

2008-2009

LA ROUTE SOLAIRE



GOUZIEN Elie,
ADDI Cyril,
DE BATZ Florian,
FERFOURI Sabrina,
Lycée Hoche, Versailles

Introduction

Nous sommes quatre élèves de terminale S au lycée Hoche de Versailles : Cyril Addi, Florian de Batz, Sabrina Ferfourri et Elie Gouzien. Dans le cadre de l'atelier de physique expérimentale du lycée, nous travaillons sur un projet de «route solaire». La route solaire est un système permettant de capter l'énergie solaire grâce à des tuyaux placés directement sous une route. L'énergie ainsi récupérée peut être utilisée à des fins diverses, notamment le chauffage. Nous nous sommes alors intéressés à la façon d'optimiser la récupération d'énergie solaire.

INTRODUCTION.....	1
I/ Présentation du projet.....	3
1) A l'origine	3
2) Etude quantitative en circuit fermé.....	6
a) Les différents circuits	6
b) Etude des circuits fermés.....	8
3) Vers une étude des circuits ouverts	12
4) Dispositif expérimental	13
5) Premières acquisitions.....	15
II/ Comment peut-on modéliser les transferts d'énergie dans notre système ?	16
1) Hypothèses et construction d'un modèle théorique	16
2) Confrontation du modèle à l'expérience	19
III/ Influence des paramètres.....	20
1) Notion d'efficacité de la route	20
2) Influence de la nature du matériau	21
a) Construction de la route avec des tuyaux en métal.....	21
b) Interprétation des mesures.....	22
3) Influence du débit sur k.....	23
4) Puissance.....	27
a) Etablissement des équations :	27
b) Tracé des courbes :	28
CONCLUSION.....	29

I/ Présentation du projet

1) A l'origine

L'idée de la route solaire nous est venue lors de l'élaboration de notre TPE axé sur l'exploitation de l'énergie solaire. Nous sommes partis du constat suivant: de nos jours l'exploitation des énergies renouvelables se développe de façon extrêmement rapide en raison de la baisse des réserves en énergie fossile et de son coût.

De ces énergies renouvelables, celles dont l'exploitation se développe le plus sont l'éolien et le solaire. N'oublions pas de rappeler que la plupart des sources d'énergies renouvelables existent grâce au Soleil (vent, marée, biomasse).

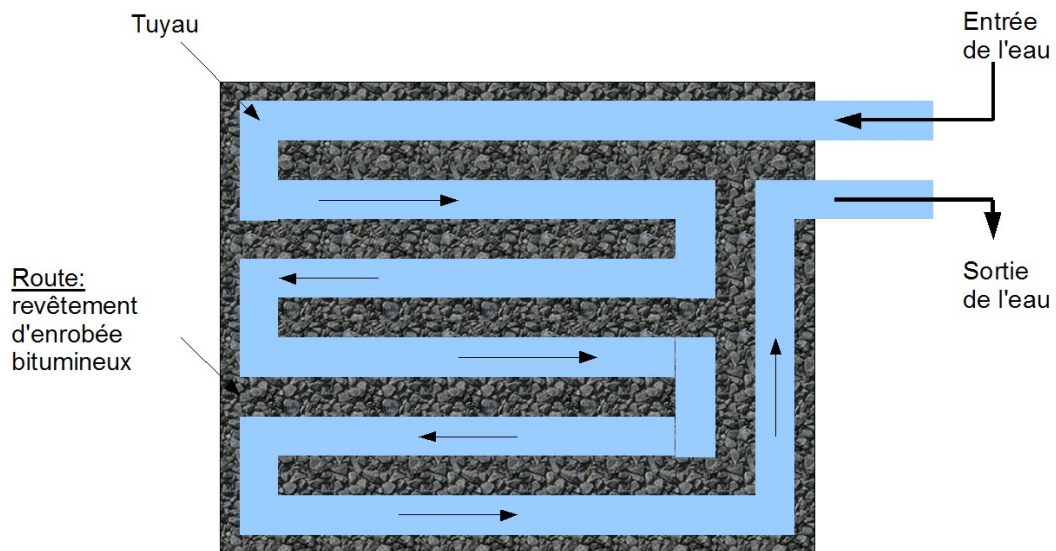
Il existe aujourd'hui différents moyens d'exploiter l'énergie directe du Soleil :

- Les panneaux solaires photovoltaïques transformant l'énergie lumineuse et infrarouge en énergie électrique;
- Les capteurs thermiques, permettant d'utiliser directement l'énergie thermique du Soleil, ou de la transformer en énergie mécanique puis électrique.

Nous avons essayé de trouver une nouvelle manière simple d'exploiter l'énergie solaire thermique. Ayant remarqué le nombre considérable de routes nous entourant et leur revêtement de couleur sombre, nous avons pensé qu'elles seraient un bon moyen pour exploiter l'énergie du Soleil.

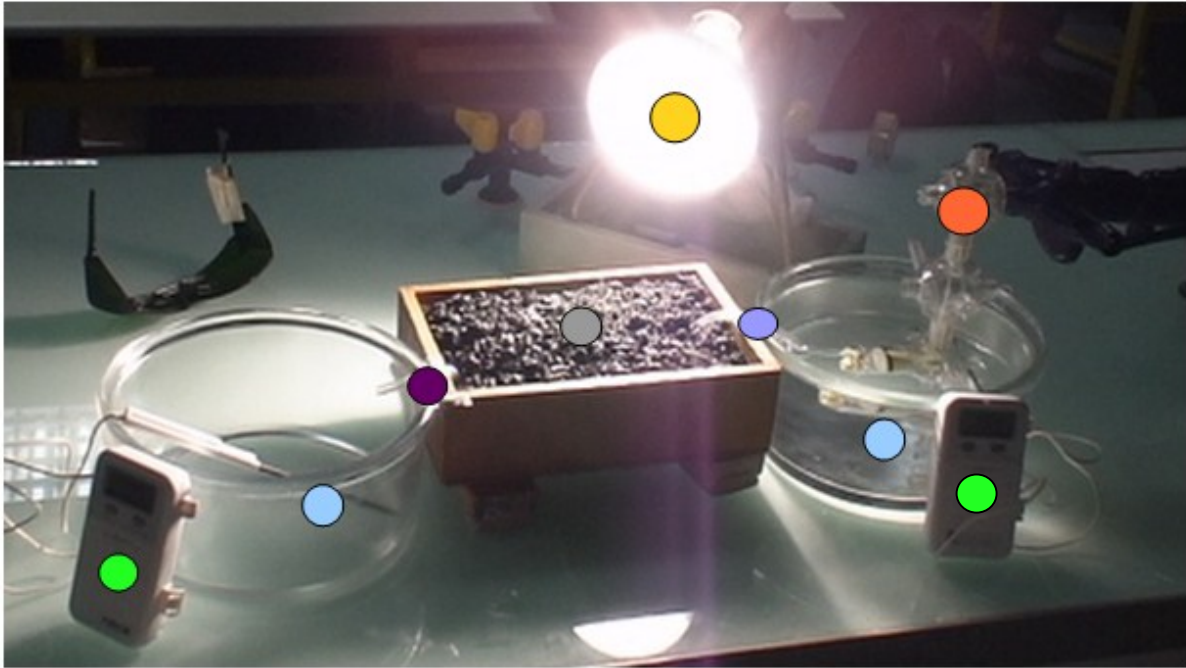
Le principe est simple : faire circuler de l'eau dans des tuyaux intégrés à la route, le bitume recouvrant les tuyaux jouant le rôle de "panneau solaire". La route, chauffée par le Soleil, transmet son énergie thermique à l'eau circulant dans les tuyaux.

Principe d'une route solaire



Nous avons donc réalisé une maquette : une boîte en bois au fond de laquelle sont fixés des tuyaux en plastique ensuite recouverts d'enrobé bitumineux.

Une pompe permet d'injecter l'eau dans la route chauffée par une lampe faisant office de Soleil. Nous avons alors pu mesurer une élévation de température de l'eau d'environ 3°C lors de son passage dans la route.

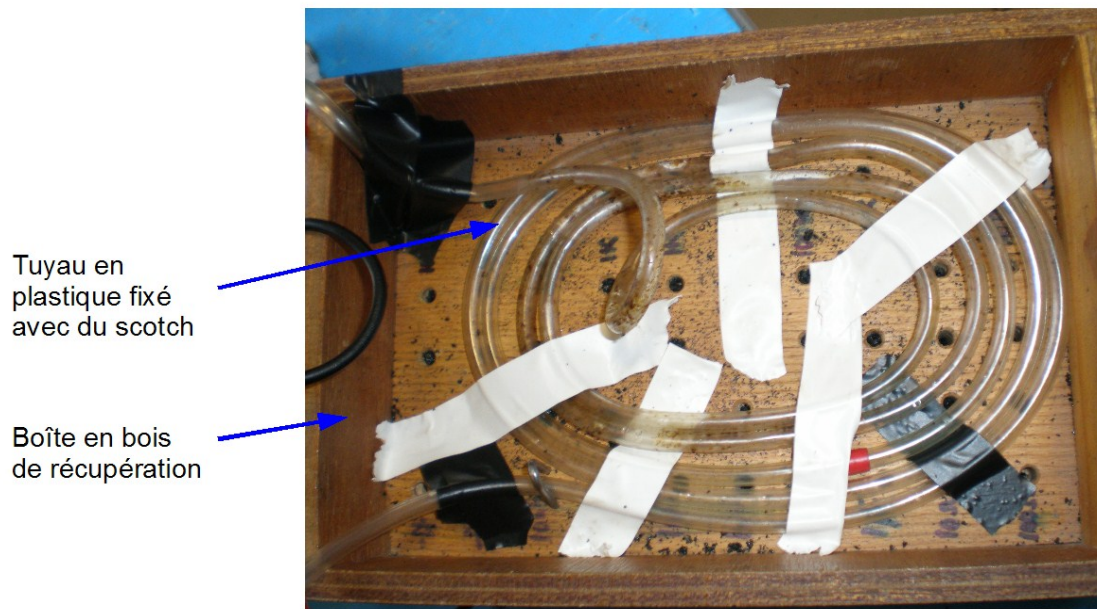


Le montage de notre TPE

Légende:

- Lampe chauffant la route ●
- Cristallisoirs ●
- Thermomètres ●
- Tuyau d'entrée ●
- Tuyau de sortie ●
- Route ●
- Pompe ●

Construction de notre première route



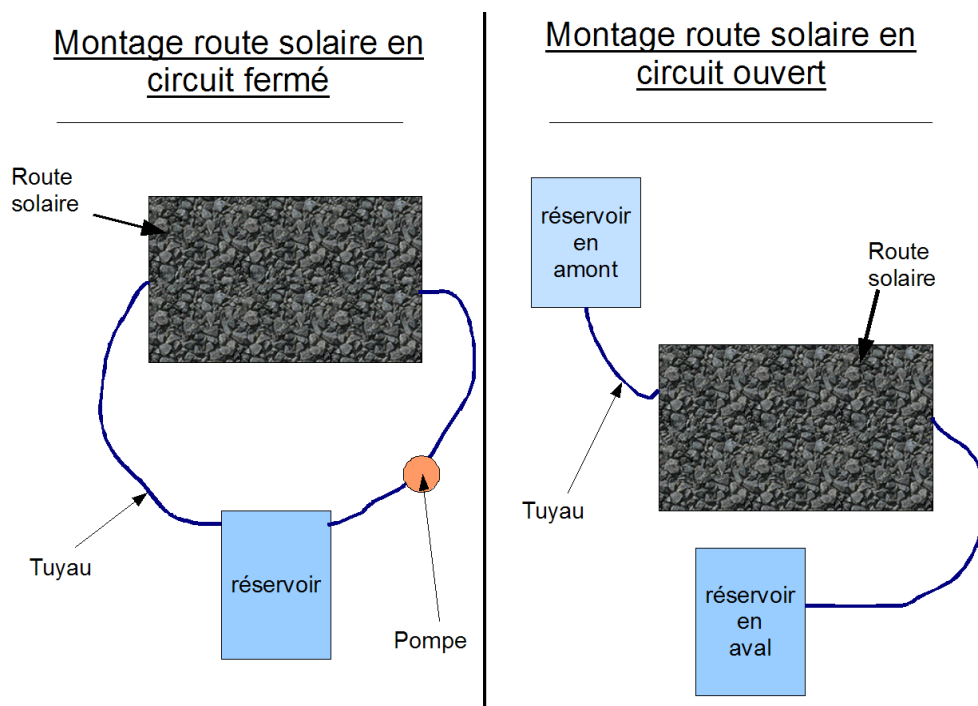
Donc notre système permettait d'obtenir une élévation de la température assez faible. Mais notre route était de petite dimension (20*15cm) et la longueur des tuyaux était limitée (1,50m). Donc, avec une route plus grande et des tuyaux plus grands, on pouvait espérer obtenir de meilleurs résultats. Et nous avons décidé de poursuivre l'étude de la route solaire dans le cadre de l'Atelier de Physique Expérimentale du lycée afin de réaliser des maquettes plus élaborées et d'étudier leurs performances.

2) Etude quantitative en circuit fermé

a) Les différents circuits

Nous avons imaginé deux types de circuits pour exploiter l'énergie solaire :

- En circuit ouvert, l'eau ne passe qu'une fois dans la route et est ensuite stockée ou directement utilisée.
- En circuit fermé, la même eau passe plusieurs fois dans la route avant d'être définitivement stockée et de pouvoir être utilisée.



Le montage en circuit fermé nous a paru le plus prometteur pour nos expériences et le plus simple à mettre en œuvre. Nous avons donc choisi de concentrer notre étude sur les circuits fermés et réalisé différents montages selon le principe qui suit :

Une pompe permet d'aspirer l'eau contenue dans un récipient calorifugé faisant office de réservoir pour la faire circuler dans le tuyau placé dans le bitume avant de revenir dans le réservoir.

Avant toute mesure expérimentale, il est nécessaire de faire chauffer le bitume pendant environ deux heures afin de s'assurer à l'aide d'une sonde thermique ou d'un thermomètre que la température de la route est relativement homogène et constante dans le temps. On peut alors faire circuler l'eau dans le circuit et mesurer la température dans le calorimètre pour suivre son évolution au cours du temps.

Nous avons aussi remplacé le cristalliseur par un vase de Dewar qui permet de limiter les pertes thermiques du stockage d'eau.

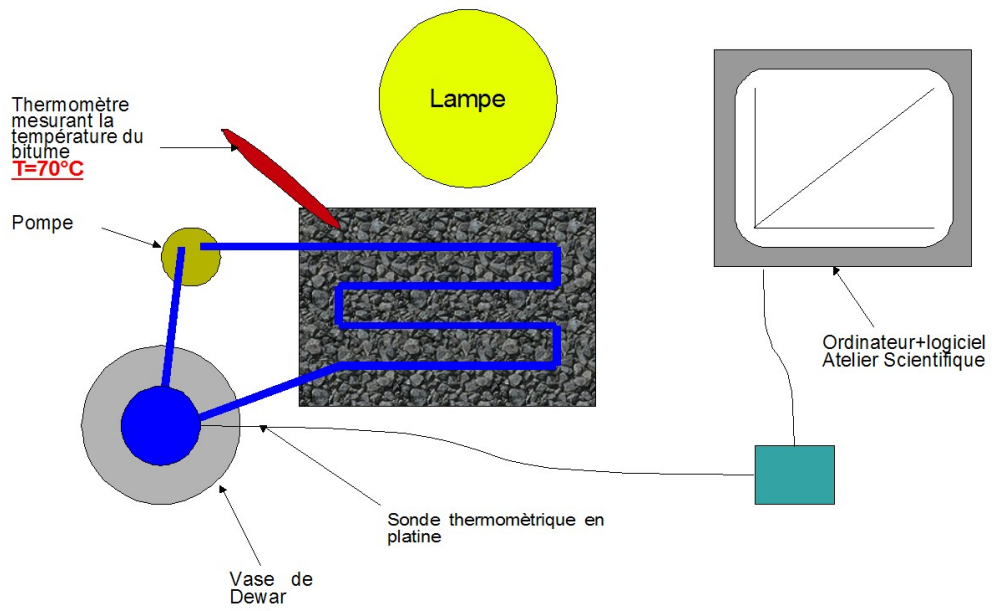


Schéma général de fonctionnement du circuit fermé

b) Etude des circuits fermés

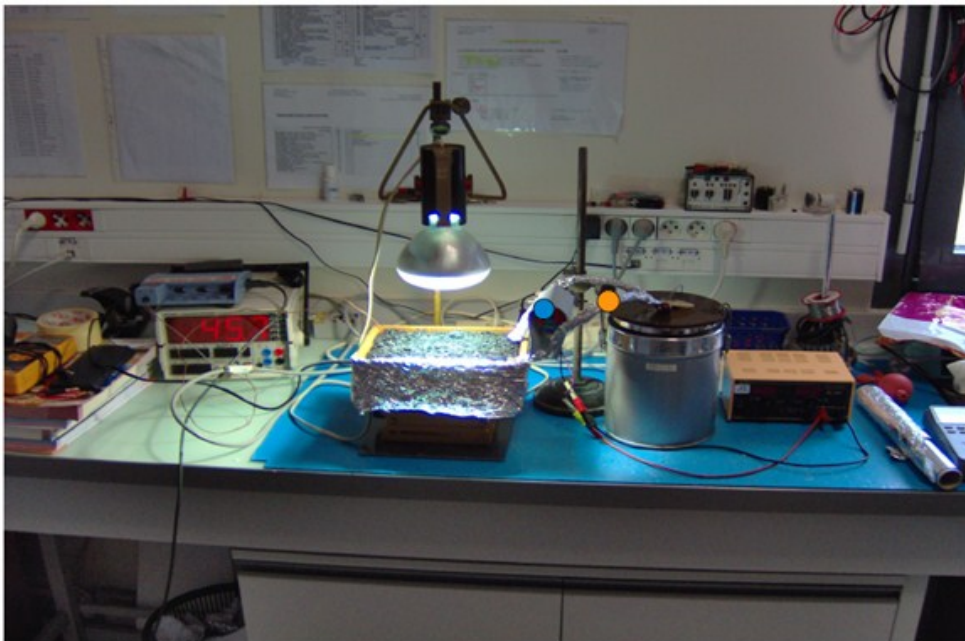
Nous avons réalisé trois circuits différents lesquelles sont chacun une amélioration du précédent. Voici en comparaison le premier circuit et le dernier (le troisième)



Premier montage en circuit fermé

On peut voir qu'entre les deux circuits :

- La longueur des tuyaux à l'extérieur de la route a été réduite au minimum et qu'ils ont été isolés par du papier aluminium ●
- La pompe a été changée ●
- Les raccords entre les tuyaux qui étaient en ruban adhésif sur le premier montage ont été remplacés (invisibles sur la photo) ●

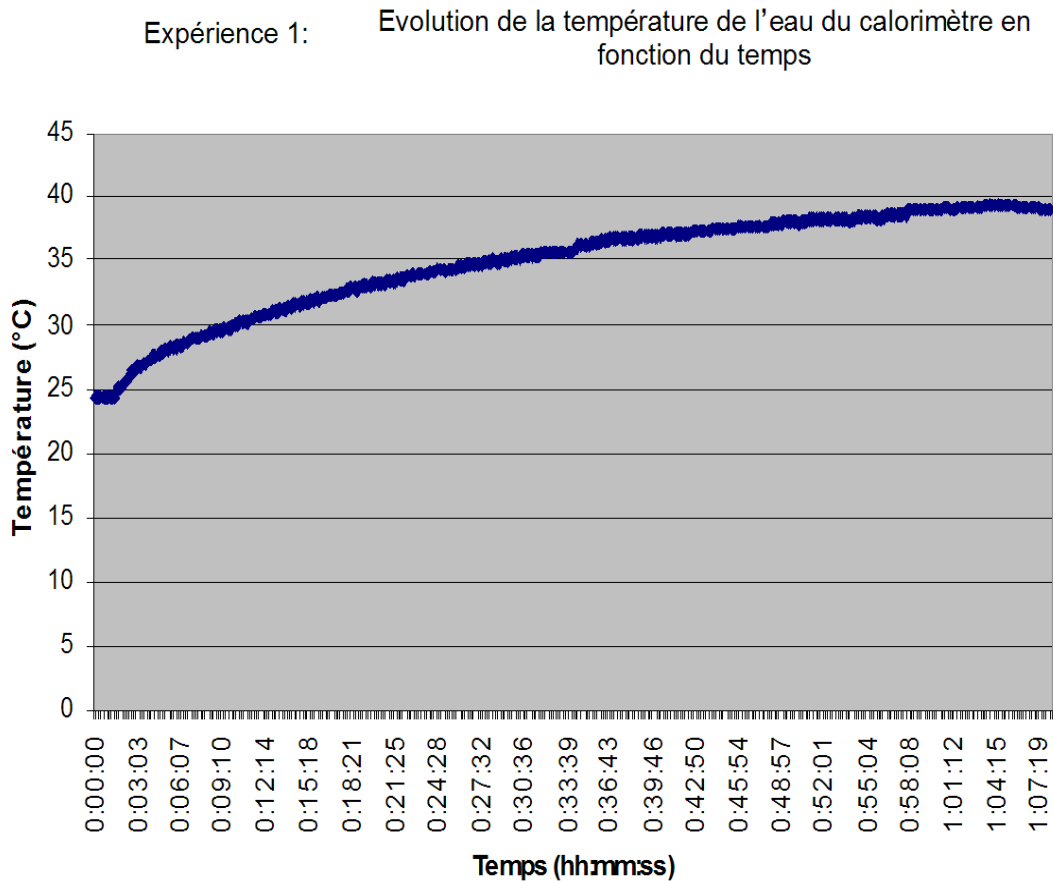


Troisième montage en circuit fermé

Pour faire nos mesures, nous avons utilisé une sonde thermique reliée à un ordinateur.

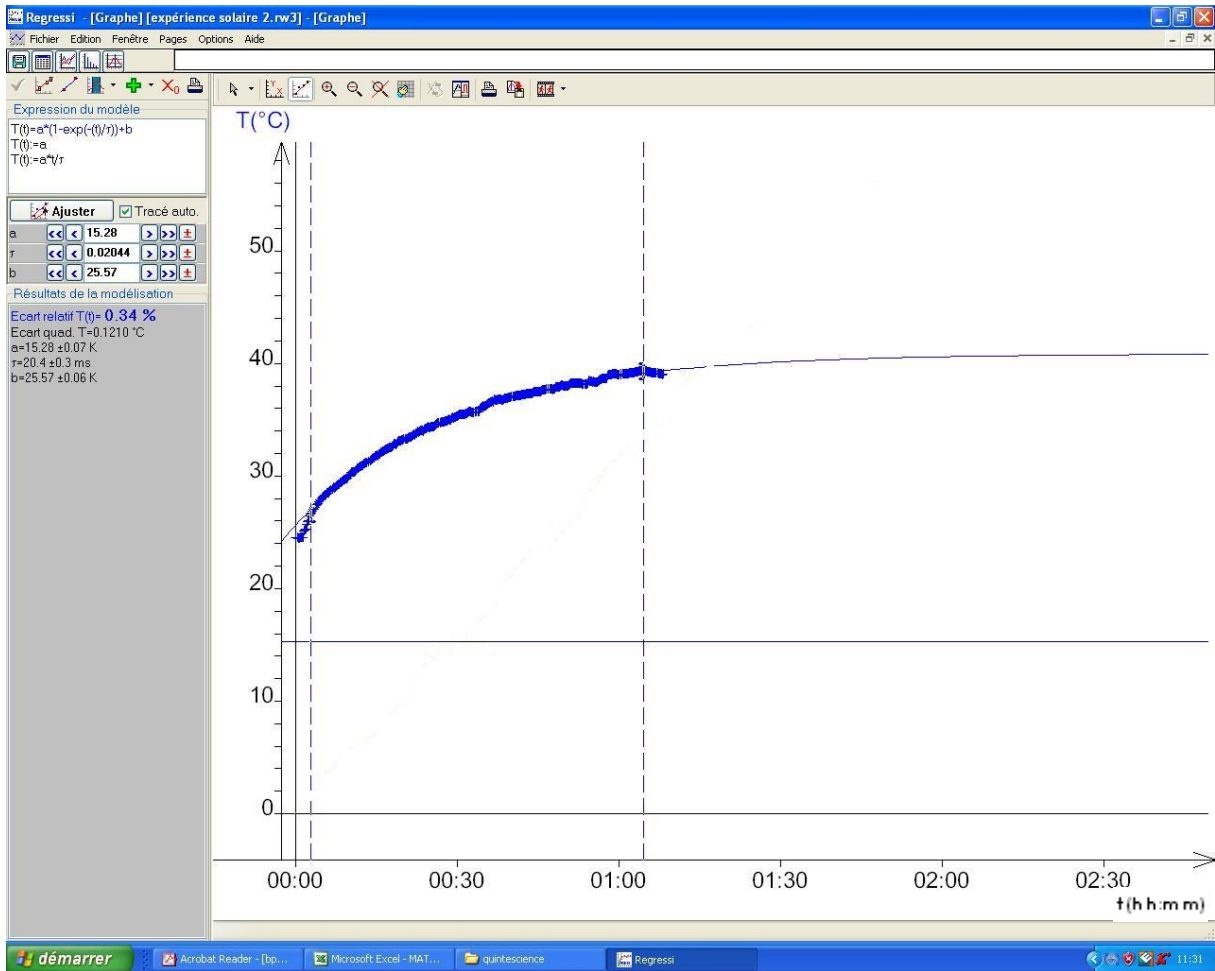
Voici les mesures réalisées grâce aux premier et troisième montages.

Nous avons, dans un premier temps réalisé, une acquisition de la température de l'eau dans le calorimètre pendant une heure. ($T_{\text{route}} = 70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$)



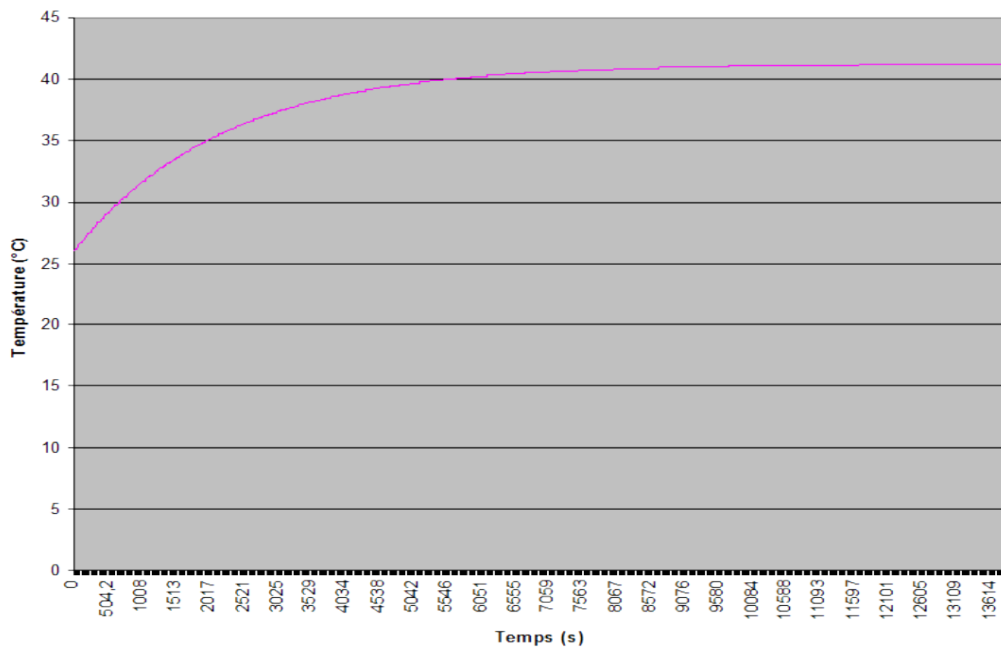
La température initiale est de 25°C et la température finale est de 39°C . L'élévation de température est donc de 14°C .

Les manipulations étant très longues (1 après midi = 1 acquisition, car le temps de chauffage du bitume et l'élévation de la température de l'eau dans le calorimètre est très lente), et l'expérience ne semblant pas être terminée au bout d'une heure, nous avons eu recours à l'extrapolation de nos résultats sur une longue durée.



Résultats obtenus avec le premier montage en cours d'extrapolation avec le logiciel Regressi

Extrapolation de l'expérience 1

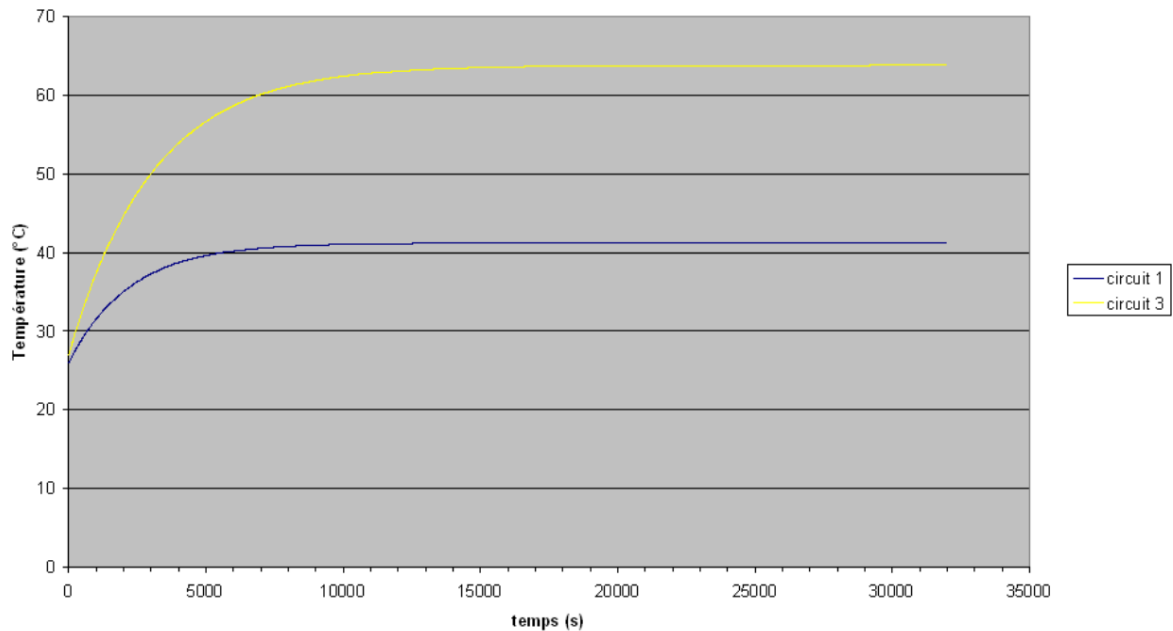


Premier résultats une fois extrapolés

Finalement, on observe que la température finale est de 41°C, soit une élévation totale de la température de 16°C.

Nous avons ensuite procédé à différentes mesures et nous vous présentons sur le même graphique les extrapolations des résultats obtenus avec les premier (courbe bleue) et troisième montage (courbe jaune):

Comparaison des extrapolations de la température d'eau dans le calorimètre en fonction du temps pour les expériences 1 et 3



On observe que pour une température initiale de 25°C, la température finale atteint 62°C, soit une élévation de température de 37°C (résultats obtenus avec le troisième montage).

On peut aisément observer en comparant les deux courbes que les meilleurs résultats sont obtenus avec le troisième montage : la température dans le calorimètre atteint environ 62°C alors qu'elle n'atteignait que 41°C avec notre première maquette de route. Les expériences sont réalisées avec une température moyenne du bitume égale à 70°C. L'écart de température entre la route et l'eau est donc de 29°C dans la première expérience, et de 8°C dans la seconde. L'écart de température s'est donc réduit de 21°C entre les deux expériences, donc le système de récupération de l'énergie thermique été plus efficace dans la deuxième expérience, avec le troisième montage.

3) Vers une étude des circuits ouverts

Après avoir trouvé le moyen d'exploiter de manière efficace l'énergie captée par la route, nous avons décidé d'étudier l'influence des différents paramètres sur la température de l'eau (longueur de tuyaux, nature des matériaux employés pour les tuyaux, débit...). De plus nous avons décidé d'étudier les circuits ouverts car ils présentaient de nombreux avantages:

- Ils ne nécessitent pas obligatoirement de pompe contrairement aux circuits fermés, car si le dénivelé entre l'entrée et la sortie de la route est assez important, l'eau coule toute seule entraînée par son propre poids. Ce sont des coûts d'utilisation en moins, et un argument commercial.
- En circuit fermé, l'eau passe n fois dans la route. En circuit ouvert l'eau ne passe qu'une fois. Donc le circuit fermé représente n fois ce qu'il se passe en circuit ouvert. Il est donc plus simple d'étudier la route solaire en circuit ouvert.
- C'est à la même époque que nous avons découvert dans un article de science et vie d'avril 2008 que le principe de la route solaire avait déjà été testé aux Pays Bas sous le nom de "Road Energy System". Nous avons alors contacté Science et Vie pour obtenir plus d'informations sur les caractéristiques du système mis en œuvre. Les journalistes nous ont transmis l'adresse de la société constructrice de la route solaire aux Pays Bas cependant nous n'avons pas obtenu de réponse à notre courrier. Cette découverte fortuite a néanmoins renforcé notre motivation et nous a conforté dans l'idée que notre route solaire peut avoir un réel intérêt industriel.

4) Dispositif expérimental

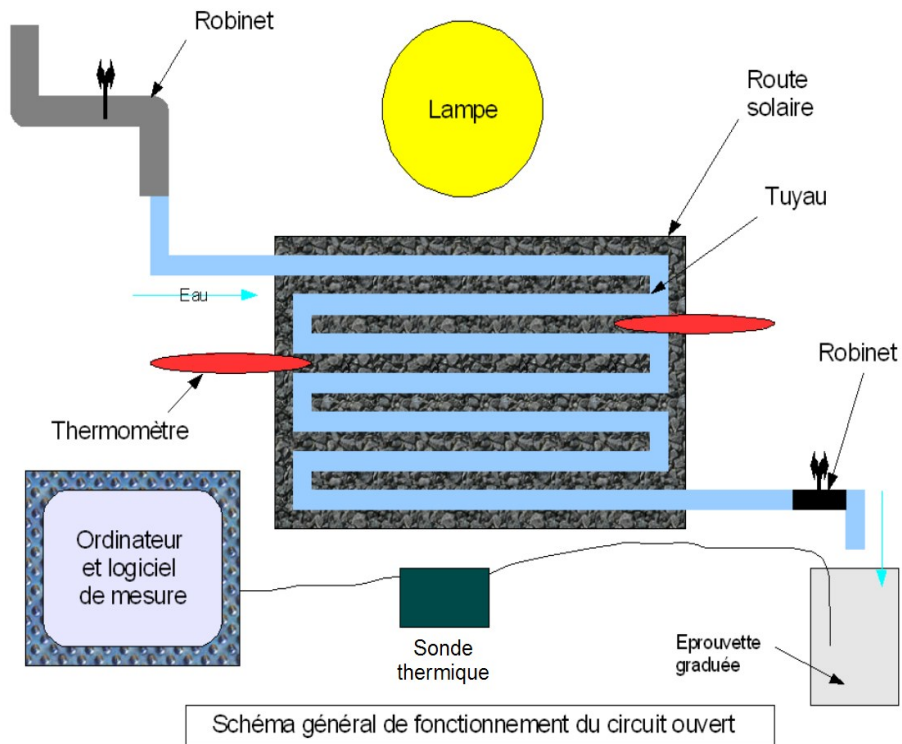
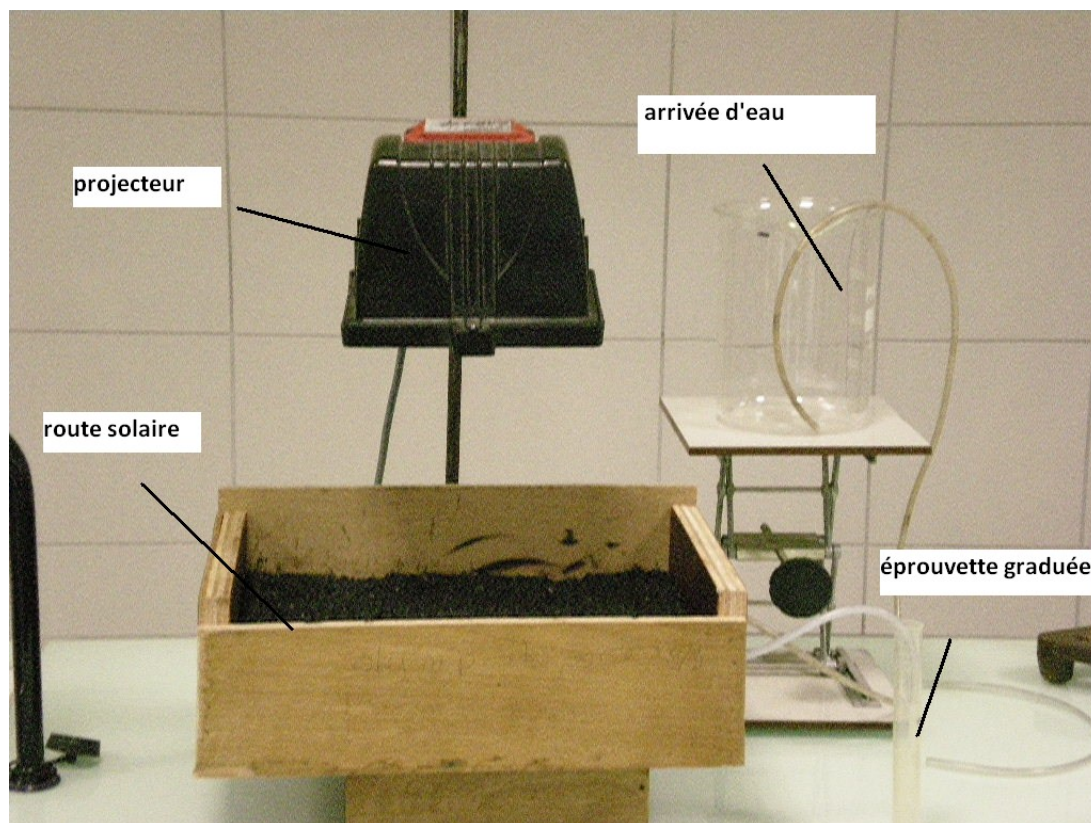


Photo d'un montage en circuit ouvert

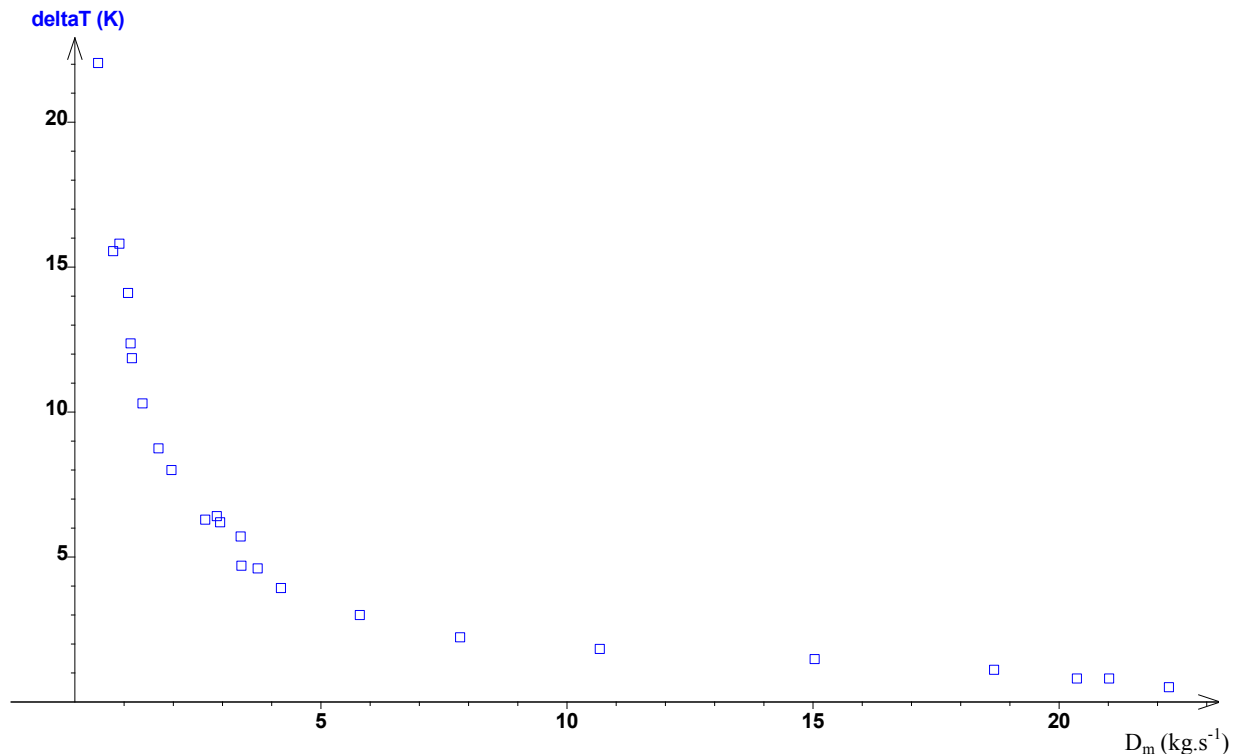


Ici, L'eau circule dans la route grâce à son propre poids, et n'y passe qu'une fois. Pour effectuer nos mesures, nous avons utilisé systématiquement le même dispositif expérimental. Le débit volumique a tout d'abord été mesuré. Pour cela, nous disposons, d'une éprouvette graduée, placée en aval de la route, et d'un chronomètre. Un robinet est également inséré avant l'entrée et permet de modifier le débit. Le raccordement de l'entrée de l'eau à un robinet permet d'obtenir de grands débits pour les expériences. En utilisant l'expression de la masse volumique, nous avons pu convertir nos débits volumiques en débits massiques, utiles pour l'élaboration du modèle théorique. La mesure de température a été effectuée à l'aide d'une sonde thermique insérée à la sortie du tuyau.

5) Premières acquisitions

Nous avons tout d'abord décidé de mesurer l'échauffement ΔT entre l'entrée et la sortie, en fonction du débit, car il s'agit du paramètre le plus influent. En effet, les autres paramètres qui pourraient influencer sur la récupération d'énergie thermique, tels que la longueur, la nature, le diamètre des tuyaux, dépendent de la route en elle-même. Ainsi, seul le débit est réglable quelque soit la route.

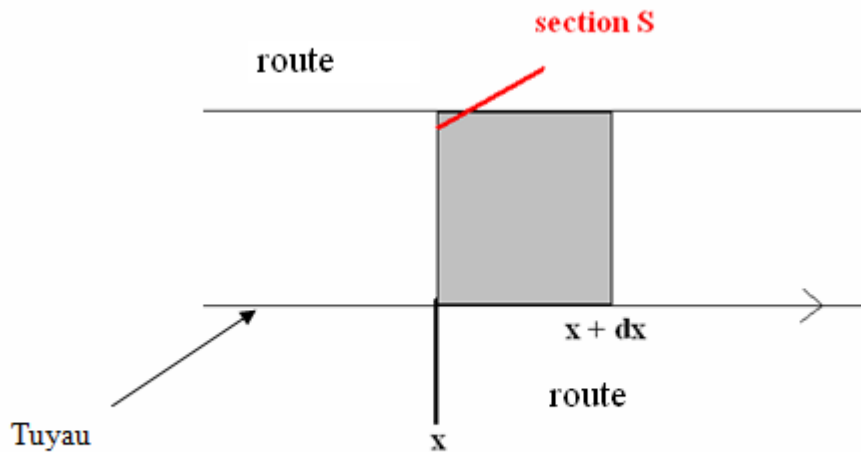
Différence de température ΔT en fonction du débit massique



Cette courbe semble évoluer de façon particulière. Nous avons donc voulu expliquer cette tendance en élaborant un modèle théorique.

II/ Comment peut-on modéliser les transferts d'énergie dans notre système ?

1) Hypothèses et construction d'un modèle théorique



Une portion du tuyau

L'axe des abscisses x est orienté dans le même sens que celui de l'écoulement de l'eau.

On considère une masse d'eau dm traversant une section S située à une abscisse x du tuyau, pendant une durée dt . Le système occupe une longueur élémentaire de tuyau dx .

On suppose que la température de dm est homogène.

Pendant une durée dt , cette masse a une énergie interne U qui varie tel que :

$$dU = c_{eau} dm dT(x)$$

Avec,

c_{eau} , capacité thermique massique de l'eau $c_{eau} = 4186 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$dT(x)$, variation élémentaire de température pendant une durée dt à une abscisse x en kelvins

d^2U , variation d'énergie interne en joules

On suppose que cette variation d'énergie est due uniquement à des transferts thermiques entre la route et l'eau.

On modélise ces transferts par la relation, découlant de la loi de Newton sur les transferts thermiques :

~~$$dE_{route} = k(T_r - T(x)) dx dt$$~~

Avec,

k , coefficient d'échanges thermiques en $J.m^{-1}.K^{-1}.s^{-1}$

T_r , température de la route en kelvins

$T(x)$, température de l'eau dans les tuyaux à une abscisse x en kelvins

On peut alors déterminer l'équation différentielle suivante :

$$dm.c_{eau}.dT(x) = k.T(x) - T_r dx dt$$

et le débit massique $D_m = \frac{dm}{dt}$

Donc,

~~$$D_m.c_{eau}.dT(x) = k.T(x) - T_r dx dt$$~~

Or pour tout x , $T(x) \leq T_r$

Donc $D_m.c_{eau} \cdot \frac{dT(x)}{dx} = k(T_r - T(x)) \Leftrightarrow \frac{dT(x)}{dx} = \frac{-k}{D_m.c_{eau}} T(x) + \frac{kT_r}{D_m.c_{eau}}$. Ici, on considère

que tous les paramètres qui interviennent dans cette équation différentielle sont constants par rapport à x .

Les solutions de cette équation différentielle sont donc :



On note $T(0) = T_0$, T_0 est la température pour $x=0$ donc la température initiale de l'eau



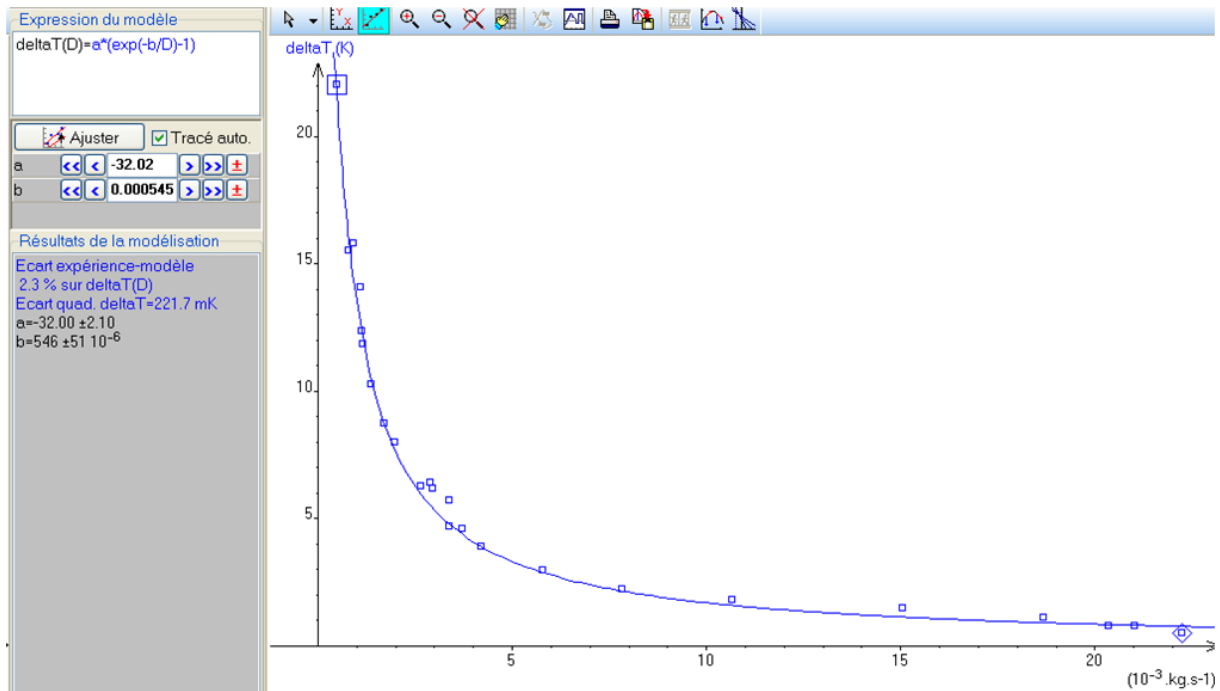
Ainsi, pour un tuyau de longueur l , la température de sortie T_f s'exprime par :



Résumons les hypothèses qui nous permettent d'établir cette équation :

- la température de dm est homogène
- les transferts d'énergie se font uniquement entre la route et l'eau
- Tous les paramètres composant l'équation sont constants par rapport à x et notamment la température de la route et k .

2) Confrontation du modèle à l'expérience



Comparaison de ΔT en fonction du débit massique obtenue de façon théorique et de façon expérimentale

Nous avons reporté les points expérimentaux de ΔT en fonction du débit (24 points). A l'aide du logiciel Regressi, nous avons dessiné une courbe d'équation

$f(D_m) = a * \exp\left(\left(\frac{-b}{D_m}\right) - 1\right)$, le logiciel a calculé les coefficients a et b permettant d'approcher au mieux les points expérimentaux.

D'après l'étude théorique :

$$T_f - T_0 = (T_0 - T_r) \exp\left(\frac{-kl}{D_m c}\right) + T_r - T_0$$

$$\text{Donc } T_f - T_0 = (T_0 - T_r) \exp\left(\frac{-kl}{D_m c}\right) + T_r - T_0 \Leftrightarrow T_f - T_0 = (T_0 - T_r) \left(\exp\left(\frac{-kl}{D_m c}\right) - 1\right)$$

$$\text{Soit } \Delta T = (T_0 - T_r) \left(\exp\left(\frac{-kl}{D_m c}\right) - 1\right)$$

On constate que l'écart expérience - modèle est de 2.3 %. Notre modèle théorique est donc tout à fait plausible. Nous sommes donc parvenus à modéliser les transferts d'énergie.

Nous pouvons donc dorénavant étudier l'influence des différents paramètres sur la récupération d'énergie thermique.

III/ Influence des paramètres

1) Notion d'efficacité de la route

Afin de quantifier la notion d'efficacité de la route, c'est-à-dire son aptitude à capter l'énergie thermique de la route, et à la transmettre au liquide caloporteur, l'eau, nous avons étudié la variable k , utilisée dans notre modèle théorique.

Cette valeur n'est pas calculable par la théorie. Cependant, plus elle est grande, plus les transferts sont efficaces. Il serait donc très intéressant de pouvoir la déduire de l'expérience. Grâce à cette formule :

$$k = \frac{-D_m \times c}{l} \ln \left(\frac{T_f - T_r}{T_0 - T_r} \right)$$

Nous avons donc pu la calculer par l'intermédiaire d'expériences qui consistent à mesurer T_r , la température de la route, T_0 , la température initiale de l'eau, T_f , la température finale de l'eau, et bien évidemment D_m , le débit massique. Par ailleurs c (capacité thermique massique) et l (longueur des tuyaux) sont des constantes connues.

Nous cherchons dans cette partie à mettre en évidence l'influence d'un certain nombre de paramètres sur k .

Ces paramètres sont très nombreux. Mais nous avons listés ceux là : débit, diamètre des tuyaux, épaisseur des tuyaux, nature des tuyaux, disposition des tuyaux, capacité thermique massique de la route, taille des graviers composant le bitume, profondeur d'enfouissement des tuyaux, la nature du bitume, la nature du fluide caloporteur...

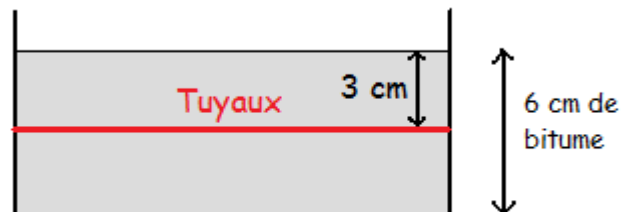
2) Influence de la nature du matériau

a) Construction de la route avec des tuyaux en métal

Pour comparer l'influence de la nature des matériaux, nous avons construit une route comportant des tuyaux en métal. Ces tuyaux ont été récupérés sur le système d'échangeur thermique d'un réfrigérateur. Ainsi, nous avons placé 4,38 mètres de tuyaux, la longueur des tuyaux de la route "plastique", dans une épaisseur de 6 cm de bitume. L'épaisseur entre la surface et les tuyaux est de 3 cm. Nous avons reproduit le plus fidèlement possible les paramètres spatiaux du montage précédent qui comportait les tuyaux en plastiques.

Les mesures sont les mêmes que précédemment : on fait varier le débit et on mesure la température initiale et finale, ainsi que celle du bitume. De ce fait, les deux expériences faisant varier la nature des tuyaux sont comparables.

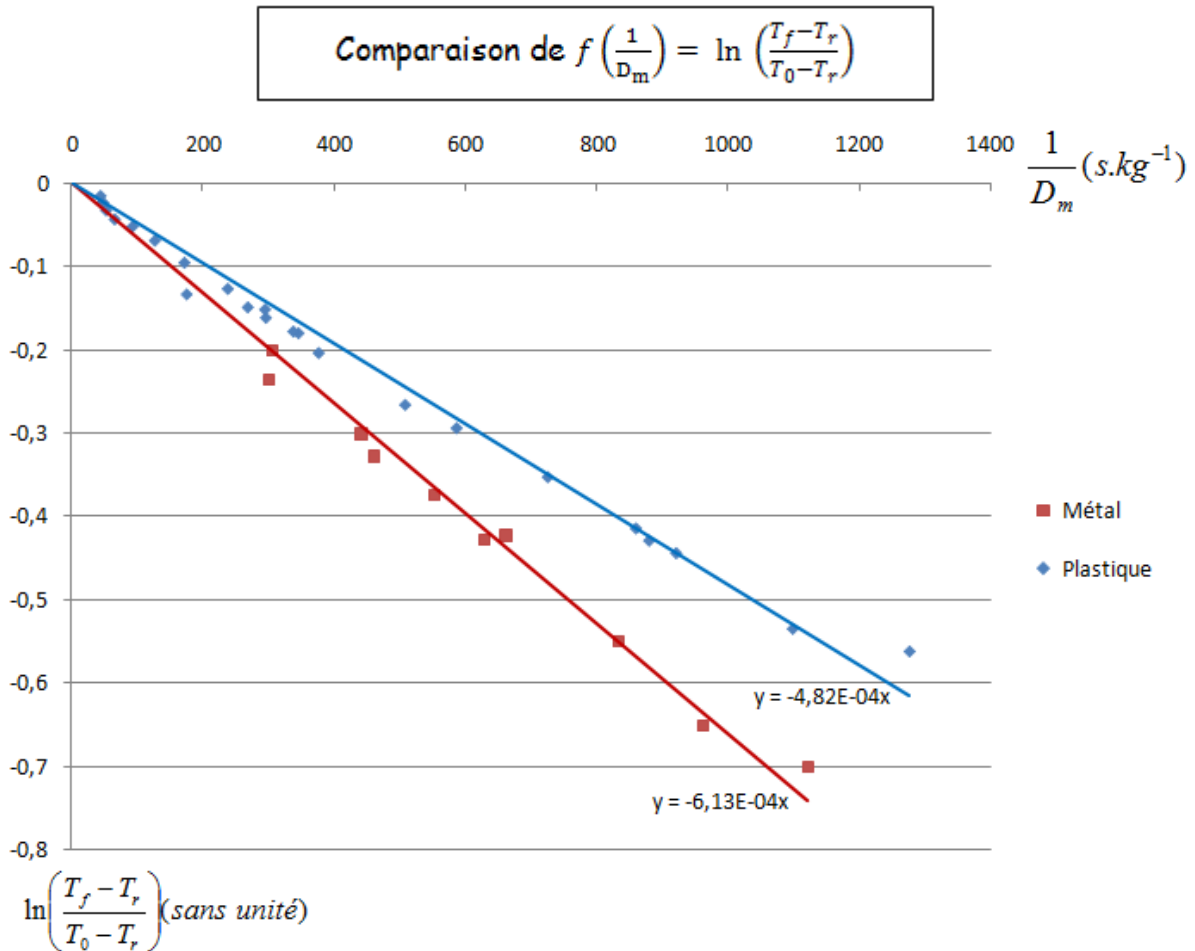
Le but de la manipulation est donc de comparer le k de cette route avec celui de la route construite à l'identique mais avec des tuyaux en plastique.



b) Interprétation des mesures

Nous avons comparé l'expression $\ln\left(\frac{T_f - T_r}{T_0 - T_r}\right)$ en fonction de $\frac{1}{D_m}$ pour la route comportant les tuyaux en métal et celle comportant les tuyaux plastiques. Nous attendons une droite.

Nous obtenons le graphique suivant :



Ainsi, en comparant les valeurs absolues des pentes des droites, on compare les k .

On en déduit que pour tous les débits étudiés, $k_{\text{métal}}$ est nettement supérieur à $k_{\text{plastique}}$. L'aptitude de la route "métal" à capter l'énergie thermique est donc plus importante.

Cependant, il est important de préciser que la plage de débits étudiés est relativement petite : de ce fait, on perçoit mal le fait que pour de forts débits, les valeurs de $\ln\left(\frac{T_f - T_r}{T_0 - T_r}\right)$ ont tendance à s'écarter du modèle linéaire.

3) Influence du débit sur k

Le but de cette partie est de trouver expérimentalement l'influence du débit sur k

Dans toute cette partie, on considère un débit comme fort au delà de $50 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$ et faible en dessous de $6,2 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$. Ces valeurs ont été choisies par rapport aux résultats des expériences.

Comme on l'a précédemment constaté sur le graphique représentant $\ln\left(\frac{(T_f - T_r)}{(T_0 - T_r)}\right)$ en fonction de $\frac{1}{D_m}$, on observe pour les débits extrêmes (les plus importants et les plus faibles) un écart minime entre la droite prévue par le k constant de notre modèle et la courbe expérimentale.

Pour les forts et faibles débits, la courbe expérimentale s'écarte du modèle théorique que nous avons envisagé. Dans notre modèle théorique, nous avons supposé k indépendant du débit. On peut alors se demander si cette hypothèse est valable ?

Même si industriellement, il n'y a pas d'intérêt à travailler avec d'immenses débits ou de très faibles débits, nous avons décidé de les étudier à la fois par curiosité et pour savoir s'il existe un débit qui maximise le coefficient k, c'est-à-dire un débit pour lequel la récupération d'énergie thermique est maximale.

Nous avons donc décidé pour la dernière route expérimentée de modifier un peu le protocole afin de pouvoir obtenir de forts débits.

Cette dernière route est celle contenant des tuyaux en métal. La seule modification apportée au protocole est l'abandon de l'utilisation de l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau pour générer un débit : cela demandait de placer le réservoir source en hauteur et ne permettait pas d'obtenir de forts débits. A la place, nous avons relié le tuyau entrant dans la route sur un robinet d'eau. La pression s'est avérée largement suffisante pour obtenir de forts débits.



Montage utilisé dans cette partie

On rappelle que notre modèle précédemment établi prévoit l'équation suivante :

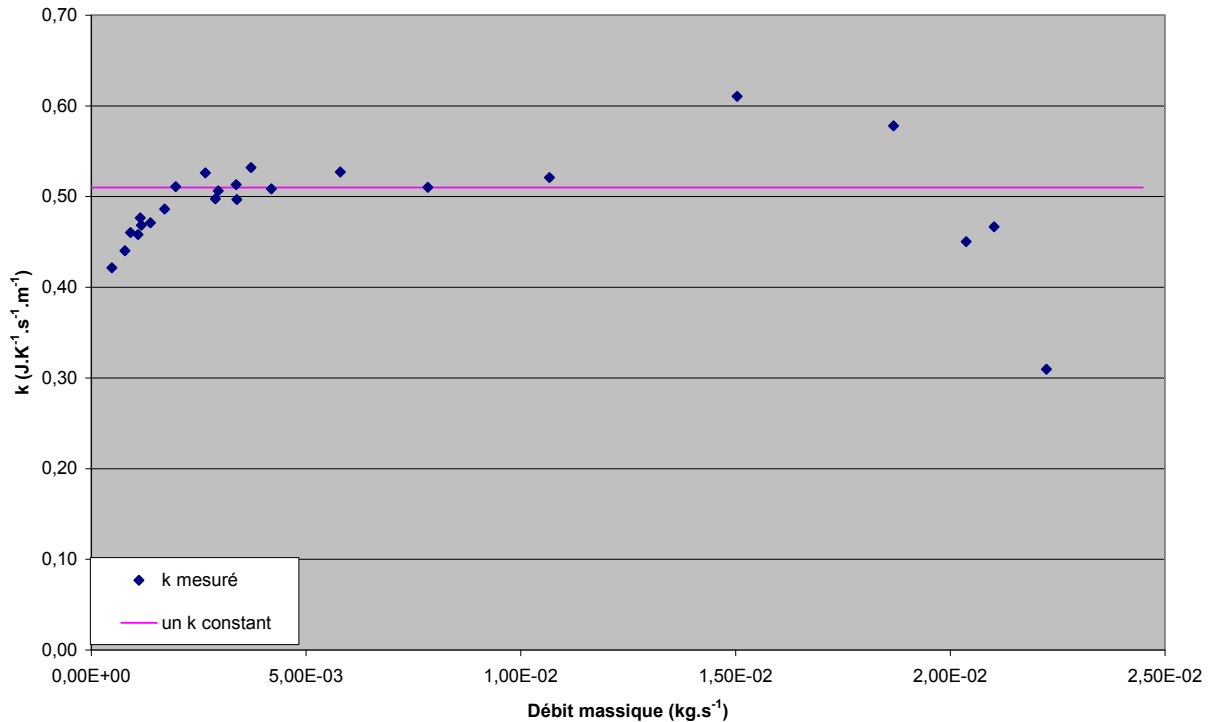
$$Q = \frac{k l}{D_m c_{eau}} \ln \left(\frac{T_f - T_r}{T_0 - T_r} \right)$$

$$\text{Soit : } \ln \left(\frac{T_f - T_r}{T_0 - T_r} \right) = \frac{-k l}{D_m c_{eau}}$$

$$\text{Soit : } \frac{-c_{eau} D_m \ln \left(\frac{T_f - T_r}{T_0 - T_r} \right)}{l} = k$$

Ainsi, traçons $k = f(D_m)$

k en fonction du débit massique



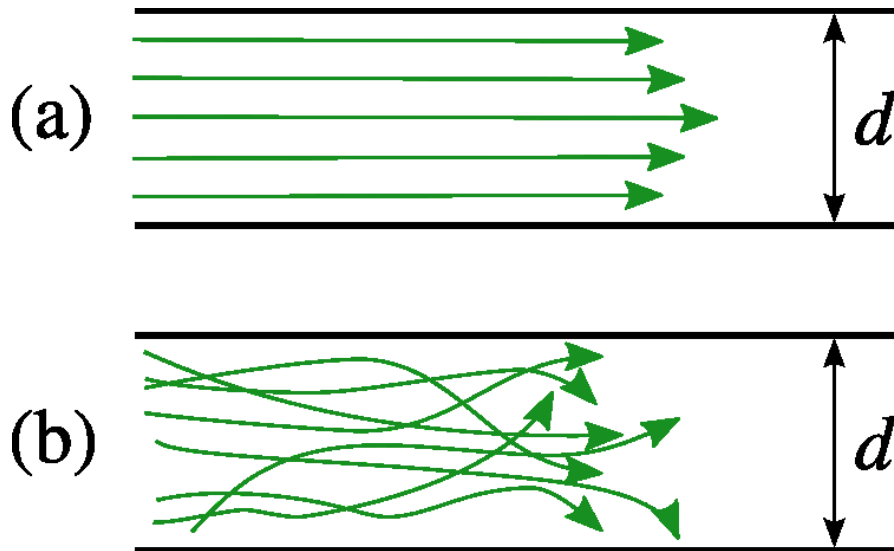
Il apparaît ici beaucoup plus nettement que le débit a une influence sur k. Donc l'hypothèse d'un k constant vis-à-vis du débit est infirmée par l'expérience. Les résultats des autres expériences étant similaires, on peut s'engager dans des interprétations.

On remarque que, pour les faibles débits, lorsque le débit augmente, k augmente.

On peut également interpréter cette baisse d'efficacité de la route pour les faibles débits par le mode d'écoulement de l'eau dans les tuyaux. En effet, le modèle utilise l'hypothèse d'une diffusion instantanée d'énergie thermique de la périphérie vers le centre du tube (mais inexistante dans l'axe du tuyau) et suppose l'homogénéité de la température dans la section du tube. Ceci est caractéristique du régime d'écoulement turbulent.

Lors d'un écoulement turbulent (ce qui est le cas pour des débits importants), l'eau est brassée et donc la température est plus homogène. Ainsi, la différence de température entre l'eau à la périphérie du tuyau et la route au niveau de la surface de contact est plus importante. Cela entraîne alors des échanges plus rapides donc plus efficaces.

Dans le régime d'écoulement laminaire, pour les débits les plus faibles, les filets d'eau glissent les uns sur les autres et il n'y a pas d'échange entre le centre et les filets extérieurs du tuyau. Les hypothèses de calcul du modèle ne sont pas compatibles avec ce régime. Au centre du tuyau, l'eau reste froide tandis qu'en périphérie, l'eau est plus chaude. Donc les échanges thermiques avec le bitume sont moins importants : si l'eau est plus chaude, la différence de température entre l'eau et la route est plus faible donc les échanges thermiques plus lents.



Cette interprétation permet d'expliquer que pour les faibles débits, plus le débit est important, plus le système est efficace.

Par ailleurs, on remarque une baisse de k dans les très forts débits. Ceci peut s'expliquer par le fait que le modèle théorique utilise une route à température constante. En effet, cela supposerait une capacité thermique de la route infinie. Or il est évident qu'avec de forts débits, la température du bitume sur le pourtour des tuyaux va baisser, ce qui entraîne une baisse de la différence de température entre la route et l'eau des tuyaux donc des échanges thermiques moins rapides.

Cette expérience, en plus de nous renseigner sur la nature de k , nous a montré les principales limites de notre modèle.

Elle a également confirmé qu'il existe un débit pour lequel l'efficacité du système est optimale, ce qui est essentiel dans notre projet d'optimisation.

4) Puissance

Industriellement, seule la puissance récupérée par l'eau importe (Cependant en circuit ouvert, il y aura d'autres facteurs comme la quantité d'eau disponible et de température d'arrivée). C'est pourquoi nous avons recherché l'existence d'un optimum.

a) Etablissement des équations :

Observons ce qui se passe durant une durée dt .

Une masse d'eau dm définie par $dm = D_m \cdot dt$ sort de la route à une température T_f

En même temps, une même masse dm y rentre à une température T_i

L'énergie thermique reçue par l'eau, entre l'entrée et la sortie de la route, est donc

$$dE_{th} = c_{eau} \cdot dm \cdot T_f - c_{eau} \cdot dm \cdot T_0$$

$$\text{Soit } dE_{th} = c_{eau} \cdot dm \cdot \Delta T$$

La puissance thermique récupérée est donc $P_{th} = \frac{c_{eau} \cdot dm \cdot \Delta T}{dt}$

$$\text{Soit } P_{th} = \frac{dm}{dt} \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$$

Donc
$$P_{th} = D_m \cdot c_{eau} \cdot \Delta T$$

A ce point, on peut avoir accès expérimentalement à la puissance récupérée par notre route.

On peut également remplacer ΔT par sa valeur établie théoriquement au chapitre II/4). On obtient alors

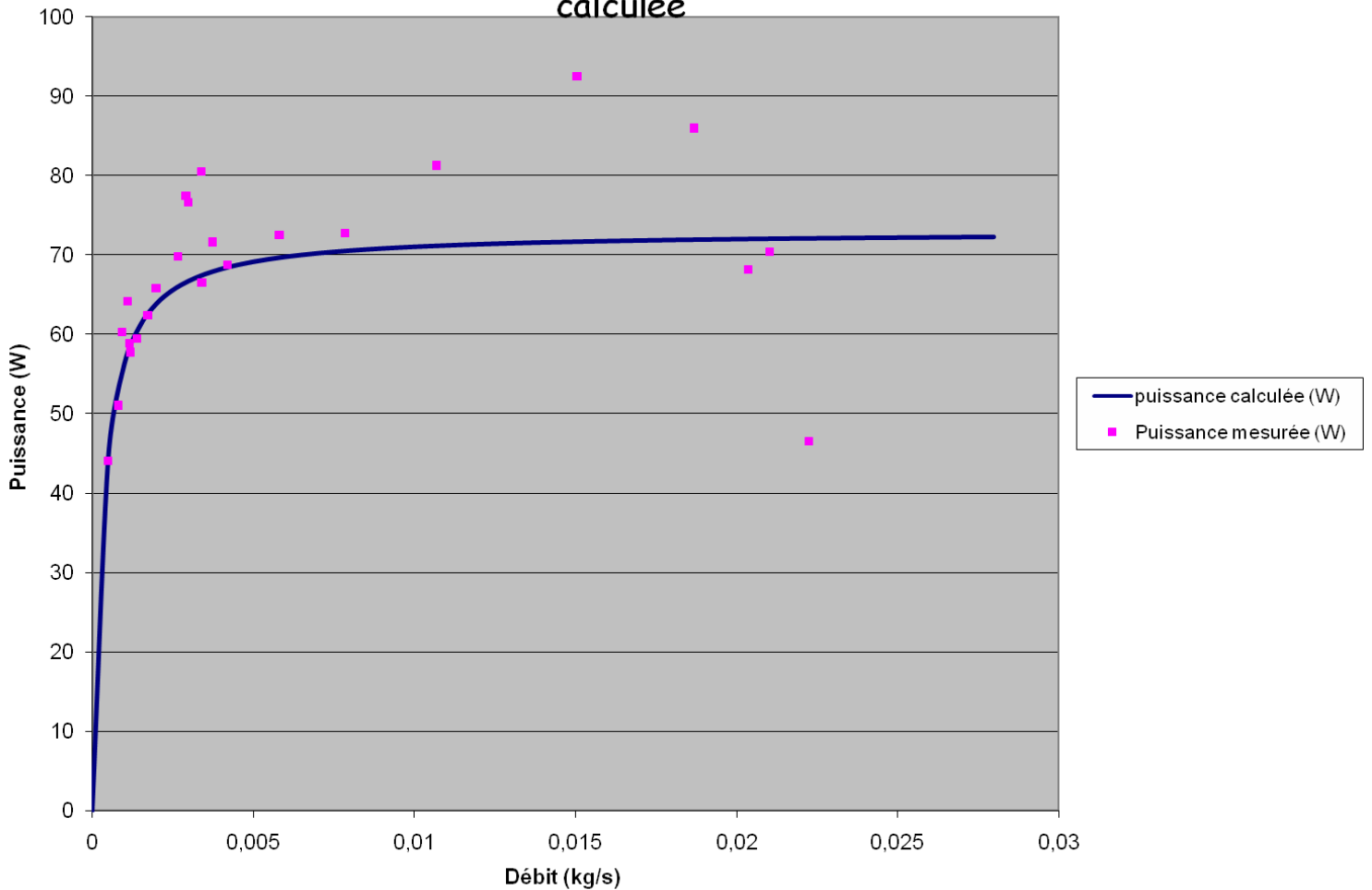
$$P_{th} = D_m \cdot c_{eau} \cdot (T_0 - T_r) \left(\exp\left(\frac{-kl}{D_m c_{eau}}\right) - 1 \right)$$

Dans cette équation, on peut remplacer $(T_0 - T_r)$ par sa valeur trouvée expérimentalement (en réalité, $(T_0 - T_r)$ n'est pas tout à fait constant mais

l'objectif de cette étape est de visualiser l'influence théorique du débit sur la récupération d'énergie. Nous pouvons utiliser la valeur obtenue lors de la modélisation de $\Delta T = f(D_m)$. De même pour $\frac{-kl}{c_{eau}}$ qui lui est réellement constant)

b) Tracé des courbes :

Comparaison de la Puissance thermique reçue par l'eau mesurée et calculée



Nous observons qu'il existe un débit optimum.
 Industriellement, cela permet au moins pour les circuits fermés d'avoir un réglage de pompe optimal.

Conclusion

Suite à nos manipulations, nous avons réussi à mettre en place un système pouvant élever la température de l'eau de façon remarquable. Nous avons proposé un modèle qui permet de calculer la température de sortie à partir d'un certain nombre de paramètres avec une assez bonne précision.

Notre étude a montré qu'utiliser des tuyaux métalliques permettrait d'avoir un coefficient d'échange thermique plus important qu'avec des tuyaux en plastique, malgré leur coût élevé.

L'étude de l'influence du débit sur ce coefficient nous a d'ailleurs permis de conclure qu'un débit optimisant la récupération d'énergie thermique existe.

Ces paramètres peuvent donc être pris en compte lors de construction de routes solaires.

La route solaire est un moyen ingénieux et prometteur dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, l'énergie utilisée est tout à fait gratuite une fois l'investissement initial effectué. De plus, la route solaire ne nécessite que l'utilisation d'un dispositif de stockage et de simples tuyaux placés directement sous n'importe quelle route ou bien n'importe quel parking. Ainsi, le paysage n'est pas défiguré.

La route solaire a donc de belles années devant elle. Alors en route pour la route solaire !