

GYMNASE DE BEAULIEU
TRAVAIL DE MATURITÉ 2024

LES THERMOS

Répondant :

Dominique SEPPEY

Auteure :

Morgane MORETA VERA

Lausanne, le 6 octobre 2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mes proches pour leur soutien et encouragements. Une attention particulière va à ma mère, dont l'aide et les conseils avisés m'ont permis de réaliser mes expériences. Je remercie également mon oncle pour ses conseils, toujours judicieux, qui m'ont permis de développer ma réflexion. Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers mon répondant pour m'avoir guidée, conseillée et corrigée tout au long de ce travail.

Résumé du travail de Maturité 2024

Nom : Moreta Vera

Prénom : Morgane

Classe : 3m02

Titre du TM : Les thermos

Répondant : Dominique Seppey

Résumé :

Ce travail de maturité a pour but d'analyser les différents composants des thermos pour comprendre leur influence sur la qualité de l'isolation thermique. Ce travail est divisé en deux parties : une partie théorique et une partie pratique.

Dans la première partie, des notions théoriques essentielles à la compréhension du sujet de ce TM sont expliquées. Les notions abordées sont : la différence entre chaleur et température, les différents transferts thermiques, la structure d'un thermos ainsi que les quelques matériaux les plus utilisés dans leur fabrication.

La deuxième partie est une expérience pratique qui vise à déterminer l'effet du matériau, du volume et du prix des thermos sur leur capacité à préserver la chaleur. Pour ce faire, dix bouteilles isothermes de prix différents de 0.5L ou de 1L en acier inoxydable, verre borosilicate ou matières plastiques sont testées. Cette expérience se déroule sur 48h et étudie la baisse de la température de l'eau, initialement chaude, contenue dans les thermos au fil du temps.

Lausanne, le 6 octobre 2024

Signature de l'élève :

Table des matières

1. Introduction	4
1.1 Un peu d'histoire	4
1.2 Problématique	5
2. Notions théoriques	6
2.1 Chaleur et température	6
2.2 Transfert thermique	6
2.2.1 Conduction thermique.....	7
2.2.2 Convection thermique	8
2.2.3 Rayonnement thermique	9
2.3 Thermos	10
2.4 Matériaux.....	11
2.4.1 Acier inoxydable	11
2.4.2 Matières plastiques	12
2.4.3 Verre borosilicate	13
3. Expérience pratique	15
3.1 But.....	15
3.2 Thermos testés	15
3.3 Protocole expérimental	16
3.4 Incertitudes de mesure.....	17
3.5 Résultats et analyse	18
3.5.1 Température ambiante.....	18
3.5.2 Températures internes	19
3.5.3 Températures des parois	20
3.5.4 Gourde simple ou thermos.....	21
3.5.5 Effet du matériau	23
3.5.6 Effet du volume.....	26
3.5.7 Effet du prix	29
3.5.8 Les bouchons	31
4. Conclusion.....	33
5. Bibliographie	35
6. Table des illustrations	41

1. Introduction

Remplis de thé ou de café, baladés du bureau à la montagne, les thermos sont, depuis quelques décennies, de précieux alliés du quotidien. En effet, ces bouteilles capables de garder un liquide chaud ou froid à plus ou moins la même température pendant des heures¹ sont des atouts majeurs dans bon nombre de situations de la vie quotidienne, ce qui explique leur grande popularité.

1.1 Un peu d'histoire²

C'est au début du XXe siècle que deux verriers allemands ont l'idée de transformer le vase de Dewar, récipient isolant thermique inventé à la fin du XIXe par le chimiste et physicien britannique James Dewar, en un produit commercial.³ C'est ainsi qu'en 1904⁴, ils commercialisent la toute première bouteille isotherme sous la marque « Thermos », signifiant « chaud » en grec ancien.⁵ Ce produit rencontre un tel succès, pour son prix abordable, son entretien facile et sa grande utilité dans un monde encore privé de réfrigérateurs, qu'il remporte en 1909 le prix de la Meilleure invention.⁶ La marque et son produit sont dès lors souvent confondus, si bien que le mot « thermos » est peu à peu entré dans le langage courant, désignant n'importe quelle bouteille isotherme.⁷ Initialement entièrement en verre, il ne faudra pas attendre longtemps avant que ces bouteilles isothermes présentent une paroi externe en plastique et c'est en 1966 que la marque Thermos en commercialisent entièrement fabriquées en inox, plus robuste.⁸



Figure 1 : Publicité de 1909 pour une bouteille isotherme de la marque Thermos

Le thermos est aujourd'hui un accessoire indispensable commercialisé par de nombreuses marques, permettant à chacun d'y trouver son compte grâce aux nombreux modèles existants, de couleurs, tailles et matières différentes. C'est également un récipient de choix durable qui remplace les bouteilles en plastique nocives pour l'environnement.

¹ <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/thermos>

² Image tirée de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermos the Bottle, ad from Rod and Gun in Canada, 1909.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermos_the_Bottle,_ad_from_Rod_and_Gun_in_Canada,_1909.jpg)

³ <https://www.tonton-outdoor.com/marques/thermos>

⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Bouteille_isotherme

⁵ <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-thermos-11155/>

⁶ https://www.cotemaison.fr/chaine-d/deco-design/le-thermos-tout-ce-qu-il-faut-savoir_15334.html

⁷ <https://dictionnaire.orthodidacte.com/article/genre-thermos>

⁸ <http://musee-boissons.blogspot.com/2017/07/histoire-de-la-bouteille-isotherme.html>

1.2 Problématique

La problématique associée à ce TM est la suivante : Analyse des différents composants des thermos et leur influence sur la qualité de l'isolation thermique.

Dans un premier temps, quelques notions théoriques seront expliquées afin de comprendre le fonctionnement et la structure des bouteilles isothermes. Dans un second temps, une expérience pratique sera réalisée dans le but de comparer les différentes caractéristiques des thermos (matériau, volume et prix) avec leur efficacité à préserver la chaleur.

2. Notions théoriques

2.1 Chaleur et température

La chaleur et la température sont deux concepts différents, bien qu'étroitement liés, qu'il ne faut pas confondre.

La chaleur correspond à un transfert thermique entre deux corps. C'est un mouvement d'énergie exprimé en joules [J].⁹ Un corps ne peut pas « posséder » de la chaleur, il peut seulement en perdre ou en gagner. La chaleur est directement liée aux mouvements des molécules, soit l'agitation thermique, car lorsqu'un corps gagne en énergie sous forme de chaleur, les particules de ce corps s'agitent et provoquent ainsi une hausse de l'agitation thermique.¹⁰

La température correspond à la mesure de l'agitation thermique d'un corps.¹¹ Elle se mesure en degrés Celsius [°C], en degrés Fahrenheit [°F] ou en Kelvin [K]. Un corps peut « posséder » une température, il peut donc être qualifié de chaud ou de froid. Plus l'agitation d'un corps est grande et plus ce corps aura une température élevée. L'absence d'agitation thermique entre les molécules d'un corps est appelée le zéro absolu (0 K, -273,15°C), limite au-delà de laquelle la température du corps ne peut plus baisser.¹²

En résumé, la chaleur que gagne ou perd un corps affectera l'agitation thermique de ce corps, ce qui aura pour conséquence de faire monter ou baisser sa température. Plus un corps gagne de la chaleur, plus l'agitation thermique de ce corps sera importante, et plus sa température sera élevée.¹³

L'unité de mesure de la température utilisée dans ce TM est le degré Celsius [°C], car cette unité est la plus couramment utilisée en Suisse au 21^e siècle et elle n'a pas besoin d'être convertie en Kelvin [K] car aucun calcul, d'après une formule, n'est effectué dans ce travail.

2.2 Transfert thermique

Le transfert thermique est une des formes de transfert d'énergie. Ce phénomène a lieu lorsque deux corps ou deux systèmes, n'ayant pas nécessairement un contact direct, ne sont pas à la même température. Ce transfert a toujours lieu du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. L'équilibre thermique est atteint lorsque ces deux corps ou systèmes sont parvenus à la même température. Lorsque cela arrive, ils n'échangent alors plus d'énergie thermique.¹⁴

⁹ <https://fr.khanacademy.org/science/chemistry/thermodynamics-chemistry/internal-energy-sal/a/heat>

¹⁰ https://www.pistes.fse.ulaval.ca/sae/?onglet=contenu&no_version=2102&no_recherche=rep&debut=20

¹¹ <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/energie-chaleur-temperature-difference-11779/>

¹² <https://science.lu/fr/physique/quest-ce-que-chaleur>

¹³ <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-distinction-entre-la-temperature-et-la-chaleur-s1092>

¹⁴ <https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/les-transferts-et-les-bilans-denergies-thermodynamiques-1/52452>

Il existe trois types de transferts thermiques, indépendants les uns des autres, qui peuvent coexister : la conduction, la convection et le rayonnement.¹⁵

2.2.1 Conduction thermique

La conduction thermique est un transfert d'énergie par contact.¹⁶ Elle est due à la propagation progressive de l'agitation thermique dans un corps et s'effectue sans déplacement de matière. Ce transfert d'énergie concerne alors principalement les solides car les liquides et les gaz, dont les particules sont moins fortement liées entre elles, peuvent bouger plus facilement. Elle peut s'opérer au sein d'un même corps ou entre deux corps différents.¹⁷ Les molécules plus chaudes ont une agitation thermique supérieure aux molécules plus froides (comme vu au point 2.1 Chaleur et température). Leur agitation va leur permettre de bousculer les molécules voisines et de leur transmettre ainsi de l'énergie, ce qui va aboutir à un transfert d'énergie du corps le plus chaud au corps le plus froid.¹⁸ La conduction thermique peut être expliquée par la loi de Fourier, d'équation¹⁹ :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$$

où $\vec{\varphi}$ est la densité du flux thermique $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,

λ est la conductivité thermique du matériau $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$,

$\overrightarrow{\text{grad}} T$ est le gradient de température $\left[\frac{K}{m}\right]$

Cette loi démontre que la densité du flux thermique est proportionnelle à la variation de température du milieu²⁰. Ainsi, plus l'écart entre les températures des milieux est important, plus la densité du flux thermique sera importante. La différence de température de milieux en contact induit donc la diffusion de la chaleur par conduction²¹.

Sur la Figure 2²² est représenté le transfert de chaleur par conduction entre deux solides, la casserole et son manche, ayant un contact direct. L'agitation thermique des molécules de la casserole, initialement chaude, va transmettre de l'énergie aux molécules du manche, initialement moins chaud que la casserole, dont la température va augmenter.

¹⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique

¹⁶ <https://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/>

¹⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique

¹⁸ <https://www.echosciences-paca.fr/articles/le-mystere-de-la-bouteille-thermos#>

¹⁹ https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude_saintblanquet/conducti/11intro/11intro.htm#1

²⁰ <https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/transfert%20thermique%20M1%20TE.pdf>

²¹ <https://chauffage.pagesjaunes.fr/astuce/voir/563295/loi-de-fourier-sur-la-conduction-thermique>

²² Image tirée de <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>

2.2.2 Convection thermique

La convection thermique est un transfert d'énergie dû au déplacement des molécules, qui induit des déplacements macroscopiques de la matière.²³ Elle peut s'opérer au sein de liquides et de gaz qui, réchauffés, peuvent se déplacer physiquement contrairement aux solides (comme indiqué au point 2.2.1 Conduction thermique).²⁴ Il existe deux types de convections : naturelle ou forcée.

La convection naturelle est causée par la différence de masse volumique des particules. Les particules plus chaudes ont une masse volumique plus faible que les particules plus froides. Plus une particule a une masse volumique importante et plus elle est dense. Les atomes chauds présentent donc une plus faible densité que les atomes froids. Les particules ont tendance à se placer dans un milieu par ordre de densité, le moins dense en haut et le plus dense en bas. Lorsqu'un liquide ou un gaz gagne en énergie thermique, les atomes les plus chauds, plus près de la source de chaleur, vont échanger leurs places avec les atomes plus froids, plus loin de la source de chaleur, afin de respecter l'ordre de densité.²⁵ En faisant cela, une partie de l'énergie des atomes plus chauds va être transmise, leur température va donc diminuer, aux molécules plus froides, dont la température va augmenter. Les molécules plus chaudes vont à leurs tours devenir plus froides, ce qui va les pousser à échanger de nouveau leurs places avec les particules désormais plus chaudes qu'elles.²⁶ Ce déplacement est un mouvement circulaire répétitif qui produit le mouvement des liquides ou gaz à l'échelle macroscopique.²⁷ Sur la Figure 2 est représenté le transfert de chaleur par convection naturelle dans de l'eau chauffée, où les molécules d'eau plus proches du feu, donc plus chaudes, échangent leurs places avec les molécules plus loin du feu, donc plus froides, induisant ainsi un mouvement circulaire. Seul ce type de convection est important pour ce TM.

La convection forcée, qui n'est pas représentée sur la Figure 2, est causée par une action extérieure facilitant le transfert thermique par la mise en mouvement du liquide ou gaz en question.²⁸

²³ https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique

²⁴ <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/les-transferts-de-chaleur>

²⁵ <https://fr.quora.com/Pourquoi-la-chaleur-monte>

²⁶ https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique

²⁷ <https://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/>

²⁸ <https://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/>

2.2.3 Rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est un transfert d'énergie via les ondes électromagnétiques.²⁹ Tous les corps, quels qu'ils soient, émettent un rayonnement plus ou moins fort suivant leur température.³⁰ Ce type de transfert est le seul à pouvoir s'effectuer dans le vide, n'ayant pas besoin de matière pour être exécuté.³¹ Le rayonnement infrarouge est le rayonnement dominant dans les transferts thermiques, c'est-à-dire la partie du spectre électromagnétique qui est la plus absorbée par le corps récepteur. Ces rayons sont invisibles mais sont ressentis sous forme de chaleur.³² Sur la Figure 2 est représenté le transfert de chaleur par rayonnement du feu, dont les rayons infrarouges chauffent l'air environnant.

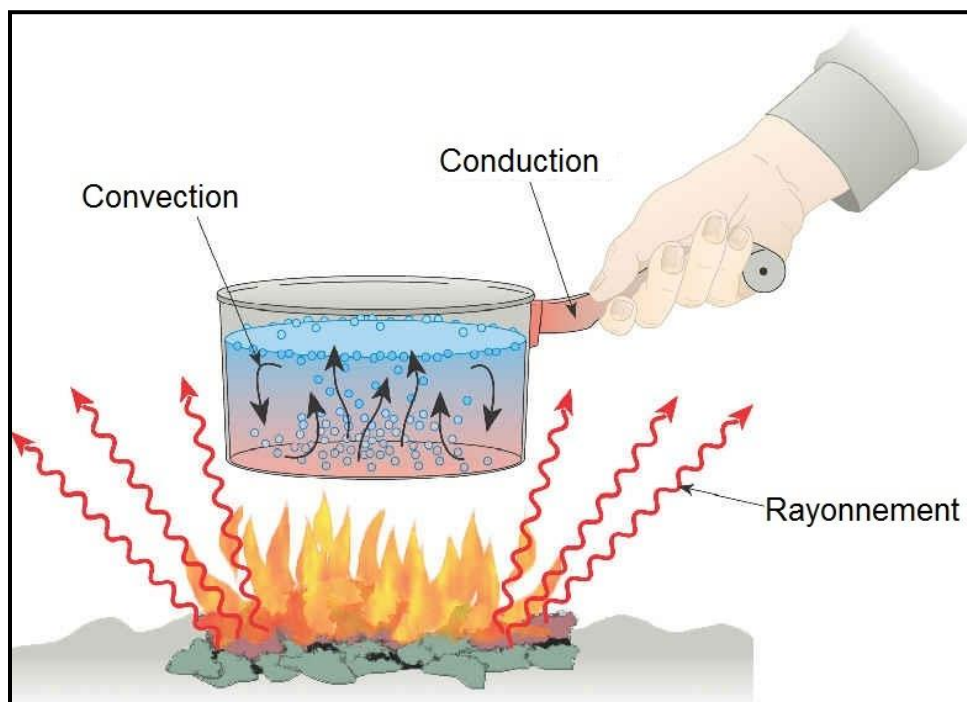


Figure 2 : Transferts thermiques par conduction (entre le manche et la casserole), par convection (dans l'eau chauffée) et par rayonnement (causé par le feu)

²⁹ <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/les-transferts-de-chaleur>

³⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=0iLWeaJKUBk>

³¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique

³² <https://www.suva.ch/fr-ch/prevention/par-danger/materiaux-rayonnements-et-situations-a-risque/rayonnement-et-radioactivite/rayonnement-non-ionisant/rayonnement-infrarouge-informations-et-dangers>

2.3 Thermos

Le thermos, ou bouteille isotherme, est un récipient isolant permettant de maintenir la température du liquide qu'il contient pendant plusieurs heures.³³ Il est composé de 4 éléments principaux lui permettant de garder au mieux la chaleur : le corps extérieur, la double paroi avec du vide intercalaire, le revêtement intérieur et le couvercle, voir Figure 3³⁴.

La présence de la double paroi avec du vide intercalaire dans les thermos est l'élément qui les différencie des simples gourdes, qui ne disposent pas de cet élément et servent simplement d'espaces de stockage pour un liquide sans l'isoler des transferts thermiques.³⁵

Le corps extérieur est la paroi externe de la bouteille isotherme. Elle est conçue pour résister aux impacts ainsi qu'à l'usure. Pour cela, elle est généralement fabriquée en matériaux robustes comme l'acier inoxydable ou le plastique. Cette couche protège les parois internes mais ne contribue pas directement à l'isolation de la chaleur, c'est pour cela qu'elle a une température très proche de celle ambiante au toucher.³⁶

La double paroi, composée des couches externe et interne, est conçue pour minimiser les transferts thermiques par conduction et par convection (comme expliqué aux points 2.2.1 Conduction thermique et 2.2.2 Convection thermique). Pour éviter presque entièrement ces transferts, le vide est fait entre ces deux parois, ce qui empêche la chaleur de se propager. La paroi interne ne peut pas flotter dans le vide, elle est donc fixée à la paroi externe au niveau du couvercle pour éviter le maximum de contact et donc le maximum de transferts thermiques entre les deux parois.³⁷ Le vide n'empêche cependant pas le transfert de chaleur par rayonnement³⁸ (comme indiqué dans le point 2.2.3 Rayonnement thermique).

Le revêtement intérieur est la couche interne du thermos. Elle est conçue de sorte à réfléchir le plus possible les rayonnements de chaleur provenant du liquide ou de l'extérieur. Cette paroi est donc normalement revêtue d'un matériau réfléchissant comme l'argent ou l'aluminium, ce qui empêche la chaleur de s'échapper ou de rentrer par la paroi interne. La paroi externe peut aussi être réfléchissante, ce qui permet également aux rayonnements venant de l'extérieur d'être réfléchis.³⁹

Le couvercle, conçu pour fermer le récipient, fait aussi office de fermeture hermétique. Il empêche ainsi le transfert de chaleur par convection (comme vu au point 2.2.2 Convection thermique). Cependant, vu que le couvercle peut souvent être ouvert, c'est par là que la chaleur s'échappe le plus. En général, les bouchons sont équipés de joints en silicone ou en caoutchouc pour les rendre plus étanches.⁴⁰

³³ <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/thermos>

³⁴ Image modifiée d'après <https://www.alamyimages.fr/schema-complet-du-vase-de-dewar-ou-du-recipient-a-vide-isole-sur-une-section-transversale-blanche-vue-en-coupe-d-une-fiole-a-vide-thermos-schema-montrant-le-vide-couches-de-flacons-vecteur-image417206069.html>

³⁵ <https://shop-ta-gourde.com/blogs/infos/gourde-inox-simple-paroi-ou-double-paroi>

³⁶ <https://thermos-expert.com/blogs/infos/comment-fonctionne-un-thermos>

³⁷ <https://takaterra.com/fr/blog/comment-faite-bouteille-isotherme.html#>

³⁸ <https://www.simplyscience.ch/fr/jeunes/decouvre/de-quoi-se-compose-une-bouteille-thermos>

³⁹ <https://blog.partiprof.fr/principe-fonctionnement-thermos/>

⁴⁰ <https://healthy-lunch.fr/blogs/blog-healthy-lunch/bouteille-isotherme-fonctionnement>

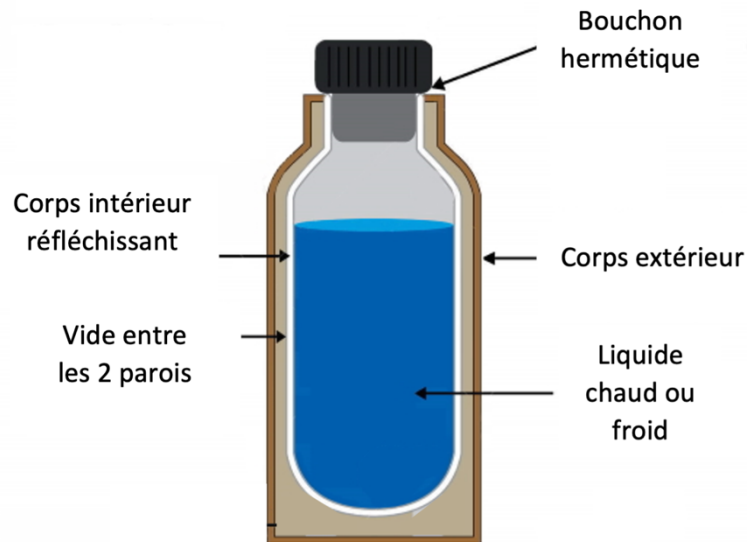


Figure 3 : Vue en coupe verticale d'un thermos et de ses différents composants

2.4 Matériaux

Les thermos que l'on trouve aujourd'hui sur le marché sont principalement fabriqués à l'aide de 3 matériaux : l'acier inoxydable, le plastique et le verre borosilicate.^{41,42,43,44}

2.4.1 Acier inoxydable

L'acier inoxydable, ou inox, est un alliage d'acier et de chrome.⁴⁵ Sa composition peut être modifiée afin d'acquérir les propriétés souhaitées, notamment en modifiant le pourcentage de chrome présent ou en ajoutant d'autres matériaux en faible quantité comme le nickel ou le cuivre.⁴⁶

⁴¹ <https://www.soif-de-gourde.fr/blog/avantages-et-inconvenients-des-differents-materiaux-dune-gourde-pour-bien-la-choisir/>

⁴² <https://www.simplyscience.ch/fr/jeunes/decouvre/de-quoi-se-compose-une-bouteille-thermos>

⁴³ <https://www.soif-de-gourde.fr/blog/que-penser-des-gourdes-en-verre/>

⁴⁴ <https://gourde-personnalisable.fr/quelle-matiere-pour-une-gourde/>

⁴⁵ <https://acierinoxydable.ca/fr/durabilite-resistance-acier-inoxydable>

⁴⁶ <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-acier-inoxydable-16677/>

L'inox est un mauvais conducteur de chaleur et présente une excellente résistance mécanique et résistance aux chocs thermiques.⁴⁷ Il peut résister à de très hautes et basses températures⁴⁸ et est, comme son nom l'indique, peu sensible à l'oxydation.⁴⁹ L'inox est également entièrement recyclable et adapté au contact alimentaire^{50,51} mais il n'est pas très léger⁵².

Toutes ces propriétés en font un matériau de choix dans beaucoup de secteurs comme la construction, le pharmaceutique et l'alimentaire⁵³, notamment dans la fabrication de thermos où celui-ci est le matériau majoritairement utilisé.

2.4.2 Matières plastiques

Le plastique est un matériau dérivé du pétrole brut et synthétisé à partir de polymères, des macromolécules formées de monomères liés entre eux par des liaisons covalentes.^{54,55} Il en existe de nombreux types, de propriétés nettement différentes. Dans l'industrie du thermos, sont principalement utilisés le PP, ou polypropylène, et le PE, ou polyéthylène.

Le PP et le PE sont de très mauvais conducteurs thermiques et d'excellents résistants aux chocs mécaniques et thermiques ainsi qu'à l'usure.^{56,57,58,59} Ce sont des matières également peu coûteuses et faciles à produire,^{60,61} ainsi qu'entièrement recyclables^{62,63}. Elles ne peuvent en revanche pas supporter de trop hautes ou basses températures, entre 0°C et 100°C pour

⁴⁷ <https://www.novameta.lt/fr/des-produits/caracteristiques-de-lacier-inoxydable>

⁴⁸ <https://www.praud-inox.com/blog/acier-inoxydable>

⁴⁹ [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro Inox/What is Stainless Steel FR.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro%20Inox/What%20is%20Stainless%20Steel%20FR.pdf)

⁵⁰ <https://oopla.fr/inox-gourde-bento-durable/>

⁵¹ <https://www.easy-inox.com/news/propriétés-et-familles-d-aciers-inoxydables>

⁵² <https://www.soif-de-gourde.fr/blog/avantages-et-inconvenients-des-differents-materiaux-dune-gourde-pour-bien-la-choisir/>

⁵³ <https://www.airwork.it/fr/blog/produits-en-acier-inoxydable-caracteristiques-et-secteurs-dutilisation/>

⁵⁴ <https://polymerexpert.fr/polymere-definition/>

⁵⁵ <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-polymere-803/>

⁵⁶ <https://www.nelinkia.com/blog/applications/defintion-polyethylene-utilisation-plaque-polyethylene.html>

⁵⁷ [https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES polymere 19§ion=caracteristiques](https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES%20polymere%2019§ion=caracteristiques)

⁵⁸ <https://www.logistiekonline.be/fr/blogs/blog/pe-et-pp-les-differences-en-un-coup-doeil/>

⁵⁹ <https://scrapad.com/fr/blog/differences-entre-le-polyethylene-et-le-polypropylene/>

⁶⁰ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyéthylène>

⁶¹ <https://www.protolabs.com/fr-fr/ressources/blog/abs-vs-polypropylene-pp-choisir-entre-deux-plastiques-populaires/>

⁶² <https://ripack.com/evenement/lutilisation-et-le-recyclage-du-polyethylene/>

⁶³ <https://www.hubency.com/dechets-valorises/plastique/polypropylene/>

le PP⁶⁴ et entre -200°C et 80°C pour le PE.⁶⁵ Ces deux matériaux sont également potentiellement dangereux pour la santé en cas de contact alimentaire prolongé à cause des microplastiques.^{66,67}

Ainsi, le polypropylène et le polyéthylène présentent des propriétés thermiques et mécaniques adéquates à leur utilisation dans les bouteilles isothermes. Cependant, au vu du risque potentiel pour la santé qu'ils représentent, les thermos en plastique sur le marché sont constitués d'une paroi externe en matières plastiques et d'une paroi interne en inox ou en verre. Ces deux types de plastique, en plus d'être employés dans l'industrie alimentaire en tant qu'emballages, sont également utilisés dans la cosmétique (pour le PE), et dans l'automobile (pour le PP), en raison de leur bonne résistance chimique.^{68,69}

2.4.3 Verre borosilicate

Le verre borosilicate est un type de verre composé, comme son nom l'indique, à 80% de silice⁷⁰, composant principal du sable⁷¹, et à 13% de borates.⁷² Bien qu'ayant une composition similaire au verre normal, ou verre sodo-calcique, le verre borosilicate supporte de plus hautes et basses températures, raison pour laquelle il est utilisé dans les thermos.⁷³

Le verre borosilicate est un assez mauvais conducteur thermique⁷⁴ et il résiste bien aux chocs thermiques⁷⁵ et mécaniques⁷⁶. Il est léger aux premiers abords mais peut rapidement, suivant la quantité et l'épaisseur utilisées, devenir plutôt lourd.⁷⁷ C'est également un excellent résistant chimique⁷⁸ recyclable à 100% et parfaitement adapté au contact alimentaire.⁷⁹

⁶⁴ <https://vink.fr/polypropylene>

⁶⁵ <https://www.juntasindustriales.com/plastiques-techniques-en-polyethylene-pe/>

⁶⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007996022000335>

⁶⁷ <https://www.lasantedanslassiette.com/dans-l-assiette/cuisine-saine/plastiques-alimentaires.html#>

⁶⁸ <https://www.nelinkia.com/blog/applications/defintion-polyethylene-utilisation-plaque-polyethylene.html>

⁶⁹ https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/polypropylene_pp.php4

⁷⁰ https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_borosilicate

⁷¹ <https://jardinage.pagesjaunes.fr/astuce/voir/326378/sable-de-silice>

⁷² <https://www.paprec.com/fr/solutions/les-matieres-que-nous-valorisons/verre/la-classification-des-differents-types-de-verre/>

⁷³ <https://www.chemscience.com/fr/blog/borosilicate-glass-vs-soda-lime-glass-understanding-the-differences>

⁷⁴ <http://www.verrehaget.fr/le-verre-borosilicate/>

⁷⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_borosilicate

⁷⁶ <https://www.soif-de-gourde.fr/blog/gourde-en-verre-cest-quoi-le-verre-borosilicate/>

⁷⁷ <https://www.soif-de-gourde.fr/blog/avantages-et-inconvenients-des-differents-materiaux-dune-gourde-pour-bien-la-choisir/>

⁷⁸ <https://www.paprec.com/fr/solutions/les-matieres-que-nous-valorisons/verre/la-classification-des-differents-types-de-verre/>

⁷⁹ <https://fill-me.ch/fr/blogs/blog/journee-dessai>

Le verre borosilicate est, pour ses propriétés thermiques, chimiques et mécaniques, grandement utilisé dans toutes sortes d'industries comme en chimie ou en ingénierie pour la fabrication d'ustensiles de laboratoire, et dans l'alimentaire en tant que récipients tels que des thermos.⁸⁰

⁸⁰ <https://www.paprec.com/fr/solutions/les-matieres-que-nous-valorisons/verre/la-classification-des-differents-types-de-verre/>

3. Expérience pratique

3.1 But

Le but de cette expérience est de déterminer l'efficacité de la préservation de la chaleur de thermos de matériaux, de volumes et de prix différents.

Pour cela, plusieurs températures sont mesurées à intervalles réguliers : la température du liquide, la température ambiante et la température de la paroi externe.

Les paramètres analysés sont : l'effet du matériau, l'effet du volume et l'effet du prix.

3.2 Thermos testés

Lors de cette expérience, 10 bouteilles isothermes sont testées : 4 en inox, 2 en verre borosilicate et 4 en plastique. Parmi celles en inox, de même que pour celles en plastique, 2 ont un volume de 0.50 L et 2 de 1 L. Pour celles en verre borosilicate, les 2 ont un volume de 0.50 L, faute d'en trouver à 1L. Ces récipients sont numérotés, voir Tableau 1 et Figure 4.

Numéro	Matière.s	Volume	Prix
1	Acier inoxydable	0.50 L	8.-
2	Acier inoxydable	0.50 L	30.-
3	Acier inoxydable	1 L	22.-
4	Acier inoxydable	1 L	47.-
5	Verre borosilicate	0.50 L	19.-
6	Verre borosilicate	0.50 L	25.-
7	Extérieur en matières plastiques et intérieur en verre	0.50 L	27.-
8	Extérieur en matières plastiques et intérieur en verre	0.50 L	22.-
9	Extérieur en matières plastiques et intérieur en verre	1 L	16.-
10	Extérieur en PP et intérieur en verre	1 L	16.-

Tableau 1 : Caractéristiques des thermos testés

Les thermos n°8 et n°9 sont de même modèle. Les numéros 1, 2, 3 et 4 sont référés en tant que « thermos en inox », les 5 et 6 en tant que « thermos en verre » et les 7, 8, 9 et 10 en tant que « thermos en plastique ».



Figure 4 : Les 10 thermos testés pendant l'expérience



Figure 5 : Les 10 bouchons des thermos testés

3.3 Protocole expérimental

Toutes les expériences sont effectuées en intérieur. En voici la marche à suivre :

1. Remplir les 10 thermos à leurs maximums avec de l'eau chauffée à l'aide d'une bouilloire à précisément 94.0°C, température mesurée avec un thermomètre digital ; pour atteindre cette valeur, les laisser ouverts ou les chauffer préalablement si nécessaire ; et les fermer avec leurs bouchons.
2. Enclencher un minuteur de 1 heure et prendre la température ambiante avec un thermomètre digital et la température des parois extérieures avec un thermomètre infrarouge.
3. Quand le minuteur sonne, mesurer la température des parois des thermos avec un thermomètre infrarouge et prendre la température de l'eau avec un thermomètre digital.
4. Retirer l'eau et prendre la température ambiante avec un thermomètre digital.
5. Refaire plusieurs fois cette expérience en ajoutant à chaque fois 1 heure ou plus au chronomètre jusqu'à atteindre 48h.

Pour les thermos en verre, il est fortement possible que, pour que l'eau atteigne la température de 94.0°C, il faille chauffer les parois internes avant d'y verser l'eau chaude de l'expérience. En effet, si l'eau est directement versée alors que ces parois sont à la même température que celle ambiante, la température de l'eau n'atteint pas la valeur souhaitée. Il faut donc préalablement verser de l'eau chaude dans ces thermos et la laisser dans le récipient pendant quelques instants avant de la déverser ailleurs.

L'eau utilisée est à 94,0°C et non à 100°C, point d'ébullition de l'eau. Ceci est dû au fait que l'eau chauffée avec une bouilloire refroidit lorsqu'elle est versée dans un thermos. 94.0°C est donc la température moyenne la plus haute que l'on peut obtenir.

3.4 Incertitudes de mesure

Les instruments utilisés pendant cette expérience présentent des incertitudes définies suivant :

Instrument de mesure	Mesures	Incertitudes	Définition des incertitudes
Thermomètre digital	Température ambiante et température de l'eau des thermos	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	Incertitude du fabricant : 0.8°C Précision de la mesure
Thermomètre infrarouge	Température des parois des thermos	$\pm 3^{\circ}\text{C}$	Incertitude du fabricant : 3°C
Minuteur	Temps de repos des thermos	$\pm 30\text{s}$	Réaction « fermer le thermos et déclencher le minuteur » : 15s Réaction « arrêter le minuteur et ouvrir le thermos » : 15s

Tableau 2 : Caractéristiques des instruments utilisés

Les incertitudes concernant le thermomètre digital et le minuteur ne seront pas pris en compte car négligeables comparé aux données récoltées pour cette expérience.

3.5 Résultats et analyse

Cette expérience s'est déroulée sur 48h bien que l'eau de la majorité des thermos soit encore chaude à ce moment-là. En effet, les données récoltées pendant ces 48h ont été utilisées pour en faire des graphiques qui ont permis de répondre au but de l'expérience.

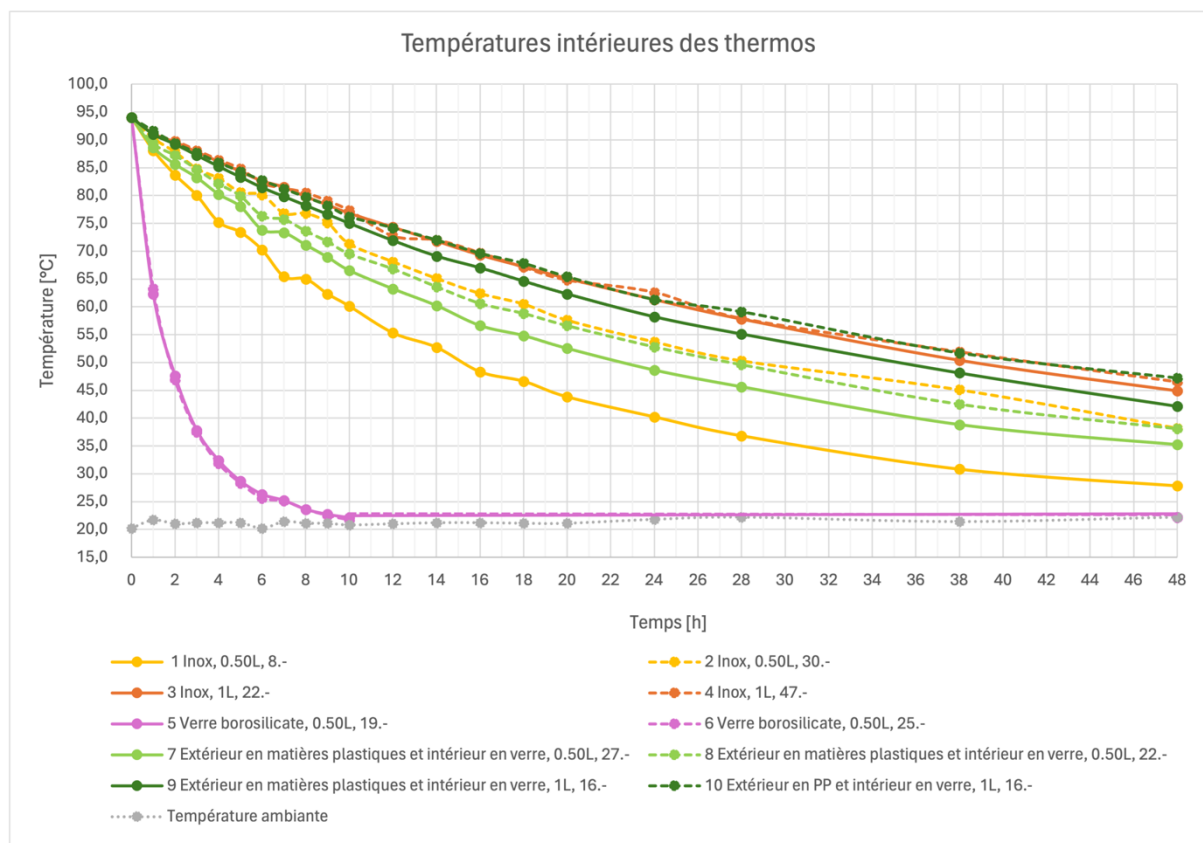
Dans cette partie, les températures mesurées pendant l'expérience (citées aux points 3.3 Protocole expérimental et 3.4 Incertitudes de mesure) soit les températures ambiante, de l'eau et des parois seront commentées et les paramètres (énumérés au point 3.1 But) soit les effets du matériau, du volume et du prix seront analysés. Afin d'analyser ces paramètres, une grandeur a été fixée, notée $t_{1/2}$. Elle correspond au temps au bout duquel la température initiale du liquide à l'intérieur des thermos baisse de moitié. La différence entre les gourdes et les bouteilles isothermes, ainsi que les bouchons seront également brièvement étudiés.

3.5.1 Température ambiante

Les données récoltées sur la température ambiante grâce au thermomètre digital indiquent que la température ambiante est, pendant l'entièreté de l'expérience, de $21 \pm 1^\circ\text{C}$. Cette expérience a été effectuée à l'intérieur d'un appartement, ainsi la température ambiante est maintenue par le thermostat du chauffage à une température plus ou moins constante. Cette température ne varie alors que très peu, ses variations n'ont donc pas d'influence sur la température intérieure des thermos. Sur tous les graphiques présentés ultérieurement, la température ambiante au temps 0 est une moyenne de toutes les températures ambiantes initiales récoltées durant l'expérience.

3.5.2 Températures internes

Le Graphique 1 est un graphique général qui présente les valeurs de température de l'eau contenue dans les 10 thermos sur 48h où, au temps 0, la température du liquide est partout à 94°C :



Graphique 1 : Températures du liquide contenu dans les 10 thermos sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C

Le Graphique 1 fait ressortir deux constats généraux sur le transfert thermique observé durant cette expérience : l'importante modification des températures de plusieurs milieux lors d'un fort écart entre celles-ci et leur rapprochement au fil du temps.

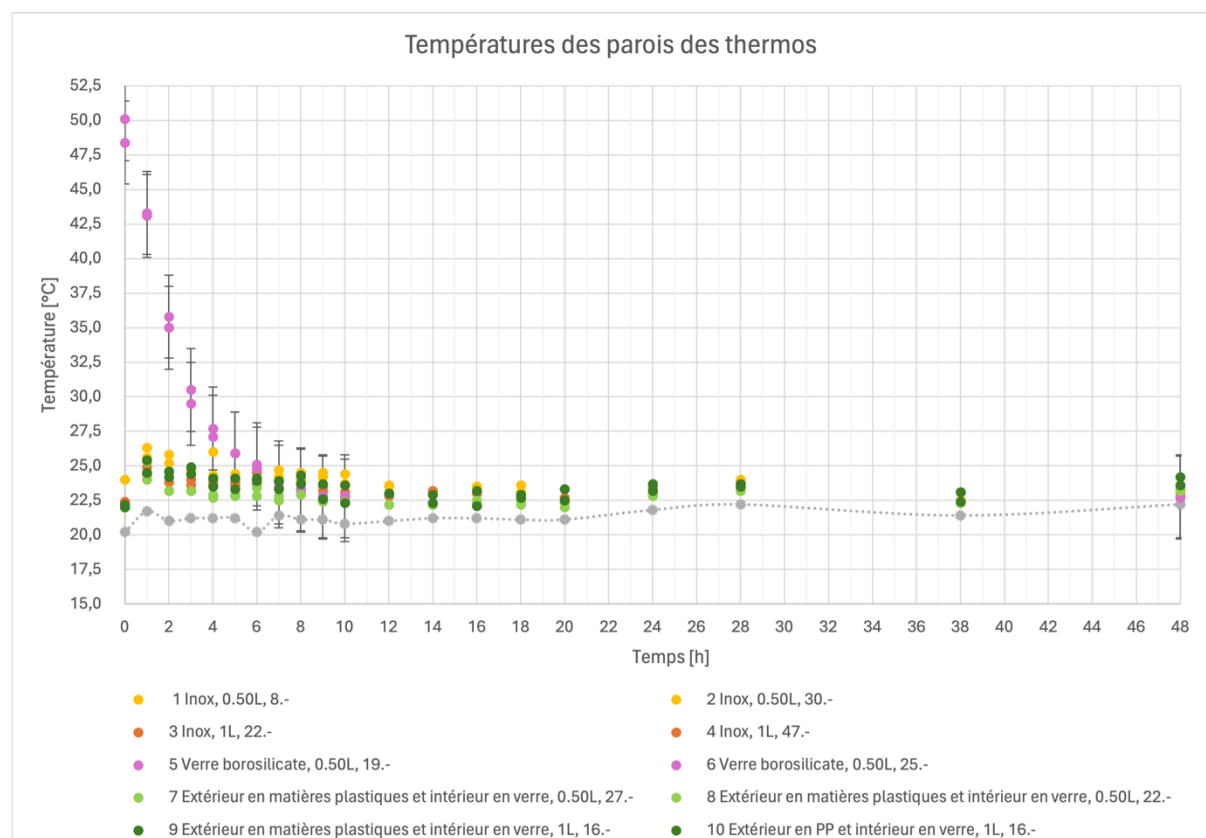
Comme indiqué sur le Graphique 1, la température de l'eau baisse plus rapidement au début de l'expérience que vers les 48h. Ceci est dû à la conduction thermique qui est plus importante lorsqu'il y a une grande différence de température entre deux milieux (comme vu au point 2.2.1 Conduction thermique de la théorie). Au début de l'expérience, la température du liquide est fortement supérieure à la température ambiante. Il y a donc un important transfert de chaleur vers l'extérieur, ce qui fait diminuer rapidement la température du liquide. Plus l'expérience avance dans le temps et moins cette différence est grande. Le transfert de chaleur par conduction est alors de moins en moins important, résultant à une baisse de la température interne de moins en moins rapide.

De plus, la température interne de tous les thermos tend vers la température ambiante. En effet, le transfert de chaleur par conduction persiste tant qu'il y a une différence de température entre les deux milieux. Cette différence devient alors de plus en plus minime jusqu'à être nulle quand les deux milieux ont la même température. Ce phénomène peut notamment être observé sur le Graphique 1 où les courbes de températures des thermos en verre tendent de plus en plus vers la température ambiante au fil du temps.

Le Graphique 1 sera repris et modifié ultérieurement afin de permettre l'analyse du paramètre souhaité.

3.5.3 Températures des parois

Le Graphique 2⁸¹ est un graphique général, d'échelle de température différente du Graphique 1, qui traite des mesures des températures des parois des 10 thermos sur 48h où l'incertitude de mesure de $\pm 3^\circ\text{C}$ (définie au point 3.4 Incertitudes de mesure) est représentée sur les données des récipients en verre :



Graphique 2 : Températures des parois des 10 thermos sur 48 heures

⁸¹ Les températures des parois des thermos de points de même couleur sont assez proches, il n'est donc pas nécessaire de les distinguer.

Les deux constats du Graphique 1 (au point 3.5.2 Températures internes) ressortent également sur le Graphique 2. Ainsi, les températures des parois baissent plus rapidement au début de l'expérience et tendent vers la température ambiante.

Le premier fait peut être observé, sur le Graphique 2, à l'aide des thermos n°5 et n°6. Ces récipients ont préalablement dû être chauffés pour qu'ils puissent atteindre la température interne initiale adéquate (comme indiqué au point 3.3 Protocole expérimental). Pendant que la paroi interne de ces thermos chauffait, des pertes de chaleur vers l'extérieur par conduction (phénomène expliqué dans les notions théoriques au point 2.2.1 Conduction thermique) ont eu lieu, chauffant ainsi leur paroi externe. Lorsque l'eau à 94°C a été versée et l'expérience enclenchée, une partie de la chaleur a été perdue par conduction ce qui a également chauffé la paroi externe. Ceci explique donc la température initiale élevée des n°5 et n°6. Sur le Graphique 2, l'écart entre les températures des parois des thermos en verre et des autres récipients est initialement très grand, mais diminue au fil du temps. Cet écart représente les pertes de chaleur par conduction qui s'effectuent à cause de la grande différence de température entre la paroi externe des bouteilles isothermes et l'air ambiant, différence due au chauffage préalable des contenants en verre et à la température du liquide initialement de 94.0°C. Au début, les pertes sont importantes car l'eau est très chaude, mais avec le temps la température de l'eau diminue, faisant également diminuer les pertes de chaleur et ainsi baisser la température des parois.

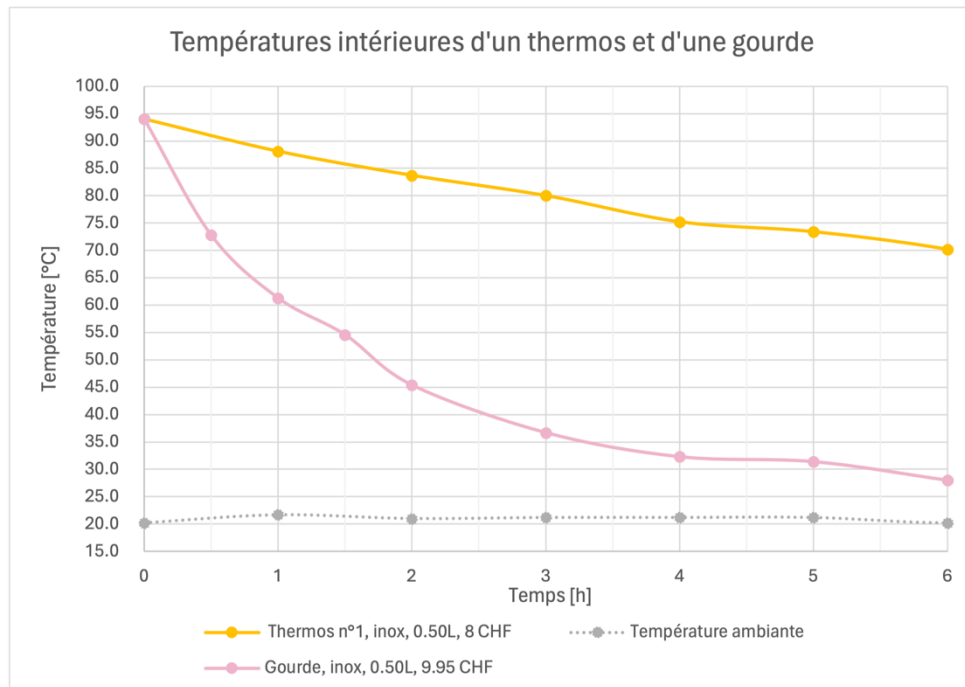
Le second fait est démontré, sur le Graphique 2, par tous les thermos, dont les températures des parois tendent à rejoindre la température ambiante. Ce phénomène est dû à la conduction thermique qui ne cesse qu'au moment où les deux milieux sont à la même température.

Les incertitudes présentent sur le Graphique 2 indiquent que les mesures ne sont pas très précises mais sont cohérentes entre elles.

3.5.4 Gourde simple ou thermos

Avant d'analyser les effets du matériau, volume et prix sur l'efficacité des thermos, il serait utile de comprendre ce qui les différencie du point de vue de la préservation de la chaleur des simples gourdes, ces deux récipients étant très souvent confondus dans le langage courant. Comme rapidement indiqué au point 2.3 Thermos de la théorie, les thermos se différencient des simples gourdes par la présence d'une double paroi et d'un vide intercalaire dans leur structure. Les gourdes sont alors uniquement des espaces de stockage tandis que les thermos servent également à isoler les transferts thermiques pour minimiser la perte de chaleur du liquide qu'ils contiennent.

Le Graphique 3, d'échelle de temps différente des autres graphiques, démontre cette différence d'isolation thermique entre une gourde et un thermos, tous deux en acier inoxydable, de même volume et de prix presque identiques :



Graphique 3 : Températures internes d'un thermos et d'une gourde sur 6h

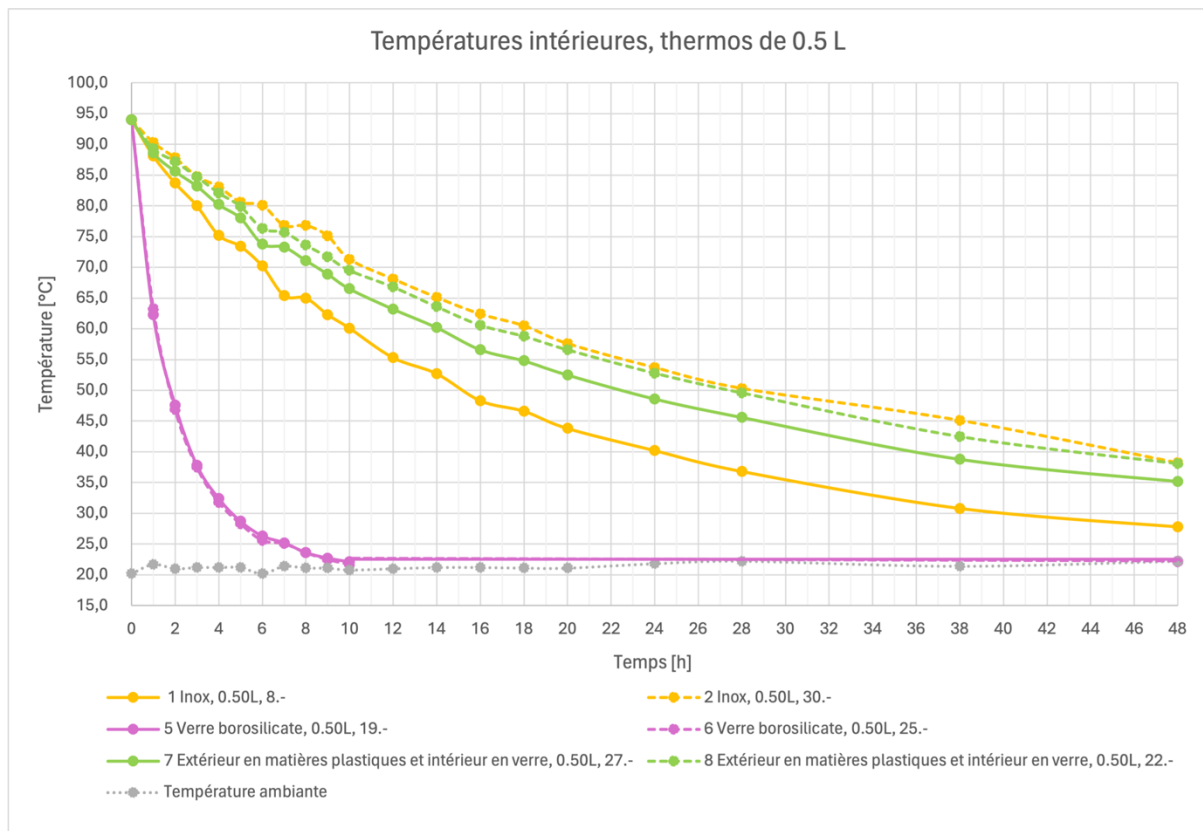
Le Graphique 3 permet de prouver le fait que les gourdes et les thermos ont une fonction clairement différente. En effet, $t_{1/2}$ du thermos est de 17h tandis que celui de la gourde est d'un peu moins de 2h. Cette grande différence de préservation de la chaleur, due à l'absence de la double paroi et du vide dans les gourdes, explique en elle-même que l'objectif principal des thermos est de conserver la chaleur tandis qu'il est de stocker des liquides pour les gourdes.

3.5.5 Effet du matériau

Dans cette partie, seul le paramètre du matériau est pris en compte. Pour cela, deux graphiques sont analysés, séparant ainsi les thermos de 0.5 L de ceux de 1 L afin de mieux observer l'effet du matériau.

3.5.5.1 Thermos de 0.5 L

Le Graphique 4 traite des mesures des températures de l'eau contenue uniquement dans les thermos de 0.5 L sur 48h :



Graphique 4 : Températures du liquide contenu dans les thermos de 0.5 L sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C

Le Graphique 4 met en lumière deux faits sur la construction des thermos, dont le matériau utilisé : l'inefficacité des thermos en verre borosilicate et la similitude de l'efficacité de ceux en inox et en plastique.

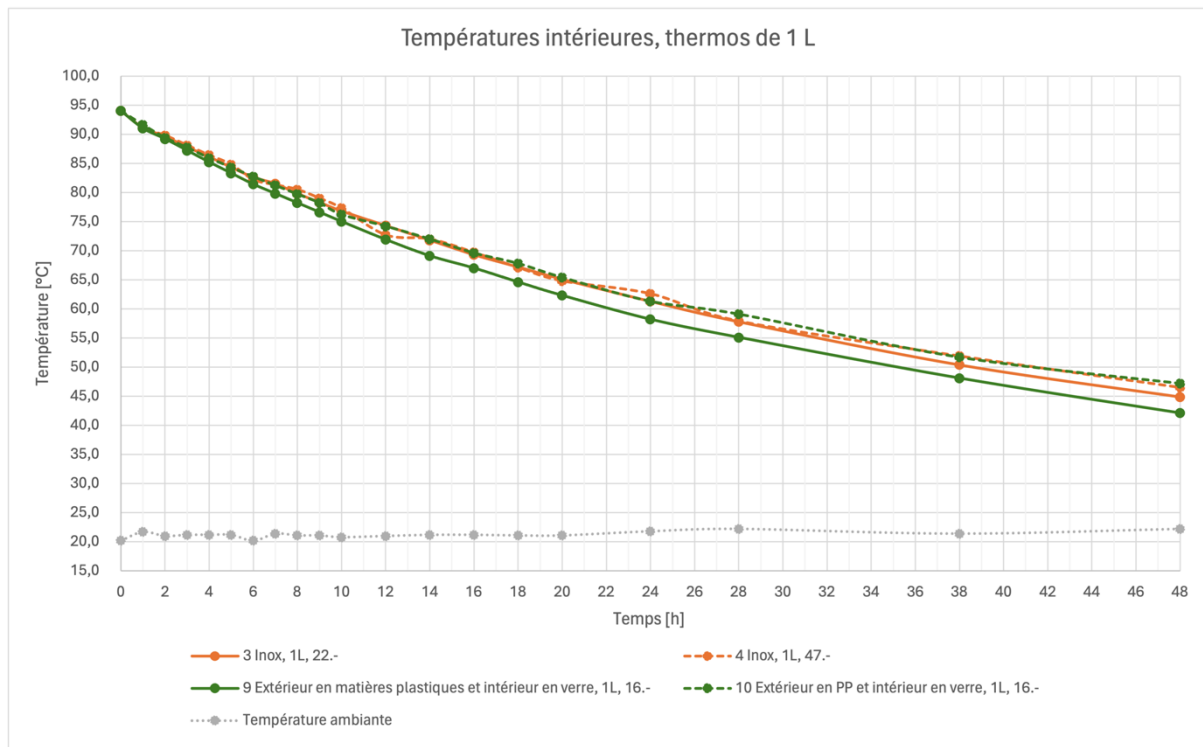
Premièrement, comme indiqué sur le Graphique 4, les deux courbes de températures intérieures des thermos en verre descendent beaucoup plus rapidement que celles des autres matériaux. En effet, $t_{1/2}$ des contenants en verre est de 2h, contre en moyenne 27h pour les autres. La température ambiante est presque atteinte pour ceux en verre en une dizaine d'heures, alors qu'elle n'est pas atteinte pour les quatre autres au bout de 48h. Les courbes des deux thermos en verre étant pratiquement les mêmes, cela révèle bien l'inefficacité de leur structure pour préserver la chaleur. Ceci peut également être observé sur le Graphique 2 où les points des températures des parois des récipients n°5 et n°6 sont presque identiques aux deux courbes de températures de l'eau du Graphique 4, ce qui indique une perte de chaleur importante à travers les parois.

Pourtant, le matériau principal utilisé dans les thermos en verre est le verre borosilicate qui possède de bonnes propriétés thermiques (comme vu dans la partie théorique au point 2.4.3 Verre borosilicate). Ce matériau n'est d'ailleurs pas moins efficace à la préservation de la chaleur que l'acier inoxydable ou certains types de matières plastiques (décrits dans les notions théoriques aux points 2.4.1 Acier inoxydable et 2.4.2 Matières plastiques). Or cette information ne coïncide pas du tout avec les résultats trouvés. Ces résultats, pour le moins étranges, ne seraient alors pas l'œuvre du matériau lui-même mais de la structure des thermos. En effet, les thermos en verre ne présentent pas de paroi réfléchissante contrairement à ceux en inox et en plastique qui préservent beaucoup mieux la chaleur. L'utilisation d'une paroi réfléchissante (élément décrit au point 2.3 Thermos de la théorie) qui sert à réfléchir les rayonnements de chaleur provenant du liquide, est alors sûrement un choix judicieux pour préserver au mieux la chaleur dans une bouteille isotherme et ne doit pas être négligé lors de leur fabrication. Les thermos en verre transparent sont alors plus un choix esthétique que pratique.

Deuxièmement, comme en témoigne également le Graphique 4, les bouteilles isothermes en plastique et en inox sont quasiment aussi efficaces les unes que les autres. Cependant le n°1 est beaucoup moins efficace que le n°2 qui a pourtant les mêmes caractéristiques du point de vue de sa structure. Ceci est dû à son prix, nettement inférieur que le n°2, c'est pour cette raison que sa courbe n'est pas analysée ici, mais uniquement dans la partie 3.5.7 Effet du prix. Ainsi sans le prendre en compte, le duo plastique/verre présent dans les bouteilles isothermes en plastique et l'acier inoxydable de celles en inox sont des matériaux aussi efficaces l'un comme l'autre pour préserver la chaleur.

3.5.5.2 Thermos de 1 L

Le Graphique 5 traite des mesures des températures de l'eau contenue uniquement dans les thermos de 1 L sur 48h :



Graphique 5 : Températures du liquide contenu dans les thermos de 1 L sur 48 heures, avec une température initiale de 94,0°C

Le second constat du Graphique 4 peut également être observé sur le Graphique 5 où ni l'acier inoxydable ni le duo plastique/verre ne se distingue l'un de l'autre. $t_{1/2}$ des thermos en inox est de 43h pour le n°3 et 46h pour le n°4 tandis qu'elle est, pour ceux en plastique, de 39h pour le n°9 et 48h pour le n°10. Soit le plus et le moins performant des thermos, sans compter ceux en verre, sont, cette fois-ci, ceux en plastique. Cela concorde avec l'idée que ces deux configurations de matériaux sont tout aussi efficaces pour préserver la chaleur dans une bouteille isotherme.

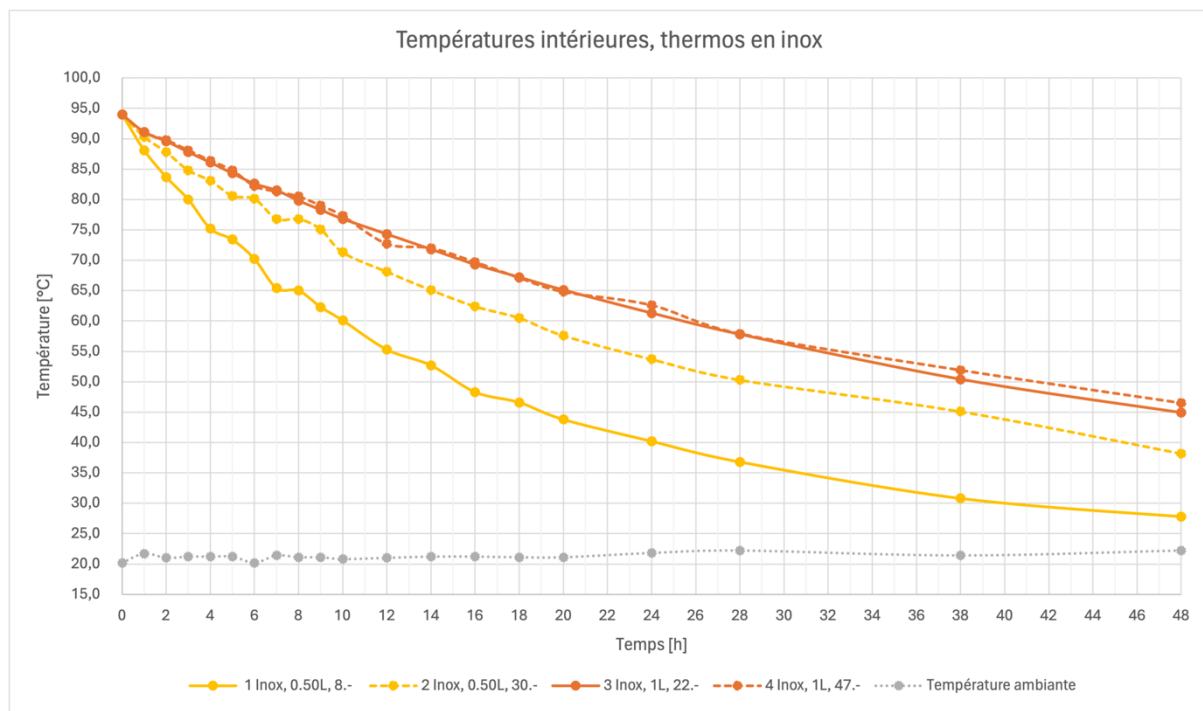
En conclusion, la construction du thermos, notamment son matériau, est un facteur déterminant de son efficacité à isoler la chaleur. Parmi les trois combinaisons de matériaux testés, l'acier inoxydable et le duo verre/plastique présentent une bonne isolation thermique comparé aux thermos en verre borosilicate transparent qui ne préservent pas bien la chaleur. Ceci n'est sûrement pas dû au matériau lui-même, car il présente des propriétés thermiques efficaces, mais plutôt à l'absence de parois réfléchissantes dans la structure de ces récipients.

3.5.6 Effet du volume

Dans cette partie, seul le paramètre du volume est pris en compte. Pour cela, deux graphiques sont analysés, séparant ainsi les thermos en inox de ceux en plastique afin de mieux observer l'effet du volume. Les thermos en verre ne sont pas analysés dans cette partie, car il n'y en a pas de volumes différents.

3.5.6.1 Thermos en inox

Le Graphique 6 traite des mesures des températures de l'eau contenue uniquement dans les thermos en inox sur 48h :



Graphique 6 : Températures du liquide contenu dans les thermos en acier inoxydable sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C

Le Graphique 6 met en évidence le fait qu'un plus grand volume préserve mieux la chaleur.

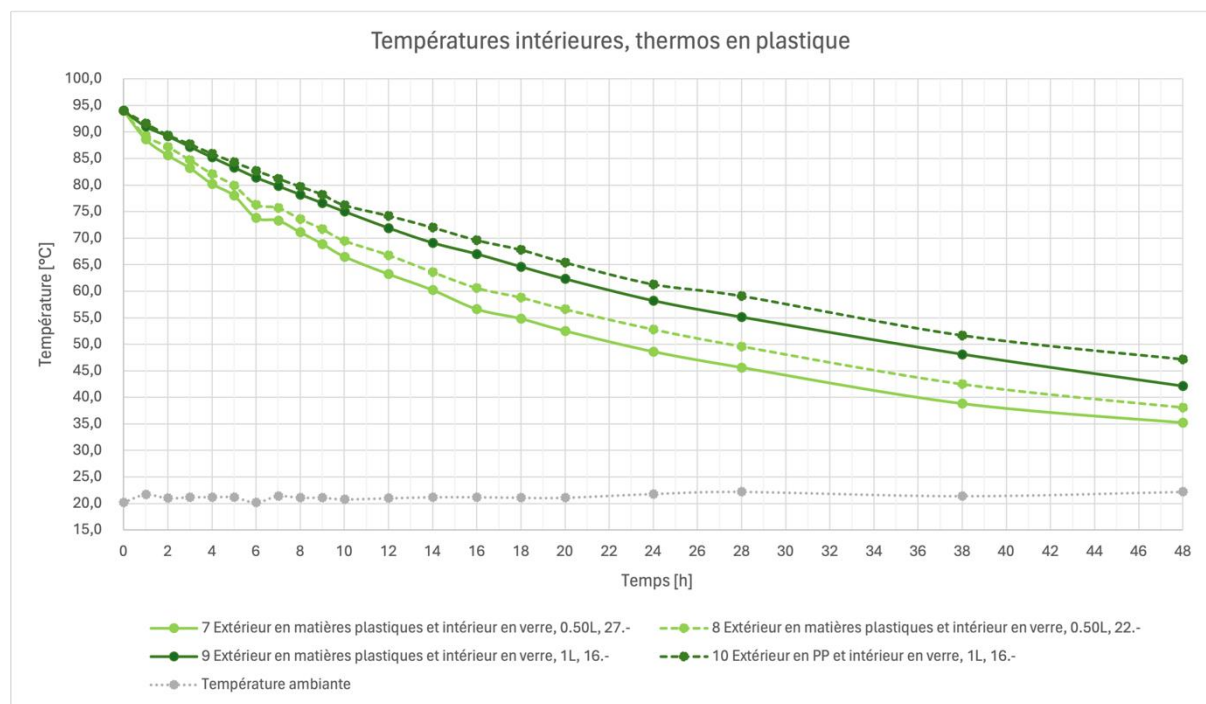
Effectivement, il y a, sur le Graphique 6, une très nette distinction, visible directement sur ce graphique, entre les thermos en inox de 0.5 L et de 1 L. Les deux récipients présentant un plus grand volume, soit de 1L, sont plus efficaces pour préserver la chaleur de l'eau que ceux de 0.5L. Ceci peut être également remarqué avec $t_{1/2}$ des thermos de 0.5 L qui est de 17h et 34h pour les n°1 et n°2, tandis que dans ceux de 1L, $t_{1/2}$ est de 43h pour le n°3 et 46h pour le n°4.

Si la courbe du thermos n°1 est nettement plus basse que les autres, c'est parce que son prix est fortement différent des autres bouteilles. Comme brièvement expliqué au point 3.5.5.1 Thermos de 0.5 L, cette courbe n'est analysée que dans la partie 3.5.7 Effet du prix.

Ainsi, les deux bouteilles isothermes les plus performantes sont celles avec un volume plus grand. Il y a également un écart minimal non-négligeable de 9h, soit 21% d'augmentation, entre celles de même matériau mais de volumes différents.

3.5.6.2 Thermos en plastique

Le Graphique 7 traite des mesures des températures de l'eau contenue uniquement dans les thermos en plastique sur 48h :



Graphique 7 : Températures du liquide contenu dans les thermos avec l'extérieur en plastique et l'intérieur en verre sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C

Le Graphique 7 indique également, comme le Graphique 6, le fait qu'un thermos de plus grand volume préserve mieux la chaleur.

Il y a, sur le Graphique 7, une nette distinction entre les récipients de volumes différents, qui peut être observée directement sur le graphique ou en comparant $t_{1/2}$. Cette grandeur est, pour les thermos de 0.5 L, de 26h pour le n°7 et 31h pour le n°8, et pour ceux de 1 L de 39h pour le n°9 et 48h pour le n°10. Les bouteilles de 1L sont alors plus efficaces pour préserver la chaleur avec un écart minimal de 8h avec celles de 0.5L, soit 21% d'augmentation, ce qui est à une heure près de l'écart présent sur le Graphique 6.

La différence entre l'efficacité de préservation de la chaleur de ces deux volumes différents peut s'expliquer par le rapport surface/volume. En effet, en raison de la forme cylindrique du thermos et du fait que si son volume augmente, ce n'est pas uniquement sa hauteur qui augmente mais également son diamètre (pour éviter d'avoir un récipient trop haut), lorsqu'un thermos a un plus grand volume, son rapport surface/volume diminue. Ceci est dû au fait que comme sa hauteur et son diamètre augmentent tous les deux, sa surface est au final plus petite que si uniquement sa hauteur s'amplifiait. Son volume, quant à lui, reste le même. Cela étant, lorsque le volume double, la surface augmente mais pas d'un facteur 2, son rapport surface/volume diminue donc. Ainsi, un thermos de 1L a proportionnellement moins de surface d'échange par rapport à un thermos de 0.5L et préserve donc mieux la chaleur.

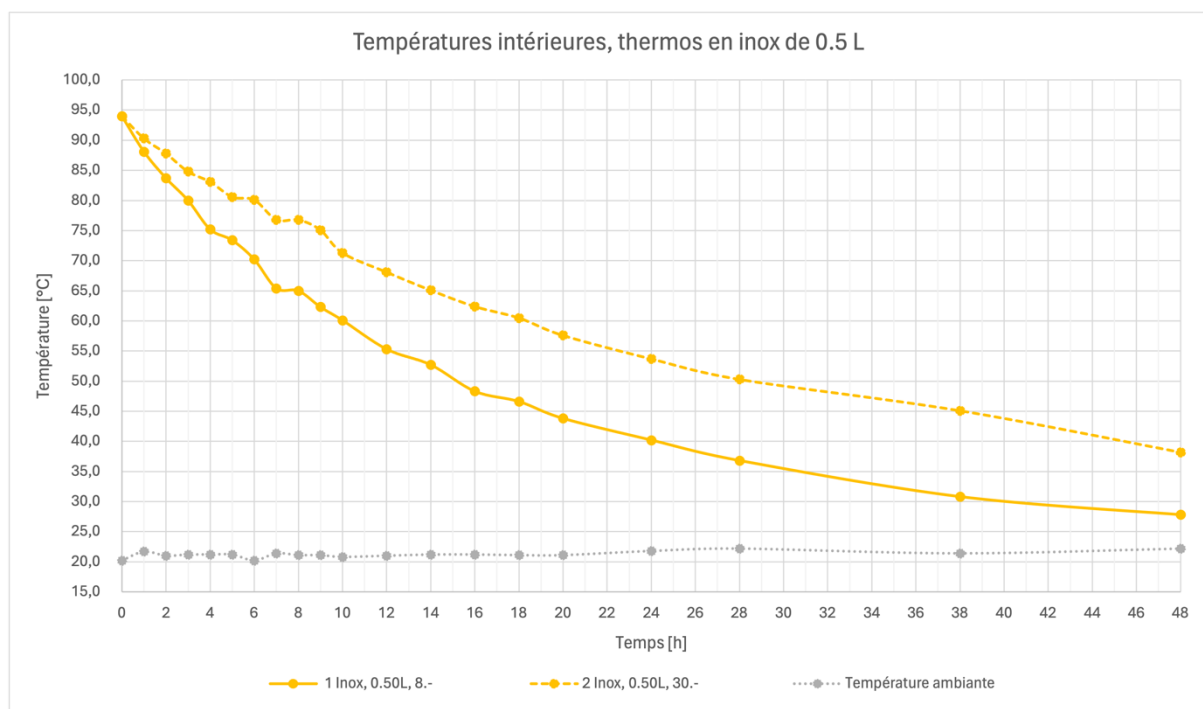
En conclusion, le volume a un impact conséquent sur la préservation de la chaleur. En effet, dû au rapport surface/volume qui diminue lorsque le volume augmente, les thermos de 1 L présentent, comme en témoignent le Graphique 6 et le Graphique 7, des températures intérieures supérieures à ceux de 0.5 L et ce, quel que soit le matériau utilisé.

3.5.7 Effet du prix

Dans cette partie, seul le paramètre du prix est pris en compte. Pour cela, deux graphiques sont analysés, séparant ainsi des thermos de même volume, même matériau mais différents prix afin de mieux observer l'effet du prix. Les quatre thermos analysés sont en inox car ce matériau domine dans ce marché, les prix des thermos peuvent alors fortement varier.

3.5.7.1 Thermos en inox de 0.5 L

Le Graphique 8 traite des mesures des températures de l'eau contenue uniquement dans les thermos en inox de 0.5 L sur 48h :



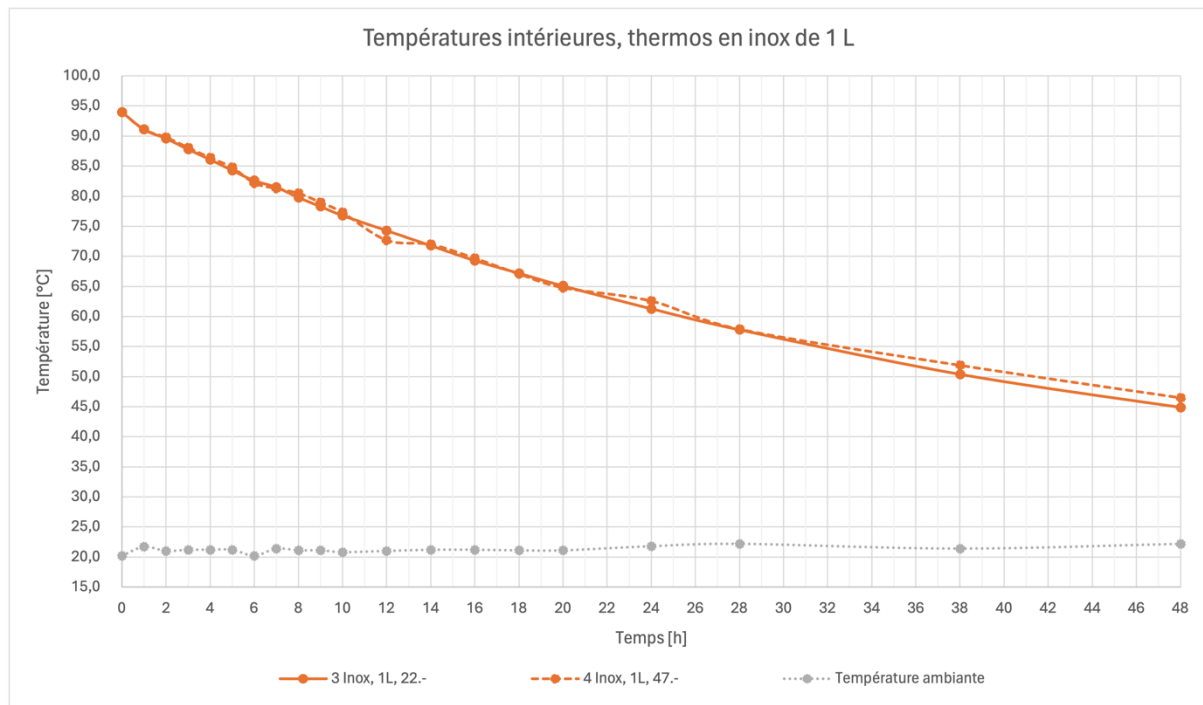
Graphique 8 : Températures du liquide contenu dans les thermos en inox de 0.5 L sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C

Suivant le Graphique 8, le prix a un rôle à jouer dans la qualité d'un thermos.

En effet, sur le Graphique 8, le thermos n°1 a un prix de 8.- tandis que le n°2 de 30.-, soit presque le quadruple du n°1. Comme le montre ce graphique, le n°2, dont $t_{1/2}$ est de 34h, est nettement plus efficace pour préserver la chaleur que le n°1, dont $t_{1/2}$ est de 17h. Cet écart de 17h, soit du simple au double, qui n'est pas dû au volume ou au matériau, car tous deux présentent les mêmes caractéristiques de ce point-de-vue-là, est sûrement dû au prix. Ainsi, selon le Graphique 8, un thermos de meilleure qualité a un prix plus élevé.

3.5.7.2 Thermos en inox de 1 L

Le Graphique 9 traite des mesures des températures de l'eau contenue uniquement dans les thermos en inox de 1 L sur 48h :



Graphique 9 : Températures du liquide contenu dans les thermos en inox de 1 L sur 48 heures, avec une température initiale de 94,0°C

Contrairement au Graphique 8 qui insinue que le prix a un rôle conséquent à jouer dans la qualité d'un thermos, le Graphique 9 démontre que le prix n'a pas ou très peu d'importance.

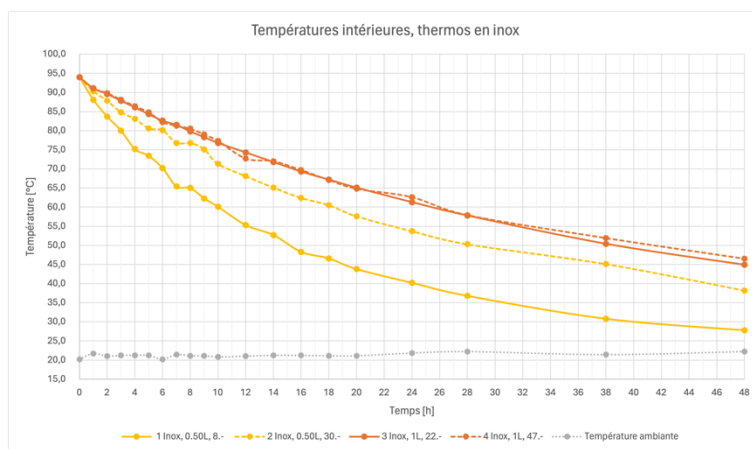
Sur le Graphique 9, le n°4 a un prix de 47.-, soit le double du n°3 à 22.-. Pourtant, $t_{1/2}$ est de 46h pour le n°4 et de 43h pour le n°3, une différence d'à peine 3h, soit 6,5% d'augmentation, qui est un écart minime si comparé à la durée totale de l'expérience. Ces deux bouteilles isothermes préservent la chaleur quasiment aussi efficacement l'une que l'autre malgré leur prix fortement différent. Ainsi, selon le Graphique 9, le prix n'est pas un facteur important à prendre en compte pour la qualité d'un thermos.

En conclusion, le Graphique 8 et le Graphique 9 démontrent deux faits différents quant à l'influence du prix sur la préservation de la chaleur dans les thermos. Celui-ci a de l'importance d'après le Graphique 8 mais n'en a pas d'après le Graphique 9. Ceci peut sûrement s'expliquer par le fait qu'un thermos à prix trop bas ne préserve pas bien la chaleur. En effet, le n°1, sur le Graphique 8, présente le prix le plus bas, de 8.-, parmi tous ceux testés. Les moins chers après lui sont les n°9 et n°10 à 16.- soit le double du n°1 et ils préservent efficacement la chaleur, comme indiqué sur le Graphique 7. Un prix trop bas peut signifier que le produit

est de mauvaise qualité. Dans le cas des récipients isothermes cela peut notamment se traduire par un vide plus ou moins important, des parois plus ou moins épaisses et des bouchons plus ou moins hermétiques, qui sont les éléments principaux de leur constitution (comme vu au point 2.3 Thermos dans les notions théoriques). Les fabricants n'indiquent pas la structure et composition exacte de leurs produits, le consommateur ne peut donc pas savoir exactement la qualité du thermos qu'il achète. Cependant, les deux constats des Graphique 8 et Graphique 9 indiquent qu'un prix trop bas, soit près des 8.-, peut avoir des conséquences négatives sur la préservation de la chaleur. Hormis ce cas-là, le prix n'a pas ou peu d'importance.

3.5.8 Les bouchons

Le bouchon est un élément important de la structure du thermos qui participe à la préservation de la chaleur (comme indiqué au point théorique 2.3 Thermos). Il est souvent équipé de joints en plastique pour permettre une fermeture hermétique. L'efficacité du couvercle peut faire la différence entre une bouteilles isotherme de bonne ou mauvaise qualité. Cette différence peut notamment s'observer avec les thermos en inox dont les plus performants possèdent des bouchons de meilleure qualité :



Graphique 10 : (reprise du Graphique 6) Températures du liquide contenu dans les thermos en acier inoxydable sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°



Figure 6 : (reprise de la Figure 5) Les 4 bouchons des thermos en inox testés

Les thermos en inox les plus efficaces à préserver la chaleur sur le Graphique 10 sont : le n°2 pour ceux de 0.5 L et le n°4 pour ceux de 1 L. Ceci concorde avec la qualité des bouchons de la Figure 6, qualité démontrée par la taille du bouchon et de ses joints en plastique, où les plus performants semblent être également les n°2 et n°4.

En plus de leur intérêt hermétique, il est intéressant de parler de leur intérêt pratique, même si ce dernier n'a pas été testé durant l'expérience. Un bouchon peut en effet être hermétique sans pour autant être pratique à utiliser. Leur facilité d'utilisation dépend de pleins de facteurs, souvent propres à chaque personne, mais dont les principaux sont : la facilité de vissage/dévisage qui permet de manipuler facilement le bouchon en ayant les mains mouillées ou froides, le débit plutôt lent du liquide qui évite les brûlures ou tâches en cas de mouvements brusques et une ouverture étroite dans le bouchon qui sert non seulement à mieux garder la chaleur du liquide car le bouchon tout entier n'a pas besoin d'être retiré à chaque ouverture, mais aussi à éviter les brûlures ou tâches. Le bouchon n°2 possède cette petite ouverture, comme le montre la Figure 7.

Ainsi, les facteurs hermétiques et pratiques des bouchons sont effectivement une partie importante à considérer lors de l'achat d'un thermos de bonne qualité.



Figure 7 : Vue de haut du bouchon n°2

4. Conclusion

Ce Travail de Maturité, dont la problématique est « Analyse des différents composants des thermos et leur influence sur la qualité de l'isolation thermique », a permis d'acquérir une meilleure compréhension du fonctionnement et de la structure des thermos ainsi que de leur capacité à préserver la chaleur.

La première partie de ce TM, soit la partie théorique, a abordé plusieurs facettes importantes à la compréhension du mécanisme derrière la préservation de la chaleur dans les bouteilles isothermes.

Premièrement, les modes de transfert de chaleur ont été expliqués : la conduction, produite par le contact entre des solides sans échange de matière, la convection, causée par une différence de masse volumique entre les particules d'un liquide ou gaz, et les rayonnements, propagés via les ondes électromagnétiques et pouvant s'effectuer dans le vide.

Deuxièmement, les éléments de la structure des thermos ont été décrits : la paroi externe résistante aux impacts, la double paroi dont le vide intercalaire empêche les transferts par conduction et convection, les parois réfléchissantes faisant obstacle aux rayonnements thermiques, et le bouchon qui évite la perte de chaleur par convection.

Finalement, les principaux matériaux avec lesquels les thermos sont fabriqués ont été commentés : l'acier inoxydable, les matières plastiques et le verre borosilicate sont tous trois de mauvais conducteurs thermiques et de bons, voire d'excellents, résistants aux chocs mécaniques et thermiques.

La seconde partie, soit l'expérience pratique, dont le but était de comparer l'efficacité de la préservation de la chaleur de thermos de matériaux, de volumes et de prix différents, a été réalisée sur 48h à l'aide de 10 thermos dont la moitié de 0.5L et l'autre de 1L et dont 4 sont en inox, 4 avec la paroi externe en matières plastiques et la paroi interne en verre, et 2 en verre borosilicate. Cette expérience a permis de comprendre l'effet du matériau, du volume et du prix sur l'efficacité des thermos à garder la chaleur.

Du côté des matériaux, les thermos en inox et en plastique sont tous deux très performants, tandis que ceux en verre borosilicate transparent ne le sont pas. Ces derniers ne présentent pas de parois réfléchissantes contrairement à tous les autres ce qui pourrait expliquer leur mauvaise isolation thermique. Les thermos en verre sont alors plus un choix esthétique que pratique.

Du côté du volume, les thermos de plus grand volume sont plus efficaces que ceux de plus petit volume. Ceci est dû au rapport surface/volume qui indique qu'un thermos de 1L a proportionnellement moins de surface d'échange qu'un thermos de 0.5L ce qui lui permet de mieux préserver la chaleur.

Du côté du prix, cette expérience a montré qu'un prix trop bas, près des 8.-, a de fortes chances de signifier une mauvaise qualité du produit et donc une mauvaise isolation thermique. En dehors de ce cas-là, le prix ne semble pas avoir d'impact significatif sur la qualité d'un thermos.

L'expérience a également démontré l'importance de la double paroi et du vide intercalaire grâce à la comparaison de la préservation de la chaleur entre une gourde et un thermos, la structure des gourdes ne comportant pas cet élément, ainsi que l'importance des bouchons sur la qualité de l'isolation thermique, les bouchons de plus grandes tailles accompagnés de joints en plastique étant les plus performants.

Ainsi, les thermos les plus performants à préserver la chaleur combinent une structure adéquate avec des parois réfléchissantes, une composition en acier inoxydable ou en duo plastique/verre, un grand volume, un prix raisonnable en dessus des alentours de 8.-, ainsi que des bouchons de grande taille hermétiques grâce à des joints en plastique.

5. Bibliographie

Article de revue

FOURNIER Elora, ETIENNE-MESMIN Lucie, BLANQUET-DIOT Stéphanie et al., « Microplastiques dans notre alimentation: un focus sur la santé intestinale », *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 57 (4), 01.08.2022, pp. 270-283. En ligne: <<https://doi.org/10.1016/j.cnd.2022.03.001>>.

Articles d'encyclopédie

« Bouteille isotherme », in: *Wikipédia*, 26.03.2024. En ligne: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Bouteille_isotherme&oldid=213683856>, consulté le 01.08.2024.

« Polyéthylène », in: *Wikipédia*, 04.06.2024. En ligne: <<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Poly%C3%A9thyl%C3%A8ne&oldid=215674178>>, consulté le 18.07.2024.

« Transfert thermique », in: *Wikipédia*, 29.04.2024. En ligne: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Transfert_thermique&oldid=214678314>, consulté le 10.01.2024.

« Verre borosilicate », in: *Wikipédia*, 28.03.2024. En ligne: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Verre_borosilicate&oldid=213758867>, consulté le 19.07.2024.

Entrées de dictionnaires

« thermos - Définitions, synonymes, prononciation, exemples | Dico en ligne Le Robert », in: *Le Robert*. En ligne: <<https://dictionnaire.lerobert.com/definition/thermos>>, consulté le 09.04.2024.

« thermos - Genre du mot - Dictionnaire Orthodidacte », in. En ligne: <<https://dictionnaire.orthodidacte.com/article/genre-thermos>>, consulté le 01.08.2024.

Pages web

Apprentis pas Sages - Membres du Réseau Culture Science Sud, « Le mystère de la bouteille Thermos », <<https://www.echosciences-paca.fr/articles/le-mystere-de-la-bouteille-thermos>>, consulté le 10.01.2024.

DELHALT Patrick, « Qu'est-ce que la chaleur? », <<https://science.lu/fr/physique/quest-ce-que-chaleur>>, consulté le 24.02.2024.

DELUZARCHE Céline, « Chaleur et température : quelle différence ? », *Futura*, <<https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/energie-chaleur-temperature-difference-11779/>>, consulté le 24.02.2024.

MAYER Nathalie, « Définition | Acier inoxydable - Inox | Futura Sciences », *Futura*, 03.09.2017, <<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-acier-inoxidable-16677/>>, consulté le 16.07.2024.

PARIS Emmanuelle, « Le Thermos : tout ce qu'il faut savoir », *Cotemaison.fr*, 07.08.2012, <<https://www.cotemaison.fr/chaine-d/deco-design/le-thermos-tout-ce-qu-il-faut-savoir-15334.html>>, consulté le 01.08.2024.

SAINT-BLANQUET Claude, « La loi de Fourier. Les équations de la chaleur », <https://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude_saintblanquet/conducti/11intro/11intro.htm#1>, consulté le 17.07.2024.

SEO Consultant, « Transfert thermique : définition et fonctionnement », *LE GARREC*, 15.11.2019, <<https://www.legarrec.com/entreprise/transfert-thermique-definition/>>, consulté le 10.01.2024.

« Caractéristiques de l'acier inoxydable », <<https://www.novameta.lt/fr/des-produits/caracteristiques-de-lacier-inoxidable>>, consulté le 16.07.2024.

« Chaleur et température : étude détaillée », *PISTES*, <https://www.pistes.fse.ulaval.ca/sae/?onglet=contenu&no_version=2102&no_recherche=rep&debut=20>, consulté le 24.02.2024.

« Chaleur et température (leçon) | Khan Academy », <https://fr.khanacademy.org/_render>, consulté le 29.07.2024.

« De quoi se compose une bouteille Thermos? », *SimplyScience*, 20.02.2014, <<https://www.simplyscience.ch/fr/jeunes/decouvre/de-quoi-se-compose-une-bouteille-thermos>>, consulté le 16.07.2024.

« Définition | Thermos - Bouteille isotherme | Futura Maison », *Futura*, 16.07.2012, <<https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-thermos-11155/>>, consulté le 01.08.2024.

« Définition | Polymère | Futura Sciences », *Futura*, 23.06.2024, <<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-polymere-803/>>, consulté le 18.07.2024.

« Définition de PolyPropylène (PP) », *Actu-Environnement*, <https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/polypropylene_pp.php4>, consulté le 18.07.2024.

« Durabilité et résistance de l'acier inoxydable », <<https://acierinoxydable.ca/fr/durabilite-resistance-acier-inoxydable>>, consulté le 16.07.2024.

« Easy Inox | Propriétés et familles d'aciers inoxydables », 27.10.2023, <<https://www.easy-inox.com/news/propri%C3%A9t%C3%A9s-et-familles-d-aciers-inoxydables>>, consulté le 16.07.2024.

« L'UTILISATION ET LE RECYCLAGE DU POLYETHYLENE », *ripack*, 23.06.2020, <<https://ripack.com/evenement/lutilisation-et-le-recyclage-du-polyethylene/>>, consulté le 18.07.2024.

« La distinction entre la chaleur et la température », *Alloprof*, <<https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-distinction-entre-la-temperature-et-la-chaleur-s1092>>, consulté le 24.02.2024.

« Les plastiques alimentaires sont-ils dangereux ? », <<https://www.lasantedanslasiette.com/dans-l-assiette/cuisine-saine/plastiques-alimentaires.html>>, consulté le 18.07.2024.

« Les transferts de chaleur - Parlons sciences », 21.01.2021, <<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/les-transferts-de-chaleur>>, consulté le 10.01.2024.

« Les transferts thermiques et bilans d'énergie d'un système thermodynamique - Tle - Cours Physique-Chimie - Kartable », <<https://www.kartable.fr/ressources/physique-chimie/cours/les-transferts-et-les-bilans-denergies-thermodynamiques-1/52452>>, consulté le 10.01.2024.

« Loi de Fourier sur la conduction thermique - PagesJaunes », *PagesJaunes.fr*, <<https://chauffage.pagesjaunes.fr>>, consulté le 17.07.2024.

« Polypropylène (PP) - Base de données Plastiques, risque et analyse thermique - INRS », 02.2023, <https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES_polymere_19>, consulté le 18.07.2024.

« Produits en acier inoxydable: caractéristiques et secteurs d'utilisation – Airwork », <<https://www.airwork.it/fr/blog/produits-en-acier-inoxydable-caracteristiques-et-secteurs-dutilisation/>>, consulté le 16.07.2024.

« Rayonnement infrarouge: faits et mesures de protection », <<https://www.suva.ch/fr-ch/prevention/par-danger/materiaux-rayonnements-et-situations-a-risque/rayonnement-et-radioactivite/rayonnement-non-ionisant/rayonnement-infrarouge-informations-et-dangers>>, consulté le 17.07.2024.

« Recyclage polypropylène : tri, collecte, traitement des déchets », *HUBENCY*, <<https://www.hubency.com/dechets-valorises/plastique/polypropylene/>>, consulté le 18.07.2024.

« Sable de silice - PagesJaunes », *PagesJaunes.fr*, <<https://jardinage.pagesjaunes.fr>>, consulté le 19.07.2024.

« Thermos - Marque de gourdes isolantes en acier inoxydable », *Tonton Outdoor*, <<https://www.tonton-outdoor.com/marques/thermos>>, consulté le 01.08.2024.

« Tout savoir sur le polypropylène | Vink France », <<https://vink.fr/polypropylene>>, consulté le 18.07.2024.

Documents PDF

« transfert thermique M1 TE.pdf », <<https://fac.umc.edu.dz/fstech/cours/G%20Transport/transfert%20thermique%20M1%20TE.pdf>>, consulté le 19.07.2024.

« What_is_Stainless_Steel_FR.pdf », <[https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro Inox/What is Stainless Steel FR.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro%20Inox/What%20is%20Stainless%20Steel%20FR.pdf)>, consulté le 22.07.2024.

Billets de blogs

CUENOT Paul, « Avantages et inconvénients des gourdes en verre », *Soif de Gourde, le blog*, 29.04.2014, <<https://www.soif-de-gourde.fr/blog/que-penser-des-gourdes-en-verre/>>, consulté le 16.07.2024.

DOLATKHANI Diana, « Qu'est-ce qu'un polymère ? », *PolymerExpert*, 14.09.2022, <<https://polymerexpert.fr/polymere-definition/>>, consulté le 18.07.2024.

LOPEZ Reyes, « Différences entre le polyéthylène et le polypropylène – ScrapAd », 30.03.2023, <<https://scrapad.com/fr/blog/differences-entre-le-polyethylene-et-le-polypropylene/>>, consulté le 18.07.2024.

TELLIER Jérémy, « Principe de fonctionnement d'une bouteille thermos - Le blog Parti'Prof », 27.11.2014, <<https://blog.partiprof.fr/principe-fonctionnement-thermos/>>, consulté le 26.03.2024.

VAN NUFFEL Brent, « PE et PP - Les différences en un coup d'œil », *Logistiekonline.be*, <<https://www.logistiekonline.be/fr/blogs/blog/pe-et-pp-les-differences-en-un-coup-doeil/?source=facebook>>, consulté le 18.07.2024.

« ABS vs. Polypropylene (PP) », 09.05.2024, <<https://www.protolabs.com/fr-fr/resources/blog/abs-vs-polypropylene-pp-choisir-entre-deux-plastiques-populaires/>>, consulté le 18.07.2024.

« Acier inoxydable, une matière incontournable dans vos activités », 15.09.2023, <<https://www.praud-inox.com/blog/acier-inoxydable>>, consulté le 16.07.2024.

« Blog du Musée des Boissons : Histoire de la bouteille isotherme », *Blog du Musée des Boissons*, 24.07.2017, <<http://musee-boissons.blogspot.com/2017/07/histoire-de-la-bouteille-isotherme.html>>, consulté le 01.08.2024.

« Bouteille isotherme : tout savoir sur son fonctionnement », *Healthy Lunch*, 09.10.2020, <<https://healthy-lunch.fr/blogs/blog-healthy-lunch/bouteille-isotherme-fonctionnement>>, consulté le 26.03.2024.

« Comment est faite une bouteille isotherme », *Takatterra*, <<https://takatterra.com/fr/blog/comment-faite-bouteille-isotherme.html>>, consulté le 26.03.2024.

« Comment Fonctionne un Thermos ? », *Thermos Expert*, <<https://thermos-expert.com/blogs/infos/comment-fonctionne-un-thermos>>, consulté le 26.03.2024.

« Gourde en Verre : c'est quoi le verre borosilicate ? », *Soif de Gourde, le blog*, 23.02.2022, <<https://www.soif-de-gourde.fr/blog/gourde-en-verre-cest-quoi-le-verre-borosilicate/>>, consulté le 19.07.2024.

« Gourde inox simple paroi ou double paroi ? », *Shop ta Gourde*, 29.01.2020, <<https://shop-ta-gourde.com/blogs/infos/gourde-inox-simple-paroi-ou-double-paroi>>, consulté le 29.07.2024.

« L'inox : un matériau écologique et durable | OOPLA », 03.02.2021, <<https://oopla.fr/inox-gourde-bento-durable/>>, consulté le 16.07.2024.

« La classification des différents types de verre – Paprec », <<https://www.paprec.com/fr/solutions/les-matieres-que-nous-valorisons/verre/la-classification-des-differents-types-de-verre/>>, consulté le 19.07.2024.

« Le verre Borosilicate », *VERREHAGET*, <<http://www.verrehaget.fr/le-verre-borosilicate/>>, consulté le 19.07.2024.

« Polyéthylène PE | Juntas Industriales y Navales », <<https://www.juntasindustriales.com/plastiques-techniques-en-polyethylene-pe/>>, consulté le 18.07.2024.

« Qu'est-ce que le polyéthylène et à quoi sert-il ? | Nelinkia », 30.04.2020, <<https://www.nelinkia.com/blog/applications/defintion-polyethylene-utilisation-plaque-polyethylene.html>>, consulté le 18.07.2024.

« Quel matériau choisir pour ma gourde? », *Soif de Gourde, le blog*, 04.06.2021, <<https://www.soif-de-gourde.fr/blog/avantages-et-inconvenients-des-differents-materiaux-dune-gourde-pour-bien-la-choisir/>>, consulté le 16.07.2024.

« Quelle matière choisir pour une gourde ? | Gourde Personnalisable », 12.10.2020, <<https://gourde-personnalisable.fr/quelle-matiere-pour-une-gourde/>>, consulté le 16.07.2024.

« Verre borosilicaté - propriétés particulières », *FILL ME (Switzerland) AG*, <<https://fill-me.ch/fr/blogs/blog/journee-dessai>>, consulté le 19.07.2024.

« Verre borosilicaté vs verre sodocalcique : comprendre les différences », *ChemScience*, <<https://www.chemscience.com>>, consulté le 19.07.2024.

Message de forum

« Pourquoi la chaleur monte ? », *Quora*, <<https://fr.quora.com/Pourquoi-la-chaleur-monte>>, consulté le 24.02.2024.

Enregistrement vidéo

ProfCoudert, *Le transfert thermique*, 0:30, 10.11.2020. En ligne: <<https://www.youtube.com/watch?v=0iLWeaJKUBk>>, consulté le 10.01.2024.

6. Table des illustrations

Figures

Figure 1 : Publicité de 1909 pour une bouteille isotherme de la marque Thermos	4
Figure 2 : Transferts thermiques par conduction (entre le manche et la casserole), par convection (dans l'eau chauffée) et par rayonnement (causé par le feu)	9
Figure 3 : Vue en coupe verticale d'un thermos et de ses différents composants	11
Figure 4 : Les 10 thermos testés pendant l'expérience	16
Figure 5 : Les 10 bouchons des thermos testés.....	16
Figure 6 : (reprise de la Figure 5) Les 4 bouchons des thermos en inox testés	31
Figure 7 : Vue de haut du bouchon n°2	32

La Figure 1 est une image tirée de : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermos_the_Bottle_ad_from_Rod_and_Gun_in_Canada_1909.jpg

La Figure 2 est une image tirée de : <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques/>

La Figure 3 est une image tirée est modifiée d'après : <https://www.alamyimages.fr/schema-complet-du-vase-de-dewar-ou-du-recipient-a-vide-isole-sur-une-section-transversale-blanche-vue-en-coupe-d-une-fiole-a-vide-thermos-schema-montrant-le-vide-couches-de-flacons-vecteur-image417206069.html>

Graphiques

Graphique 1 : Températures du liquide contenu dans les 10 thermos sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C	19
Graphique 2 : Températures des parois des 10 thermos sur 48 heures	20
Graphique 3 : Températures internes d'un thermos et d'une gourde sur 6h	22
Graphique 4 : Températures du liquide contenu dans les thermos de 0.5 L sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C	23
Graphique 5 : Températures du liquide contenu dans les thermos de 1 L sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C	25
Graphique 6 : Températures du liquide contenu dans les thermos en acier inoxydable sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C	26
Graphique 7 : Températures du liquide contenu dans les thermos avec l'extérieur en plastique et l'intérieur en verre sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C	27
Graphique 8 : Températures du liquide contenu dans les thermos en inox de 0.5 L sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C	29
Graphique 9 : Températures du liquide contenu dans les thermos en inox de 1 L sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°C	30
Graphique 10 : (reprise du Graphique 6) Températures du liquide contenu dans les thermos en acier inoxydable sur 48 heures, avec une température initiale de 94.0°	31