity	12 Ah
	Stored energy	153.6 Wh
	Internal resistance	≤ 50mΩ
	Cycles	>3000 cycles (see chart)
	Self discharge	< 3% per month
	Energy efficiency	> 98%
Standard Charge	Charge voltage	14.4V ± 0.2V
	Charge mode	CC/CV : Constant Current / Constant Voltage
	Continuous charge current / Maximum charge current	6 A / 12A
	BMS charge cut-off voltage	14.8V ± 0.1V
Standard Discharge	Continuous discharge current	24 A (307 W)
	Maximum discharge current (< 30s)	30 A (384 W)
	BMS discharge cut-off voltage	10 V
Environment	Charge temperature range	0°C to +50°C
	Discharge temperature range	-20°C to +60°C
	Storage temperature	0°C to +50°C @60±25% relative humidity
	IP protection level	IP 66
Mecanical	Cell assembly	18650 - 4S8P
	Casing material	ABS
	Dimensions	L : 151mm x P : 98mm x H : 95 mm
	Weight	1.55 kg
	Terminal	Clip Faston 6.35mm

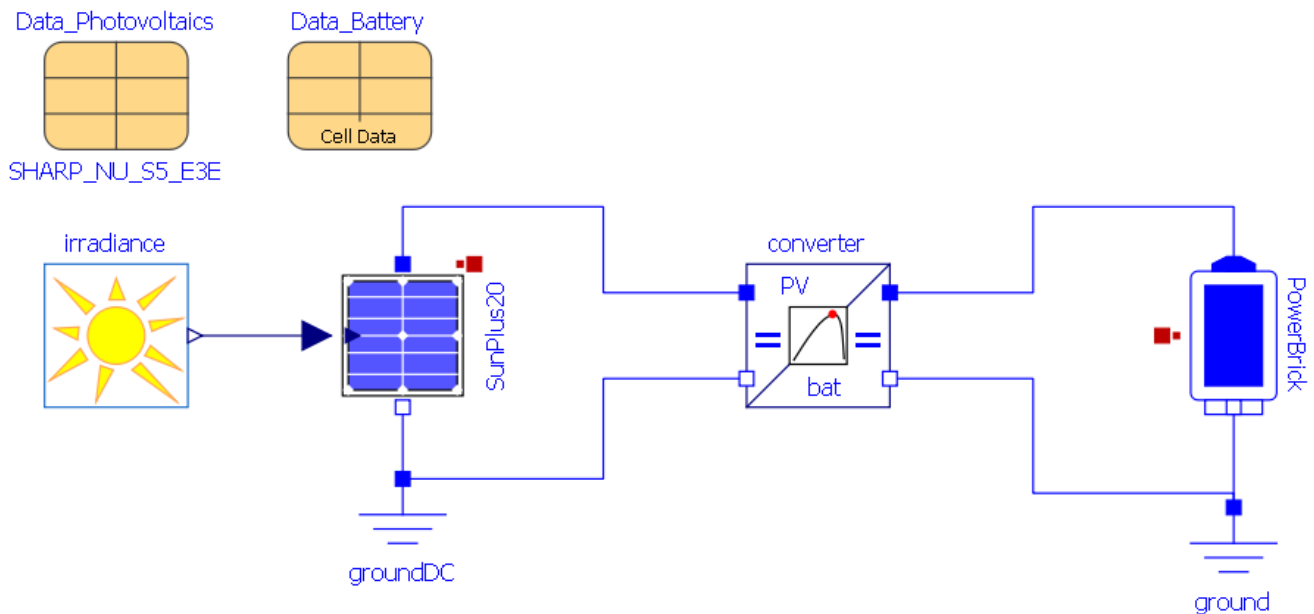


## Caractéristique du panneau solaire

Pour la recharge de cette batterie, nous allons utiliser un panneau solaire Sun Plus 20 incliné à 55°

Technical Data		Technische Daten				Sun Plus 5	Sun Plus 10	Sun Plus 20
Systemvoltage		Systemspannung		(VDC)	[V]	12		
Power		Nennleistung		(Pmp)	[W]	5	10	20
Voltage at max. power		Spannung bei Max. Leistung		(Vmp)	[V]	16,8	17,0	17,0
Current at max. power		Strom bei Maximalleistung		(Imp)	[A]	0,3	0,59	1,18
Open circuit voltage		Leerlaufspannung		(Voc)	[V]	21,0	22,0	22,0
Short circuit voltage		Kurzschlussstrom		(Isc)	[A]	0,34	0,66	1,32
Max. tolerance		Max. Leistungstoleranz			[%]	+/- 3 %		
Max. system voltage		Max. Systemspannung			[V]	70		
Operating module temp.		Min. Betriebstemperatur			[°C]	-40 °C to +85		
Cells		Zellen				36 cells poly   36 Zellen, polykristallin		
Front		Vorderseite				Tempered Low Iron Solar Glass   gehärtetes eisenarmes Solarglas		
Frame		Rahmen				Anodized Aluminum with Twin - Wall Profile   eloxierter Aluminium Hohlkammerahmen		
Junction box protection		Anschlussdose Schutzklasse				IP65		
Dimension (l x w x h)		Abmessung (L x B x H)		(X/Y/Z)	[mm]	255 x 255 x 34	355 x 255 x 34	455 x 380 x 34
Mounting holes pitch		Befestigungslöcher Abstand		(x1/y/x2)	[mm]	150 / 226 / -	200 / 226 / -	330 / 351 / -
Mounting hole Ø		Befestigungslöcher Ø				7 x 10	7 x 10	7 x 10
Weight		Gewicht			[kg]	1,0	1,4	2,2
Temperature coefficient	Power	Temperaturkoeffizient	Leistung		[%]	-0,43		
	Voc		Voc		[%]	-0,33		
	Isc		Isc		[%]	0,05		

Ouvrir le modèle [Recharge\\_BatterieSolaire.mo](#)



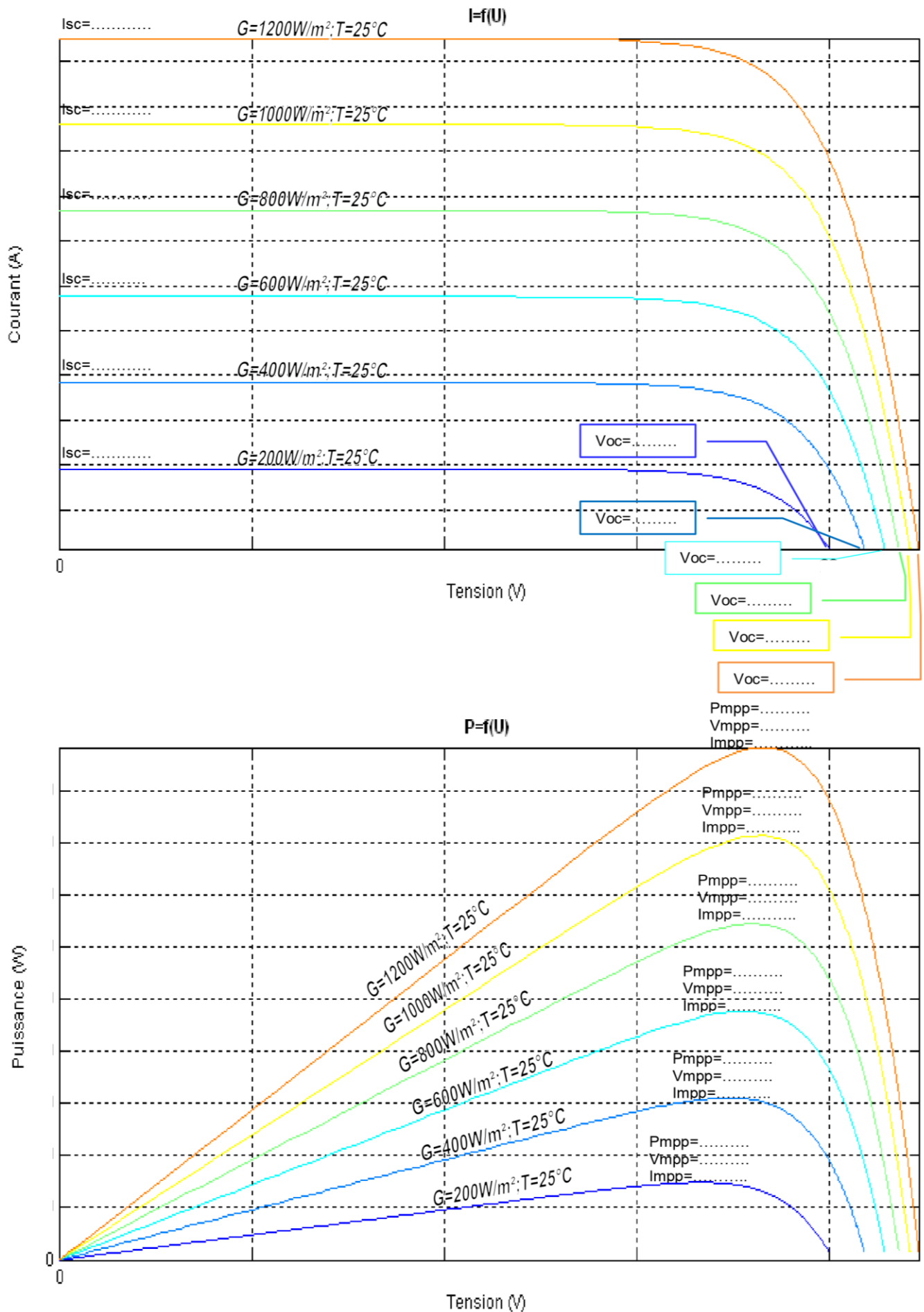
## Questions

**Question 23 :** Configurer les blocs du modèle en fonction de la documentation technique mis à disposition. Utiliser les données d'irradiance de votre position et de votre journée.

**Question 24 :** En considérant que la batterie est totalement déchargée (SOC = 0%), est-il possible de recharger totalement la batterie aujourd'hui avec le panneau solaire. Si, oui au bout de combien de temps ?

**Question 25 :** S'il n'est pas possible de recharger la batterie, quel est son niveau de charge à la fin de la journée ? Quelle(s) solution(s) apporter pour atteindre une recharge complète ?

## Influence de l'irradiance



## La régulation de tension

Problème : l'Arduino et la micro :bit nécessitent une régulation de tension afin de baisser la tension du panneau solaire à 5v et de la stabiliser.

Pour cela nous allons utiliser un **convertisseur DC/DC**

### Convertisseur DC-DC

Un **convertisseur DC-DC**, ou **convertisseur Buck**, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Un convertisseur Buck bien conçu possède un fort rendement (jusqu'à 95 %) et offre la possibilité de réguler la tension de sortie.

#### Applications

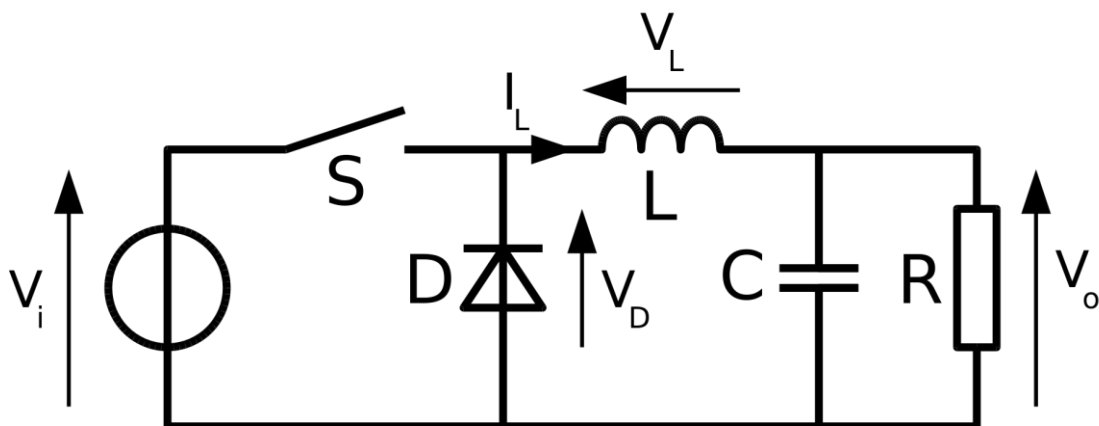
Ce type de convertisseur est utilisé pour des applications que l'on peut classer en deux catégories :

- Les applications visant à obtenir une tension continue fixe (et parfois réglée) à partir d'un générateur de tension continue supérieure.
  - Conversion des 12-24V fournis par une batterie d'ordinateur portable vers les quelques Volts nécessaires au processeur.
  - Conversion de la tension du secteur redressée en continu fixe.
- Les applications permettant d'obtenir une tension réglable mais toujours inférieure à celle présente à l'entrée.
  - Variateur de tension continue.

#### Principe de fonctionnement

La pièce essentielle est l'**inductance**, qui passe alternativement :

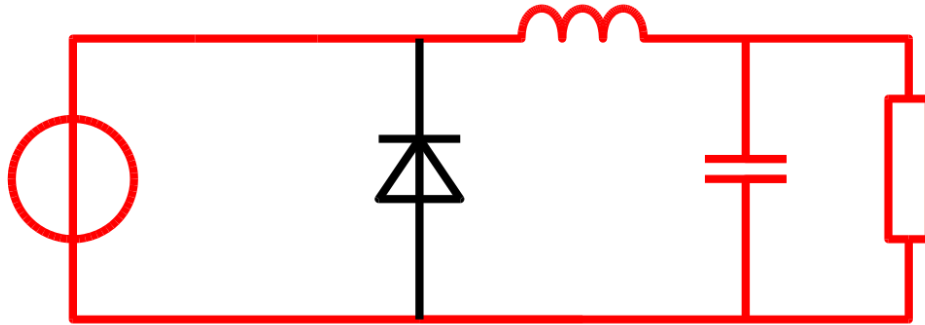
- de charge, réduisant la tension, fournit par le générateur, disponible pour le circuit en aval
- à source, fournissant une tension alors que le générateur est mis hors circuit.



Le fonctionnement peut être divisé en deux phases suivant l'état de l'interrupteur S (voir schéma) :

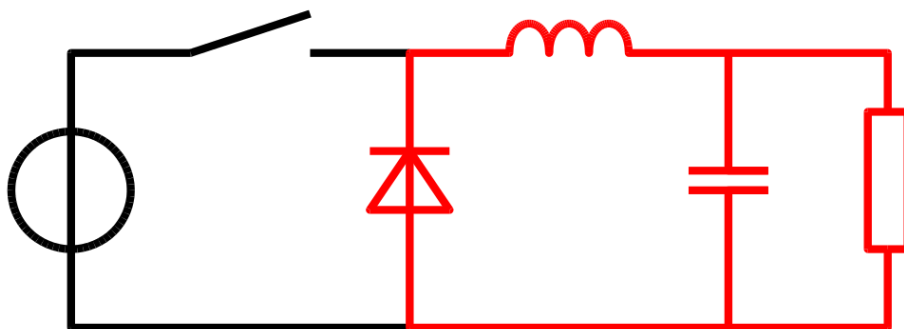
- On ferme l'interrupteur S. Le courant fourni par le générateur (ici le panneau photovoltaïque), initialement nul, augmente linéairement et traverse l'inductance. L'inductance s'oppose à cette augmentation du courant, produisant une tension opposée, et elle stocke l'énergie reçue sous forme magnétique. La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = V_i - V_O$ . La diode étant polarisée en inverse avec la tension  $V_i$  du générateur, aucun courant ne la traverse.

## Interrupteur passant

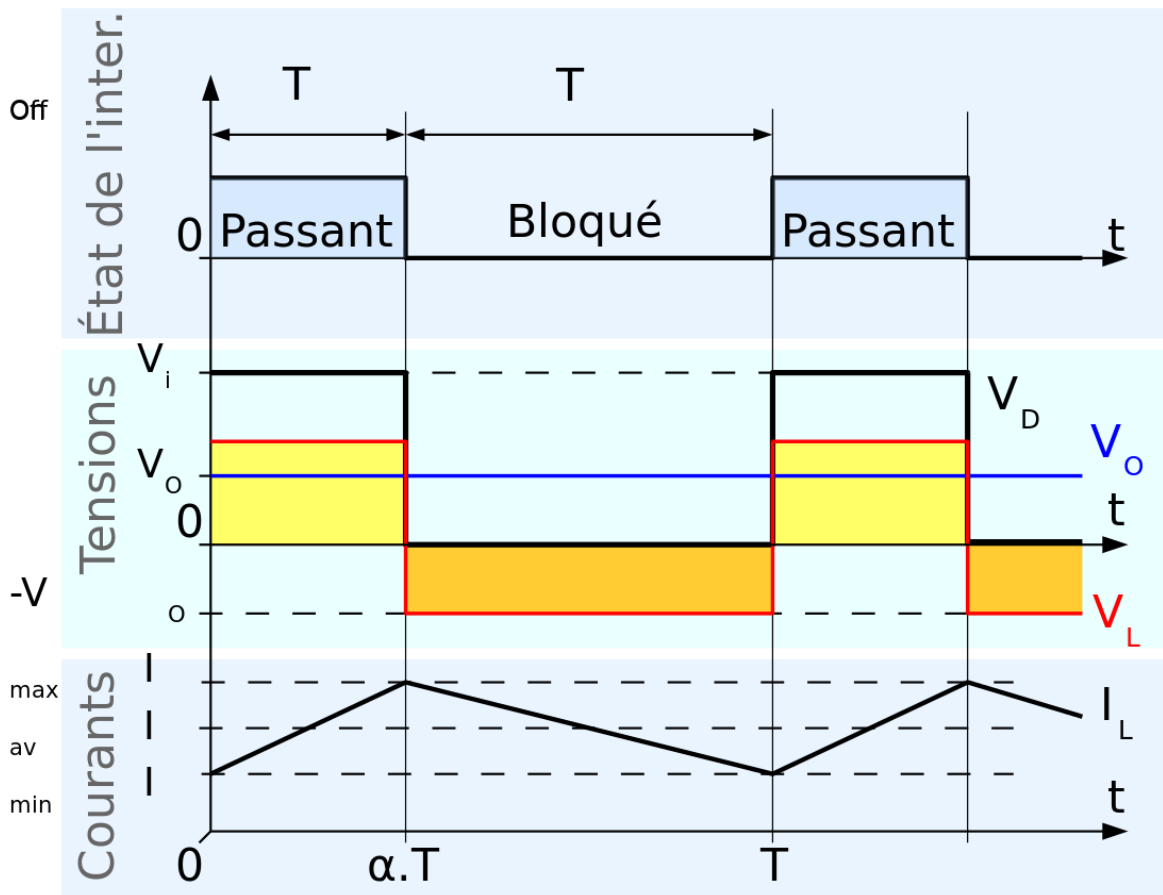


- L'interrupteur est ouvert. Le générateur est mis hors circuit, plus aucun courant ne le traverse. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. Le courant traversant l'inductance décroît. L'inductance s'oppose à cette réduction du courant, produisant une tension qui la met en situation de source pour le circuit aval, en utilisant l'énergie magnétique stockée à la phase précédente. La tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_L = -V_O$

## Interrupteur bloqué



Un circuit de commande de l'interrupteur le fait alterner à un rythme adéquat pour obtenir la tension désirée. La diode peut être remplacée par un autre interrupteur.



Un convertisseur Buck permettant d'abaisser une tension à 5v se trouve facilement. Il s'agit par exemple d'un chargeur de téléphone adaptable sur les allume-cigares des voitures :

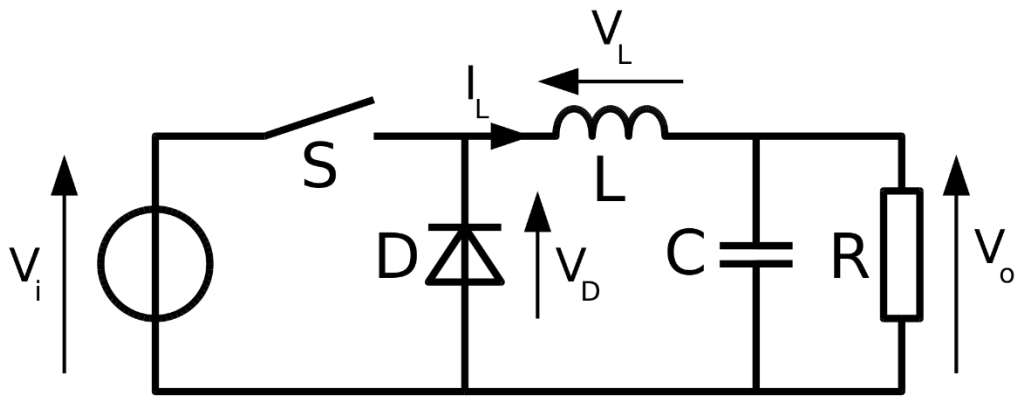
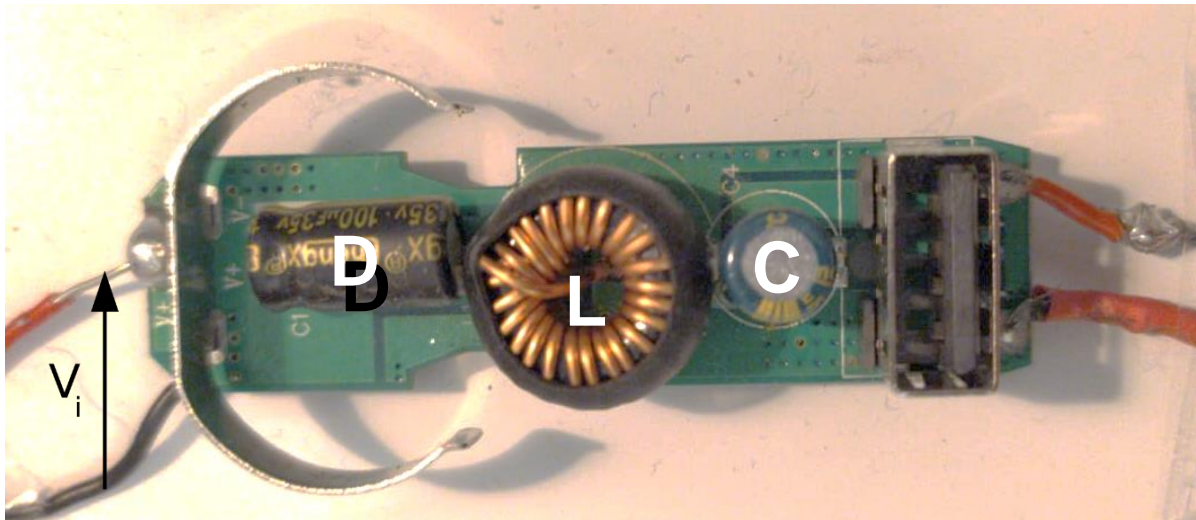


DC in = 12V  
DC out = 5V

Autre avantage, ils possèdent généralement une ou plusieurs sortie en USB. Ce qui facilitera le branchement des cartes Micro:Bit et Arduino avec des câbles Micro-USB classique.

Voici généralement le circuit que l'on trouve à l'intérieur des allume-cigares :

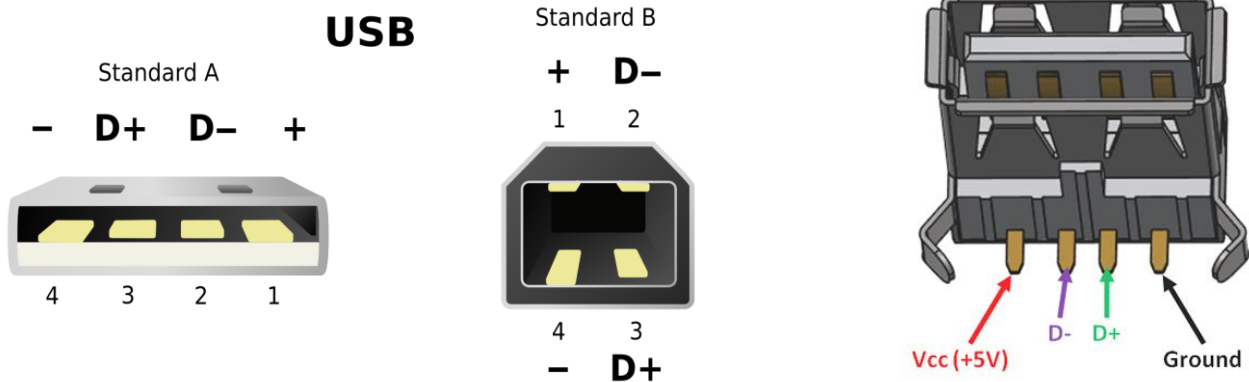




On reconnaît les différents éléments du montage du convertisseur buck. L'interrupteur S n'est pas visible car il s'agit dans ce cas (et dans la majorité des cas) d'un transistor.

### Ports USB

Une sortie USB se compose de 4 fils :

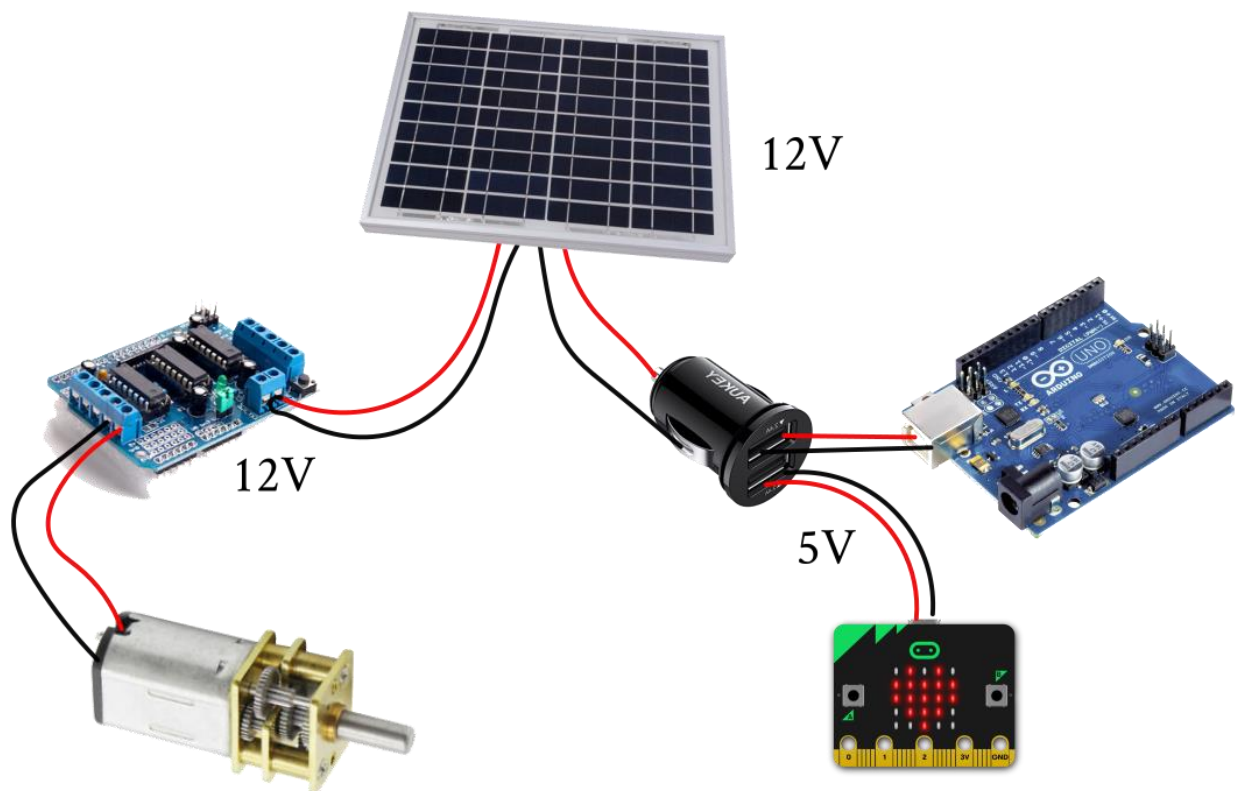


Les mesures sont donc à réaliser sur les fils – et +

## Travail à faire

- Réaliser le montage à partir du panneau solaire et d'un allume-cigare
- Mesurez au voltmètre la tension en sortie du panneau solaire et la tension en sortie de la prise USB de l'allume cigare.
- Proposez un montage avec les différents systèmes ?
- Comment sont branchés les différents éléments ? En série ou en dérivation ?

Exemple de montage :



# Pour aller plus loin sur le photovoltaïque

## Les impacts environnementaux liés à la production du silicium

Les impacts environnementaux liés à la production de composants électroniques à base de silicium débutent avec l'exploitation des carrières d'où sont extraits les sables nécessaires à cette industrie. La poursuite du processus nécessite des combustibles fossiles comme le charbon, du charbon de bois dont respectivement l'extraction et la production ont également un impact environnemental. Enfin, les divers processus de purification nécessaires à l'obtention de la qualité électronique du silicium auront également un poids considérable dans l'impact environnemental global des puces électroniques.



### Les impacts imputables à l'exploitation des carrières



Une activité aussi répandue que l'exploitation de carrières de silice, de sables ou de graviers n'est pas sans laisser des traces qui vont au-delà du simple aspect visuel, mais qui posent de véritables problèmes d'érosion des sols et de dégradation de l'environnement aux alentours de ces sites. Bien que l'impact environnemental de chacune de ces carrières puisse sembler limité, leurs impacts combinés sont considérables en raison de leur large dispersion sur la région. Ceci est dû à plusieurs raisons :

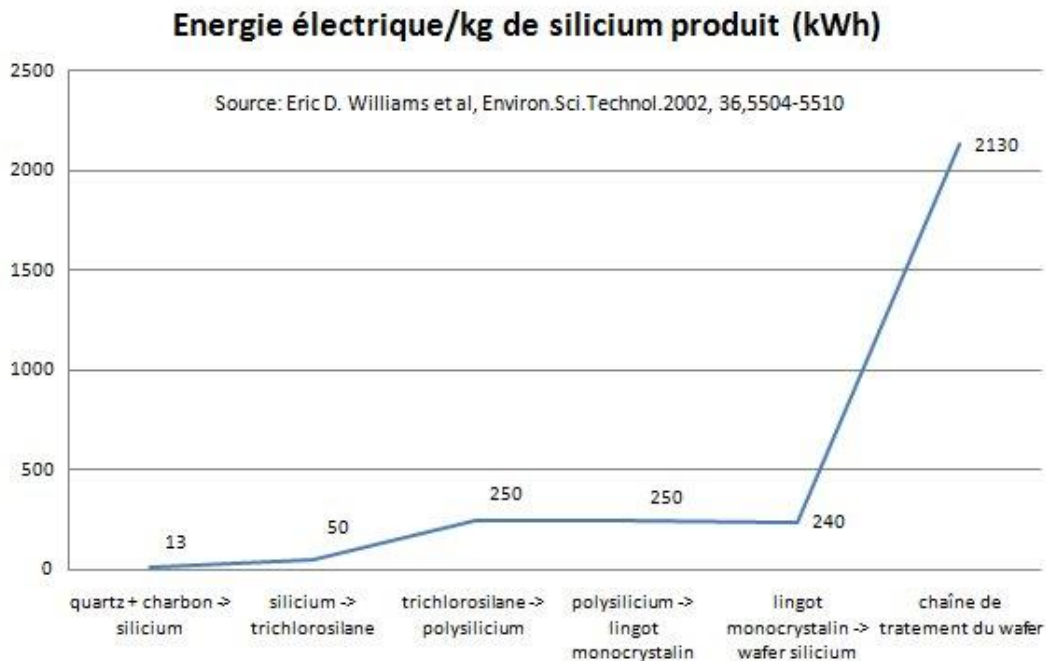
- une durée de vie moyenne extrêmement limitée: de nouvelles carrières sont constamment ouvertes et les anciennes abandonnées— cette activité a été poursuivie depuis des siècles— cette activité s'accroît dans les années récentes
- L'extraction de sable conduit à une série d'impacts environnementaux négatifs qui ont été décrits et évalués avec des méthodes standardisées
- les effets sur le paysage ont été jugés critiques— les impacts sur la qualité de l'eau ont été jugés sévères (augmentation des écoulements, de l'érosion et de la turbidité en aval)
- les impacts sur le sol et la végétation ont également été jugés sévères (érosion, atteinte aux zones boisées et aux pâturages)

### Les impacts liés à la production du silicium

La pollution constatée dans la "Silicon Valley" atteste que les effluents toxiques nécessaires pour le traitement de la silice ont été rejetés dans l'environnement, polluant les nappes phréatiques. Le traitement industriel du silicium est donc excessivement propice au gaspillage de matière première, gros consommateur de produits toxiques, d'eau et d'énergie.

## Une production de plus en plus énergivore

Les différentes étapes pour transformer la ressource naturelle (silice) en wafer sont très consommatrices en énergie. L'énergie nécessaire à l'accomplissement de chaque étape de ce long processus a été évaluée et on remarque que c'est la chaîne de traitement du wafer qui est la phase la plus énergivore (cf. graphique ci-dessous) avec près de 73% de l'énergie totale nécessaire pour le processus global. Au total, 2933 kWh d'électricité sont nécessaires pour produire 1 kg de wafer en silicium. Ramené à la production d'1 cm<sup>2</sup> de wafer, la dépense énergétique est de 0,34 kWh. Pour donner une échelle de grandeur, une famille française moyenne (4 personnes en maison individuelle), consomme environ 4500 kWh/an.



## L'emploi de produits toxiques est permanent

Les données concernant l'emploi de produits chimiques dans le cadre de la chaîne de fabrication des semi-conducteurs sont difficiles à obtenir et varient sensiblement selon les sources. Toutefois, pour produire 1 cm<sup>2</sup> de puce électronique, on peut dégager une fourchette 6 à 190 g de substances chimiques nécessaires en entrée, ainsi que de 1,2 à 160 g d'émissions de produits chimiques en sortie. Une société qui préfère rester anonyme confie que pour produire 1 cm<sup>2</sup> de wafer, il faut 45 g de produits chimiques :

- gaz dopants/déposition (silane, phosphine, dichlorosilane, diborane): 0,16 g
- photolithographie (acétone, peroxyde d'hydrogène, hydroxyde de tétraméthylammonium,...): 14 g
- gravure (protoxyde d'azote, ammoniaque, chlore, trichlorure de bore,...): 0,23 g
- acides/bases (acides phosphorique, nitrique, sulfurique, chlorhydrique, ammoniaque,...): 31 g

## L'utilisation d'importantes quantités d'eau en grande partie ultra pure

La chaîne de fabrication des semi-conducteurs a également besoin d'importantes quantités d'eau hautement purifiée. Une usine de fabrication de wafers de 6 pouces qui produit 40 000 wafers par mois, consomme de 7,57 à 11,35 millions de litres d'eau par mois, soit entre 18 et 27 litres d'eau par cm<sup>2</sup> de silicium.



Comme on a pu le voir dans la production des wafers, une eau de qualité ultra pure est nécessaire au nettoyage des wafers. De par leur taille (pouvant aller jusqu'à 32 nm) les circuits présents sur les wafers ne tolèrent pas les éléments minéraux contenus dans une eau de qualité courante. Le traitement que devra subir l'eau du réseau dépend de sa qualité et des besoins requis par le processus industriel. La quantité d'eau ultra pure dépend de la taille du wafer mais aussi de la fonction des composants produits : les puces mémoires sont constituées de moins de couches que les puces logiques et plus il y a de couches, plus les besoins en eau sont importants. Les industriels déclarent que pour la fabrication d'un wafer de 300 mm, 8330 litres d'eau sont nécessaires (dont 68% doit être ultra pure).

## Et les terres rares dans les panneaux solaires, alors ?<sup>14</sup>

Contrairement aux idées reçues, **la grande majorité des panneaux photovoltaïques ne contiennent pas de « terres rares »**, ces groupes de métaux (utilisés notamment dans des smartphones...) dont l'extraction et le raffinage sont très polluants.

La très grande majorité des **panneaux solaires sont constitués de silicium cristallin**, élément que l'on extrait du sable ou du quartz et qui, comme le verre, est 100 % recyclable. Ces panneaux solaires contiennent aussi des éléments en argent, en aluminium ou en cuivre et, selon les modèles, du plastique. Ils couvrent 90 % du marché du solaire. D'autres technologies photovoltaïques ont recours à des métaux rares et controversés (et non des « terres rares »), mais elles concernent moins de 10 % du marché. **Des cellules de 3e génération constituées de molécules organiques** sont aussi à l'étude.

Dans le monde, **la principale source de consommation des éléments appelés « terres rares » revient au matériel des nouvelles technologies de l'information** : tablettes, smartphone, etc... On en trouve aussi **dans chaque centrale à charbon, gaz ou nucléaire**. Cette consommation grandissante est inquiétante car l'extraction minière de ces éléments cause de nombreux dégâts sociaux et environnementaux. Mais pour le coup, les panneaux solaires n'y sont pour rien.

## Questions documentées

1. Définir la notion **d'énergie grise**.
2. Quels sont les impacts environnementaux que génère la production de panneaux solaire.
3. Combien de temps faut-il pour qu'un panneau photovoltaïque « rembourse » en production électrique sa consommation en énergie grise ?
4. Le photovoltaïque est-il une solution pour la production d'énergie à grande échelle ?

<sup>14</sup> <https://www.greenpeace.fr/impact-environnemental-solaire/>



# ANNEXES

*Pour la réalisation du four par l'enseignant*



## Matériel

### Boite :

- Plaques de bois (utilisation de bois de récupération), épaisseur entre 6mm et 10mm
- Isolant d'environ 40 mm d'épaisseur (4 plaques de 500x500 mm) : liège en plaque, vermiculite, isolant biosourcé, papier journal ...
- 4 mètres de baguettes de la même épaisseur que l'isolant
- Mylar adhésif, papier réfléchissant
- Visserie 4x40
- Clous 1,5 x25 mm

### Vitre, cadre et oreilles :

- Vitre de 410x470 mm, pas trop épaisse 2 à 3mm (possibilité de récupération chez un menuisier poseur de vitres)
- Panneau aggloméré de la même épaisseur que la vitre, une de 500x500 mm et une autre de 500x550 mm
- Palette / Planches de bois (8 planches d'environ 500x60 mm et pas trop épaisse (environ 20 mm))
- 1 mètre de charnière fine avec des vis à têtes plates OU 6 charnières.
- 3 mètres de cordelettes (4 mm de diamètre)
- joint

### Plateau tournant

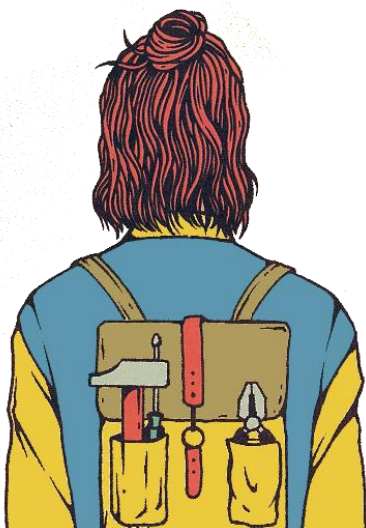
- Chutes de bois
- Roues dentées imprimées en 3D.
- Courroie crantée
- 2 cartes mirco :bit

- Shield Grove mirco:bit
- Shield moteur pour MICROBIT
- Écran LCD 32 caractères Grove
- Multiprise I2C Grove
- Module Grove UART Wifi V2
- Capteur de T° étanche Grove
- Photorésistances
- Moteur à courant continu
- Buzzer
- Arduino Uno
- Shield Moteur pour arduino Uno

<https://fr.vittascience.com/shop><https://fr.vittascience.com/shop>

## Outillage

- Visseuse / Perceuse
- Scie sauteuse
- Scie à métaux
- Coupe verre (si besoin)
- Ruban adhésif
- Briquet
- Étau
- Serre joint
- Mètre
- Cutter
- Ciseaux
- Papier ponce
- Équerre, règle, rapporteur
- Casque et lunettes de protection
- Pistolet à silicone
- Imprimante

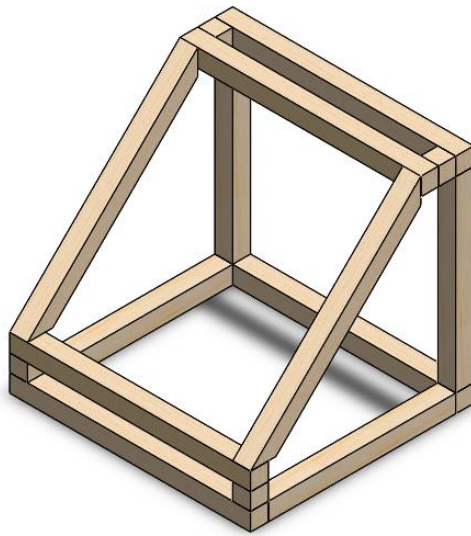


## Plans

---

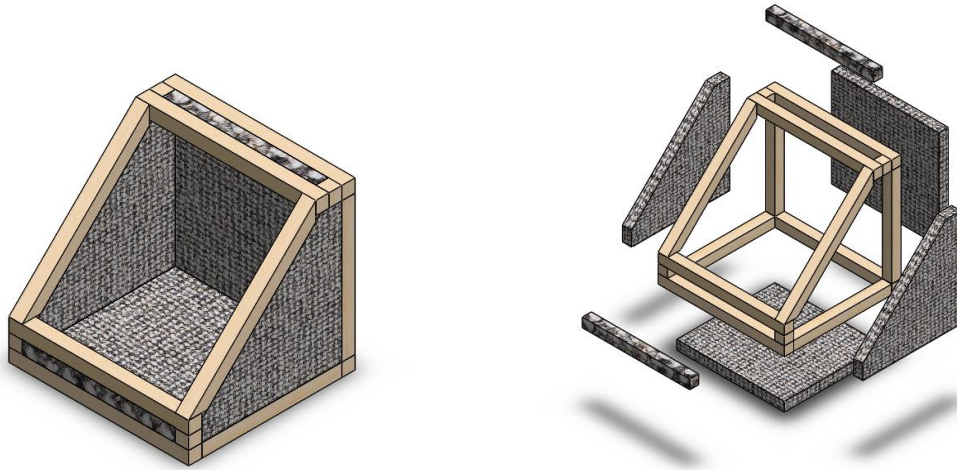
### Baguettes

**Travail : Découper les baguettes, les isolants, les plaques intérieurs et extérieurs en suivant les plans fournis dans les documents ressources**



## Isolation

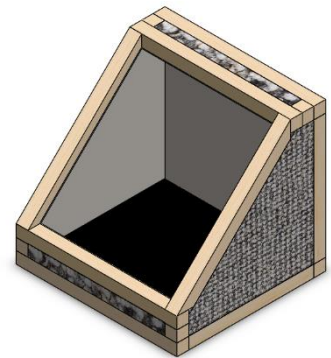
L'isolation sera choisie en fonction de votre prochaine étude. Voici néanmoins les patrons pour les intégrer entre les baguettes. Les isolants ont une épaisseur de 40mm



## Panneaux intérieurs

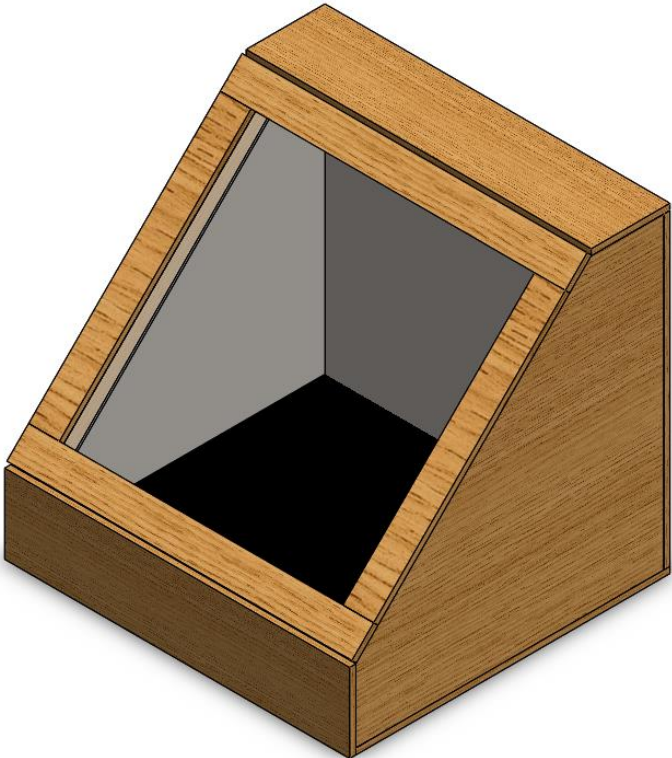
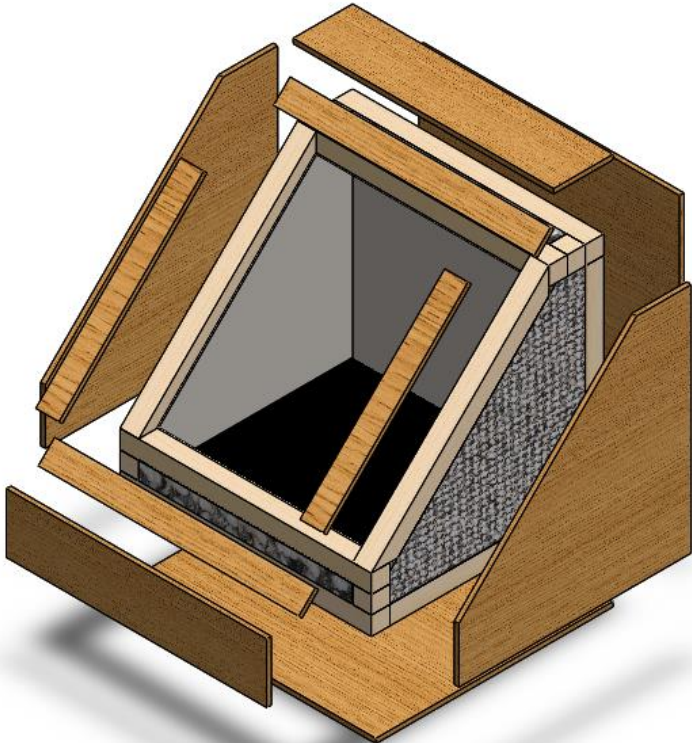
Les panneaux intérieurs seront recouverts de Mylar réfléchissant. Le fond du four lui sera recouvert d'une plaque en fer noir qui aura pour but de restituer toute la chaleur dans l'ustensile de cuisine.

Le rôle des plaques noires est déterminant dans le four solaire. Pour donner une explication rapide de ce phénomène, la couleur noire est le transformateur qui fera passer la vibration lumineuse (très rapide) en vibration infrarouge (vibration beaucoup plus lente). C'est là toute la magie de la couleur noire. S'il existe plusieurs manières de fabriquer une plaque noire vous devrez dans tous les cas prendre une tôle métallique (acier, aluminium, zinc, plaque de cuisson) et éviter les matériaux en pierre foncée, de type ardoise ou galets, qui auront une fonction accumulatrice de la chaleur et provoqueront donc un retard de transmission de cette chaleur vers la casserole.



## Panneaux Extérieurs

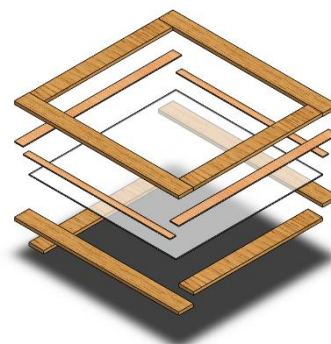
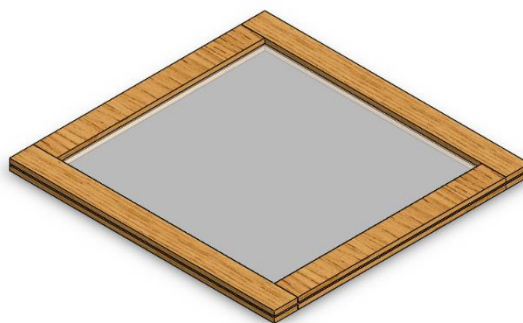
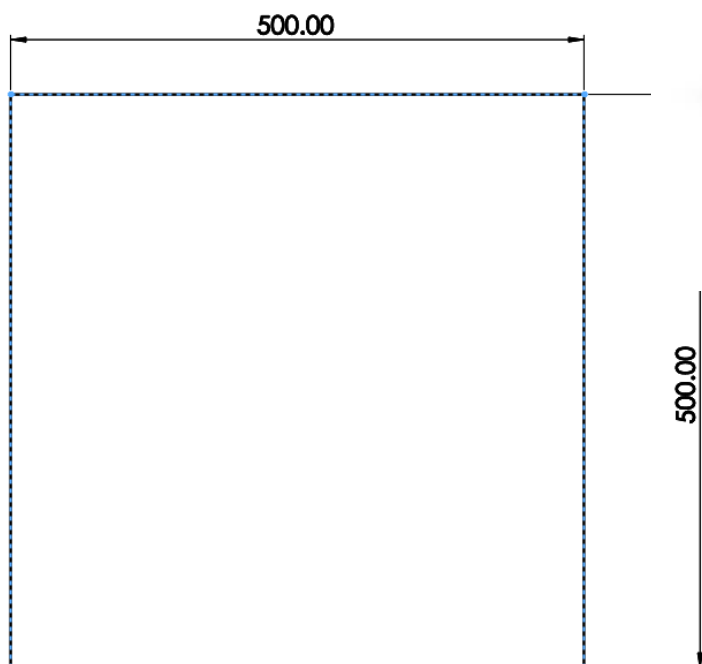
Enfin les panneaux extérieurs seront visés aux baguettes pour maintenir le four dans une structure solide. La visserie n'est pas représentée.



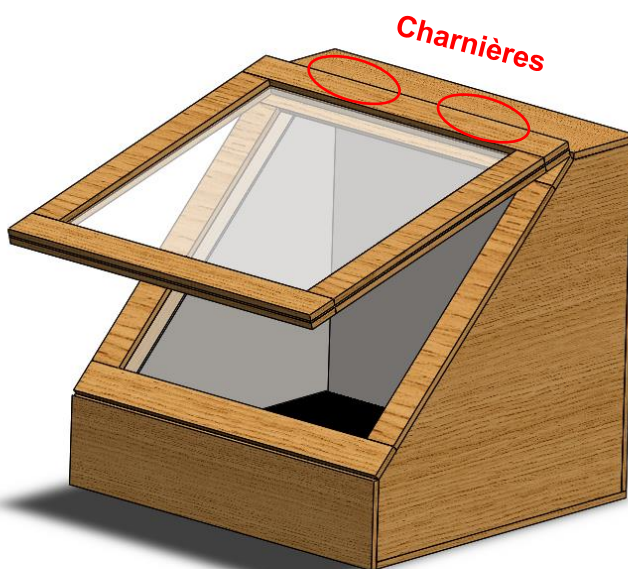


## Cadre de la vitre

Taille de la vitre : (récupérable facilement)



La vitre sera insérée dans un cadre puis montée grâce aux charnières sur la structure boîte



## Chili sin carne

### Ingrédients pour 4 personnes

- 300 g de haricots rouges (en boîte)
- 500 g de tomates pelées
- 1 poivron rouge
- 1 oignon
- 1 gousse d'ail
- 1 cuillère à café de cumin
- Huile d'olive
- 1 cuillère à café d'origan
- 1 cuillère à café de paprika
- Coriandre
- Sel
- Poivre



### Instructions

1. Peler et émincer finement l'ail et l'oignon.
2. Préchauffer le four pendant 1h
3. Laver le poivron et le couper en lanières.
4. Dans une cocotte noire, faire revenir l'ail et l'oignon dans un peu d'huile d'olive. Faire revenir jusqu'à ce que l'oignon devienne translucide.
5. Ajouter les haricots égouttés et laisser cuire 30 minutes.
6. Ajouter les tomates et les épices, la coriandre ciselée, saler et poivrer.
7. Laisser mijoter 2h.
8. Ajouter un peu d'eau si besoin.
9. Servir bien chaud avec du riz.





## Gâteau au chocolat

---

### Ingrédients

- 340 g farine de blé
- 60 g cacao en poudre
- 240 g sucre semoule
- 1/2 sachet levure chimique
- 400 ml lait végétale
- 160 ml huile végétale
- 1/4 c. à café de sel
- 1 c. à café de café soluble *facultatif - renforce le goût du cacao*

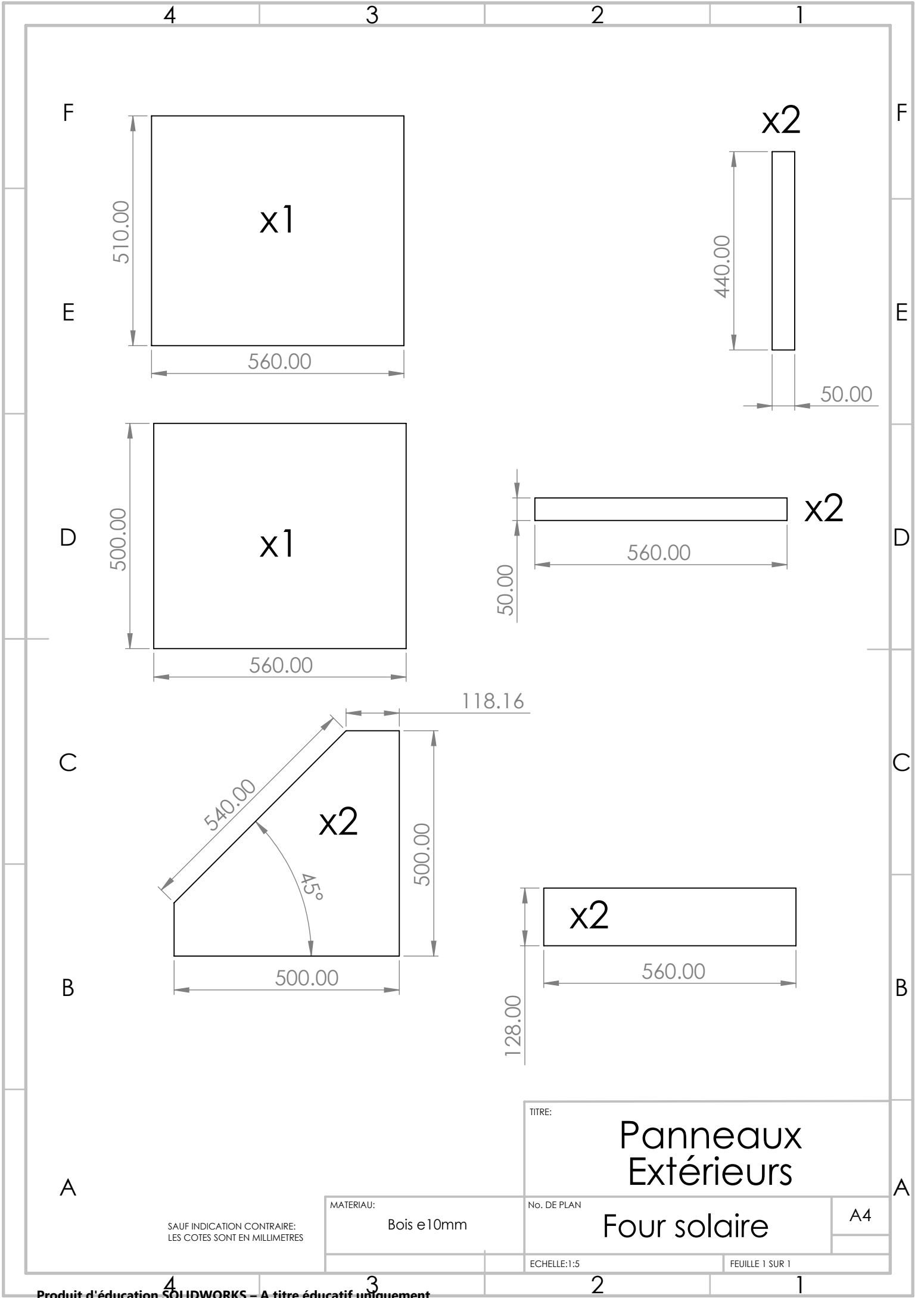
### Ganache au chocolat

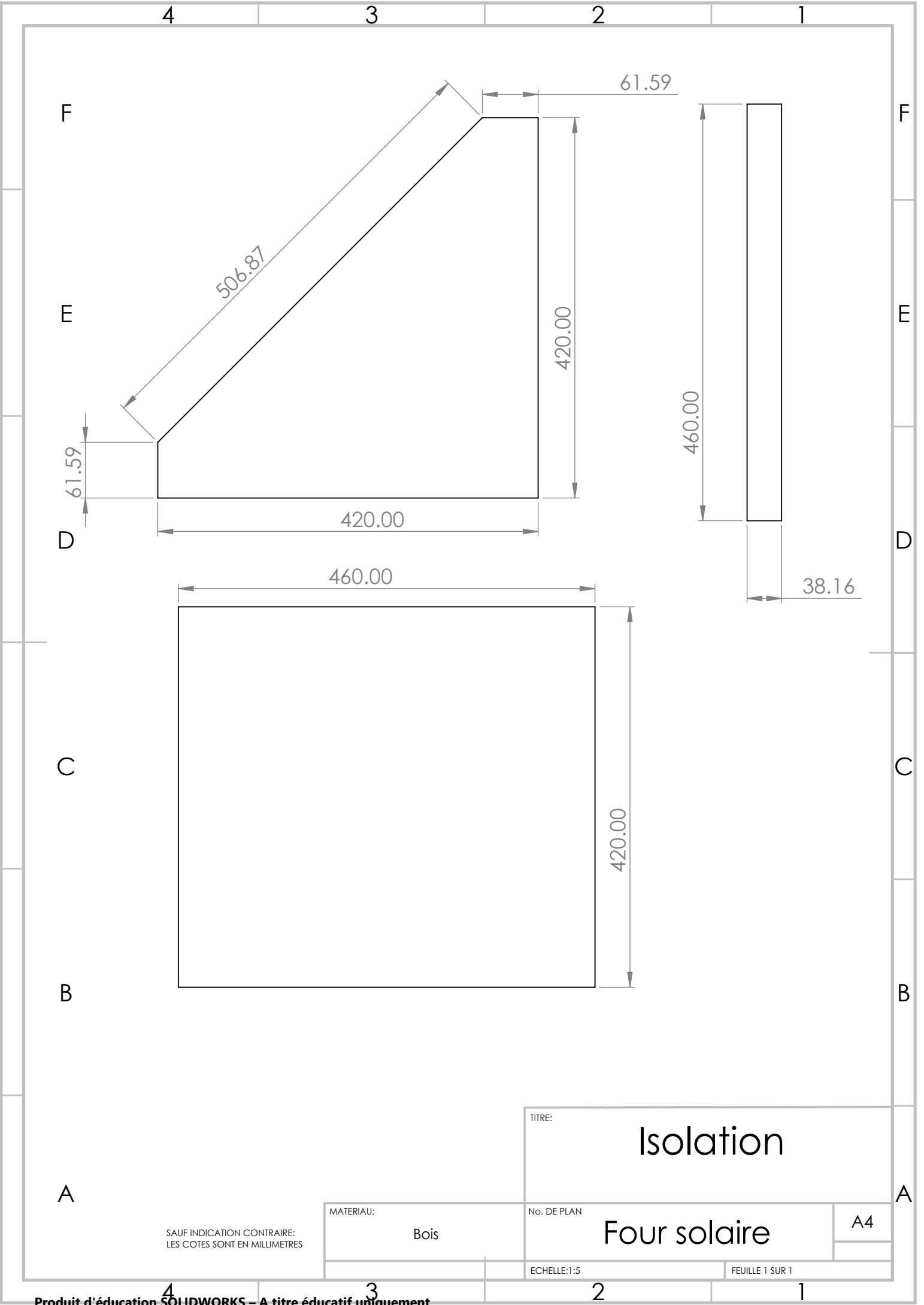
- 200 g chocolat noir à pâtisser
- 200 g crème de soja
- 1/2 c. à café fleur de sel

### Instructions

1. Préchauffez le four solaire pendant 30 min. Mettez tous les ingrédients secs dans un saladier et mélangez bien.
2. Ajoutez tous les ingrédients humides et mélangez jusqu'à obtenir une pâte homogène, sans trop travailler.
3. Tapotez le saladier pour faire remonter les bulles d'air à la surface, et coulez dans un moule margariné et fariné.
4. Cuisez jusqu'à ce qu'une lame de couteau plantée à cœur ressorte sèche. Attendez que le gâteau soit bien tiède avant de démouler.
5. Coupez le chocolat en très petits morceaux, faites chauffer la crème de soja dans le four et versez sur le chocolat.
6. Remuez à la maryse (évitez le fouet qui incorpore de l'air dans la préparation) jusqu'à obtenir un mélange bien lisse. Si des petits morceaux subsistent, remettez à chauffer dans le four pendant 1h
7. Versez sur le gâteau refroidi. Saupoudrez de fleur de sel.
8. Conserver au frais.



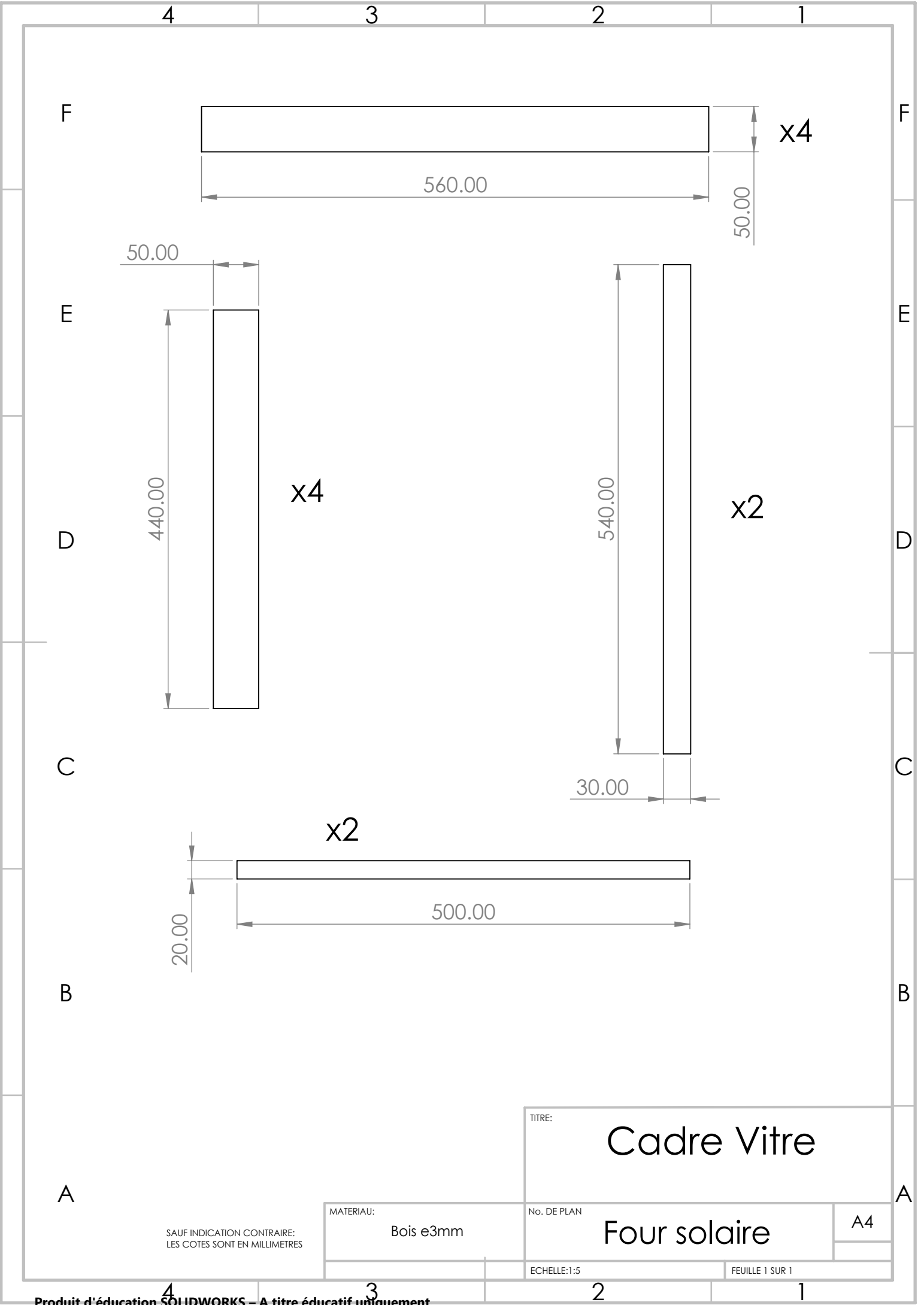




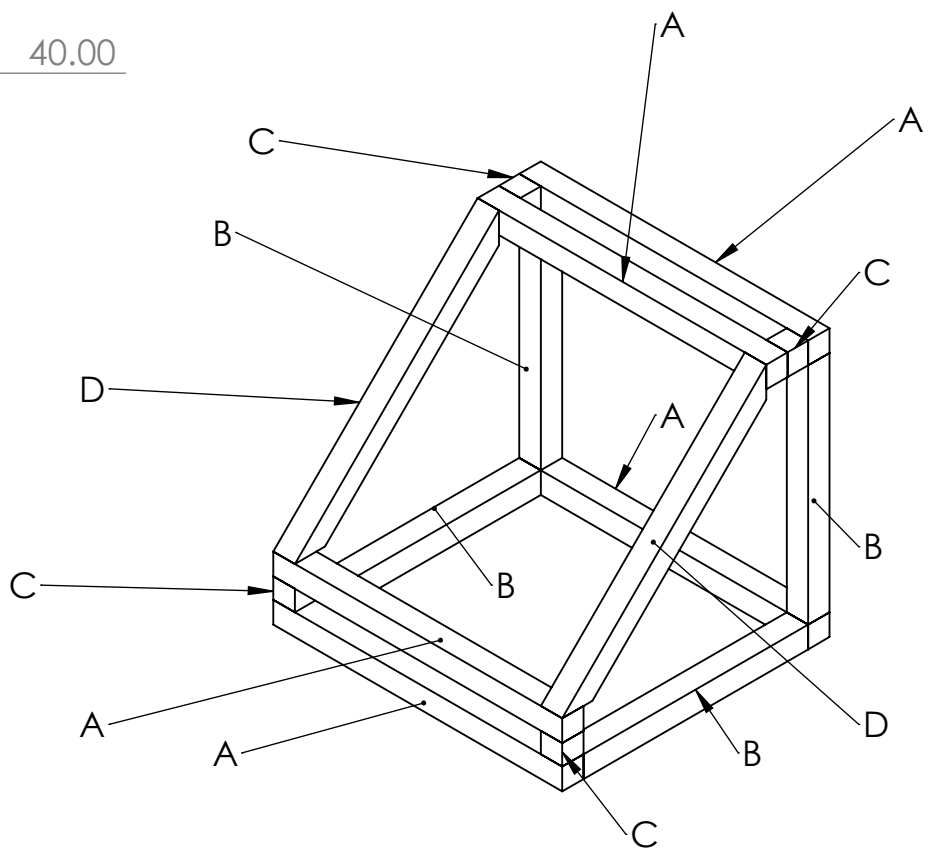
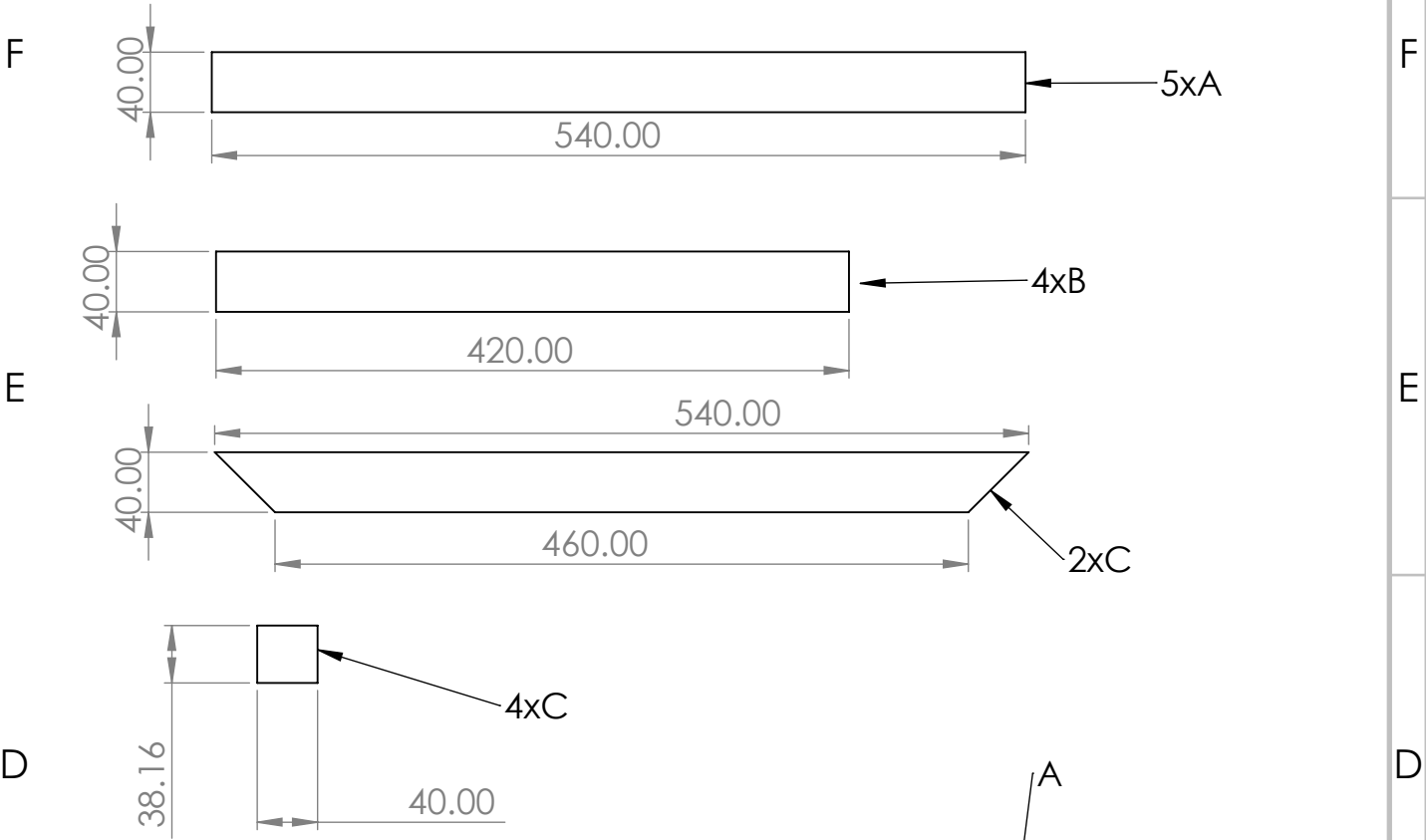
SAUF INDICATION CONTRAIRE:  
LES COTES SONT EN MILLIMETRES

MATERIAU:	No. DE PLAN	A4
Bois	Four solaire	
	ECHELLE:1:5	FEUILLE 1 SUR 1

TITRE:	Isolation	
	Four solaire	



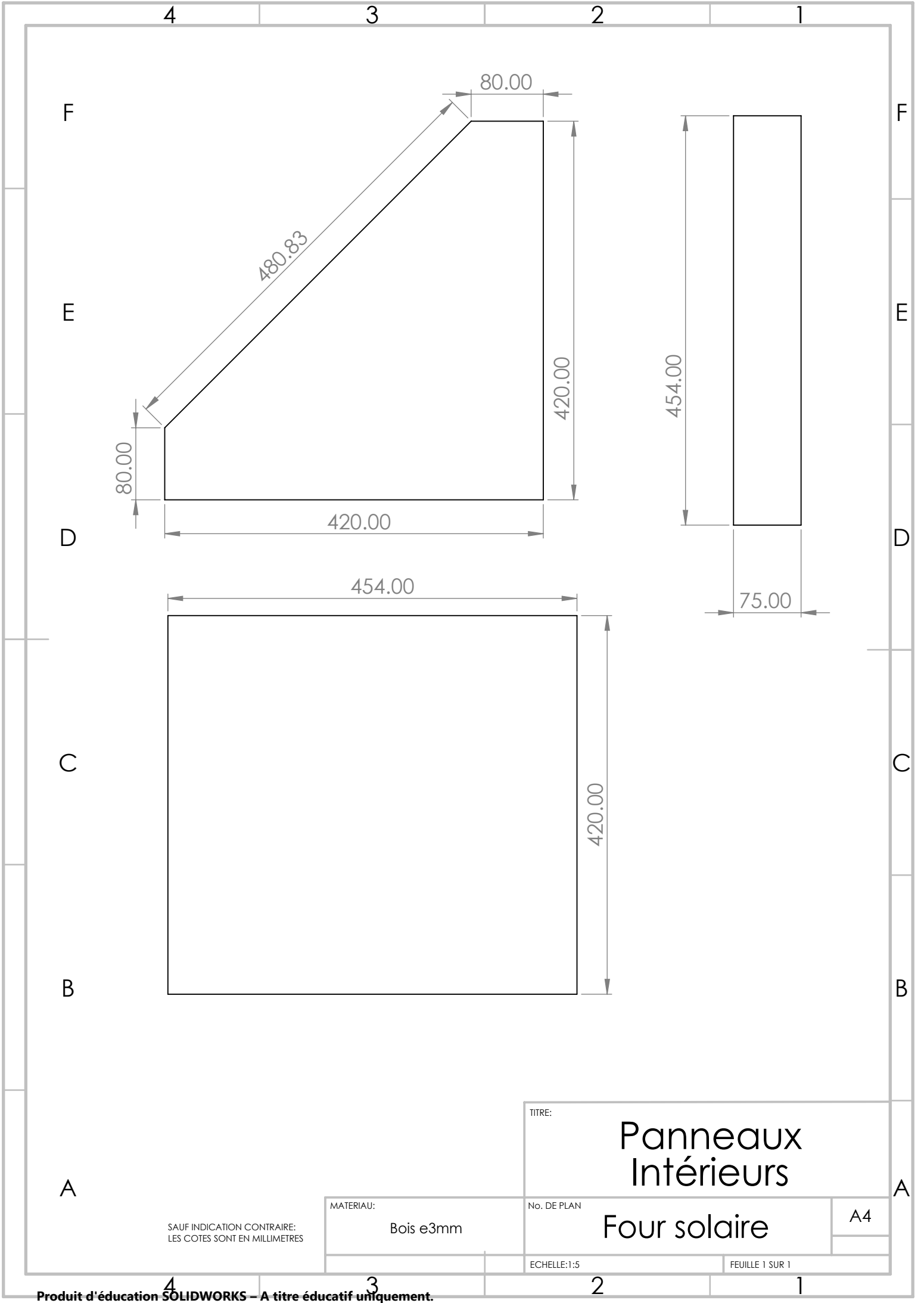
4 3 2 1



TITRE:		Baguettes	
No. DE PLAN		Four solaire	
ECHELLE:1:10		FEUILLE 1 SUR 1	
A4			

SAUF INDICATION CONTRAIRE:  
LES COTES SONT EN MILLIMETRES

MATERIAU:	Bois



F

E

D

C

B

A

F

E

D

C

B

A

SAUF INDICATION CONTRAIRE:  
LES COTES SONT EN MILLIMETRES

MATERIAU:

Bois e3mm

TITRE:

Panneaux  
Intérieurs

No. DE PLAN

Four solaire

A4

ECHELLE:1:5

FEUILLE 1 SUR 1