

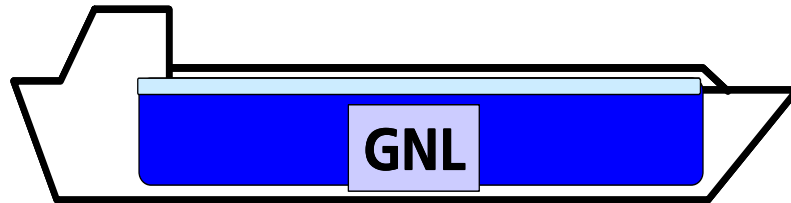
**CONTRAT ATM
ARRONDIS ET METHODES DE CALCULS
DE L'ENERGIE NETTE DECHARGEE
D'UNE CARGAISON GNL**

Version 3

1 METHODE DE DETERMINATION DE L'ENERGIE TRANSFEREE

Une représentation schématique des volets chargement et déchargement du GNL d'un navire méthanier permet d'apprécier visuellement la quantité d'énergie déchargée (cf schéma ci-après).

• *Avant déchargement (ou après chargement...)*



• *Après déchargement (ou avant chargement...)*

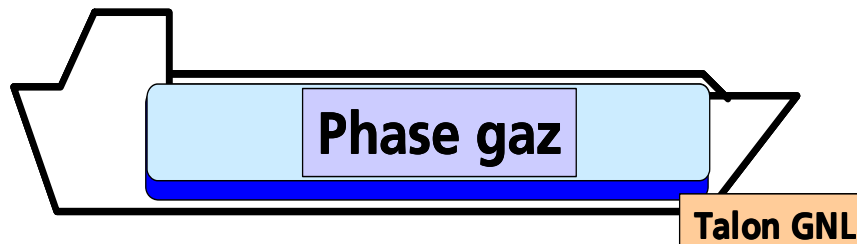


Schéma n°1 : Phases de chargement et de déchargement d'un navire méthanier

Pendant ces opérations de transfert, le volume du GNL déchargé est remplacé par du gaz renvoyé par le terminal. Par commodité, dans la suite du texte ce gaz est appelé gaz retour.

Un talon de GNL reste dans les cuves du navire en fin de déchargement (cf schéma ci-dessus).

L'énergie transférée notée E correspond à la différence des énergies transférées sous forme de GNL et sous forme de gaz [gaz retour (GN) + gaz consommé par les machines du navire le cas échéant (GM)] :

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

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

➤ Pour le GNL :

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

avec : V_{GNL} : volume de GNL mesuré dans les cuves du navire ;
 ρ_{GNL} : masse volumique moyenne du GNL calculée à partir de l'analyse chromatographique du GNL (D_{LNG}) ;

H_{GNL} : pouvoir calorifique supérieur (PCS) massique moyen du GNL calculé comme ci-dessus à partir de l'analyse chromatographique du GNL. (GCV_{LNG}).

➤ Pour le gaz retour (GN) (Gas displaced) :

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

avec : V_{GN} : volume de gaz ayant pris la place du GNL déchargé. Ce volume, ramené aux conditions normales (273,15 K et 1013,25 mbar), est calculé à partir du volume de GNL transféré et des conditions de pression et de température de la phase gazeuse dans les cuves à la fin du déchargement (Volume of gas displaced) ;

H_{GN} : pouvoir calorifique supérieur volumique du gaz calculé à partir de l'analyse chromatographique du retour gaz (GCV of gas displaced).

Le diagramme ci-après donne une bonne représentation de l'énergie transférée entre le GNL déchargé et le gaz retour.

Nota : les évaporations naturelles de la cargaison durant le déchargement ne sont pas comptabilisées ; en effet, la quantité manquante de GNL est compensée par la quantité moindre de gaz retourné dans les cuves du méthanier

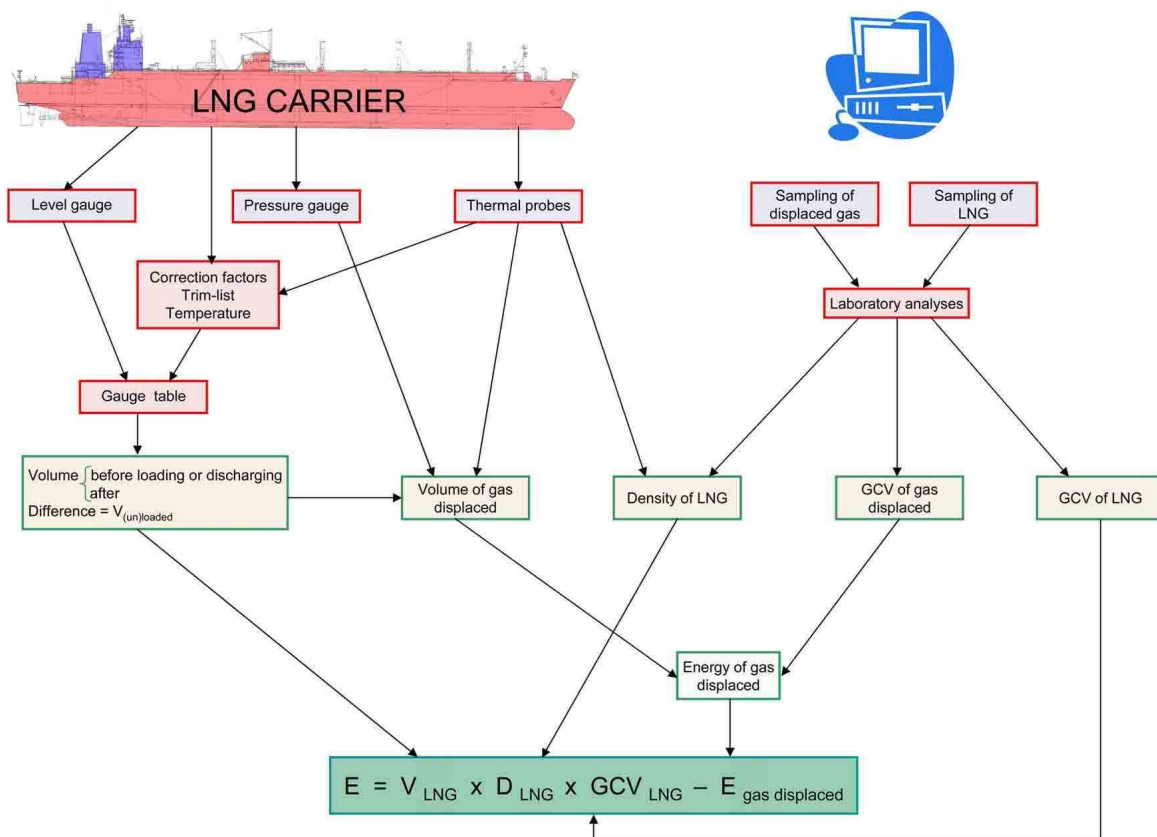


Schéma 2 : Principe d'une reconnaissance cargaison

2 METHODES DE CALCULS DE L'ENERGIE TRANFEREE

2.1 Calcul de l'énergie brute déchargée

Le calcul de l'énergie déchargée brute est fonction de :

- V_{GNL} : volume de GNL déchargé,
- ρ_{GNL} : masse volumique du GNL déchargé,
- H_{GNL} : pouvoir calorifique supérieur massique du GNL déchargé.

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

2.1.1 Calcul du volume de GNL déchargé V_{GNL}

Méthode de calculs

Le volume de GNL déchargé est calculé par différence entre les volumes de GNL contenus dans les cuves avant et après déchargement.

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 (assiette, gîte, masse volumique, ...).

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 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^3

Le volume de GNL, avant et après reconnaissance cargaison, est déterminé avec trois chiffres après la virgule ; le volume net 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 déchargé ρ_{GNL}

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

- la composition du GNL issue de l'analyse chromatographique après échantillonnage et vaporisation de celui-ci ; **les valeurs de composition molaire sont prises avec 5 chiffres après la virgule ;**
- et la température du GNL mesurée dans les cuves du navire méthanier ; **la température du GNL est prise en °C avec 1 chiffre après la virgule.**

Dans les terminaux méthaniers de Fos sur Mer et de Montoir de Bretagne, Elengy, une Société du groupe GDF SUEZ, utilise la méthode de Klosek Mac Kinley (KMK) révisée¹ pour la détermination de la masse volumique du GNL.

Domaines d'application de la méthode de calculs

Les limites de la méthode Klosek Mac Kinley sur la composition du GNL et la température sont :

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

Formule de la méthode Klosek Mac Kinley

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

$$\rho_{GNL} = \frac{M_{mix}}{V_{mix}}$$

avec :

ρ_{GNL} : masse volumique du GNL en kg/m³
 M_{mix} : poids moléculaire du mélange en g.mol⁻¹

$$M_{mix} : M_{mix} = \sum M_i \cdot X_i$$

où : M_i est le poids moléculaire du constituant i selon la table 1 de l'ISO 6976 - 1995 (annexe 2) ;
 X_i est la fraction molaire du constituant i .

V_{mix} : volume molaire du mélange exprimé en l.mol⁻¹

$$V_{mix} : V_{mix} = \sum X_i \cdot V_i - \left[K_1 + (K_2 - K_1) \times \left(\frac{X_{N_2}}{0,0425} \right) \right] \times X_{CH_4}$$

où : X_i est la fraction molaire du constituant i ;

: V_i est le volume molaire du constituant i à la température du GNL ;

¹ Méthode Klosek Mac Kinley : Four mathematical models for the prediction of LNG densities – NBS Technical Note 1030 – December 1980

: K_1, K_2 qui sont des facteurs de correction.

Les valeurs de K_1 et K_2 , exprimées en l/mol, sont déterminées par des tables en fonction de la masse molaire du GNL et de la température de ce GNL comprise entre 105 K et 135 K. Des tables indiquant les volumes molaires en l/mol pour les hydrocarbures de C_1 à C_5 , en fonction de températures variant de 106 K à 118 K sont utilisées par la méthode (cf valeurs en annexe 1). **Aucun arrondi n'est effectué durant ces calculs de K_1 , K_2 et V_{mol} .**

Unités et arrondis de calculs

Les calculs de masse volumique seront réalisés sans aucun arrondi à partir des codes de calculs KMK (note NBS 1030 December 1980) ; la masse volumique est exprimée en kg/m^3 .

2.1.3 Calcul du pouvoir calorifique massique du GNL déchargé H_{GNL}

Méthode de calculs

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 :

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

avec :

H_{GNL} : pouvoir calorifique massique du mélange

x_i : fraction molaire du constituant i

M_i : masse molaire du constituant i

$$M = \sum_{i=1}^N x_i \times M_i$$

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

$$\hat{H}_i^{\circ}(t_1) = \frac{\overline{H}_i^{\circ}(t_1)}{M_i} \quad (\text{cf tableaux en annexe 2})$$

Unités et arrondis

Le pouvoir calorifique supérieur massique est exprimé en MJ/kg ou dans d'autres unités kWh/kg 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_{GNL} n'est fait pour calculer l'énergie brute déchargée**

2.2 Calcul de l'énergie du retour gaz vers le méthanier

Le calcul de l'énergie retournée au navire méthanier E_{GN} porte sur les termes suivants :

- le volume de gaz V_{GN} ,
- et le pouvoir calorifique supérieur volumique du gaz retour H_{GN} .

2.2.1 Calcul du volume du retour gaz V_{GN}

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

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

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

En dehors des reconnaissances cargaison (avant et après), ces évaporations ne sont pas prises en compte bien que réincorporées par le Terminal.

Méthode de calculs

Le volume de gaz retourné au navire entre deux reconnaissances cargaison, correspondant au volume géométrique de GNL déchargé, doit être ramené dans les conditions de pression et de température respectivement de 1,01325 bar et de 0 °C ; il doit être corrigé en fonction des conditions de température et de pression de retour de la phase gaz au navire méthanier. A noter, la correction du facteur de compressibilité du gaz retour qui n'est pas pris en compte dans ce calcul du fait d'un impact négligeable sur la mesure du volume du gaz retour.

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

- avec : V_{GN} : volume de gaz ramené dans les conditions normales de pression et de température ; **aucun arrondi n'est effectué pour le calcul du retour gaz ;**
- P : pression absolue exprimée en bar ou en mbar, régnant dans les réservoirs du navire méthanier ; **la mesure est prise au mbar près pour les calculs ;**
- t : température de la phase gaz exprimée en degrés Celsius. La valeur de cette température est égale à la moyenne des valeurs indiquées par les sondes de la température non immergées dans le GNL restant dans les cuves du navire méthanier ; **la température est prise à 0,1 °C près pour les calculs.**

Unités et arrondis

Le volume du gaz retour V_{GN} est exprimé en m^3 dans les conditions normales de pression et de température (1,01325 bar ; 0 °C), **sans faire d'arrondis pour le calcul de l'énergie du retour gaz.**

2.2.2 Le pouvoir calorifique supérieur du retour gaz H_{GN}

Le calcul du pouvoir calorifique volumique supérieur du GNL est réalisé à partir de la composition 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 ».

Dans tous les cas, l'opérateur du terminal doit prendre en compte, s'il s'agit d'un déchargement, le pouvoir calorifique supérieur du retour gaz et l'utiliser dans le calcul de l'énergie transférée ; ceci contribuera à une meilleure justesse du bilan annuel d'exploitation du terminal méthanier en question.

Méthode de calculs

Le pouvoir calorifique du 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 :

$$\tilde{H}_i^\circ [t_1, V(t_2, p_2)] = \overline{H}_i^\circ(t_1) \times \frac{p_2}{R \times T_2}$$

où :

$\tilde{H}_i^\circ [t_1, V(t_2, p_2)]$	est le pouvoir calorifique supérieur parfait sur une base volumique du constituant i ;
$\overline{H}_i^\circ(t_1)$	est le pouvoir calorifique supérieur sur une base molaire
R	est la constante molaire des gaz étant égale à $8,314\ 510\ J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
$T_2 = (t_2 + 273,15)$	est la température absolue en K

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

$$\tilde{H}_{mel}^\circ = \sum_{i=1}^N [x_i \times \tilde{H}_i^\circ [t_1, V(t_2, p_2)]]$$

où x_i est la fraction molaire du constituant i du mélange

Pour un mélange de composition connue, le pouvoir calorifique supérieur réel sur une base volumique s'exprime ainsi :

$$H_{GN} = \frac{\tilde{H}_{mél}^{\circ}}{Z_{mél}} = \frac{\sum_{i=1}^N [x_i \times \tilde{H}_i^{\circ}[t_1, V(t_2, p_2)]]}{1 - \left[\sum_{i=1}^N (x_i \sqrt{b_i}) \right]^2}$$

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

$Z_{mél}$: 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 (annexe 2)

Unités et arrondis

Le pouvoir calorifique supérieur réel sur une base volumique est exprimé en MJ/m³ ou dans d'autres unités comme le kWh/m³ 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 retour gaz.**

2.3 Calcul de l'énergie nette déchargée (formules et arrondis pour le calcul)

Méthode de calculs

En résumé l'énergie nette déchargée s'exprime selon la formule :

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

Unités et arrondis

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

- V_{GNL} : exprimé en m^3 avec 3 chiffres après la virgule
 ρ_{GNL} : exprimé en kg/m^3 sans arrondis pour le calcul ; pas d'arrondis pour les calculs de K1, K2 et V_{mol} ; 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 $^{\circ}C$ est donnée avec un chiffre après la virgule
 H_{GNL} : pouvoir calorifique massique du GNL exprimé en MJ/kg ou en kWh/kg 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 retour gaz exprimée en $^{\circ}C$ est donnée avec un chiffre après la virgule
 P : pression du retour gaz est exprimée en bar avec trois chiffres après la virgule ou bien en mbar au mbar près
 H_{GN} : pouvoir calorifique du retour gaz exprimé en MJ/ $m^3(n)$ ou en kWh/ $m^3(n)$ 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_{GNL} : énergie nette déchargée exprimée en MJ ou en kWh **sans aucun arrondi.**

Conversions

- MJ vers kWh
1 Wh (Tréférence combustion) = 3600 J (Tréférence combustion)
- MJ vers MMBtu (ASTM E380-72)
1 MMBtu (Tréférence combustion) = 1055,056 MJ (Tréférence combustion)

avec Tréférence combustion = 0 $^{\circ}C$ ou 15 $^{\circ}C$ ou 20 $^{\circ}C$ ou 25 $^{\circ}C$ ou 60 $^{\circ}F$

Pour des Tréférence de combustion différentes, les coefficients de conversion ne sont pas les mêmes.

3 CERTIFICAT DE DECHARGEMENT ET BILAN DE DECHARGEMENT

Pour les certificats de déchargement et bilan de déchargement, les caractéristiques de la cargaison sont données comme suit :

V_{GNL} avant déchargement	: en m^3 avec (3) trois chiffres après la virgule
V_{GNL} après déchargement	: en m^3 avec (3) trois chiffres après la virgule
V_{GNL} déchargé	: en m^3 avec (1) un chiffre après la virgule
Température GNL avant déchargement	: en $^{\circ}\text{C}$ avec (1) un chiffre après la virgule
Pression des cuves après déchargement	: en mbar à (1) un mbar près
Température du GN après déchargement	: en $^{\circ}\text{C}$ avec (1) un chiffre après la virgule
Composition du GNL	: en % molaire avec (3) trois chiffres après la virgule
Composition du retour gaz	: en % molaire avec (3) trois chiffres après la virgule
Indice de Wobbe	: en kWh par m^3 avec (2) deux chiffres après la virgule
PCS, PCI volumique et massique	: en kWh/kg ou par m^3 avec (2) deux chiffres après la virgule
Masse volumique du GNL	: en kg/m^3 avec (3) trois chiffres après la virgule
Masse volumique du GNL gazeux	: en kg/m^3 avec (3) trois chiffres après la virgule
Densité du GNL gazeux	: sans unité avec (3) trois chiffres après la virgule
Quantité énergie GNL retour navire	: en kWh au kWh près (sans chiffre après la virgule)
Quantité énergie GNL nette déchargée	: en kWh au kWh près (sans chiffre après la virgule)

ANNEXE 1

COMPONENT MOLAR VOLUMES

Component	Molar volume*, l/mol							Masse Molaire**
	118 K	116 K	114 K	112 K	110 K	108 K	106 K	
CH ₄	0.038817	0.038536	0.038262	0.037995	0.037735	0.037481	0.037234	16.043
C ₂ H ₆	0.048356	0.048184	0.048014	0.047845	0.047678	0.047512	0.047348	30.070
C ₃ H ₈	0.062939	0.062756	0.062574	0.062392	0.062212	0.062033	0.061855	44.097
iC ₄ H ₁₀	0.078844	0.078640	0.078438	0.078236	0.078035	0.077836	0.077637	58.123
nC ₄ H ₁₀	0.077344	0.077150	0.076957	0.076765	0.076574	0.076384	0.076194	58.123
iC ₅ H ₁₂	0.092251	0.092032	0.091814	0.091596	0.091379	0.091163	0.090948	72.150
nC ₅ H ₁₂	0.092095	0.091884	0.091673	0.091462	0.091252	0.091042	0.090833	72.150
N ₂	0.050885	0.049179	0.047602	0.046231	0.045031	0.043963	0.043002	28.0135

*Source : N.B.S. - Technical note 1030 December 1980.

**Source : ISO 6976 – 1995 Table 1

VOLUME CORRECTION FACTOR - $k_1 \times 10^{-3}$

Molecular weight of mixture g/mol	Volume reduction, l/mol						
	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 : N.B.S. - Technical note 1030 December 1980.

VOLUME CORRECTION FACTOR - $k_2 \times 10^{-3}$

Molecular weight of mixture	Volume reduction, l/mol						
	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 : N.B.S. - Technical note 1030 December 1980.

ANNEXE 2

**Masse molaire, pouvoir calorifique supérieur sur une base molaire et facteurs de sommation
(ISO 6976 – 1995 : tables 1, 2 & 3)**

Component	Masse molaire (kg/kmol)	Pouvoir calorifique supérieur sur une base molaire (kJ/mol)	$\sqrt{b_i}$ à T 0 °C et P = 101,325 kPa
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
Nitrogen	28.0135	0	0.0224