

LP 19 - Bilans thermiques ; Flux convectifs, conductifs et radiatifs

Niveau : Licence

Pré-requis :

- Premier principe de la thermodynamique
- Phénomènes de transport
- Notion de corps noir et rayonnement d'équilibre thermique
- Conduction électrique

Bibliographie :

Chardon vandenbrouck, Salamito. J'intègre tout-en-un : Physique PC. Dunod (5ème édition).

Plan :

- I. Les différents types de flux thermiques
 - A. Le flux conductif
 - B. le flux conducto-convectif
 - C. Le flux radiatif
- II. Etude de l'absorbeur solaire
 - A. Bilan thermique
 - B. Expression des flux
 - C. Rendement final

Notes

Intro :

Vie quotidienne; isolation des habitations (double vitrage)

1. Les différents types de flux thermiques
 - a. Le flux conductif

Définition : La conduction thermique est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux milieux en contact ou deux régions d'un même milieu sans transport de matière.

Illustration avec la loi de fourier

$$\vec{j}(M) = -\lambda \text{grad } T(M)$$

avec :

- λ la conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$
- \vec{j} le vecteur densité de courant thermique

- Le transfert d'énergie se fait dans le sens :
régions chaudes \longrightarrow régions froides
- Décrit des phénomènes irréversibles

Loi phénoménologique

- = région chaude vers région froide

Grad garde toujours le même signe

Equation de diffusion thermique :

→ Equation du bilan thermique et loi de fourier

$$\rho c \frac{\partial T(M)}{\partial t} = \lambda \Delta T(M) \quad \text{ou} \quad \frac{\partial T(M)}{\partial t} = a \Delta T(M)$$

$$\text{avec :} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

la diffusivité thermique en $m^2.s^{-1}$

Quelques ordres de grandeur :

matériau	$\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$	$a (\times 10^6 m^2.s^{-1})$
cuivre	$4,0.10^2$	$1,2.10^{-4}$
acier	$\simeq 50$	$\simeq 10^{-5}$
béton	$\simeq 1$	$\simeq 5.10^{-7}$
eau	$6,0.10^{-1}$	$1,4.10^{-7}$
air	$2,6.10^{-2}$	$\simeq 2.10^{-5}$

Table 1 – Valeurs de la conductivité et de la diffusivité pour quelques matériaux

attention dans le tableau des ordres de grandeurs ne pas mettre le 10^6 !!!!

Eau a une conductivité thermique $>$ à l'air
et une diffusivité plus petite que celle de l'air
→ masse volumique

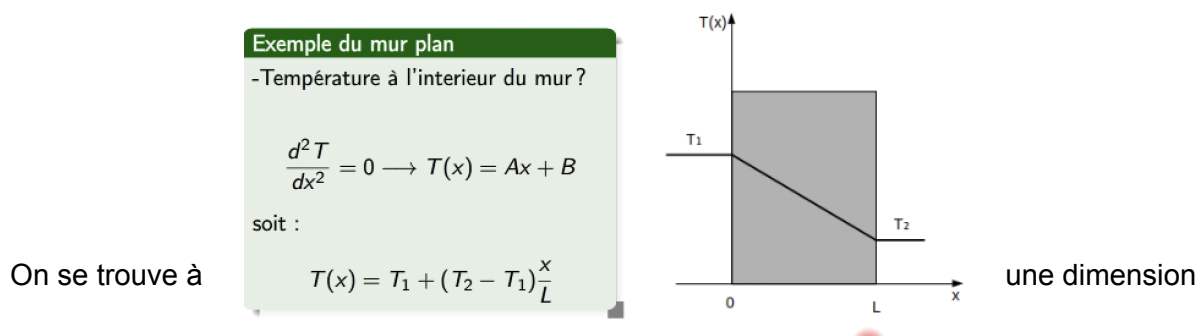
Résistance thermique : Champ de température

En régime permanent et en l'absence de production interne d'énergie, on a :

$$\frac{\partial T(M)}{\partial t} = a \Delta T(M) \longleftrightarrow \Delta T(M) = 0$$

Le champ de température vérifie l'équation de Laplace.

On va utiliser des matériaux qui ne crée pas leur propre énergie (=régime permanent?)
Eq de diffusion thermique → équation de laplace, champ de température vérifie l'eq de Laplace



Nous amène à un profil de température linéaire

conditions aux limites :

$x=0 \rightarrow T_1$

$x=L \rightarrow T_2$

Formalisation :

S surface quelconque

Soit le flux thermique :

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = jS = -\lambda \frac{dT}{dx} S = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} S$$

On définit R_{th} , la résistance thermique :

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi_{1 \rightarrow 2}} = \frac{L}{\lambda S}$$

ARQS

$$\tau_{evol} \gg \tau_{diff} = \frac{L^2}{a}$$

Forme analogue à la résistance électrique lol :p

Discussion de ce qui se passe en régime permanent ?

ARQS stipule que si la différence entre les deux températures \gg devant le temps de diffusion alors on trouve une approximation de ce temps.

On se placera dans la suite de la leçon dans l'approximation des régime quasi stationnaire

b. le flux conducto-convectif

Définition : la convection thermique est un mode de transfert au sein d'un fluide en mouvement ou un fluide en mouvement et une paroi solide.

Loi de newton :

$$\Phi_{s \rightarrow f} = hS(T_s(M) - T_f(M))$$

avec :

- h le coefficient de transfert thermique en $W.m^{-2}.K^{-1}$

Résistance thermique

$$R_{th} = \frac{T_s - T_f}{\Phi_{s \rightarrow f}} = \frac{1}{hS}$$

Quelques ordres de grandeurs :

milieu	h ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
air (libre)	5-25
eau (libre)	100-900
air (forcée)	10-500
eau (forcée)	100-15000
huile (forcée)	50-2000
métaux fondus (forcée)	6000-120000

Table 2 – gamme de valeurs du coefficient h pour quelques matériaux

c. Le flux radiatif

Définition : Le rayonnement thermique est un transfert thermique entre deux systèmes par l'intermédiaire du champ électromagnétique existant dans le milieu qui les sépare.

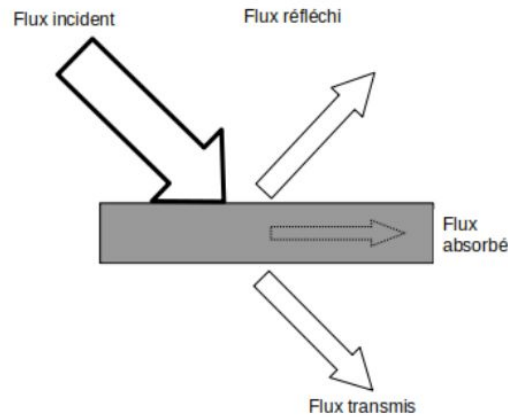
Absorption, réflexion, transmission

Cas des corps réels :

- La réflexion
- La transmission
- L'absorption

Flux total

$$\Phi_i = \Phi_a + \Phi_r + \Phi_t$$



$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} \quad ; \quad \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad ; \quad \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$$

tel que :

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Cette dernière équation correspond aux corps noirs.

Loi de Stefan-Boltzmann :

$$\varphi^0(T) = \sigma T^4$$

avec :

- φ^0 le flux surfacique du rayonnement d'équilibre
- σ la constante de Stefan ($\sigma = 5,670.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)

Lien avec la loi de Newton :

Soit le flux correspondant au transfert de chaleur par rayonnement entre 2 corps noirs :

$$\Phi = S\sigma(T_2^4 - T_1^4) \longleftrightarrow \Phi = 4S\sigma T_2^3(T_2 - T_1)$$

Détails des calculs

$$T_2^4 - T_1^4 = (T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)(T_2 - T_1)$$

$$= (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3)(T_2 - T_1)$$

On suppose $T_1 \approx T_2$ donc :

$$T_2^4 - T_1^4 \approx 4T_2^3(T_2 - T_1)$$

Résistance thermique :

On peut en déduire :

$$\Phi = \frac{T_2 - T_1}{R_{ray}} \quad \text{avec} \quad R_{ray} = \frac{1}{4\sigma T_2^3}$$

II. Etude de l'absorbeur solaire

a. Bilan thermique

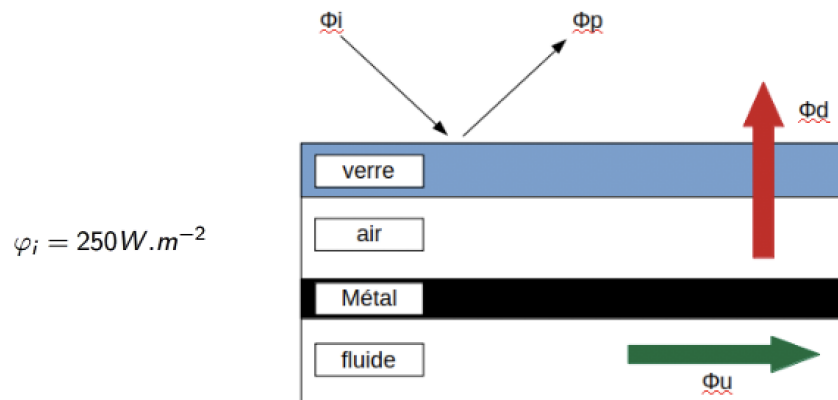


Figure 2 – Flux entrant et sortant de l'absorbeur

Métal que l'on assimile à un corps noir pour simplifier l'étude.

Bilan thermique du sy complet

On considère un flux incident qui arrive sur la plaque, un flux "perdu" qui est composé des réflexions du rayon.

Flux diffusé et un flux utile qui correspond au fluide en mouvement

250 W/M2 est la valeur moyenne de l'ensoleillement

Premier principe appliqué au système absorbeur :

$$\Delta U = \sum Q = 0$$

Il y a des pertes :

- due à la réflexion sur la vitre
- par diffusion
- par convection dans la couche d'air au dessus de l'absorbeur

Donc :

$$Q_i = Q_p + Q_d + Q_u$$

et comme : $\Phi dt = \delta Q$

$$\Phi_i = \Phi_p + \Phi_d + \Phi_u$$

b. Expression des flux

Rayonnement :

Comportement de manière incidente ?

Pour la plaque de verre :

- $\rho_{vis} = 0.15$
 $\tau_{vis} = 0.85$
- $\rho_{IR} = 0.90$
 $\tau_{IR} = 0.10$

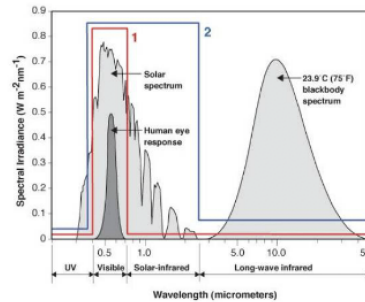


Figure 3 – Transmittivité d'une vitre :
https://www.commercialwindows.org/primer_intro.php

On a :

$$T_e = 313K$$

et

$$\varphi_e = \sigma T_e^4$$

$$\varphi_e = 544 W.m^{-2}$$

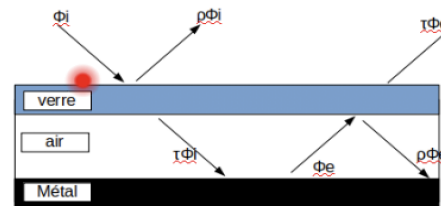


Figure 4 – Flux radiatifs au sein du système

Flux radiatifs au travers du système : (voir schéma plus haut)

Φ_p

On a pour le flux thermique perdu par rayonnement :

$$\Phi_p = \rho_{vis}\Phi_i + \tau_{IR}\Phi_e$$

$$\varphi_p = 0,15 \times 250 + 0,10 \times 544 = 92 W.m^{-2}$$

et le flux absorbé par la plaque de métal :

$$\Phi_a = \tau_{vis}\Phi_i - \Phi_e + \rho_{IR}\Phi_e = \Phi_i - \Phi_p$$

On retrouve bien que le flux absorbé est le flux incident - le flux émis.

La résistance thermique équivalente.

On a : $T_0 = 293K$

Les conductivités thermiques :

- $\lambda_a = 0,026 W.m^{-1}.K^{-1}$
- $\lambda_v = 1,3 W.m^{-1}.K^{-1}$

Les épaisseurs :

- $e_a = 1cm$
- $e_v = 0,5cm$

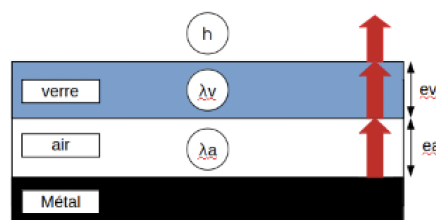


Figure 5 – Flux conductifs et convectif au sein du système

et :

- $h = 20 W.m^{-1}.K^{-1}$

On choisit h (assez complexe à déterminer) selon la viscosité du milieu. Ici nous sommes à l'air libre; et à cause de perturbations météorologiques comme le vent, la valeur du coefficient peut varier. On prend donc une valeur moyenne pour avoir la meilleure approximation possible.

Pour le verre → T_{ext} = couche d'air

Pour l'air → T_{int} = intérieur du verre

On peut facilement trouver la valeur de la résistance thermique équivalente puis le flux.

Soit les résistances thermique :

$$R_{th/v} = \frac{T_{v/int} - T_{v/ext}}{\Phi_d} = \frac{e_v}{\lambda_v S}$$

$$R_{th/a} = \frac{T_e - T_{v/int}}{\Phi_d} = \frac{e_a}{\lambda_a S}$$

$$R_{th/conv} = \frac{T_{v/ext} - T_0}{\Phi_d} = \frac{1}{hS}$$

$$R_{th/eq} = \frac{1}{S} \left(\frac{e_v}{\lambda_v} + \frac{e_a}{\lambda_a} + \frac{1}{h} \right)$$

Φ_d

$$\Phi_d = S \frac{T_e - T_0}{\frac{e_v}{\lambda_v} + \frac{e_a}{\lambda_a} + \frac{1}{h}}$$

$$\varphi_d = \frac{313 - 293}{\frac{0,5 \cdot 10^{-2}}{1,3} + \frac{10^{-2}}{0,026} + \frac{1}{20}} = 45,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

T_e la température de la plaque.

T_0 la température de l'air libre ?

c. Rendement final

Expression du rendement :

$$\eta(T_e) = \frac{\Phi_u}{\Phi_i} = \frac{\Phi_i - \Phi_d - \Phi_p}{\Phi_i} = \frac{\varphi_i - \varphi_d - \varphi_p}{\varphi_i}$$

$$= 1 - \frac{T_e - T_0}{\left(\frac{e_v}{\lambda_v} + \frac{e_a}{\lambda_a} + \frac{1}{h} \right) \varphi_i} - \rho_v - \tau_{IR} \frac{\sigma T_e^4}{\varphi_i}$$

Application numérique

$$\eta(T_e = 313K) = \frac{250 - 45,5 - 92}{250} = 0,45$$

Soit : $\eta = 45\%$

Comme nous avons vu précédemment le flux utile = le flux incident - fluxd - flux perdu
Etude simplifié.

On aurait pu ne pas considérer

On aurait pu calculer un autre flux par convection dû au fluide en mouvement
Pas de réflexion sur la vitre → Totalité du flux incident soit transmis
Ou ignorer le flux d'émission de la plaque

REMARQUES :

Exo bien détaillé

mais il faut détailler plus la première partie.

Faire des schémas au tableau

Mettre le numéro sur les diapos

Leçon difficile

Leçon transverse, on compare les différents flux thermiques

Bien déterminer ce qui a été vu et ce qui était nouveau !!

Alors on ne peut pas abordé toute la première partie dans la leçon donc on développe certains surtout les truc nouveau mais on explique bien qu'ils l'ont déjà vu pour le reste !

On cherche à comparer les trois : convectif, conductif et radiatif !

Questions :

- Quand est ce qu'on a besoin de regarder la conductivité et quand est ce qu'on fait appel à la diffusivité ?

on utilise la conductivité. Pourquoi ne pas utiliser l'autre ? car régime permanent. eq de diff devient eq de laplace → a (coeff de diff) disparaît car on n'a plus de dérivée temporelle par rapport au temps → On trouve Laplace

- D'autres exemples de matériaux pour l'isolation ? Notamment habitat ?

laine de roche et de verre, polystyrènes, PVC

Pourquoi c'est pas mal ? Laine de verre parce que y'a pleins d'air dedans et du coup la différence d'impédance entre les deux matériaux est importante et du coup ça passe pas et du coup c isolé tadaaa !! CQFD

- ss

On doit garder un profil linéaire

Il faut qu'il n'y ai

Est-ce que si différence est forte ce sera plus linéaire ?

- Est ce qu'on a le droit de se placer en régime stationnaire ?

ARQS

- Exemple où ça ne marche pas ? Et dans ce cas là on fait quoi?

On peut regarder les épaisseurs caractéristiques de chaque partie et comparer à leur diffusivité

pour chaque matériau on prend L^2/a et on le compare à quoi ?

Pour l'acier : 0,1 mm d'épaisseur : $T_{\text{diff}} = 10^{-4} / 10^{-5} = 10$ s pour qu'une plaque de métal???
acier non? chauffe
Attention dans le tableau des ordres de grandeurs ne pas mettre le 10^6 .

- Pourquoi les deux air et acier chauffent aussi rapidement ?

L'air est mauvais conducteur et pourtant il se retrouve aussi performant que l'acier → car masse volumique très faible donc il chauffe beaucoup plus vite que l'eau

- Y a-t-il besoin d'une paroi solide pour avoir de la convection ?

Attention → convection sur une paroi solide est un cas particulier de convection/diffusion au voisinage d'une paroi.

- Que peut-on dire de la convection de l'air dans une pièce ? Qualitativement ? par rapport à la diffusion ?

convection = transport de matière et d'NRJ par rapport à la diff.

et les temps caractéristique ? C'est beaucoup beaucoup plus rapide la convection !!

- Que se passe-t-il dans l'air au dessus? Qu'a-t-on supposé implicitement dans l'exercice ? Comment est la température ?

Température uniforme

Transfert instantané au vu du temps caractéristique (plus long)

- Pourquoi y a-t-il différence de masse volumique ?

différence de température.

- pq convection ?

Le fluide se réchauffe donc ρ diminue, le fluide monte, puis il redescend et ça tourne (cellule de convection)

Poussée d'Archimède ET gravité

dilatation avec un écart de température combiné avec un champ gravitationnel

- Autre type de convection?

Convection forcée

- Convection naturelle a-t-elle toujours lieu ou y'a-t-il besoin de conditions particulières ?

T_1 (casserole) > T_2 (casserole) → création d'un cycle/rouleau de convection. il faut un gradient de température dans le bon sens !

Pour l'eau c'est l'inverse l'eau chaude est en haut et l'eau froide en bas.

Pour le miel il faut un écart de température plus important.

particule = vitesse constante

particule remonte à une certaine vitesse mais y a de la diffusion avec le milieu

La particule a la température du fluide qu'elle a "vu" il y a un certain instant qui correspond au temps de diffusion.

Si on connaît alpha on trouve delta T.

Formule de Stokes pour la viscosité.

Grosse particule → R dimension de la boîte L divisé par 2.

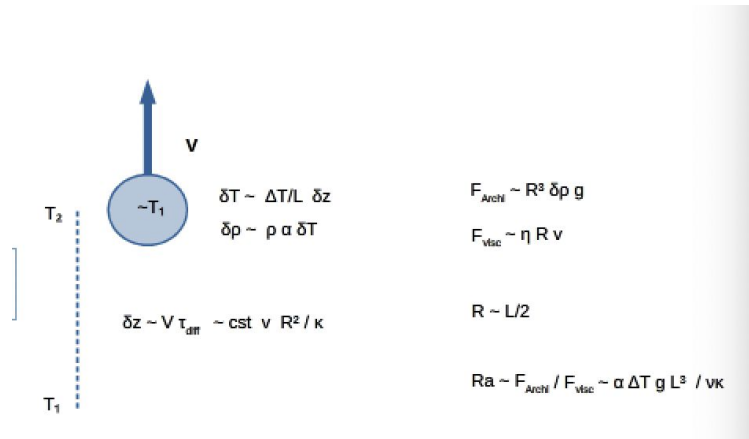
On calcul Rayleigh qui est la comparaison entre archimède et la viscosité.

on trouve Ra

Ra < grandeur critique → pas convection

Ra > grandeur critique → convection

Méca flu du Guillot/guyon?



- D'où est que formule sort ?

$$\Phi_{s \rightarrow f} = hS(T_s(M) - T_f(M))$$

ce
cette

Air fluide parfait, on peut négliger la viscosité sauf à proximité des parois où on ne peut pas la négliger. → Couche limite

Il faut une vitesse limite

Croissance de la vitesse dans la vitesse limite

Une petite zone où on peut considérer qu'il y a très peu de convection car on peut dire que la vitesse est très faible dû à la viscosité

On exprime la conduction en supposant qu'il y a une couche d'air immobile au voisinage de la paroi.

Si la vitesse du vent augmente ça rétrécit la couche limite et augmente le facteur h.

SCHÉMA : Bertin Faroux Renault Thermodynamique (petit chapitre tout a la fin sur la convection thermique et le rayonnement)

- A quoi correspond la température ressentie ?

25°C dehors et la temp ressentie = 20°C

Quand il y a du vent; ça diminue la couche limite, et donc baisse la température superficielle de la peau à cause de la résistance thermique naturelle de la peau qui a diminuée (h).

- Absorbeur : Quel serait l'épaisseur optimale de la couche d'air ?

Utile de mettre une couche d'air de plus en plus gde ?

il faut que la couche d'air soit suffisamment importante pour avoir une isolation mais si TROP importante on va avoir de la convection.

Il faudrait que l'épaisseur soit environ égal à la couche limite.

Isolation va saturer → inutile d'agrandir la couche

- Loi de Stefan est elle la seule loi qui permet de décrire le corps noir ?

La loi de Planck cas plus général.

partie cours : marquer le nom absorptivité, réflectivité et transmissivité

- Commenter le graphique Page 21 ?

Courbe verte →

transmissivité vitre idéale → bleu ?

Les courbes grises : comme on considère la plaque de métal comme un corps noir il va très peu transmettre

différence entre les deux courbes grises : la première flux incident ?

Soleil corps noir → spectre solaire

l'autre c'est un autre corps noir

Loi de Wien

le soleil : 5600 K

- Que se passe il si on a pas de corps noir? si la plaque n'est pas un corps noir ?

Epsilon n'est plus = 1. émissivité

C'est un corps gris (il ne rayonne plus totalement le spectre)

$\alpha = \epsilon$ → Loi de Kirchhoff

- Pourquoi on assimile la plaque a un corps noir ?

Le métal est il un bon corps noir ?

Non c'est affreux, émissivité 0,2 (émet 20 % de la lumière du corps noir)

Comme le rayonnement solaire est dans le visible, on la peint en noir pour être sûr qu'elle absorbe tout le spectre.

Premier principe appliqué au système absorbeur :

$$\Delta U = \sum Q = 0$$

Il y a des pertes :

$dU/dt = \text{somme } \Phi_i$

- due à la réflexion sur la vitre
- par diffusion
- par convection dans la couche d'air au dessus de l'absorbeur

Donc :

$$Q_i = Q_p + Q_d + Q_u$$

et comme : $\Phi dt = \delta Q$

$$\Phi_i = \Phi_p + \Phi_d + \Phi_u$$

Mettre à la fin de la partie I :

Dessinons la différence entre trois flux :

1er cas : diffusion qui varie selon la surface, la conductivité, delta T , et L.

2ème cas : Convection : S, h, delta T

3ème cas : rayonnement thermique : dépend du corps noir, de la surface qui émet et du flux qui va sur l'autre surface. Ici ce qui compte c'est l'angle solide. La proportion des rayons qui vont taper au bon endroit. Dépend également de l'écart de T^4 .



$$\Phi \propto \frac{S \lambda}{L} \Delta T$$



$$\Phi \propto S h \Delta T$$

Essayer
les trois
exemple



$$\Phi \propto S \Omega \Delta(T^4)$$

de faire ressentir la différence entre
phénomènes et l'appliquer à un
concret en deuxième partie.

L'absorbeur solaire est un bon

exemple.

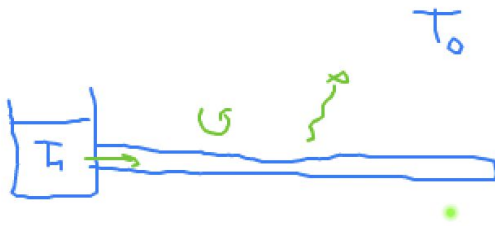
On pourrait étudier l'effet de serre (prend en compte QUE le rayonnement)

Mais trop classique

Savoir en parler toutefois

Autre exemple : Ailette (de radiateur ou sur les gobelets de café pour pas se brûler)

Décroissance exponentielle



Si on prend une canalisation avec de l'eau chaude dedans, on va avoir des pertes thermiques dans le cuivre.

Calculer sur une longueur de 10 m, ce que vaut la température de notre eau chaude
Même principe on a une décroissance exponentielle aussi.

Exemple très bien géré !!

Droite affine avec une variation linéaire.

Absorbeur solaire = voir version cours en ligne
plan de leçon de physique
échangeur thermique

Transmissivité du verre aussi sur le site.--> courbe