Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 83 (1957)

Heft: 14

Artikel: Turbines à gaz en circuit fermé munies d'un réacteur nucléaire: note relative à certaines propriétés des gaz utilisables

Autor: Colombi, Ch.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-62789

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

83e année 6 juillet 1957 N° 14

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Abonnements:
Suisse: 1 an, 26 francs
Etranger: 30 francs
Pour sociétaires:
Suisse: 1 an, 22 francs
Etranger: 27 francs
Prix du numéro: Fr. 1.60
Ch. post. « Bulletin technique de la Suisse romande »
N° II. 57 75, à Lausanne.

Adresser toutes communications concernant abonnements, changements d'adresse, expédition à **Imprimerie La Concorde, Terreaux 31, Lausanne**

Rédaction
et éditions de la S. A. du Bulletin technique (tirés à part), Case Chauderon 475
Administration de la S.A. du Bulletin Technique
Ch. de Roseneck 6 Lausanne

Paraissant tous les quinze jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des Anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale

Comité de patronage — Président : J. Calame, ingénieur, à Genève ; Vice-président : † G. Epitaux, architecte, à Lausanne — Membres : Fribourg : MM. H. Gicot, ingénieur ; M. Waeber, architecte — Vaud : MM. A. Gardel, ingénieur ; A. Chevalley, ingénieur ; E. d'Okolski, architecte ; Ch. Thévenaz, architecte — Genève : MM. Cl. Grosgurin, architecte ; E. Martin, architecte — Neuchâtel : MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye ingénieur — Valais : MM. G. de Kalbermatten, ingénieur ; D. Burgener, architecte.

Rédaction : D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration
de la Société anonyme du Bulletin technique : A. Stucky, ingénieur, président ; M. Bridel ; P. Waltenspuhl, architecte ; R. Neeser, ingénieur.

Tarif des annonces

1/1 page		Fr. 275.—
1/2	»	» 140.—
1/4	»	» 70.—
1/8	»	» 35.—

Annonces Suisses S. A. (ASSA)

Place Bel-Air 2. Tél. 22 33 26
Lausanne et succursales

SOMMAIRE : *Turbines à gaz en circuit fermé munies d'un réacteur nucléaire*, par CH. COLOMBI, ingénieur, professeur honoraire de l'Université de Lausanne. — DIVERS : *75e anniversaire du chemin de fer du Saint-Gothard.* — *Commission pour l'étude du plan d'ensemble du réseau des routes principales.* — BIBLIOGRAPHIE. — Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : *Assemblée générale extraordinaire.* — SERVICE DE PLACEMENT. — DOCUMENTATION GÉNÉRALE. — DOCUMENTATION DU BATIMENT. — NOUVEAUTÉS, INFORMATIONS DIVERSES.

TURBINES A GAZ EN CIRCUIT FERMÉ MUNIES D'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Note relative à certaines propriétés des gaz utilisables

par CH. COLOMBI, ingénieur, professeur honoraire de l'Université de Lausanne

1. Dans une des parties de la seconde édition de notre ouvrage sur les diagrammes enthalpie-potentiel thermodynamique (enthalpie-enthalpie libre) que nous préparons actuellement et qui sera publiée dans quelques mois par la maison Dunod, à Paris, nous avons été amenés à examiner l'influence de la chaleur spécifique et du poids moléculaire de gaz parfaits sur les valeurs des travaux de détente, ou de compression, isothermiques et isentropiques, ainsi que sur certaines données utiles au dimensionnement général des machines dans lesquelles des évolutions tendant vers celles théoriques mentionnées doivent intervenir.

Ces questions présentent un intérêt majeur dès que l'on envisage le cas de turbines à gaz en circuit fermé comme les réalise la maison Escher Wyss S. A., à Zurich et ses licenciés, puisque, en principe, il est possible d'utiliser dans de telles installations un gaz quelconque comme corps actif parcourant l'ensemble du circuit ; leur importance est encore accrue lorsque l'installation dont il s'agit comporte, comme producteur de l'énergie thermique à utiliser, un réacteur nucléaire dont le refroidissement est assuré par le gaz qui évolue dans l'ensemble du circuit.

Une note parue dans le numéro 284 (avril 1957) de la revue *Oil Engine and Gas Turbine* [1] traitant justement de l'application de la turbine à gaz en circuit fermé alimentée par le gaz réfrigérateur d'un réacteur nucléaire, nous incite à détacher de l'ouvrage en cours de préparation cité, les quelques considérations qui suivent au sujet de certaines propriétés thermodynamiques des gaz qui évoluent dans de tels circuits.

[1] *Nuclear G.T. Marine Propulsion Unit; some considerations for a single-loop closed cycle nuclear gas-turbine particularly for merchant ships.* Résumé d'une communication de MM. G. P. GIBLON et G. H. KURZ à la Society of Naval Architects and Marine Engineers à New-York. « Oil Engine and Gas Turbine », n° 284, avril 1957, p. 474-476, 5 fig.

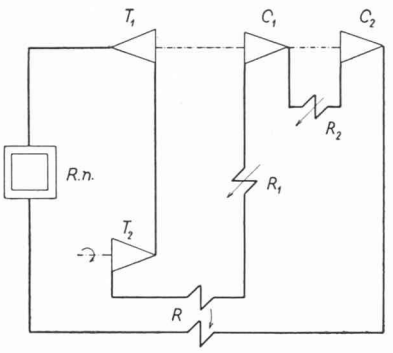

Fig. 1. — Schéma simplifié d'une installation de propulsion navale munie d'un réacteur nucléaire avec circulation de gaz en circuit fermé.

$R.n$ = réacteur nucléaire réfrigéré par le gaz qui circule dans l'ensemble de l'installation. — T_1 = turbine à gaz à haute pression. — T_2 = turbine à gaz à basse pression entraînant, par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse, l'hélice propulsive. — C_1 = compresseur à basse pression. — C_2 = compresseur à haute pression. — R = échangeur récupérateur de chaleur transmettant une partie de la chaleur contenue dans les gaz débités par la turbine de basse pression au fluide livré par le compresseur de haute pression. — R_1 = préréfrigérateur du gaz aspiré par le compresseur de basse pression. — R_2 = réfrigérateur intermédiaire.

Afin de bien fixer les idées, nous avons reproduit à la figure 1 le schéma, grandement simplifié, de l'installation décrite dans l'article mentionné ci-dessus ; cette figure et sa légende sont suffisamment explicites pour que nous puissions nous dispenser de toute explication plus détaillée. Ce schéma est au surplus conforme à celui classique des installations de turbines à gaz en circuit fermé : les seules différences entre les installations usuelles et celle envisagée ici résident en ceci que le réacteur nucléaire prend la place de l'échauffeur d'air et que ce dernier fluide est remplacé par un gaz convenable du point de vue de ses propriétés radio-actives.

Il est évident, en effet, qu'étant donné l'emploi d'un réacteur nucléaire comme générateur d'énergie thermique, les gaz actifs doivent posséder certaines propriétés spéciales non seulement thermodynamiques, thermocinétiques et aérodynamiques, mais encore pour ce qui concerne leurs qualités radio-actives. Ceci étant le nombre des gaz utilisables dans les installations ayant recours à des réacteurs nucléaires est relativement restreint : actuellement on envisage surtout l'emploi de l'hélium (He), celui de l'azote (N_2) ou celui de mélanges convenablement préparés.

2. En ce qui suit, nous nous proposons d'examiner certains aspects exclusivement thermodynamiques du problème du choix d'un gaz pouvant convenir en laissant de côté toutes autres considérations tant thermocinétiques qu'aérodynamiques ou constructives ou, encore, d'exploitation.

Les propriétés thermodynamiques auxquelles nous venons de faire allusion font intervenir dans les calculs le poids moléculaire du gaz (M... kg/kmol) et sa chaleur spécifique molaire sous pression constante $M.c_p$ (kcal/kmol.$^o\Delta t$).

Pour mettre en évidence l'influence de ces deux facteurs sur les travaux fournis ou absorbés par les machines qui interviennent dans la réalisation du circuit et sur certaines valeurs importantes pour le dimensionnement de ces machines, on peut procéder de diverses façons, notamment par des calculs connus de tout thermicien. Il apparaît cependant utile de remplacer ces derniers par des relevés sur graphiques permettant d'arriver aux résultats voulus de façon rapide tout en mettant plus clairement en évidence l'importance du rôle que jouent les deux facteurs mentionnés et leurs variations lorsque l'on considère l'emploi de gaz différents les uns des autres. Ces problèmes ont été traités plus d'une fois sous des aspects divers auxquels nous avons nous-même fait allusion, par exemple dans nos publications de 1946 et 1947 [1] ; dans la seconde de celles citées se trouve même l'ébauche du procédé exposé ci-dessous.

Nous ajoutons encore, toujours pour bien fixer les idées, que les transformations-limite, soit théoriques, qui peuvent être prises en considération sont soit des isothermes, soit des adiabatiques réversibles (isentropiques) : ce sont les seules dont nous nous occuperons ici en évitant de faire intervenir des notions de rendements qui sortiraient du cadre d'une note telle que la présente.

Ceci posé, nous résumons en quelques mots les notions essentielles relatives à l'établissement des diagrammes desquels nous voulons nous servir. Nous avons recours aux relations classiques que voici :

Variation élémentaire de l'enthalpie par kmol :

$$M.di = T.d(M.s) + A.(M.v).dp \qquad (1)$$

Variation élémentaire du potentiel thermodynamique (enthalpie libre) par kmol :

$$M.d\Phi = -(M.s).dT + A.(M.v).dp \qquad (2)$$

Différence (enthalpie liée) par kmol :

$$M.di - M.d\Phi = d(M.s.T). \qquad (3)$$

Dans ces équations, les énergies $M.i$, $M.\Phi$, $M.s.T$ figurent en kcal/kmol ; l'entropie $M.s$ est donnée en kcal/kmol.^oK ; $M \cdot v$ représente le volume occupé par 1 kmol (m^3/kmol) et enfin les pressions sont à compter en kg/m^2 (lorsque l'on fait intervenir des rapports de pressions on compte en ata, soit kg/cm^2).

Les diverses quantités définies par les relations (1) à (3) sont caractérisées par de nombreuses propriétés énergétiques et leurs représentations graphiques par des propriétés géométriques particulières que nous exposons naturellement dans l'ouvrage en cours de préparation, mais dont la connaissance n'est, ici, pas indispensable.

En partant des bases ainsi établies, nous choisissons comme coordonnées orthogonales de notre représentation graphique en abscisses $M.i$ et en ordonnées $M.\Phi$; en outre, nous admettons la même échelle pour ces deux quantités, ce qui conduit à représenter des valeurs constantes de $M.s.T$ par des droites inclinées à 45° par rapport aux axes.

Toutes les quantités définies par (1) à (3) étant des énergies, on peut choisir arbitrairement l'origine du

[1] C. Colombi : *La turbine aérodynamique en circuit fermé (Système Ackeret et Keller)*. « Chaleur et Industrie », Paris, n°s 246, 247 et 248, janvier, février et mars 1946.

C. Colombi : *Le diagramme enthalpie-potentiel thermodynamique généralisé*. « Bulletin technique de la Suisse romande », Lausanne, 4 février 1947.

C. Colombi : *La turbine à gaz en circuit fermé*. Conférence éditée par le Groupement des constructeurs français de turbines à gaz en circuit fermé.

diagramme ; pour des raisons de commodité nous l'admettons telle que

$$M.i = 0\,;\; M.\Phi = 0;\; M.s = 0$$

pour $p = 1{,}0$ ata (kg/cm²) et $t = 0^{o}$C, soit $T = 273{,}15^{o}$ K (dans la plupart des calculs techniques il suffit de compter avec 273° K).

Il est facile de tracer, dans le système coordonné ainsi défini, une isobare fondamentale $p = 1{,}0$ ata ainsi que nous allons le montrer en nous limitant au cas $M.c_p = ct.$

Pour chaque température t différente de zéro, donc $T \neq 273^{o}$ K, arbitrairement choisie on a

$$M.i = M.c_p.(T - 273) = M.c_p.t \qquad (4)$$

en outre

$$M.ds = M.c_p \frac{dT}{T} \text{ donc } \quad M.s = M.c_p.ln \frac{T}{273}$$

ce qui donne

$$M.\Phi = -\left(M.c_p.ln \frac{T}{273}\right)\cdot T + M.c_p(T - 273) \qquad (5)$$

Cette dernière relation ne représente pas autre chose que la fonction $M.\Phi = f(M.i)$ et l'on peut dire que dès qu'elle est connue, l'ensemble du diagramme est défini. Il est, en effet, aisé d'y faire figurer toute isobare désirée, les isothermes étant des droites parallèles à l'axe des $M.\Phi$ et, dans l'hypothèse $M.c_p = ct.$ que nous prenons en considération ici, les isentropiques étant des droites issues d'un pôle dont les coordonnées sont $M.i = -273.M.c_p$ et $M.\Phi = -273.M.c_p$ (nous nous bornons à citer cette propriété des isentropiques que justifient des considérations sortant du cadre de la présente note).

En fait, seul le tracé d'isobares demande un petit calcul. Comme nous considérons des gaz parfaits, un travail isothermique est donné par

$$M.d\Phi = A.(M.v).dp = A.M.R.T.\frac{dp}{p}$$

soit

$$M.\Phi = 1{,}9858.T.ln \frac{p_f}{p_i} \qquad (6)$$

(p_f = pression finale ; p_i = pression initiale)

et, en partant de $p_i = 1{,}0$ ata soit de l'isobare fondamentale

$$M.\Delta\Phi = 1{,}9858.T.ln\, p_f \qquad (7)$$

Dès que l'on a tracé un réseau d'isobares, le diagramme est complet en ce sens que le travail isothermique étant donné par la (7), celui isentropique se déduit par la lecture d'une différence $M.\Delta i$ et toutes autres données utiles par celle des valeurs de $M.i$, $M.\Phi$ et $M.s.T$. Le calcul suivant, relatif à la détermination du travail isentropique n'est donc indiqué qu'à simple titre de vérification de l'exactitude des résultats fournis par des lectures faites sur le diagramme.

Si l'entropie $M.s$ est constante, on a

$$\int_i^f M.di = A.M.\int_i^f v.dp = M.c_p(T_f - T_i)$$

T_f et T_i étant respectivement les températures finale et initiale de la transformation en °K. Mais on sait que

$$\frac{T_f}{T_i} = \left(\frac{p_f}{p_i}\right)^{\frac{M(c_p - c_v)}{Mc_p}} = \left(\frac{p_f}{p_i}\right)^{\frac{1{,}9858}{Mc_p}} \qquad (8)$$

donc pour un rapport des pressions $p_f : p_i$ choisi, le travail cherché est donné par

$$M.\Delta i = M.c_p.\left(1 - \frac{T_i}{T_f}\right)\cdot T_f \qquad (9)$$

ou

$$M.\Delta i = M.c_p.\left(\frac{T_f}{T_i} - 1\right)\cdot T_i \qquad (9a)$$

Il apparaît immédiatement que ce travail dépend de $M.c_p$ tandis que tout travail isothermique est, lui, indépendant de ce facteur.

On remarquera enfin que $M.i$, $M.\Phi$, $M.s.T$ sont proportionnels à $M.c_p$ de sorte que si l'on a établi un diagramme pour un gaz-type pour lequel on a admis une certaine valeur de $M.c_p$, on peut en déduire immédiatement les valeurs correspondantes pour un autre gaz caractérisé par un $M.c_p$ différent.

3. Munis de ces renseignements, nous allons choisir comme gaz-type le fluide avec $M.c_p = 5{,}0$. Ce cas correspond à l'hélium pour lequel il semble bien que l'on puisse admettre que la valeur de $M.c_p$ soit celle indiquée et reste pratiquement constante dans le domaine de températures qui nous intéresse. Nous devons cependant dire que si les renseignements que l'on possède sur le He pour des températures très basses sont fort complets, il n'en est pas de même, à notre connaissance,

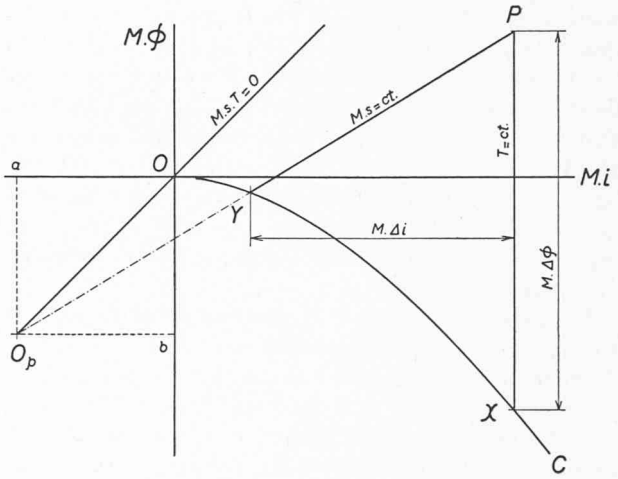

Fig. 2. — Représentation générale d'un diagramme $M.i$-$M.\Phi$.

P = point représentatif de l'état d'un gaz se trouvant à une pression et à une température déterminées. — Segment $P - X$ = correspond à une transformation isothermique ; la différence d'ordonnées entre les points P et X, soit $M.\Delta\Phi$, donne, en kcal/kmol, le travail fourni par la détente isentropique du gaz entre P et X, ce dernier point se trouvant sur la courbe C représentative d'une isobare (p = 1,0 ata). — Segment $P - Y$ = correspond à une transformation isentropique ; la différence d'abscisse entre les points P et Y, soit $M.\Delta i$, donne, en kcal/kmol, le travail fourni par la détente isentropique du gaz entre P et Y. — O_p = pôle pour toutes les droites qui représentent des transformations isentropiques, défini par $O_p - a = O_p - b = -273.M.c_p$ avec $M.c_p$ = chaleur spécifique molaire du gaz (kcal/kmol.Δt).

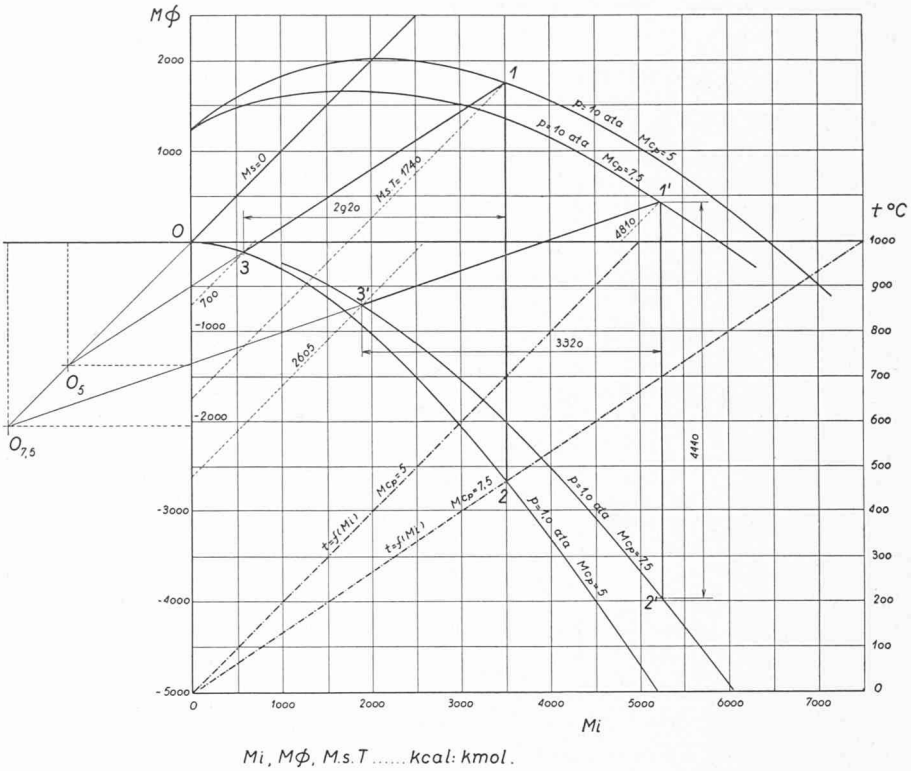

Fig. 3. — Diagramme $M.i$-$M.\Phi$ pourvu des indications relatives aux transformations isothermiques et isentropiques de deux gaz caractérisés notamment par leurs chaleurs spécifiques molaires à pression constante admises respectivement de $M.c_p = 5$ et $M.c_p = 7{,}5$ kcal/kmol. Δt. — Sont représentées les isobares $p = 1{,}0$ ata et $p = 10$ ata pour les deux gaz mentionnés et

1-2 = transformation isothermique pour le gaz $M\ c_p = 5$
1-3 = transformation isentropique pour le gaz $M.c_p = 5$
1'-2' = transformation isothermique pour le gaz $M.c_p = 7{,}5$
1'-3' = transformation isentropique pour le gaz $M.c_p = 7{,}5$

pour des températures élevées [1]. La chose n'a, au surplus, qu'une importance secondaire car, comme on l'a vu, il est toujours possible de tenir compte d'autres valeurs que celle supposée et admise ci-dessus.

Le diagramme schématique de la figure 2 montre la disposition adoptée pour le graphique en cause. Il est pourvu de l'isobare fondamentale $p = 1{,}0$ ata (courbe C) et des indications relatives à une isotherme (détente) partant de l'état représenté par le point P et aboutissant à la pression de 1,0 ata, soit au point représentatif X, ainsi qu'à une isentropique partant également de P et aboutissant à la pression $p = 1{,}0$ ata (point Y). Cette dernière transformation est donnée par une droite passant par le pôle O_p, point commun à toutes les lignes $M.s = ct$. Le travail isothermique est représenté par la longueur, lue à l'échelle des $M\Phi$ ou $M.i$, du segment $M.\Delta\Phi$ et celui isentropique par la longueur du segment $M.\Delta i$.

Au moyen de la figure 3, on a reproduit un diagramme analogue, mais complété par les indications suivantes : Premièrement, la courbe isobare $p = 10$ ata pour le gaz-type $M.c_p = 5$, puis les courbes $p = 1{,}0$ ata et $p = 10$ ata, pour un gaz pour caractériser lequel on a admis $M.c_p = 7{,}5$ kcal/kmol. Δt (valeur qui correspond approximativement à celle de la chaleur spécifique moyenne du N_2 entre 0 et 1000° C). Ces deux courbes sont obtenues comme suit. Pour une valeur choisie de la température (donc aussi pour une valeur déterminée de l'enthalpie puisque $M.i$ dans le cas de gaz parfaits est une fonction de la température seulement), la valeur de $M.i$ pour le cas $M.c_p = 7{,}5$ est égale à celle de $M.i$ pour $M.c_p = 5$ multipliée par le rapport des chaleurs spécifiques, soit $7{,}5 : 5 = 1{,}5$. En conséquence, l'abscisse d'un point tel que (2) multipliée par 1,5 devient l'abscisse du point représentatif (2') correspondant à la même température et à la même pression pour le gaz $M.c_p = 7{,}5$. D'autre part, l'ordonnée du point (2) multipliée par 1,5 devient l'ordonnée du point (2') dont on vient de définir l'abscisse. Le lieu géométrique de points tels que (2') est l'isobare $p = 1{,}0$ ata pour le gaz $M.c_p = 7{,}5$. Une autre paire d'isobares quelconque pour les deux gaz considérés se trouve en reportant depuis les points de la courbe $p = 1{,}0$ ata valable pour chacun de ces gaz, les différences de potentiel thermodynamique calculées d'après l'équation (7). Cette autre paires d'isobares, en l'espèce celle valable pour $p = 10$ ata, est donc donnée par les lieux géométriques des points (1) pour $M.c_p = 5$ et (1') pour $M.c_p = 7{,}5$.

Examinons maintenant, à titre d'exemple, le cas de détentes partant d'états définis par la pression $p = 10$ ata et la température $t = 700°$ C et aboutissant à la pression $p = 1{,}0$ ata.

Pour la détente isothermique du gaz $M.c_p = 5$ on lit au diagramme $M.\Phi_2 - M.\Phi_1 = 4440$ kcal/kmol, valeur que l'on retrouve aussi naturellement pour $M.\Phi_2, - M.\Phi_1$, valable pour le gaz $M.c_p = 7{,}5$.

Les travaux isentropiques s'obtiennent tout aussi facilement. L'isentropique pour le gaz $M.c_p = 5$ est une droite passant par le point (1) et par le pôle $M.i = M.\Phi = -273.M.c_p = -273.5$; elle coupe $p = 1{,}0$ ata en (3). Celle pour le gaz $M.c_p = 7{,}5$ est la droite passant par le point (1') et le pôle $M.i = M.\Phi =$

[1] Le très remarquable ouvrage de M. G. Ribaud, membre de l'Institut : *Constantes thermodynamiques des gaz aux températures élevées* (Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'air, n° 266, Paris, 1952) qui contient un très grand nombre de renseignements des plus intéressants et utiles sur les chaleurs spécifiques de nombreux gaz, ne traite pas spécialement le cas de l'He. L'étude également très fouillée de M. S. W. Akin : *The thermodynamic properties of helium* (Trans. A.S.M.E., août 1950, p. 751-757) ne se réfère pas au domaine des températures qui intéresse les turbines à gaz.

$= -273.7{,}5$ et coupant $p = 1{,}0$ ata en (3'). On lit alors pour les travaux :

pour le gaz $M.c_p = 5$ ... $M.i_3 - M.i_1 =$
$= -2920$ kcal/kmol

pour le gaz $M.c_p = 7{,}5$ ... $M.i_{3'} - M.i_{1'} =$
$= -3520$ kcal/kmol.

En indiquant les différences d'enthalpie et celles de potentiel thermodynamique que l'on vient de déterminer respectivement par $M.\Delta i$ et $M.\Delta\Phi$ on peut écrire pour les rapports entre les travaux isentropiques et les travaux isothermiques :

dans le cas du gaz $M.c_p = 5$

$$\frac{M.\Delta i}{M.\Delta\Phi} = \frac{2920}{4440} = 0{,}658$$

dans le cas du gaz $M.c_p = 7{,}5$

$$\frac{M.\Delta i}{M.\Delta\Phi} = \frac{3320}{4440} = 0{,}748.$$

On peut conclure de cette comparaison que si, dans les conditions de fonctionnement admises, on veut, par une para-isotherme, soit par une suite de transformations isentropiques suivies d'apports de chaleur isobares, se rapprocher de la transformation la plus favorable (l'isothermique) on aboutirait, lors de l'emploi d'un gaz à faible chaleur spécifique, à une fourniture de travail par kmol moins élevée que lors de l'utilisation d'un gaz à forte chaleur spécifique. Ceci, bien entendu, en supposant toutes choses égales (en particulier, dans la réalité, un même rendement des machines dans les deux cas) et au seul point de vue thermodynamique, soit sans tenir compte d'autres facteurs qui, en pratique, peuvent être déterminants. Malgré ces restrictions, l'indication générale ainsi fournie n'en est pas moins intéressante et utile.

L'influence de $M.c_p$ se manifeste encore sous d'autres aspects. Dans le cas de la transformation-limite isothermique, le débit-masse par unité de travail est donné par 860 : $M.\Delta\Phi$ kmol/kWh, mais comme $M.\Delta\Phi$ a la même valeur pour un rapport de pressions donné et pour une température également donnée, quel que soit le gaz utilisé, on en déduit que le débit susdit est le même pour tous les gaz parfaits. En d'autres mots, le débit en kmol/kWh pour des conditions de fonctionnement identiques et pour une transformation isothermique ne dépend pas de la nature du gaz utilisé. Il en est de même pour le débit en kmol par unité de temps pour une puissance déterminée livrée par une turbine qui serait le siège d'une transformation isothermique (infinité de réchauffages intermédiaires). En effet, ce débit vaut, la puissance fournie étant de N kW :

$$0{,}23889 \cdot \frac{N}{M.\Delta\Phi} \text{ kmol/sec.}$$

La question se présente autrement si l'on considère le cas-limite d'une transformation isentropique, car alors le débit par unité de travail est donné par :

$$\frac{860}{M.\Delta i} = \frac{860}{M.c_p.(T_f/T_i - 1).T_i} \text{ kmol/kWh.}$$

Soit pour un rapport de pressions et une température initiale donnés, la consommation en kmol/kWh est inversement proportionnelle à la chaleur spécifique $M.c_p$. Naturellement, le débit par unité de temps présente la même caractéristique. Ce sont là, au surplus, des conséquences du fait que les deux formes de transformations-limite envisagées sont foncièrement différentes et se traduisent par des expressions algébriques pour les travaux de même foncièrement différentes. Il n'en reste pas moins que, dans chaque cas repéré au diagramme $M.i$-$M.\Phi$ on obtient les résultats désirés par de simples lectures de longueurs ou déterminations de différences de cotes, quels que soient les rapports de pression et les températures en jeu.

4. L'influence de la chaleur spécifique étant ainsi mise en évidence, une brève remarque est utile en ce qui concerne celle du poids moléculaire.

On sait que le rendement d'un ailettage de turbomachine peut être exprimé en fonction d'une valeur caractéristique, le chiffre de Parsons, respectivement le coefficient manométrique de Rateau. Sous forme adimensionnelle, le chiffre de Parsons vaut, par définition :

$$Pa = \frac{\Sigma u^2}{8378.E}$$

avec Σu^2 = somme des carrés des vitesses périphériques (aux diamètres moyens de coutume) de tous les éléments mobiles de la turbo-machine ; E = énergie disponible en kcal par unité de masse choisie.

Dans le cas d'une détente isothermique, on aura donc :

$$Pa = \frac{M.\Sigma u^2}{3878.M.\Delta\Phi}.$$

Comme $M.\Delta\Phi$ a même valeur pour une même température et un même rapport de pressions quel que soit le gaz utilisé, il résulte :

$$M.\Sigma u^2 = 8378.Pa.M.\Delta\Phi$$

c'est-à-dire que, dans les conditions déjà spécifiées plus d'une fois, le produit du poids moléculaire par la somme des carrés des vitesses circonférentielles ne varie pas avec le gaz utilisé. En revanche :

$$\Sigma u^2 = \frac{8378.Pa.M.\Delta\Phi}{M} \qquad (10)$$

qui définit une donnée essentielle au point de vue constructif est inversement proportionnel au poids moléculaire M.

Ainsi, toujours pour le cas-limite $T = ct$, en admettant $M = 4$ pour le gaz avec $M.c_p = 5$ et $M = 28$ pour le gaz avec $M.c_p = 7{,}5$ ce qui, nous répétons, correspond aux cas de l'He et du N_2, avec une approximation suffisante pour les buts que nous poursuivons ici, en désignant par Σu_5^2 et par $\Sigma u_{7,5}^2$ les sommes des carrés des vitesses circonférentielles dans les deux cas pris en considération, on a :

$$\frac{\Sigma}{\Sigma}\frac{u_5^2}{u_{7,5}^2} = \frac{28}{4} = 7.$$

Pour le cas de la transformation isentropique, un calcul analogue conduit aux résultats suivants :

$$Pa = \frac{M.\Sigma u^2}{8378\,.\,M\,.\,\Delta i}$$

d'où, en remplaçant $M.\Delta i$ par sa valeur selon la relation (9a) et en résolvant par rapport à Σu^2 :

$$\Sigma u^2 = 8378.Pa.\left(\frac{T_f}{T_i} - 1\right).T_i.\frac{M.c_p}{M} \qquad (11)$$

ou, compte tenu de la (8) :

$$\Sigma u^2 = 8378.Pa.\left\{\left(\frac{p_f}{p_i}\right)^{\frac{1,9858}{Mc_p}} - 1\right\}.T_i.\frac{Mc_p}{M}.$$

L'influence de $M.c_p$ est donc ici manifeste.

Les températures initiale et finale des transformations isentropiques se lisent directement au diagramme. Dans le cas de l'exemple auquel se réfère la figure 3, elles valent respectivement :

Avec $M.c_p = 5$ $\quad T_i = T_1 = 700 + 273 = 973^o\ K$
$\quad T_f = T_3 = 115 + 273 = 388^o$ K

d'où :

$$T_f : T_i = T_3 : T_1 = 0,399.$$

Avec $M.c_p = 7,5$ $\quad T_i = T_1 = 973^o$ K
$\quad T_f = T_{3'} = 252 + 273 = 525^o$ K

d'où :

$$T_f : T_i = T_{3'} : T_1 = 0,538.$$

Les valeurs notées introduites dans les relations (10) et (11) donnent :

Avec $M.c_p = 5$ et $M = 4$ $\quad \Sigma u^2 = 6295.Pa$
Avec $M.c_p = 7,5$ et $M = 28$ $\quad \Sigma u^2 = 1037.Pa$

et le rapport entre ces deux valeurs est :

$$\frac{\Sigma u_5^2}{\Sigma u_{7,5}^2} = 6,07.$$

Ce rapport se retrouve à très peu de chose près (écarts de lectures) en multipliant celui trouvé pour le cas de la transformation isothermique par le quotient des deux chiffres qui expriment à leur tour les rapports entre les travaux isentropiques et isothermiques.

5. Ces comparaisons nous conduisent tout naturellement à examiner la question de l'exactitude que l'on atteint en utilisant les données déduites de lectures faites sur le diagramme $M.i$-$M.\Phi$. Jusqu'à maintenant, nous avons fait usage exclusivement de valeurs lues au diagramme de la figure 3, dont l'original a été tracé à l'échelle de 50 mm pour 1000 kcal/kmol. En guise de contrôle, les calculs que nous résumons ci-dessous ont été effectués et leurs résultats comparés aux lectures correspondantes.

a) Travail isothermique avec $T_i = 973^o$ K

$M.\Delta\Phi = -1,9858.973.2,3026 = -4449$ kcal/kmol
Lecture $= -4440$ kcal/kmol

b) Températures finales des isentropiques :

Avec $M.c_p = 5$

$\frac{T_i}{T_f} = 10^{0,39716} = 2,498 \qquad T_f = 389,6^o$ K
$t_f = 116,6^o$ C
Lecture ..... 115° C

Avec $M.c_p = 7,5$

$\frac{T_i}{T_f} = 10^{0,26477} = 1,840 \qquad T_f = 529^o$ K
$t_f = 256^o$ C
Lecture ..... 252° C

c) Travail isentropique :

Avec $M.c_p = 5$

$M.\Delta i = 5.1,498.389,6 = 2918$ kcal/kmol
Lecture..... 2920 »

Avec $M.c_p = 7,5$

$M.\Delta i = 7,5.0,840.529 = 3333$ »
Lecture..... 3320 »

On peut dire en conclusion pour ce qui concerne la représentation graphique utilisée que les indications fournies par le diagramme sont d'une exactitude largement suffisante pour les calculs techniques, même lorsque l'échelle choisie est relativement faible. Mais, comme toute représentation graphique convenable, le diagramme tracé rend particulièrement évidentes les caractéristiques et les particularités de chaque type de transformation par les propriétés de la ligne qui le représente. Il a en outre l'avantage de faire figurer comme données fondamentales des quantités d'énergie sous une forme très générale, ce qui permet la solution de nombreux problèmes autres que ceux dont nous venons de nous entretenir.

D'autre part, et pour ce qui concerne plus spécialement les calculs exposés, on peut dire que les résultats obtenus sur la base de lectures faites au diagramme $M.i$-$M.\Phi$ confirment que l'utilisation de gaz à chaleur spécifique molaire et à poids moléculaire élevés dans les turbo-machines d'une turbine à gaz en circuit fermé présente des avantages sur celui de gaz à faible poids moléculaire et à faible chaleur spécifique molaire. Tel est le cas pour le N_2 si on le compare, par exemple, au He. Bien entendu, d'autres considérations interviennent lorsque l'on veut aboutir à une appréciation et à un choix définitif du fluide à employer qui peut être un mélange de gaz divers : leur examen excède cependant les limites de la présente note.