



Hogere Zeevaartschool Antwerpen

Applications de l'aérogel dans la marine marchande.

Gauthier MARTIN

Mémoire présenté pour l'obtention
du titre de
Bachelor en Mécanique Navale

Promoteur : Stefaan Bueken
Année académique : 2019- 2020

Résumé

Les aérogels sont des solides nanoporeux connus pour être les solides les plus légers qui existent. On peut en faire à partir de différents types de gels, qu'ils soient organiques ou non. L'aérogel le plus commun est l'aérogel de Silice, on l'obtient en effectuant un séchage supercritique du gel de silice. Les aérogels ont de nombreuses propriétés, ils ont une très faible densité et un ratio surface/volume très élevé grâce à leurs nanostructures, ce qui les rend aussi très légers et de très bons isolants thermiques. Les aérogels peuvent aussi être hydrophobes et absorber les huiles. Les différents types d'aérogels ont de nombreuses propriétés allant de la diffusion de lumière à des propriétés plus complexes de semi-conducteurs.

De nos jours les aérogels sont utilisés dans de plus en plus de domaines, que ce soit comme isolant thermique sur les Mars Rover, dans la recherche nucléaire comme détecteur de radiations de Cherenkov, mais aussi dans certains terminaux LNG comme isolation cryogénique ainsi que pour les pipelines sous-marins.

L'aérogel a un grand potentiel dans l'industrie maritime, on peut l'utiliser pour améliorer l'isolation thermique dans la salle des machines là où d'autres isolations ne peuvent pas être utilisées efficacement, il peut aussi augmenter l'espace dédié à la cargaison réfrigérée en diminuant la taille de la couche isolante. Sa capacité à absorber les liquides huileux et à repousser l'eau pourrait changer la manière dont nous combattons les fuites d'huiles et les marées noires. Utiliser l'aérogel comme isolation thermique dans le domaine de la sécurité, par exemple dans les lifeboats et les radeaux de sauvetage, permettrait d'augmenter les chances de survie des marins dans certaines situations critiques.

Globalement, les aérogels pourraient grandement se populariser dans les années à venir grâce à leurs propriétés, néanmoins leur prix de production reste très élevé.

Abstract

Aerogels are nanoporous solids known to be the lightest solids ever. They can be made from different kind of gels, whether they are organic or not. The most common aerogel is silica Aerogel, it is obtainable by supercritically drying silica gel. Aerogels have many properties, they have a very low density and a very high surface/volume ratio due to their nanoporous structure, making them extremely light and extremely good thermal insulators. Aerogels can also be super hydrophobic and absorb oily liquids. Different types of aerogel have many different properties ranging from light diffusion to more complex semiconductors properties.

Nowadays Aerogels are present in more an more domains, they are used by NASA on mars rovers as an insulator, in nuclear research in cherenkov radiation detectors, but also on LNG terminals as cryogenic insulation as well as in underwater pipelines.

Aerogel has a great potential in the maritime industry. It can be used to improve the insulation in the engine room where common insulation cannot work effectively, it can also increase the refrigerated cargo space by reducing the size of insulation layers. Its capacity to absorb oily liquids and repel water could improve the way we deal with cleaning oil leaks and oil spills. Using aerogel insulation in lifesaving appliances such as lifeboats could also increase the survival chances of seafarers in critical situations.

Overall aerogel could become more popular over the years thanks to their properties, however their production price is still very high.

Table des Matières

Résumé	2
Abstract	3
Table des Matières	4
Liste des figures	6
Introduction	8
L'aérogel	9
Qu'est-ce qu'un aérogel	9
Procédé de fabrication	15
Un peu d'histoire	15
Comment produire de l'aérogel	15
Aérogel de silice	16
Aérographe	18
Facilitation du procédé	20
Les propriétés des aérogels	21
Aérogel de Silice	21
Aérographe	29
Les usages de l'aérogel	31
Les aérogels et la marine marchande	38
Isolation thermique	38
Isolation dans la salle des machines	38
Isolation du LNG	43
Isolation combinaison de survie	50
Isolation Lifeboat/Liferaft	51
Navires poseurs de conduites	53
Propriétés oléophiles	54
Utilisation dans les chaudières	54
Procédé de dépollution	55
Limiter la corrosion	56
Coatings	56
Tapis hydrophobe	57
Isolation sonore	58
Expériences	59
Séparation eau/huile	59
Isolation d'une chaudière (modèle réduit)	64

Aspects économiques	67
Rentabilité sur le long terme	67
Salle des machines	67
LNG	69
Conclusion	70
Annexe	72
Bibliographie	73

Liste des figures

[Figure 1 : Aérogel de Silice.](#)

[Figure 2 : Diffusion de Rayleigh.](#)

[Figure 3 : Disposition des atomes de carbones dans le graphène.](#)

[Figure 4 : Aérographène.](#)

[Figure 5 : Aérogel de carbone obtenu à partir d'aérogel organique.](#)

[Figure 6 : Xerogel.](#)

[Figure 7 : Différents états de la matière.](#)

[Figure 8 : Hydrogel de graphène.](#)

[Figure 9 : Capillarité dans un pore.](#)

[Figure 10 : Pores d'aérogel de Silice.](#)

[Figure 11 : Résistance à la compression de l'aérogel de silice.](#)

[Figure 12 : Illustration de l'unité de conductivité thermique.](#)

[Figure 13 : Chimie de surface de l'aérogel de silice non traité.](#)

[Figure 14 : Traitement hydrophobe de l'aérogel de silice.](#)

[Figure 15 : Absorption d'huile par une éponge couverte d'aérogel de silice.](#)

[Figure 16 : Structure de l'aérographène.](#)

[Figure 17 : Compressibilité de l'aérographène.](#)

[Figure 18 : Brevet traitant d'aérogels 2002/2016.](#)

[Figure 19 : Gamme de tapis isolants de Aspen Aerogels.](#)

[Figure 20 : Conductivité thermique du Pyrogel.](#)

[Figure 21 : Conductivité thermique de la laine de roche.](#)

[Figure 22 : Épaisseur d'isolation équivalente de certains isolants.](#)

[Figure 23 : Plaque de métal partiellement recouverte d'un coating à l'aérogel.](#)

[Figure 24 : Démonstration de la faible conductivité thermique du coating.](#)

[Figure 25 : Membrane tank LNG.](#)

[Figure 26 : Composition commune d'un membrane tank.](#)

[Figure 27 : Réglementation IGC.](#)

[Figure 28 : Dimension du tank imaginaire isolé à la perlite.](#)

[Figure 29 : Dimension du tank imaginaire isolé au Cryogel.](#)

[Figure 30 : Coefficient d'isolation du polyuréthane.](#)

[Figure 31 : Expérience de pompe à huile maison.](#)

[Figure 32 : Fuite du liquide final.](#)

[Figure 33 : Couches d'isolation de la chaudière imaginaire.](#)

Introduction

Aujourd'hui la majorité du commerce mondial est assurée par la marine marchande, que ce soit nos téléphones, notre essence et autres dérivés du pétrole, nos vêtements et même une grande partie de notre alimentation, ce que nous consommons passe par la mer. Les navires sont de plus en plus gros, et de plus en plus puissants, et la quantité de biens transportés augmente d'année en année.

Néanmoins l'industrie maritime, comme le reste du monde, doit s'adapter au défis du 21ème siècle, réduire la consommation, combattre la pollution, entretenir l'environnement marin, améliorer le confort des marins, limiter l'usure des navires, et tout ça sans perdre d'argent sur le long terme. Afin d'atteindre ces objectifs, les officiers doivent être mieux formés et les navires mieux équipés; la marine marchande est rarement pionnière dans le domaine de la recherche, il est tout de même possible de nous inspirer des technologies développées par d'autres industries et de les adapter à nos défis.

L'aérogel est l'une de ces technologies; depuis quelques années le marché de l'aérogel augmente rapidement, les industries de l'aérospatiale, du pétrole et du gaz, de la construction et d'autres, investissent dans ce nouveau solide aux propriétés étonnantes.

Connu principalement comme le solide le plus léger sur terre ainsi que comme excellent isolant thermique, l'aérogel possède de nombreux autres usages dont l'industrie maritime peut profiter.

Contrairement à la majorité des innovations actuelles qui sont soit à but unique, soit orienté vers l'informatique, l'aérogel est un solide avec de nombreuses propriétés, l'aérogel n'est donc pas une technologie mais une nouvelle base nous permettant de développer de nombreuses technologies potentiellement utiles au milieu maritime.

À travers ce mémoire nous allons étudier l'intérêt potentiel que les compagnies maritimes auraient à investir dans l'aérogel, d'abord en étudiant les propriétés de l'aérogel puis en les adaptant à l'industrie maritime. L'aspect financier de l'utilisation d'aérogels à bord sera aussi évoqué.

L'aérogel

Qu'est-ce qu'un aérogel

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, un aérogel n'est pas un gel, il porte ce nom car il est obtenu à partir d'un gel, par exemple l'aérogel de silice est un dérivé du gel de silice. Un gel est un squelette solide tridimensionnel dilué dans un fluide, il peut avoir différentes propriétés matérielles, pouvant être mou et ductile jusqu'à dur et cassant, un gel se caractérise par l'absence d'écoulement en état stable, cette caractéristique vient de son squelette solide.

Un aérogel dispose du même squelette solide nanoscopique qu'un gel, mais au lieu d'être dilué dans un liquide, les pores du squelette sont remplis de gaz, l'un des noms donnés à l'aérogel est d'ailleurs "solid smoke" la fumée solide, comme si un nuage avait été piégé dans le squelette solide.

Il existe de nombreux types d'aérogels, et les avancées dans le domaine permettent d'en obtenir avec de plus en plus de nouvelles bases. La base la plus courante est le Silice :

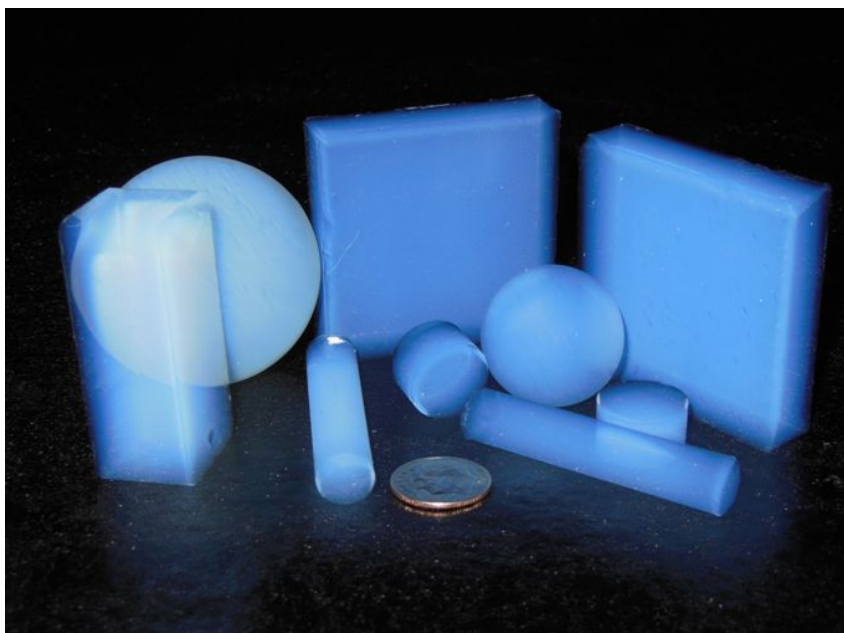


Figure 1 : Aérogel de silice.

Source : Reports and Markets (2017)

L'aérogel de silice est le plus connu mais aussi le plus utilisé des aérogels, il sera donc le sujet principal de ce mémoire. On le reconnaît à son teint bleuté sur les fonds noirs et presque complètement transparent sur les fonds blancs. Ce phénomène est dû à un effet nommé diffusion de Rayleigh, la diffusion de Rayleigh dans l'aérogel de silice a lieu grâce au taux très élevé d'air. Les molécules de dioxygène et de diazote présentes dans l'air (78% de diazote, 21% de dioxygène et 1% d'autres gaz) diffusent mieux les lumières dont la longueur d'onde est faible, c'est le même principe qui explique la couleur du ciel, la lumière diffusée dans l'aérogel est donc bleue, la couleur avec la longueur d'onde la plus faible :

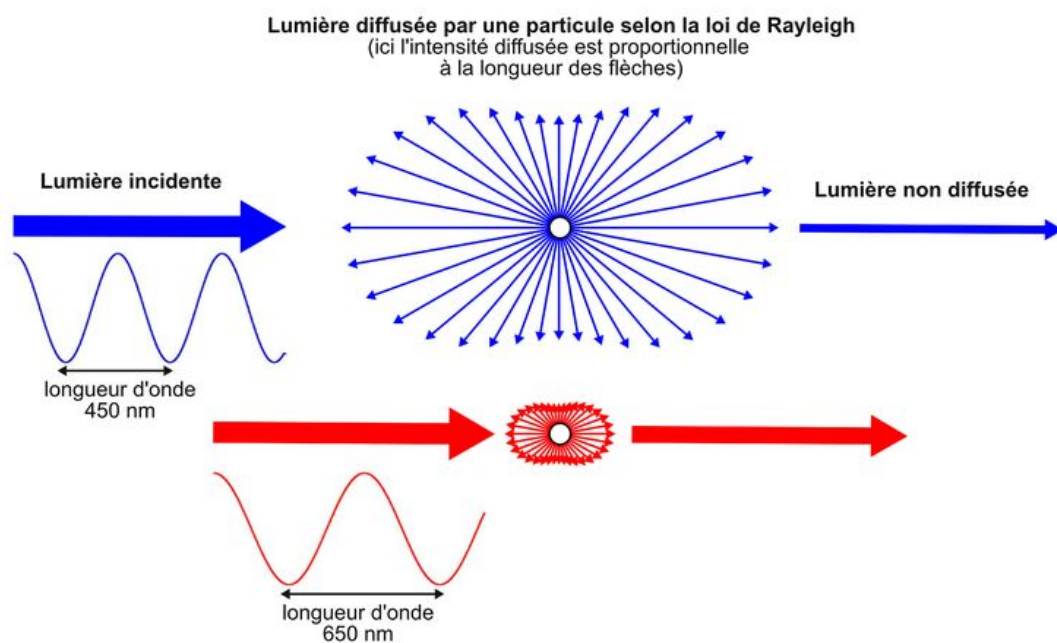


Figure 2 : Diffusion de Rayleigh.

Source : 1,2,3 Couleurs ! (2020)

Le deuxième type d'aérogel le plus courant est l'aérogel de graphène, il est composé d'une structure en nanotubes de graphène. Le graphène est un matériau monocouche composé uniquement d'atomes de carbone; synthétisé pour la première fois en 2004 par André Geim qui reçut avec Konstantin Novoselov le prix Nobel de physique en 2010 pour ces travaux, le graphène est une innovation très récente et extrêmement prometteuse :

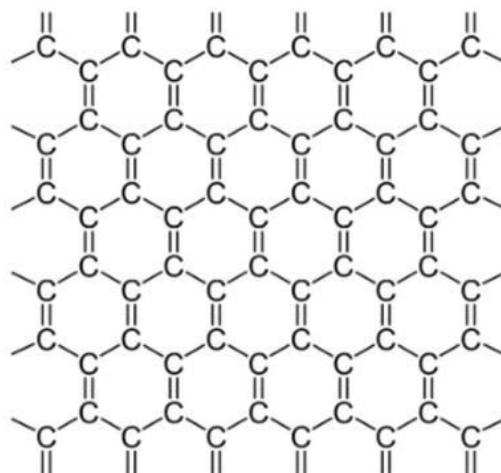


Figure 3 : Disposition des atomes de carbone dans le graphène.

Source : Graphene Info (2020)



Figure 4 : Aérographène.

Source : Daily Mail (2013)

Ses propriétés mécaniques sont supérieures à l'aérogel de silice, sous vide il est 7 fois plus léger que l'air, mais à l'inverse de l'aérogel de silice qui est un excellent isolant thermique, l'aérogel de graphite est un excellent conducteur thermique; il possède d'autres propriétés que nous étudierons plus tard.

La 3ème catégorie d'aérogel la plus courante est celle des aérogels organiques. Malgré sa popularité, l'aérogel de silice n'est pas le premier type d'aérogel à être apparu, les premiers aérogels avaient des bases organiques, contrairement à l'aérogel de silice, dont la structure est composée de polymères inorganiques. On appelle polymère organique les polymères obtenus à partir d'êtres vivants. Le biopolymère le plus utilisé pour créer de l'aérogel est le resorcinol formaldéhyde, c'est un type de résine.

Néanmoins on peut obtenir de l'aérogel à partir de nombreux autres polymères, par exemple l'agar-agar, un bio-polymère obtenu à partir d'algues, peut être utilisé comme structure pour l'aérogel. On appelle l'aérogel d'agar-agar le SEAgel (Safe Emulsion Agar gel), il est plus léger que l'aérogel de silice, moins cher à produire, mais aussi biodégradable, il est même comestible. Le SEAgel a été développé par l'armée américaine dans les années 80 lors de recherches liées à l'armement, depuis deux brevets ont été déposés en 1992 mais il n'existe aucune trace de commercialisation ou utilisation actuellement.

Les aérogels organiques peuvent être utilisés pour obtenir un autre type d'aérogel. En effet grâce à la pyrolyse, on peut transformer un aérogel organique en aérogel de carbone :

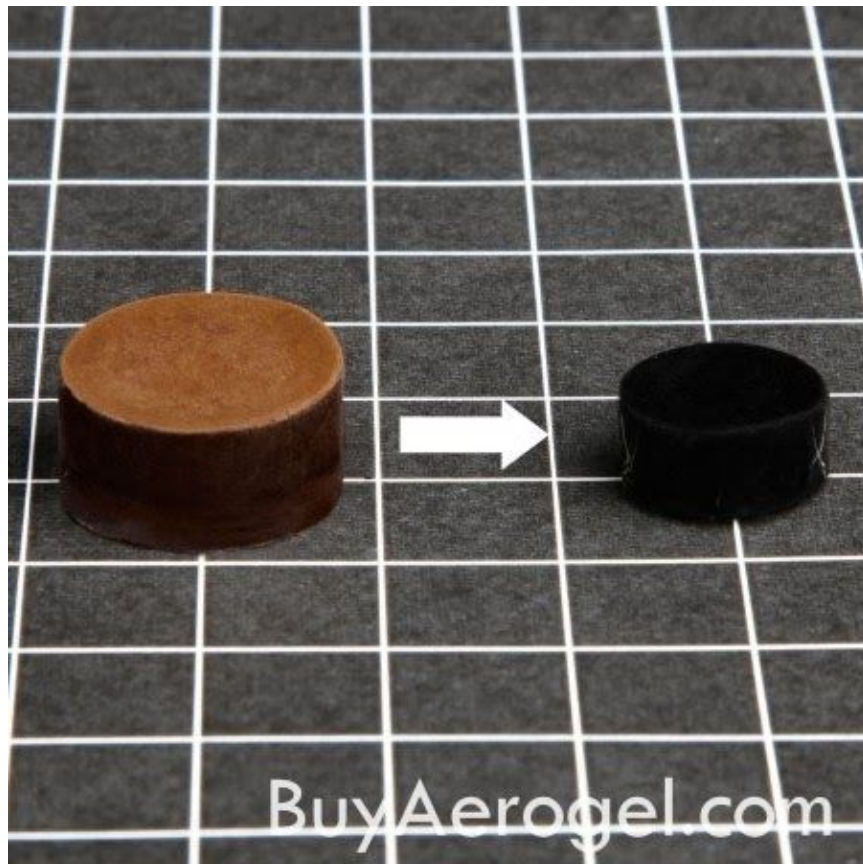


Figure 5 : Aérogel de carbone obtenu à partir d'aérogel organique.

Source : Buyaerogel.com (2020)

L'aérogel de carbone partage de nombreuses propriétés avec l'aérogel de graphène malgré des procédés de production très différents.

Préparés pour la première fois en 2002 les aérogels de métaux chalcogénures sont probablement les moins connus de la famille des aérogels, leur structure est composée d'un métal ainsi que d'un membre de la famille des chalcogènes (éléments de la 16ème colonne du tableau de Mendeleïev). Ce type d'aérogel a des propriétés complexes encore étudiées aujourd'hui; il est trop tôt pour débattre de ses applications dans le milieu maritime, les aérogels de métaux

chalcogénures ne seront donc pas étudiés plus longuement dans ce mémoire, on notera tout de même leur propriété de semi conducteur capable de changer la taille de "bande interdite" offrant potentiellement à ce type d'aérogel un avenir dans le domaine des cellules photovoltaïques.

Il existe des aérogels d'oxyde de métaux, auparavant très difficiles à produire dû à la difficulté de créer un gel avec une structure en oxyde de métaux, de nouvelles avancées rendent leur production moins complexe. Selon l'oxyde de métal utilisé, les propriétés et l'apparence de ce type d'aérogel varient. Actuellement utilisé dans le domaine de la chimie en tant que catalyseur, nous n'en avons pas l'utilité dans la marine marchande, nous ne faisons donc que l'évoquer ici.

De nombreux autres types d'aérogels ont déjà été créés mais ceux précédemment évoqués sont les plus couramment étudiés et utilisés.

Il existe aussi de la nano-mousse de métal, néanmoins on ne peut pas la considérer comme un aérogel, il n'en sera donc pas fait de mention ultérieurement.

Procédé de fabrication

Un peu d'histoire

L'histoire de l'aérogel n'est pas très détaillée, on ne sait pas exactement où et quand le premier aérogel a été synthétisé. Les différentes publications de l'époque laissent penser que le premier aérogel fut créé à la fin des années 1920, le premier document officiel évoquant l'aérogel date de 1931 nommé "Coherent Expanded Aerogels and Jellies." L'auteur n'est autre que le créateur de l'aérogel, Samuel Kistler. Samuel Kistler était un professeur de chimie américain qui à l'époque travaillait sur les fluides supercritiques. Fabulations ou réalité, à l'origine de l'aérogel se trouverait un défi lancé par l'un des collègues de Samuel Kistler, Charles Learned. Samuel Kistler essayait alors de démontrer que ce qui définit un gel n'est pas le liquide dans lequel il est dilué, mais plutôt sa nanostructure polymérique; son collègue l'aurait alors mis au défi d'enlever toute l'eau contenue dans un bloc de gelée sans que la structure ne soit impactée.

Lorsqu'une éponge mouillée sèche, elle se déforme, le même phénomène se produit lorsque l'on sèche un gel. Obtenir un aérogel demande donc un procédé plus complexe.

Comment produire de l'aérogel

Dans cette partie nous allons étudier les deux types d'aérogels les plus courants, qui sont aussi les plus utiles dans notre domaine. Seule la méthode la plus couramment utilisée sera évoquée et certains détails seront négligés afin de garder un contenu adapté à ce mémoire.

Aérogel de silice

On obtient l'aérogel de silice à partir du gel de silice. Ce gel est assez connu, on le retrouve le plus couramment sous forme de petites sphères dans les poches des vêtements neufs. Elles sont utilisées pour absorber l'humidité grâce à la chimie de leur surface similaire à celle de l'aérogel de silice expliqué plus en détail dans le chapitre dédié aux propriétés des aérogels.

On obtient le gel grâce à un procédé appelé "sol-gel", les nanoparticules de silice présentes dans une solution se rejoignent jusqu'à former une nano-structure remplie de liquide. Généralement on utilise une solution d'éthanol, on obtiendra donc un Alcogel; une fois que le gel s'est structuré, il est donc rempli de cette solution d'éthanol. On trouve souvent des traces d'autres substances utilisées comme catalyseurs; pour y remédier on plonge le gel dans un nouveau bain d'éthanol pour purifier le liquide du gel.

Après ce procédé il faut trouver un moyen d'extraire l'éthanol du gel. Il ne suffit pas de le faire sécher ou d'utiliser une seringue pour se débarrasser du liquide, l'objectif étant de garder la même structure il faut une autre solution. Le gel séché a tout de même un nom, on l'appelle xérogel, la structure du gel est toujours là mais bien plus dense et écrasée sur elle-même, comme une éponge sèche :

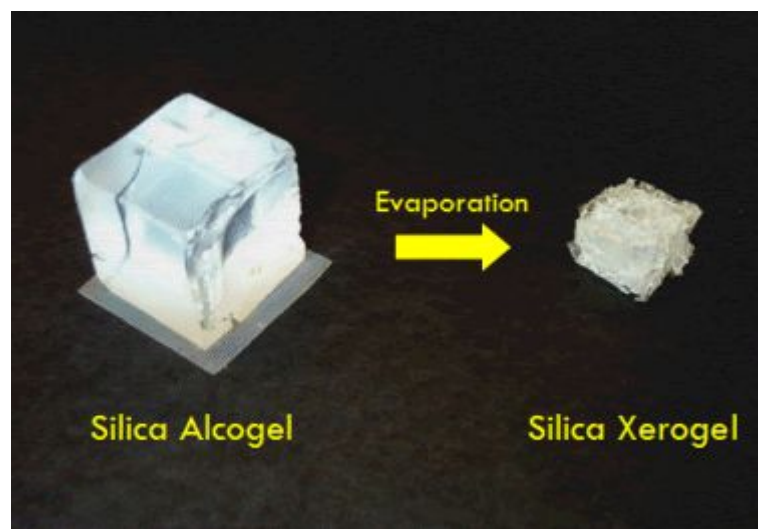


Figure 6 : Xérogel.

Source : Sol gel method by Sukesh Hedge (2017)

En effet lors d'un séchage classique, autrement dit, un séchage à température ambiante, la tension capillaire sur les parois des pores entre les phases gazeuse et liquide est tellement grande que les nano pores s'écroulent. Le problème réside donc dans la frontière entre l'état gazeux et l'état liquide, or il existe un moyen d'aller au delà de cette frontière :

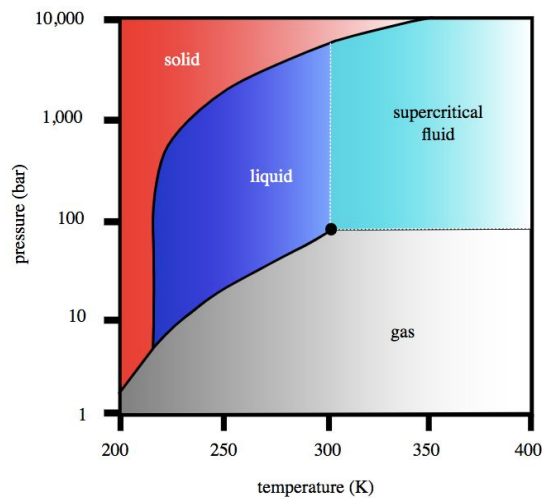


Figure 7 : Différents états de la matière.

Source : enacademic.com (2020)

À un certain rapport pression/température, la frontière entre l'état liquide et l'état gazeux n'existe plus, on parle alors de fluide supercritique. En mettant du gel de silice dans une cuve pressurisée et chauffée au delà du point critique de l'éthanol, on peut changer l'état de l'éthanol sans passer par une frontière. Il suffit de dépressuriser isothermiquement le fluide supercritique. On peut faciliter cette étape en remplaçant l'éthanol par du CO₂ liquide en immergeant le gel dans du CO₂ liquide suffisamment longtemps. Ce remplacement peut prendre plusieurs jours et le CO₂ doit être remplacé régulièrement. Le gros avantage ne vient pas seulement de la différence de température et de pression nécessaires pour atteindre le point critique, mais aussi des risques très élevés d'explosion de l'éthanol chauffé et sous pression. L'éthanol a besoin d'être chauffé à 241°C sous une pression de plus de 60 bars, alors que le CO₂ a besoin de 31°C et d'un peu plus de 72 bars.

À la fin du séchage supercritique on obtient un aérogel de silice avec une structure quasi-identique à celle du gel de départ, mais à la place de l'éthanol on a du CO₂ gazeux représentant jusqu'à 99% du volume de l'aérogel.

Aérographe

L'aérographe s'obtient à partir de solution d'oxyde de graphène ou de pâte d'oxyde de graphène. L'obtention d'un gel demande plus de travail et de précaution qu'avec le gel de silice, on utilise un mélange de solution d'oxyde de graphène, d'eau déminéralisée et d'éthylènediamine, un composant chimique favorisant la gélification du mélange.

Une fois le mélange obtenu il est chauffé pendant 6 à 8h à 95°C, pendant cette opération, l'oxyde de graphène connaît une réduction chimique, perdant ses atomes d'oxygènes. On laisse ensuite refroidir le mélange à température ambiante et on obtient du gel de graphène :



Figure 8 : Hydrogel de graphène

Source : Kingswell labs Graphene aerogel Synthesis part 2 (2019)

Une fois ce gel, ou plutôt cet hydrogel obtenu, on passe au procédé de transformation en aérogel. Pour l'aérographe, on utilise une autre méthode de séchage, le séchage à froid, plus connu sous le nom de lyophilisation. Cette technique, plus courante que le séchage supercritique, consiste aussi à changer d'état sans passer par la transition de phase liquide à gazeuse. Plutôt qu'atteindre le stade supercritique, on refroidit le gel pour le rendre solide, puis on passe de la phase solide à la phase gazeuse directement, autrement dit on sublime le gel de graphène.

Après la sublimation, le liquide contenu dans le gel au départ est maintenant gazeux, mais la structure en graphène est toujours présente, c'est ainsi que s'obtient un aérogel de graphène.

Facilitation du procédé

Comme évoqué plus tôt le séchage supercritique est employé afin d'empêcher l'écroutement des nanopores sous la tension de la capillarité du liquide dans les pores, mais il existe d'autres façons de contourner ce problème.

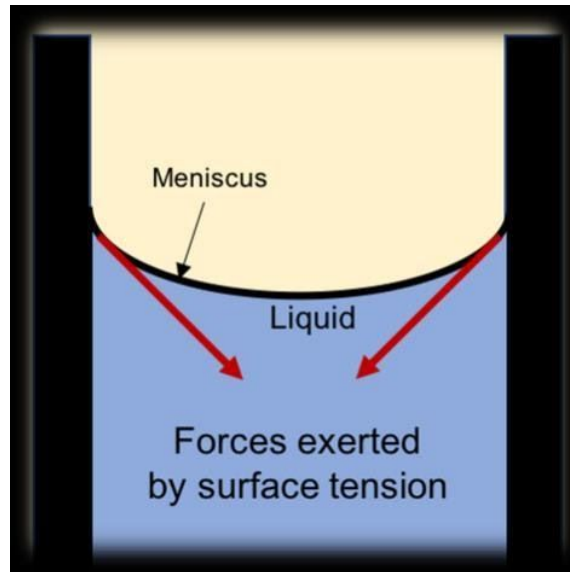


Figure 9 : Capillarité dans un pore.

Source : Novel Alginate-Chitosan Aerogel Fibres For Potential Wound Healing Applications (2018)

Les forces exercées sur les parois des nanopores du gel par la tension de surface du solvant sont faibles mais suffisantes pour qu'il ne garde pas sa structure lorsqu'on le sèche atmosphériquement. Les solutions pour ne pas avoir besoin d'utiliser le séchage supercritique se basent sur une seule caractéristique, la viscosité. En changeant la viscosité du solvant par rapport à la surface des pores, les forces capillaires sont largement réduites. Il suffit donc de changer la chimie de surface du gel ou bien la viscosité du solvant pour que le solvant ne colle plus aux parois.

Grâce à cette méthode on peut obtenir de l'aérogel séché à température ambiante, il faut tout de même compter 2 jours de séchage.

Malheureusement les propriétés des aérogels de silice séchés à température ambiante ne sont pas aussi bonnes que celles de l'aérogel classique notamment en matière d'isolation thermique.

Il est important de noter que le terme xérogel employé plus tôt ne dépend pas de la méthode de séchage du gel, mais de l'état de sa structure après le séchage, c'est pour ça que l'on parle ici d'aérogel malgré un séchage sous-critique. Il peut paraître surprenant que l'aérogel supercritique ait été découvert avant l'aérogel sous-critique (découvert dans les années 1990), mais cela s'explique par le fait que Samuel Kistler expérimentait déjà le séchage supercritique à l'époque de sa découverte; de plus les avancées en chimie des surfaces et en nanotechnologies nécessaires pour obtenir de l'aérogel sous-critique sont arrivées bien après la découverte de l'aérogel supercritique.

Les propriétés des aérogels

Aérogel de Silice

L'aérogel de silice est doté de nombreuses propriétés, deux d'entre elles ont fait sa popularité, sa légèreté ainsi que sa très faible conductivité thermique.

La très faible densité de l'aérogel de silice est due à sa composition, en effet il est principalement composé de gaz, ce gaz, le plus souvent du CO₂, est piégé dans les nanopores. Mais au delà de sa légèreté, cette structure nanoporeuse a d'autres avantages. Les chaînes de silice sont répandues de manière dendritique, c'est à dire comme un arbre avec des branches devenant de plus en plus petites, on peut même parler de fractales. Généralement on peut observer des pores de moins de 100 nanomètres de diamètre.

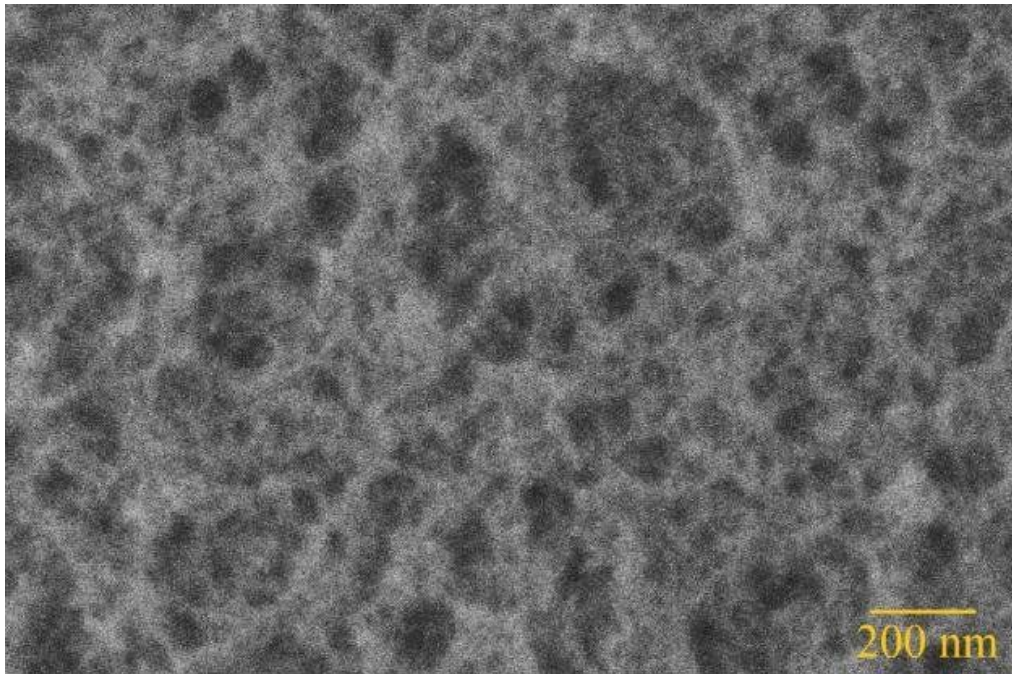


Figure 10 : Pores d'aérogel de Silice.

Source : Integration of Silica Aerogels in Microfluidic Chips (2017)

Selon sa densité l'aérogel de silice peut être plus ou moins friable. À faible densité $0.001-0.01 \text{ g/cm}^3$ il est très fragile est une simple pression du doigt suffit à le briser, à haute densité $0.1-0.5+ \text{ g.cm}^3$ il est plus solide et fait penser à du polystyrène néanmoins il ne se déformera pas sous pression mais se brisera comme du verre. D'apparence fragile, il peut tout de même supporter jusqu'à 4000 fois son propre poids, ici une pièce de densité de 0.001g.cm^3 de 2,38g supportant une brique de 2,5kg :



Figure 11 : Résistance à la compression de l'aérogel de silice.

Source : Aerogel.org (2019)

Sa propriété la plus adaptée à notre milieu est son très faible coefficient de transmission de chaleur. L'aérogel de silice est un excellent isolant thermique, en effet là où un isolant classique tel que de la laine de roche dispose d'un coefficient de conductivité thermique d'environ $0,04\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, l'aérogel de silice a un coefficient inférieur à $0,016\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Le Watt par mètre-Kelvin est une unité SI (Système International), elle correspond au courant de chaleur mesuré entre deux faces opposées d'un cube de 1m^3 lorsqu'on applique une différence de température de 1 Kelvin entre les deux faces.

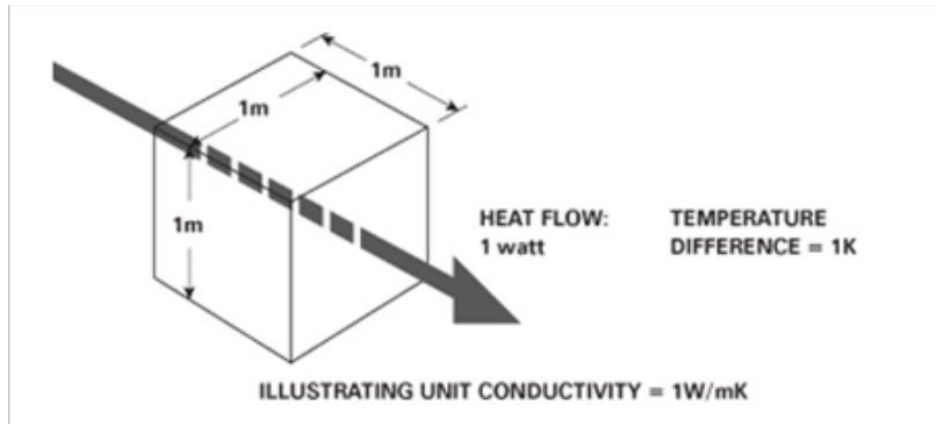


Figure 12 : Illustration de l'unité de conductivité thermique.

Source : GreatWall group (2020)

Afin de donner un ordre de grandeur, voici les coefficients de quelques matériaux :

- Aérogel de Silice 0,003 - 0,016 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- Air 0,024 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- Laine de verre 0,03 - 0,045 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- Eau 0,6 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- Aluminium 205 - 237 $W.m^{-1}.K^{-1}$
- Graphène 4000-5300 $W.m^{-1}.K^{-1}$

Ce qui permet à l'aérogel de silice d'être un si bon isolant c'est encore une fois sa structure, le squelette nanoporeux offre un rapport surface / volume très élevé jusqu'à 1500 mètres carrés par gramme, soit plus d'un million de mètres carrés de surface par mètre cube. La chaleur a donc un long chemin à parcourir pour être transmise par conduction, de plus le squelette de silice ne représente qu'environ 3% du volume total d'un morceau d'aérogel de silice.

Il existe 3 manières de transmettre de la chaleur, la conduction, la convection, et le rayonnement. Comme évoqué précédemment, l'aérogel de silice est principalement composé de gaz, or le gaz favorise la transmission de chaleur par convection. Malgré ça l'aérogel de silice reste un très bon isolant, et c'est parce que la convection ne peut pas avoir lieu, ce phénomène est décrit sous le nom d'effet Knudsen.

Cet effet permet à l'aérogel de transférer moins de chaleur que le gaz qu'il contient, les nanopores ne laissent pas assez de place au gaz pour transmettre de la chaleur de manière habituelle, la convection n'a pas lieu et la conduction est fortement limitée car les molécules de gaz entrent rarement en collision.

Quant à la transmission de chaleur par rayonnement, elle a bien lieu dans le cas de l'aérogel de silice pur car il est transparent, néanmoins il existe de nombreuses façons de transformer l'aérogel. Nous les étudierons plus tard dans le chapitre évoquant les applications des aérogels.

Le gel de silice est très couramment utilisé pour sa capacité à absorber l'humidité grâce à sa chimie de surface, l'aérogel pur non traité possède la même chimie de surface. On retrouve des groupes hydroxyles OH sur toute la surface de l'aérogel de silice, ces groupes ont comme particularité de former des liaisons hydrogènes avec certaines molécules, notamment l'eau !

Les liaisons hydrogènes ont lieu lorsqu'une molécule contient un atome d'hydrogène lié à un atome plus électronégatif. L'électron de l'atome d'hydrogène est donc attiré par l'autre atome plus électronégatif, dans notre cas, l'atome d'oxygène du groupe hydroxyle. L'atome d'hydrogène devient donc un pôle magnétique positif, de leur côté, les molécules d'eau sont elles aussi polarisées, et viennent donc s'aimer au groupe hydroxyle.

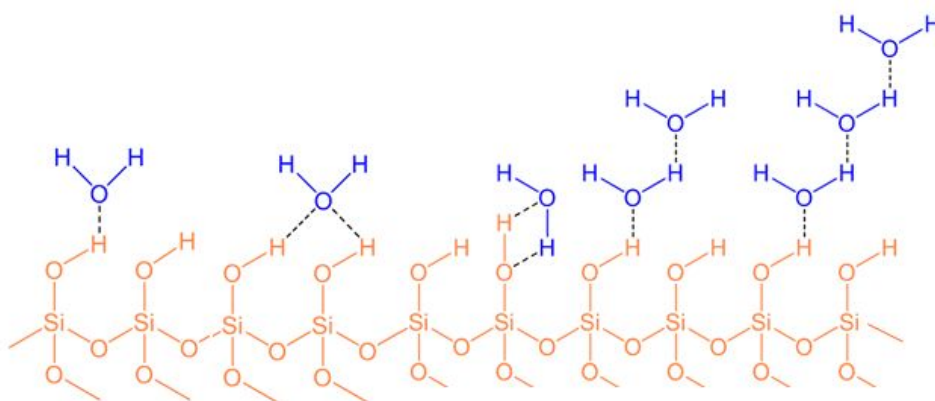


Figure 13 : Chimie de surface de l'aérogel de silice non traité.

Source : Researchgate (2016)

Lorsque l'on trempe de l'aérogel pur non traité dans de l'eau, il se dissout immédiatement à cause de sa chimie de surface. Heureusement il existe une manière relativement simple de régler ce problème. Si la polarité des groupes hydroxyles est à l'origine de ce problème, alors il suffit de rendre la surface de l'aérogel apolaire !

La solution la plus courante consiste à ajouter certains composants chimiques dans la préparation du gel de silice. Selon le résultat que l'on souhaite obtenir, on peut utiliser différents réactifs, on peut même rendre l'aérogel fluorescent, mais dans notre cas on utilise des molécules appelées hexaméthylidisilazane. Ces molécules s'attachent au groupes hydroxyle en surface du gel, le gel échange alors l'atome d'hydrogène du groupe hydroxyle contre un groupe triméthylsilane. Pour rendre l'explication plus visuelle :

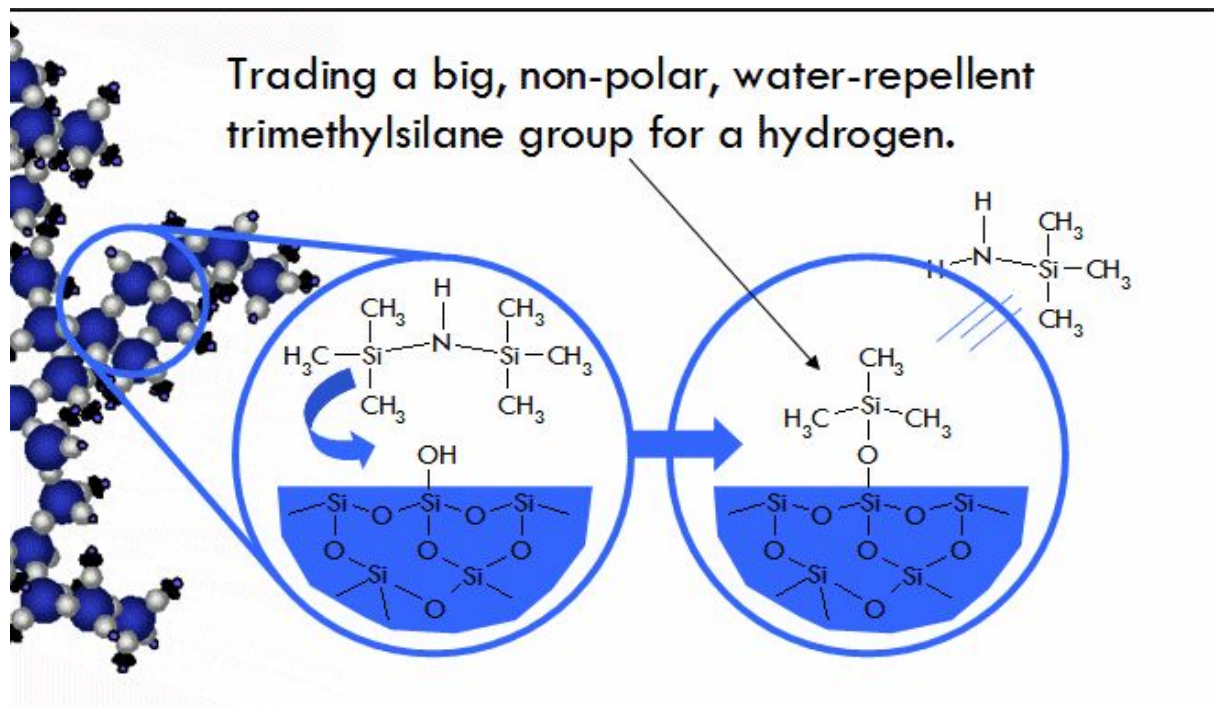


Figure 14 : Traitement hydrophobe de l'aérogel de silice.

Source : Aerogel.org (2020)

Les groupes de triméthylsilane sont apolaires, toute la surface de l'aérogel de silice est désormais hydrophobe. Même la surface des pores à l'intérieur est devenue hydrophobe !

Dans la majorité des cas lorsque l'on utilise de l'aérogel de silice on utilise une version déjà traitée de l'aérogel pour ses propriétés hydrophobes.

Comme évoqué plus tôt la chimie de surface de l'aérogel peut avoir d'autres fonctions telles que l'augmentation de la rigidité et de la force de l'aérogel, la détection d'oxygène, le filtrage biomoléculaire, et de nombreuses autres fonctions ne s'appliquant pas directement au thème de ce travail de fin d'étude.

En rendant l'aérogel de silice hydrophobe on étend le champ de ses applications, en effet l'aérogel de silice n'absorbe plus l'eau mais peut toujours absorber l'huile et les métaux lourds ce qui en fait un candidat idéal pour absorber différents types d'huiles dans des environnements remplis d'eau. L'aérogel de silice est capable d'absorber plusieurs centaines de fois son propre poids en huile sans absorber une seule goutte d'eau. En effet l'aérogel de silice est rempli de gaz à environ 99%, une fois l'huile capturée il garde sa structure et l'huile se retrouve piégée dedans, on a donc une éponge dont le volume est à environ 99% de l'huile (ici on parle d'un cas idéal). Malheureusement une fois que l'huile est absorbée, on ne peut pas réutiliser cet aérogel.

Encore une fois il existe une manière de contourner le problème, on peut utiliser l'aérogel de silice hydrophobe pour enduire une éponge classique, l'aérogel sur la paroi de l'éponge agit comme un filtre ne laissant passer que l'huile, on a donc une éponge à huile réutilisable et pour bien moins cher.

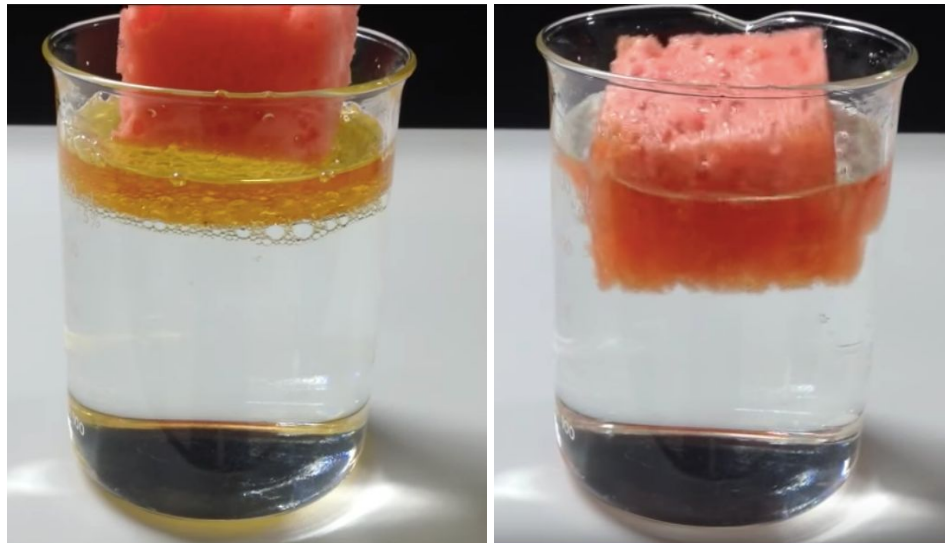


Figure 15 : Absorption d'huile par une éponge couverte d'aérogel de silice.

Source : Youtube "Silica Aerogel for Oil Spill Cleanup" (2014)

Sur ces images on peut voir une éponge en polyuréthane recouverte de poudre d'aérogel de silice absorber toute l'huile contenue dans le bécher. Cette solution est la plus économique pour absorber de l'huile sans absorber l'eau avec de l'aérogel de silice. Une éponge de ce genre permet d'absorber de l'huile en surface mais aussi des émulsions d'huile, autrement dit, des gouttelettes d'huile en suspension dans l'eau.

Aérographe

On dit souvent de l'aérogel qu'il est le solide le plus léger existant, et en 2013 c'est l'aérogel de graphène qui a battu tous les records avec une densité d'environ 160 grammes par mètre cube (pour les aérogels de graphène les moins denses). Attention on parle ici de l'aérographe sous vide. À titre de comparaison l'aérogel de silice le moins dense sous vide a une densité de 1000 grammes par mètre cube, encore plus impressionnant, sous vide l'aérogel de graphène est 7 fois moins dense que l'air, et légèrement moins dense que de l'hélium.

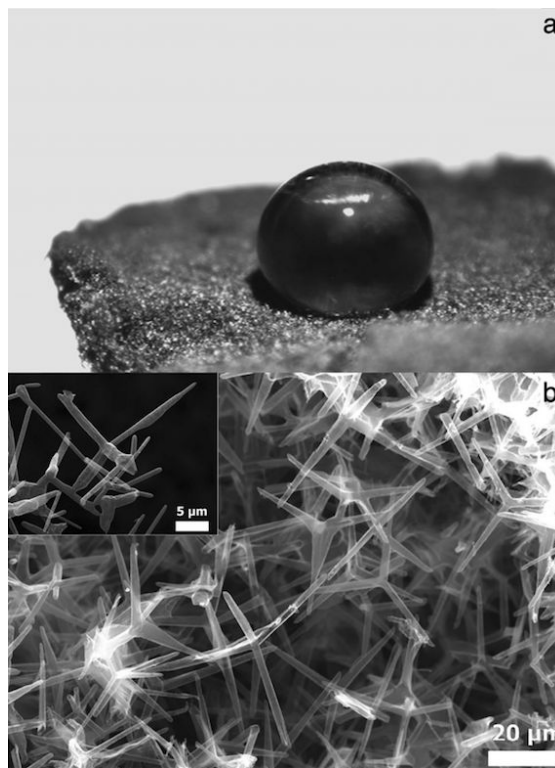


Figure 16 : Structure de l'aérographe.

Source : Wetting Properties of Graphene Aerogels (2020)

Ici on peut voir la structure de l'aérographe, elle est très différente de celle de l'aérogel de silice étudié précédemment. On observe ici une structure en tétrapodes de graphène. Cette structure ainsi que les propriétés du graphène offrent à l'aérographe des propriétés très différentes de celles de l'aérogel de silice.

Les performances matérielles de l'aérographe sont hors du commun, là où l'aérogel de silice peut supporter 4000 fois son propre poids, l'aérogel de graphène peut lui supporter jusqu'à 26000 fois son poids.

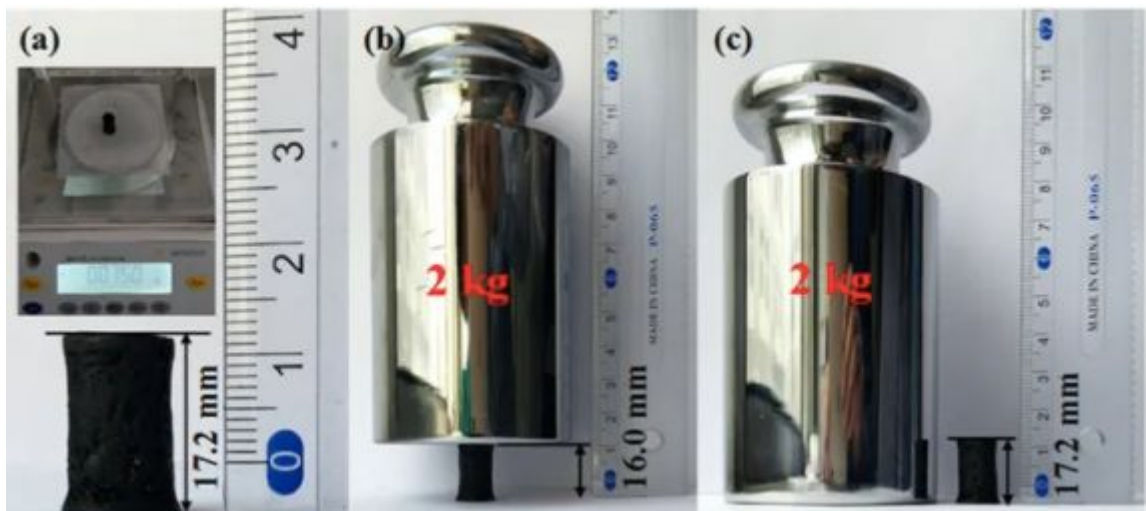


Figure 17 : Compressibilité de l'aérographe.

Source : Enhanced mechanical, thermal, and electric properties of graphene aerogels via supercritical ethanol drying and high-temperature thermal reduction.

(2017)

En observant ces photos on peut constater qu'après la compression l'aérographe a retrouvé sa taille initiale. En effet, contrairement à l'aérogel de silice qui une fois déformé ne retrouve pas sa forme originelle, l'aérogel de graphène est réutilisable même après sa compression. Selon la méthode de fabrication on peut l'écraser entièrement et il retrouvera sa forme. Actuellement on estime que l'aérographe ne se dégrade pas avant plusieurs centaines de milliers de cycles de compression/décompression.

L'Aérogel de graphène est hydrophobe et oléophile, on peut donc l'utiliser comme éponge à huile mais aussi comme filtre à grande durabilité. En l'associant à une pompe on peut donc absorber de l'huile en continu.

Les usages de l'aérogel

L'aérogel a été créé dans les années 1930, malgré ses propriétés son utilisation reste limitée à certains domaines et n'a pas encore atteint le grand public, ou du moins pas à grande échelle. On peut tout de même observer un intérêt croissant pour les aérogels depuis quelques années. Notamment en Chine où le nombre de brevets concernant des applications de l'aérogel a énormément augmenté depuis 2006.

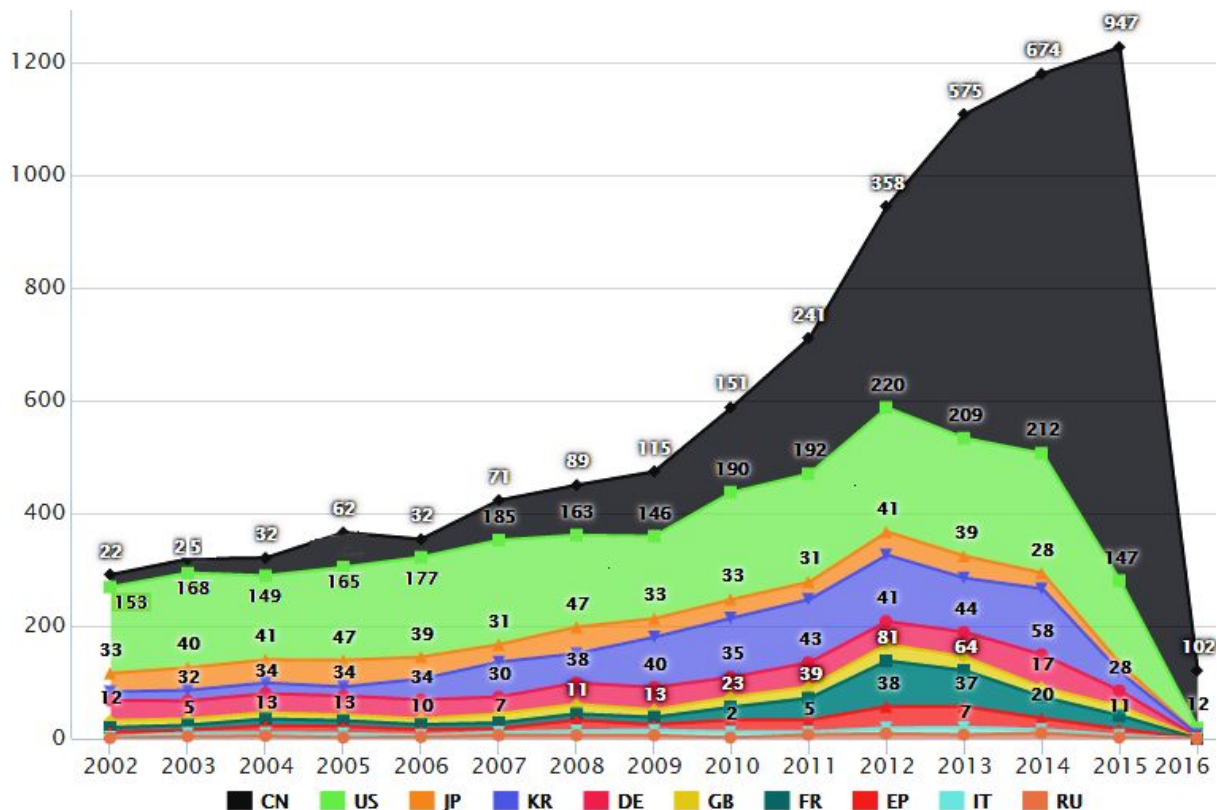


Figure 18 : Brevet traitant de d'aérogels 2002/2016.

Source : Patseer (2017)

Ce graphique témoigne de la contribution des bureaux de brevets de certains pays concernant les applications de l'aérogel. L'augmentation nette de publications et de nouvelles applications depuis les 10 dernières années annonce peut être le début de l'âge d'or de l'aérogel. L'Union Européenne a même investi dans une

technologie appelée Quartzene, un nouveau type d'aérogel qui coûterait moins cher à produire, cependant il est toujours en développement.

Les aérogels sont tout de même utilisés dans certains domaines, et il est intéressant de voir comment leurs propriétés sont mises à l'épreuve pour répondre aux besoins de certaines industries.

La NASA est probablement l'utilisateur d'aérogel le plus connu, ils ont d'ailleurs fait beaucoup de recherches sur l'aérogel et notamment sur sa production en l'absence de gravité. On retrouve donc de l'aérogel de silice comme isolant pour les composants électroniques à bord des "rover" Spirit et Opportunity. Les températures sur Mars peuvent varier entre -140°C et $+20^{\circ}\text{C}$, et l'aérogel a permis aux composants de résister plus longtemps à ces températures, permettant aux rovers de dépasser la durée de vie estimée par les ingénieurs de la NASA.

Les recherches sur l'aérogel de silice ont aussi permis à la NASA de développer un système pour piéger la queue des comètes. Dans ce cas c'est plusieurs propriétés qui ont fait de l'aérogel de silice le candidat idéal pour cette mission. Son poids, paramètre très important dans l'aérospatiale, mais aussi sa porosité, les particules contenues dans la queue de la comète sont piégées dans l'aérogel sans pour autant briser sa structure. La faible conductivité thermique de l'aérogel permet aussi d'éviter un choc thermique brusque pour les particules afin qu'elles ne soient pas altérées, ce qui a permis à la NASA d'avoir des résultats plus fiables.

L'aérogel de silice est aussi utilisé par le CERN et d'autres instituts disposant d'accélérateurs de particules. Ils l'utilisent en tant que détecteur de radiations de Cherenkov. C'est le type de radiations que l'on obtient dans les accélérateurs de particules ainsi que dans les réacteurs nucléaires.

La vitesse de la lumière dans le vide ne peut pas être dépassée. Néanmoins la vitesse de la lumière peut être plus lente dans certains milieux. Dans l'eau la lumière va à $2/3$ de sa vitesse dans le vide. Les protons, photons ou électrons peuvent aller jusqu'à des vitesses très proches de la vitesse de la lumière, néanmoins ils ne sont pas ralentis en passant dans l'eau !

Donc dans certaines matières comme l'eau, les particules élémentaires peuvent dépasser la vitesse de la lumière.

Les nanopores de l'aérogel font que la lumière change régulièrement de milieu et est très ralentie. Mais les particules élémentaires gardent leur vitesse.

On peut donc facilement détecter des particules élémentaires à haute vitesse dans l'aérogel car une fois qu'elles dépassent la vitesse de la lumière dans ce milieu, elles émettent une radiation de Cherenkov. Cette radiation se caractérise par une légère lumière bleutée.

La capacité de certains aérogels à absorber l'huile mais pas l'eau a inspiré de nombreuses recherches, et il existe déjà aujourd'hui des éponges ou des tapis avec de l'aérogel afin de nettoyer des fuites d'huiles, mais il n'y a pas encore eu d'expérience à grande échelle..

La transparence de l'aérogel de silice permettrait de l'utiliser dans la conception de vitres et de réduire drastiquement le courant de chaleur passant par ces dernières. Pour l'instant il n'existe pas encore commercialement de vitre transparente mêlant verre et aérogel, ni de vitre constituée entièrement d'aérogel. En effet la production de monolithe autrement dit de bloc d'aérogel pur est difficile, et presque impossible à l'échelle d'une vitre de maison. Certaines entreprises proposent tout de même des vitres légèrement opaques dans lesquelles on retrouve de l'aérogel. Ces vitres sont utilisées pour profiter de la lumière du jour sans perdre trop d'énergie. Néanmoins ces vitres sont très floues et leur commercialisation est pour l'instant très limitée.

Même si la production de monolithes d'aérogel est complexe, la production de tapis d'aérogel lié avec de la fibre polymère est facilement réalisable et est très courante aujourd'hui. Le procédé est presque le même que pour produire de l'aérogel de silice classique, sauf qu'on imbibe un tapis en polyester ou en fibre de verre avec la solution de gel de silice, ensuite on procède à la gelation, au remplacement du solvant, et pour finir, au séchage supercritique. On obtient alors un tapis flexible et résistant avec d'excellentes propriétés d'isolation thermique. Ce type

de tapis a tendance à générer de la poussière, mais heureusement les procédés de fabrication ont été améliorés afin d'obtenir des tapis moins poussiéreux mais tout aussi efficaces.

Aujourd'hui deux entreprises sont à la tête du marché des tapis d'aérogel, Cabot, une entreprise allemande, et Aspen, une entreprise américaine. La Chine commence à s'attaquer au marché ce qui entraînera probablement une popularisation des tapis d'aérogel ainsi qu'une baisse considérable des prix d'ici quelques années. Ces entreprises proposent des tapis adaptés à différents scénarios, que ce soit l'isolation des bâtiments mais aussi des applications pour des circuits cryogéniques et ainsi que pour des circuits chauds.



Figure 19 : Gamme de tapis isolant de Aspen Aerogels.

Source : Aspen Aerogels (2020)

L'intérêt des tapis d'aérogel comparés à des isolants classiques est que leur conductivité thermique reste faible même à haute température. Prenons ici l'exemple du Pyrogel XTE de Aspen comparé à de la laine de roche :

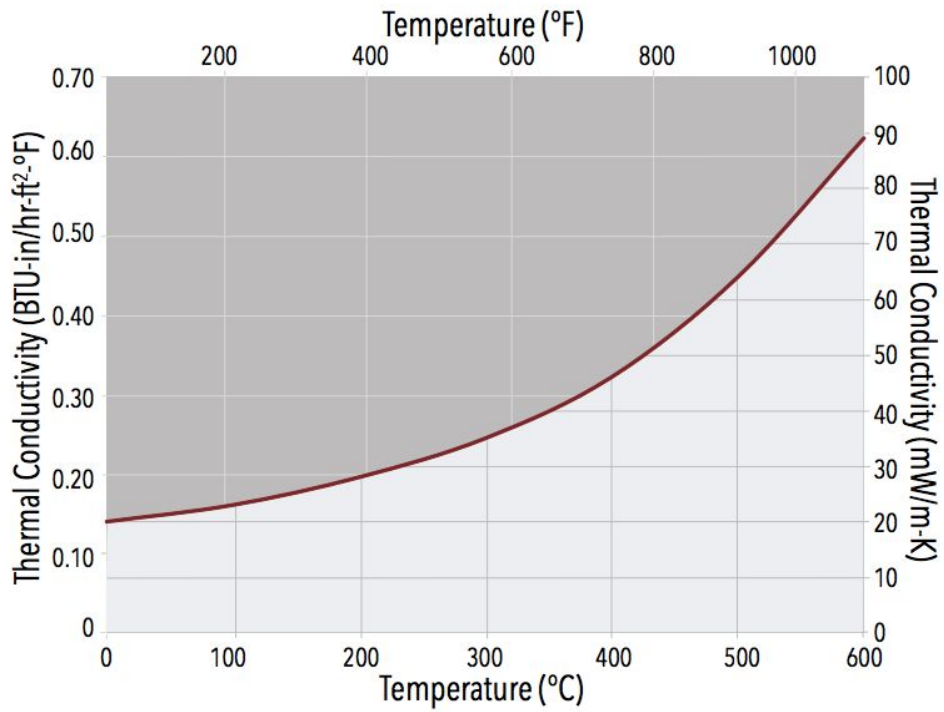


Figure 20 : Conductivité thermique du Pyrogel.

Source : Aspen Aerogel (2020)

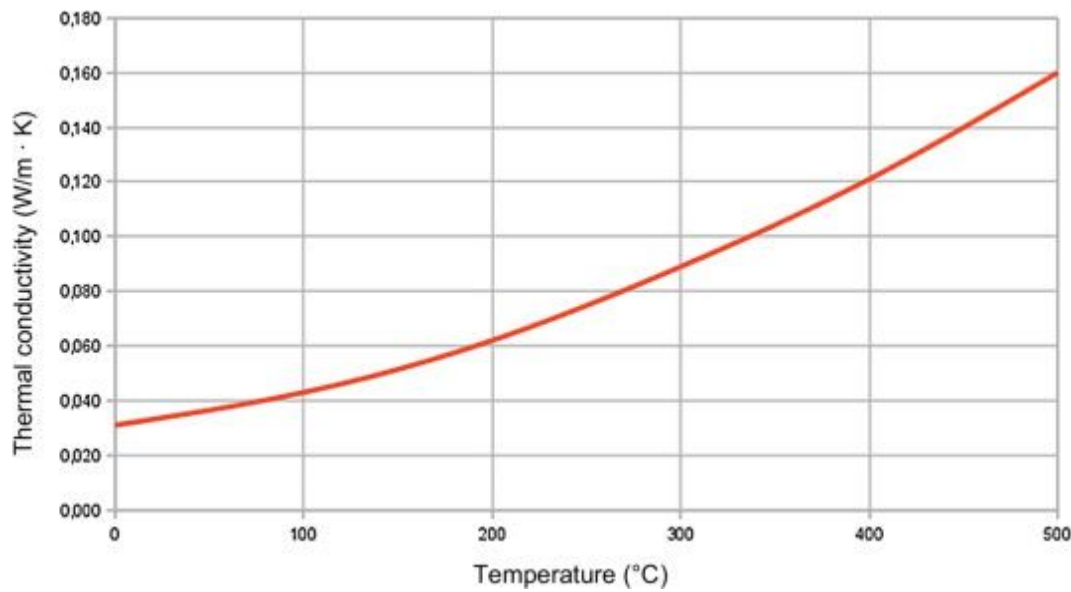


Figure 21: Conductivité thermique de la laine de roche.

Source :Plant Engineer's Reference Book (Second Edition) (2002)

Le Pyrogel est fait pour les hautes températures que l'on peut retrouver dans certaines industries; à 500°C son coefficient de transmission de chaleur est d'environ $0,065\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ contre $0,16\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour la laine de roche. On a donc besoin de 2,5 fois moins d'isolant pour le même résultat avec de l'aérogel. De plus les tapis d'aérogel gardent aussi un bon coefficient lorsqu'ils sont comprimés.

Aspen propose aussi des solutions d'isolation adaptées à la construction et aux températures ambiantes avec un coefficient cette fois de $0,015\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ce qui permet un gain de place considérable dans tous types d'habitations, ou bien de fortes économies en chauffage ou climatisation.

La gamme adaptée aux circuits froids se retrouve de plus en plus souvent dans les terminaux et autres installations traitant du LNG, elle a été conçue spécialement pour éviter les jet fire et pool fire ainsi que pour ne plus avoir besoin de joints de contraction dans les circuits froids.

Tous ces tapis ont l'avantage d'être légers, souples, et très faciles à installer. Les tapis d'aérogel sont aussi hydrophobes et laissent la vapeur s'échapper ce qui empêche le développement de "champignons" et réduit considérablement la corrosion sous isolation (plus connu sous le nom de corrosion under insulation (CUI)). Ils ont aussi des propriétés acoustiques, et sont capables de limiter la diffusion des vibrations.

D'après le site aerogel.org :

"Silica aerogel materials are poised to displace mineral wool in the decade, translating into greater efficiency and reduced emissions in what amounts to 15% of all industrial CO₂ emissions in the United States."(1)

Autrement dit l'aérogel sera probablement amené à remplacer la laine de roche comme isolant thermique dans les 10 prochaines années et pourra permettre de réduire de 15% les émissions industrielles de CO₂ aux États Unis.

L'aérogel est aussi utilisé dans les peintures et les coatings, permettant de les épaissir mais aussi de les rendre plus isolants. On en retrouve même dans certains produits de beauté afin de d'obtenir une peau moins grasse à apparence plus mate.

Évidemment l'industrie vestimentaire s'intéresse de près aux tapis d'aérogel, il

existe déjà des vestes et des semelles intégrant de l'aérogel; de nombreux projets de crowdfunding visant à commercialiser des vestes de ski ou des gants isolés à l'aérogel ont vu le jour ces dernières années.

L'intérêt croissant pour l'aérogel et ses performances entraîne même certains grands groupes à développer leurs propres solutions. Par exemple Bouygues Construction a développé en partenariat avec BASF ses propres tapis d'aérogel appelé Slentite pour l'isolation des bâtiments.

Et malgré ce développement et ces promesses, la marine marchande n'a pas encore mis le cap sur l'aérogel. La première partie de ce mémoire était basé sur les aérogels, leurs propriétés et la place qu'ils se font dans le monde d'aujourd'hui. Il est maintenant temps d'étudier si l'aérogel a sa place dans l'industrie maritime.

Les aérogels et la marine marchande

L'industrie maritime est une industrie pleine de défis. Que ce soit des défis écologiques, économiques, ou bien même des défis vis à vis du confort et la sécurité des marins, il y a toujours place pour de l'amélioration. Ce chapitre va donc traiter des améliorations auxquelles l'aérogel peut contribuer à bord des navires de la marine marchande.

Isolation thermique

Isolation dans la salle des machines

En quittant le port, chaque navire dispose d'une certaine quantité de carburant à bord. Ce carburant sert à la propulsion du navire mais aussi à la production d'électricité à bord. La consommation des navires est donc énorme, et par conséquent la somme dépensée dans le carburant et l'impact écologique le sont aussi. Faire des économies de carburant est l'une des priorités pour les officiers mécaniciens. Il est aussi important de noter que la majorité des feux et brûlures à bord ont lieu dans la salle des machines, une bonne isolation thermique a donc un important rôle à jouer pour ce qui est de la sécurité.

Dans la salle des machines d'un navire les températures sont toujours élevées, généralement entre 25 et 50 degrés celsius soit environ 15 degrés de plus que la température extérieure. Heureusement sur les bateaux récents les salles des machines sont équipées de système d'air conditionné et de ventilation. Ces systèmes représentent tout de même une énorme quantité d'énergie consommée et ne représente pas une solution économique ni écologique. Isoler correctement les composants de la salle des machines est donc essentiel.

Afin de bien estimer l'importance de l'isolation thermique dans la salle des machines, il faut d'abord mettre en avant les équipements les plus chauds. En général à bord des navires on retrouve deux principales sources de chaleur, le moteur principale (ME) ainsi que la chaudière (Boiler) mais aussi certains réservoirs qui doivent être chauffés pour diminuer la viscosité de leur contenu, par exemple on chauffe le fioul lourd à environ 65°C pour s'assurer de sa fluidité dans les tuyaux. Attention, certaines installations chauffent mais ont besoin de diffuser leur chaleur pour éviter de surchauffer par exemple certains moteurs électriques reliés à des pompes, les isoler serait une dangereuse erreur.

Pour isoler à bord on retrouve souvent de la laine de roche ou de la laine de verre, ces isolants sont efficaces et bon marché. En remplaçant cette isolation par des tapis d'aérogel de silice, on peut économiser beaucoup d'espace, mais aussi de main d'oeuvre. Les tapis d'aérogel étant bien plus légers, souples, et fins, leur installation et entretien sont aussi plus faciles.

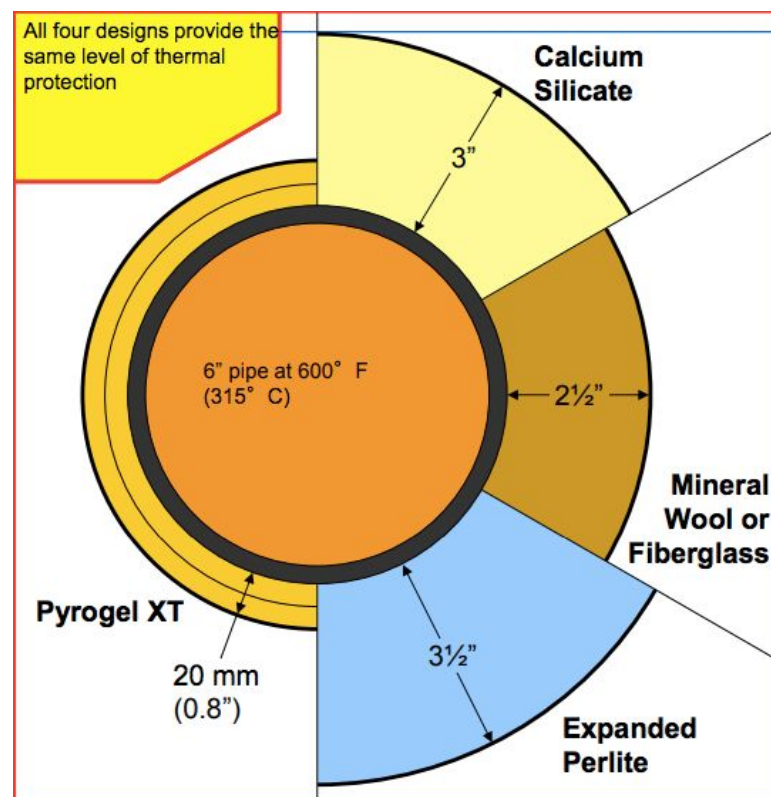


Figure 22 : Épaisseurs d'isolation équivalentes de certains isolants.

Source : Aspen Aerogel (2020)

Ce schéma représente l'épaisseur nécessaire pour isoler un tuyau à 315 degrés Celsius avec différents matériaux. Cette différence d'épaisseur permet une isolation plus précise et plus adaptée à l'environnement de la salle des machines. Là où certains tuyaux ne peuvent être isolés avec des isolants classiques, les tapis d'aérogel peuvent être installés facilement.

Les tapis d'aérogel ont aussi l'avantage d'être très résistants aux flammes et de ne pas produire de fumée, et contrairement à d'autres produits tel que la laine de roche, l'aérogel n'utilise pas de liant organique. Les liants organiques ont tendance à se détériorer au dessus de 200°C ce qui impacte la durabilité de certains isolants.

De plus leur légèreté, flexibilité, résistance à la compression, résistance à l'humidité et faible conductivité thermique en font un isolant qui ne prend que très peu de place lorsqu'il est stocké, ce qui est très intéressant à bord où l'espace est souvent limité.

On peut donc facilement imaginer les tapis d'aérogel remplacer les isolants classiques sur les navires, par exemple pour les chaudières ou les tuyaux de gaz d'échappements. On peut aussi les utiliser pour isoler les tanks de fioul lourd, et les tuyaux transportant des liquides chauds.

Dans certains cas on ne peut pas utiliser de tapis aérogel pour isoler une surface. Mais il existe aussi une solution à ce problème.

Cette solution c'est un coating contenant de l'aérogel de silice, évidemment ça n'est pas aussi efficace que des tapis d'isolation, mais les propriétés isolantes sont quand même présentes, même sur une couche d'un millimètre.

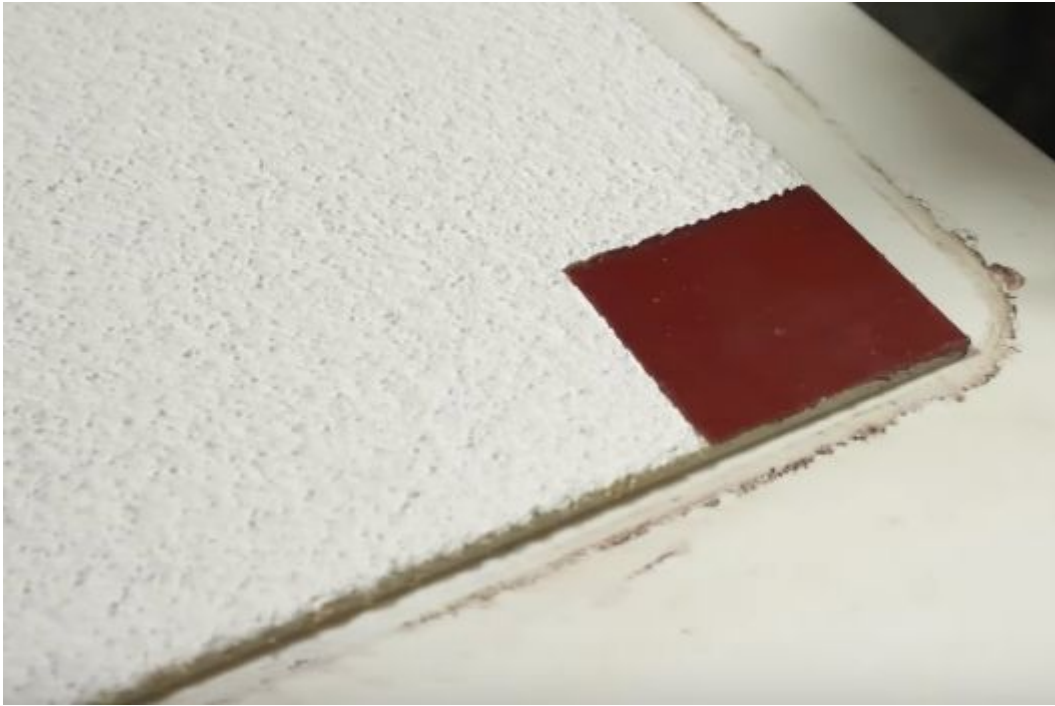


Figure 23 : Plaque de métal partiellement recouverte d'un coating à l'aérogel.

Source : Youtube "Flamethrower vs Aerogel "-Veritasium (2019)

Ici on peut voir une plaque de métal, la partie rouge est vierge et la partie blanche est isolée avec un coating à base d'aérogel. La partie rouge est chauffée à 180°C, mais grâce à la couche isolante, la partie blanche est à 125 degrés Celsius. Cette différence de température, malgré la finesse de la couche, n'a pas de gros impact sur les pertes thermiques dans la salle des machines. Néanmoins l'aérogel confère à ce coating une autre grande qualité très utile pour les marins. En effet malgré sa température très élevée et largement suffisante pour infliger une brûlure sur la peau d'un marin, l'aérogel transmet tellement lentement la chaleur que la plaque ne brûle pas.

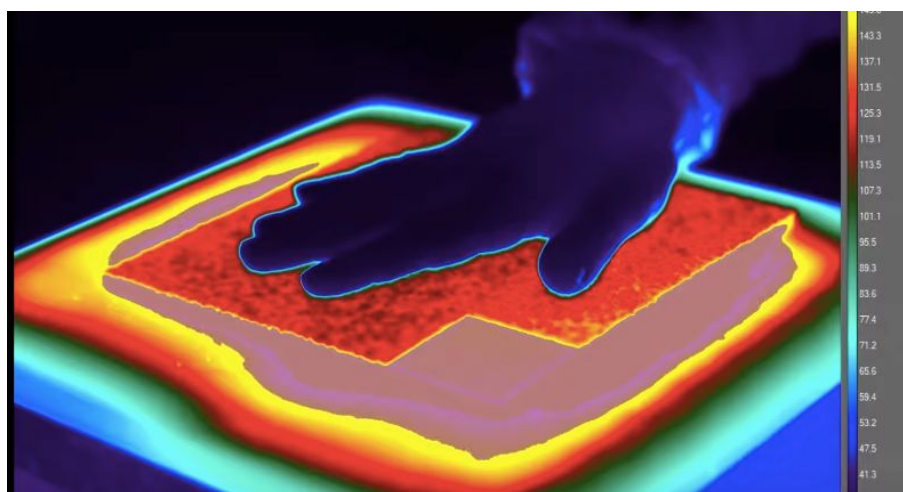


Figure 24 : Démonstration de la faible conductivité thermique du coating.
Source : Youtube "Flamethrower vs Aerogel "-Veritasium (2019)

Ici on retrouve la même plaque que sur l'image précédente, la température de la partie non isolée va au delà de la mesure de la caméra thermique mais on l'a précédemment mesurée à environ 180°C en changeant l'échelle. Sur la partie isolée on peut observer que la température est entre 120 et 130 °C et pourtant il est possible de poser sa main nue sur le coating. On peut aussi verser de l'eau sur le coating et le courant de chaleur est si faible que l'eau n'entre pas en ébullition.

Ce type de coating a donc sa place dans la salle des machines, permettant d'isoler les poignées de certaines vannes et d'autres surfaces, on peut grandement réduire les risques de brûlure chez les mécaniciens. En cas de fuite de produit inflammable, ce coating peut aussi permettre d'éviter une combustion au contact d'une surface chaude. L'économie d'énergie n'est pas très intéressante avec ce coating mais en limitant les blessures et les risques d'incendie on améliore la sécurité à bord, ce qui est primordial. On peut aussi imaginer l'utilisation de ce genre de coating sur le moteur principal ou certains générateurs diesel, on ne peut pas toujours y mettre des tapis d'isolation.

À bord, les salles des machines sont déjà bien isolées, l'intérêt de l'aérogel n'est pas seulement de mieux isoler le matériel déjà isolé, mais aussi d'isoler certains objets que les isolants classiques ne permettent pas d'isoler correctement.

Isolation du LNG

Le gaz naturel est transporté à bord de tankers spécialisés permettant de le transporter sous forme liquide. En effet le gaz naturel liquéfié (LNG) prend 600 fois moins de volume que le gaz naturel à l'état gazeux. Pour le transporter il faut donc baisser la température à bord des tanks jusqu'à -160°C , température à laquelle le méthane (composant principal du gaz naturel) se condense.

L'un des types de tanks les plus couramment utilisés pour transporter du LNG est le "membrane tank".

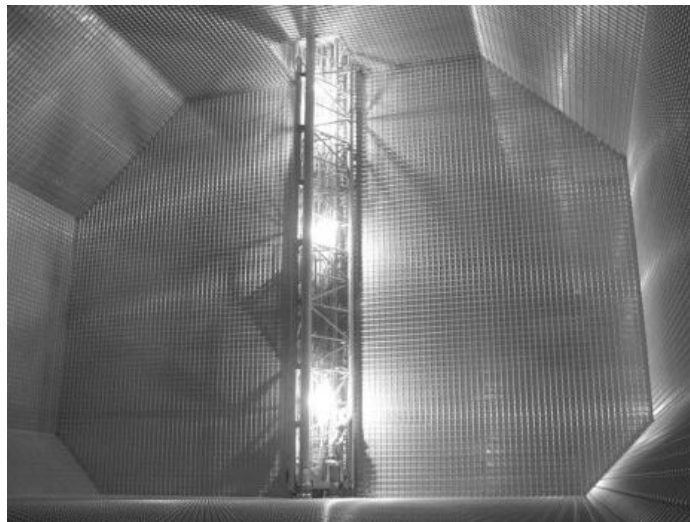


Figure 25 : Membrane tank LNG.

Source : Handbook of Liquefied Natural Gas (2014)

Les membrane tanks portent ce nom car leurs parois sont relativement souples, telle une membrane. Cette souplesse est due aux différentes couches composant cette membrane.

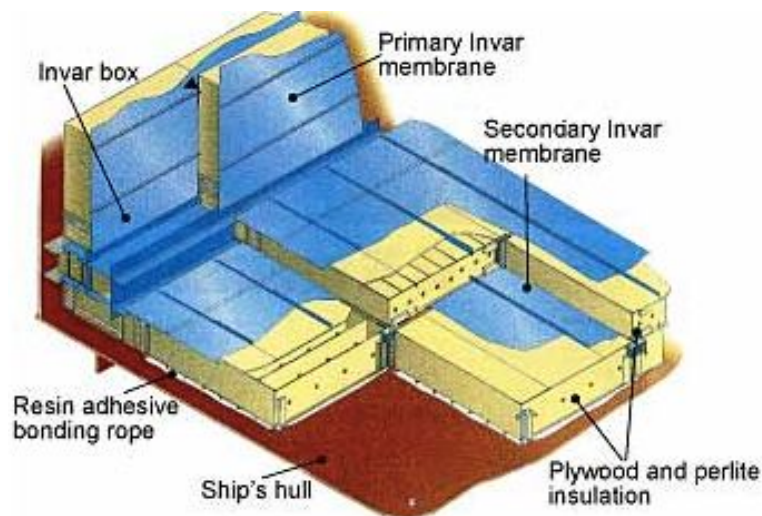


Figure 26 : Composition commune d'un membrane tank.

Source : TWI Global (2006)

Il y a plusieurs types de membrane tanks, mais en général on retrouve une structure proche de celle visible ci-dessus. D'abord une couche d'INVAR, c'est un alliage de fer et de nickel dont le coefficient de dilatation est très faible, sa différence de taille entre la température ambiante et la température du LNG est donc suffisamment faible pour ne pas endommager la structure du tank. En dessous on retrouve une première couche d'isolant thermique, généralement de la perlite sur une couche de 200 mm, puis une autre couche d'INVAR et encore en dessous une autre couche d'isolation de 200 mm. La membrane est ensuite mise sous pression avec du diazote (N_2) qui condense à $-192^\circ C$ ce qui évite la présence de liquide dans l'isolation.

Cette membrane est posée sur la coque intérieure du navire, elle même séparée de la coque externe du navire par un espace réservé aux ballasts.

La perlite ou plutôt la perlite expansée est un isolant thermique obtenu à base de roche volcanique. On l'utilise comme isolant sous forme de petites granules blanches. Pure, elle a une densité d'environ 130 kg/m^3 et un coefficient de conductivité thermique de $0.047 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Sa forme granuleuse permet de remplir

facilement des grands volumes mais il est aussi possible de l'utiliser sous forme de tapis.

La perlite est un isolant qui respecte les critères nécessaires pour isoler un membrane tank, ces critères sont :

- Un faible coefficient thermique.
- Une bonne résistance aux flammes.
- Une résistance à la compression.
- Une résistance aux endommagements mécaniques.
- Une faible densité.
- Pas de réaction particulière avec le LNG.
- Une bonne étanchéité.

Si ces critères semblent familiers c'est parce que les tapis d'aérogel de silice répondent à chacun d'entre eux. Encore mieux, l'aérogel est plus léger, conduit moins bien la chaleur, résiste mieux aux flammes et est plus étanche. L'utilisation de l'aérogel comme isolant semble donc être une alternative envisageable.

À bord des navires transportant du LNG, il existe des règles très strictes du IGC code ("International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk ", ou en français, Recueil international de règles relatives à la construction et à l'équipement des navires transportant des gaz liquéfiés en vrac). En effet la distance entre la coque extérieure et le LNG est limitée.



Figure 27 : Réglementation IGC.

Source : Advanced Tanker Training Gas Course, Jacobs (2020)

Il existe différents types de construction mais pour ce type de tank (3G) il faut entre la cargaison et l'extérieur du navire, 800 mm sur les côtés (régulation récente) et 2 mètres ou bien un quinzième de la largeur du navire dans le fond. Arriver à réduire l'espace dédié à l'isolation permet d'augmenter le volume total de la cargaison, de plus l'aérogel ayant une très faible densité, ajouter de la masse de cargaison est possible compte tenu de la masse d'isolant économisé.

Afin de se faire une idée plus précise des gains de quantité de cargaison possible grâce à l'aérogel, il va falloir s'inspirer d'une membrane tank qui sera isolée à la perlite, puis avec une isolation à base d'aérogel. Pour l'isolation à l'aérogel les valeurs se baseront sur les performances du Cryogel de Aspen, pour les valeurs de la perlite, on se base sur les tapis de perlite SPROUL WR-1200 . Nous estimons que le navire est un tanker LNG de type Qmax (taille maximale pour un gazier pour rentrer au Qatar) avec un volume pour la cargaison de 266 000 mètres cubes de LNG.

Petite précision avant d'entamer les estimations, l'isolation thermique de la membrane est régulièrement calculée afin d'obtenir une certaine quantité de "boil off" . Le but n'est donc pas d'augmenter l'isolation du tank mais bien de maintenir la même isolation tout en réduisant la taille de la couche isolante.

Quelques valeurs importantes :

Aérogel (Cryogel) :

$\lambda = 0,014 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (à -160°C)

$\rho = 160 \text{ kg/m}^3$

Perlite :

$\lambda = 0,040 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (à -160°C)

$\rho = 210 \text{ kg/m}^3$

On va estimer que notre navire Qmax peut transporter $266\,000\text{m}^3$ de cargaison dans un membrane tank isolé avec des tapis de perlite. Les dimensions du membrane tank imaginaire sont les suivantes :

Volume = $266\,000 \text{ m}^3$

Longueur = $295,55 \text{ m}$

Cross Section = 900m^2

Total Membrane Surface = $33\,573,88 \text{ m}^2$

(afin de faciliter les calculs on assume que la paroi avant et la paroi arrière ont la même surface que la Cross Section)

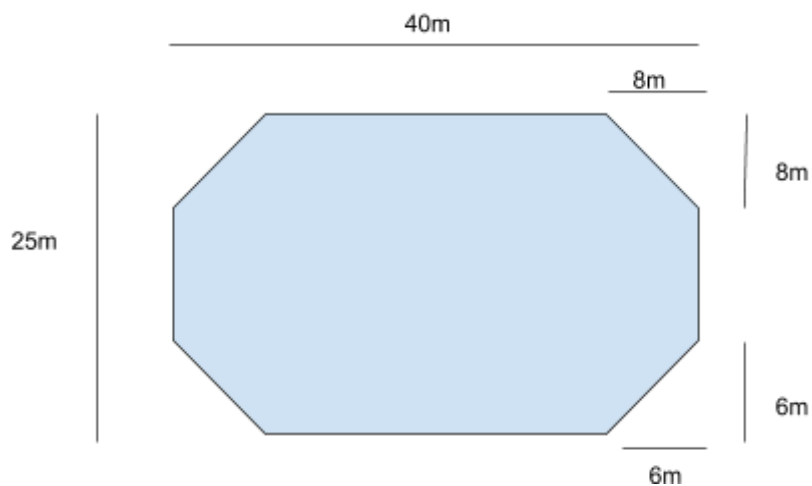


Figure 28 : Dimension du tank imaginaire isolé à la perlite.

Source : Applications de l'aérogel dans la marine marchande (2020)

On a donc une surface de 33 573,88 m² d'isolation en perlite de 400 mm d'épaisseur ce qui représente 13 429,5 m³ d'isolation à base de perlite. Soit 2820 tonnes.

L'isolation aérogel est 2,86 fois plus isolante que l'isolation à base de perlite, on a donc besoin de seulement 140 mm d'isolation à base d'aérogel pour la même isolation thermique qu'avec de la perlite.

Afin d'obtenir le volume d'aérogel nécessaire, il ne suffit pas de calculer le volume à partir des valeurs précédentes. En effet, si on a moins d'épaisseur d'isolation, la surface totale de la membrane du tank va aussi changer. Ici on ne va pas changer la taille des parois diagonales afin de faciliter les calculs.

En utilisant de l'aérogel à la place de la perlite on gagne donc 260 mm de chaque côté et le tank a désormais une longueur de 296,07m (on a gagné 0,26 m à l'avant et à l'arrière).

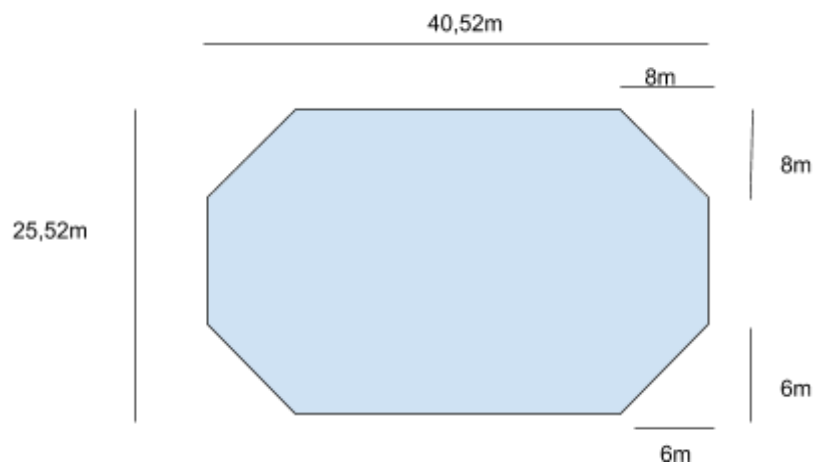


Figure 29 : Dimension du tank imaginaire isolé au Cryogel.

Source : Applications de l'aérogel dans la marine marchande (2020)

Avec ces valeurs on obtient :

$$V = 276\,550,1 \text{ m}^3$$

$$\text{Cross Section} = 934,07 \text{ m}^2$$

$$\text{Surface membrane} = 34\,248,78 \text{ m}^2$$

Ce qui nous donne un volume d'aérogel de $4\,794,8 \text{ m}^3$. Si l'on prend en compte la densité cela représente $767,128$ tonnes d'isolation.

On peut maintenant observer les résultats, avec un tank isolé à l'aérogel il est possible de transporter $10\,550 \text{ m}^3$ de plus qu'avec l'isolation en perlite. La densité du LNG étant de $422,62 \text{ kg/m}^3$, cela représente $4\,458$ tonnes de cargaison en plus.

Attention, le changement d'isolation réduit la masse d'isolation de $2052,8$ tonnes ce qui ne compense pas un ajout de cargaison de $4\,458$ tonnes. À noter que dans le calcul on ne prend pas non plus en compte la masse d'INVAR qui augmente car la surface de la membrane a augmenté.

De nombreux autres paramètres sont à prendre en compte mais cette simulation a pour but de donner une idée des gains de quantité de cargaison possible grâce à l'aérogel.

L'aspect économique sera aussi étudié un peu plus tard dans ce mémoire.

Isolation combinaison de survie

L'aérogel de silice est utilisé de plus en plus couramment dans l'industrie vestimentaire, en particulier lorsqu'il s'agit de sports extrêmes. On en trouve par exemple dans des doublures de vestes d'alpinisme mais aussi dans des combinaisons de plongée.

Il est possible d'intégrer de l'aérogel de silice sous forme de poudre directement dans le textile d'une combinaison mais on peut aussi ajouter une couche de tapis d'aérogel.

Généralement composées de néoprène et de polyéthylène, les combinaisons de survie (immersion suits) ont pour but de maintenir les marins en vie lorsqu'ils sont amenés à abandonner le navire. Elles se doivent donc d'être étanches et isolantes afin de permettre au corps de garder sa température le plus longtemps possible. Le néoprène a une conductivité thermique de $0,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et le polyéthylène $0,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Une meilleure isolation thermique permettrait de mieux conserver l'énergie des utilisateurs et d'améliorer le confort avec une combinaison plus fine et plus légère.

En réduisant l'épaisseur et le poids d'une combinaison il est possible de la rendre plus facile à enfiler et par conséquent de faire gagner de précieuses secondes aux marins dans des situations de crise.

Actuellement il n'existe pas de combinaison utilisant de l'aérogel, les combinaisons en néoprène sont très bien développées, des combinaisons de survie contenant de l'aérogel ne seront donc probablement pas produites avant de longues années.

Isolation Lifeboat/Liferaft

Dans le même thème que les combinaisons de survie, les lifeboats aussi ont besoin d'être isolés. Les lifeboats peuvent être utilisés pour des situations extrêmes ou l'équipage doit abandonner le navire. Les conditions à bord peuvent être extrêmes. Si le lifeboat se trouve dans une zone isolée, il faut parfois compter plusieurs semaines pour être secouru. Au milieu de l'océan les nuits sont froides, il est donc essentiel d'isoler les lifeboats afin d'augmenter les chances de survie des personnes ayant besoin de les utiliser.

Les lifeboats sont aussi équipés de système de sprays d'eau pour créer une barrière en cas de feu, dans le cas d'une fuite de carburant ou même de fuite de cargaison dans le cas d'un pétrolier, le lifeboat peut être entouré de flammes.

Ces deux situations montrent l'importance d'une bonne isolation dans les lifeboats. Le plus couramment on retrouve du polyuréthane entre la coque externe et interne du navire.

Cette couche isolante a aussi d'autres rôles, tels que l'absorption de chocs et l'augmentation de flottabilité du lifeboat. Il faut aussi mesurer l'importance de l'espace à bord, les lifeboats sont conçus pour permettre d'avoir le plus de personnes possible à bord avec suffisamment de réserves de nourriture et d'eau, une bonne isolation qui ne sacrifie pas d'espace est donc adaptée aux lifeboats.

Le polyuréthane est un bon isolant avec un coefficient d'environ $0,025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ à température ambiante. À haute température il n'est pas aussi efficace et exposé au feu il fond, ce qui est un grand défaut dans des situations où le lifeboat est cerné par les flammes.

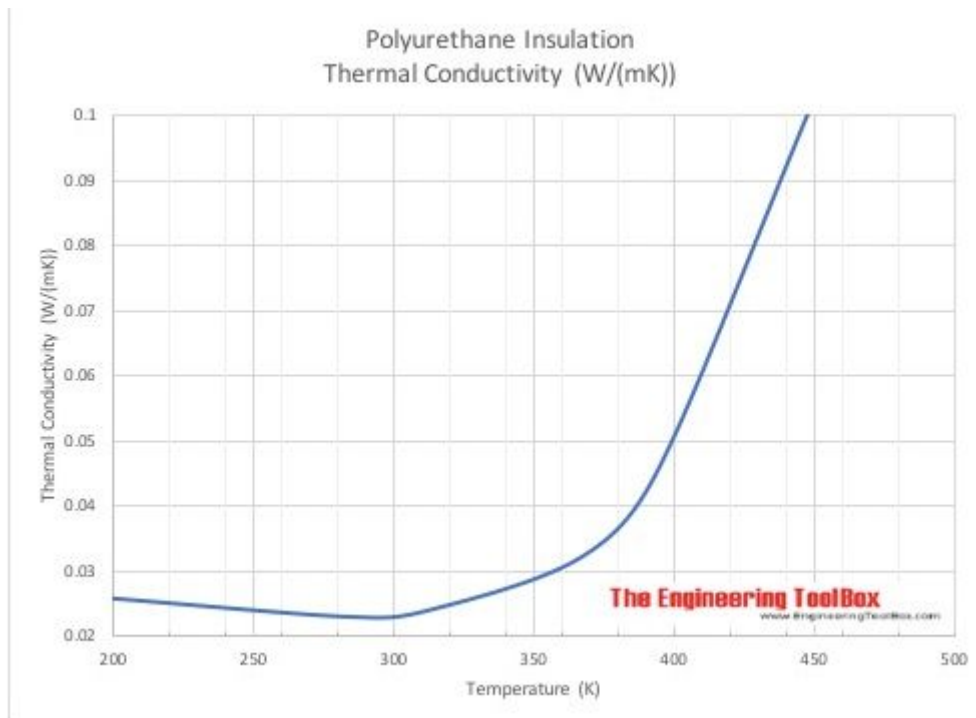


Figure 30 : Coefficient d'isolation du polyuréthane.

Source : The engineering toolbox (2007)

Les tapis d'isolation aérogel remplissent les conditions nécessaires sans sacrifier de place, et résistent aussi aux températures élevées et aux flammes. De plus les tapis d'aérogel étant hydrophobes, l'eau ne risque pas de pénétrer le lifeboat si la coque extérieure est endommagée.

Pour les radeaux de sauvetage (Liferaft), il n'existe pas de régulation précise de l'IMO sur l'isolation thermique, il est seulement demandé à ce que les liferaft soient "suffisamment isolés". Généralement le sol des radeaux est gonflé afin d'éviter le contact direct entre la couche de plastique intérieure et l'eau. Il existe aujourd'hui des liferaft avec une couche d'isolation supplémentaire en mousse de polyuréthane.

Encore une fois les tapis d'aérogel permettraient de réduire l'épaisseur de la couche d'isolant avec une conductivité thermique de $0,015 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ l'aérogel prendrait 1,6 fois moins de place. Même si ça semble peu, ça peut laisser de la place pour d'autres éléments essentiels à la survie.

Navires poseurs de conduites

Il existe un domaine dans lequel l'aérogel est déjà utilisé depuis plusieurs années dans la marine marchande, la pose de conduites sous-marines. Ces conduites sont le plus souvent utilisées pour transporter du pétrole sous la mer, par exemple entre une plateforme pétrolière en mer et une raffinerie à terre. Ces conduites sont posées sur le fond marin par des navires spécialisés similaires à des câbliers.

Le pétrole est un liquide très visqueux il est donc nécessaire de le chauffer afin de le fluidifier et de pouvoir le pomper dans les conduites pouvant parfois mesurer des centaines de kilomètres. Afin de maintenir le pétrole à une température suffisamment élevée sur ces distances, il faut isoler les conduites pour éviter au maximum la dissipation d'énergie dans l'océan, dont la température à très basse profondeur stagne entre 0 et 3°C.

Afin d'isoler suffisamment les conduites sur de grandes distances, la couche d'isolation thermique doit être très épaisse, ce qui rend le tuyau lourd et volumineux. Pour les conduites de diamètre élevé, le poids et le volume des tuyaux limitent le nombre de navires capables de les déposer sur le fond marin. Aspen Aerogels a donc créé une gamme spécialement pour les conduites sous marines appelée Spaceloft subsea. Cette isolation a permis de diviser par 3 l'épaisseur couche d'isolation nécessaire dans les câbles, réduisant ainsi le poids des câbles et la place nécessaire pour les stocker.

Grâce à ce changement d'isolation thermique, le nombre de navires capables de déposer ces conduites a énormément augmenté. Aujourd'hui de nombreuses compagnies pétrolières telles que Exxon ou Total utilisent des conduites isolées à l'aérogel.

Cet exemple est le premier cas d'utilisation d'aérogel à grande échelle dans la marine marchande.

Propriétés oléophiles

Utilisation dans les chaudières

À bord des navires pour chauffer certaines machines ou pour produire de l'électricité, on retrouve de grandes chaudières marines. Afin de produire de la vapeur une flamme est créée. On utilise la chaleur produite par la flamme pour faire chauffer des tubes d'eau, ou on utilise des tubes dans lesquels les gaz chauds produits par la flamme passent pour chauffer un réservoir d'eau. L'eau utilisée dans la chaudière suit un cycle fermé et une fois passée par les consommateurs elle est condensée et introduite à nouveau dans la chaudière. Certains des consommateurs de chaleur sont des réservoirs de fioul lourd dans lesquels on fait passer des tubes de vapeur chaude pour diminuer sa viscosité. En cas de fuites dans ces tubes on peut retrouver du fioul ou de l'huile dans la chaudière.

La contamination d'huile dans les chaudières est très risquée, elle peut entraîner une forte production de mousse dans le réservoir, cette mousse peut nuire à la qualité de la vapeur et endommager fortement les consommateurs. En se déposant sur les tuyaux d'échange de chaleur entre le brûleur et l'eau, l'huile peut grandement réduire la conduction thermique. Sur le long terme l'efficacité de la chaudière est moins bonne et les tuyaux à force d'être surchauffés sont endommagés.

Certains aérogels sont capables d'absorber l'huile sans absorber d'eau. C'est notamment le cas de l'aérogel de silice et de l'aérogène. Plus tôt nous avons envisagé d'utiliser de l'aérogel comme filtre couplé à une pompe permettant d'absorber l'huile mais pas l'eau (voir figure 15). En utilisant un système de ce type, il est possible de retirer facilement l'huile de l'eau d'un circuit vapeur. On peut donc détecter la présence d'huile dans un circuit et en absorber afin d'éviter la création de mousse dans la chaudière.

Placé à la sortie du condenseur, ce système de séparation permettrait d'enlever l'huile du circuit avant même qu'elle atteigne la chaudière, diminuant grandement les risques de moussage. De plus en plaçant ce système dans le condenseur, il peut contribuer à la création de la basse pression nécessaire pour aspirer la vapeur des consommateurs. Ce n'est pas une réelle solution au problème de fuite d'huile, la seule solution étant de trouver et combler la fuite. Néanmoins une utilisation périodique permettrait de détecter et de compenser les petites fuites.

Procédé de dépollution

De la même manière que pour les chaudières, les fuites d'huile à grande échelle peuvent provoquer d'importantes pollutions en mer. Tout le monde est conscient des dangers et de l'impact des marées noires sur l'environnement. Utiliser une pompe permettant de séparer l'huile de l'eau serait une solution efficace pour se débarrasser des marées noires avant qu'elles atteignent les côtes. Le gros avantage de cette solution c'est que les hydrocarbures récupérés ne contiennent pas d'eau et sont donc réutilisables. On pourrait donc espérer empêcher une catastrophe écologique tout en récupérant la cargaison perdue.

Ce procédé pourrait fonctionner à grande comme à petite échelle. Même les gouttelettes sous la surface pourraient être aspirées.

Un système de dépollution de ce type pourrait facilement être équipé de nombreux types de navires.

Dans la partie dédiée aux expériences une tentative de création de pompe à huile sera réalisée avec les moyens à disposition.

Limiter la corrosion

Le coût global de la corrosion sur terre est estimé à environ 2500 milliards de dollars par an, soit plus de 3% du PIB (produit intérieur brut) mondial. Elle pose des problèmes dans presque tous les milieux, allant du nucléaire aux outils de jardinage, en passant par la marine marchande.

À bord, la corrosion représente un coût important en argent mais aussi en temps. La lutte contre la corrosion est pourtant essentielle afin de diminuer les risques à bord.

Coatings

L'aérogel étant hydrophobe, son utilisation dans les coatings anti corrosion est facilement imaginable. Sa faible conductivité limite aussi l'impact des variations de températures et des chocs thermiques, réduisant la présence de craquelures sur le coating ce qui le rend plus durable. Pour des applications sur des surfaces exposées à des variations de températures élevées, un coating à l'aérogel est donc facilement envisageable.

Sur la coque du navire l'aérogel peut limiter la corrosion mais aussi servir d'antifouling. Les propriétés superhydrophobes de l'aérogel de silice en font aussi un composant idéal pour que les navires glissent mieux sur l'eau en réduisant la friction. De nombreuses entreprises et chercheurs se penchent déjà sur le sujet car l'aérogel pourrait être une alternative remplaçant les antifouling communs qui sont souvent toxiques pour l'environnement marin.

L'aérogel peut donc aussi être utilisé dans les coatings pour la coque des navires.

Tapis hydrophobe

Les tapis isolants évoqués plus tôt ont un autre avantage. Contrairement à la majorité des isolants classiques, les tapis d'isolation à base d'aérogel de silice ne favorisent pas la corrosion sous isolation.

La corrosion sous isolation est un phénomène très courant que l'on observe sur les tuyaux et les réservoirs ainsi que sur la majorité des objets isolés par des tapis isolants. Ce type de corrosion est à l'origine de nombreux accidents, de fuites.

La corrosion sous isolation a lieu lorsque les tapis d'isolation sont exposés à l'eau, l'eau pénètre le tapis pour atteindre le métal, puis la corrosion a lieu sans que l'on puisse l'observer. Il faut parfois jusqu'à 5 ans avant de pouvoir en observer les conséquences. En cas de corrosion sous isolation il faut généralement remplacer le métal attaqué mais aussi toute la couche d'isolation de la zone. La corrosion sous isolation a lieu avec tous les tapis isolants classiques. Le plus souvent on utilise des protections autour de l'isolation afin d'empêcher l'eau d'entrer dans l'isolation, mais elles sont rarement parfaitement étanches et quand elles sont endommagées l'eau trouve son chemin. Il est très courant d'appliquer un coating entre le tuyau et l'isolation, mais avec le temps le coating aussi perd de l'efficacité et n'empêche pas la corrosion. La solution la plus courante est d'utiliser l'isolation la plus étanche à l'eau possible afin de limiter la présence d'eau dans l'isolation.

Les tapis d'aérogel étant hydrophobes, l'eau ne peut pas atteindre le métal isolé ou même fragiliser la couche d'isolation. De plus, si jamais l'isolation aérogel est endommagée et que de l'eau s'infiltré jusqu'à la paroi, l'aérogel laisse passer la vapeur d'eau et sèche donc très vite sans que de l'eau reste piégée entre l'isolation et le métal. Il faut tout de même préciser que les tapis d'aérogel sont flexibles et résistants à la compression, ce qui en fait un matériel très robuste et durable. Le Pyrogel évoqué plus tôt dans ce mémoire dispose aussi d'un renfort chimique permettant l'inhibition de la corrosion.

Les tapis d'aérogel sont aussi plus légers et normalement moins épais que les isolants classiques. Ce qui facilite grandement l'entretien et les vérifications.

Isolation sonore

La salle des machines est le coeur des navires, malheureusement ses vibrations sont très nocives pour la santé des marins. Les vibrations peuvent causer des problèmes articulaires, osseux, auditifs, cardiovasculaires, et plus encore.

La structure poreuse de l'aérogel ainsi que les polymères utilisés dans les tapis sont très efficaces pour absorber les vibrations. L'utilisation de tapis d'aérogel comme isolants dans la salle des machines permettrait donc, au delà d'isoler thermiquement, de réduire les vibrations ambiantes.

Utiliser une couche d'aérogel dans la paroi entre la salle des machines et la salle de contrôle pourrait réduire le bruit et la température.

Expériences

Attention, ces expériences sont faites maison et ont donc été réalisées avec les moyens à ma disposition. Le protocole et le résultat ne sont donc pas aussi précis que dans le cas d'une expérience réalisée en laboratoire avec le matériel adéquat.

Séparation eau/huile

Plus tôt l'idée d'utiliser une éponge recouverte d'aérogel comme filtre dans une pompe a été évoquée. Il existe peu de représentations et d'expériences comme celle-ci disponible en ligne, J'ai donc décidé d'essayer de la reproduire.

Objectif :

Nous souhaitons nous débarrasser d'une couche d'huile à la surface de l'eau. Idéalement il faut récupérer l'huile intacte à la fin de l'expérience.

Protocole :

Il faut créer une pompe capable d'aspirer seulement l'huile, pour cela on va utiliser un aspirateur qui créera une dépression dans un réservoir. Un autre tuyau sera connecté au réservoir d'un côté et de l'autre côté il aspirera l'huile à travers une éponge recouverte d'aérogel.

Matériel :

- Cabot Lumira Aerogel (Débris d'aérogel pur hydrophobe sous forme de petites granules, trop légers pour être pesés avec le matériel à disposition)
- Aspirateur commun
- Réservoir (Tupperware commun)
- Morceau de tuyau d'arrosage
- Morceau d'éponge de cuisine végétale
- Gros scotch
- Eau du robinet 2L
- Huile d'olive extra vierge 25 cL
- Saladier
- Broyeur à épices

Hypothèse :

L'huile sera complètement séparée de l'eau sans présence d'eau dans l'huile récupérée.

Mesures de sécurité :

L'aérogel broyé en fine poudre est extrêmement volatile, afin d'éviter d'en inspirer ou d'en recevoir dans les yeux les protections adéquates ont été utilisées. L'aérogel n'est pas toxique mais le respirer ou en recevoir dans les yeux peut être irritant.

L'expérience :

Après la mise en place du système d'aspiration, j'ai utilisé le broyeur à épices pour écraser les morceaux d'aérogel afin d'obtenir une poudre plus fine. J'ai ajouté l'éponge dans le broyeur et broyé la poudre avec l'éponge pour bien l'imprégner. Ensuite j'ai scotché l'éponge au bout du tuyau d'arrosage (j'ai pu remarquer que le scotch n'était pas très collant à cause de la couche d'aérogel, mais bien serré il a permis de maintenir l'éponge en place). Par précaution j'ai percé un trou dans le tuyau que j'ai pu recouvrir avec mon doigt afin de laisser de l'air entrer en cas de trop forte dépression. J'ai ensuite procédé à l'aspiration de l'huile en réglant l'aspirateur sur sa puissance minimale.



Figure 31 : Expérience de pompe à huile maison.

Source : Applications de l'aérogel dans la marine marchande (2020)

Résultat :

30 s : L'éponge étant très serrée sur le tuyau, le débit était très faible, néanmoins au bout de quelques secondes j'ai pu observer que le réservoir à basse pression se remplissait d'huile.

2min : Après quelques minutes le niveau d'huile dans le saladier avait déjà considérablement baissé, alors que le niveau d'eau restait le même. Lorsque l'éponge est entièrement immergée dans l'eau, le tuyau n'aspire plus rien.

5min : Il ne reste plus qu'une fine couche d'huile sur l'eau. En remuant un peu l'eau il est nettement visible que l'huile a presque été entièrement séparée.

6min : Le tupperware rempli d'huile a craqué à cause de la pression très faible à l'intérieur. L'huile se répand sur la table et on peut remarquer la présence d'eau mais en très faible proportion. À vue d'oeil j'estime moins de 10% d'eau dans la solution finale (attention cette estimation personnelle n'a en aucun cas une valeur scientifique précise mais sert juste d'ordre de grandeur).



Figure 32 : Fuite du liquide final.

Source : Applications de l'aérogel dans la marine marchande (2020)

Observations :

La présence d'eau dans mon liquide final se justifie par l'aspect approximatif de l'expérience. Le type d'aérogel utilisé n'est pas le plus adapté pour recouvrir une éponge. En imbibant préalablement l'éponge avec un peu d'huile il est possible que la poudre recouvre plus facilement et efficacement l'éponge. L'importance d'une vanne de sûreté a été largement prouvée par les dégâts subis par le réservoir. À la fin de l'expérience l'éponge était intacte et toujours hydrophobe.

Interprétations :

Les résultats obtenus laissent penser que réaliser avec le matériel adapté, un système de séparation d'huile de l'eau pourrait être réellement efficace que ce soit à grande ou à petite échelle. Cette solution est peu coûteuse en matériel compte tenu de la quantité d'huile qu'une seule pompe peut aspirer. De plus la quantité d'aérogel utilisée est très faible pour de tels résultats.

Isolation d'une chaudière (modèle réduit)

La situation sanitaire au moment de la rédaction de ce mémoire n'a pas permis la réalisation de cette expérience. Le matériel nécessaire à l'isolation n'a pas pu être réceptionné et la chaudière miniature n'était pas accessible compte tenu du confinement.

L'objectif de cette expérience était de tester la qualité de l'isolation à base d'aérogel et de la comparer à d'autres isolations classiques.

On peut tout de même réaliser quelques calculs afin d'avoir une idée des résultats possibles.

On imagine une chaudière chauffant à 150°C sous une pression de 4,78 bars absolus. La chaudière se situe dans une pièce à température de 20°C. La chaudière est un cylindre de 15 cm de rayon et 106 cm de long avec une surface isolable de environ 1 mètre carré. La paroi de la chaudière est en acier inox et d'une épaisseur de 1cm.

- Pyrogel Aspen $\lambda = 0,025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Laine de roche $\lambda = 0,050 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Polyuréthane $\lambda = 0,060 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Perlite $\lambda = 0,080 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Acier inox $\lambda = 26 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

À noter que les valeurs précédentes sont celles de la conductivité thermique à 150°C.

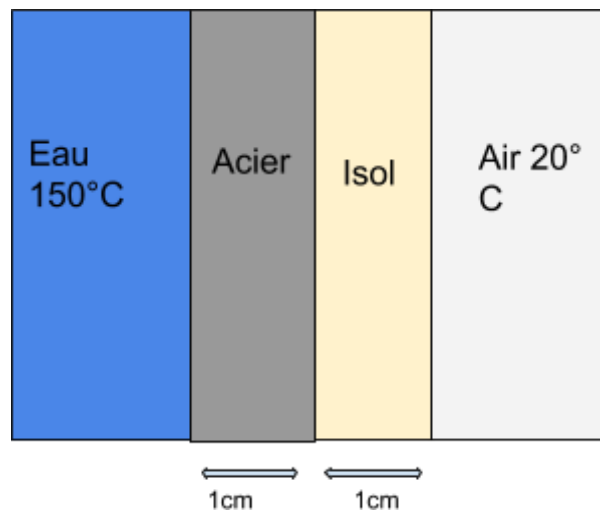


Figure 33 : Couches d'isolation de la chaudière imaginaire.

Source : Applications de l'aérogel dans la marine marchande (2020)

La première étape consiste à calculer la valeur de la résistivité thermique de la couche d'isolation :

$$R = (\text{Épaisseur acier} / \lambda \text{ acier} * \text{Aire acier}) + (\text{Épaisseur isolation} / \lambda \text{ isolation} * \text{Aire Isolation})$$

On obtient un résultat en Kelvin par Watt (K/W), la surface étant de 1m², il suffit ensuite de diviser la différence de température par la résistivité thermique afin de connaître le courant de chaleur dissipé par l'isolation de ma chaudière.

- Pyrogel Aspen + Acier Perte = 324,7 W
- Laine de roche + Acier Perte = 648,7 W
- Polyuréthane + Acier Perte = 778,2 W
- Perlite + Acier Perte = 1036,8 W
- Acier Perte = 338 000 W

Le résultat le plus impressionnant est la perte d'énergie lorsque la chaudière n'est pas isolée. Les différences entre les isolants sont négligeables comparées aux pertes sans aucune isolation. On notera quand même que le Pyrogel est bien plus efficace que les autres isolants.

Tous ces résultats sont théoriques et ont pour seul but de donner une échelle aux gains d'énergie possibles grâce à l'aérogel.

Aspects économiques

Les qualités des aérogels sont nombreuses, il est donc étonnant qu'il ne soit pas encore répandu. Cette faible popularité de l'aérogel est principalement due à sa réputation d'être bien plus coûteux que les autres matériaux isolants. Il reste en effet bien plus coûteux que les isolants classiques, néanmoins le prix de l'aérogel a grandement baissé ces dernières années. Le développement de techniques de fabrication moins coûteuses et l'augmentation de la production à l'échelle mondiale rendent l'aérogel plus abordable aujourd'hui. Le marché chinois de l'aérogel commence à se développer et la demande globale augmente peu à peu. Ce sont des indicateurs très encourageants pour les entreprises.

Ayant personnellement contacté des entreprises américaines et européennes, il semble que la concurrence chinoise ne les effraie pas, au contraire, certains comptent dessus pour populariser l'aérogel.

À travers ce mémoire, diverses utilisations de l'aérogel ont été étudiées. Il faut maintenant évaluer l'aspect économique de ces scénarios.

Rentabilité sur le long terme

Salle des machines

Pour la salle des machines il est difficile d'estimer précisément la quantité d'isolant nécessaire. On peut tout de même comparer le prix de la laine de roche avec celui des tapis d'aérogel de type Pyrogel.

Pour isoler de la même manière une surface avec de la laine de roche et de l'aérogel, il faut 10mm de pyrogel à 115 €/m² contre environ 20 mm de laine de roche à 12,50 €/m². On comprend donc mieux pourquoi l'aérogel est moins courant que la laine de roche.

Par contre quand il s'agit d'améliorer l'isolation de certains systèmes, même si la différence de prix est considérable, les économies réalisables sur le long terme peuvent justifier le coup de l'isolation aérogel. En particulier dans la salle des machines où l'espace est limité, l'aérogel peut être très avantageux.

En se basant sur les calculs des pertes d'énergie pour une chaudière on a bien vu que l'aérogel permettait de diviser par 2 les pertes obtenues avec de la laine de roche pour une chaudière chauffant à 150°C . Mais cette fois avec une surface isolable de 20,5m² et une couche d'isolation limitée à 2 cm ainsi qu'une température extérieur de 40°C, on obtient un courant de chaleur de 2818,75W avec le Pyrogel contre 5637,5W pour de la laine de roche. On a donc une perte de 2818,75W en plus avec la laine de roche. Imaginons que la chaudière fonctionne toute l'année, les pertes sont de $8,9 \cdot 10^{10}$ Joules. Ce qui représente l'équivalent de 1929kg soit environ 2192 litres de fioul (0,880kg/L), à 721 € les mille litres c'est une somme de 1580 €/an.

Le prix de 2 cm de Pyrogel sur 20,5m² est de 4715€, contre 250 € pour la laine de roche. Le prix à l'investissement est donc considérable, mais au bout de 3 ans de fonctionnement les économies de carburant rentabilisent l'isolation aérogel.

L'aérogel étant durable la compagnie diminue sa consommation sur le long terme ce qui a un impact positif économiquement et écologiquement. En réduisant le risque de corrosion sous isolation, les tapis d'aérogel limitent les risques d'accidents et augmente aussi la durabilité des matériaux isolés.

Ce que ces résultats démontrent c'est que l'isolation aérogel est particulièrement rentable lorsqu'il s'agit de réduire les pertes en isolant des matériaux sur une épaisseur faible. Plus l'épaisseur est faible plus l'aérogel est rentable, si on reprend l'exemple précédent avec une couche d'isolation de 10cm, il faudrait plus de 50 ans de fonctionnement pour rentabiliser l'isolation aérogel; alors qu'une couche de 1cm est rentabilisée en moins d'un an.

LNG

Si l'on se base sur les résultats observés plus tôt, il faut 13 429,5 m³ de perlite pour isoler un tank de 266 000 m³ de LNG, un mètre cube de perlite coûte environ 180€ ce qui donne une somme totale de 2 417 310 €.

On a calculé que pour le même taux d'isolation il faut 4 794,8 m³ d'isolation Cryogel, au prix de 1300 €/m³ ce qui fait un total de 6 238 210 €.

On a aussi estimé que la quantité de cargaison transportable en plus était de 2052,8 tonnes, il est difficile d'estimer les gains générés par une tonne de LNG transportée en plus. Ces gains dépendent de la durée du voyage, du trajet suivi, du cours du gaz et d'autres facteurs. On peut tout de même envisager que cet écart de prix d'isolation peut être rentabilisé après plusieurs voyages.

Pour se donner une idée d'ordre de grandeur, nous allons nous baser sur l'annexe 1. Dans ce document on peut constater que le prix de l'affrètement d'un navire de 160 000 m³ de capacité de cargaison LNG est de 1,571,596\$. Le navire étant chargé à 98% on a 156 800 m³ de cargaison. Pour une densité de 422,62 kg/m³ on obtient donc 66 266 tonnes. On peut donc estimer que la tonne de LNG coûte 23,7\$ à affréter.

Pour les 2052,8 tonnes de cargaison supplémentaire calculée plus tôt on obtient 48650\$. En comparant avec les prix de l'installation on peut calculer que 78 trajets de ce type sont nécessaires pour compenser la différence de prix entre la perlite et l'aérogel. Dans l'annexe 1 la durée du trajet est de 47,2 jours aller-retour en comptant le temps au port. Il faut donc un peu plus de 10 ans pour rentabiliser l'isolation d'un membrane tank isolé à l'aérogel.

Conclusion

À travers ce mémoire on a pu constater que les aérogels, et en particulier l'aérogel de silice, sont des matériaux très prometteurs. Leurs nombreuses propriétés sont déjà utilisées dans certains milieux tels que l'aérospatiale avec la NASA, mais aussi dans des milieux plus proches de l'industrie maritime comme les terminaux LNG.

À bord l'aérogel pourrait permettre de réduire les pertes thermiques, de limiter la propagation des ondes, d'améliorer les coatings, et de combattre les fuites d'huiles ainsi que la corrosion. Ses capacités isolantes ont aussi le potentiel d'améliorer la sécurité des marins en permettant d'avoir du matériel de survie gardant mieux la chaleur, mais aussi les protégeant dans les scénarios catastrophes.

Pour la cargaison, remplacer l'isolation classique par des tapis d'aérogel permet de transporter plus de cargaison réfrigérée pour un volume équivalent. En gardant le même boil off on peut transporter plus de cargaison LNG avec des tanks isolés avec des tapis d'isolation aérogel.

Pour ce qui est de l'aspect financier, le prix de l'aérogel est le plus grand frein à son développement. Son utilisation est rentable dans certains cas précis, il n'est donc pas encore envisageable de remplacer toutes les isolations thermiques à bord par des tapis d'aérogel. Néanmoins le marché de l'aérogel se développe ce qui devrait étendre le domaine des applications rentables.

Écologiquement parlant, la réduction de consommation de carburant lié à la diminution des pertes, la capacité à nettoyer les fuites d'hydrocarbures ainsi que la non-toxicité des coating font de l'aérogel un élément ayant un impact positif sur l'environnement.

L'aérogel a déjà fait ses premiers pas dans l'industrie maritime avec l'isolation des conduites sous-marines. Aujourd'hui d'autres utilisations rentables, écologiques, ou même sécuritaires sont possibles, il y a donc de grandes chances pour que les aérogels se fassent une place dans notre industrie. Si le coût de production continue de diminuer, le nombre d'applications rentables augmentera favorisant la popularisation de l'aérogel.

Au début du mémoire de nombreux aérogels ont été évoqués, avec le temps il est possible que de nouvelles applications soient découvertes et que ces aérogels se popularisent à leur tour.

Annexe

Annexe 1 :

Appendix 2: Example calculation for Dual Fuel Diesel Electric (DFDE) carrier

Example route: Sabine Pass to Shanghai (via Panama Canal) is 10,081 nautical miles (one way).

Average carrier speed: 19 nautical miles/hour.

Nominal vessel size: 160,000 m³ liquid LNG.

At 98% loading: 156,800 m³ liquid LNG (3,625,216 MMBtu). Assume heel left at end of return (ballast) voyage (4%) = 145,009 MMBtu.

Charter rate: \$33,286/day (July 2017 figure).

Daily LNG boil-off: 3,673 MMBtu/day.

Opportunity cost of LNG boil-off: \$20,204/day (assuming destination price of \$5.5/MMBtu).

Voyage days: 22.1 days each way.

Port days: 3, outbound port, destination port and return destination port.

Charter costs: 44.22+3=47.2 days at \$33,286/day = \$1,571,596 (allowing for rounding).

Fuel costs: LNG boil-off for 44.22 days: 20,204x44.22 = \$893,315 (allowing for rounding).

LNG delivered at destination: 3,317,787 MMBtu (initial loading less boil-off on outward voyage, less boil-off and heel reserved for return (ballast voyage)).

Panama Canal fee: outbound and return voyage is \$0.2/MMBtu = \$663,557 based on size of delivered cargo.

Port costs: 3 days at \$100,000/day = \$300,000.

Agents and broker fees, and insurance: 2% of charter cost plus \$2,600/day for insurance. This equates to \$154,191 (allowing for rounding).

Summarising:

Charter costs:	\$1,571,596
Fuel costs:	\$893,315
Panama Canal fee:	\$663,557
Port costs:	\$300,000
Agents and broker fees plus insurance:	\$154,191
Total:	\$3,582,658

Based on the delivered cargo of 3,317,787 MMBtu, the total cost is \$1.08/MMBtu.

Bibliographie

1. Aerogel.org » Silica Aerogel [Internet]. 2019 [cité 31 mars 2020]. Disponible sur: <https://web.archive.org/web/20190331210316/http://www.aerogel.org/?p=16>
2. LNG freight rates [Internet]. [cité 18 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.argusmedia.com/en/hubs/lng>
3. Bai Q, Bai Y. 17 - Pipe-in-Pipe and Bundle Systems. In: Bai Q, Bai Y, éditeurs. Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation [Internet]. Boston: Gulf Professional Publishing; 2014 [cité 4 avr 2020]. p. 405-33. Disponible sur: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123868886000171>
4. Bardy E, Mollendorf J, Pendergast D. A comparison of the thermal resistance of a foam neoprene wetsuit to a wetsuit fabricated from aerogel-syntactic foam hybrid insulation. *J Phys Appl Phys*. 1 sept 2006;39:4068.
5. A robust salt-tolerant superoleophobic alginate-graphene oxide aerogel for efficient oil-water separation in marine environments *Scientific Reports*. webloc.
6. A Super-Material That Can Be Made In The Kitchen (Starlite) - YouTube. webloc.
7. Advantages of Aerogel Insulation vs Conventional Insulation [Internet]. KLAY EnerSol. 2019 [cité 8 avr 2020]. Disponible sur: <https://www.klayenersol.com/blog/advantages-of-aerogel-insulation>
8. Aerogel Academy The Official Blog of Aspen Aerogels. webloc.
9. Aerogel brick - Virgo – Cargo Example Design [Internet]. [cité 16 févr 2020]. Disponible sur: <https://cargocollective.com/virgo/Aerogel-brick>
10. Aerogel Insulation Market demand to hit \$2.5bn by 2025- Global Market Insights, Inc.. webloc.
11. Aerogel Technologies (@aerogeltech) Twitter. webloc.
12. Aerogel Technologies, LLC | Markets and Applications [Internet]. [cité 13 avr 2020]. Disponible sur: <http://www.aerogeltechnologies.com/applications/>
13. Koebel M, Rigacci A, Achard P. Aerogel-based thermal superinsulation: an overview. *J Sol-Gel Sci Technol*. sept 2012;63(3):315-39.
14. patseer. AEROGELS – UPDATES IN THE LAST 5 YEARS [Internet]. PatSeer. [cité 3 avr 2020]. Disponible sur: <https://patseer.com/2016/08/aerogels-patent-analysis/>
15. BuyAerogel.com | RF Aerogel [Internet]. [cité 17 févr 2020]. Disponible sur: <http://www.buyaerogel.com/product/rf-aerogel/>
16. Cabot Experience. webloc.
17. Silva J. Climate Change Solutions: :20.
18. Cours Advanced Tanker Gas.
19. Cheng Y, Zhou S, Hu P, Zhao G, Li Y, Zhang X, et al. Enhanced mechanical, thermal, and electric properties of graphene aerogels via supercritical ethanol drying and high-temperature thermal reduction. *Sci Rep*. 3 mai 2017;7(1):1-11.
20. Fabricating LNG carriers (September 2006) [Internet]. [cité 10 avr 2020]. Disponible sur: twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/fabricating-lng-carriers-september-2006.aspx
21. fenanofoamsem-lanl.jpg (1024×768) [Internet]. [cité 6 mai 2020]. Disponible

- sur: <http://www.aerogel.org/wp-content/uploads/2009/03/fenanofeamsem-lanl.jpg>
22. Fig. 1. CCS insulation wall. [Internet]. ResearchGate. [cité 9 avr 2020].
Disponible sur:
https://www.researchgate.net/figure/CCS-insulation-wall_fig1_232410920
 23. Figure 1. Aerographene aerogels morphology. (a), Image of a water... [Internet]. ResearchGate. [cité 2 avr 2020]. Disponible sur:
https://www.researchgate.net/figure/Aerographene-aerogels-morphology-a-Image-of-a-water-droplet-cast-on-a-hydrophobic_fig1_339051389
 24. Figure 4 : représentation des interactions du gel de silice avec les... [Internet]. ResearchGate. [cité 30 mars 2020]. Disponible sur:
https://www.researchgate.net/figure/representation-des-interactions-du-gel-de-silice-avec-les-molecules-deau-Ces_fig4_315842186
 25. Figure 4. Pore structure of the silica aerogel shown in a SEM picture.... [Internet]. ResearchGate. [cité 6 mai 2020]. Disponible sur:
https://www.researchgate.net/figure/Pore-structure-of-the-silica-aerogel-shown-in-a-SEM-picture-The-pores-have-a-diameter-of_fig1_319017326
 26. Graphene Aerogel Synthesis Part 2 [Internet]. [cité 23 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=osNw8J-1ggs>
 27. Flamethrower vs Aerogel [Internet]. [cité 8 avr 2020]. Disponible sur:
<https://www.youtube.com/watch?v=qnOoDE9rj6w&t=374s>
 28. Graphene: structure and shape | Graphene-Info [Internet]. [cité 17 févr 2020].
Disponible sur: <https://www.graphene-info.com/graphene-structure-and-shape>
 29. Greatwall Group [Internet]. [cité 29 mars 2020]. Disponible sur:
<http://www.greatwall1988.com/insulation.php>
 30. High Temperature Insulation – Pyrogel XTE [Internet]. Aspen Aerogels Industrial Aerogel Insulation. [cité 4 avr 2020]. Disponible sur:
</products-and-solutions/pyrogel-xte/>
 31. How to Make an Aerogel Out of Anything - YouTube 2.webloc.
 32. IBC Code [Internet]. [cité 10 avr 2020]. Disponible sur:
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/ChemicalPollution/Pages/IBCCode.aspx>
 33. Les couleurs de diffusion [Internet]. 1,2,3 Couleurs ! Expériences scientifiques et boutique sur la couleur. [cité 16 févr 2020]. Disponible sur:
<http://www.123couleurs.fr/explications/explications-matière/tm-couleursdiffusion/>
 34. Marine Coatings Cabot Corporation.webloc.
 35. Membrane Tank - an overview | ScienceDirect Topics [Internet]. [cité 10 avr 2020]. Disponible sur:
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/membrane-tank>
 36. Nanometer scale particles and pores in an aerogel. (a) Network... [Internet]. ResearchGate. [cité 16 févr 2020]. Disponible sur:
https://www.researchgate.net/figure/Nanometer-scale-particles-and-pores-in-an-aerogel-a-Network-architecture-of-an-aerogel_fig5_270674618
 37. Ge Y, Zhang T, Zhou B, Wang H, Zhang Z, Shen J, et al. Nanostructured resorcinol-formaldehyde ink for 3D direct writing. *J Mater Res.* juill 2018;33(14):2052-61.
 38. New order for Svenska Aerogel - Ekomarine launches pilot of non-toxic paint with Quartzene for boats [Internet]. Svenska Aerogel Holding AB. [cité 15 avr 2020]. Disponible sur:

- <https://www.aerogel.se:443/en/new-order-for-svenska-aerogel-ekomarine-launch-es-pilot-of-non-toxic-paint-with-quartzene-for-boats/>
39. Novel Alginate-Chitosan Aerogel Fibres For Potential Wound Healing Applications - PDF Download gr \acute{a} tis [Internet]. [cit \acute{e} 31 mars 2020]. Disponible sur:
<https://docplayer.com.br/134319933-Novel-alginate-chitosan-aerogel-fibres-for-potential-wound-healing-applications.html>
 40. Oil contamination in marine boilers | LinkedIn [Internet]. [cit \acute{e} 13 avr 2020]. Disponible sur:
<https://www.linkedin.com/pulse/oil-contamination-marine-boilers-kenneth-bendtsen/>
 41. Polyurethane Insulation [Internet]. [cit \acute{e} 12 avr 2020]. Disponible sur:
https://www.engineeringtoolbox.com/polyurethane-insulation-k-values-d_1174.html
 42. Pyrogel-XTE-Datasheet.pdf [Internet]. [cit \acute{e} 4 avr 2020]. Disponible sur:
<http://www.buyaerogel.com/wp-content/uploads/2017/09/Pyrogel-XTE-Datasheet.pdf>
 43. Rester au chaud avec de l'a \acute{e} rogel de silice | Result In Brief | CORDIS | European Commission [Internet]. [cit \acute{e} 17 f \acute{e} vr 2020]. Disponible sur:
<https://cordis.europa.eu/article/id/238601-keeping-warm-with-silica-aerogel/fr>
 44. Hetherington C, Flin R, Mearns K. Safety in shipping: The human element. *J Safety Res.* 1 janv 2006;37(4):401-11.
 45. Gayle D. Scientists develop lightest solid material ever which can balance on top of a flower [Internet]. Mail Online. 2013 [cit \acute{e} 17 f \acute{e} vr 2020]. Disponible sur:
<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2296223/Lightest-material-Graphene-aerogel-balanced-atop-petals-flower.html>
 46. Silica Aerogel for Oil Spill Cleanup [Internet]. [cit \acute{e} 1 avr 2020]. Disponible sur:
<https://www.youtube.com/watch?v=E1hElgpOy0>
 47. Silica Aerogel Market Set to Record Rapid Growth at 22.6% CAGR During the Forecast Period, 2018 - 2023 Million Insights.webloc.
 48. ezioauditore136. Silica Aerogel, Market by Manufacturers, Regions (Province), Type and Application, Forecast to 2022 [Internet]. REPORTS AND MARKETS. 2017 [cit \acute{e} 16 f \acute{e} vr 2020]. Disponible sur:
<https://reportsandmarketsblog.wordpress.com/2017/03/23/silica-aerogel-market-by-manufacturers-regions-province-type-and-application-forecast-to-2022/>
 49. suresh hegde. sol gel method [Internet]. Ing \acute{e} nie \acute{r} ie pr \acute{e} sent \acute{e} \grave{a} ; 15:17:16 UTC [cit \acute{e} 22 f \acute{e} vr 2020]. Disponible sur:
<https://fr.slideshare.net/sureshhegde1/sol-gel-method>
 50. Strong And Flexible Aerogels | Aerogel.org | Road To Abundance [Internet]. [cit \acute{e} 3 avr 2020]. Disponible sur:
<https://roadtoabundance.wordpress.com/2013/03/06/strong-and-flexible-aerogels-aerogel-org/>
 51. Supercritical drying [Internet]. [cit \acute{e} 22 f \acute{e} vr 2020]. Disponible sur:
<https://enacademic.com/dic.nsf/enwiki/1018725>
 52. Fischer F. Synth \acute{e} se et \acute{e} tude de mat \acute{e} riaux nanostructur \acute{e} s \grave{a} base d'ac \acute{e} tate de cellulose pour applications \acute{e} nerg \acute{e} tiques. :193.
 53. Table 4 . Data for boiler consumption, tons per hour per berth. [Internet]. ResearchGate. [cit \acute{e} 17 avr 2020]. Disponible sur:

https://www.researchgate.net/figure/Data-for-boiler-consumption-tons-per-hour-per-berth_tbl2_324756235

54. The Aerogel Market Has Finally Come Of Age - Coatings World.webloc.

55.

The-LNG-Shipping-Forecast-costs-rebounding-outlook-uncertain-Insight-27.pdf
[Internet]. [cité 18 avr 2020]. Disponible sur:

<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/02/The-LNG-Shipping-Forecast-costs-rebounding-outlook-uncertain-Insight-27.pdf>