

# TRANSFERT DE CARGAISON

## CALCULS ET ARRONDIS

### SOMMAIRE

#### 1. Méthode de détermination de l'énergie transférée lors du transfert d'une cargaison de GNL

#### 2. Calcul de l'énergie transférée

##### 2.1 Calcul de l'énergie brute transférée

2.1.1 Calcul du volume de GNL transféré  $V_{GNL}$

2.1.2 Calcul de la masse volumique du GNL transféré  $\rho_{GNL}$

2.1.3 Calcul du pouvoir calorifique massique du GNL transféré  $H_{GNL}$

##### 2.2 Calcul de l'énergie du gaz retour

2.2.1 Calcul du volume du gaz retour  $V_{GN}$

2.2.2 Calcul du pouvoir calorifique supérieur du gaz retour  $H_{GN}$

##### 2.3 Calcul de l'énergie utilisée par les machines du méthanier

2.3.1 Détermination du pouvoir calorifique supérieur du gaz brûlé aux machines  $H_{GM}$

2.3.2 Détermination du volume du gaz d'évaporation ou gaz retour brûlé aux machines, ramené aux conditions de référence,  $V_{GM}$

##### 2.4 Calcul de l'énergie nette transférée

#### 3. Calcul de l'énergie nécessaire à la mise en gaz

#### 4. Calcul de l'énergie nécessaire à la mise en froid

4.1 Mise en froid avec talon

4.2 Mise en froid avec rechargement navire

#### 5. Etat des traverses du navire

#### 6. Rapport de cargaison : Certificat de Qualité et Certificat de Quantité

#### Annexe 1 – Données issues de NBS - Technical note 1030, December 1980

#### Annexe 2 – Données issues de la norme ISO 6976-1995

# 1. Méthode de détermination de l'énergie transférée lors du transfert d'une cargaison de GNL

Une représentation schématique (Schéma n°1) du transfert d'une cargaison de GNL d'un navire méthanier vers le terminal (déchargement) ou du terminal vers un navire (rechargement) permet d'apprécier visuellement la quantité d'énergie transférée.

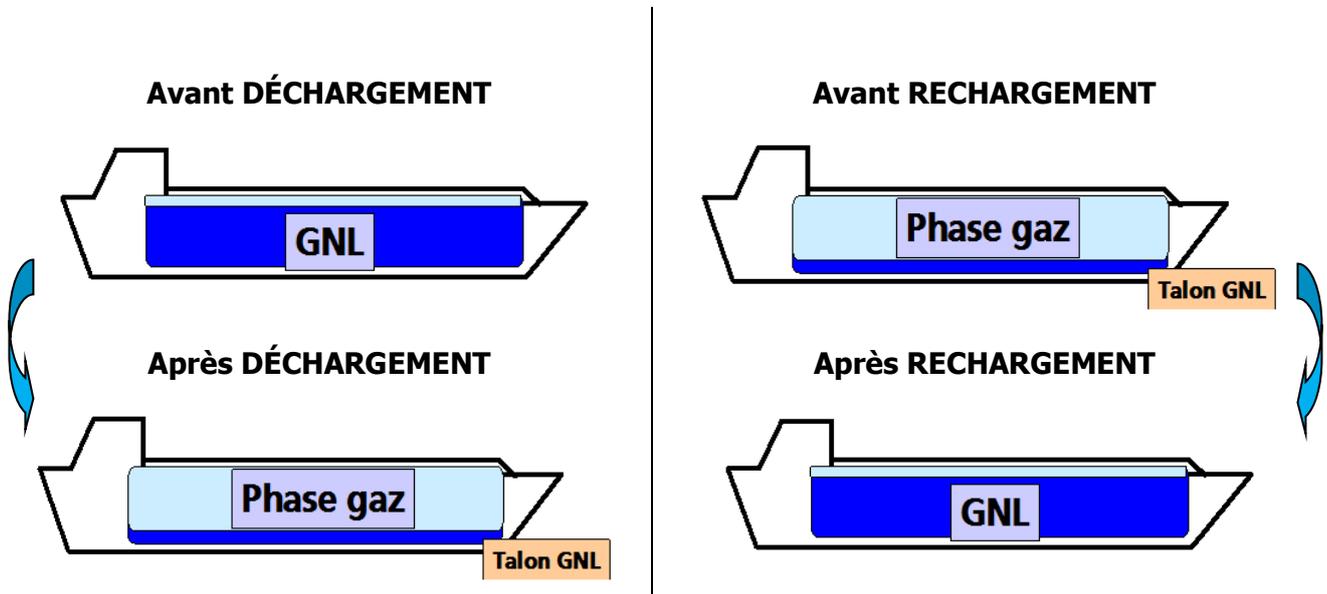


Schéma n°1 : Phases de transfert d'une cargaison de GNL

Pendant ces opérations de transfert :

- pour un déchargement : le volume du GNL déchargé est remplacé par du gaz d'évaporation de GNL renvoyé par le terminal ;
- pour un rechargement : le volume du GNL rechargé remplace la phase gaz contenue dans les cuves du navire à son arrivée, laquelle est renvoyée au terminal.

Par commodité, dans la suite de ce document, ce gaz (renvoyé par ou au terminal) est appelé gaz retour (noté GN).

De façon générale, un talon de GNL :

- reste dans les cuves du navire en fin de déchargement ;
- est présent en fond de cuves du navire en début de rechargement.

L'énergie nette transférée notée **E** est égale :

- pour un déchargement : à l'énergie du GNL déchargé éventuellement diminuée de l'énergie du gaz retourné au navire (gaz retour, GN) et de l'énergie du gaz utilisé par les machines du méthanier (GM) :

$$E = E_{GNL} - E_{GN} - E_{GM}$$

- pour un rechargement : à l'énergie du GNL rechargé éventuellement diminuée de l'énergie du gaz retourné au terminal (gaz retour, GN) et augmentée de l'énergie du gaz utilisé par les machines du méthanier (GM) :

$$E = E_{GNL} - E_{GN} + E_{GM}$$

L'évaluation de ces énergies se fait par la détermination des volumes et/ou masses transférés, de la masse volumique du GNL et du pouvoir calorifique volumique et/ou massique moyen pendant la durée du transfert, soit :

❖ **Pour le GNL :**

$$E_{GNL} = V_{GNL} \times \rho_{GNL} \times H_{GNL}$$

avec :

**V<sub>GNL</sub>** : volume de GNL mesuré dans les cuves du navire ;

**ρ<sub>GNL</sub>** : masse volumique moyenne du GNL calculée à partir de l'analyse chromatographique du GNL ;

**H<sub>GNL</sub>** : pouvoir calorifique supérieur (PCS) massique moyen du GNL calculé à partir de la moyenne des analyses chromatographiques du GNL.

❖ **Pour le gaz retour (GN) :**

$$E_{GN} = V_{GN} \times H_{GN}$$

avec :

**V<sub>GN</sub>** : volume de gaz ayant pris dans les cuves du navire la place du GNL déchargé (si déchargement) ou renvoyé au terminal et remplacé par du GNL rechargé (si rechargement). Ce volume, ramené aux conditions normales (0 °C et 1,01325 bar), est calculé à partir du volume de GNL transféré et des conditions de pression et de température de la phase gaz dans les cuves du navire à la fin (si déchargement) ou au début (si rechargement) du transfert de la cargaison ;

**H<sub>GN</sub>** : pouvoir calorifique supérieur volumique moyen du gaz calculé à partir de l'analyse chromatographique du gaz retour.

Le Schéma n°2 illustre le principe de détermination de l'énergie transférée à partir du GNL transféré et du gaz retour.

*Nota : les évaporations naturelles de la cargaison durant le transfert de la cargaison ne sont pas comptabilisées. En effet, la quantité manquante de GNL est compensée par la quantité moindre de gaz retour.*

❖ **Pour le gaz d'évaporation (boil-off gas ou BOG) ou le gaz retour consommé aux machines du méthanier (GM) :**

Plusieurs cas se présentent :

- **E<sub>GM</sub>** = 0 (pas de consommation),
- **E<sub>GM</sub>** = 0,1 % du GNL transféré (forfait appliqué en cas de défaillance ou de dysfonctionnement du compteur de gaz aux machines à bord du navire, ou en cas d'absence de relevé des index du compteur lors de la reconnaissance de Cargaison),
- **E<sub>GM</sub>** : calculée à partir du volume (ou de la masse) de gaz d'évaporation ou de gaz retour consommé et mesuré sur le méthanier, et du pouvoir calorifique volumique (ou massique).

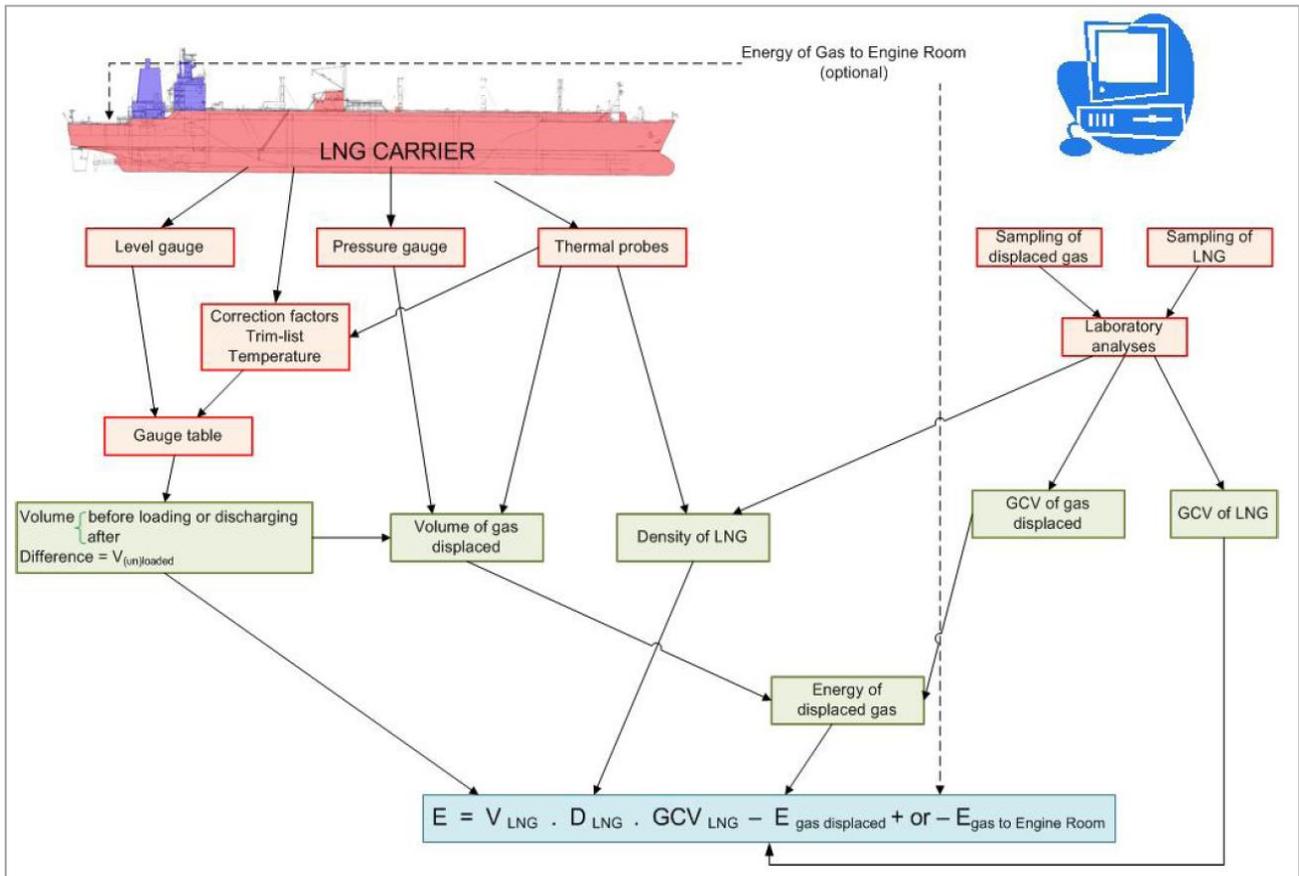


Schéma n°2 : Principe de détermination de l'énergie transférée (à partir de la reconnaissance de cargaison)  
 Source : LNG Custody Transfer Handbook, 5<sup>th</sup> edition, GIIGNL, 2017

## 2. Calcul de l'énergie transférée

### 2.1 Calcul de l'énergie brute transférée

Le calcul de l'énergie transférée brute  $E_{GNL}$  est fonction de :

- $V_{GNL}$  : volume de GNL transféré
- $\rho_{GNL}$  : masse volumique du GNL transféré
- $H_{GNL}$  : pouvoir calorifique supérieur massique du GNL transféré

$$E_{GNL} = V_{GNL} \times \rho_{GNL} \times H_{GNL}$$

#### 2.1.1 Calcul du volume de GNL transféré $V_{GNL}$

##### ❖ Méthode de calcul

Le volume de GNL transféré est calculé par différence entre les volumes de GNL contenus dans les cuves du navire avant et après transfert.

Le calcul du volume de GNL contenu dans une cuve, à un instant donné, est déterminé par lecture sur une table de jauge en fonction du niveau de GNL corrigé.

Ce niveau de GNL corrigé est obtenu à partir du niveau mesuré dans une cuve (au moyen des jauges de niveau), auquel sont appliquées, le cas échéant, les corrections.

Le volume de GNL à bord du navire à un instant donné est la somme des volumes contenus dans les différentes cuves du navire.

#### ❖ Unités et arrondis

Le volume est exprimé en m<sup>3</sup>.

**Le volume de GNL, avant et après reconnaissance de la cargaison, est déterminé avec trois chiffres après la virgule ; le volume net de GNL transféré est calculé par différence et est pris avec trois chiffres après la virgule pour le calcul de l'énergie.**

#### 2.1.2 Calcul de la masse volumique du GNL transféré $\rho_{\text{GNL}}$

La masse volumique est calculée à partir de différents modèles basés sur les équations d'état, les équations d'états correspondants, etc. avec comme données d'entrée :

- la composition du GNL issue de l'analyse chromatographique après échantillonnage et vaporisation de celui-ci ; **les fractions molaires des constituants sont prises avec 5 chiffres après la virgule ;**
- la température moyenne du GNL mesurée dans les cuves du navire méthanier<sup>1</sup> ; **la température du GNL est ensuite arrondie avec 1 chiffre après la virgule et exprimée en °C.**

Elengy utilise la méthode de Klosek-McKinley révisée<sup>2</sup> (dite méthode KMK) pour la détermination de la masse volumique du GNL

#### ❖ Domaines d'application de la méthode de calcul

Les limites de la méthode de Klosek-McKinley sur la composition et la température du GNL sont les suivantes :

Méthane (CH <sub>4</sub> )	> 60 % mol.
Iso et normal butanes (iC <sub>4</sub> + nC <sub>4</sub> )	< 4 % mol.
Iso et normal pentanes (iC <sub>5</sub> + nC <sub>5</sub> )	< 2 % mol.
Azote (N <sub>2</sub> )	< 4 % mol.
Température (T)	< 115 K (équivalent à < -158,15 °C)

#### ❖ Formule de la méthode Klosek-McKinley

La méthode de calcul de la masse volumique du GNL est basée sur une évaluation empirique des volumes molaires du mélange dans l'état thermodynamique considéré. La masse volumique est calculée comme suit :

$$\rho_{\text{GNL}} = \frac{M_{\text{GNL}}}{v_{\text{GNL}}}$$

avec :

$\rho_{\text{GNL}}$  : masse volumique du GNL en kg.m<sup>-3</sup>

<sup>1</sup> La température moyenne du GNL est calculée à partir de l'ensemble des sondes de température immergées et non à partir de la température moyenne de chaque cuve.

<sup>2</sup> Méthode de Klosek-McKinley : Four mathematical models for the prediction of LNG densities – NBS Technical Note 1030 – December 1980.

$$M_{\text{GNL}} = \sum x_i \cdot M_i \quad ; \text{ masse molaire du GNL en g.mol}^{-1}$$

où :

**M<sub>i</sub>** : masse molaire du constituant i selon la table 1 de l'ISO 6976-1995 (cf. annexe 2 de la présente note)

**x<sub>i</sub>** : fraction molaire du constituant i

**V<sub>GNL</sub>** : volume molaire du GNL exprimé en L.mol<sup>-1</sup>, défini par :

$$V_{\text{GNL}} = \sum x_i \cdot V_i - \left[ K_1 + (K_2 - K_1) \cdot \left( \frac{x_{N_2}}{0,0425} \right) \right] \cdot x_{\text{CH}_4}$$

où :

**V<sub>i</sub>** : volume molaire du constituant i à la température du GNL

**K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>** : facteurs de correction

et l'on note  $V_{\text{mol}} = \sum x_i \cdot V_i$

Les valeurs de **K<sub>1</sub>** et **K<sub>2</sub>**, exprimées en L.mol<sup>-1</sup>, sont déterminées par des tables en fonction de la masse molaire et de la température du GNL, cette dernière étant comprise entre 105 K et 135 K. Des tables indiquant les volumes molaires en L.mol<sup>-1</sup> pour les hydrocarbures de C<sub>1</sub> à C<sub>5</sub>, en fonction de températures variant de 106 K à 118 K sont utilisées par la méthode (cf. valeurs en annexe 1 de cette note). **Aucun arrondi n'est effectué durant ces calculs de K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> et V<sub>mol</sub>.**

#### ❖ Unités et arrondis de calculs

La masse volumique est exprimée en kg.m<sup>-3</sup>.

**Les calculs de masse volumique sont réalisés sans aucun arrondi à partir des codes de calculs KMK (note NBS 1030, December 1980).**

### 2.1.3 Calcul du pouvoir calorifique massique du GNL transféré H<sub>GNL</sub>

#### ❖ Méthode de calcul

Le calcul du pouvoir calorifique massique supérieur du GNL est réalisé à partir de la composition molaire, de la masse molaire et du pouvoir calorifique molaire des différents constituants. Ces dernières valeurs sont issues de la norme ISO 6976-1995 « Gaz naturel – Calcul du pouvoir calorifique, de la masse volumique, de la densité relative et de l'Indice de Wobbe à partir de la composition ».

La relation utilisée s'établit ainsi :

$$H_{\text{GNL}} = \sum_{i=1}^N \left[ \left( x_i \cdot \frac{M_i}{M_{\text{GNL}}} \right) \cdot \hat{H}_i^{\circ}(t_1) \right]$$

avec :

**H<sub>GNL</sub>** : pouvoir calorifique massique du mélange

**x<sub>i</sub>** : fraction molaire du constituant i

**M<sub>i</sub>** : masse molaire du constituant i

$$M_{\text{GNL}} = \sum_{i=1}^N x_i \cdot M_i \quad ; \text{ masse molaire du GNL}$$

$\hat{H}_i^o(t_1)$  : pouvoir calorifique supérieur massique du constituant i **calculé sans arrondi** à partir des « table 3 - pouvoir calorifique sur une base molaire » (kJ.mol<sup>-1</sup>) et « table 1 - masse molaire des constituants » (kg.kmol<sup>-1</sup>) de la norme ISO 6976-1995 selon la relation :

$$\hat{H}_i^o(t_1) = \frac{\overline{H}_i^o(t_1)}{M_i} \quad (\text{cf. données en annexe 2 de la présente note})$$

#### ❖ Unités et arrondis

Le pouvoir calorifique supérieur massique est exprimé en MJ.kg<sup>-1</sup> ou dans d'autres unités telles que kWh.kg<sup>-1</sup> dans les conditions de référence de combustion à 0 °C à la pression atmosphérique de 1,01325 bar. Les constantes physiques de pouvoir calorifique supérieur massique et les masses molaires des différents composés sont issues de la norme ISO 6976–1995. **Aucun arrondi de H<sub>GNL</sub> n'est fait pour calculer l'énergie brute transférée.**

### 2.2 Calcul de l'énergie du gaz retour

Le calcul de l'énergie retournée (gaz retour, GN) **E<sub>GN</sub>** porte sur les termes suivants :

- le volume de gaz retour **V<sub>GN</sub>**,
- le pouvoir calorifique supérieur volumique du gaz retour **H<sub>GN</sub>**.

$$\mathbf{E_{GN} = V_{GN} \times H_{GN}}$$

#### 2.2.1 Calcul du volume du gaz retour V<sub>GN</sub>

Le volume de GN est calculé par différence à partir du volume de GNL transféré corrigé en fonction :

- de la température de la phase gaz,
- de la pression dans cette même phase gaz.

Entre deux reconnaissances de la cargaison, les évaporations naturelles sont prises en compte dans le volume GNL transféré puisque la diminution du niveau GNL correspondant est mesurée.

En dehors des reconnaissances de la cargaison (avant et après transfert), ces évaporations ne sont pas prises en compte bien qu'éventuellement réincorporées par le terminal.

#### ❖ Méthode de calcul

Le volume de gaz retour entre deux reconnaissances de la cargaison correspond au volume géométrique de GNL transféré ; il doit être ramené dans les conditions normales de température et de pression (0 °C et 1,01325 bar) et être corrigé en fonction des conditions de température et de pression de retour de la phase gaz au navire méthanier (déchargement) ou des conditions de température et de pression de la phase gaz initiale du méthanier (rechargement). A noter que la correction du facteur de compressibilité du gaz retour n'est pas prise en compte dans ce calcul du fait d'un impact négligeable sur la mesure du volume du gaz retour.

$$V_{GN} \approx V_{GNL} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t} \cdot \frac{P}{1,01325}$$

avec :

**V<sub>GN</sub>** : volume de gaz exprimé en m<sup>3</sup> ramené dans les conditions normales de pression et de température ; **aucun arrondi n'est effectué pour le calcul du gaz retour ;**

**P** : pression absolue exprimée en bar, régnant dans les réservoirs du navire méthanier ; **la mesure est prise au mbar (10<sup>-3</sup> bar) près pour les calculs ;**

**t** : température de la phase gaz exprimée en °C. La valeur de cette température est égale à la moyenne des moyennes de température de chaque cuve issue de la moyenne des valeurs indiquées par les sondes de température non immergées dans le GNL restant dans les cuves du navire méthanier ; **la température est arrondie à 0,1 °C près pour les calculs.**

#### ❖ Unités et arrondis

Le volume du gaz retour **V<sub>GN</sub>** est exprimé en m<sup>3</sup> dans les conditions normales de température et de pression (0 °C ; 1,01325 bar), **sans faire d'arrondi pour le calcul de l'énergie du gaz retour.**

#### 2.2.2 Calcul du pouvoir calorifique supérieur du gaz retour H<sub>GN</sub>

Le calcul du pouvoir calorifique supérieur volumique du GN est réalisé à partir de la composition molaire (déterminée par analyse chromatographique) et du pouvoir calorifique molaire des différents constituants. Ces dernières valeurs sont issues de la norme ISO 6976–1995 « Gaz naturel – Calcul du pouvoir calorifique, de la masse volumique, de la densité relative et de l'Indice de Wobbe à partir de la composition ».

Dans tous les cas, l'opérateur du terminal prend en compte le pouvoir calorifique supérieur du gaz retour et l'utilise dans le calcul de l'énergie transférée.

#### ❖ Méthode de calcul

Le pouvoir calorifique supérieur d'un gaz parfait sur une base volumique pour une température de combustion  $t_1$  d'un constituant  $i$  mesuré à une température  $t_2$  et sous une pression  $P_2$  est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\tilde{H}_i^\circ [t_1, V(t_2, P_2)] = \overline{H}_i^\circ (t_1) \cdot \frac{P_2}{R \cdot T_2}$$

avec :

$\tilde{H}_i^\circ [t_1, V(t_2, P_2)]$  : pouvoir calorifique supérieur parfait (sur une base volumique) du constituant  $i$

$\overline{H}_i^\circ (t_1)$  : pouvoir calorifique supérieur parfait (sur une base molaire) du constituant  $i$

**R** : constante molaire des gaz égale à 8,314 510 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

**T<sub>2</sub> = (t<sub>2</sub> + 273,15)** : température absolue en K, avec **t<sub>2</sub>** en °C

Pour un mélange de composition connue, le pouvoir calorifique supérieur parfait (sur une base volumique) s'exprime :

$$\tilde{H}_{\text{mel}}^\circ = \sum_{i=1}^N [x_i \cdot \tilde{H}_i^\circ [t_1, V(t_2, P_2)]]$$

où **x<sub>i</sub>** est la fraction molaire du constituant  $i$  du mélange.

Le pouvoir calorifique supérieur réel sur une base volumique, appliqué au cas du gaz retour, s'exprime alors :

$$H_{\text{GN}} = \frac{\tilde{H}_{\text{mel}}^\circ}{Z_{\text{mel}}} = \frac{\sum_{i=1}^N [x_i \cdot \tilde{H}_i^\circ [t_1, V(t_2, P_2)]]}{1 - \left[ \sum_{i=1}^N (x_i \sqrt{b_i}) \right]^2}$$

avec :

$H_{GN}$  : pouvoir calorifique supérieur volumique réel du gaz retour

$Z_{mei}$  : facteur de compressibilité du gaz retour égal à  $1 - \left[ \sum_{i=1}^N (x_i \sqrt{b_i}) \right]^2$

où  $\sqrt{b_i}$  : facteur dit de sommation du constituant  $i$

#### ❖ Unités et arrondis

Le pouvoir calorifique supérieur réel sur une base volumique est exprimé en MJ.m<sup>-3</sup> ou dans d'autres unités telles que kWh.m<sup>-3</sup> dans les conditions de référence de combustion à 0 °C à la pression atmosphérique de 1,01325 bar et les conditions de référence du volume à 0 °C à la pression atmosphérique de 1,01325 bar. Les constantes physiques de pouvoir calorifique supérieur sur une base molaire et les masses molaires des différents composés sont issues de la norme ISO 6976–1995. **Aucun arrondi n'est fait pour le calcul de l'énergie du gaz retour.**

### 2.3 Calcul de l'énergie utilisée par les machines du méthanier

❖ **Cas n° 1 : pas de consommation de gaz aux machines** par le méthanier durant le transfert de cargaison ;

$$E_{GM} = 0$$

❖ **Cas n° 2 : consommation de gaz aux machines** par le méthanier durant le transfert de cargaison :

Le gaz brûlé aux machines est du gaz d'évaporation ou du gaz retour. Son pouvoir calorifique est donc celui du gaz d'évaporation ou du gaz retour. On a systématiquement :

$$H_{GM} = H_{GN}$$

où  $H_{GM}$  est le pouvoir calorifique supérieur du gaz brûlé aux machines et  $H_{GN}$  le pouvoir calorifique supérieur du gaz d'évaporation ou du gaz retour.

**A) pas de compteur gaz aux machines ou compteur défaillant** (ou absence de relevé des index) ; un **forfait de 0,1 % de l'énergie GNL transférée brute** est appliqué :

$$E_{GM} = 0,001 E_{GNL}$$

**B) compteur massique aux machines** ; l'énergie du gaz d'évaporation ou du gaz retour consommé aux machines (GM) est calculée **à partir de la masse mesurée en kg** (sans décimale) comme suit :

$$E_{GM} = H_{GM} \times m_{GM}$$

avec :

$H_{GM} = H_{GN}$  : pouvoir calorifique supérieur massique du GN (gaz d'évaporation ou gaz retour) brûlé aux machines en MJ.kg<sup>-1</sup>,

$m_{GM}$  : masse de GN brûlé aux machines en kg.

Le pouvoir calorifique supérieur (sur une base massique) du GN est calculé selon la norme ISO 6976-1995, d'après la formule :

$$H_{GN} = \frac{\sum_i (H_i \cdot x_i \cdot M_i)}{\sum_i (x_i \cdot M_i)}$$

avec :

**H<sub>GN</sub>** : pouvoir calorifique supérieur massique du GN calculé en MJ.kg<sup>-1</sup> à T<sub>référence combustion</sub> = 0 °C,

**H<sub>i</sub>** : pouvoir calorifique supérieur massique de chaque constituant i en MJ.kg<sup>-1</sup> à T<sub>référence combustion</sub> = 0 °C, égal au PCS molaire  $\overline{H}_i^\circ(t_1)$  du constituant i divisé par sa masse molaire

**M<sub>i</sub>** (cf. données en Annexe 2 de la présente note),

**x<sub>i</sub>** : fraction molaire du constituant i du GN,

**M<sub>i</sub>** : masse molaire du constituant i (cf. données en Annexe 2 de la présente note).

**C) compteur volumique aux machines** ; l'énergie du gaz d'évaporation ou du gaz retour consommé aux machines est calculée **à partir du volume mesuré en m<sup>3</sup>** comme suit :

$$E_{GM} = H_{GM} \times V_{GM}$$

avec :

**H<sub>GM</sub> = H<sub>GN</sub>** : pouvoir calorifique supérieur volumique du GN (gaz d'évaporation ou gaz retour) brûlé aux machines en MJ/m<sup>3</sup>(n),

**V<sub>GM</sub>** : volume de GN brûlé aux machines ramené aux conditions de référence en m<sup>3</sup>(n).

### 2.3.1 Détermination du pouvoir calorifique supérieur du gaz brûlé aux machines H<sub>GM</sub>

Comme indiqué précédemment, **H<sub>GM</sub>** est confondu avec **H<sub>GN</sub>**. On se reportera donc au § 2.2.2 de la présente note pour la détermination du pouvoir calorifique.

### 2.3.2 Détermination du volume du gaz d'évaporation ou gaz retour brûlé aux machines, ramené aux conditions de référence, V<sub>GM</sub>

Le volume réel de gaz naturel (gaz d'évaporation ou gaz retour) **V<sub>GMréel</sub>** brûlé aux machines est ramené aux conditions de référence, par correction P, T, Z, par l'équation suivante :

$$V_{GM} = \frac{Z_{ref}}{Z_{GN}} \cdot \frac{T_{ref}}{T_{GN}} \cdot \frac{P_{GN}}{P_{ref}} \cdot V_{GMréel}$$

avec :

**Z<sub>ref</sub>, Z<sub>GN</sub>** : facteur de compressibilité du gaz d'évaporation ou du gaz retour respectivement dans les conditions de référence et dans les conditions réelles ;

**T<sub>ref</sub>, T<sub>GN</sub>** : respectivement température de référence (0 °C) et température du gaz d'évaporation ou du gaz retour au niveau du compteur volumique ;

**P<sub>ref</sub>, P<sub>GN</sub>** : respectivement pression de référence (1,01325 bar) et température du gaz d'évaporation ou du gaz retour au niveau du compteur volumique.

En général, lorsque le compteur est volumique, l'information transmise au PC gaz du navire méthanier est exprimée dans les conditions de référence et aucune correction n'est à faire à l'exception de la vérification de l'homogénéité des conditions de référence du volume de gaz mesuré avec l'expression volumique du pouvoir calorifique du gaz.

## 2.4 Calcul de l'énergie nette transférée

### ❖ Méthode de calcul

En résumé, l'énergie nette transférée **E** s'exprime selon la formule :

- pour un déchargement :

$$E = V_{\text{GNL}} \left[ (\rho_{\text{GNL}} \cdot H_{\text{GNL}}) - \left( \frac{273,15}{273,15 + t} \cdot \frac{P}{1,01325} \cdot H_{\text{GN}} \right) \right] - E_{\text{GM}}$$

- pour un rechargement :

$$E = V_{\text{GNL}} \left[ (\rho_{\text{GNL}} \cdot H_{\text{GNL}}) - \left( \frac{273,15}{273,15 + t} \cdot \frac{P}{1,01325} \cdot H_{\text{GN}} \right) \right] + E_{\text{GM}}$$

### ❖ Unités et arrondis

Tous les calculs qui conduisent à l'énergie nette transférée se font sans arrondis via le calculateur et ont comme données d'entrée celles citées entre autres dans ce qui suit :

**V<sub>GNL</sub>** : volume de GNL transféré, exprimé en m<sup>3</sup> avec 3 chiffres après la virgule,

**ρ<sub>GNL</sub>** : masse volumique du GNL, exprimée en kg.m<sup>-3</sup> sans arrondis pour le calcul ; pas d'arrondis pour les calculs de K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> et V<sub>mol</sub> ; la composition molaire du GNL est donnée avec 5 chiffres après la virgule ou bien si %molaire trois chiffres après la virgule ; la température du GNL en °C est donnée avec un chiffre après la virgule,

**H<sub>GNL</sub>** : pouvoir calorifique massique du GNL exprimé en MJ.kg<sup>-1</sup> ou en kWh.kg<sup>-1</sup> sans arrondis pour le calcul ; la composition molaire du GNL est donnée avec 5 chiffres après la virgule ou bien si %molaire trois chiffres après la virgule,

**t** : température du gaz d'évaporation ou du gaz retour exprimée en °C, donnée avec un chiffre après la virgule,

**P** : pression du gaz d'évaporation ou du gaz retour exprimée en bar avec trois chiffres après la virgule, ou bien en mbar au mbar près,

**H<sub>GN</sub>** : pouvoir calorifique volumique du gaz retour exprimé en MJ/m<sup>3</sup>(n) ou en kWh/m<sup>3</sup>(n) sans arrondis pour le calcul ; la composition molaire du GNL est donnée avec 5 chiffres après la virgule ou bien si %molaire trois chiffres après la virgule,

**E<sub>GM</sub>** : énergie calculée sans arrondis avec un pouvoir calorifique sur une base massique ou volumique calculé sans arrondi à partir du pouvoir calorifique sur une base molaire ; les volumes et les masses sont arrondis respectivement au m<sup>3</sup> et au kg.

En l'absence de compteur, on applique le forfait de 0,1 % de E<sub>GNL</sub>.

Si pas de consommation de gaz aux machines du méthanier, alors E<sub>GM</sub> = 0.

**E** : énergie nette transférée exprimée en MJ ou en kWh **sans aucun arrondi**.

N.B. En cas de présence de traces de CO<sub>2</sub> dans le GNL, la fraction molaire de CO<sub>2</sub> est ajoutée à la fraction molaire de N<sub>2</sub> pour tous les calculs d'énergie.

### ❖ Conversions

- de MJ vers kWh : 1 Wh (T<sub>référence combustion</sub>) = 3 600 J (T<sub>référence combustion</sub>)
- de MJ vers MMBtu (ASTM E380-72) : 1 MMBtu (T<sub>référence combustion</sub>) = 1 055,056 MJ (T<sub>référence combustion</sub>)  
avec T<sub>référence combustion</sub> = 0 °C ou 15 °C ou 20 °C ou 25 °C ou 60 °F (15,556 °C)

Pour des T<sub>référence combustion</sub> différentes, les coefficients de conversion ne sont pas les mêmes. Par exemple :

$$1 \text{ MMBtu (T}_{\text{référence combustion}} = 15 \text{ °C)} = 1 \text{ 055,119 MJ (T}_{\text{référence combustion}} = 60 \text{ °F)}$$

### 3. Calcul de l'énergie nécessaire à la mise en gaz

La mise en gaz d'un navire est une opération consistant à chasser et à remplacer le gaz inerte contenu dans les cuves du navire (généralement dioxyde de carbone ou azote) par du gaz naturel issu de la vaporisation forcée de GNL.

On considère qu'une mise en gaz est atteinte lorsque la teneur résiduelle en CO<sub>2</sub> est inférieure à 0,1 % mol.

Le terminal met à disposition du navire la quantité de GNL nécessaire pour réaliser cette opération.

Ce volume de GNL nécessaire à la mise en gaz est donné par les tables du navire pour chacune de ses cuves. La quantité de GNL est en effet fonction des caractéristiques techniques et dimensionnelles du navire (issues des données constructeur).

A partir de cette quantité, on en déduit un volume gazeux équivalent à partir du facteur d'expansion du GNL utilisé :

$$V_{\text{Gazeux}} = V_{\text{GNL}} \times \text{Facteur d'expansion}$$

avec :

**V<sub>GNL</sub>** : volume de GNL donné par les tables du navire, exprimé en m<sup>3</sup><sub>GNL</sub>

**Facteur d'expansion** : issu de la composition et de la température du GNL mesurée dans le réservoir du terminal (compris entre 569 et 576), exprimé en m<sup>3</sup>(n)/m<sup>3</sup><sub>GNL</sub>

La quantité d'énergie correspondante est donnée par :

$$E_{\text{MEG}} = V_{\text{Gazeux}} \times H_{\text{vol. GNL}}$$

avec :

**E<sub>MEG</sub>** : énergie nécessaire à la mise en gaz, exprimée en kWh/m<sup>3</sup>(n)

**V<sub>Gazeux</sub>** : volume gazeux ramené dans les conditions normales de pression et de température (0°C ; 1,01325 bar) et exprimé m<sup>3</sup>(n).

**H<sub>vol. GNL</sub>** : pouvoir calorifique supérieur volumique du GNL utilisé, exprimé en kWh/m<sup>3</sup>(n).

Le PCS volumique du GNL étant donné par la composition du GNL utilisé.

La mise en gaz d'un navire ne donne pas lieu à l'établissement d'un rapport de cargaison par Elengy. Le traitement est purement commercial.

## 4. Calcul de l'énergie nécessaire à la mise en froid

La mise en froid d'un navire est une opération consistant à abaisser la température de la phase gaz des cuves du navire (généralement jusqu'à -130°C) avant de procéder au chargement GNL partiel ou total. Avant une mise en froid, le navire est considéré contenir du gaz naturel avec une teneur résiduelle en CO<sub>2</sub> inférieure à 0,1% mol.

### 4.1 Mise en froid avec talon (sans rechargement navire)

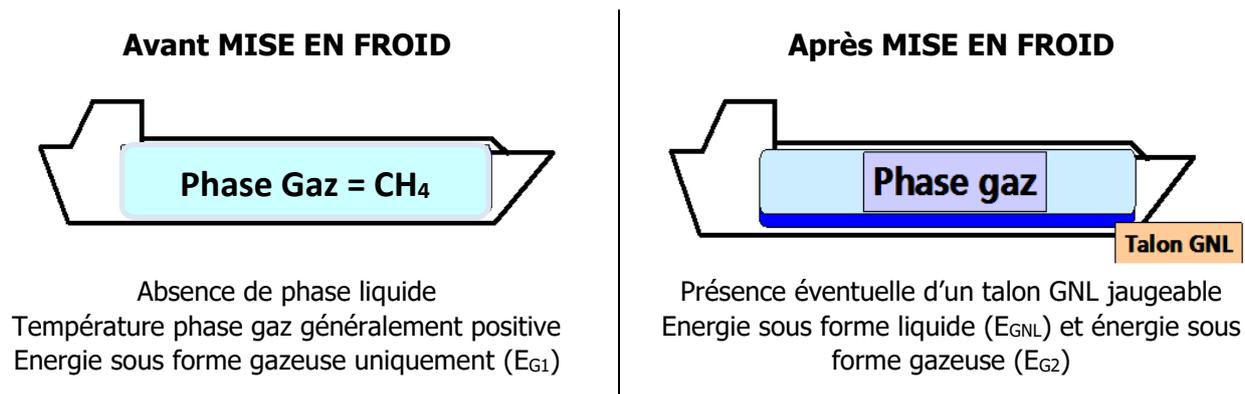


Schéma n°3 : phase d'une opération de mise en froid

L'énergie nette de mise en froid notée  $E_{MEF}$  est égale à :

$$E_{MEF} = E_{GNL} + E_{\text{phase Gaz}} - E_{GN} + E_{GM}$$

L'évaluation de ces énergies se fait par la détermination des volumes et/ou masses transférés, de la masse volumique du GNL et du pouvoir calorifique volumique et/ou massique moyen soit :

#### ❖ Pour la phase liquide GNL :

Énergie apportée par l'éventuel talon GNL jaugeable

$$E_{GNL} = V_{GNL} \times \rho_{GNL} \times H_{GNL}$$

$\rho_{GNL}$  : masse volumique du GNL utilisé

$H_{GNL}$  : pouvoir calorifique supérieur massique du GNL utilisé

$V_{GNL}$  : volume de GNL jaugeable contenu dans les cuves du navire

#### ❖ Pour la phase gaz :

Énergie apportée par l'abaissement de température de la phase gaz dans les cuves

$$E_{\text{phase Gaz}} = E_{G2} - E_{G1}$$

avec :

$E_{G1}$  : énergie contenue dans la phase gaz avant le début de la mise en froid

$E_{G2}$  : énergie contenue dans la phase gaz à l'issue de la mise en froid

$$E_{G2} = (V_{\text{navire}} - V_{GNL2}) \times \left( \frac{273,15}{273,15 + t_2} \right) \times \frac{P_2}{1,01325} \times H_{\text{vol.GNL}}$$

$$E_{G1} = V_{navire} \times \left( \frac{273,15}{273,15 + t_1} \right) \times \frac{P_1}{1,01325} \times H_{vol. CH4}$$

avec :

**V<sub>navire</sub>** : capacité totale des cuves du navire

**V<sub>GNL2</sub>** : Volume du talon de GNL jaugeable après la mise en froid

**t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>** : respectivement température de la phase gaz avant et après la mise en froid

**P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>** : respectivement pression de la phase avant et après la mise en froid.

**H<sub>vol. GNL</sub>** : pouvoir calorifique volumique du GNL utilisé ou chargé. On considère que la phase gaz contenue dans les cuves du navire après la mise en froid est issue de la vaporisation forcée du GNL.

**H<sub>vol. CH4</sub>** : pouvoir calorifique volumique du CH<sub>4</sub>. On assimile la phase gaz contenue dans les cuves du navire avant la mise en froid à du méthane pur.

❖ **Pour le gaz retour (GN) :**

$$E_{GN} = V_{GN} \times H_{GN}$$

avec :

**V<sub>GN</sub>** : volume de gaz renvoyé au terminal et remplacé par le GNL talon rechargé. Ce volume, ramené aux conditions normales (0 °C et 1,01325 bar), est calculé à partir du volume de GNL talon et des conditions de pression et de température de la phase gaz dans les cuves du navire au début de la mise en froid ;

Se référer au paragraphe 2.2.1

**H<sub>GN</sub>** : pouvoir calorifique supérieur volumique moyen du gaz calculé à partir de l'analyse chromatographique du gaz retour.

❖ **Pour le gaz consommé aux machines :**

Le gaz brûlé aux machines est du gaz issu de la vaporisation forcée du GNL utilisé pour la mise en froid. Son pouvoir calorifique est donc celui du GNL. On a systématiquement :

$$H_{GM} = H_{GNL}$$

où **H<sub>GM</sub>** est le pouvoir calorifique supérieur du gaz brûlé aux machines et **H<sub>GNL</sub>** le pouvoir calorifique supérieur du GNL.

**A) pas de compteur gaz aux machines ou compteur défaillant** (ou absence de relevé des index) ; un **forfait de 0,1 %** de l'énergie GNL transférée brute est appliqué :

$$E_{GM} = 0,001 E_{GNL}$$

**B) compteur massique aux machines** ; l'énergie du gaz consommé aux machines (GM) est calculée à partir de la masse mesurée en kg (sans décimale) comme suit :

$$E_{GM} = H_{GM} \times m_{GM}$$

avec :

**H<sub>GM</sub> = H<sub>GNL</sub>** : pouvoir calorifique supérieur massique du GNL brûlé aux machines en MJ.kg<sup>-1</sup>,

**m<sub>GM</sub>** : masse de gaz brûlé aux machines en kg.

**C) compteur volumique aux machines** ; l'énergie du gaz consommé aux machines est calculée à partir du volume mesuré en m<sup>3</sup> comme suit :

$$E_{GM} = H_{GM} \times V_{GM}$$

avec :

$H_{GM} = H_{GNL}$  : pouvoir calorifique supérieur volumique du GNL (utilisé pour la mise en froid) brûlé aux machines en MJ/m<sup>3</sup>(n),

$V_{GM}$  : volume de gaz brûlé aux machines ramené aux conditions de référence en m<sup>3</sup>(n).

## 4.2 Mise en froid avec rechargement navire

Dans le cas d'une mise en froid **suivie** d'un rechargement navire, l'énergie nécessaire à l'opération de mise en froid et l'énergie nette rechargée ne sont pas dissociées. Un seul rapport de cargaison est produit incluant l'énergie ayant permis la mise en froid avant de procéder au rechargement.

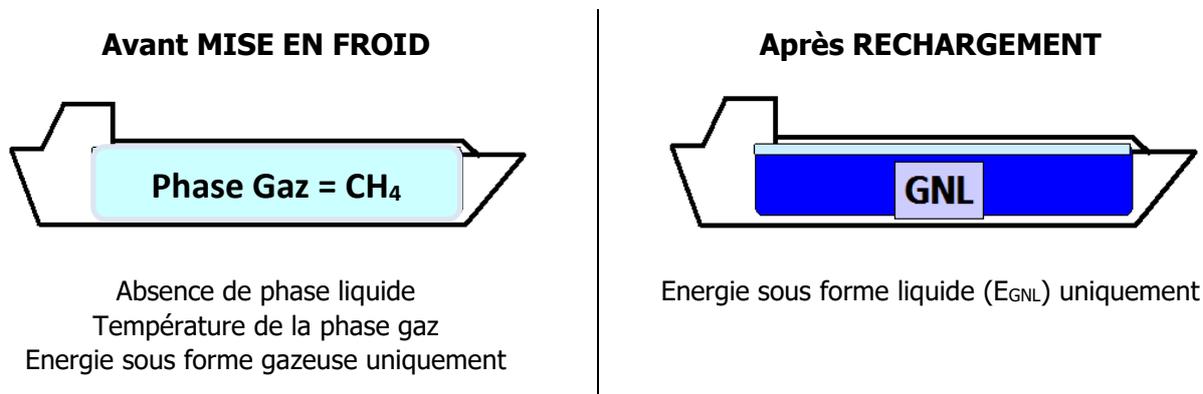


Schéma n°4 : phase d'une opération de mise en froid suivi d'un rechargement

Dans ce cas précis, le volume initial de GNL dans les cuves du navire est nul. Le volume de GNL chargé correspond au volume mesuré lors de la reconnaissance cargaison finale.

Seules la pression et la température de la phase gaz avant mise en froid sont relevées et prises en compte pour le calcul de l'énergie du gaz retour ( $E_{GN}$ ).

Se référer au paragraphe 2.4 pour le calcul de l'énergie nette rechargée.

## 5. Etat des traverses du navire

Le volume de GNL contenu dans les lignes du navire (*cargo lines*) au moment de la reconnaissance cargaison est pris en compte si l'état de remplissage des lignes est différent lors des 2 reconnaissances cargaison. Dans ce cas, ce volume de GNL vient s'ajouter ou se retrancher au volume final présent dans les cuves du navire.

### 5.1 Cas du déchargement

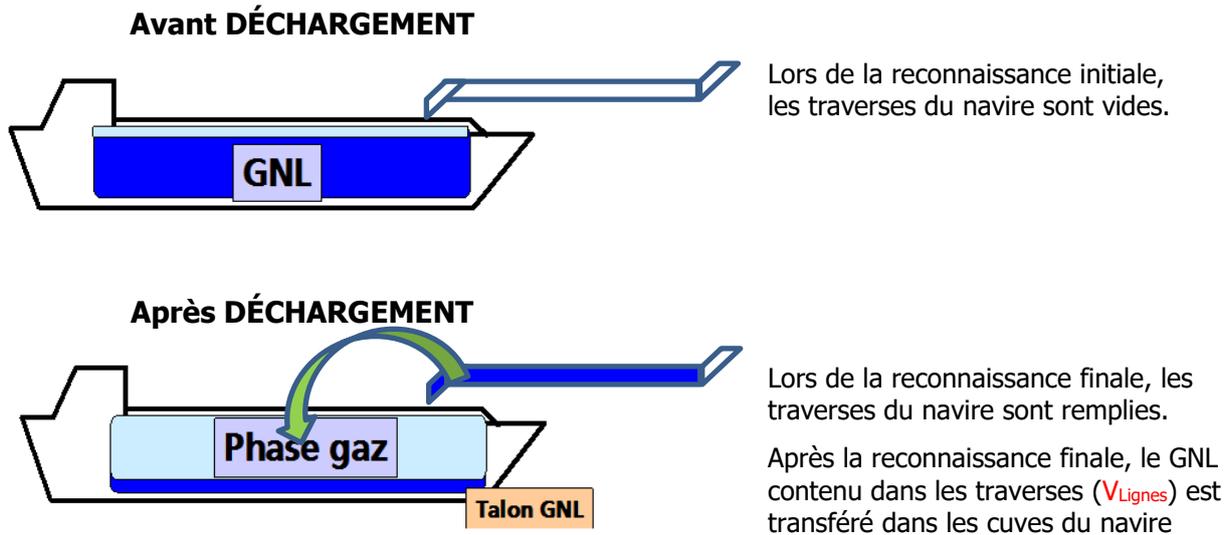


Schéma n°5 : phases de transfert pour un déchargement cargaison

L'énergie nette transférée notée **E** devient égale à :

- si les traverses sont remplies lors de la reconnaissance cargaison **finale** (et vides lors de la reconnaissance cargaison initiale) alors :

$$E = E_{GNL} - E_{Lignes} - E_{GN} - E_{GM}$$

- inversement, si les traverses sont remplies lors de la reconnaissance cargaison **initiale** (et vides lors de la reconnaissance cargaison finale) alors :

$$E = E_{GNL} + E_{Lignes} - E_{GN} - E_{GM}$$

Avec  $E_{Lignes} = V_{Lignes} \times \rho_{GNL} \times H_{GNL}$

$E_{GNL}$  : énergie brute dans la phase liquide chargé dans le navire

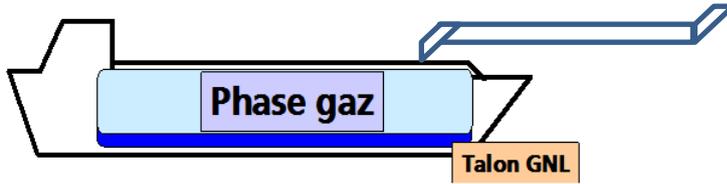
$E_{Lignes}$  : énergie contenue dans les lignes du navire

$E_{GN}$  : énergie de la phase gaz renvoyé du terminal vers le navire

$E_{GM}$  : énergie du gaz consommé par les machines du navire

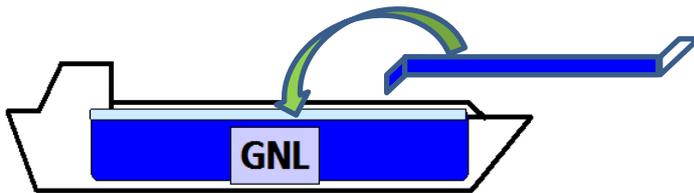
## 5.2 Cas du rechargement

### Avant RECHARGEMENT



Lors de la reconnaissance initiale, les traverses du navire sont vides.

### Après RECHARGEMENT



Lors de la reconnaissance finale, les traverses du navire sont remplies.

Après la reconnaissance finale, le GNL contenu dans les traverses ( $V_{Lignes}$ ) est transféré dans les cuves du navire

Schéma n°6 : phases de transfert pour un rechargement cargaison

Par opposition, dans le cas d'un rechargement navire, le GNL contenu dans les traverses du navire au moment de la reconnaissance finale vient s'ajouter aux quantités déjà transférées :

L'équation de l'énergie nette transférée notée **E** devient alors :

- si les traverses sont remplies lors de la reconnaissance cargaison **finale** (et vides lors de la reconnaissance cargaison initiale) alors :

$$E = E_{GNL} + E_{Lignes} - E_{GN} + E_{GM}$$

- si les traverses sont remplies lors de la reconnaissance cargaison **initiale** (et vides lors de la reconnaissance cargaison finale) alors :

$$E = E_{GNL} - E_{Lignes} - E_{GN} + E_{GM}$$

Quel que soit le type d'opération (déchargement ou rechargement navire), le volume de GNL contenu dans les traverses du navire ( $V_{Lignes}$ ) est :

- soit donné par les tables du navire,
- soit fixé à une valeur forfaitaire de 75 m<sup>3</sup> de GNL si ce volume n'a pas pu être établi grâce aux tables du navire.

## 6. Rapport de cargaison : Certificat de Qualité et Certificat de Quantité

Quel que soit le type d'opération (déchargement ou rechargement), le rapport de cargaison est constitué d'un certificat de Qualité et d'un certificat de Quantité et les caractéristiques de la cargaison sont données comme suit :

Volume de GNL avant transfert	: en m <sup>3</sup> avec (3) trois chiffres après la virgule
Volume de GNL après transfert	: en m <sup>3</sup> avec (3) trois chiffres après la virgule
Volume de GNL transféré brut	: en m <sup>3</sup> avec (3) trois chiffres après la virgule
Volume de GNL issu des lignes navire	: en m <sup>3</sup> au m <sup>3</sup> près (sans chiffre après la virgule)
Volume de GNL transféré net	: en m <sup>3</sup> avec (1) un chiffre après la virgule
Masse de GNL (avant/après transfert, transférée)	: en kg avec (1) un chiffre après la virgule
Température GNL avant ou après transfert	: en °C avec (1) un chiffre après la virgule
Pression des cuves avant ou après transfert	: en mbar à (1) un mbar près
Température du GN avant ou après transfert	: en °C avec (1) un chiffre après la virgule
Composition du GNL	: en % molaire avec (3) trois chiffres après la virgule
Composition du gaz retour	: en % molaire avec (3) trois chiffres après la virgule
Indice de Wobbe	: en kWh.m <sup>-3</sup> avec (2) deux chiffres après la virgule
Pouvoir Calorifique Supérieur volumique	: en kWh.m <sup>-3</sup> avec (2) deux chiffres après la virgule
Pouvoir Calorifique Supérieur massique	: en kWh.kg <sup>-1</sup> avec (2) deux chiffres après la virgule
Masse volumique du GNL	: en kg.m <sup>-3</sup> avec (1) un chiffre après la virgule
Masse volumique du GNL gazeux	: en kg.m <sup>-3</sup> avec (3) trois chiffres après la virgule
Densité du GNL gazeux	: sans unité avec (3) trois chiffres après la virgule
Quantité d'énergie brute transférée	: en kWh au kWh près (sans chiffre après la virgule)
Quantité d'énergie gaz retour	: en kWh au kWh près (sans chiffre après la virgule)
Quantité d'énergie consommée aux machines	: en kWh au kWh près (sans chiffre après la virgule)
Quantité d'énergie nette transférée	: en kWh au kWh près (sans chiffre après la virgule)

## ANNEXE 1 – Données issues de NBS - Technical note 1030, December 1980

### COMPONENT MOLAR VOLUMES ( $v_i$ )

Component	Molar volume*(L.mol <sup>-1</sup> )						
	118 K	116 K	114 K	112 K	110 K	108 K	106 K
CH <sub>4</sub>	0,038817	0,038536	0,038262	0,037995	0,037735	0,037481	0,037234
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,048356	0,048184	0,048014	0,047845	0,047678	0,047512	0,047348
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,062939	0,062756	0,062574	0,062392	0,062212	0,062033	0,061855
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,078844	0,078640	0,078438	0,078236	0,078035	0,077836	0,077637
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,077344	0,077150	0,076957	0,076765	0,076574	0,076384	0,076194
iso-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,092251	0,092032	0,091814	0,091596	0,091379	0,091163	0,090948
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,092095	0,091884	0,091673	0,091462	0,091252	0,091042	0,090833
N <sub>2</sub>	0,050885	0,049179	0,047602	0,046231	0,045031	0,043963	0,043002

Par convention, on considère que le néo-pentane présente les mêmes caractéristiques que l'iso-pentane, l'hexane que le normal-pentane et le dioxyde de carbone que l'azote.

Ainsi, on a les données suivantes :

néo-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,092251	0,092032	0,091814	0,091596	0,091379	0,091163	0,090948
n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,092095	0,091884	0,091673	0,091462	0,091252	0,091042	0,090833
CO <sub>2</sub>	0,050885	0,049179	0,047602	0,046231	0,045031	0,043963	0,043002

### VOLUME CORRECTION FACTOR - $K_1 \times 10^{-3}$

Molecular weight of mixture (g.mol <sup>-1</sup> )	Volume reduction (L.mol <sup>-1</sup> )						
	105 K	110 K	115 K	120 K	125 K	130 K	135 K
16	-0,007	-0,008	-0,009	-0,010	-0,013	-0,015	-0,017
17	0,165	0,180	0,220	0,250	0,295	0,345	0,400
18	0,340	0,375	0,440	0,500	0,590	0,700	0,825
19	0,475	0,535	0,610	0,695	0,795	0,920	1,060
20	0,635	0,725	0,810	0,920	1,035	1,200	1,390
21	0,735	0,835	0,945	1,055	1,210	1,370	1,590
22	0,840	0,950	1,065	1,205	1,385	1,555	1,800
23	0,920	1,055	1,180	1,330	1,525	1,715	1,950
24	1,045	1,155	1,280	1,450	1,640	1,860	2,105
25	1,120	1,245	1,380	1,550	1,750	1,990	2,272

Source : NBS - Technical note 1030, December 1980

VOLUME CORRECTION FACTOR -  $K_2 \times 10^{-3}$

Molecular weight of mixture	Volume reduction (L.mol <sup>-1</sup> )						
	105 K	110 K	115 K	120 K	125 K	130 K	135 K
16	-0,010	-0,015	-0,024	-0,032	-0,043	-0,058	-0,075
17	0,240	0,320	0,410	0,600	0,710	0,950	1,300
18	0,420	0,590	0,720	0,910	1,130	1,460	2,000
19	0,610	0,770	0,950	1,230	1,480	1,920	2,400
20	0,750	0,920	1,150	1,430	1,730	2,200	2,600
21	0,910	1,070	1,220	1,630	1,980	2,420	3,000
22	1,050	1,220	1,300	1,850	2,230	2,680	3,400
23	1,190	1,370	1,450	2,080	2,480	3,000	3,770
24	1,330	1,520	1,650	2,300	2,750	3,320	3,990
25	1,450	1,710	2,000	2,450	2,900	3,520	4,230

Source : NBS - Technical note 1030, December 1980

## ANNEXE 2 – Données issues de la norme ISO 6976-1995

Component	Molar mass (kg.kmol <sup>-1</sup> ) $M_i$	Gross heating value on a molar basis (kJ.mol <sup>-1</sup> ) $\overline{H}_i^\circ(t_1) @ 0^\circ\text{C}$	Facteur de sommation $\sqrt{b_i} @ 0^\circ\text{C}$
Methane	16,043	892,97	0,0490
Ethane	30,070	1564,34	0,1000
Propane	44,097	2224,01	0,1453
n-Butane	58,123	2883,82	0,2069
2-Methyl propane	58,123	2874,20	0,2049
n-Pentane	72,150	3542,89	0,2864
2-Methyl butane	72,150	3535,98	0,2510
2,2-Methylpropane	72,150	3521,72	0,2387
n-Hexane	86,177	4203,23	0,3286
Nitrogen	28,0135	0	0,0224
Carbon dioxide	44,010	0	0,0819