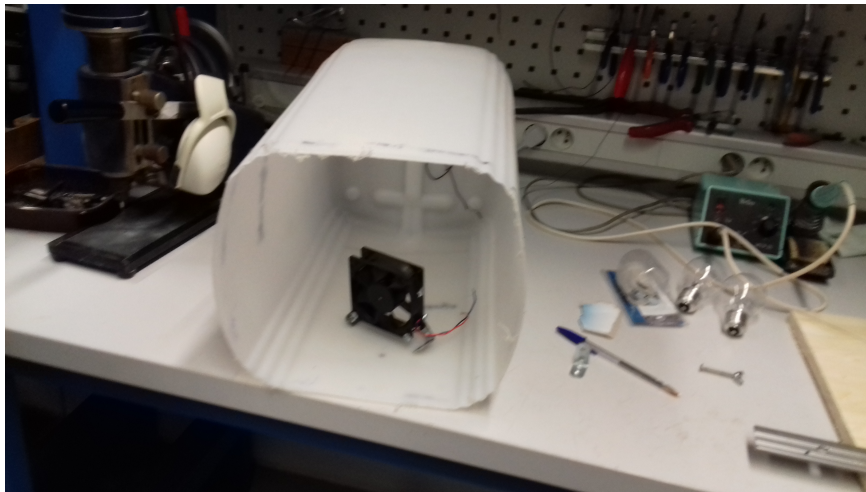


---

# Protection thermique d'un fluide par une couche de balles

---



*Auteurs :*

Yann BACHELOT  
Morgane COCATRIX  
Quentin GELLÉ  
Chenxi LU  
Thomas ROUER  
Zeina TAFNOUT

*Enseignant :*

Didier VUILLAMY  
Didier.Vuillamy@ariane.group  
Didier.Vuillamy@insa-rouen.fr



**Date de remise du rapport :** 18/06/2018

**Référence du projet :** STPI/P6/2018 – # 20

**Intitulé du projet :** Protection thermique d'un fluide par une couche de balles

**Type de projet :** *expérimental, modélisation, bibliographie*

**Objectifs du projet :**

Dans ce projet, nous allons nous demander si une couche de petites balles à la surface d'un liquide peut limiter les échanges thermiques. Pour cela, nous allons modéliser ce procédé à travers des expériences. Les expériences nous permettront de tester la viabilité et l'efficacité des couches de balles pour la réduction des transferts thermiques gaz-liquide.

**Mots-clefs du projet :** *(Transfert thermique, balles, isolant, expériences)*

# Table des matières

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Présentation du problème et organisation du travail</b>                 | <b>3</b>  |
| 1.1      | Démarche suivie . . . . .  | 4         |
| 1.2      | Résumé des séances . . . . .   | 4         |
| 1.3      | Répartition du travail . . . . .   | 5         |
| <b>2</b> | <b>Élaboration et conception du montage</b>                                | <b>7</b>  |
| 2.1      | Système de chauffage . . . . .   | 8         |
| 2.1.1    | Récapitulatif des systèmes de chauffage envisagés . . . . .                | 9         |
| 2.2      | Volume de liquide . . . . .  | 10        |
| 2.3      | Relevé des mesures . . . . .   | 10        |
| 2.4      | Isolation thermique . . . . .  | 10        |
| 2.4.1    | Du système avec l'extérieur . . . . .                                      | 10        |
| 2.4.2    | Isolation liquide-gaz . . . . .  | 11        |
| 2.5      | Réalisation du montage . . . . .   | 11        |
| <b>3</b> | <b>Expérimentation et analyse des résultats</b>                            | <b>14</b> |
| 3.1      | Observations et Interprétations . . . . .                                  | 14        |
| 3.2      | Remarques . . . . .  | 18        |
| <b>4</b> | <b>Réalisation du modèle et Examen des échanges thermiques liquide-gaz</b> | <b>19</b> |
| 4.1      | Réalisation d'un modèle thermique . . . . .                                | 19        |
|          | <b>Conclusion et perspectives</b>  | <b>22</b> |
|          | <b>Bibliographie</b>   | <b>23</b> |
| <b>A</b> | <b>Documentation technique</b>   | <b>24</b> |
| <b>B</b> | <b>Résultats expérimentaux</b>   | <b>26</b> |



# Chapitre 1

## Présentation du problème et organisation du travail

Notre projet est issu d'un sujet concret en aéronautique vis-à-vis des réservoirs des moteurs de fusées, et il porte plus particulièrement sur les réservoirs LOX, qui sont des réservoirs contenant de l'oxygène liquide. Pendant la phase d'utilisation, la pression doit rester constante dans ces réservoirs. Ainsi un gaz est injecté pour assurer la stabilité de la pression. Actuellement, le gaz injecté est de l'hélium.

Cependant cette méthode nécessite d'embarquer un fluide supplémentaire dans un réservoir annexe et de le maintenir à l'état liquide. Cela complexifie le lanceur et représente un coût supplémentaire non négligeable.

Pour diminuer les coûts, à la place d'injecter de l'hélium, du dioxygène gazeux pourrait être utilisé.

Cependant un phénomène de condensation apparaît entre la partie gazeuse à 300K et la partie liquide à 91K. Le liquide se réchauffe au contact du gaz de pressurisation, créant une couche de dioxygène liquide dit "chaud" à environ 93K.

Le problème étant que la pompe ne fonctionne pas correctement avec ce liquide chaud, une partie du liquide embarqué est donc inutilisable.

Dès lors, des recherches ont été menées pour réduire les transferts thermiques entre la partie gazeuse et liquide. Des études sur le sujet ont été réalisées et des brevets ont été déposés sur la possibilité de rajouter des obstacles entre les deux phases afin de réduire ces transferts thermiques. Notre projet consiste à reproduire un modèle à notre échelle pour simuler les échanges thermiques dans le réservoir, afin de déterminer si la protection d'un fluide par couches de balles est réellement envisageable.

## 1.1 Démarche suivie

| Objectifs  | Contraintes   |
|--|---|
| Montage représentatif<br>Valider ou invalider la solution proposée | Finance<br>Temps<br>Mobilité (contrainte faible)<br>Montage réutilisable et adaptable<br>Dangerosité (faible) |

### Méthodologie

1. Examen "grossier" des échanges entre un gaz et une surface (ici liquide).
2. Trouver des exemples de réalisation où les échanges thermiques sont réduits par un isolant et regarder les brevets existants à ce sujet.
3. Conception d'un montage expérimental.
4. Étude de cas : avec/sans balles ; avec 1,2,3 couches (effet du nombre de couches) ; changer le matériau (modifier la conductivité) ; taille et forme ; avec/sans ventilation.
5. Poser le modèle lié à notre montage.
6. Conclusion sur l'efficacité attendue du système.

## 1.2 Résumé des séances

**09/02** : Découverte du projet. Présentation du fonctionnement d'un réservoir de fusée (système réel)

**16/02** : Recherche sur les propriétés des matériaux (conductivité, prix, moyen d'obtention, dimensions). Examen "grossier" des échanges thermiques se déroulant dans le système réel. Réflexion sur l'isolation du montage expérimental.

**23/02** : Réflexion sur les dimensions du montage et les critères auxquels notre modèle devra se conformer.

**16/03** : Réflexion sur les systèmes de chauffage utilisables. Fin de l'élaboration du modèle expérimental qui nous servira pour le montage.

**17/03** : Construction de l'enveloppe d'isolation en polyuréthane.

**23/03** : Réflexion sur le positionnement des capteurs de température. Caractérisation du modèle. Fixation du système de chauffage et premier test sur la température.

**30/03** : Fixation d'un ventilateur dans le montage, changement de la source de chauffage pour deux lampes moins puissantes, nouveaux perçages du couvercle.

**13/04** : Perçage du réservoir pour positionner les thermomètres et sondes et rajout d'une isolation en polyuréthane sur le couvercle en bois.

**20/04** : Début des expérimentations.

**18/05** : Expérimentations.

**25/05** : Réflexion sur le modèle thermique et la possibilité de perte d'énergie avec l'extérieur.

**01/06** : Vérification de la puissance délivrée par les ampoules, calcul des capacités thermiques (quantification des pertes dues aux conteneurs en polyuréthane). Vérification de si les balles pivotent dans l'eau à cause de la ventilation ou non.

**07/06** : Expérimentations.

**08/06** : Analyse des résultats expérimentaux.

**14/06** : Expérimentations.

**15/06** : Finalisation du projet.

### **1.3 Répartition du travail**

Pour répartir équitablement le travail, nous avons choisi de travailler dans un premier temps tous ensemble pendant les séances dédiées au projet P6. Au cours du temps, nous nous sommes aperçu que travailler uniquement lors de ces séances n'allait pas nous permettre de réaliser l'ensemble du projet dans les temps. Nous avons donc commencé à travailler, toujours ensemble, à d'autres moments tel que le jeudi après-midi. Ces séances nous ont permis de finaliser notamment les expériences, très coûteuses en temps. Nous avons donc favoriser le travail de groupe plutôt que le travail individuel.

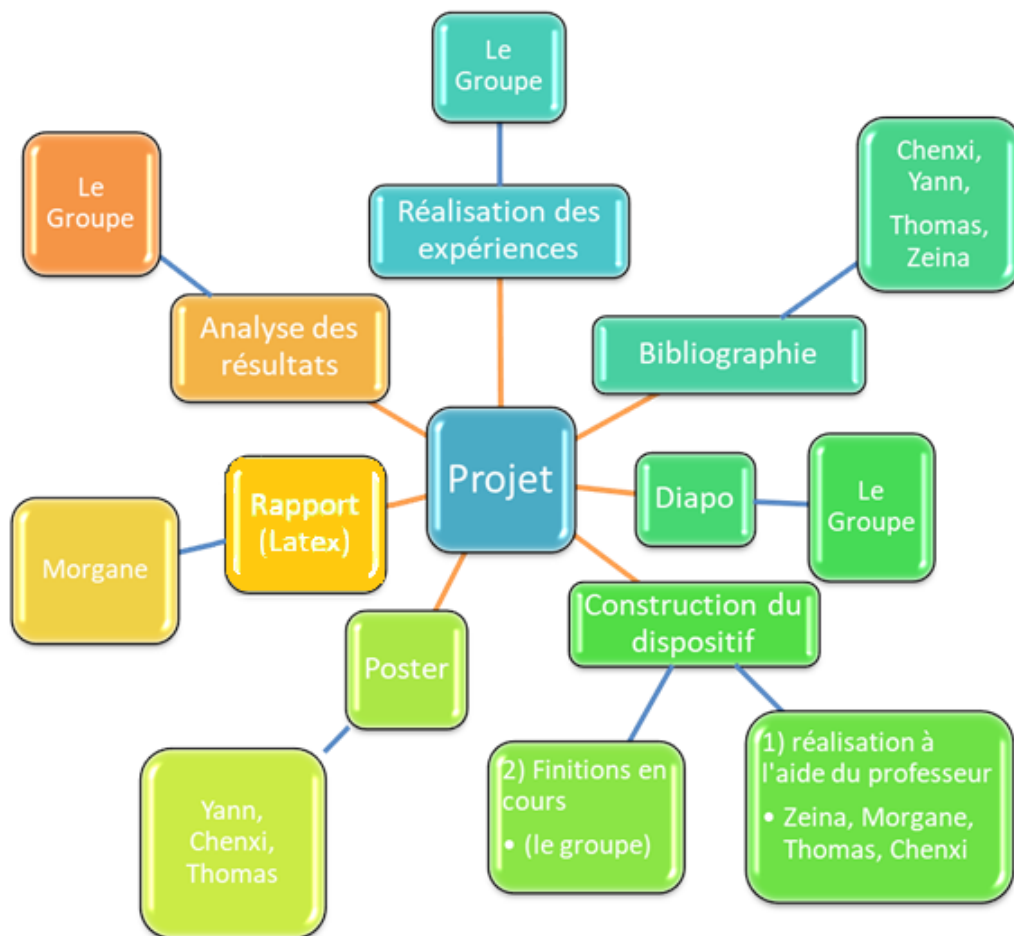


FIGURE 1.1 – Organigramme des tâches réalisées

## Chapitre 2

# Élaboration et conception du montage

Nous avons choisi de travailler à pression constante pour des raisons pratiques. Pour modéliser le dioxygène gazeux, nous allons prendre l'air ambiant et pour le dioxygène liquide, de l'eau.

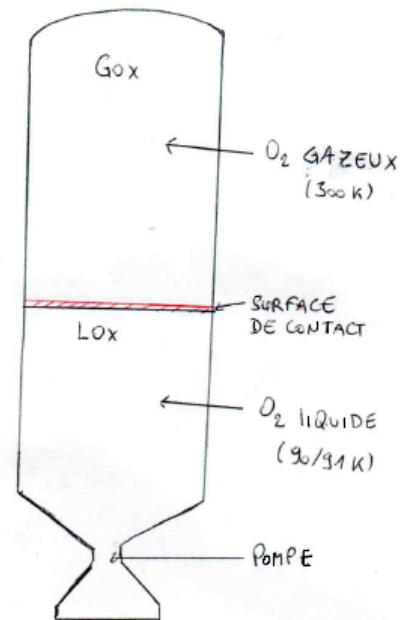


FIGURE 2.2 – Schéma d'un réservoir

FIGURE 2.1 – Vue en coupe de la Fusée Ariane 5

## 2.1 Système de chauffage

Dans notre système réel, il y a un décalage d'environ 200K entre le liquide (91K) et le gaz injecté (300K). Nous allons donc chauffer l'air pour reproduire cet écart thermique.

Nous avons d'abord envisagé plusieurs systèmes de chauffage :

- sèche-cheveux ou décapeur thermique
- ampoule électrique
- résistance électrique

**Sèche-cheveux ou décapeur thermique :** Le sèche-cheveux ou décapeur thermique permet de créer un échange continu et un transfert thermique par convection. Cependant, si nous supposons que le système est étanche, l'air injecté doit provenir de l'intérieur du système.

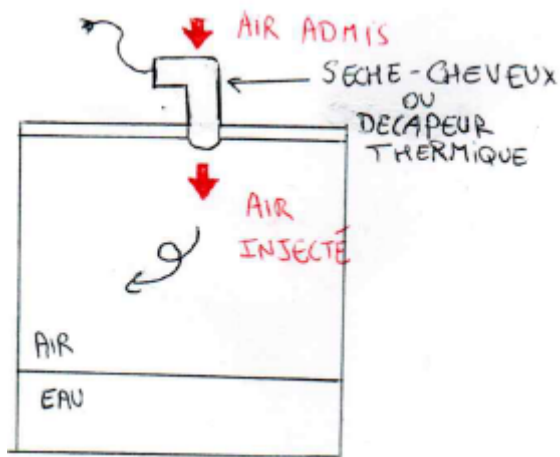


FIGURE 2.3 – Modèle 1

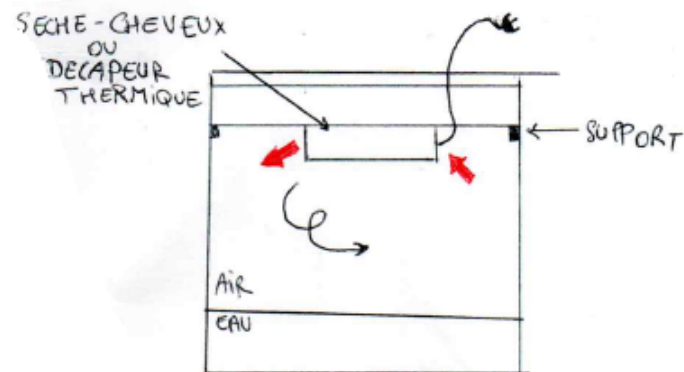


FIGURE 2.4 – Modèle 2

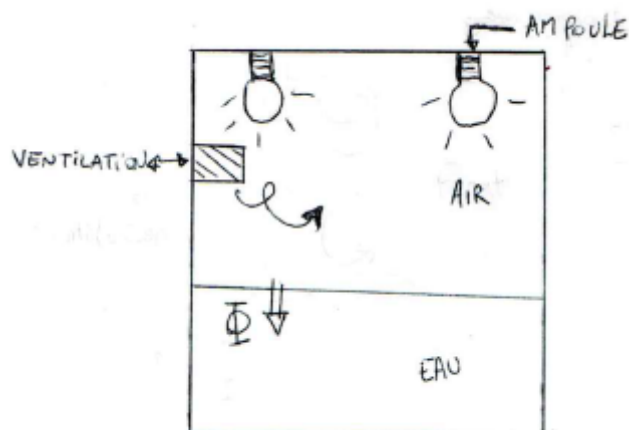
Le 2ème modèle proposé permettrait de remédier à ce problème, en accrochant directement le sèche-cheveux ou décapeur thermique à l'intérieur. Pour éviter une surchauffe du système, il serait possible d'utiliser un minuteur. Le fonctionnement du système de chauffage serait donc discontinu, ce qui peut poser problème pour quantifier l'énergie apportée au système. De plus, il y aurait un fort effet de convection mal connu, qui nuirait aux expériences.

Le modèle proposé avec la décapeur thermique est identique à celui du sèche-cheveux car les systèmes de chauffage sont similaires, hormis que le décapeur thermique est plus puissant. Cependant, la température de sortie est trop élevée. Si les parois du contenant sont en plastique, elles risqueraient de fondre. Pour

des raisons techniques et de sécurité, nous avons décidé d'éliminer ce système de chauffage.

**Ampoules électriques :** Les lampes ont une faible convection, mais si nous rajoutons un système de ventilation nous pouvons remédier à cela.

Modèle 3 :



**Résistance thermique :** Lorsque les résistances thermiques sont rouges, elles émettent un rayonnement infra-rouge qui chauffe ce qui reçoit le rayonnement, donc principalement la paroi de notre montage. Ce qui n'est pas le but recherché.

### 2.1.1 Récapitulatif des systèmes de chauffage envisagés

| Systèmes de chauffage | Propriétés  | Inconvénients        |
|-----------------------|---|----------------------|
| Sèche-cheveux         | Convection  | Bruyant              |
| Décapeur thermique    | Ventilation   | Risque de surchauffe |
| Lampes                | Montage facile<br>Rayonnement<br>Fonctionnement en continu<br>Puissance modulable | Support résistant    |
| Résistance thermique  | Rayonnement   | Chauffe la paroi     |

Nous avons tout d'abord opté pour une lampe chauffante à infrarouge (150 Watts). Cependant, nous nous sommes rendus compte que la lampe à infra rouge ne répondait pas à nos besoins : puissance pas suffisamment modulable, trop directif et taille trop encombrante (trop proche du liquide et de la couche de balle). Nous avons donc par la suite modifié le montage afin de pouvoir utiliser 2 lampes de 70 Watts simultanément.

## 2.2 Volume de liquide

Dans le réservoir, le volume de  $O_2$  varie au cours du temps. L' $O_2$  liquide occupe un volume initial compris entre 90 et 95% du réservoir. Cependant, afin de pouvoir qualifier les échanges thermiques au cours de notre expérience, nous avons besoin que le volume d'eau reste constant.

Le volume d'eau influence la durée de chaque expérimentation. Comme nous avons besoin de pouvoir faire plusieurs expériences par séances, il fallait que le volume d'eau dans le système soit suffisamment petit pour pouvoir observer rapidement une variation de température. Mais il fallait suffisamment d'eau pour que les balles flottent sur l'eau sans toucher le fond du conteneur. Cependant au cours des expérimentations, nous nous sommes rendus compte que si nous mettions trop peu d'eau, c'était les parois qui absorbaient la majorité de l'énergie fournie au système.

## 2.3 Relevé des mesures

Il nous fallait relever les températures de l'eau et de l'air au cours de l'expérience pour pouvoir ensuite déterminer le modèle thermique.

Dans le système réel, il y a une stratification de la température du gaz en fonction de sa position dans le réservoir : plus le gaz est proche de liquide, plus sa température baisse. Nous avons donc choisi de mettre plusieurs thermomètres à différentes hauteurs dans notre montage afin de voir si nous observions le même phénomène dans notre système.

Comme c'était le cas, nous avons fixé un ventilateur dans le système afin d'éviter la stratification en améliorant les transferts thermiques convectifs.

## 2.4 Isolation thermique

### 2.4.1 Du système avec l'extérieur

| Matière        | Conductivité thermique                                 | Remarques                           |
|----------------|--|-------------------------------------|
| Laine de roche | $\lambda : 0,033-0,040 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | Gants et des lunettes de protection |
| Laine de verre | $\lambda : 0,033-0,045 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | Gants et des lunettes de protection |
| Fibre de verre | $\lambda : 0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$        | A disposition                       |
| Polystyrène    | $\lambda : 0,036 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$       |                                     |
| Polyuréthane   | $\lambda : 0,023 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$       |                                     |
| Bois           | $\lambda : 0,12-0,17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$   |                                     |

Nous voulions réduire au maximum les échanges thermiques avec l'extérieur, afin d'avoir un modèle qui se rapproche le plus possible d'un montage



adiabatique. Pour les matériaux utilisés, nous avons pris prioritairement ceux que M. Vuillamy nous mettait à disposition.

De plus, lors des relevés de température, il fallait le plus possible éviter d'avoir à ouvrir le montage. Pour cela, nous avons percé la paroi du montage pour que les sondes soient à l'intérieur, afin de limiter la présence ponts thermiques.

### **2.4.2 Isolation liquide-gaz**

Pour le choix de l'isolant, nous avons suivi les contraintes et recommandations du brevet d'Ariane Group [3]. Pourquoi avoir choisi des balles et pas d'autres surfaces comme un tapis flottant à la surface du liquide ? Il faut prendre en compte la structure du réservoir. En réalité un tas d'éléments sont présents dedans (sonde, répartiteur, grille anti vortex) et il ne faut pas que l'isolant se bloque sur ces éléments lorsque le niveau baisse. Ceci exclut donc de choisir un isolant d'un seul tenant et indéformable. Le choix d'une couche de balles semble donc être un solution parfaitement envisageable pour pallier à ce problème.

Le brevet déposé sur ce sujet nous apprend que 3 couches d'objets devraient être le cas idéal. De plus, les objets ne sont pas nécessairement des boules sphériques mais peuvent être aussi des éléments hexagonaux ou autres formes géométriques.

## **2.5 Réalisation du montage**

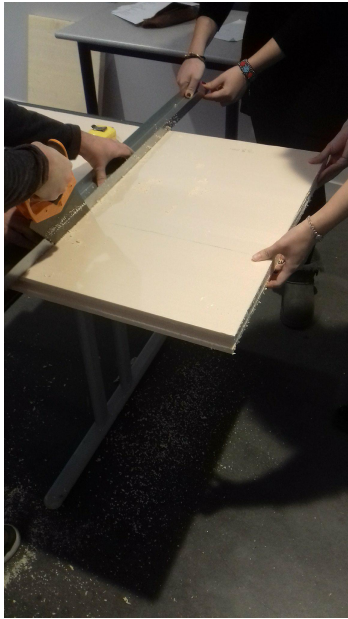


FIGURE 2.5 – Découpage du polyuréthane...

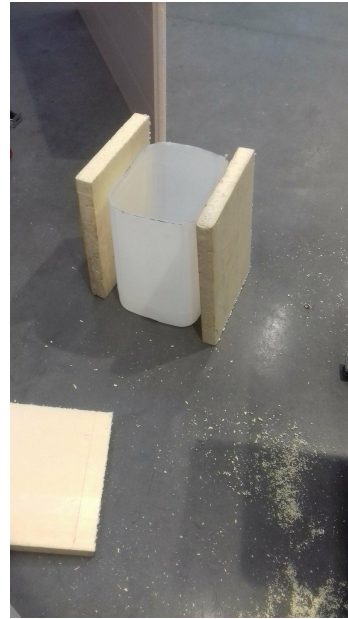


FIGURE 2.6 – ... à la taille des bacs en plastique



FIGURE 2.7 – Assemblage des plaques avec de la colle



FIGURE 2.8 – Maintien à l'aide de sangles le temps que la colle sèche



FIGURE 2.9 – Maintiens à l'aide du support à roulettes afin de coller la base

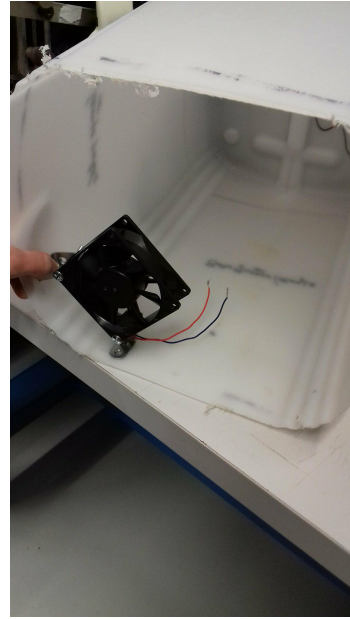


FIGURE 2.10 – Fixation du ventilateur dans le conteneur en plastique

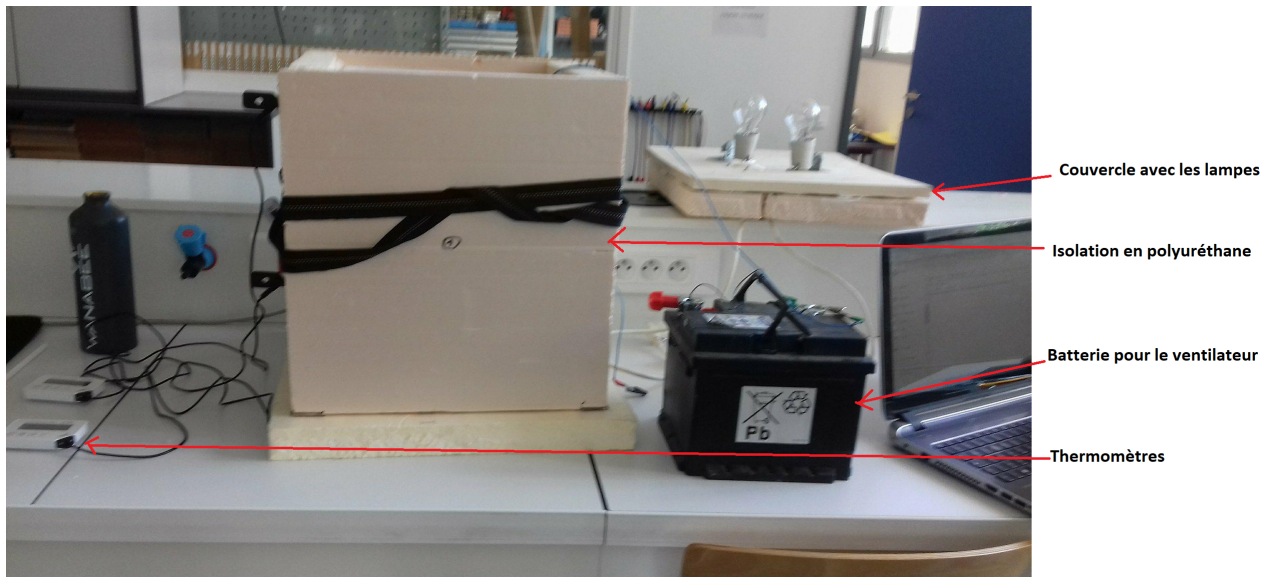


FIGURE 2.11 – Montage final

## Chapitre 3

# Expérimentation et analyse des résultats

Pour toutes les expériences, nous avons positionné trois sondes de température. La première est située en haut du montage, proche des lampes. La seconde est positionnée à mi-hauteur, de manière à être au-dessus de l'eau quand il y en a et au-dessus de la couche de balles lorsque celle-ci est présente. Enfin, la troisième est plongée dans l'eau, puisque la température de celle-ci est l'information qui nous intéresse le plus dans le cadre de notre travail.

De plus, les expériences ont été réalisées pendant 30 minutes par contraintes temporelles et organisationnelles. En effet, il nous fallait parfois enchaîner plusieurs expériences avec des pauses pour permettre au système de refroidir. Nous ne pouvions donc pas les effectuer durant une période de temps trop grande. Nous devons aussi relever les températures toutes les deux minutes pendant les expériences ce qui nécessitait une présence pendant l'intégralité de celles-ci.

Lorsqu'une des trois températures (celle relevée par la sonde d'en haut qui était toujours la plus chaude) se rapprochait des 100°C avant la 30 ème minute, nous arrêtions l'expérience pour ne pas atteindre des températures trop élevées.

Tous les relevés de température des expériences sont disponibles en annexes.

### 3.1 Observations et Interprétations

**Expérience 0 : Vérification de l'isolation des surfaces extérieures** L'expérience 0 est un premier test sur l'efficacité de l'isolation thermique du montage. Nous avons relevé la température extérieure de toutes les surfaces du montage. Le couvercle n'était alors composé que de bois alors que l'isolation des parois latérales était en polyuréthane. Une différence d'environ 9°C est observable entre le couvercle et les autres parois au bout de 30 minutes de fonctionnement et d'environ 17°C en 1h03 de fonctionnement.

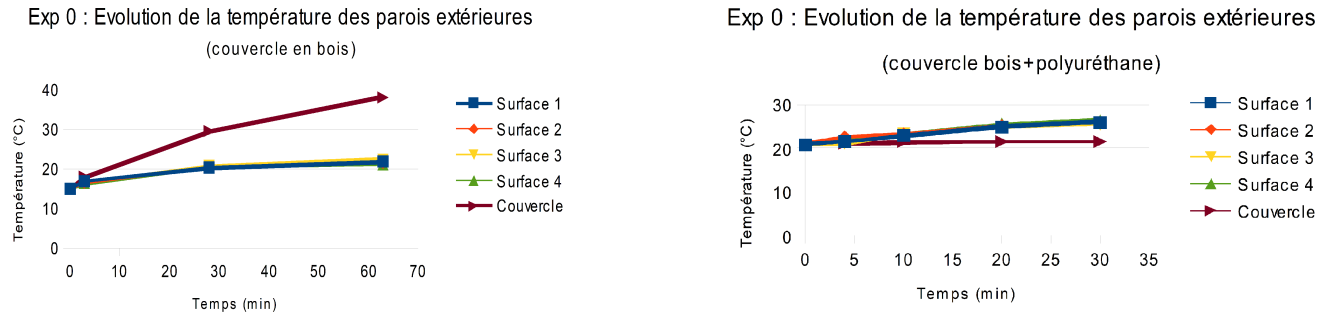


FIGURE 3.1 – Graphique de l'expérience 0

Comme la température du couvercle est plus élevée que pour les autres parois, nous pouvons en déduire qu'il y a une perte thermique par le couvercle. Pour y remédier nous avons rajouté une isolation en polyuréthane supplémentaire sur le couvercle en bois.

Après la modification du système, les nouveaux relevés de température des surfaces extérieures nous montrent que les pertes au niveau du couvercle sont maintenant limitées.

**Expérience 1, 2 et 3** Pour ces deux expériences, nous avons mis 2 litres d'eau et la ventilation. Le seul paramètre qui a été modifié est la présence d'une couche de balles de ping-pong (expérience 2) ou non (expérience 1). L'expérience 3 reprenait les mêmes paramètres que l'expérience 1, hormis que le ventilateur était éteint.

**Avec la présence d'une couche de balles, la température de l'eau n'augmente que de 4°C contre 9,1°C sans.** La seule présence d'une couche de balles a permis de diminuer de moitié les transferts thermiques avec l'eau. La température finale de l'air est plus élevée d'environ 10°C pour le test 2 comparée au test 1.

Grâce aux expériences 1 et 3, nous pouvons remarquer que **sans la présence du ventilateur, une stratification importante est présente dans l'air, avec une accumulation de la chaleur en haut du système, ce qui entraîne très peu de transferts thermiques avec l'eau.**

**Expérience 4** L'expérience 4 reprend les paramètres de l'expérience 3 (sans couche de balles et sans ventilation) sauf que nous n'avons pas mis d'eau. Nous avons donc relevé les températures des deux premières sondes seulement puisque la 3ème est habituellement dans l'eau.

Le but de cette expérience était de voir s'il était possible de quantifier les pertes d'énergie dues à l'absorption par le conteneur en plastique.

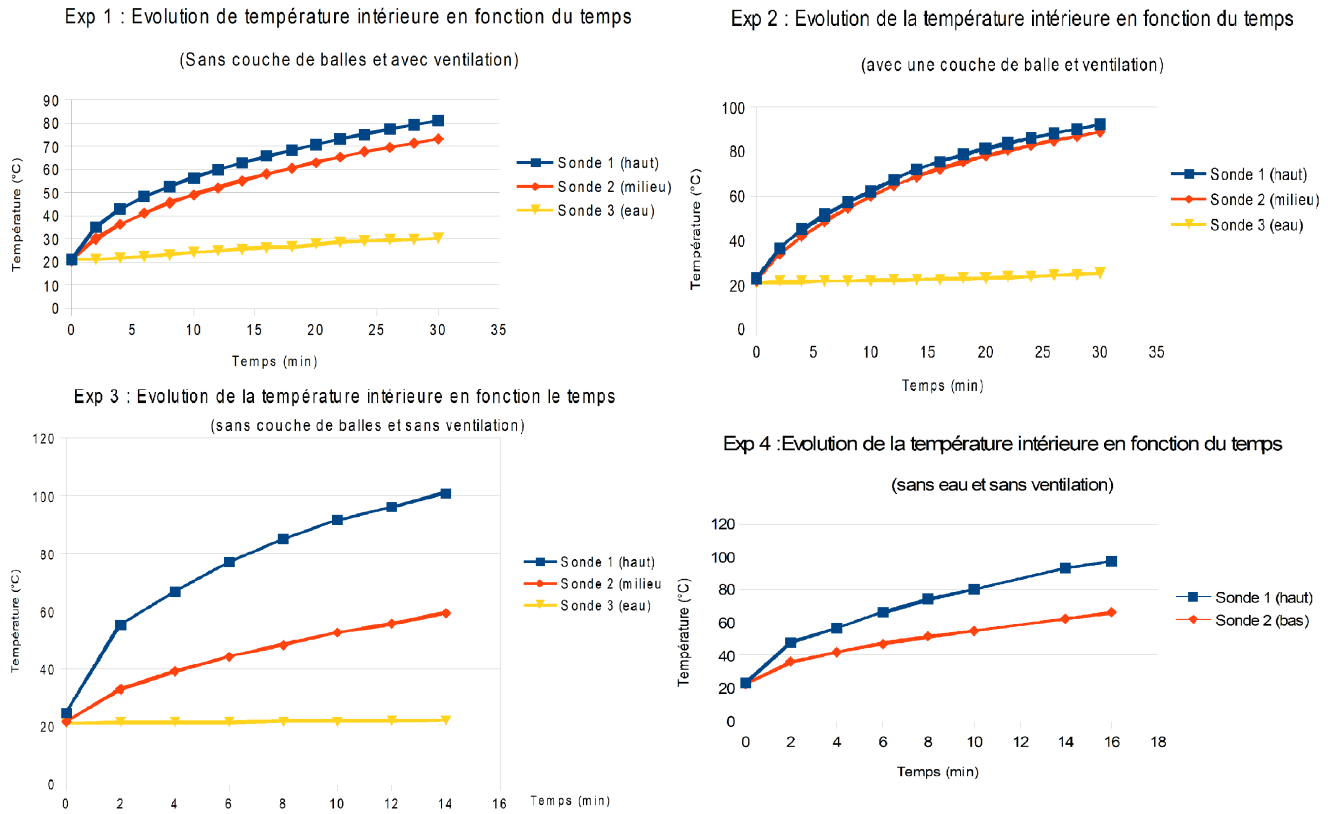


FIGURE 3.2 – Graphique de l’expérience 1, 2, 3 et 4

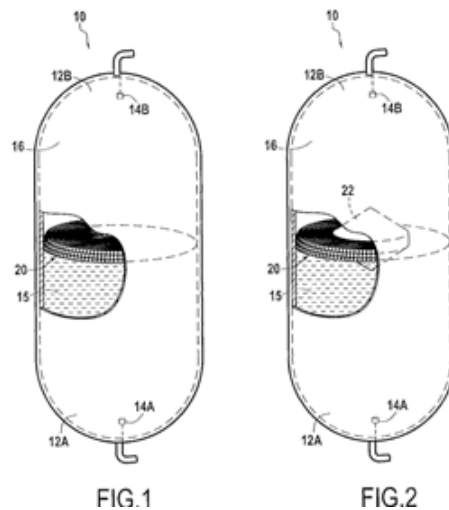


FIGURE 3.3 – Schéma d’une isolation avec plusieurs couches de balles et avec ou non un flotteur central, *extrait de [3]*

**Expérience 5, 6 et 7** Dans ces expériences, nous avons testé une quantité d’eau plus importante (4L) que précédemment (2L). Le but était d’établir le modèle le

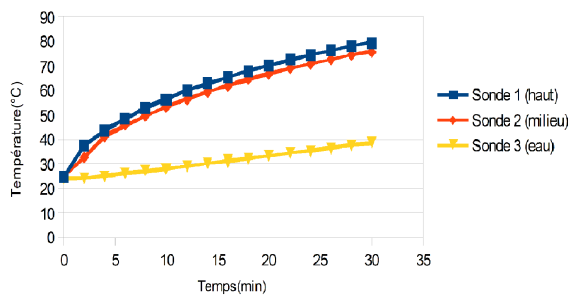


plus efficace pour limiter l'élévation de la température de l'eau. Ces trois expériences ont été réalisées avec ventilation. Avec l'expérience 6, nous avons modifié la protection thermique en rajoutant un flotteur central sphérique avec la couche de balles.

Nous avons tracé l'évolution de la température en fonction du temps, et obtenu les graphiques suivants :

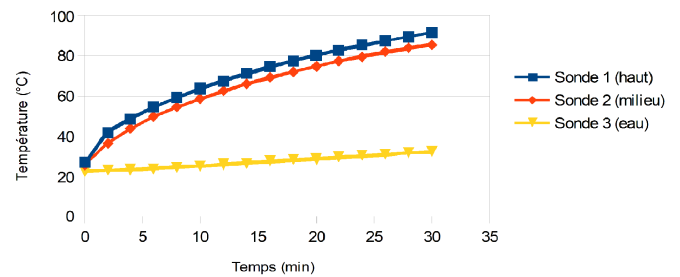
Exp 5 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(sans balles et avec ventilation)



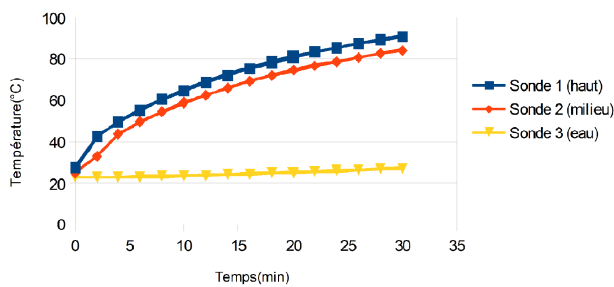
Exp 6 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(avec une couche de balles, flotteur central et ventilation)



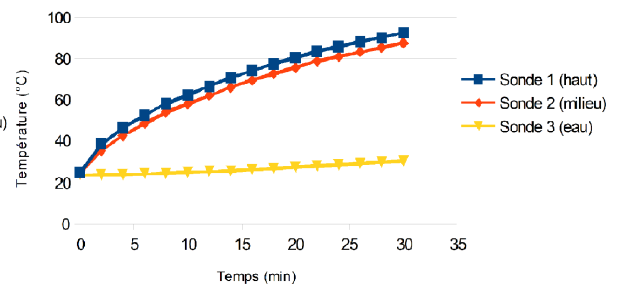
Exp 7 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(avec une couche de balles et ventilation)



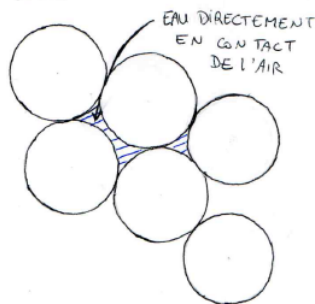
Exp 8 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(avec une couche de balles, flotteur central et ventilation)



**Expérience 6, 7 et 8** Contrairement aux attentes, nous remarquons qu'avec un flotteur central et une couche de balles (expérience 6), la protection thermique est moins efficace qu'avec seulement une couche de balles (expérience 7) (écart de 5,3°C). Le flotteur central utilisé était une boule pleine en polystyrène de rayon 4cm. Le flotteur central n'est pas lesté, ce qui laisse une zone de contact de l'eau avec l'air assez importante.

VUE DU DESSUS



Nous avons donc refait cette expérience dans l'expérience 8, mais avec une demi-sphère en flotteur central, afin d'avoir une plus grande surface de contact avec l'eau.

Comme attendu, la protection thermique pour l'expérience 8 est plus efficace que pour l'expérience 6 (écart de  $2,9^{\circ}\text{C}$ ), comme la zone de contact direct entre l'eau et l'air est réduite.

**Expérience 9** L'expérience 9 a été réalisée sur une durée plus grande. Pour les courbes représentant la variation de la température de l'air, une asymptote est visible. En effet, au bout d'un certain temps la température de l'air n'augmente plus et se stabilise (autour des  $105^{\circ}\text{C}$ ), le système se retrouve donc dans un état quasi-stationnaire où seule la température de l'eau continue d'évoluer de façon linéaire.

## 3.2 Remarques

Lors de l'expérience 9, nous avons mesuré la température de surface et celle au fond du conteneur de l'eau. Il y avait une différence de  $6^{\circ}\text{C}$ . Cet écart montre qu'il y a également une stratification de la température dans l'eau importante. **Pour avoir une température homogène, il aurait fallu mettre un agitateur dans le système.**

La sonde 3 qui était dans l'eau, n'a pas dû être placée à la même profondeur pour toutes les expériences. Les températures initiales et finales ne sont donc pas forcément significatives à comparer d'une expérience à une autre. Il vaut mieux se concentrer sur les variations de températures entre le début et la fin de chaque expérience.



## Chapitre 4

# Réalisation du modèle et Examen des échanges thermiques liquide-gaz

### 4.1 Réalisation d'un modèle thermique

Flux global reçu par l'eau :

$$\Phi = m_{eau} \times C_{p_{eau}} \times \frac{dT_{eau}}{dt} \quad (4.1)$$

avec  $m_{eau} = 4kg$ ;  $C_{p_{eau}} = 4180J.kg^{-1}.K^{-1}$

Grâce à l'expérience 5, nous pouvons déterminer la variation de température de l'eau en fonction du temps  $\frac{dT_{eau}}{dt}$ . Sur 30 minutes de fonctionnement, nous obtenons :  $\frac{dT_{eau}}{dt} = \frac{38,6-24}{30 \times 60} K.s^{-1}$ .

Nous obtenons donc un flux global  $\Phi$  entre l'air et l'eau de 135,6 W. Pour l'expérience, nous avons utilisé 2 lampes de 70 Watts, soit une énergie totale fournie au système de 140 Watts. Il y aurait donc une perte de 4,4 W.

L'utilisation d'un ventilateur induit des flux thermiques de type convectifs entre l'air et l'eau.

$$\Phi = h \times S_{echange} \times (T_{air} - T_{eau}) \quad (4.2)$$

avec  $h$  : le coefficient d'échange en  $W.m^{-2}.K^{-1}$

Le coefficient d'échange  $h$  reste le même d'une expérience à une autre. Il s'agit d'une fonction qui dépend de la vitesse  $\nu$ , de la conductivité  $\mu$  et de la viscosité  $\lambda$  de l'air ainsi que du diamètre  $d$  de la couche limite.

$$h = f(\nu_{air}, \mu_{air}, \lambda_{air}, d)$$

Comparer l'expérience 5 avec l'expérience 7 nous permet de vérifier l'effet d'une couche de balles. Le seul paramètre modifié entre ces deux expériences est la présence ou non d'une couche de balles. Sur 30 minutes de fonctionnement, l'élévation de température de l'eau a été divisée par deux lors de la présence d'une couche de balles. Nous pouvons en déduire que les balles possèdent un rôle d'isolant.

Avec la présence d'une couche de balle, le transfert thermique s'effectue d'abord de l'air vers l'isolant puis de l'isolant vers l'eau. Comme les balles sont en régime permanent, le flux des balles est transmis intégralement à l'eau. A travers l'isolant, il s'agit de flux de conduction.  $T_{S1}$  est la température moyenne de surface de la couche de balles et  $T_{S2}$  est la température moyenne de la paroi des balles dans l'eau.

$$\Phi = h \times S_{\text{echange}} \times (T_{\text{air}} - T_{S1})$$

Habituellement, pour le flux de conduction :

$$\Phi_{\text{conduction}} = \lambda \times \frac{(T_{S1} - T_{S2})}{ep}$$

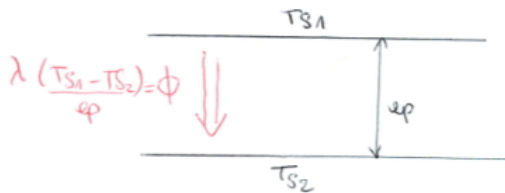


FIGURE 4.1 – Schéma d'un flux de conduction dans le cas général

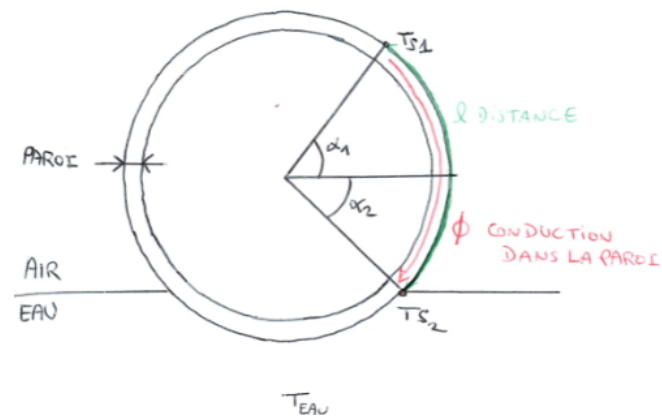


FIGURE 4.2 – Schéma des transferts thermiques dans une balle de ping-pong

Dans notre cas,  $ep$  représente la distance  $l$  entre le point  $T_{S1}$  et  $T_{S2}$ . Nous considérons que la paroi au contact de l'eau possède la même température que l'eau. Donc  $T_{S2} = T_{\text{eau}}$ , d'où  $\Phi_{\text{conduction}} = \lambda \times \frac{(T_{S1} - T_{\text{eau}})}{l}$ .

Pour connaître la température en  $T_{S1}$ , il nous faut mesurer le flux thermique par balle. Pour cela, nous avons besoin de connaître la surface d'échange.

Pour calculer la surface d'échange nous utilisons la formule de l'annexe A. Nous fixons  $\alpha_1$  à  $70^\circ$  et R le rayon d'une balle vaut 2 cm.

$$S = 2\pi R^2 \times \int_{\alpha_1}^{\pi} \cos(\alpha) d\alpha$$

$$\begin{aligned} \text{d'où : } S &= 2\pi R^2 \times (1 - \sin(\alpha_1)) \\ &= 2\pi (2 \times 10^{-2})^2 \times (1 - \sin(\frac{70\pi}{180})) \\ &= 1,51 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Une couche de balles était composée de 34 balles de ping-pong. Nous avons  $(T_{air} - T_{S1}) = cst$ . Nous supposons un  $h$  équivalent à  $20 \text{ W.m}^{-2}.K^{-1}$ [9].

$$\begin{aligned} \Phi_{parballe} &= \frac{\text{Puissance}}{\text{NbDeBalles}} = \frac{140}{34} = cst \\ \Phi_{parballe} &= h \times S_{echange} \times (T_{air} - T_{S1}) \end{aligned}$$

d'où  $(T_{air} - T_{S1}) = 1336^\circ\text{C}$ . Ce qui signifierait que la température moyenne de surface des balles est d'environ  $1260^\circ\text{C}$ . C'est absurde.

Même si nous doublons les surfaces d'échanges et le  $h$ , la température de surface resterait aberrante.

Cette valeur aberrante s'explique sûrement par le fait que le modèle que nous avons considéré est trop simple. En effet, nous aurions peut-être dû prendre en compte certains paramètres comme le rayonnement des lampes ainsi que celui des parois de notre système.

Il faut savoir que notre montage était composé de deux parties, un bac en plastique et un contour en polyuréthane (cf partie 2.5). Afin de simplifier notre modèle et donc de minimiser les sources d'erreurs dans nos calculs, nous pourrions envisager un montage composé d'une seule couche, qui doit être à la fois étanche, isolante et résistante à de fortes températures. L'idée d'une glacière en polystyrène a été envisagée, mais sa résistance à des températures de l'ordre de  $80-100^\circ\text{C}$  n'est pas une certitude.

## Conclusion et perspectives

L'objectif de ce projet était de réduire les échanges thermiques liquide – gaz en plaçant une couche de balles à la surface du liquide. Les différentes expériences réalisées au cours du projet tendent à valider cette idée. En effet, rajouter une couche de balles (de ping-pong dans notre cas) réduit l'élévation de la température de l'eau. Une amélioration possible serait de lester les balles pour réduire davantage les flux thermiques.

Ainsi, nous pouvons conclure que notre modèle a prouvé son efficacité, il ne manque plus qu'une application en conditions réelles.

Cet E.C nous a permis pour certains de continuer une matière de physique, notamment avec un côté expérimental très présent. En effet cette expérience enrichissante, nous a permis de concrétiser nos connaissances scientifiques. Nous avons appris à travailler en équipe, afin d'augmenter notre productivité et de mener à bien ce projet. C'est également le premier projet que nous avons réalisé du début à la fin par nous-même, partir d'une problématique pour arriver à y répondre intégralement, en passant par la phase expérimentation.

Pour aller plus loin, nous aurions pu envisager de modifier la couche permettant l'isolation. Par exemple, nous aurions pu tester des balles de différentes formes, tailles et matériaux comme mentionné dans les différents brevets. Il aurait été intéressant de prendre contact avec des personnes travaillant dans ce domaine afin de voir s'il existe déjà des perspectives d'applications concrètes de notre problématique dans l'aéronautique.

### **Remerciements :**

Nous tenons à remercier quelques personnes sans qui rien n'aurait été possible. Pour commencer Didier Vuillamy, notre professeur référent de projet, qui nous a aidé tout au long de ce projet de par ses connaissances, son expérience et références (avec les brevets notamment), et aussi de par son implication et son apport matériel. Nous tenons à remercier l'encadrement technique qui ont répondu à toutes nos questions et besoins.

# Bibliographie

- [1] JOSEPH RIORDAN, "*Brevet US 2010/0294761 A1, intitulé « Vapor barrier for flammable liquid storage tanks »*", (Datant du 25 novembre 2010)
- [2] T. YOSHIDA ET K. NAKAMICHI, "*Brevet US 2015/0292454 A1, intitulé « Storage tank for liquefied fuel »*", (Datant du 15 octobre 2015)
- [3] BREVET ARIANE GROUPE
- [4] textscR. Hagen, "*Brevet 3,401,818, intitulé « Open top tank and covering for the contents thereof »*",(Datant du 19 septembre 1968)
- [5] L'ISOLANT POLYURÉTHANE RIGIDE : UN MATÉRIAU D'EXCELLENCE POUR L'ISOLATION THERMIQUE DES BÂTIMENTS, <http://snpu.fr/performance-energetique/polyurethane-et-isolation-thermique/> (Valide à la date du 25/05/2018)
- [6] ISOLATION THERMIQUE, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Isolation\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Isolation_thermique) (Valide à la date du 11/05/2018)
- [7] FORMULES DE PHYSIQUE, LAMPE ÉLECTRIQUE, <http://www.formules-physique.com/categorie/1344> (Valide a la date du 30/05/2018)
- [8] COEFFICIENT DE TRANSFERT THERMIQUE PAR CONVECTION, [http://help.solidworks.com/2012/French/SolidWorks/cworks/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](http://help.solidworks.com/2012/French/SolidWorks/cworks/Convection_Heat_Coefficient.htm) (Valide a la date du 07/06/2018)
- [9] LISTE DE CONDUCTIVITÉS THERMIQUES, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste\\_de\\_conductivit%C3%A9s\\_thermiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_conductivit%C3%A9s_thermiques) (Valide a la date du 11/05/2018)

# Annexe A

## Documentation technique

Cette note explique le modèle thermique de conduction dans la paroi de la sphère creuse.

On considère que la paroi de la sphère est à la température  $T_1$  pour l'angle  $\alpha_1$  (voir Figure 1), et à la température  $T_2$  à l'angle  $\alpha_2$ . Le flux qui passe par la paroi à  $\alpha_1$  est conservé dans toute section de la sphère définie par son angle  $\alpha$

On détermine la section de passage du flux thermique pour toute section :

$$r(\alpha) = R * \cos(\alpha), \quad S(\alpha) = 2\pi R * e * \cos(\alpha), \quad \Phi_{th} = cst = \lambda * S(\alpha) * \left| \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right|$$

, et  $\text{grad}(T) = \frac{dT(\alpha)}{R d\alpha} = \frac{1}{R} \frac{dT(\alpha)}{d\alpha}$ , d'où  $\Phi_{th} = cst = \lambda * S(\alpha) * \frac{1}{R} \frac{dT(\alpha)}{d\alpha}$ , soit

$$\Phi_{th} = cst = \lambda * 2\pi R * e * \cos(\alpha) * \frac{1}{R} \frac{dT(\alpha)}{d\alpha} = \lambda * 2\pi * e * \cos(\alpha) * \frac{dT(\alpha)}{d\alpha}$$

$$\frac{dT(\alpha)}{d\alpha} = \frac{\Phi_{th}}{\lambda * 2\pi e \cos(\alpha)}$$

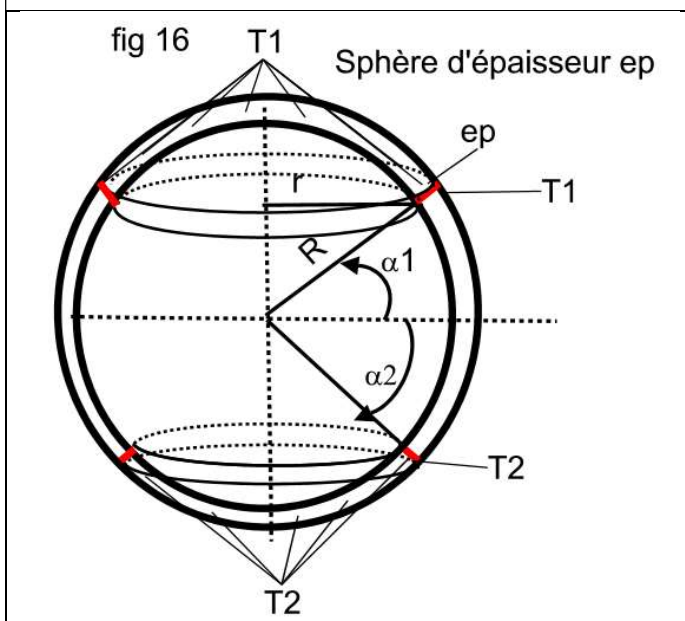
D'où L'intégration donne

$$\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{dT(\alpha)}{d\alpha} d\alpha = T(\alpha_2) - T(\alpha_1) = \frac{\Phi_{th}}{\lambda * 2\pi e} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{1}{\cos(\alpha)} d\alpha, \text{ ou}$$

$$\Phi_{th} = \lambda * 2\pi e (T(\alpha_2) - T(\alpha_1)) \frac{1}{\int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{1}{\cos(\alpha)} d\alpha} =$$

Examen de cette relation : elle montre que le rayon de la sphère n'importe pas.

Figure 1 Schéma de la sphère et des conditions limites imposées en température



## **Annexe B**

# **Résultats expérimentaux**



## Test n°0

### Conditions expérimentales:

Sans balles

Nombre de lampes: 2

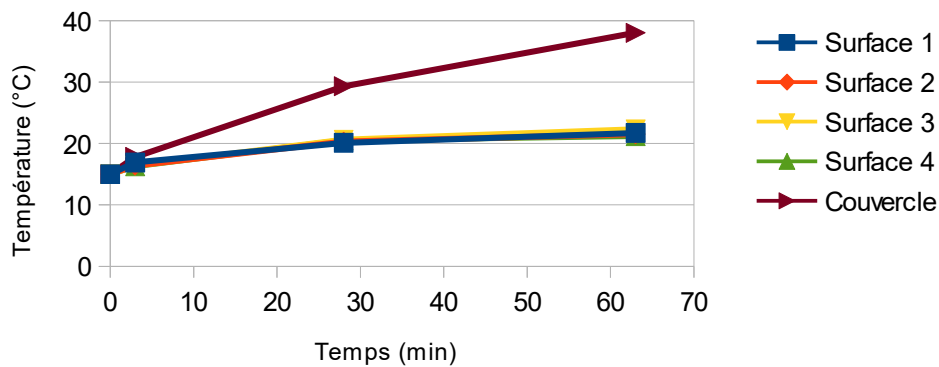
Masse d'eau: 2L

Ventilation: oui

### Couvercle en bois

| Temps (min) | Surface 1 | Surface 2 | Surface 3 | Surface 4 | Couvercle |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0           | 15        | 15        | 15        | 15        | 15        |
| 3           | 16,9      | 16,4      | 16,4      | 16,3      | 17,8      |
| 28          | 20,1      | 20,3      | 20,6      | 20,5      | 29,3      |
| 63          | 21,7      | 21,5      | 22,3      | 21,2      | 38        |

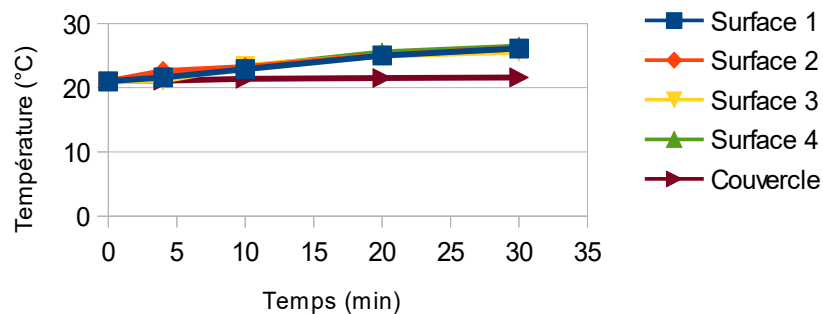
Exp 0 : Evolution de la température des parois extérieures  
(couvercle en bois)



### Couvercle en bois et polyuréthane

| Temps (min) | Surface 1 | Surface 2 | Surface 3 | Surface 4 | Couvercle |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0           | 21        | 21        | 21        | 21        | 21        |
| 4           | 21,6      | 22,6      | 21,1      | 22,2      | 21,1      |
| 10          | 22,9      | 23,2      | 23,4      | 23,2      | 21,4      |
| 20          | 25        | 25,1      | 25        | 25,5      | 21,5      |
| 30          | 26,1      | 26,1      | 25,6      | 26,4      | 21,6      |

Exp 0 : Evolution de la température des parois extérieures  
(couvercle bois+polyuréthane)



## Test n°1

### Conditions expérimentales:

Sans balles

Nombre de lampes: 2

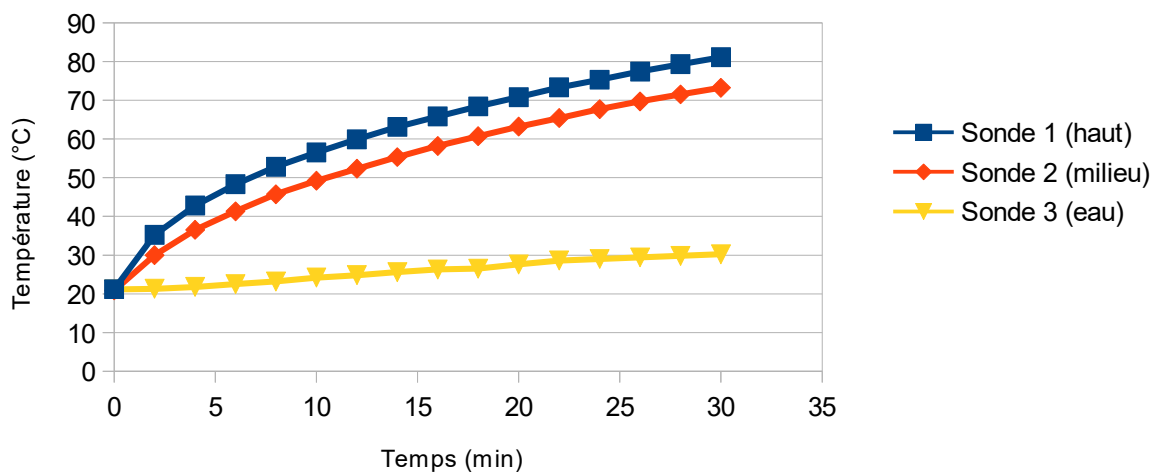
Masse d'eau: 2L

Ventilation: oui

| temps (min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (milieu) | Sonde 3 (eau) |
|-------------|----------------|------------------|---------------|
| 0           | 21,2           | 20,9             | 21,1          |
| 2           | 35,2           | 30               | 21,3          |
| 4           | 42,8           | 36,5             | 21,8          |
| 6           | 48,3           | 41,3             | 22,5          |
| 8           | 52,8           | 45,7             | 23,2          |
| 10          | 56,5           | 49,2             | 24,2          |
| 12          | 59,9           | 52,3             | 24,8          |
| 14          | 63,1           | 55,3             | 25,6          |
| 16          | 65,8           | 58,2             | 26,3          |
| 18          | 68,4           | 60,7             | 26,5          |
| 20          | 70,8           | 63,2             | 27,6          |
| 22          | 73,3           | 65,4             | 28,6          |
| 24          | 75,3           | 67,7             | 29            |
| 26          | 77,4           | 69,7             | 29,4          |
| 28          | 79,3           | 71,5             | 29,8          |
| 30          | 81,1           | 73,2             | 30,2          |

### Exp 1 : Evolution de température intérieure en fonction du temps

(Sans couche de balles et avec ventilation)



### Observations:

Au début, l'air et l'eau ont une température équivalente. Au bout de 30 minutes d'expérimentation, la température augmente de 9,1°C pour l'eau et de 52,3 à 59,9°C pour l'air. Il y a une différence de 7,6°C entre la sonde du haut et la sonde du milieu dans l'air.

## Test n°2

### Conditions expérimentales:

Une couche de balles

Nombre de lampes: 2

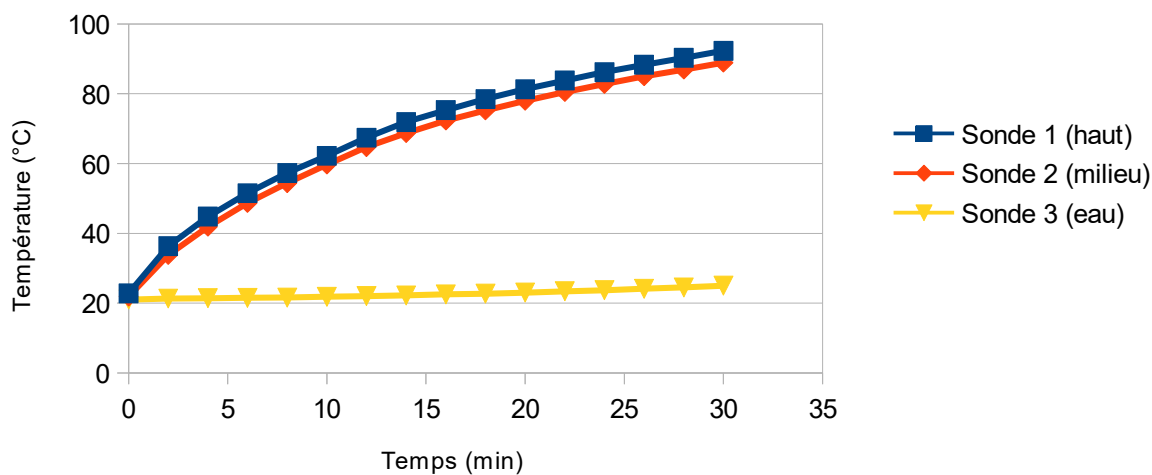
Masse d'eau: 2L

Ventilation: oui

| temps (min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (milieu) | Sonde 3 (eau) |
|-------------|----------------|------------------|---------------|
| 0           | 22,8           | 21,9             | 21            |
| 2           | 36,3           | 33,8             | 21,3          |
| 4           | 44,8           | 41,9             | 21,4          |
| 6           | 51,5           | 48,7             | 21,5          |
| 8           | 57,3           | 54,4             | 21,6          |
| 10          | 62,2           | 59,7             | 21,8          |
| 12          | 67,4           | 64,7             | 22            |
| 14          | 71,9           | 68,7             | 22,2          |
| 16          | 75,3           | 72,3             | 22,5          |
| 18          | 78,5           | 75,2             | 22,7          |
| 20          | 81,3           | 78               | 23            |
| 22          | 83,8           | 80,5             | 23,4          |
| 24          | 86,2           | 82,8             | 23,7          |
| 26          | 88,3           | 85               | 24,1          |
| 28          | 90,3           | 86,9             | 24,5          |
| 30          | 92,3           | 88,9             | 25            |

### Exp 2 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(avec une couche de balle et ventilation)



### Observation :

Au début, l'air et l'eau ont une température équivalente. Au bout de 30 minutes, la température de l'eau augmente de 4°C et de 67 à 69,5°C pour l'air. Il y a un écart de 2,5°C entre la sonde du haut et la sonde du milieu.

### Test n°3

#### Conditions expérimentales:

Sans balles

Nombre de lampes: 2

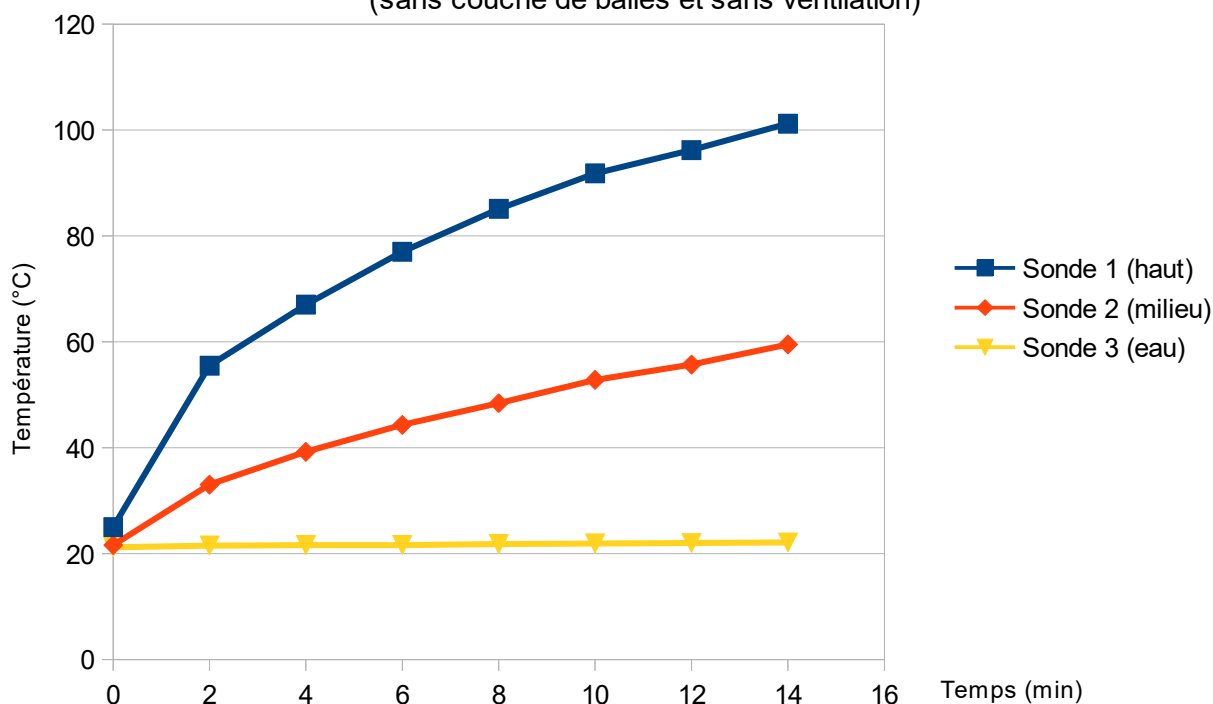
Masse d'eau: 2L

Ventilation: non

| temps(min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (milieu) | Sonde 3 (eau) |
|------------|----------------|------------------|---------------|
| 0          | 25             | 21,6             | 21,2          |
| 2          | 55,5           | 33               | 21,5          |
| 4          | 67             | 39,2             | 21,6          |
| 6          | 77             | 44,3             | 21,6          |
| 8          | 85,1           | 48,4             | 21,8          |
| 10         | 91,8           | 52,8             | 21,9          |
| 12         | 96,2           | 55,7             | 22            |
| 14         | 101,2          | 59,5             | 22,1          |

#### Exp 3 : Evolution de la température intérieure en fonction le temps

(sans couche de balles et sans ventilation)



#### Observations :

Au début, la sonde du milieu dans l'air et celle dans l'eau ont une température sensiblement équivalente. La température dans l'air n'est pas homogène, sûrement dû au fait que l'on n'a pas suffisamment laissé le système refroidir avant cette expérience.

Au bout de 14 minutes, la température de l'eau a très peu varié (0,9°C de variation). Cependant, pour la sonde du haut, en seulement 14 minutes, la température a augmenté de 76,2°C, dépassant ainsi les 100°C (d'où l'arrêt de l'expérience). Alors que pour la sonde du milieu, la température n'a augmenté que de 37,9°C, soit 2 fois moins que pour la sonde 1.

## Test n°4

### Conditions expérimentales:

Sans balles

Nombre de lampes: 2

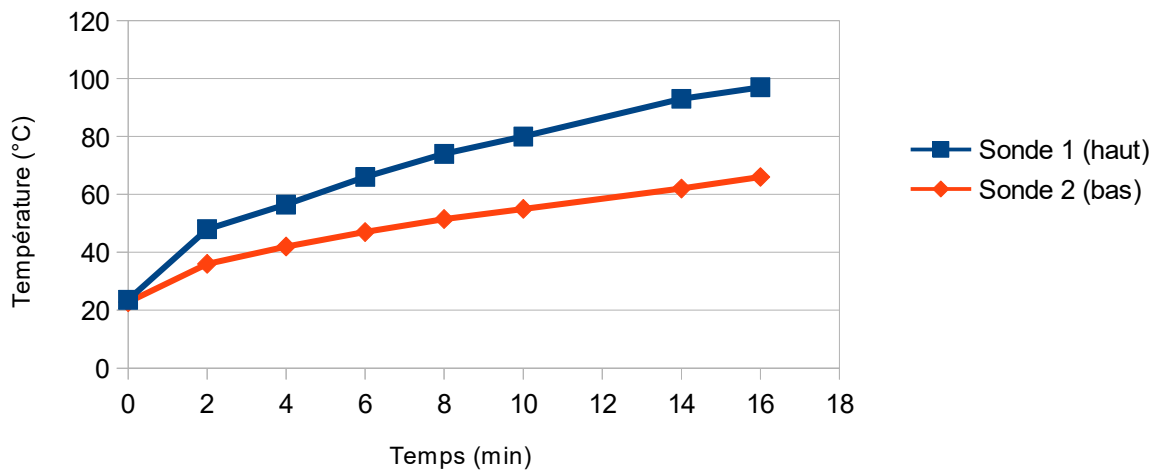
Sans eau

Ventilation: non

| Temps(min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (bas) |
|------------|----------------|---------------|
| 0          | 23,6           | 22,8          |
| 2          | 48             | 36            |
| 4          | 56,5           | 42            |
| 6          | 66             | 47            |
| 8          | 74             | 51,5          |
| 10         | 80             | 55            |
| 14         | 93             | 62            |
| 16         | 97             | 66            |

### Exp 4 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(sans eau et sans ventilation)



### Observations :

Au début, la température dans l'air est assez homogène dans tout le système ( 0,8°C d'écart). Au bout de 16 minutes, la température de l'air augmente de 43,2°C pour la sonde du milieu et de 73,40°C pour la sonde du haut, soit une différence de 31°C entre les 2 sondes.

## Test n°5

### Conditions expérimentales:

Sans balles

Nombre de lampes: 2

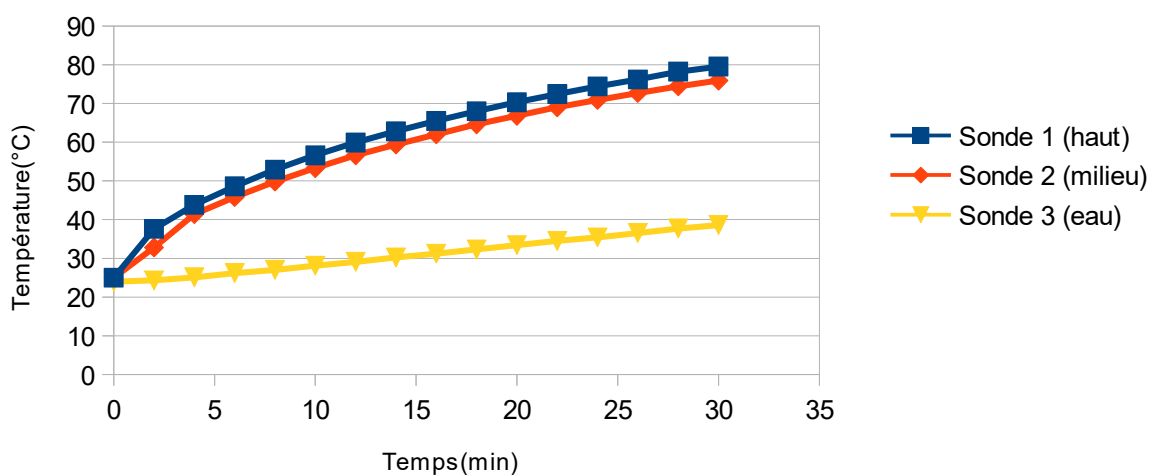
Masse d'eau: 4L

Ventilation: oui

| Temps (min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (milieu) | Sonde 3 (eau) |
|-------------|----------------|------------------|---------------|
| 0           | 25             | 25               | 24            |
| 2           | 37,6           | 32,8             | 24,3          |
| 4           | 43,8           | 41,4             | 25,1          |
| 6           | 48,6           | 45,8             | 26,2          |
| 8           | 52,9           | 49,8             | 27            |
| 10          | 56,6           | 53,3             | 28,1          |
| 12          | 59,9           | 56,6             | 29,1          |
| 14          | 62,8           | 59,4             | 30,2          |
| 16          | 65,5           | 62               | 31,2          |
| 18          | 68             | 64,6             | 32,3          |
| 20          | 70,3           | 66,8             | 33,4          |
| 22          | 72,4           | 69               | 34,5          |
| 24          | 74,4           | 70,9             | 35,4          |
| 26          | 76,2           | 72,7             | 36,5          |
| 28          | 78,2           | 74,4             | 37,7          |
| 30          | 79,5           | 75,9             | 38,6          |

### Exp 5 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(sans eau, sans balles et avec ventilation)



### Observations :

La température initiale est équivalente pour toutes les sondes. La température de la sonde du milieu et celle du haut suivent la même évolution, avec 3 à 4°C de différence. En 30 minutes d'expérience, la température de l'eau a augmentée de 14,6°C.

## Test n°6

### Conditions expérimentales:

Une couche de balles avec un flotteur central en polystyrène de 4cm de rayon

Nombre de lampes: 2

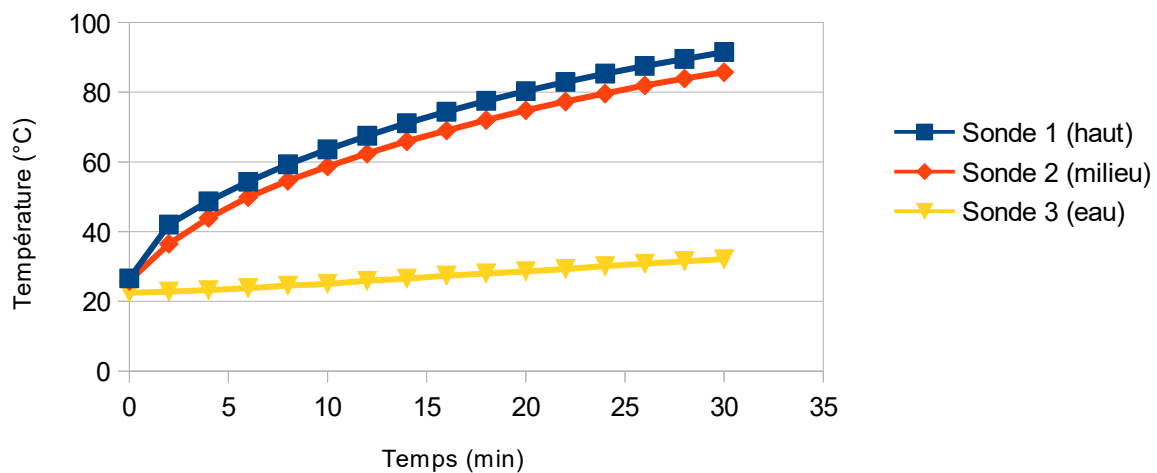
Masse d'eau: 4L

Ventilation: oui

| Temps (min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (milieu) | Sonde 3 (eau) |
|-------------|----------------|------------------|---------------|
| 0           | 26,6           | 25,9             | 22,5          |
| 2           | 42             | 36,5             | 22,8          |
| 4           | 48,7           | 43,9             | 23,2          |
| 6           | 54,3           | 49,9             | 23,8          |
| 8           | 59,3           | 54,6             | 24,5          |
| 10          | 63,6           | 58,7             | 25            |
| 12          | 67,5           | 62,4             | 25,9          |
| 14          | 71,1           | 65,9             | 26,5          |
| 16          | 74,4           | 69               | 27,4          |
| 18          | 77,5           | 72               | 28            |
| 20          | 80,3           | 74,8             | 28,6          |
| 22          | 82,9           | 77,3             | 29,3          |
| 24          | 85,3           | 79,6             | 30,1          |
| 26          | 87,5           | 81,9             | 30,8          |
| 28          | 89,5           | 83,9             | 31,5          |
| 30          | 91,5           | 85,7             | 32,1          |

### Exp 6 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(avec une couche de balles, flotteur central et ventilation)



### Observations :

L'écart de température initial pour les sondes dans l'air est faible (0,7°C). Au bout de 30 minutes de fonctionnement, il y a une différence de 5,8°C entre la sonde du haut et celle du milieu dans l'air. La température de l'eau a augmenté de 9,6°C au bout des 30 minutes.

## Test n°7

### Conditions expérimentales:

Une couche de balles

Nombre de lampes: 2

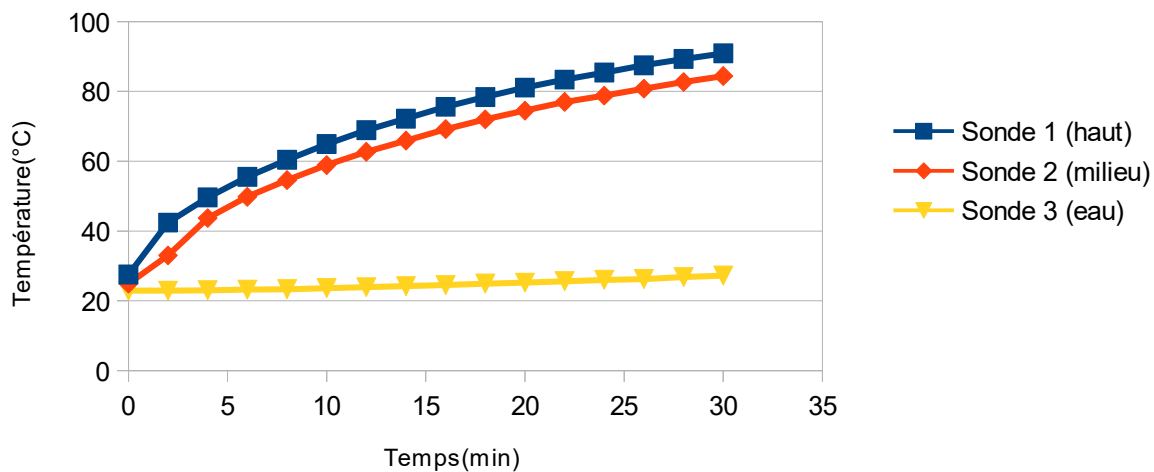
Masse d'eau: 4L

Ventilation: oui

| Temps (min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (milieu) | Sonde 3 (eau) |
|-------------|----------------|------------------|---------------|
| 0           | 27,5           | 24,9             | 22,9          |
| 2           | 42,4           | 33               | 22,9          |
| 4           | 49,6           | 43,7             | 23            |
| 6           | 55,5           | 49,8             | 23,2          |
| 8           | 60,4           | 54,6             | 23,3          |
| 10          | 64,9           | 58,9             | 23,6          |
| 12          | 68,9           | 62,7             | 23,9          |
| 14          | 72,2           | 65,9             | 24,2          |
| 16          | 75,6           | 69,2             | 24,5          |
| 18          | 78,4           | 72               | 24,9          |
| 20          | 81,1           | 74,5             | 25,2          |
| 22          | 83,4           | 77               | 25,6          |
| 24          | 85,4           | 78,8             | 26            |
| 26          | 87,5           | 80,8             | 26,2          |
| 28          | 89,3           | 82,7             | 26,8          |
| 30          | 90,9           | 84,4             | 27,2          |

### Exp 7 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(avec une couche de balles et ventilation)



### Observations :

La sonde du haut et du milieu suivent la même évolution avec 7 à 8°C de différence.

La température de l'eau augmente de 4,3°C au bout de 30 minutes d'expérience.



## Test n°8

### Conditions expérimentales :

Une couche de balles avec un flotteur central en demi-sphère de polystyrène de 4cm de rayon

Nombre de lampes: 2

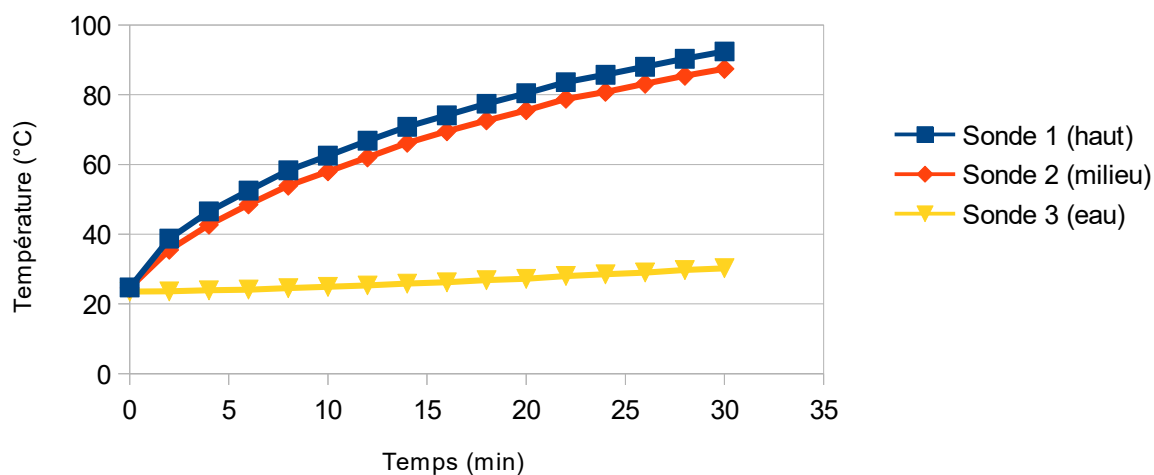
Masse d'eau: 4L

Ventilation: oui

| Temps (min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (milieu) | Sonde 3 (eau) |
|-------------|----------------|------------------|---------------|
| 0           | 24,7           | 24,6             | 23,5          |
| 2           | 38,7           | 35,5             | 23,6          |
| 4           | 46,5           | 42,7             | 23,9          |
| 6           | 52,5           | 48,5             | 24,1          |
| 8           | 58,3           | 53,9             | 24,5          |
| 10          | 62,5           | 58               | 24,9          |
| 12          | 66,8           | 62               | 25,3          |
| 14          | 70,8           | 66,2             | 25,8          |
| 16          | 74,1           | 69,5             | 26,2          |
| 18          | 77,4           | 72,6             | 26,8          |
| 20          | 80,4           | 75,5             | 27,2          |
| 22          | 83,6           | 78,8             | 28            |
| 24          | 85,7           | 80,8             | 28,5          |
| 26          | 88             | 83,1             | 29            |
| 28          | 90,3           | 85,4             | 29,7          |
| 30          | 92,4           | 87,4             | 30,2          |

### Exp 8 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(avec une couche de balles, flotteur central et ventilation)



### Observations :

Les températures initiales sont équivalentes

La sonde du haut et du milieu dans l'air suivent la même évolution.

Il y a un écart de température d'environ 5°C entre la sonde du haut et de celle du milieu.

Au bout de 30 minutes d'expérimentation, la température de l'eau a augmenté de 6,7 °C.

## Test n°9

### Conditions expérimentales :

Une couche de balles  
Nombre de lampes: 2  
Masse d'eau: 4L  
Ventilation: oui

### Observations :

La température initiale pour la sonde 1 et 2 sont équivalentes.

| Temps (min) | Sonde 1 (haut) | Sonde 2 (milieu) | Sonde 3 (eau) |
|-------------|----------------|------------------|---------------|
| 0           | 25,7           | 25,6             | 22,9          |
| 2           | 40,2           | 38,8             | 22,9          |
| 4           | 49,1           | 46,2             | 23,2          |
| 6           | 54,4           | 50,9             | 23,5          |
| 8           | 60             | 56,1             | 23,9          |
| 10          | 64,8           | 60,8             | 24,3          |
| 12          | 67,9           | 64,1             | 24,8          |
| 14          | 71,9           | 68               | 25,3          |
| 16          | 74,9           | 70,9             | 25,8          |
| 18          | 78,2           | 74,2             | 26,3          |
| 20          | 81             | 76,8             | 26,8          |
| 22          | 83,4           | 79,3             | 27,4          |
| 24          | 85,7           | 81,5             | 27,9          |
| 26          | 88             | 83,7             | 28,5          |
| 28          | 90             | 85,7             | 29,1          |
| 30          | 91,7           | 87,3             | 29,7          |
| 32          | 93,3           | 88,9             | 30,1          |
| 34          | 94,6           | 90,3             | 30,7          |
| 36          | 96             | 91,5             | 31,3          |
| 38          | 97,2           | 92,6             | 31,7          |
| 40          | 98,5           | 93,9             | 32,3          |
| 42          | 99,3           | 94,6             | 32,7          |
| 44          | 100,3          | 95,5             | 33,2          |
| 46          | 101            | 96,2             | 33,5          |
| 48          | 101,8          | 96,9             | 34,1          |
| 50          | 102,4          | 97,3             | 34,3          |
| 52          | 103            | 97,8             | 34,7          |
| 54          | 103,4          | 98,3             | 35,2          |
| 56          | 104            | 98,6             | 35,4          |
| 58          | 104,2          | 98,7             | 35,8          |
| 60          | 104,6          | 99,2             | 36,2          |
| 62          | 104,8          | 99,4             | 36,4          |
| 64          | 105,2          | 99,7             | 36,8          |
| 66          | 105,3          | 99,9             | 37,1          |
| 68          | 105,4          | 100              | 37,3          |
| 70          | 105,6          | 100,2            | 37,7          |
| 72          | 105,8          | 100,2            | 37,9          |
| 74          | 106            | 100,3            | 38,2          |

### Exp 9 : Evolution de la température intérieure en fonction du temps

(avec une couche de balles et ventilation (long durée))

