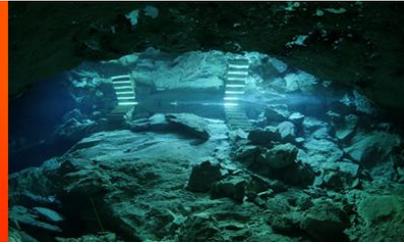




NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Gestions des risques industriels »

NEWS 51 - MARS 2021

NEWSLETTER N°51 : CONDITIONS EXTREMES & RISQUES INDUSTRIELS Immersion dans le monde des ultra-basses températures.

Les exemples historiques détaillés dans la précédente NEWS nous ont permis d'aborder des risques industriels associés à la fragilisation de produits évoluant à des températures voisines de 0°C.

Nous sommes maintenant prêts pour s'immerger dans le monde de la cryogénie qui débute à 120 K (soit -150°C), température à laquelle les gaz de l'air commencent à se liquéfier. Cet environnement de travail nous permettra d'aborder les alliages à faible expansion en étudiant la conception des méthaniers.

III.I. Les méthaniers, l'INVAR et les environnements cryogéniques.

a) Les méthaniers

Pour aborder ce sujet, profitons de l'arrivée dans le chantier de réparation brestois, au cours de l'année 2019, des 2 mastodontes des mers français : le Provalys et le Gaselys. Il s'agit de méthaniers à membranes Invar d'une capacité de plus de 150 000 m³ chacun. Cette technologie se différencie, de par l'architecture des cuves, des méthaniers à sphères ou prismatiques. Le choix se fera principalement en fonction des capacités de stockage, des distances à parcourir, du taux d'évaporation et du rendement visé (Cf. figure 1). Le gaz naturel est un mélange dont le constituant principal est le méthane (CH₄), avec des teneurs comprises entre 80% et 97%, auquel on peut y voir associé d'autres hydrocarbures (propane, butane, éthane, ...), du diazote, du dioxyde de carbone, du sulfure d'hydrogène...

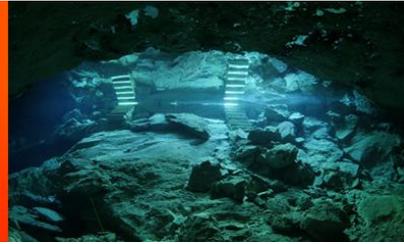


Figure 1 : Méthaniers à sphères et à membranes. [FILL 2014]

Quelle que soit la configuration, ces bateaux transportent du gaz naturel sous forme liquide, G.N.L. (Gaz Naturel Liquéfié), à la pression atmosphérique à une température de -163°C. L'intérêt de liquéfier ce gaz inflammable et explosif réside dans le fait que le volume occupé est 600 fois moins élevé qu'à l'état gazeux sous une pression d'un bar.



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Gestions des risques industriels »

NEWS 51 - MARS 2021

Pendant le transport, le gaz liquéfié ne doit pas trop se réchauffer afin de limiter son évaporation. L'isolation doit permettre également de limiter le refroidissement des structures adjacentes et de résister à d'éventuelles collisions ou naufrages des édifices. Il est également impératif d'isoler le méthane de l'oxygène de l'air afin d'éviter tout risque d'explosion et/ou d'incendie. Face à ces impératifs, on comprend aisément que l'architecture des cuves de stockage est très proche d'une bouteille thermos instrumentée (thermocouple, pressostat, sonde O₂, analyseur CH₄, ...). Le méthanier est donc équipé d'une double coque (Cf. figure 2) dont chaque caisson est constitué de 2 membranes en Invar (alliage Fe-36%Ni) ou aciers inoxydables austénitiques et de 2 couches d'isolant, maintenues sous azote.

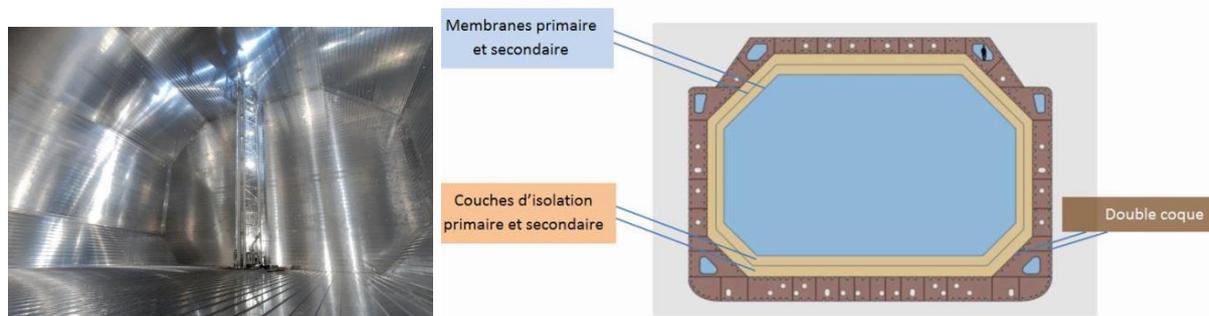


Figure 2 : Cuve de stockage d'un méthanier à membrane. (Blog Kao 29) [FILL 2014]

Pour les méthaniers à membranes en acier inoxydable, l'isolant est une mousse polyuréthane renforcée. Pour les membranes en Invar, on met en place des caissons isolants en contreplaqué qui sont remplis de perlite expansée* ou de laine de verre en encore des mousses polyuréthane chargées de fibres de verre ou des mélanges « Triplex » à base de caoutchouc et d'aluminium [BOUL 2004]. On vient ensuite recouvrir ces caissons avec des feuillards en Invar soudés les uns aux autres dont l'épaisseur est inférieure au millimètre [CRYS XX]. Cette technologie permet d'atteindre des taux d'évaporation inférieurs à 0,1% en volume par jour, tout en sachant qu'il est possible de récupérer le gaz naturel évaporé pour alimenter les moteurs du navire. [MARI XX]

Cette description des cuves de stockage nous a permis d'introduire l'Invar, un alliage base fer contenant 36% de nickel. Mais quelles sont les particularités de cet alliage tant associé aux environnements cryogéniques ?

b) L'Invar : un alliage qui rime avec précision et basse température

Utilisés pour l'horlogerie (fabrication des spiraux), les éléments de structures des systèmes optiques et laser de précision, la sismographie, les thermostats bimétabliques... nous ne pouvons pas faire l'impasse sur l'INVAR en parlant d'applications cryogéniques et surtout en 2020... En effet, nous fêtons, cette année, les 100 ans du prix Nobel décerné à C.E. Guillaume, physicien suisse qui a travaillé à la fin du XIXème siècle sur des alliages fer / nickel et qui a observé un coefficient de dilatation thermique anormalement bas, sur une large plage de température avec ce type d'alliage (Cf. figure 3), l'effet Invar était né pour 36% de nickel.



« Gestions des risques industriels »

NEWS 51 - MARS 2021

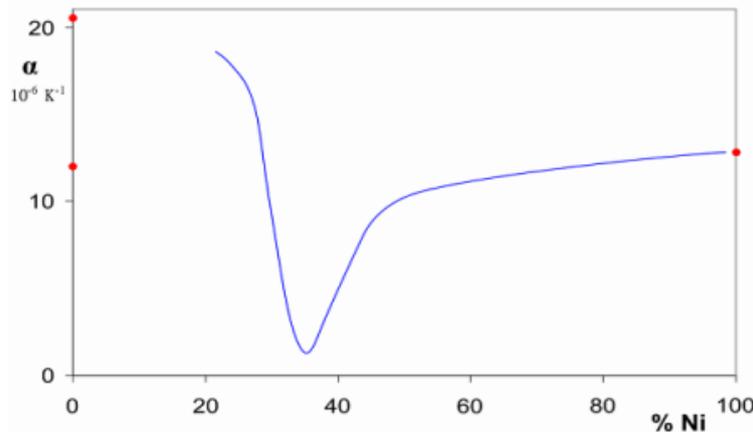


Figure 3 : Evolution du coefficient de dilatation à température ambiante des alliages Fe-Ni en fonction de la teneur en nickel. [LECO 2016]

Les éléments d'addition vont influencer sur le pourcentage de nickel pour lequel le coefficient de dilatation thermique est minimum : le manganèse et le chrome le déplacent vers des teneurs supérieures à 36% de nickel tandis que le cuivre, le cobalt et le carbone ont un effet inverse. [LECO 2016]

Dans les métaux de transition ou alliages métalliques classiques (aciers, cuivreux, alliages d'aluminium ou titane, ...), le coefficient de dilatation au voisinage de 25°C est de l'ordre de 10 à $20 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ et croît lentement avec la température (Cf. figure 4).

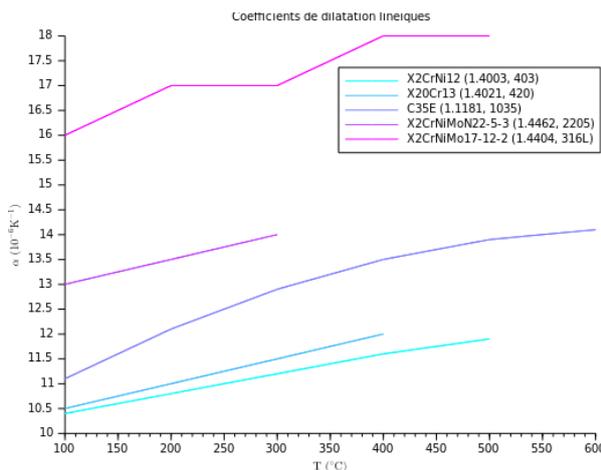


Figure 4 : Evolution du coefficient de dilatation thermique pour différents aciers en fonction de la température.

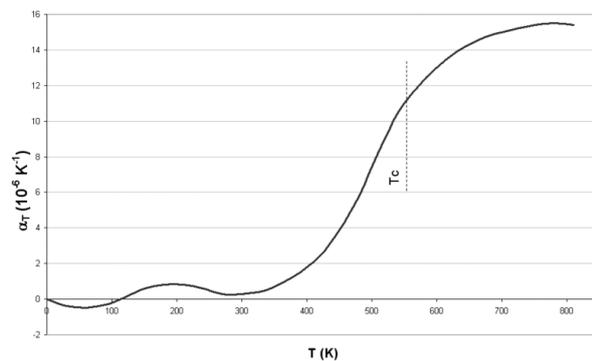


Figure 5 : Coefficient de dilatation thermique de l'Invar en fonction de la température [TREM 2000]

Pour l'Invar, les coefficients de dilatation sont très peu élevés, environ 10 fois moins que ceux attendus avec la grande famille des aciers. Cette anomalie physique disparaît (Cf. figure 5) dès que l'on se



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Gestions des risques industriels »

NEWS 51 - MARS 2021

rapproche du point de Curie (T_C , température à laquelle le matériau perd son aimantation spontanée, son caractère ferromagnétique où les moments magnétiques sont tous orientés dans le même sens). Ce constat nous permet de comprendre que l'effet Invar est directement relié aux propriétés magnétiques de cet alliage et plus particulièrement à la magnétostriction, propriété que possèdent les matériaux ferromagnétiques de se déformer en fonction de l'orientation de leur aimantation. Les contraintes mécaniques engendrées par l'évolution du magnétisme interne de l'alliage s'opposent aux variations dimensionnelles lors d'une élévation de température.

Au cœur de la structure cristalline de l'Invar, les atomes de fer peuvent adopter une configuration ferromagnétique ou une configuration paramagnétique (état correspondant à des moments magnétiques désorientés). Le volume de la première configuration est légèrement plus important. Or, lorsque la température augmente, le matériau a tendance à devenir paramagnétique. La perte de volume d'ordre magnétique est donc compensée par la dilatation thermique de l'alliage, d'où une apparente invariance du volume de matière.

Lorsque l'on compare d'autres grandeurs physiques (résistivité, conductivité thermique, température de Curie) ou mécaniques (modules d'Young ou de Coulomb, coefficient de Poisson) avec celles des aciers de construction à la température ambiante, l'Invar n'a probablement pas fini de nous étonner (Cf. tableau 1).

Tableau 1 : Comparaison des grandeurs physiques de l'Invar et des aciers de construction à 20°C [LECO 2016 ; OTUA 1995].

Grandeurs physiques	Unité	INVAR	Aciers de construction
Coefficient de dilatation linéaire	$10^{-6} \cdot K^{-1}$	1,2 à 2	10 – 12
Module de Young	GPa	140 – 150	210
Module de Coulomb	Gpa	57	84
Coefficient de poisson		0,228	0,28
Résistivité	$\mu\Omega\text{cm}$	75 – 85	17 – 25
Conductivité thermique	W/(m.K)	13	45 – 50
Température de Curie	°C	~ 230	~ 770

Il existe d'autres alliages à faible expansion thermique dérivés de l'Invar à 36% de nickel : l'INVAR 42, le Super-INVAR, le NYLO ou le KOVAR. Les améliorations qu'apportent ces alliages, se situent au niveau de l'étendue de la plage de températures pour lesquelles le coefficient d'expansion reste bas et constant (Cf. figure 6). Pour le KOVAR, celui-ci reste quasi constant entre 20 et 500°C.

Dans le prochain article de la saga des « conditions extrêmes », nous vous proposerons d'aborder les difficultés que rencontrent certains produits lorsqu'ils sont utilisés à hautes températures. Ils nous permettront d'introduire les phénomènes d'adoucissement des caractéristiques mécaniques, les corrosions et oxydations catastrophiques ainsi que les grands principes du fluage en prenant un exemple dans le secteur aéronautique.



NOTRE METHODE



LES EXPERTS

« Gestions des risques industriels »

NEWS 51 - MARS 2021

Bibliographie

- [BOUL 2004] A BOULBEN, A JEMAIN, « Rupture les méthaniers innovent pour grandir », Usine Nouvelle, sept 2004.
- [FILL 2014] B. Fillon, « Développement d'un outil statistique pour évaluer les charges maximales subies par l'isolation d'une cuve de méthanier au cours de sa période d'exploitation », thèse soutenue le 19 décembre 2014, université de Poitier.
- [MARI XX] <http://www.marine-marchande.net/>
- [CRYS XX] <https://www.crystal-sleeve.com/gaz-methanier-p295857.html>
- [LECO 2016] Lecomte-Beckers, « Mise en œuvre d'un alliage "invar" Fe-Ni par Laser Beam Melting », Mémoire Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées, 2016.
- [OTUA 1995] Recueil OTUA, « Données physiques sur quelques aciers d'utilisation courante », édition 1995.
- [TREM 2000] Etienne Du Tremolet de Lacheisserie et Louis Néel, Magnétisme : Matériaux et applications, t. 2, DP Sciences, coll. « Collection Grenoble sciences », 2000