

---

---

**Produits pétroliers — Calcul de l'énergie  
spécifique des combustibles résiduels à  
partir de caractéristiques  
physicochimiques et d'éléments  
de composition — Données de base**

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

*Petroleum products — Calculation of specific energy of residual fuels from  
physical and compositional properties — Basic data*

ISO/TR 18455:1999

[https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8f965e69-7840-4d1d-82fc-  
dc59c0b044d6/iso-tr-18455-1999](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8f965e69-7840-4d1d-82fc-dc59c0b044d6/iso-tr-18455-1999)



## Sommaire

1	Domaine d'application .....	1
2	Approche de l'analyse des données.....	1
3	Termes et définitions.....	2
4	Analyse des données .....	2
4.1	Vérification de l'analyse de Cragoe .....	2
4.2	Équation simplifiée.....	4
5	Énergie spécifique inférieure.....	4
5.1	Relations de Cragoe .....	4
5.2	Vérification de la relation de Cragoe .....	5
5.3	Équation simplifiée.....	6
6	Conclusions .....	6
Annexe A (informative)	Données de base pour le calcul de l'énergie spécifique.....	8

iteh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

[ISO/TR 18455:1999](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8f965e69-7840-4d1d-82fc-dc59c0b044d6/iso-tr-18455-1999)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8f965e69-7840-4d1d-82fc-dc59c0b044d6/iso-tr-18455-1999>

© ISO 1999

Droits de reproduction réservés. Sauf prescription différente, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

Organisation internationale de normalisation  
Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Suisse  
Internet iso@iso.ch

Imprimé en Suisse

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comité membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

La tâche principale des comités techniques de l'ISO est d'élaborer les Normes internationales. Exceptionnellement, un comité technique peut proposer la publication d'un Rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1: lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2: lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour toute autre raison, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3: lorsqu'un comité technique a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales (ceci pouvant comprendre des informations sur l'état de la technique par exemple).

Les rapports techniques des types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données fournies ne soient plus jugées valables ou utiles.

L'ISO/TR 18455, Rapport technique du type 3, a été élaboré par le comité technique ISO/TC 28, *Produits pétroliers et lubrifiants*.

L'annexe A du présent Rapport technique est donnée uniquement à titre d'information.

## Introduction

L'énergie spécifique est une propriété essentielle à connaître pour la sélection, l'étude de l'utilisation finale et la mise en œuvre des combustibles résiduels. Le mesurage de cette caractéristique prend beaucoup de temps, nécessite les compétences de spécialistes, et ne conduit pas à une bonne fidélité. C'est pourquoi depuis de nombreuses années, l'énergie spécifique est évaluée, pour les besoins courants, par une méthode de calcul basée sur certaines caractéristiques normalement connues des combustibles.

Le présent Rapport technique expose les données de base et les équations dont l'usage est largement répandu dans l'industrie pétrolière pour l'évaluation de l'énergie spécifique des combustibles résiduels. Les Normes internationales suivantes produisent des équations développées à partir des données contenues dans le présent Rapport technique:

ISO 4261:1993, *Produits pétroliers — Combustibles (classe F) — Spécifications des combustibles pour turbines à gaz en service dans l'industrie et la marine.*

ISO 8217:1996, *Produits pétroliers — Combustibles (classe F) — Spécifications des combustibles pour la marine.*

En raison de leur nature, il est rarement possible d'obtenir une analyse compositionnelle détaillée ou même une séparation physique simple des combustibles résiduels. Par conséquent, les techniques appliquées aux calculs de l'énergie spécifique des gaz et des distillats de produits pétroliers ne sont pas applicables aux combustibles résiduels. La première approche empirique de ce problème a été publiée par Cragoe en 1929<sup>1)</sup>. Les méthodes de calcul développées ensuite sont toutes fondées sur le même principe de base, à savoir que l'énergie spécifique peut être reliée à la masse volumique du produit, avec des corrections relatives aux teneurs en eau, soufre et cendres.

Les équations de Cragoe ont été en usage presque exclusivement dans l'industrie pétrolière jusque dans les années 1960. Il a alors été mis en lumière que ces relations étaient fondées sur des combustibles résiduels préparés exclusivement par mélange de composants issus de procédés de raffinage direct, avec du pétrole brut ou des produits pétroliers. Ces équations étant basées sur un large éventail de combustibles et de types de pétrole brut, on a avancé que les valeurs de leurs coefficients pourraient ne pas être applicables au groupe de combustibles obtenu par les nouvelles voies de traitement des combustibles résiduels apparaissant à l'époque. Il y avait également, en dehors des Etats-Unis, un besoin grandissant d'une version métrique moderne des équations de Cragoe. De nouvelles équations furent développées par de nombreux organismes de normalisation durant la période 1966 - 1974, et ne conduisirent dans la plupart des cas qu'à de très petites différences de résultats d'énergie spécifique calculée.

Toute équation empirique est principalement le résultat d'une analyse de régression de valeurs expérimentales permettant d'obtenir la meilleure relation possible. Il est donc essentiel que les analyses soient effectuées avec une grande rigueur technique sur un échantillonnage représentatif de l'ensemble de la population. A la fin des années 1970, le traitement sévère des résidus devenait de plus en plus courant, introduisant ainsi un nouveau type de combustible résiduel. En outre, dans les laboratoires pétroliers, le nombre et le niveau de compétence du personnel étaient en baisse. C'est pourquoi, il fut décidé de mener un travail à grande échelle, probablement pour la dernière fois possible, pour obtenir une relation représentative des combustibles résiduels disponibles dans le monde entier. Il fut demandé aux experts français du Bureau de Normalisation du Pétrole (BNPé) de réaliser cette étude, et de vérifier en même temps si la relation de Cragoe originelle demeure applicable aux types de combustibles résiduels existant à cette époque. Ce travail, qui a fait l'objet d'un rapport en décembre 1981<sup>2)</sup>, a été effectué entre 1980 et 1981.

---

1) Cragoe, US Bureau of Standards, Miscellaneous Publication No. 97, November 1929.

2) Rapport des experts français, décembre 1981.

# Produits pétroliers — Calcul de l'énergie spécifique des combustibles résiduels à partir de caractéristiques physicochimiques et d'éléments de composition — Données de base

## 1 Domaine d'application

Le présent Rapport technique examine les données relatives à 258 échantillons de combustibles résiduels dont l'énergie spécifique a été déterminée par des techniciens expérimentés avec la technique classique de la bombe calorimétrique. Dans 15 cas, il n'existe pas suffisamment de données physiques et/ou chimiques pour calculer l'énergie spécifique. Dans de nombreux cas, les teneurs en eau fournies étaient inférieures à la valeur limite de la méthode (0,05 % ou 0,10 %), et dans certains cas la même remarque s'applique à la teneur en cendres. Ce Rapport technique contient également de nombreuses données de teneur en hydrogène, à la fois mesurées et calculées. Les combustibles résiduels examinés couvrent une gamme de masses volumiques à 15 °C comprise entre 912 kg/m<sup>3</sup> et 1 032 kg/m<sup>3</sup>. On estime que ces échantillons couvrent toutes les régions principales productrices de pétrole brut et les différents procédés normaux de traitement du pétrole existant à la fin des années 1970. Les teneurs en soufre s'étendent de 0,33 % (m/m) à 5,19 % (m/m). Cette analyse ne porte sur aucun échantillon à haute teneur en eau ou en cendres.

NOTE 1 Dans le cadre du présent Rapport technique, les termes «%(m/m)» et «%(V/V)» sont utilisés pour représenter respectivement les fractions massiques et les fractions volumiques.

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8f965c69-7840-4d1d-82fc-dc59c0b044d6/iso-tr-18455-1999>

## 2 Approche de l'analyse des données

L'approche adoptée dans le présent Rapport technique est tout d'abord de vérifier si les équations de Cragoe pour le calcul de l'énergie spécifique restent valables pour cet ensemble de données, puis d'ajuster autant que nécessaire les valeurs numériques afin d'obtenir le meilleur calage possible des relations, et finalement d'étudier l'importance relative des différents facteurs de ces équations en vue de les simplifier, tout en leur conservant une fidélité acceptable.

Au cours de ce travail, on a mis en lumière un certain nombre de généralisations, malgré le biais négligeable que celles-ci vont éventuellement donner dans les résultats calculés pour cet ensemble de données. En effet une exactitude absolue exigerait un détail d'analyse généralement inexistant pour les combustibles résiduels. Ces généralisations sont principalement en relation avec le fait que l'énergie spécifique est une fonction de la teneur en hydrocarbures du produit examiné, avec une très petite correction pour le soufre, alors que les propriétés apparentes sont déterminées sur l'ensemble de l'échantillon. Ces effets sont probablement plus importants dans le calcul de l'énergie spécifique inférieure, pour lequel Cragoe utilise une corrélation directe entre la teneur en hydrogène et la masse volumique, mais même dans ce cas, ces effets restent extrêmement faibles. On a également noté de petites anomalies dans l'expression de la teneur en eau, où il n'est généralement pas précisé s'il s'agit de «%(m/m)» ou de «%(V/V)». Cependant, les teneurs en eau de l'ensemble de données étant faibles, et les masses volumiques voisines de 1 000 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C, l'effet produit par cette imprécision peut être considéré comme négligeable.

Finalement, le fait que Cragoe utilise des unités Impériales dans tous ses calculs, notamment pour la masse volumique (où il utilise la densité à 60/60 °F), et les unités de résultats (où il utilise les Btu/lb, les Btu/USG et les cal/g), constitue une petite complication pour l'analyse des données. La conversion en unités SI, bien que facile, introduit une source potentielle d'erreurs. Le présent Rapport technique a cependant adopté cette voie. A cet égard, le document originel publié par les experts français exprime la masse volumique en kg/l, alors que tous les documents ISO publiés depuis le début des années 1980 utilisent le kg/m<sup>3</sup>, qui est l'unité SI correcte. Cette dernière

unité est maintenant largement acceptée dans l'industrie pétrolière. Elle est utilisée dans le présent Rapport technique.

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent Rapport technique, les termes et définitions suivants s'appliquent.

#### 3.1

##### énergie spécifique supérieure

quantité totale de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de masse de combustible, cette combustion étant réalisée avec de l'oxygène saturé par la vapeur d'eau dans un volume constant, les réactifs et les produits de combustion formés étant à la même température, et l'eau produite étant à l'état liquide

#### 3.2

##### énergie spécifique inférieure

quantité totale de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de masse de combustible, la combustion étant réalisée avec de l'oxygène sous une pression constante de 101,3 kPa, l'eau formée restant en phase vapeur

L'énergie spécifique inférieure est égale à l'énergie spécifique supérieure moins la chaleur latente de vaporisation de l'eau produite durant la combustion.

NOTE 2 On trouvera dans les références indiquées dans le présent Rapport technique, les termes devenus obsolètes: "pouvoir calorifique" et "chaleur de combustion".

### 4 Analyse des données

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

#### 4.1 Vérification de l'analyse de Cragoe

##### 4.1.1 Équations de Cragoe pour l'énergie spécifique supérieure

Les corrélations de Cragoe pour les produits pétroliers lourds sont basées sur une analyse des valeurs expérimentales obtenues sur 630 produits pétroliers provenant de 11 pays, les analyses étant réalisées par cinq "groupes d'observateurs". Ces produits pétroliers comprennent des kérosènes, des fuels distillés, des combustibles résiduels et des pétroles bruts dont les masses volumiques sont comprises entre approximativement 780 kg/m<sup>3</sup> et 1 000 kg/m<sup>3</sup>. Les sous-groupes de cet ensemble de données ne semblent pas avoir été analysés.

Cragoe a établi une série de corrélations qui sont toutes basées sur la découverte que l'énergie spécifique supérieure de la fraction hydrocarbures d'un pétrole brut ou d'un produit pétrolier présente une relation constante avec la densité, de la forme:

$$Q_s = 12\,400 - 2\,100 d^2 \quad (1)$$

où

$Q_s$  est l'énergie spécifique supérieure de la fraction hydrocarbures du produit, en calories par gramme;

$d$  est la densité à 60/60 °F.

À partir de cette relation, il est possible d'exprimer l'énergie spécifique supérieure de l'ensemble du produit comme suit:

$$G = Q_s - 0,01Q_s(w + a + s) + 22,5s \quad (2)$$

où

$G$  est l'énergie spécifique supérieure de l'ensemble du produit, en calories par gramme;

- $w$  est la teneur en eau, en pourcentage en masse;
- $a$  est la teneur en cendres, en pourcentage en masse;
- $s$  est la teneur en soufre, en pourcentage en masse.

Le coefficient 22,5 déterminé par Cragoe pour l'énergie spécifique du soufre, est un compromis basé sur un composé soufré «moyen». Ce coefficient est probablement trop faible pour les composés soufrés légers et trop élevé pour les composés lourds où le soufre se trouve dans de grosses molécules complexes.

La conversion de ces équations en unités SI - mégajoules par kilogramme (MJ/kg) pour l'énergie spécifique et kilogrammes par mètre cube pour la masse volumique à 15 °C ( $\rho_{15}$ ) - donne

$$Q_s = 51,900 \ 2 - \left[ 8,802 \left( \rho_{15}^2 \times 10^{-6} \right) \right] \quad (3)$$

$$G = Q_s - 0,01Q_s (w + a + s) + 0,094 \ 2s \quad (4)$$

où

51,900 2 est  $12 \ 400 \times 4,185 \ 5 \times 10^{-3}$ ;

8,802 est  $2 \ 100 \times (0,999 \ 7 / 0,999 \ 012)^2 \times 4,185 \ 5 \times 10^{-3}$ ;

0,999 7 est le coefficient de conversion de la masse volumique à 60 °F en masse volumique à 15 °C;

0,999 012 est le coefficient de conversion pour le changement de masse volumique de l'eau entre 60 °F et 15 °C;

0,094 2 est  $(22,5) \times (4,185 \ 5) \times (10^{-3})$ .

ISO/TR 18455:1999

NOTE 2 Les coefficients 0,999 7 et 0,999 012 sont obtenus à l'aide de l'ITPS 68, l'échelle de température Internationale existant à l'époque de la publication du rapport des experts français (1981). En utilisant l'échelle actuelle (ITS 90), ces coefficients sont modifiés au niveau de la quatrième et de la sixième décimales respectivement, ce qui ne conduit qu'à un très petit effet sur le facteur 8,802. Du fait que le facteur 4,185 5, utilisé comme équivalent mécanique de la calorie par les experts français, soit également légèrement suspect, les coefficients réels de l'équation (4), et de celles qui en sont dérivées, ne sont pas mathématiquement exacts au niveau de la troisième décimale. Cependant, le présent Rapport technique, accepté par l'ISO/TC 28/SC 4/WG 5 et WG 6, est une reprise du rapport fourni par les experts français et non pas une nouvelle analyse des données. Ensuite, toute modification des coefficients de ces équations à ce niveau n'entraîne aucun effet pratique sur leur valeur d'utilisation, celles-ci se situant nettement dans les limites de toute marge d'arrondissement normale.

#### 4.1.2 Importance relative des facteurs de Cragoe

Pour un combustible résiduel typique ayant une masse volumique de  $990 \text{ kg/m}^3$  à 15 °C, une teneur en soufre de 3,8 % ( $m/m$ ), une teneur en eau de 0,1 % ( $m/m$ ) et une teneur en cendres de 0,04 % ( $m/m$ ), l'équation (3) donne une valeur de 43,27 MJ/kg pour  $Q_s$ . La correction du soufre réduit cette valeur d'environ 3 %, les corrections des teneurs en eau et en cendres réduisent de nouveau la valeur de 0,14 % pour donner une énergie spécifique supérieure finale de 41,93 MJ/kg. On peut en conclure, qu'en l'absence de contamination significative par l'eau et les matières minérales, les valeurs de masse volumique et de teneur en soufre suffisent pour fournir une valeur d'énergie spécifique supérieure suffisamment exacte pour la plupart des applications pratiques.

#### 4.1.3 Vérification de la relation de Cragoe

Les données figurant en annexe A comprennent les valeurs expérimentales d'énergie spécifique supérieure, de masse volumique et de teneur en soufre, et dans la plupart des cas les valeurs mesurées de teneur en eau et de teneur en cendres. Le tableau donne, mais pas systématiquement, à la fois les teneurs en hydrogène calculées et mesurées, et pour un tout petit peu plus de 50 % des échantillons, la teneur en carbone mesurée. Le tableau indique également la valeur d'énergie spécifique supérieure calculée selon l'équation de Cragoe (4), et l'écart existant entre cette valeur et la valeur expérimentale.

Les résultats montrent que dans 98 % des cas, la valeur de l'énergie spécifique supérieure calculée selon l'équation de Cragoe se trouve à 2 % près de la valeur expérimentale, avec un décalage systématique des valeurs calculées vers les valeurs inférieures. Ce biais présente une valeur moyenne de 0,28 MJ/kg. L'examen des sous-groupes de la matrice d'échantillons montre que ce biais est constant pour les sous-groupes basés soit sur la teneur en soufre, soit sur la région de production du pétrole brut ou le type de traitement. En termes physiques, ce biais ne semble pas relié à la masse volumique ni à la viscosité.

Il apparaît donc qu'une légère correction des coefficients des équations de Cragoe conduira à une relation valable pour les combustibles résiduels examinés, et par extrapolation, pour le marché des combustibles résiduels du début des années 1980 et avec bon espoir pour au-delà.

L'examen du meilleur calage de la relation montre que les deux coefficients de l'équation (3) devraient être modifiés. Toutefois, le seul remplacement du coefficient 51,900 2 par le coefficient 52,190 suffit à répondre à l'ensemble des critères statistiques de la corrélation, et c'est cette dernière voie qui est adoptée.

## 4.2 Équation simplifiée

Après avoir vérifié l'approche de Cragoe, puis effectué une modification mineure de la relation, on peut maintenant rechercher une forme simplifiée de l'équation, plus pratique pour l'usage courant, comme mentionné en 4.1.2. Outre la suppression des teneurs en eau et en cendres, on peut apporter une simplification supplémentaire en remplaçant le terme « $\rho_{15}^2 \times 10^{-6}$ » par « $(2\rho_{15} - 1\ 000) \times 10^{-3}$ », la masse volumique des combustibles résiduels étant voisine de 1 000 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C. En limitant l'expression des coefficients à une seule décimale,  $Q_s$  devient donc

$$Q_s = 61,0 - 17,6(\rho_{15} \times 10^{-3}) \quad (5)$$

En ajoutant le terme correctif du soufre ( $-Q_s/100 + 0,094$ )s, la masse volumique de 1 000 kg/m<sup>3</sup> étant substituée dans l'équation (5), on obtient finalement la relation simplifiée

$$G = 61,0 - 17,6(\rho_{15} \times 10^{-3}) - 0,34s \quad (6)$$

Cette équation fournit un niveau de corrélation très élevé pour les échantillons décrits dans l'Annexe A. Cependant, ceux-ci présentant tous de faibles teneurs en eau et en cendres, la confiance en cette équation se trouve limitée à ce type d'échantillons. En général toutefois, pour les échantillons à forte teneur en eau, une correction simple (soustraction) pour la teneur en eau est facile à effectuer, et l'équation simplifiée donnera néanmoins une évaluation rapide de l'énergie spécifique supérieure.

## 5 Énergie spécifique inférieure

### 5.1 Relations de Cragoe

Pour établir des équations similaires pour le calcul de l'énergie spécifique inférieure, il est nécessaire de soustraire la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

Il a été montré que les coefficients empiriques simplifiés utilisés par Cragoe dans ses calculs donnent de bons résultats, compte tenu de la fidélité des mesures de teneur en hydrogène discutée plus bas. La première étape effectuée par Cragoe a été encore une fois d'examiner la fraction hydrocarbures du produit, puis de réaliser les calculs à partir des résultats d'énergie spécifique supérieure présentés en 4.1.1. Sur cette base, l'énergie spécifique inférieure,  $N_p$ , en calories par gramme, devient

$$N_p = Q_s - 0,01H [(9 \times 585) - 220] \quad (7)$$

où

$H$  est la teneur en hydrogène de la fraction hydrocarbures en pourcentage en masse;

585 est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 20 °C, en calories par gramme;



220 est une correction destinée à prendre en compte le changement de volume entre l'état initial et l'état final;

9 est un coefficient de conversion du pourcentage en masse d'hydrogène en pourcentage en masse d'eau.

Cragoe relie ensuite le pourcentage en masse d'hydrogène à la densité à 60/60 °F à l'aide de l'équation suivante:

$$H = 26 - 15d \quad (8)$$

Il s'ensuit que l'énergie spécifique inférieure de la fraction hydrocarbures du produit peut être exprimée comme suit:

$$N_p = Q_s - 50,45 (26 - 15d) \quad (9)$$

En appliquant cette équation à l'ensemble du produit examiné, et en corrigeant les teneurs en eau, en cendres et en soufre, relation de Cragoe pour le calcul de l'énergie spécifique inférieure, en calories par gramme, devient

$$N_a = N_p [1 - 0,01(w + a + s)] + 22,5s - 5,85w \quad (10)$$

Après passage en unités SI, on obtient finalement

$$N_a = \left\{ 46,704 - \left[ 8,802 \rho_{15}^2 \times 10^{-6} \right] + \left[ 3,167 \left( \rho_{15} \times 10^{-3} \right) \right] \right\} \times [1 - 0,01(w + a + s)] + 0,094 2s - 0,024w \quad (11)$$

## 5.2 Vérification de la relation de Cragoe

Le calcul de l'énergie spécifique inférieure s'appuie à la fois sur l'énergie spécifique supérieure dont la vérification a déjà été effectuée en 4.1.3 et sur la relation empirique entre la teneur en hydrogène et la densité à 60/60 °F développée par Cragoe et donnée par l'équation (8).

Si on admet que les teneurs en eau et en cendres sont négligeables

$$H_h = \frac{H_p}{1 - 0,01s} \quad (12)$$

et

$$H_p = \frac{26 - 15,01 \left( \rho_{15} \times 10^{-3} \right)}{1 + 0,01s} \quad (13)$$

où

$H_h$  est la teneur en hydrogène de la fraction hydrocarbures du produit, en pourcentage en masse;

$H_p$  est la teneur en hydrogène de l'ensemble du produit, en pourcentage en masse;

15,01 est égal à 15 fois le facteur de conversion de la densité à 60/60 °F en masse volumique à 15 °C.

L'annexe A présente 217 résultats de teneur en hydrogène, obtenus à la fois par analyse élémentaire et par calcul selon l'équation (13). Ces résultats montrent que dans 77 % des cas, l'écart entre la valeur mesurée et la valeur calculée est inférieur à 5 % de la valeur mesurée, dans 92 % des cas cet écart est inférieur à 7,5 %, et dans 98 % des cas celui-ci est inférieur à 10 %. Par ailleurs l'écart systématique moyen, obtenu en divisant la somme algébrique des écarts absolus par leur nombre, est égale à 0,06, valeur qui est négligeable vis à vis des valeurs en question. Cette moyenne peut donc être considérée comme bien centrée et il n'est pas nécessaire d'effectuer de corrections aux coefficients empiriques.

Compte tenu du fait que les nouvelles relations empiriques de détermination de l'énergie spécifique supérieure permettent d'obtenir dans 95 % des cas un écart entre la valeur calculée et la valeur mesurée n'excédant pas 1,4 % de cette dernière, et que la relation empirique de calcul de la teneur en hydrogène permet d'obtenir dans 95 % des

cas un écart entre la valeur calculée et la valeur mesurée n'excédant pas 8,5 % de la valeur mesurée, il est possible d'avancer, après analyse mathématique, que dans 95 % des cas l'écart entre la valeur calculée d'énergie spécifique inférieure et la valeur mesurée n'excédera pas 2 % de la valeur mesurée.

### 5.3 Équation simplifiée

En procédant de la même façon que pour l'énergie spécifique supérieure (4.2), on peut développer une relation simplifiée pour le calcul de l'énergie spécifique inférieure. Cette relation simplifiée, basée sur l'approche de Cragoe, est la suivante:

$$N_a = 55,5 - 14,4(\rho_{15} \times 10^{-3}) - 0,32s \quad (14)$$

L'équation simplifiée, dite de Marder, est du même type mais présente quelques différences dans les coefficients:

$$N_a = 52,9 - 11,9(\rho_{15} \times 10^{-3}) - 0,29s \quad (15)$$

Les écarts entre les résultats obtenus en appliquant ces deux équations à des combustibles résiduels typiques à forte teneur en soufre sont négligeables pour les besoins courants.

## 6 Conclusions

6.1 L'analyse actuelle portant sur plus de 250 séries de valeurs, couvrant une grande diversité de combustibles résiduels disponibles entre 1979 et 1981, montre que les relations classiques de Cragoe conservent toute leur validité pour le calcul de l'énergie spécifique supérieure et de l'énergie spécifique inférieure. Il est cependant proposé d'apporter de faibles corrections aux coefficients de l'équation originelle pour le calcul de l'énergie spécifique supérieure afin d'obtenir un meilleur calage de la relation pour les produits actuels de ce type. L'équation pour le calcul de l'énergie spécifique inférieure reste inchangée.

6.2 L'équation proposée pour l'énergie spécifique supérieure,  $G$ , en mégajoules par kilogramme, est la suivante:

$$G = Q_s - 0,01Q_s(w + a + s) + 0,094 2s$$

où

$$Q_s = 52,190 - \left[ 8,802(\rho_{15}^2 \times 10^{-6}) \right]$$

d'où l'équation complète:

$$G = \left[ 52,190 - 8,802(\rho_{15}^2 \times 10^{-6}) \right] \times [1 - 0,01(w + a + s)] + 0,094 2s$$

6.2.1 Lorsque les teneurs en eau et en cendres ne s'écartent pas des valeurs habituelles [0,3 % ( $m/m$ ) et 0,05 % ( $m/m$ ) maximum, respectivement], la relation simplifiée suivante donne des résultats suffisamment exacts pour les besoins courants:

$$G = 61,0 - 17,6(\rho_{15} \times 10^{-3}) - 0,34s$$

6.3 L'équation pour l'énergie spécifique inférieure,  $N_a$ , en mégajoules par kilogramme, est celle proposée par Cragoe (avec les conversions):

$$N_a = \left\{ 46,704 - \left[ 8,802(\rho_{15}^2 \times 10^{-6}) \right] + \left[ 3,167(\rho_{15} \times 10^{-3}) \right] \right\} \times [1 - 0,01(w + a + s)] + 0,094 2s - 0,024w$$

**6.3.1** Dans les mêmes conditions qu'en 6.2.1, la forme simplifiée suivante de cette équation donne des résultats suffisamment exacts pour les besoins courants:

$$N_a = 55,5 - 14,4(\rho_{15} \times 10^{-3}) - 0,32s$$

**6.4** L'utilisation d'une table présentant  $Q_s$  en fonction de  $\rho_{15}$  est très pratique et simplifie considérablement le calcul de l'énergie spécifique supérieure. Une table similaire peut être réalisée pour le terme situé entre les accolades dans l'équation de l'énergie spécifique inférieure. Il est également possible de réaliser des tables incluant également la teneur en soufre [pour couvrir des valeurs de masse volumique comprises entre 950 kg/m<sup>3</sup> et 1 009 kg/m<sup>3</sup> associées à des teneurs en soufre comprises entre 0,5 % (m/m) et 4,0 % (m/m), il faut quelques 2 100 valeurs], mais elles ne présentent pas d'intérêt par rapport aux équations simplifiées, et ne font aucune correction pour la teneur en eau et/ou la teneur en cendres. De façon similaire, les abaques, largement utilisées, présentent les mêmes limitations que les tables, à savoir qu'elles ne peuvent prendre en compte que la masse volumique et la teneur en soufre. Les interpolations peuvent introduire des erreurs non négligeables, et, sauf si des calculs exacts sont requis, il est préférable de recourir aux équations simplifiées.

## iTeh STANDARD PREVIEW (standards.iteh.ai)

[ISO/TR 18455:1999](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8f965e69-7840-4d1d-82fc-dc59c0b044d6/iso-tr-18455-1999)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/8f965e69-7840-4d1d-82fc-dc59c0b044d6/iso-tr-18455-1999>