

l'ingénieur

Septembre / Octobre 1987

N° 381

73^e année

le gaz



Le système Octolume

Pleins feux sur l'éclairage de demain.

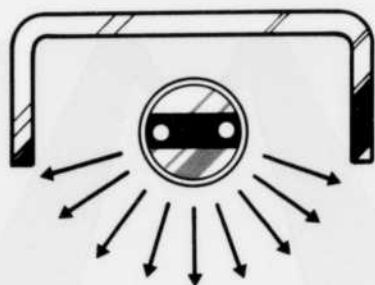
Lissu d'une technologie d'avant-garde, le système fluorescent Octolume offre qualité d'éclairage supérieure et maximum de rendement sous forme d'une lampe mince et efficace.

Économie d'énergie, rendement supérieur et couleurs plus éclatantes... pas question de lésiner sur l'efficacité.

Conçu et mis au point par Philips, le système Octolume ne représente que l'un des nombreux produits révolutionnaires qui prouvent la suprématie de Philips dans le monde en matière d'éclairage.

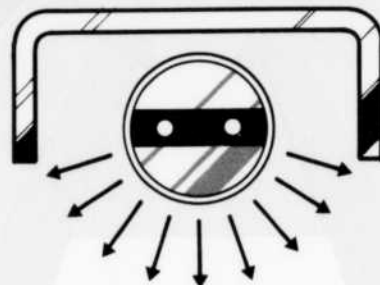


L'éclairage avec les lampes fluorescentes au tri-phosphore donne plus d'éclat aux couleurs, donc un meilleur teint à vos employés. Les gens se sentent mieux tout simplement parce qu'ils paraissent mieux. Résultat, la productivité augmente.



OCTOLUME

Comparativement aux lampes traditionnelles CW et WW, le système Octolume (avec un gain d'efficacité de 90 % et une luminosité accrue de 5 %) permet une économie d'énergie de plus de 10 %.



Pour en savoir davantage au sujet du système Octolume, ou d'un autre de nos excellents produits, composez le 416-292-5161, ou faites parvenir votre demande à: Philips, 601, avenue Milner, Scarborough (Ontario) M1B 1M8.



L'éclairer du monde



Division
Éclairage

PHILIPS

Sommaire

Éditeur

Les publications l'ingénieur inc.
Case postale 6980, succursale A
Montréal (Québec) H3C 3L4
Tél. : (514) 340-4764

Conseil d'administration

Paul Major, président
Paul Hébert, vice-président

Comité exécutif

Guy Drouin, président exécutif
Jacques Lapointe, vice-président
Jean L. Corneille, vice-président
Serge R. Tison, secrétaire
Gilles G. Bélanger, trésorier
Yolande Gingras, directeur général

Administrateurs

Adolphe Blach
Claude Brulotte
Roland Chevalier
Gilles Delisle
Fernand DeSerres
Yvon Gariepy
Roger P. Langlois
Eméric G. Léonard
Roger Lessard
Ovide J. Poitras
Diane Rousseau
Serge Saulnier
Guy A. Sicotte
Jean-Claude Therrien

Directeur général

Yolande Gingras

Comité consultatif de rédaction

Gilles G. Bélanger, directeur
Joseph A. Bouchard
Dominique Chassé
Pierre Desrochers
Claude Gou
Jacques Lapointe
Raymond LerouxYves Lizotte
Paul-Édouard Robert
Georges Salloum

Rédacteur en chef

Joseph Kélada

Publicité

Robert Dumouchel
Publications R.A.D. enr.
605 rue Filatrault
Suite 6
Saint-Laurent, (Québec) H4L 3V3
Tél. : (514) 744-6019

Composition

Les Ateliers Chiora inc.
(514) 383-4320

Imprimeur

Groupe d'imprimerie
INTER-MARK Inc.
(514) 526-3381

Abonnements

Canada 15 \$ par année
Étranger 20 \$ par année
À l'unité 3 \$
Six (6) numéros par année

Droits d'auteurs

Les auteurs des articles publiés dans l'INGÉNIEUR conservent l'entière responsabilité des théories et des opinions émises par eux. Reproduction permise, avec mention de la source: on voudra bien cependant faire tenir à la Rédaction un exemplaire de la publication dans laquelle paraîtront les articles. Engineering Index, Biol., Che., Sci., Abstracts, Periodex et Radar signalent les articles publiés dans l'INGÉNIEUR — ISSN — 0020-1138 — Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Canada — Bibliothèque nationale du Québec

Courrier de deuxième classe

Enregistrement n° 5788

2 Ce numéro sur le gaz naturel...

par Michel Gou

**3 Dans l'histoire de l'énergie
La combustion et l'évolution
des brûleurs**

par Roland Kissel

**7 Conception de système
de chauffage à haute efficacité**

par Roland Francœur

**13 Utilisation du gaz naturel dans
les industries agro-alimentaires**

par François Rapeau

**21 Le chauffage des bains industriels
et la combustion submergée**

par François Cagnon

**25 Industrie chimique
et pétrochimique
Le gaz naturel, matière première**

par Kébir Ratnani

**27 Commande électronique
d'injection de gaz naturel dans
les moteurs à combustion interne**

par M. Gou, C. Guernier, B. Detuncq, M. Perrault et G. Allard

Photo couverture: gracieuseté Gaz Métropolitain

Ce numéro sur le gaz naturel...

L'Énergie, les carburants, les sources conventionnelles, les sources alternatives, les économies, les nouveaux procédés, autant de mots-clés qui ne faisaient pas partie de notre vocabulaire il y a encore si peu de temps. Dans le «bon vieux temps», l'énergie était disponible en abondance, pas chère: on la gaspillait. Aujourd'hui, les coûts élevés, et j'ose espérer le développement d'une conscience sociale, nous obligent à étudier toutes les possibilités avant de faire un choix rationnel.

Le gaz naturel, dont les ressources canadiennes sont très importantes, a su se tailler une place de choix dans la plupart des domaines: utilisé comme carburant, comme combustible ou comme matière première, il offre une alternative non seulement viable mais souvent économique.

Même si ce numéro ne peut présenter tous les aspects des technologies gazières, il ouvre certainement une fenêtre sur diverses utilisations possibles.

Tout d'abord, M. Roland Kissel retrace *le développement des brûleurs* et l'étude de la combustion du gaz naturel. D'empirique au début du siècle, elle a atteint un niveau technique permettant une amélioration significative de la productivité, du rendement thermique et de la qualité des produits.

M. Roland Francœur nous présente ensuite *les systèmes de chauffage à haute efficacité*. Ces systèmes à condensation, commerciaux ou résidentiels, permettent d'atteindre des rendements allant jusqu'à 97%. Plus coûteux que les appareils classiques, une étude attentive des besoins énergétiques permet souvent de minimiser les investissements.

M. François Rapeau décrit ensuite *les techniques de chauffage des liquides* et présente plusieurs exemples de réalisation tandis que M. François Cagnon décrit *la combustion submergée* et discute des avantages et des inconvénients de cette technique relativement nouvelle.

Principalement connu comme combustible, le gaz naturel est aussi utilisé comme matière première et M. Kébir Ratnani examine donc certaines applications possibles dont *la production d'ammoniac et de méthanol*.

Aussi utilisé comme carburant, MM. Gou, Guernier et al. présentent le développement d'un *système d'injection à commande électronique*.

Utilisé à toutes les sauces, le gaz naturel pourra-t-il remplacer nos ressources conventionnelles d'énergie en diminution?

Michel GOU, coordonnateur

Dans l'histoire de l'énergie La combustion et l'évolution des brûleurs

Roland Kissel

La découverte en France du gaz de Lacq conduisit Gaz de France à créer, vers 1960, le groupe d'Études des Flamme de Gaz Naturel, les retombées ont été très rapides dans les milieux industriels intéressés par ces recherches, et en particulier dans les domaines de grande consommation: sidérurgie, grandes centrales thermiques, industrie du ciment, mais beaucoup plus lentes dans les petites puissances.

Durant cette période, les systèmes de combustion se sont trouvés modifiés de façon considérable: l'application des lois sur la combustion provoqua une véritable révolution: le brûleur et la chambre de combustion, grâce aux lois de similitude de Thring (2) et de Curtet (3) constituaient un ensemble aérodynamiquement et thermiquement indissociable.

Du coup, le bon «brûleur» n'existe plus, il n'y a que de bons systèmes de combustion, de bonnes associations «brûleur — chambre de combustion».

D'une façon globale, les nouveaux fours permettent des chauffages très homogènes des produits, et ceci exige des grandes vitesses des fluides à leur sortie des dispositifs de combustion. De vieux tabous tombent: la sacro-sainte luminosité des flammes se montre néfaste dans de nombreux cas. Non seulement il faut savoir élaborer de bons systèmes, mais il faut les adapter aux produits à chauffer.

Dans tout ceci, le gaz naturel, longtemps critiqué à cause de ses flammes claires, qui ne rayonnent que grâce à CO_2 et à H_2O , retrouve la faveur: cette «non luminosité» devient un facteur d'homogénéité des échanges sans compromettre de façon sensible les rendements. Les gaz combustibles se mélangent généralement plus facilement à l'air de combustion que les li-

quides qui doivent s'évaporer; parmi les gaz combustibles, le gaz naturel est celui qui contient le moins de carbone et dont la combustion ne s'accompagne qu'exceptionnellement d'une formation de carbone-suie. Pour donner des fumées propres, il nécessite moins d'excès d'air. Ne contenant pratiquement pas de soufre, il abîme moins les réfractaires et pollue moins ce qu'il chauffe. Il est possible de condenser l'eau de ses fumées et d'en récupérer la chaleur latente sans précautions particulières.

C'est ainsi que le gaz naturel se retrouve, naturellement, le combustible privilégié pour le chauffage, le traitement, le séchage des produits délicats: aciers, produits céramiques, porcelaine, aliments, air. Au Canada, il existe en abondance, son approvisionnement est sûr, c'est donc également le combustible des productions de masse.

Actuellement, l'évolution de son bon emploi n'est pas terminée. Des progrès importants restent encore à faire dans les ensembles fours — systèmes de combustion. Les optimisations manquent souvent, les performances des brûleurs s'améliorent sans cesse grâce aux nouveaux réfractaires, à l'acquisition de nouvelles connaissances sur les jets et leurs interactions. La mini-informatique permet d'automatiser des unités de puissance de plus en plus faibles. Les limites d'utilisation de nouveaux dispositifs sont à établir avec précision: c'est le cas du chauffage par impulsions (pulse firing), qui doit améliorer encore l'homogénéité, ou de nouveaux dispositifs de récupération modulaire d'énergie sur les fumées, comme l'auto-récupération ou la régénération.

La recirculation: phénomène essentiel dans les foyers

Pour bien comprendre le couplage des brûleurs et de leur chambre de combustion, il faut revenir sur le phénomène de la recirculation. Quand un combustible est injecté dans un four, il se produit un jet qui aspire tout ce qui est autour de lui: d'abord l'air de combustion qui lui est fourni, puis les

fumées qu'il puise dans la partie située en aval. Il se forme ainsi un courant de recirculation qui ramène des fumées chaudes dans la partie initiale du jet. Ceci a pour effet:

- d'apporter au mélange combustible — comburant la chaleur qui lui est nécessaire pour atteindre la température de combustion;
- de diluer le jet avec des fumées et ainsi d'uniformiser la température des gaz de la flamme;
- d'accroître la macro-turbulence et ainsi de participer à l'accomplissement de la combustion.

Suivant que l'air est amené à faible vitesse ou à vitesse élevée, les phénomènes de recirculation affectent de façon différente le mélange air-combustible.

D'une façon globale, le taux de recirculation, $\gamma = \text{MR}/\text{Mt}$, égal au rapport du débit maximal recirculé MR et du débit total Mt entrant dans le four (combustible — air) est d'après THRING (2) et Curtet (3):

$$\gamma = 0,43 \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_b}} \times \sqrt{\frac{S_f}{S_b}} - 0,71$$

expression dans laquelle ρ_f et ρ_b sont les masses volumiques respectives des fumées et du fluide sortant du brûleur, S_f et S_b sont les sections droites du four et de l'orifice du brûleur. Les caractéristiques du brûleur (ρ_b et S_b) représentent des grandeurs pondérées tenant compte des fluides (air et combustible) et de la quantité de mouvement totale.

Pour un four donné, effectuant une opération donnée (ρ_f/ρ_b donné), le taux de recirculation ne dépend que de $\sqrt{S_f/S_b}$ qui est un paramètre de construction: c'est la relation d'association brûleur — four.

Quand on accroît γ , l'inflammation du combustible est accélérée, le jet est dilué et l'homogénéité de l'ensemble est améliorée. Pour obtenir ce résultat, il est possible d'avoir une surface de four S_f importante mais cela coûte cher et introduit des phénomènes parasites. La diminution de S_b et par conséquent l'augmentation de la vitesse des fluides à leur sortie du brûleur est donc une excellente solution qui a également ses limites (accroissement des gradients de pression statique — érosion). Il faut trouver le compromis pour chaque cas.

Monsieur Roland Kissel est diplômé de l'École Centrale des Arts et Manufactures de Paris.

Il est professeur invité à l'École Polytechnique de Montréal, Coordonnateur des technologies gazières et Consultant Scientifique chez Gaz Métropolitain, inc.

Évolution des brûleurs

La recherche de l'influence bénéfique des grandes quantités de mouvement, synonyme d'augmentation des vitesses des combustibles et de l'air à leur arrivée dans les chambres de combustion, s'est heurtée à deux difficultés: (1) l'instabilité des flammes (soufflage) et (2) la tenue des matériaux réfractaires soumis à de plus fortes températures et de «remontée» à grande vitesse d'impuretés provenant de la charge.

L'évolution industrielle des brûleurs a ainsi suivi celle des matériaux. Elle s'est faite en même temps que les puissances unitaires diminueaient et que la température des fours concernés était de plus en plus faible. Dans l'ordre chronologique, se sont ainsi succédés:

- l'accroissement du produit (pression \times section de sortie) dans les brûleurs à injection utilisés dans les fours à haute température;
- l'augmentation de la vitesse du combustible et de l'air: brûleurs à ouvreaux;
- l'augmentation de la vitesse des gaz en combustion: brûleurs à chambres de précombustion.

Nous ne parlerons pas ici de l'évolution de la qualité des réfractaires ni de leur mise en forme, mais seulement de la stabilisation des flammes et des principaux types de brûleurs.

Stabilisation des flammes

D'une façon très globale, la stabilité des flammes demande d'autant plus d'énergie que les quantités de mouvement spécifiques (exprimées en Newton par Megawatt) mises en jeu sont grandes et que les températures des fours sont faibles.

Quand la stabilisation ne peut pas être obtenue «naturellement», il est indispensable d'apporter de l'énergie «à la racine» du jet pour porter combustible et comburant à la température d'inflammation. Ceci peut être obtenu de différentes façons:

- par un brûleur auxiliaire appelé brûleur pilote;
- par un petit diffuseur annulaire;
- par un disque provoquant une perturbation dans laquelle une combustion stable se produit et «nourrit» le jet principal;
- par un ouvreau en matériau réfractaire qui participe à l'inflam-

mation par sa température en y localisant la recirculation.

En fait, l'opportunité d'utiliser un certain dispositif de stabilisation seul ou en combinaison avec un autre, constitue le savoir-faire des constructeurs de brûleurs.

Brûleurs à injections

Ce sont les brûleurs types des fours à bassin fonctionnant à haute température (dépassant 1500°C) pour la fusion de l'acier et du verre. Nous avons vu que, dans ce cas, le jet aspire d'abord l'air, puis les fumées recirculées. Ceci est théorique; en fait, dès le début du four, il y a interpénétration et mélange des deux courants. Ce mélange de fumées chaudes et d'air apporte l'énergie nécessaire à l'inflammation qui est ainsi entretenue sans problème.

C'est la bonne adaptation de ce type de brûleur, très simple, aux fours Siemens-Martin qui a permis de faire la première démonstration industrielle de la validité des lois de la combustion. Les brûleurs existants étaient simplifiés en même temps que les valeurs des quantités de mouvement spécifiques étaient ajustées avec soin aux différentes phases du procédé (fusion, affinage). Ainsi, les premiers résultats dans les fours de fusion d'acier furent spectaculaires: diminution des temps de fusion de 20 à 30%, augmentation de productivité de 10 à 20%.

Brûleurs à ouvreaux

Les brûleurs à ouvreaux ont été utilisés dans l'industrie pratiquement au moment de l'arrivée des combustibles liquides et gazeux. Bien qu'apparemment similaires, les brûleurs modernes en sont très différents. En effet, l'apparition des disques de stabilisation en matériaux réfractaires (baffles), souvent percés d'orifices plus ou moins convergents ou inclinés sur l'axe pour donner une composante rotationnelle à l'air, change totalement les caractéristiques des flammes. Les vitesses d'air atteignent souvent 80 m/s quand il est froid et 120 m/s quand il est chaud et leurs valeurs peut facilement être ajustées aux

fours par un bon dimensionnement du disque (figure 1a).

Ces brûleurs sont utilisés dans tous les fours industriels demandant de grandes puissances, une bonne tenue au feu et aux impuretés nocives pour les réfractaires (réchauffage de l'acier avant laminage, fusion de l'aluminium).

Nous avons vu que le taux de recirculation est directement lié à la section de passage des fluides à leur entrée dans le four. En fait, dans le cas des brûleurs à ouvreaux, il y a entre 20 à 30% de la quantité de mouvement qui sont perdus par le disque de stabilisation (traînée) et la recirculation dans l'ouvreau.

Le réglage de la température des fours conduit souvent à des réductions de puissance très élevées par rapport à la puissance nominale. Ceci entraîne une diminution du débit d'air. Il est alors intéressant de profiter de la capacité du ventilateur pour augmenter la valeur de la vitesse en diminuant la section libre de passage de l'air. La figure 1b représente un tel dispositif dans lequel l'air arrive par deux canalisations, chacune munie d'une vanne, qui libère l'une ou l'autre arrivée de l'air ou les deux. Ce dispositif d'ajustement des longueurs de flamme aux variations de marche des fours, a permis d'améliorer de façon sensible la qualité du réchauffage, surtout dans les fours fixes. Dans les fours pits, les différences de température entre différents points d'une même charge sont passées de plus de 60°C à moins de 20°C (sur environ 1250°C).

Le dernier exemple de brûleur avec ouvreau est celui des flammes murales. Ces brûleurs permettent d'appliquer la puissance par rayonnement là où l'on veut, suivant les conditions de marche des fours. La figure 1c représente le schéma d'un tel brûleur. Dans ce genre de flamme, la recirculation se fait vers le centre et les mesures qui ont été faites sur les taux de recirculation ainsi obtenus ont fait ressortir des valeurs du débit recirculé égales à 2, 3 et même 4 fois le débit primaire. Ces brûleurs peuvent être considérés comme des mélanges sans atmosphère très efficaces sans aucune composante axiale de vitesse et par conséquent sans aucun accroissement de pression

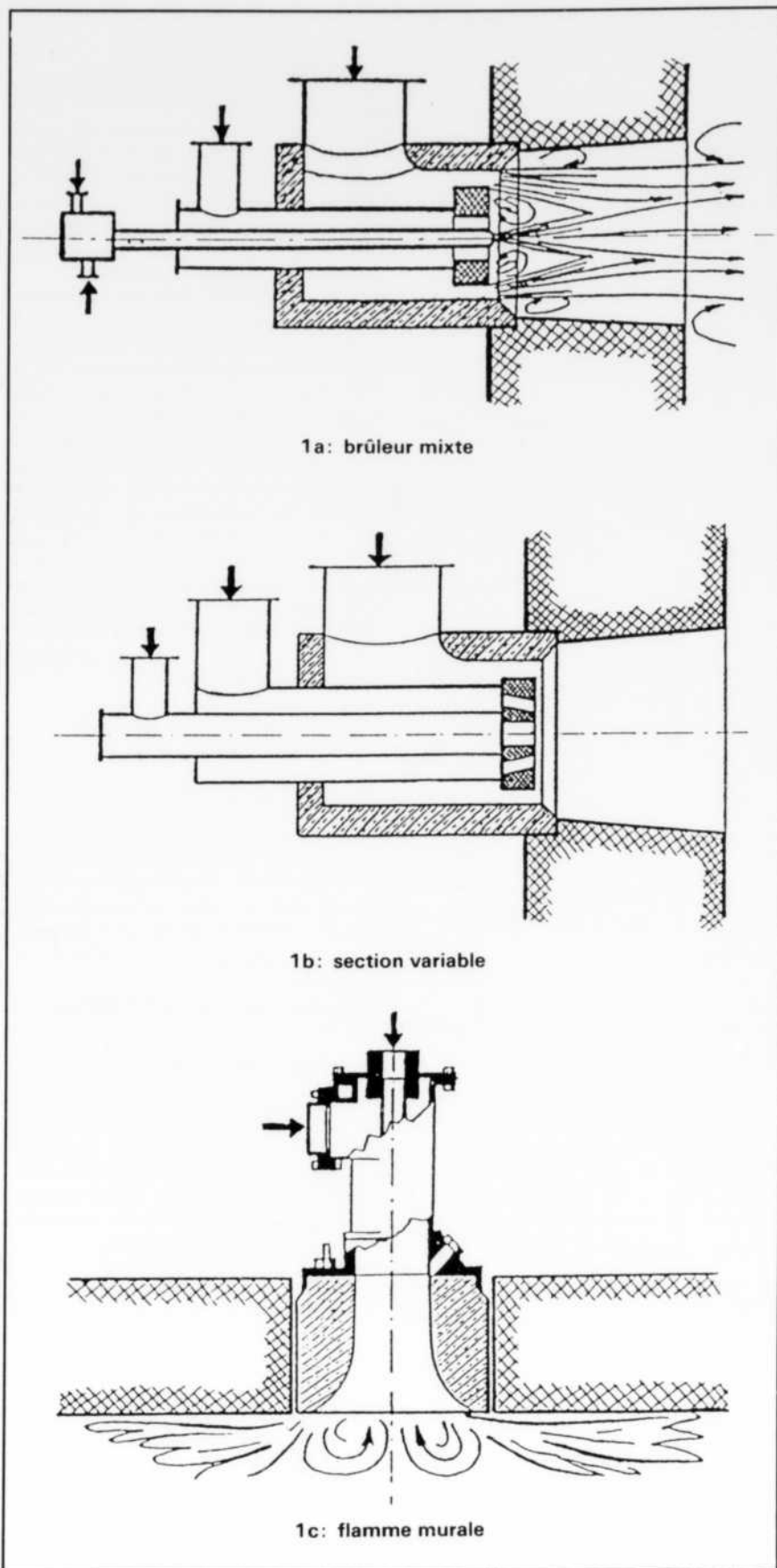


Figure 1 Brûleurs à ouverture

statique dans les fours: ce sont les brûleurs pour chauffages précis et puissants de produits répartis sur une sole. Malheureusement, ils ne peuvent pas assurer le réchauffage inférieur.

Brûleurs à chambre de précombustion

Dans le cas précédent, la combustion n'était qu'amorcée à l'intérieur de l'ouverture. Il peut être intéressant de s'arranger pour qu'elle s'y développe davantage. La pression nécessaire pour donner aux gaz une vitesse donnée étant inversement proportionnelle à la température absolue de ces derniers, il est possible d'obtenir des grandes vitesses sans avoir besoin d'une pression importante. C'est ce qui permet de faire les brûleurs à chambre de précombustion semi-intensifs ou intensifs.

Brûleurs semi-intensifs

Un tel brûleur a une longueur d'ouverture relativement longue par rapport à son diamètre (figure 2a). La disposition des orifices d'arrivée de l'air et du gaz favorise leur mélange et l'inflammation se stabilise bien à l'intérieur du tunnel.

De tels brûleurs sans rétreint permettent d'atteindre sans difficulté des vitesses d'éjection de gaz à 1100° — 1200° C de l'ordre de 60 à 70 m/s. Avec un rétreint (figure 2b), il est possible d'atteindre des valeurs de l'ordre de 80 m/s.

Brûleurs intensifs

Dans les brûleurs intensifs (figures 2c et 2d), le mélange du gaz et de l'air à l'intérieur du système est amélioré par un dispositif de rotation intensive de l'air. Les fumées produites sont le résultat d'une combustion terminée à plus de 80% et les vitesses d'éjection dépassent couramment 120 m/s et peuvent même atteindre plus de 150 m/s. Bien que ces brûleurs soient très bruyants à l'extérieur des fours, ils peuvent être utilisés avec profit dans des enceintes de combustion qui amortissent en général bien ce bruit.

Les brûleurs semi-intensifs et intensifs ont leurs ouvertures sous pression et ceci a limité pendant longtemps leur utilisation. On n'arrivait pas, en effet, à obtenir des

ouvreaux suffisamment étanches pour « contenir » les fumées à haute température sous pression et, par conséquent, le matériel se dégradait très rapidement.

Quelques résultats industriels

En aciérie, nous l'avons dit [1], l'amélioration de productivité de plus de 10% des fours Siemens-Martin dans le monde entier a constitué la première application industrielle de la science des flammes. Dans les fours pits, dans les fours de réchauffage d'acier: amélioration de l'homogénéité, économie de consommation, diminution des excès d'air, gains sur l'oxydation (diminuée de 2 à 5% à 1,5% et même moins).

Dans les fours de traitement thermique, amélioration de l'homogénéité de température donc amélioration des qualités de traitement. Dans les fours de fusion d'aluminium, diminution de la vitesse de fusion et de l'oxydation. Dans les fours à porcelaine, augmentation de production de plus du double avec diminution des rebuts de 30% à moins de 5%.

La liste actuelle est très longue. Elle s'allongera encore avec la mise au point des matériels existants et l'application des nouvelles connaissances à toutes les technologies gazières: c'est tout le domaine des petites puissances qui devrait maintenant en être le grand bénéficiaire.

l'ingénieur

Références

1. KISSEL, R., Contribution à l'étude des poussées de réaction aux brûleurs sur la production des fours Martin. Commission des Acieries Martin, 28-29 octobre 1957. C.I.T. n° 10, octobre 1958, 2081.
2. THRING, M. W. et NEWBY, M. P., Combustion length of enclosed turbulent jet flames, Fourth International Symposium on Combustion, Baltimore, 1953. Williams and Wilkins, p. 789.
3. CURTET, R. Sur l'écoulement d'un jet entre parois. *Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air*, n° 359. Paris, 1960.
4. ASSOCIATION TECHNIQUE DE L'INDUSTRIE DU GAZ EN FRANCE. *Calcul, conception et utilisation des brûleurs industriels à gaz*. Paris, l'Association, 1983, 321 p.

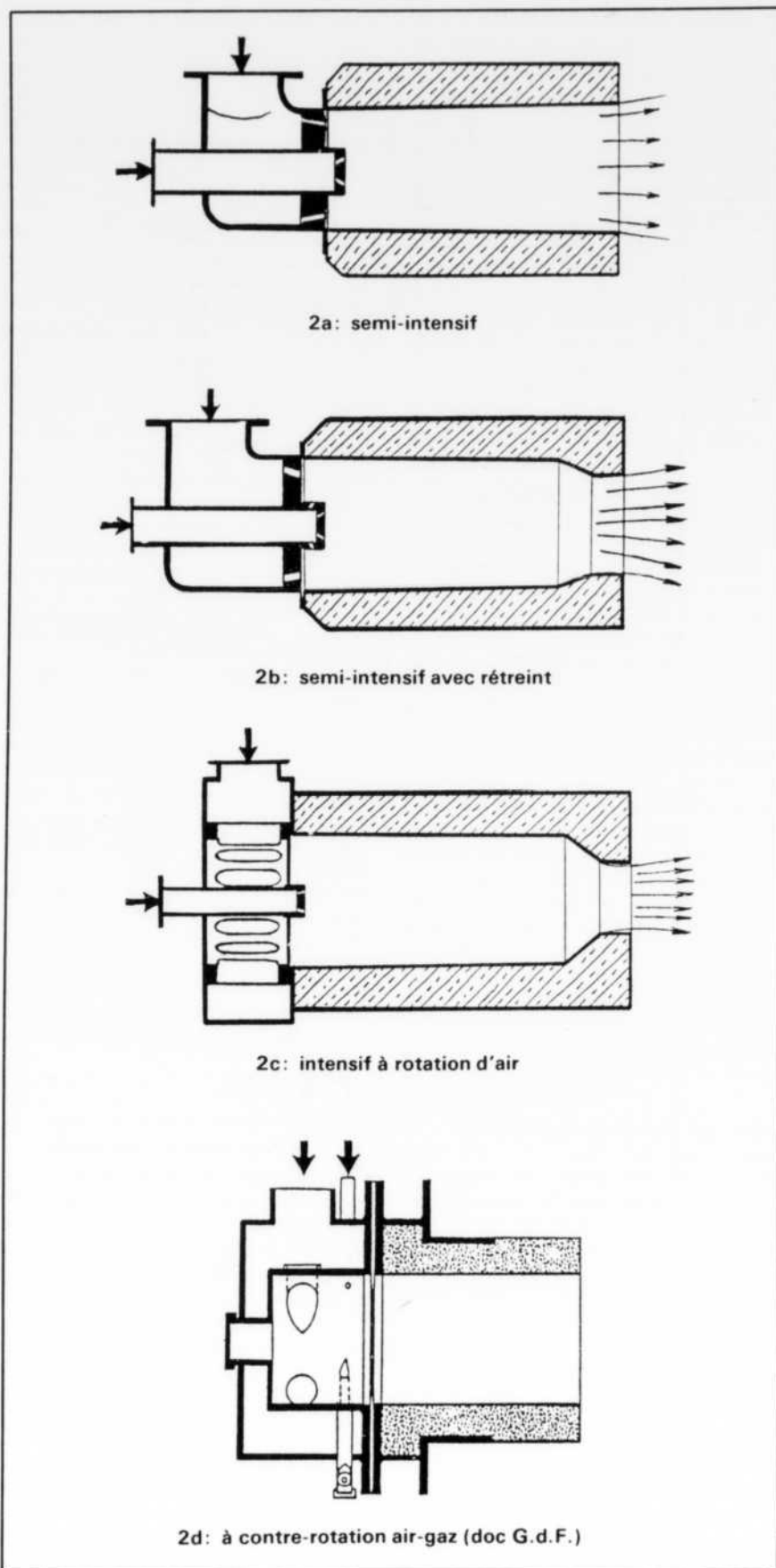


Figure 2 Brûleurs à chambre de précombustion

Conception de système de chauffage à haute efficacité

Roland Francœur

Dans les secteurs commercial et résidentiel, il existe actuellement sur le marché un choix de plus en plus grand d'appareils de chauffage dont l'efficacité est de l'ordre de 88 à 97% sur pouvoir calorifique supérieur (PCS).

Ces appareils présentent une des manières les plus faciles de diminuer la consommation d'énergie et, bien que ceux-ci aient des coûts d'achat et d'installation plus élevés que les appareils classiques, ils trouvent de plus en plus leur place dans les chaufferies canadiennes.

Cependant, en étudiant attentivement les caractéristiques opérationnelles de ces appareils et les besoins énergétiques des bâtiments, on peut concevoir des combinaisons de chaudières permettant d'optimiser le rendement moyen saisonnier des chaufferies, tout en minimisant les investissements.

Rappel des principes de condensation

Les appareils disponibles sont généralement de deux types: les générateurs d'air chaud à condensation et les chaudières à condensation. Rappelons brièvement le principe de fonctionnement de ces appareils à condensation à partir de la combustion du gaz.

Le gaz naturel est constitué principalement de méthane et d'éthane, c'est à dire, de carbone et d'hydrogène (Tableau 1). La combustion du gaz à partir de l'oxygène de l'air produit du gaz carbonique, de la vapeur d'eau et de la chaleur. Les produits de combustion évacués dans les cheminées contiennent donc, en plus de la chaleur sensible des gaz, une cer-

Monsieur Roland Francœur a obtenu son baccalauréat en sciences appliquées, options Génie Mécanique et Électrique, de l'École Polytechnique de Montréal en 1956. Depuis sa sortie de l'université, Monsieur Francœur œuvre dans le domaine de la distribution et de l'utilisation du gaz naturel pour la société Gaz Métropolitain.

En janvier 1984, M. Francœur a été nommé Conseiller principal à la Division Développement et transfert technologique, et son champ d'intérêt se situe au niveau du développement et de l'évaluation de nouvelles technologies reliées aux secteurs résidentiel et commercial ainsi qu'à l'utilisation du gaz naturel comme carburant.

taine quantité d'énergie sous forme de chaleur latente de la vapeur d'eau.

Éléments	mole %
CH ₄	95,53
C ₂ H ₆	2,06
C ₃ H ₈	0,12
C ₄ H ₁₀	0,01
CO ₂	0,34
N ₂	1,94
Total	100,00

Tableau 1 Composition typique du gaz naturel

La condensation de cette vapeur d'eau, en la refroidissant, restitue l'énergie emmagasinée lors de sa vaporisation et permet donc de récupérer cette chaleur latente. Celle-ci est loin d'être négligeable puisqu'elle représente environ 10% du pouvoir calorifique supérieur pour un gaz naturel typique.

Le point de rosée pour un gaz naturel typique dans le cas d'une combustion sans excès d'air — combustion stœchiométrique — est de l'ordre de 53°C. Cette valeur diminuera en rapport avec l'augmentation de l'excès d'air.

Types d'appareils à condensation

Il existe plusieurs technologies appliquées aux appareils à condensation et la plupart des fabricants, pour les domaines résidentiel et commercial, ont adopté

le principe d'une plus grande surface d'échange de chaleur, soit sous la forme d'un super échangeur unique, soit sous celle d'un double ou d'un triple échangeur.

Cette technologie et les autres technologies telles que les générateurs de type laveurs, les échangeurs de chaleur à caloduc ou surdimensionnés, la combustion pulsée, la combustion submergée, sont des technologies qui ont eu comme résultat d'augmenter le coût des appareils de chauffage, cette addition de coût étant compensée par une plus grande économie d'énergie, résultant d'une meilleure efficacité.

Pour les générateurs d'air chaud à condensation, refroidir les gaz de combustion en bas du point de rosée est une chose relativement facile car l'air de retour est habituellement de l'ordre de 20°C à l'échangeur de chaleur; ceci est nettement inférieur au point de rosée qui est de l'ordre de 53°C pour un excès d'air moyen de 30% (Figure 1). Pour ce type de générateur, on récupère habituellement à la fois sur la chaleur sensible et sur la chaleur latente des produits de combustion pour toute la période de chauffage.

En ce qui concerne les chaudières à eau chaude, elles ne pourront fonctionner en condensation que si la température de retour de l'eau est suffisamment basse; c'est à dire quelques 6 à 8°C plus bas que la température du point de rosée des produits de combustion.

Le consommateur qui désire profiter d'appareils plus efficaces

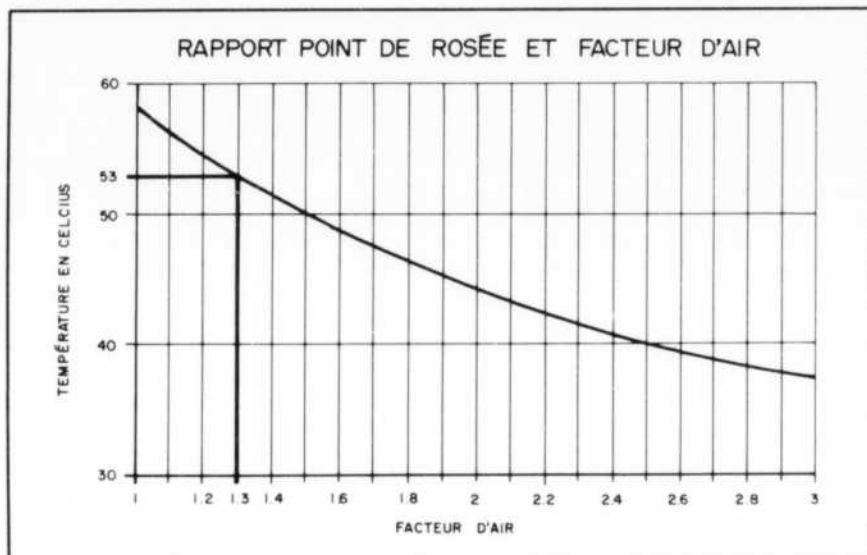


Figure 1

doit donc tenir compte de deux facteurs importants: la température de retour du caloporteur (air ou eau) à l'appareil et les coûts d'investissement additionnels requis pour obtenir cette plus grande efficacité.

Afin de profiter au maximum de ces nouvelles technologies, tout en minimisant ses coûts d'investissement, le propriétaire d'un bâtiment dont le système de chauffage nécessite une chaudière à eau chaude, peut opter pour une chaufferie composée.

La chaufferie composée

L'association de chaudières à condensation et de chaudières classiques à l'intérieur d'un même système est ce que nous appelons la chaufferie composée. Celle-ci constitue actuellement un des meilleurs choix technico-économiques possibles, aussi bien dans le cas de rénovation d'une chaufferie existante que dans le cas de création d'une chaufferie en bâtiment neuf.

Analyse de la saison de chauffage

La connaissance de l'histogramme des températures extérieures moyennes journalières est un outil de travail indispensable pour connaître la fréquence d'opération de chacune des chaudières en chaufferie composée, permettant ainsi d'en déduire un rendement annuel moyen d'exploitation et de le comparer ensuite avec d'autres systèmes.

À l'aide des données de l'histogramme des températures, nous pouvons construire un graphique ayant comme abcisse le nombre de jours de chauffage et en ordonnée le nombre de degrés-jours. Ce graphique est habituellement appelé la courbe des degrés-jours moyens saisonniers (Figure 3).

Lorsqu'on analyse la courbe des degrés-jours moyens saisonniers pour la région de Montréal, on constate que la journée la plus froide moyenne est de l'ordre de 40 degrés-jours. Comme les chaufferies dans les domaines résidentiel et commercial sont normalement dimensionnées pour une température de pointe de -29°C, c'est à dire pour 47 degrés-jours plus un facteur de surdimensionnement de l'ordre de 20 à 25%,

une chaufferie pourrait, en principe, subvenir aux besoins de chaleur du bâtiment lorsque le nombre de degrés-jours est de l'ordre de 57 à 58.

Nous constatons donc qu'un appareil de chauffage unique fonctionne presque toujours à moins des 2/3 de sa puissance et que sur une période de chauffage annuelle, l'appareil fonctionne en moyenne à 25% de sa puissance, soit:

$$\begin{aligned} \text{Puissance moyenne} &= \frac{\text{Consommation annuelle}}{\text{Puissance installée} \times \text{nombre de jours}} \\ &= \frac{4\,568 \text{ djrs}}{57,5 \text{ djrs} \times 315 \text{ jrs}} = 25\% \end{aligned}$$

Pour les appareils classiques, un faible taux d'utilisation se traduit par une efficacité saisonnière plus faible que celle obtenue en régime stable. En effet les appareils classiques ont une faible efficacité lorsque leur cycle de fonctionnement est court, c'est à dire au printemps et en automne, alors qu'en hiver ces appareils fonctionnent tout près de leur rendement idéal.

Cependant l'inverse est vrai avec les chaudières à condensation. Nous avons vu que plus le retour de l'eau est froid, plus les chaudières à condensation sont efficaces, ce qui est le cas au printemps et en automne, alors que la demande de chaleur est faible. Comme le rendement d'une chaudière s'améliore fortement en phase de condensation, il y a un intérêt économique à faire condenser une chaudière le plus longtemps possible au cours d'une période, l'idéal étant une condensation continue. En pratique, il est difficile d'arriver à ce résultat si l'installation n'a pas été construite dans cette optique.

La combinaison chaudières classiques et chaudières à condensation semble se compléter, c'est de la qu'est née la chaufferie composée.

Cette naissance a également été favorisée par le fait que les investissements requis pour une chaufferie à condensation sont plus élevés que pour une chaufferie classique. La qualité du ou des échangeurs de chaleur, le brûleur, le ventilateur extracteur de fumée

et autres, sont plus coûteux pour une chaudière à condensation que pour une chaudière classique.

Dimensionnement des chaudières d'une chaufferie composée

Le remplacement d'une chaudière conventionnelle par une combinaison chaudières classiques et chaudières à condensation, nécessite un dimensionnement au plus juste afin d'optimiser le rendement de l'ensemble tout en minimisant les investissements. Ce dimensionnement peut se faire en utilisant la technique suivante.

En analysant le graphique des degrés-jours moyens pour la région de Montréal, nous constatons que la surface sous la courbe est proportionnelle à la quantité de chaleur fournie au bâtiment. En sélectionnant une ou plusieurs chaudières à haute efficacité pour fournir la chaleur requise la majorité du temps et en installant une ou des chaudières classiques pour les besoins de pointes seulement, nous minimisons les investissements tout en maximisant l'efficacité.

Pour faciliter le travail de calcul de la consommation de chacune des chaudières, nous pouvons construire un nouveau graphique qui aurait comme ordonnée le nombre de degrés-jours et comme abcisse la quantité d'énergie totale entre 0 degré-jours et le nombre de degrés-jours spécifiés, exprimés sous forme de fraction (Figure 2).

Par exemple, installons une chaudière à condensation de façon à alimenter les besoins de chaleur jusqu'à une température de 20 degrés-jours et une chaudière classique pour les besoins de 20 degrés-jours jusqu'à 57,5 degrés-jours. En examinant le graphique, nous constatons que même si la chaudière à condensation ne compte que pour environ le 1/3 de la puissance installée, elle fournira 85% de la consommation annuelle. De plus, durant la période la plus froide, la température de l'eau de chauffage étant la plus élevée, c'est le moment où la condensation est la plus faible ou même inexistante.

Donc, en utilisant une combinaison chaudières à condensa-

tion dont le coût et le rendement sont élevés et chaudières classiques à un coût moindre et un rendement plus faible, nous minimisons les investissements sans pénaliser sensiblement le rendement moyen d'exploitation de la chaufferie. Dans les cas de rénovation, cette solution a aussi l'avantage de permettre de conserver une partie du matériel existant lorsqu'il est en bon état.

Le souci de faire face aux aléas climatiques et au besoin de récupération nécessaire en cas de panne électrique ou suite à l'utilisation de thermostats programmables a conduit les thermiciens à cumuler les situations les plus défavorables dans les calculs du coefficient de sécurité (surdimensionnement).

Une surpuissance installée constitue habituellement beaucoup de surface maintenue en température et représente donc beaucoup de pertes.

La solution de la chaufferie composée limite ce phénomène en introduisant en particulier une hiérarchie dans le fonctionnement des chaudières. La priorité donnée à la chaudière à condensation la plus performante conduit naturellement à isoler hydrauliquement les chaudières secondaires lorsqu'elles ne sont pas nécessaires au bon fonctionnement de l'installation.

Cette hiérarchie conduit à distinguer les chaudières prioritaires qui assurent la puissance de base, les chaudières secondaires qui assurent occasionnellement la puissance d'appoint et les chaudières de secours isolées hydrauliquement s'il y a lieu.

Cas pratique

Rénovation de la chaufferie d'un immeuble de 17 appartements, localisé dans le quartier Côte-des-Neiges.

Ancien système:

— Chauffage: une chaudière Warden King 30-11, 808 000 BTU/heure

— Chauffe-eau: un Dominion 18-6, 144 600 BTU/heure et un réservoir de 200 gallons

— Système: chauffage hydro-nique par gravité

Nouveau système:

— Chauffage: deux chaudières à condensation Weil Mclain de capa-

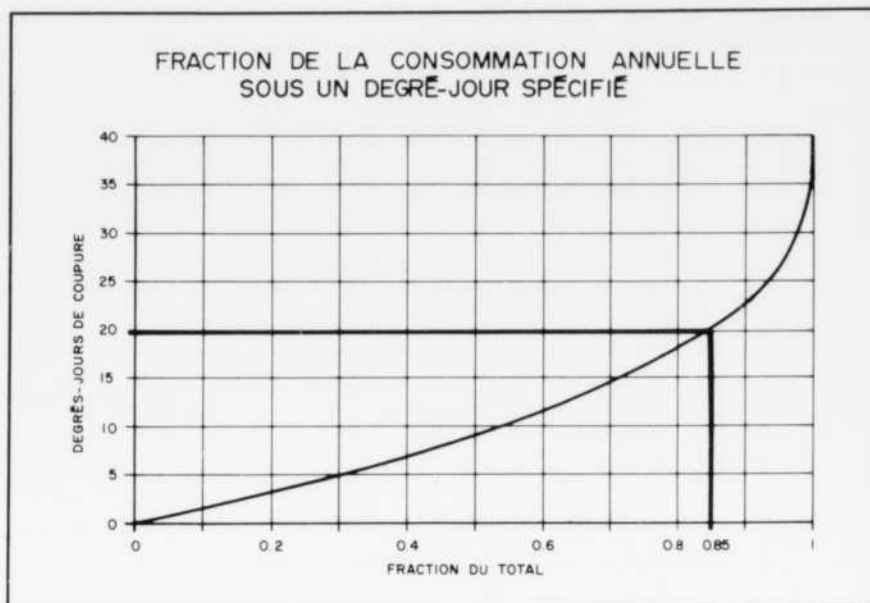


Figure 2

cité de 100 000 BTU/heure chacune, deux chaudières classiques Weil Mclain de capacité de 125 000 BTU/heure chacune.

— Chauffe-eau: un réservoir Viessman de 500 litres alimenté par une des chaudières à condensation du système de chauffage.

— Système: Installation de pompes circulatrices et conversion en un système primaire linéaire avec contrôle intérieur/extérieur adaptant la température de l'eau du circuit de chauffage en fonction de la température extérieure.

L'analyse de la consommation d'huile des 12 mois précédents nous a démontré que les besoins énergétiques du bâtiment étaient de l'ordre de 365 000 BTU/heure pour une journée maximum de 57,5 degrés-jours.

C'est pourquoi nous avons opté pour deux chaudières à condensation et deux chaudières classiques fournissant respectivement 176 000 et 190 000 BTU/heure pour ces conditions de température, soit un total de 366 000 BTU/heure. À noter que les deux chaudières à condensation comptent pour 44% de la puissance installée (Figure 3).

Dans cette installation, nous avons également voulu optimiser le système total en reliant la production d'eau chaude sanitaire à une des chaudières à condensation. Cette conception permet de produire toute l'eau chaude nécessaire à l'aide d'un appareil très efficace, sans pénaliser outre

mesure le rendement du système de chauffage.

Dans cette installation, nous avons utilisé quatre chaudières afin de nous permettre de faire une évaluation exacte de l'opération de chacune des chaudières pour différentes températures extérieures. La conception optimum pour cet édifice aurait plutôt été les deux chaudières à condensation déjà installées et une chaudière classique de 250 000 BTU/heure.

Dans un système de chauffage primaire linéaire, l'eau de chauffage est recirculée dans tout le système de chauffage sans passer dans les chaudières. Lorsqu'il y a demande de chaleur, chacune des chaudières entre en opération selon une hiérarchie programmée d'avance; c'est à dire que les deux chaudières à condensation entrent en fonction en priorité selon les besoins et si nécessaire les deux chaudières classiques assurent le complément des besoins (Figure 4). S'il y a demande d'eau chaude, la priorité est donnée à une des chaudières à condensation pour satisfaire ce besoin.

Des vannes de contrôle de débit empêchent toute circulation d'eau dans les chaudières non requise par la demande de chaleur.

En résumé, dans ce type de système, les deux chaudières à condensation ont été sélectionnées de façon à satisfaire 90% des besoins de chauffage annuel et à ce

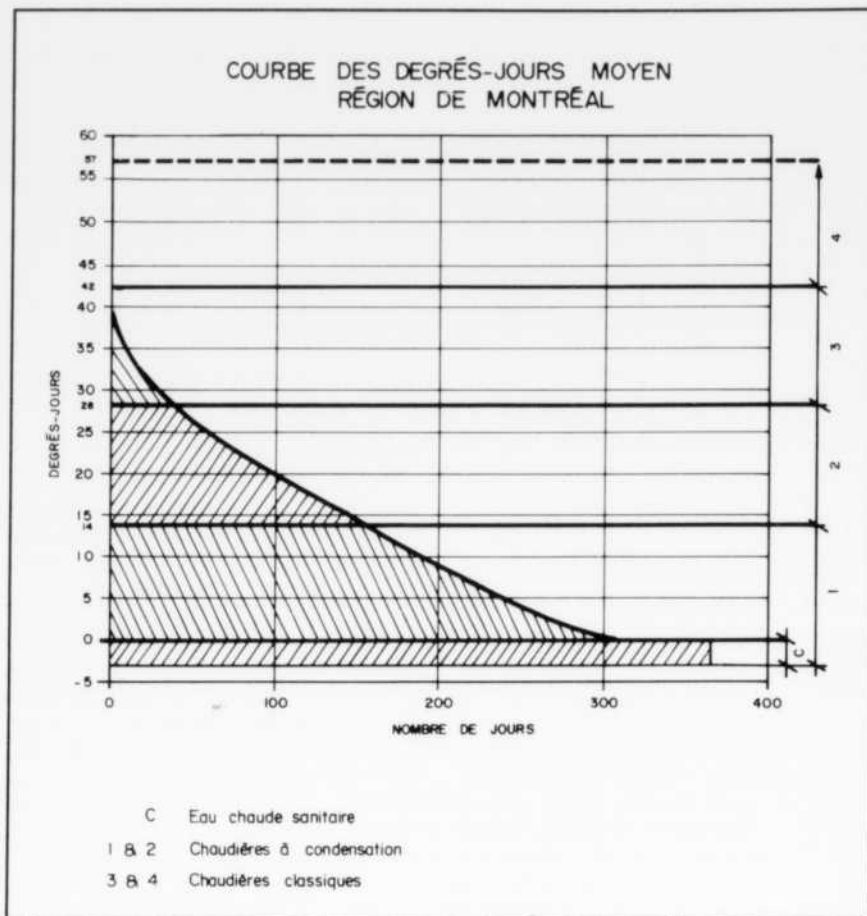


Figure 3

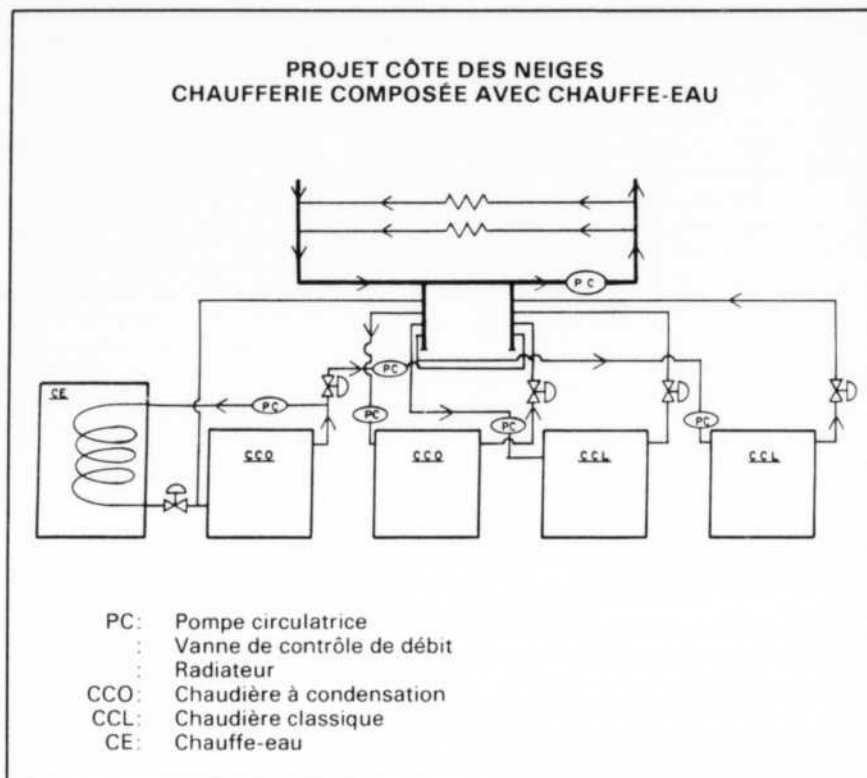


Figure 4

que la première chaudière soit de capacité adéquate pour fournir l'eau chaude sanitaire requise par les clients.

Les deux chaudières classiques fournissent la balance du chauffage et assurent les besoins de pointe extrême. Ce système permet donc l'utilisation optimum des chaudières à condensation. La consommation actuelle pour les mois de décembre 1986 à avril 1987 pour chacune des chaudières est indiquée au tableau 2. On constate à l'examen de ce tableau que, pour la période de décembre à février, les chaudières à condensation ont fourni environ 78% de la demande énergétique.

Durant la 13^e semaine, nous avons réajusté le contrôle séquentiel des chaudières en augmentant l'ajustement du différentiel de température entre chaque chaudière de 0,5°C à 1,5°C. Après réajustement du contrôle des chaudières, nous constatons que, durant les périodes froides, les chaudières à condensation ont fourni plus de 90% des besoins énergétiques et qu'avec l'arrivée du printemps, cette proportion a grimpé en moyenne jusqu'à 98%.

Pour l'installation proposée, le graphique de la figure 2 donne 68% pour la première chaudière, 27% pour la deuxième, 5% pour la troisième et 0% pour la dernière. Ces prévisions sont très près des résultats actuels, même si nous avons des données pour quatorze semaines seulement.

Conclusion

En résumé, la technique condensation pour le chauffage de locaux offre des perspectives d'économie d'énergie très intéressantes pour le consommateur.

L'étude de cas contrôlée d'un immeuble a démontré que la conception et le dimensionnement des appareils dans une chaufferie composée pouvaient être réalisés de façon adéquate, en utilisant la courbe des degrés-jours moyens pour la région donnée.

Les économies d'énergie peuvent également être réalisées en très grande partie en installant une ou deux petites chaudières à condensation alors que l'énergie totale requise en période de pointe

est assurée par l'addition d'une ou de plusieurs chaudières classiques. Cette configuration, appelée chaufferie composée, permet de minimiser les investissements tout en optimisant le rendement du système global.

L'addition de la production d'eau chaude sanitaire peut se faire dans le cas d'un immeuble par une des chaudières à condensation du système sans nécessiter l'addition de puissance additionnelle tout en profitant du haut rendement de la chaufferie.

Nous constatons que les basses températures de retour de l'eau de chauffage correspondent aux faibles charges de chauffage, d'où résulte une augmentation du rendement de la chaudière à condensation pour ces conditions due à une condensation de plus en plus importante de la vapeur d'eau contenue dans les produits de combustion (Figure 5).

Le rendement des chaudières à condensation croît lorsque la température du caloporteur diminue et permet ainsi de fonctionner avec un rendement important pendant la plus grande partie de la saison de chauffage et pour toute la production d'eau chaude sanitaire.

Le surdimensionnement des chaudières à condensation n'apporte rien d'autre qu'un investissement trop élevé. Le juste dimensionnement des chaudières, à condensation et classiques, est un des critères d'une bonne installation performante.

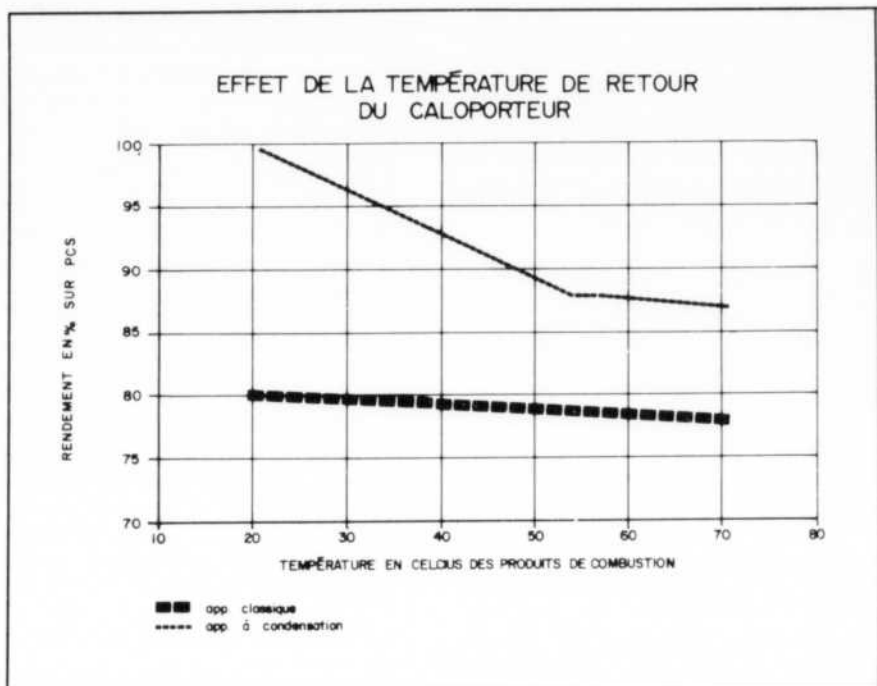
Références

1. La chaudière à condensation, ses avantages et sa bonne utilisation. Revue Générale du Gaz 105, janvier-mars 1983.
2. M. SEARLE et A.R. SHIRET. *Opportunities for a new generation of high efficiency gas boiler.*
3. F.E. BECKER, E.F. SEARIGHT et A.I. ZAKAK. *High efficiency space heating systems utilizing heat-pipe heat exchangers*, Warme Gas International, pp. 560 à 564, novembre 1984.
4. U. BONNE, R.H. TORBORG et J.E. JANSSEN. *Digital simulation of the performance of combustion heating systems*, AIChE 15th Annual Regional Symposium, 20 février 1975.
5. B. GUERPILLON. *Bilans d'exploitation de chaudières individuelles traditionnelles et à condensation dans les pavillons expérimentaux*. Association Technique de l'Industrie du Gaz en France, congrès 1984.
6. *Les chaudières individuelles à condensation*. Direction des Services Économiques et Commerciaux, Gaz de France, décembre 1982.
7. *Chaufferies à Condensation Installées dans le Secteur Tertiaire*. L'Installateur n° 475, novembre 1985.
8. M. MARTIN. *La Condensation*, janvier 1980.

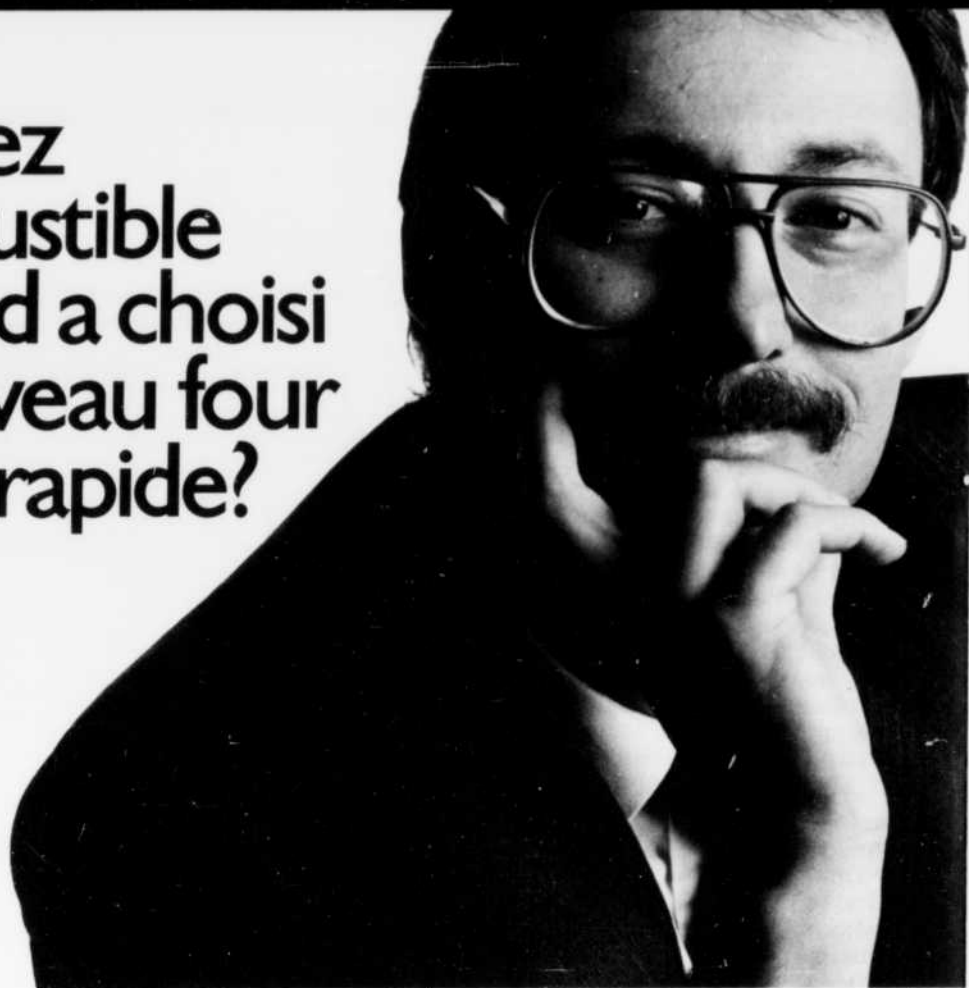
Semaine	Chaudière 1	Chaudière 2	Chaudière 3	Chaudière 4	Chaudières 1 et 2 (%)
	Mpc	Mpc	Mpc	Mpc	
1 et 2	33,2	17,4	8,5	2,2	82,5
3	16,1	10,4	6,2	2,1	76,1
4	16,3	11,1	7,0	2,3	74,7
5	15,9	8,9	4,0	1,1	82,9
6	16,0	8,3	2,9	0,9	86,5
7	16,2	10,2	4,4	1,3	82,2
8	16,6	10,4	4,3	1,2	83,1
9	16,0	12,3	6,9	2,1	75,9
10	16,1	13,5	10,7	4,0	66,8
11	16,2	11,5	4,8	1,5	81,5
12	16,3	12,5	5,2	0,8	82,8
13	21,1	19,7	14,5	2,2	71,0
Total (1)	216,0	146,2	79,4	21,7	78,2
14	11,9	8,7	2,2	0,1	90,0
15	16,0	11,0	2,2	0,2	91,8
16	16,1	9,5	2,5	0,2	90,5
17	16,4	11,5	2,4	0,2	91,5
18	15,4	4,9	0,2	0,2	98,1
19	12,7	2,0	0,2	0,2	97,4
20	15,6	5,7	0,5	0,2	96,8
21	13,5	2,1	0,1	0,1	98,7
22	7,7	0,3	0,2	0,2	95,2
23	11,7	1,1	0,2	0,1	97,7
24	14,4	2,6	0,1	0,2	98,3
25	11,0	0,7	0,2	0,2	96,7
26	7,2	0,5	0,2	0,2	95,1
27	8,7	0,3	0,2	0,1	96,8
28	4,5	0,1	0,1	0,2	93,8
Total (2)	182,8	61,0	11,5	2,6	94,5
%	71%	24%	4%	1%	94,5%

NOTE: Semaine 1 — 17 novembre 1986

Tableau 2



Devinez quel combustible Guy Chartrand a choisi pour son nouveau four à chauffage rapide?



Guy Chartrand est le propriétaire et l'ingénieur en chef du développement pour MTC Suspension Inc. Fabricant de ressorts à lames pour véhicules lourds, MTC est situé à Chambly, Québec.

Q: Lorsque vous magasinez - si l'on peut dire - pour un nouveau four à chauffage rapide, quel combustible vous est venu à l'idée en premier?

R: Personnellement, le gaz naturel et l'électricité me sont plus familiers, donc ils me sont venus à l'esprit en premier.

Q: Vous saviez ce que vous vouliez?

R: Oui et non. La technologie change si rapidement. Nous nous sommes renseignés sur le gaz naturel et l'électricité afin de trouver la technologie que répondait le mieux à nos besoins.

Q: Au départ, considérez-vous la technologie du gaz naturel comme étant aussi moderne que celle de l'électricité?

R: Franchement, les équipements au gaz naturel ne me semblaient pas être particulièrement modernes.

Q: Mais vous avez choisi le gaz naturel. Pourquoi?

R: Pourquoi? Eh bien, nous avons été impressionnés par l'évolution des appareils au gaz naturel

au cours des dernières années.

Q: Quels genres de changements sont survenus?

R: Entre autres, les gazotechnologies sont devenues plus flexibles. Aujourd'hui on atteint la chaleur désirée en l'espace de 5 minutes. Aussi, les équipements sont plus petits. Je crois que notre unité à gaz naturel occupe à peu près 40 % moins d'espace.

Q: 50% je crois.

R: 50 % c'est encore mieux. De plus, le contrôle de combustion régi par microprocesseur nous a permis de réduire la consommation énergétique de façon considérable.

Q: Quels autres avantages avez-vous découverts en installant un four à chauffage rapide au gaz naturel?

R: C'est certes une unité plus confortable à opérer car la température autour du four est aujourd'hui considérablement plus basse.

Q: Et à propos des coûts en capital?

R: Ils sont définitivement plus bas que ceux des autres sources d'énergie.

Q: Bref, vous êtes entièrement satisfait d'avoir choisi le gaz naturel?

R: Définitivement. De plus, il est sécurisant de savoir que les réserves actuelles de gaz naturel assurent un approvisionnement d'énergie fiable pour les générations à venir, sans compter les découvertes éventuelles.

Pour de plus amples informations sur toutes les innovations de la technologie du gaz naturel, s.v.p. écrire à L'Association Canadienne du Gaz Naturel au 55 Scarsdale Road, Don Mills, Ontario M3B 2R3, ou appeler votre fournisseur de gaz local.

Le gaz naturel, bien sûr.

Utilisations du gaz naturel dans les industries agro-alimentaires

François Rapeau
 Chef de la division
 branches industrielles
 Centre d'essais et de recherches
 sur les utilisations du gaz
 Direction des études et techniques
 nouvelles du gaz de France

La progression constante de la part du gaz naturel dans le secteur des industries agro-alimentaires tient pour une bonne part, à l'apparition de nouvelles technologies très performantes. La première partie de cet article décrit les techniques de chauffage des liquides: combustion submergée, échangeur immergé compact, tube immergé compact. Elles permettent d'obtenir couramment des rendements supérieurs à 100% PCI.

Les brûleurs de veine d'air qui permettent de chauffer directement l'air de procédé en raison de la pureté du gaz naturel ainsi que le brûleur à contre-rotation sont décrits par l'auteur qui présente plusieurs exemples de réalisations.

Cet article traite aussi de l'utilisation du gaz naturel pour le chauffage et l'enrichissement en gaz carbonique de l'atmosphère de serres; des essais ont montré que l'injection des fumées de gaz naturel permet de stimuler le phénomène de la photosynthèse et donc d'accroître la productivité des serres.

Introduction

En France, les industries agro-alimentaires constituent un secteur essentiel de l'économie nationale. Leur développement constant au cours des dernières années leur a permis d'occuper la première place en terme de produit national brut. Les consommations énergétiques de ce secteur représentent 5,1 millions de TEP soit 10% des consommations de l'industrie hors sidérurgie. La part du gaz naturel dans ce secteur qui atteignait 36% en 1985 est en progression constante. Ceci tient pour une bonne part à l'apparition de nouvelles technologies d'utilisation du gaz naturel tout à fait performantes.

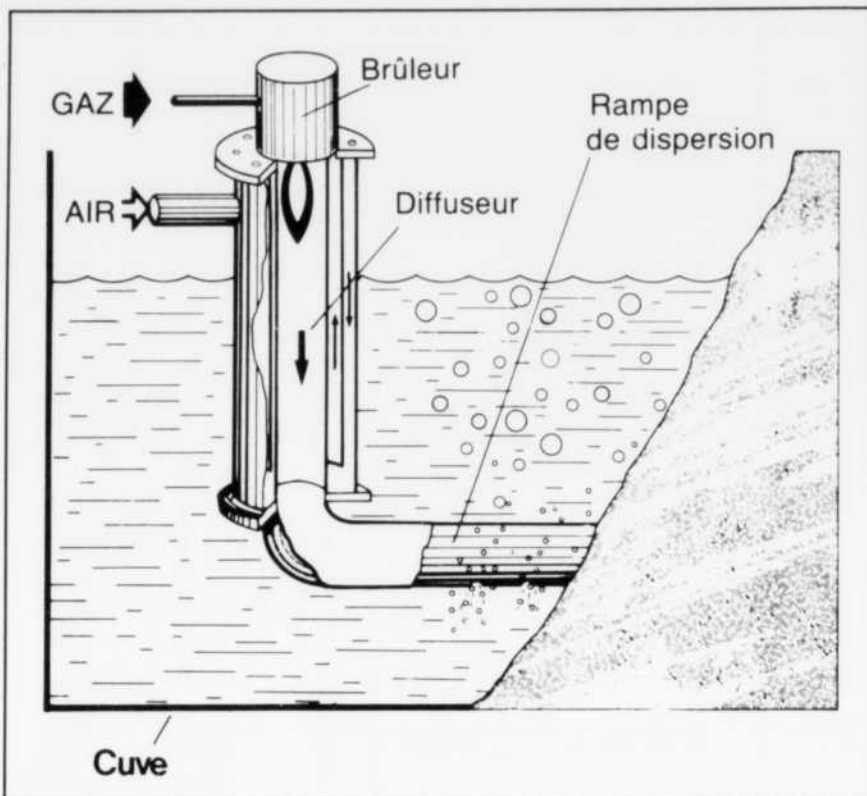


Figure 1 Combustion submergée

Les techniques performantes d'utilisation du gaz naturel

La combustion submergée

On appelle combustion submergée, le procédé qui consiste à mettre en contact direct le flux gazeux des produits de combustion du gaz naturel et le liquide à chauffer. Ce contact direct est réalisé par barbotage lorsque la combustion est achevée (figure 1).

L'équipement de chauffe se compose d'un brûleur, d'un diffuseur et d'une rampe de dispersion des fumées. Le diffuseur possède trois enveloppes externes, de façon à isoler thermiquement la flamme du liquide et à préchauffer l'air comburant. Les produits de la combustion, issus du brûleur, sont conduits à une profondeur de l'ordre de 500 à 800 mm et dispersés par une ou plusieurs rampes. L'alimentation en fluide du brûleur doit se faire à une pression suffisante pour vaincre la contrepression hydrostatique et la perte de charge du brûleur. Les matériels disponibles couvrent une gamme de puissance allant de 100 kW à 1 MW.

Dans la combustion submergée, on peut admettre que les produits de combustion sont, après barbotage, en équilibre thermodynamique avec le bain. Ceci même pour une hauteur de barbotage relativement faible car la surface d'échange entre les deux fluides est considérable. Un mètre cube de fumées dispersées dans un bain procure une surface d'échange de l'ordre de 1.000 m². Le rendement de chauffage du liquide est donc essentiellement fonction de la température du bain chauffé.

Pour le chauffage d'eau à une température inférieure à la température de rosée des fumées, qui est de l'ordre de 59°C pour un gaz naturel de type LACQ, il y aura condensation d'une partie de l'eau de combustion. Le rendement de chauffage est alors supérieur à 100% PCI (pouvoir calorifique inférieur).

Par exemple, pour une température de bain de 30°C le rendement de combustion atteint 105% PCI. Les fumées du gaz naturel étant propres (pas d'oxydes de soufre en particulier) ce procédé permet le chauffage d'eau utilisable en agro-alimentaire.

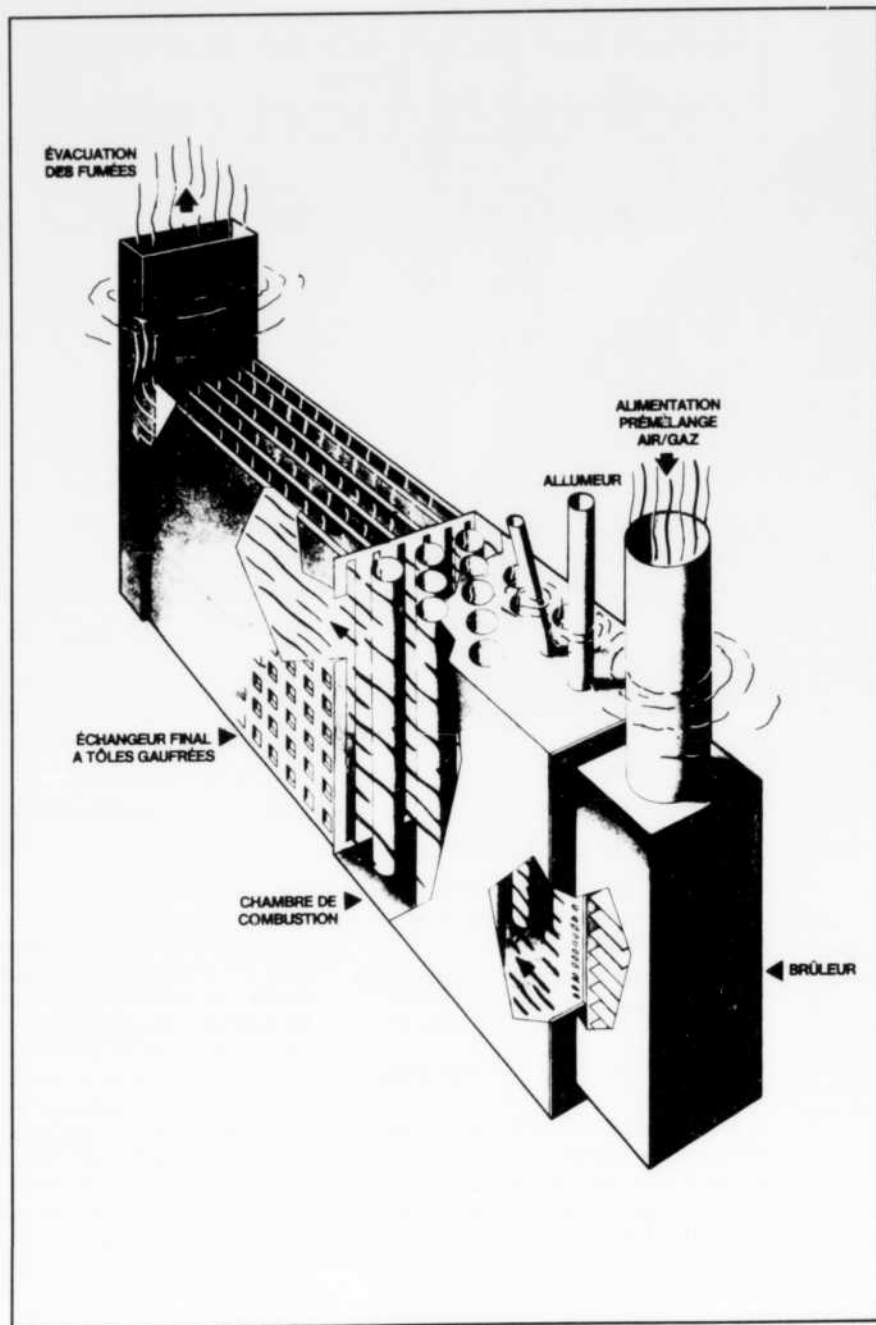


Figure 2 Échangeur immergé compact à tôles gaufrées

L'échangeur immergé compact

L'échangeur immergé compact est un ensemble monobloc de chauffage à gaz qui comprend l'équipement de chauffe et l'échangeur de chaleur, produits de combustion-liquide à chauffer (figure 2). De forme parallélépipédique, l'échangeur immergé compact est complètement immergé dans le liquide industriel. Les puissances couvrent une gamme de 100 à 450 kW PCI.

L'échangeur immergé compact comprend un brûleur à pré-mélange air-gaz, une chambre de combustion, un allumeur et un détecteur de flamme et un premier étage d'échange comprenant des tubes lisses verticaux.

Un échange thermique intense se réalise entre les produits de combustion à haute température et le liquide industriel. À l'intérieur de l'échangeur, les produits de combustion, en provenance du brûleur, circulent entre les tubes

lisses disposés en quinconce. Le liquide circule par thermosiphon dans les tubes lisses.

L'échangeur comprend aussi un deuxième étage d'échange caractéristique de la technologie retenue (à impact de jets ou de tôles gaufrées).

Le principe de l'échangeur à jets consiste à diviser, à plusieurs reprises, le flux de fumées en jets et de diriger ceux-ci contre la paroi d'échange. Le but de cette disposition est de provoquer une forte turbulence des fumées contre la paroi pour engendrer un coefficient d'échange par convection de l'ordre de $100 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$.

Quant à l'échangeur à tôles gaufrées, celui-ci est constitué d'un ensemble de plaques d'échange gaufrées entre lesquelles circulent les fumées. L'échange par convection est facilité par une forte turbulence des fumées, provoquée ici grâce aux reliefs de surface des plaques: les tôles gaufrées sont utilisées comme paroi extérieure et séparent les fumées du liquide à chauffer. Cette disposition permet d'obtenir des coefficients de convection des fumées d'environ $150 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$.

L'échangeur immergé compact étant totalement immergé dans le bain, les pertes par les parois sont entièrement récupérées. Pour l'opération de chauffage d'un liquide à 70°C , les échangeurs immergés compacts à tôles gaufrées permettent d'obtenir un rendement de 94 à 96% PCI. Il est de 92 à 95% PCI pour un échangeur immergé compact à impact de jets. Cet équipement permet le chauffage *in-situ* des liquides et à ce titre peut se substituer à des échangeurs par fluide caloporteur.

Le tube immergé compact

L'originalité des tubes immergés compacts, par rapport aux tubes immergés classiques, consiste à dissocier la chambre de combustion du tube échangeur et à réduire la taille de celui-ci ce qui permet d'en accroître les performances et d'en faciliter l'implantation. Ce type d'équipement couvre actuellement une gamme de puissance allant jusqu'à 400 kW. Le tube immergé compact se compose de trois parties: le brûleur, la chambre de combustion et le tube échangeur (figure 3).

La flamme se développe dans la chambre de combustion qui doit être aussi compacte que possible. Le brûleur doit donc entraîner une combustion intensive qui, malgré la proximité éventuelle de parois froides en contact avec le liquide, doit être complète avec des excès d'air faibles.

La chambre de combustion est de forme cylindrique suivie d'un cône pour le raccordement au tube échangeur. Elle peut être installée à l'extérieur de la cuve contenant le liquide à chauffer. La chambre de combustion est alors refroidie par l'air comburant ou isolée par des matériaux réfractaires. Il est également possible d'introduire la chambre de combustion dans le liquide à chauffer. Le tube échangeur du petit diamètre permet, par une augmentation de la vitesse d'écoulement des fumées, un accroissement du transfert de chaleur et par conséquent, une amélioration du rendement de chauffage.

Les tubes immergés compacts sont dimensionnés pour obtenir un rendement de chauffage maximum; celui-ci peut atteindre 94% sur PCI pour un liquide chauffé à 80°C et un excès d'air au brûleur voisin de 10%. Le matériel conserve ses performances même à faible régime en raison d'une parfaite maîtrise de l'excès d'air.

À cause de sa simplicité, de sa souplesse de mise en œuvre et son faible coût, ce type de dispositif est particulièrement adapté pour des cuves de dimensions particulières (grande longueur ou faible profondeur).

Les brûleurs de veines d'air

Les caractéristiques de pureté du gaz naturel, notamment l'absence de soufre, permettant d'utiliser en direct les produits de combustion dilués dans l'air pour les opérations de séchage pratiquées dans les industries agro-alimentaires. Pour ce faire, un type de brûleur particulier a été développé, dit «de veine d'air» car il s'agit d'un équipement que l'on place dans les gaines de ventilation elles-mêmes (figure 4).

Les brûleurs sont modulaires et peuvent être constitués d'un assemblage d'éléments droits, d'angle, en té ou en crois afin de s'adapter aux conditions particulières d'utilisation. La rigidité de

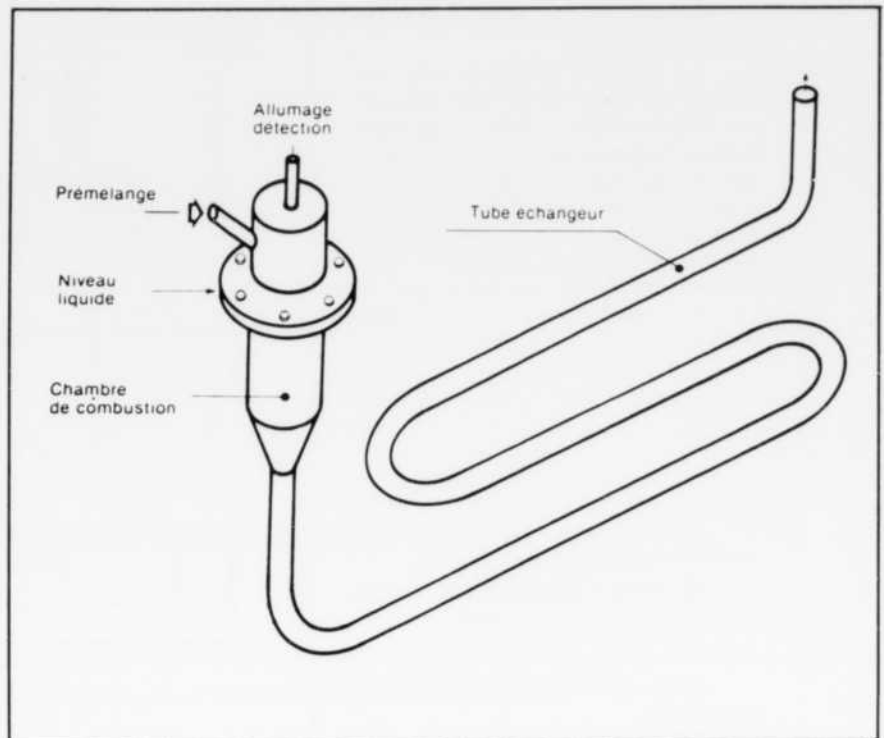


Figure 3 Tube immergé compact

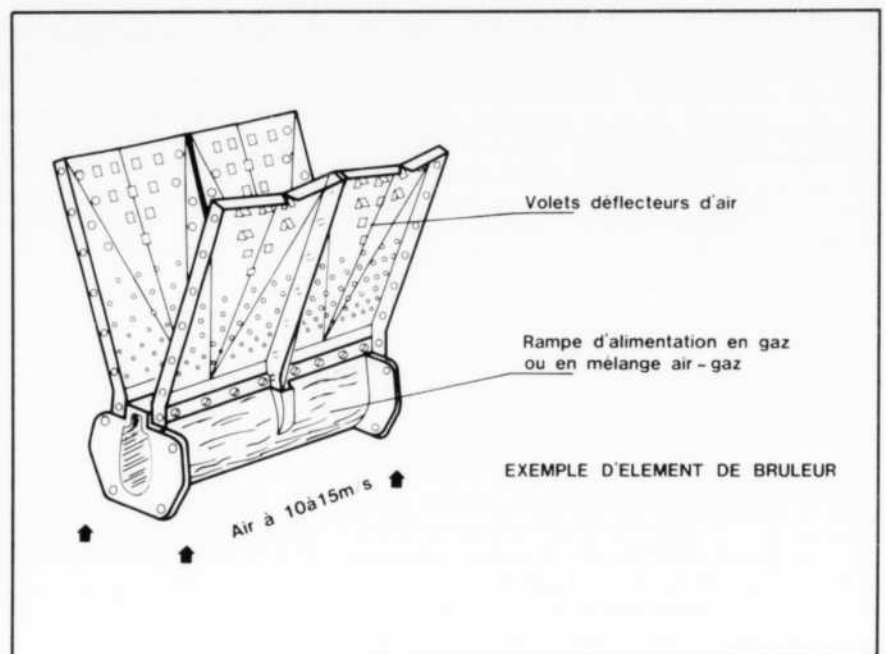


Figure 4 Schéma de principe d'un brûleur de veine d'air

l'ensemble est assurée par la rampe d'alimentation en combustible.

La puissance linéaire maximale développée est de l'ordre de 500 à 1000 kW (PCI)/m pour les brûleurs alimentés en gaz pur et de 1000 kW (PCI)/m pour les brûleurs alimentés en prémélange air-gaz. La température des gaz chauds

obtenus peut atteindre 400°C. Ce type de brûleur trouve son application sur un nombre de types de séchoirs ou de tours d'atomisation.

Les brûleurs à contre-rotation

Ce type de brûleur assure un mélange très intense de l'air et du

gaz naturel et une combustion très rapide (figure 5).

Le brûleur à contre-rotation de l'air se caractérise par ailleurs par une exceptionnelle souplesse de fonctionnement et un fonctionnement très près de la combustion stœchiométrique. Déjà utilisés dans différents secteurs de l'industrie, ils sont actuellement développés sur les fours continus de boulangerie et de biscuiterie industrielle.

Exemples d'application dans les industries agro-alimentaires

Les opérations de séchage en laiterie

Le séchage par atomisation du lait est la plus caractéristique. Dans l'industrie alimentaire, le chauffage de l'air envoyé dans les tours d'atomisation s'effectue traditionnellement au moyen d'échangeurs chauffés par de la vapeur dont la pression est comprise en général entre 15 et 20 bar. L'innocuité des produits de combustion du gaz permet son emploi en direct dans les tours d'atomisation. Pour ce faire, des brûleurs de type à veine d'air sont disposés dans la gaine d'entrée de l'air dans la tour (figure 6).

Ce type de brûleur est parfaitement adapté au séchage par atomisation:

- il est conçu pour fonctionner dans un courant d'air dont la vitesse est de l'ordre de 10 à 15 m/s;
- il est d'une grande souplesse, ses allures de marche peuvent varier dans un rapport de 1 à 25;
- il peut prendre toutes les formes par juxtaposition d'éléments standards; la combustion est alors répartie sur toute la section de passage de l'air à chauffer et l'homogénéité de température obtenue est pratiquement parfaite. De plus, il peut être facilement monté à l'emplacement d'un échangeur à vapeur.

Par ailleurs, l'emploi du gaz ne limite pas la température de l'air de séchage à 190°C comme l'emploi de la vapeur oblige en pratique. C'est alors le produit à sécher

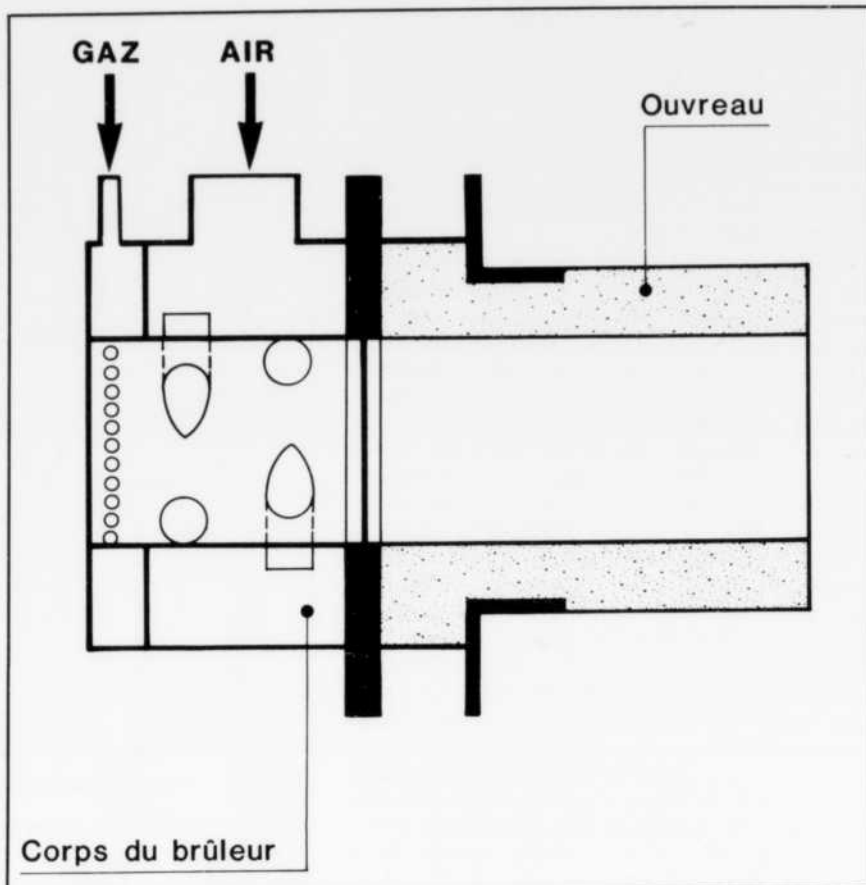


Figure 5 Brûleur à contre rotation

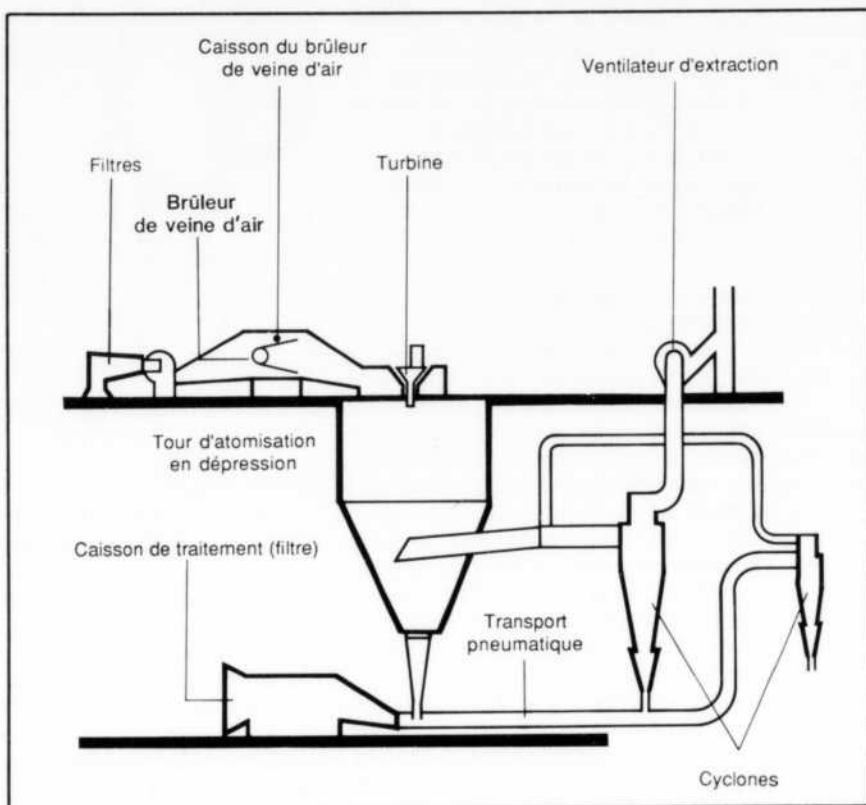


Figure 6 Schéma de principe de la tour d'atomisation

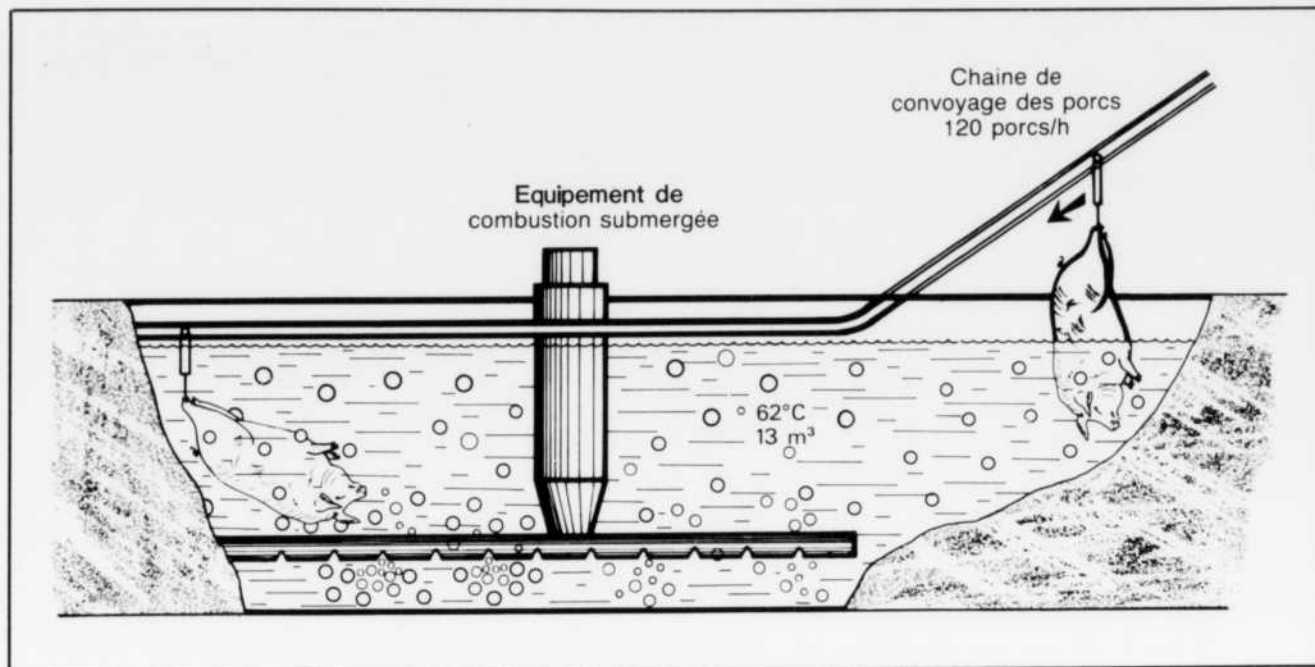


Figure 7 Le chauffage d'un bac d'échaudage de porc par combustion submergée

qui impose cette limite. L'expérience montre que le séchage en direct ne modifie pas la qualité des produits.

L'utilisation du gaz naturel, en permettant d'atteindre des températures plus élevées, entraîne une augmentation importante de la production des tours d'atomisation. La conduite d'une installation équipée d'un chauffage direct est beaucoup plus facile en raison de la très faible inertie de ce système comparativement à un ensemble chaudière-échangeur-vapeur. Enfin les gains énergétiques varient de 15 à 35% selon le type de produit traité.

Les opérations d'échaudage de porc en abattoirs

Traditionnellement dans ce type d'installation, la vapeur produite par une chaudière est distribuée par un réseau aux échangeurs montés dans les différents appareils d'utilisation entraînant des déperditions importantes et un fonctionnement non optimum des chaudières. Une chaîne d'abattage de porcs comporte après saignées les opérations suivantes: lavage, échaudage, épilage, flambage, grattage, éviscération. L'installation d'échaudage met en œuvre un équipement de combustion submergée qui consiste à faire fonctionner un brûleur sous pression dans l'eau de la cuve (figure 7).

L'équipement mis en place dans une cuve de 13 m³ comprend un brûleur à contre-rotation de 370 kW. Le chauffage du bac est entièrement automatisé. Le fonctionnement du brûleur en tout ou rien maintient la température d'eau au degré près autour d'un point de consigne fixé à 63°C. La pulvérisation de jets d'eau horizontaux évite la formation de mousse engendrée par la combustion submergée. La

capacité d'abattage maximum étant de 120 porcs/heure, la consommation d'énergie mesurée par l'échaudage varie de 3,60 à 4,45 kWh/porc selon la cadence d'abattage.

Les opérations de cuisson en charcuterie industrielle

Habituellement, la cuisson en charcuterie industrielle s'effectue dans des marmites dont le fond est

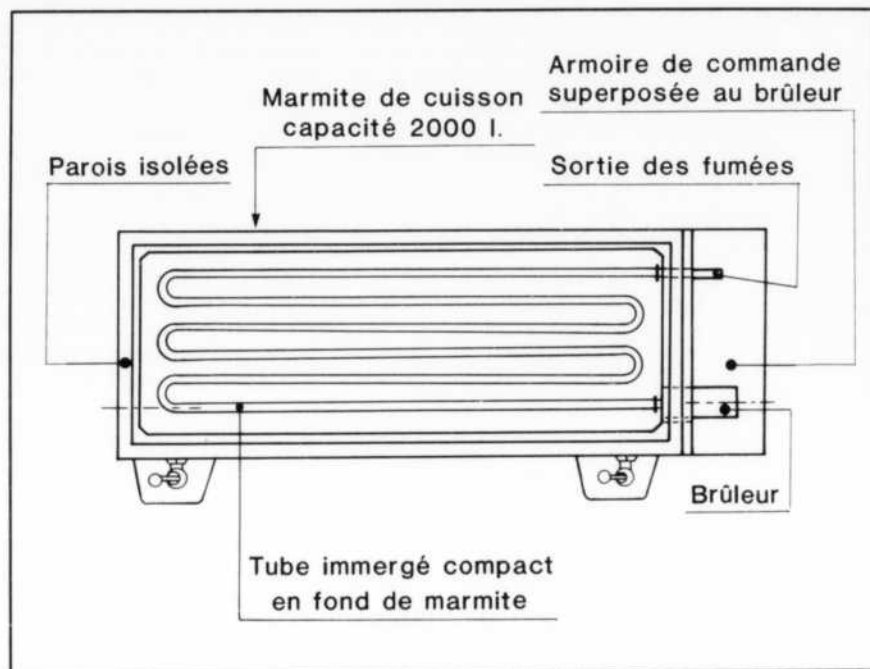


Figure 8 Chauffage direct d'une marmite de cuisson par tube immergé compact

chauffé directement par des brûleurs à air induit. Une étude avec un constructeur d'équipements agro-alimentaires a permis d'implanter directement au fond d'une marmite de 2000 litres, un tube immergé compact de 100 kW (figure 8).

Le brûleur et la cuve sont en acier inoxydable de qualité alimentaire et facilement nettoyables. Les charges sont constituées d'environ 1.200 kg d'andouillettes placées dans des paniers et introduites dans l'eau par le haut avant fermeture du couvercle. La cuisson peut s'effectuer en 4 heures à une température de 80°C.

Le rendement de chauffage est excellent, il atteint 94% sur PCI en moyenne sur un cycle de cuisson. Par ailleurs, lorsque le produit à cuire (sauce par exemple) ne peut être directement mis en contact avec la surface du tube immergé compact, celui-ci peut être implanté dans une double enveloppe remplie d'eau. Le chauffage du produit se faisant ainsi par «bain-marie». Les premiers essais sur ce type d'équipement montrent des résultats similaires.

Les utilisations du gaz naturel dans les serres

La serre est une grande consommatrice d'énergie. La part du combustible dans le prix de revient des cultures peut aller jusqu'à 30%. De part sa faible inertie thermique et son important coefficient de déperdition, la serre requiert une grande souplesse de régulation de chauffage et une importante disponibilité, deux critères auxquels le gaz naturel répond parfaitement.

Les opérations de chauffage

L'évolution la plus marquante de ces dernières années est l'apparition sur le marché d'émetteurs basse température: paillages ou gaines radiantés, tubes plastiques.

Ces émetteurs sont positionnés aux pieds des cultures, parfois dans le sol; ils sont parcourus par de l'eau tiède (maximum 45 à 50°C) et présentent une grande surface d'échange dimensionnée généralement pour abaisser la température de l'eau de 5 à 10°C.

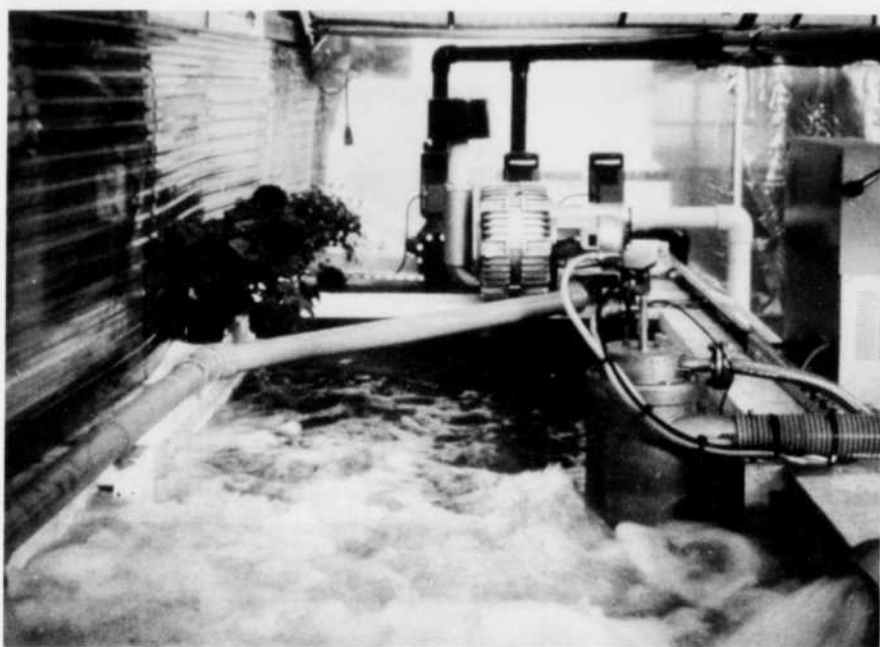


Figure 9 Équipement de combustion submergée implanté dans un bassin

Le circuit de chauffage présente ainsi une température de retour qui est couramment de 30°C. Les techniques qui appliquent le principe de la condensation trouvent ici une application de choix.

Les récupérateurs sur chaudières

Le récupérateur sur fumées est placé en sortie de chaudière classique qui possède un rendement de l'ordre de 85% PCI. Il permet de récupérer la chaleur sensible et la chaleur latente des produits de combustion.

Il existe deux principes de récupérateurs:

- à voie sèche: l'eau de chauffage circule dans des tubes à contre-courant avec les fumées,
- à voie humide: l'eau de chauffage est mise en contact direct avec les fumées.

Les rendements de combustion de l'ensemble (chaudière + récupérateur) atteignent 105% PCI.

La chaudière à condensation

La chaudière à condensation est de par son principe l'équivalent d'une chaudière classique équipée d'un récupérateur sec. Les rendements sont de l'ordre de 105%

PCI pour une température de retour de 30°C.

La combustion submergée

Ce dispositif peut servir à chauffer l'eau dans le cas d'utilisation d'émetteurs basse température (figure 9). Les rendements sont là aussi de l'ordre de 105% PCI.

L'échangeur immergé compact

Il peut être utilisé avantageusement en serre pour le chauffage des solutions hydroponiques qui se fait à basse température et qui requiert un fonctionnement indépendant des générateurs de chaleur utilisés pour le chauffage. Le rendement est là aussi excellent puisqu'il atteint 100% PCI pour une température de consigne de 40°C.

La fumure carbonée

La photosynthèse est le phénomène de base de la croissance des plantes. Le gaz carbonique est un des facteurs qui entre dans le schéma général de ce processus. Le rôle primordial joué par la concentration en CO₂ de l'atmosphère

sur la productivité des culturels est maintenant bien connu.

La teneur en CO_2 de l'air est de 0,03% (ou 300 ppm) en volume et dans le cas de serres bien isolées, ce pourcentage peut baisser jusqu'à 0,015% ce qui risque de pénaliser fortement la photosynthèse. D'où l'intérêt d'enrichir en CO_2 l'atmosphère des serres d'une part pour éviter ces situations critiques, d'autre part pour profiter de la réponse positive de la plupart des cultures à des teneurs plus élevées que la concentration normale.

Une étude conduite en collaboration avec l'Institut National de la Recherche Agronomique a montré la possibilité d'enrichir l'atmosphère des serres en gaz carbonique à partir des fumées du gaz naturel. Les concentrations variables selon le type de plantes sont de l'ordre de 1.000 à 1.500 ppm (0,10 à 0,15%).

Les résultats des expériences conduites dans ce domaine avec le Comité National Interprofessionnel de l'Horticulture sont excellents: par exemple, 80% de feuilles en plus pour le Dieffenbachia, précocité de floraison de 14 jours pour le Saint-Paulia. La figure 10 présente 2 FICUS Benjamina, l'un issu d'une serre témoin, l'autre d'une serre enrichie en CO_2 de façon contrôlée.

Les essais conduits avec un centre technique maraîcher de la région d'ORLÉANS ont montré pour le concombre, un rendement de la serre enrichie avec des fumées de gaz naturel supérieur de 25% par rapport à la serre témoin.

Des ensembles pour injection de CO_2 raccordables à la cheminée d'évacuation des produits de combustion de la plupart des générateurs de chaleur construits à partir d'un cahier des charges sont désormais proposés aux utilisateurs.

Les opérations de cuisson en boulangerie-biscuiterie industrielle

Une série de mesures effectuées sur les différents types de fours utilisés dans le secteur de la boulangerie-biscuiterie industrielle a fait ressortir les moins bonnes performances des fours cyclothermes.

Ce constat était imputable aux forts excès d'air liés à l'utilisation de brûleur à induction atmosphérique. L'installation d'un brûleur à

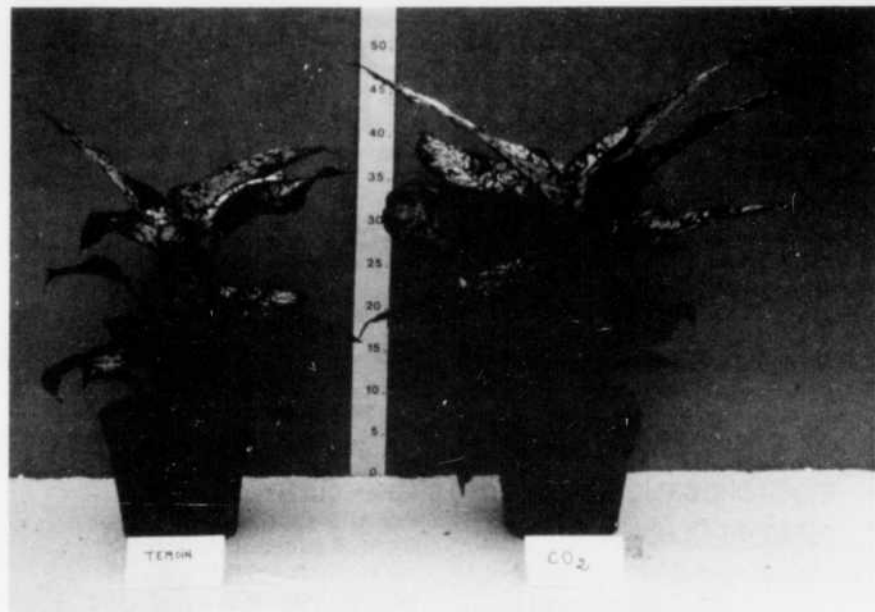


Figure 10 À gauche FICUS benjamina issu d'une serre non enrichie en CO_2 . À droite FICUS benjamina issu d'une serre enrichie en CO_2 .

contre-rotation sur une zone d'un four cyclotherme de cuisson de pain a été réalisée.

Les résultats sont extrêmement encourageants puisque le rendement de combustion de la zone équipée d'un brûleur à contre-rotation est augmenté de 19 points atteignant ainsi 86% sur PCI. Par ailleurs, la consommation spécifique pour l'ensemble du four a diminué de plus de 7%.

Autres exemples

Les exemples traités ci-dessus ne donnent qu'un aperçu des nombreuses autres possibilités d'utilisation du gaz naturel dans les industries agro-alimentaires, citons à titre d'exemple:

- le flambage des porcs en direct au gaz naturel;
- la production d'eau chaude par générateur à condensation;
- le chauffage de poste de thermolisation du vin par combustion submergée;
- le chauffage de laveuse de bouteilles par échangeurs immergés compacts.

On propose toutes les fois que cela est possible, des solutions gaz performantes permettant de produire la chaleur au plus près des appareils d'utilisation. Lorsque la décentralisation des moyens de production de chaleur ne peut être mise en œuvre, le gaz naturel

permet de récupérer la chaleur latente des fumées sur les chaudières de production de vapeur. Par ailleurs, ces chaudières offrent la possibilité d'être régulées, auto-contrôlées et gérées par automate programmable.

Conclusion

Par sa pureté, le gaz naturel utilisé à travers des équipements performants constitue un combustible de choix pour les industries agro-alimentaires.

Les possibilités d'utilisation qui s'inscrivent dans le cadre d'un marché potentiel important doivent permettre au gaz naturel de connaître un développement encore plus sensible.

Références

- FARDEAU — Le chauffage des liquides industriels par tubes et échangeurs immergés compacts, Communication au congrès ATG, 1983.
- FARDEAU — Le chauffage des liquides industriels au gaz naturel brochure GDF 84-11.
- DOUSPIS — Les brûleurs industriels à gaz — brochure GDF 1984.
- Revue de l'énergie — juin/juillet 1986 p. 389-409.
- BAILLE, JONON et LAJOUX — Contribution du gaz naturel aux cultures sous serres, Communication au congrès ATG, 1986.
- L'enrichissement des serres en CO_2 issu de la combustion du gaz naturel — Brochure GDF, mars 1986.
- Dossier chauffage localisé — basse température dans les serres — Brochure CNIH/GDF.

Nous Avons d'Excellentes Références !

Coopoly est la seule librairie agréée en ingénierie par le ministère des affaires culturelles du Québec.

Pas surprenant, car en plus d'être le distributeur exclusif des publications de l'École Polytechnique, Coopoly possède aussi un inventaire impressionnant de livres de références, en français et en anglais, des plus grandes maisons d'édition.

Coopoly vous offre aussi une vaste gamme de services qui vous faciliteront la vie:

- 2 services de commande:
 - standard
 - rapide
- service de livraison
- facilité de paiement:
 - facturation de 30 jours aux entreprises
 - cartes de crédit Visa et Mastercard

À bien y penser ... qui connaît vos besoins aussi bien que nous ?

COOPOLY

librairie scientifique
succursale informatique
papeterie

340-4851
340-4487
340-4841

dufresne farley samson brillon
ingénieurs-conseils

Chauffage — Plomberie — Climatisation Réfrigération —
Électricité — Expertises — Études énergétiques

200 ouest, rue Sauvé, Montréal, H3L 1Y9

Tél. 384-0440

Beaulier essai

ÉQUILIBRAGE DE LA VENTILATION
RIGUEUR ET FIABILITÉ

Maurice Beudet, ing.

7127, De Lorimier, Montréal, Qc H2E 2N7

(514) 376-0362

ÉTUDES, INGÉNIERIE,
APPROVISIONNEMENT,
GESTION DE PROJET,
CONSTRUCTION

Lavalin

Siège Social:
1100, boul. Dorchester ouest
Montréal, Québec H3B 4P3



SIAL

Compagnie Internationale
de Géophysique Inc.

- Etudes Géophysiques
- Hydrogéologie
- Vibration & Seismisite
- Géologie & Géochimie
- Exploration Minière
- Environnement

370 rue Mc Arthur
Saint-Laurent, Québec H4T 1X8

☎ (514) 737-5664

• Télex : GTS HTD MTL
• 05-821643

Le chauffage des bains industriels et la combustion submergée

François Cagnon

Exemples de bains industriels

De nombreux secteurs industriels ont des besoins de chaleur à basse température, inférieure à 100°C, pour le chauffage de bains. L'industrie mécanique utilise de tels bains pour la préparation des surfaces. On trouvera des bains de décapage ainsi que des bains de dégraissage, chauffés à des températures allant de 50 à 80°C. Lorsque les surfaces préparées seront traitées, elles traverseront des bains de chromatisation, de phosphatation ou autre, qui, pour être utilisables, devront être maintenus entre 45 et 90°C suivant le procédé.

Dans l'industrie agro-alimentaire, des besoins de chaleur importants se rencontrent, à 90°C pour le chauffage d'eau ou de solutions de lavage (eau sodée par exemple), à des températures plus faibles, 50°C, pour le traitement de carcasses en abattoir, voire même à des températures très faibles, vers 30°C pour le chauffage des serres.

Outre ces deux grands secteurs industriels, principaux consommateurs d'énergie pour le chauffage de liquides, de nombreuses applications ont des besoins similaires. On peut citer, par exemple, dans le domaine de l'industrie textile le lavage des fibres puis leur teinture.

Enfin des applications plus particulières ont des besoins de

chaleur voisins de ceux évoqués ci-dessus, bien que l'objectif soit la concentration de boues ou de liquides, donc l'évaporation d'eau et non son chauffage. C'est le cas en particulier dans l'industrie des pâtes et papier.

Solutions traditionnelles pour le chauffage des bains.

Les besoins évoqués plus haut ont depuis très longtemps été satisfaits par l'utilisation de chaudières centralisées produisant de la vapeur. La vapeur est utilisée comme un fluide caloporteur qui ira alimenter aussi bien les bains à chauffer, par l'intermédiaire d'un serpentin ou par injection directe de vapeur, que des éventuels séchoirs ou que le système de chauffage des bâtiments. La chaudière vapeur peut donc être considérée comme une source de chaleur universelle. L'utilisation finale de cette chaleur est très simple, l'ouverture d'une vanne suffisant à répondre au besoin local.

Cependant l'utilisation d'un système centralisé est complexe et la chaudière vapeur répond difficilement à une demande fluctuante. Enfin les pertes thermiques inévitables tout au long du réseau de distribution, alliées à l'inadéquation fréquente entre la puissance de la chaudière et les besoins de chaleur observés à un instant donné font que le rendement global de chauffage, que l'on définit comme le rapport entre l'énergie effectivement utilisée et l'énergie consommée est généralement proche de 60% quand il est ramené à la moyenne annuelle.

Les solutions décentralisées

Cette situation a amené plusieurs fournisseurs d'énergie ou fabricants de matériels thermiques, à étudier et proposer des matériels décentralisés répondant aux spécifications suivantes:

- Production et fourniture de chaleur au sein même du bain à chauffer;
- Rendements de chauffage importants, supérieurs à 80% du pouvoir calorifique supérieur (PCS);

— Encombrement minimal du bain afin de ne pas pénaliser l'utilisateur.

Le développement d'une gamme d'appareils, utilisant des surfaces d'échanges comme les tubes immergés, ou le principe de l'échange de chaleur par contact direct comme la combustion submergée, permet alors de proposer des équipements bien adaptés aux besoins en respectant une bonne adéquation entre les besoins de chaleur et la puissance installée, et en répondant correctement aux éventuels problèmes que peut poser le chauffage de bains particuliers.

Principe de la combustion submergée.

Procédé de chaleur utilisant le contact direct entre les fumées issues de la combustion et le liquide à chauffer, les matériels utilisés dans le monde sont essentiellement:

- Des équipements à aspersion,
- Des équipements à barbotage.

Dans les deux cas, la première condition à remplir est de réaliser une combustion complète avant de mettre les produits de combustion en contact avec le liquide à chauffer, ce qui revient à dire que la chambre de combustion ne contient pas de liquide.

Dans les équipements à aspersion, dont un exemple est présenté à la figure 1, la chambre de combustion, refroidie par une circulation de liquide autour de sa paroi, se situe au-dessus du niveau du bac de rétention. Le liquide venant du bain utilisateur est pulvérisé dans la tour de lavage en partie haute, les fumées circulant en sens contraire cédant leur chaleur.

Le rendement de chauffage de tels équipements est fonction du débit et de la température du liquide comme de la puissance du brûleur.

Dans les équipements à barbotage, dont un exemple est présenté en figure 2, la chambre de combustion est partiellement immergée dans le bain à chauffer et est donc noyée lorsque l'installation est à l'arrêt. Au démarrage du ventilateur, le liquide est chassé et la combustion peut alors s'effectuer correctement. Les fumées sont dispersées dans le bain sous forme

M. François Cagnon, est diplômé de l'École Supérieure d'Ingénieurs de Marseille.

Il passe deux ans en Nouvelle Calédonie au titre de la coopération durant lesquels il participe au développement de l'utilisation des énergies renouvelables sur ce territoire.

Travaillant pour Gaz De France depuis 1984, il participe au sein de la Direction des Études et Technique Nouvelles, aux recherches sur différents procédés destinés au chauffage des liquides industriels par le gaz naturel.

Depuis janvier 1986, il est détaché auprès de l'École Polytechnique de Montréal, où il participe aux études en cours sur l'utilisation du gaz naturel, plus particulièrement dans le domaine des tubes immergés compacts.

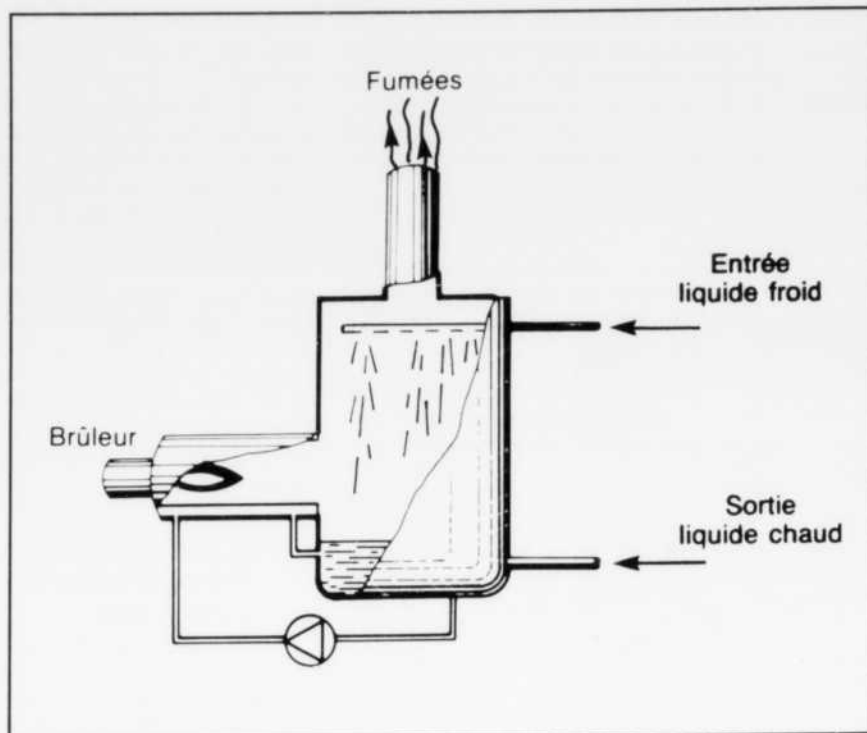


Figure 1 Équipement à aspersion.

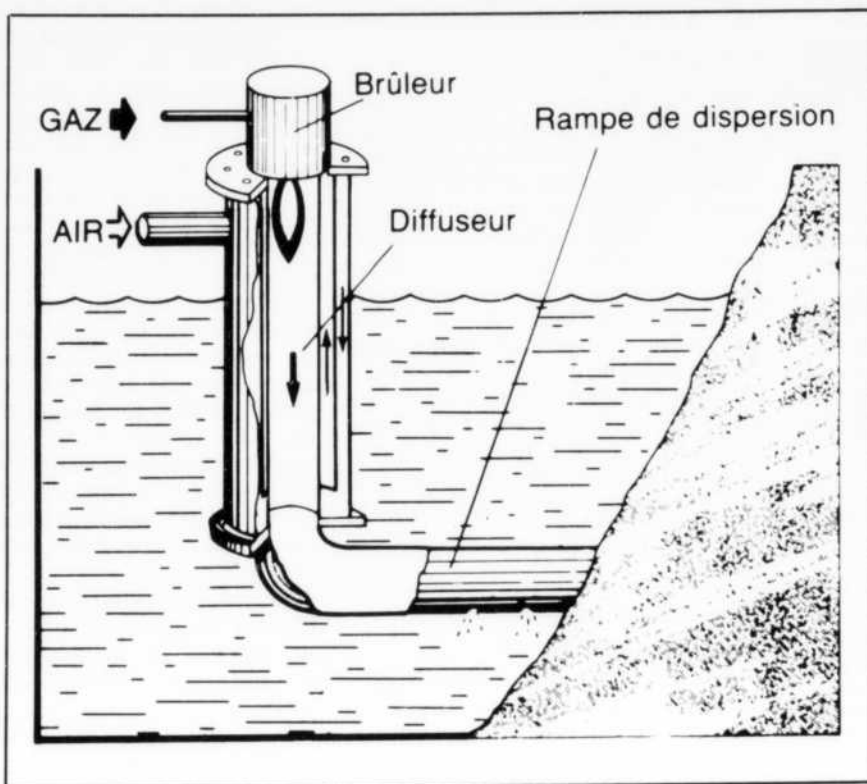


Figure 2 Équipement à barbotage.

de bulles à une profondeur comprise entre 500 et 800 mm, hauteur nécessaire pour réaliser complètement l'échange de chaleur.

Le rendement de l'équipement ne dépend alors plus que de la température du bain, celui-ci pouvant être considéré homogène

du fait de l'agitation importante induite par le passage des bulles.

Performances des équipements à barbotage

Nous nous intéresserons dans ce qui va suivre au cas des bains aqueux, c'est-à-dire des bains composés d'eau contenant ou non des produits en solution, ce qui est de loin le cas le plus général.

Nous avons dit que le rendement chauffage d'un équipement à barbotage est seulement fonction de la température du bain. Ceci est vrai si la hauteur de barbotage, c'est-à-dire la hauteur de liquide que traversent les bulles, est suffisante pour que les fumées puissent sortir en équilibre thermodynamique avec celui-ci.

Dans la mesure où cette condition est réalisée, les fumées seront extraites à la température du bain et saturée en eau à cette température. Or la quantité d'eau nécessaire pour saturer 1 kg de fumées sèches croît exponentiellement avec la température. S'il faut 10 g d'eau pour saturer 1 kg de fumées à 14°C, il en faudra 100 g à 53°C et 1 kg à 87°C. D'autre part, la quantité d'eau produite lors de la combustion est, pour le gaz naturel distribué au Québec, de 140 g/kg de fumées sèches correspondant à une température de rosée de 59°C (d'après Gaz Métropolitain).

Dans ces conditions, si la température du bain à chauffer est inférieure à cette température de rosée, une partie de l'eau produite lors de la combustion sera condensée, diluant ainsi le bain et aboutissant à des rendements de chauffage supérieur à 90% (du PCS).

Si la température du bain est supérieure à cette température, de l'eau sera évaporée pour obtenir la saturation des fumées, utilisant une part de plus en plus importante de l'énergie produite au fur et à mesure que la température du bain augmente. Le rendement de chauffage va donc diminuer progressivement et s'annuler pour une température proche de 90°C, appelée température maximum de chauffage. En ce point, toute la chaleur apportée par la combustion est utilisée pour évaporer la quantité d'eau nécessaire à la saturation des fumées.

La courbe exprimant le rendement de chauffage d'un équi-

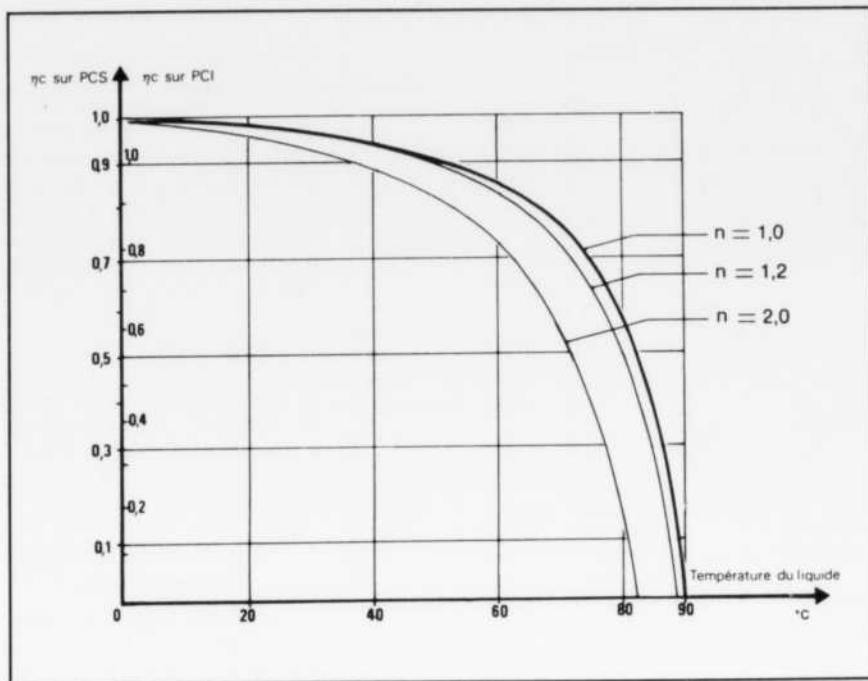


Figure 3 Rendement d'un équipement de combustion submergée en fonction de la température du bain et du taux d'aération (n).

pement de combustion submergée en fonction de la température du bain est présentée à la figure 3. On peut noter la décroissance extrêmement rapide du rendement à partir d'une température de bain de 70°C. L'examen de cette courbe nous amène en pratique à conclure que, pour des besoins de chauffage, l'utilisation de la combustion submergée est très intéressante jusqu'à des températures de l'ordre de 60°C. Cependant pour des températures supérieures à 65 ou 70°C, le choix de ce mode de chauffage devient beaucoup plus discutable.

Nous pouvons aussi remarquer, au vu des différentes courbes, l'influence que peut avoir le taux d'aération, c'est-à-dire le rapport entre la quantité d'air réellement fourni au brûleur et la quantité d'air stoechiométrique.

Une augmentation du taux d'aération abaissant la température de rosée des fumées, nous constatons que pour des taux d'aérations élevés, le rendement de chauffage est plus faible, à température de bain égale, que à la stoechiométrie, la température maximale de chauffage diminuant elle aussi. En conséquence, les équipements de combustion submergée sont réglés pour fonctionner avec de faibles taux d'aération, de l'ordre de 1,2.

Influence des produits de combustion

Les produits de combustion étant en contact direct avec le liquide à chauffer, il est nécessaire de s'assurer que ceux-ci n'ont pas d'influence sur le bain à chauffer. Nous nous plaçons toujours dans l'hypothèse d'un bain aqueux.

Les fumées issues de la combustion complète du gaz naturel réalisée avec un faible excès d'air, se composent essentiellement d'azote, de gaz carbonique, de vapeur d'eau et d'oxygène. À cela nous pouvons rajouter des traces d'oxyde d'azote en quantités variables suivant le brûleur utilisé et son réglage. L'azote comme l'oxygène n'ont pas une influence notable sur le bain. Ces gaz sont, de toute façon, en contact avec le bain à la surface de celui-ci.

Nous avons vu que la vapeur d'eau sera éventuellement condensée dans le bain et on observera une dilution du bain. Dans l'hypothèse où le bain est à une température supérieure à la température de rosée des fumées on aura évaporation et donc concentration du bain.

L'influence du gaz carbonique est déterminante. Représen-

tant environ 10% du volume des fumées sèches, il est soluble dans l'eau. La quantité de CO_2 qui peut se dissoudre dans un litre d'eau va de 15 mg à 80°C pour monter jusqu'à 75 mg à 30°C. Cette dissolution aboutit à la formation d'un acide faible avec un PH de l'ordre de 5.

Cette acidification, très rapide pour l'eau distillée, est beaucoup plus lente dans le cas de l'eau de ville qui contient divers éléments dissous. En particulier les bicarbonates contenus dans cette eau tamponnent la solution, l'acidification ne débutant qu'après des temps de chauffage très long. À titre d'exemple, pour abaisser le PH d'une eau contenant 0,005 mole/l de bicarbonates, il faut lui apporter environ 10 kWh/l correspondant au réchauffage de cette même eau 200 fois de 10 à 50°C.

Par contre cette acidification du liquide rend les procédés de chauffage par contact direct impropres à une utilisation sur des bains fortement basiques, c'est-à-dire ayant des PH supérieurs à 9. Dans ce cas la dégradation du bain est en effet extrêmement rapide.

L'influence des oxydes d'azote, présents en faible quantité dans les fumées, est beaucoup moins importante. Le dioxyde d'azote seul est réellement soluble dans l'eau et sa dissolution aboutira à la formation d'acides nitreux et nitrique, de nitrates et de nitrites. Ces composants, dont l'apparition et la concentration sont fortement fonction de la température et du PH du bain, n'ont cependant une influence notable que dans le cas de chauffage extrêmement long.

En conclusion, nous pouvons dire que seul le dioxyde de carbone a une influence notable sur les bains chauffés et que cette influence proscriit en particulier le chauffage de solutions fortement basiques.

Application de la combustion submergée pour le chauffage

De nombreuses applications ont été développées en France utilisant le principe de la combustion submergée. Ce procédé qui a fait son apparition sur le marché en 1981 a du attendre 1983 pour voir sa diffusion augmenter. Depuis cette date, les ventes d'équipe-

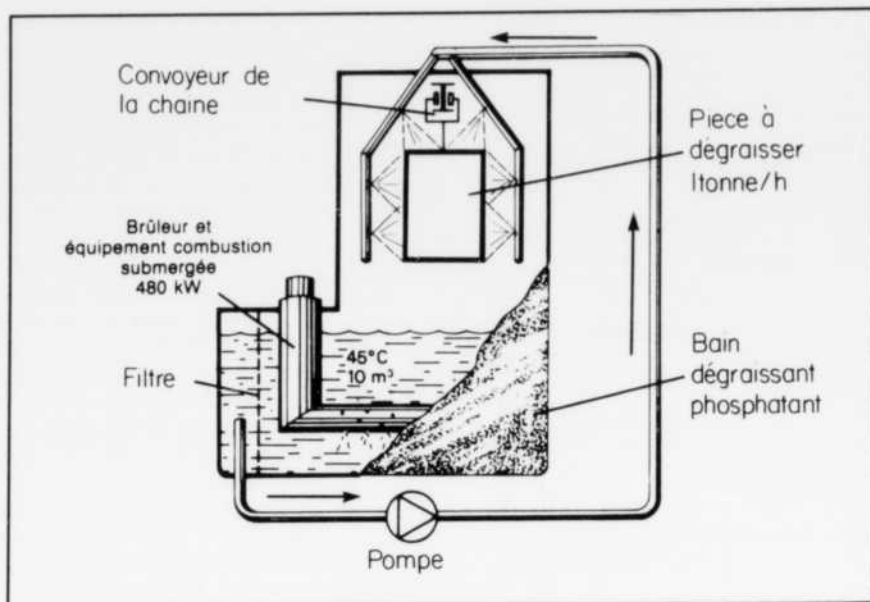


Figure 4 Tunnel de phosphatation par aspersion chauffé par combustion submergée.

ments ont démarré assez fortement permettant d'aboutir à la fin de l'année 1985 à une centaine d'appareils en service, leur puissance variant entre 150 kW et 1MW.

Les deux tiers de ces applications se trouvent dans le secteur du traitement des surfaces pour le chauffage de bains de décapage ou de phosphatation par exemple.

La figure 4 présente un équipement installé sur un tunnel de dégraissant phosphatant par aspersion. Sur cette installation, antérieurement chauffée à la vapeur, il a suffi de disposer l'équipement au fond du bac où est collecté le liquide, sans par ailleurs modifier le tunnel.

Le reste des applications concerne le secteur de l'agro-alimentaire pour le chauffage des serres et autres applications (Échaudage des carcasses de porc, thermolisation du vin, etc).

Applications de la combustion submergée pour le traitement d'effluents

Ces applications peuvent être envisagées de deux façons. D'une part d'un point de vue chimique, en associant le chauffage et l'action des produits de combustion. Il s'agit alors de la carbonatation des eaux ou de l'oxydation des rejets industriels. Dans ce second cas,

on maintiendra un fort excès d'air au brûleur, le chauffage accentuant l'action de l'oxygène.

D'autre part, on peut utiliser le pouvoir évaporant du procédé pour effectuer de la concentration de boues ou de liqueur. Cela peut se faire à haute température (80°C et plus) avec une hauteur de bain normale. Des fumées sortant saturées d'un bain à cette température évaporent en effet de l'ordre de 4 kg d'eau par m³ de gaz naturel brûlé. On peut aussi effectuer un barbotage sous une plus faible hauteur de liquide de façon à extraire les fumées avant que l'équilibre thermique ne soit atteint. On pourra obtenir alors les mêmes rendements d'évaporation que dans le cas précédent mais avec des températures de bain plus faibles.

Nouvelles études sur la combustion submergée

Nous avons vu que le rendement d'un équipement de combustion submergée ne dépend que de la température du bain *lorsque la condition d'équilibre thermique est obtenue*. L'obtention de l'équilibre dépend de différents paramètres tels que la hauteur de bain, mais aussi le mode de répartition des fumées dans le bain, induisant des diamètres de bulle différents ou une agitation plus ou moins intense du bain.

Une meilleure connaissance des phénomènes d'échange de chaleur et de masse entre les bulles et le liquide permettrait d'affiner la conception des équipements de combustion submergée et d'optimiser le choix d'un équipement en fonction du bain à chauffer, ou à concentrer. Ces objectifs sont à la base de travaux effectués à l'École Polytechnique de Montréal. Ces recherches, théoriques et expérimentales, portent essentiellement sur l'étude de différents diffuseurs et sur l'influence de la hauteur de barbotage. Elles devraient aboutir à un modèle informatique permettant d'optimiser la conception des équipements.

Perspectives

Nous avons vu que, pour de nombreux problèmes de chauffage ou de concentration de bains, la combustion submergée apporte une solution originale, très intéressante d'un point de vue énergétique et pouvant améliorer les traitements grâce à l'agitation du bain qui découle de son utilisation. Le développement industriel de cette technique est passé par l'acquisition de connaissances sur la compatibilité chimique entre les fumées de combustion et les différents bains à chauffer. Cette connaissance est en effet indispensable pour définir son domaine d'application.

Une meilleure définition des critères de conception des équipements, résultant des travaux en cours à l'École Polytechnique de Montréal permettra une optimisation de ces appareils. Les atouts de cette technique qui sont sa simplicité d'installation et d'utilisation ainsi que les excellents rendements de chauffage observés, devraient ainsi se trouver renforcés, permettant ainsi d'améliorer la diffusion que connaît ce produit.

Références

- THOUAULT A., «Les possibilités d'application de la combustion submergée au chauffage des bains industriels et au traitement d'effluents liquides.», Communication au 96^e congrès de l'industrie du Gaz (1979).
- GAGNON F. et VINCHON A., «Bilan du développement de techniques de chauffage des liquides industriels.», Communication au 103^e congrès de l'industrie du Gaz (1986).
- FARDEAU B., «Le chauffage des liquides industriels au gaz naturel.», Gaz de France, Direction des Études et Techniques Nouvelles (11. 1984).

Industrie chimique et pétrochimique

Le gaz naturel, matière première

Kébir Ratnani

Introduction

Le gaz naturel n'est pas seulement un combustible propre, contribuant ainsi à la dépollution de l'air, mais il est devenu une des plus importantes matières premières pour les industries chimique et pétrochimique. Il est en effet utilisé dans plusieurs procédés industriels, notamment pour la fabrication de produits finis ou de synthèse. En 1984, un total de 110 milliards de mètres cubes de gaz naturel ont été utilisés dans le monde, ce qui représente 7% de la consommation énergétique mondiale (1).

Les produits chimiques couramment fabriqués à partir du gaz naturel sont: l'ammoniac, le méthanol, l'hydrogène, le noir de carbone et plusieurs autres produits finis ou intermédiaires, comme on peut le voir au tableau (1).

Le reformage du gaz naturel, pour produire du gaz de synthèse (CO , H_2), représente environ 80% de l'utilisation du gaz naturel comme matière première en milieu industriel.

L'ammoniac

L'ammoniac (NH_3) est le plus grand consommateur de méthane comme matière première. Il est produit par une variation du procédé HABER-BOSCH (2). L'hydrogène nécessaire à la synthèse de l'ammoniac est obtenu par le reformage du gaz naturel (CO , H_2). Le procédé est décrit sommairement à la figure (1).

L'ammoniac est, entre autres, utilisé pour produire des engrais, de l'urée et de l'acide nitrique. L'industrie des fertilisants, tout comme celle de l'ammoniac, devrait connaître une augmentation annuelle d'environ 3% à l'échelle mondiale, ce qui reflète une bonne croissance pour ce segment d'industrie et devrait assurer une forte demande pour le gaz naturel.

Le méthanol

Le méthanol (CH_3OH) est produit à partir des gaz de synthèse

Monsieur Kébir Ratnani est conseiller senior à la Division Développement et transfert technologique chez Gaz Métropolitain.

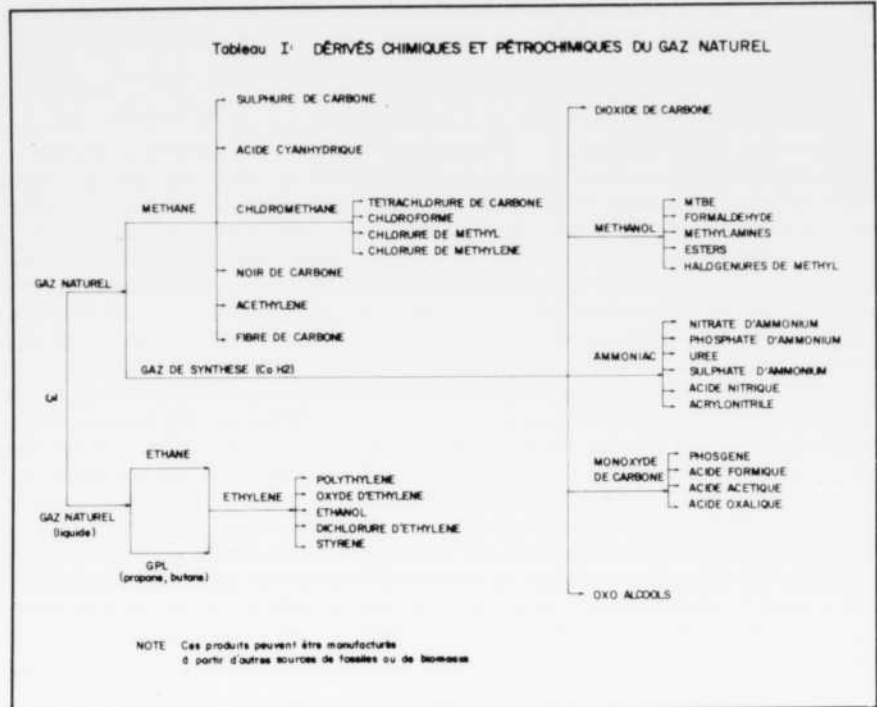


Tableau 1

(CO , H_2), obtenus par reformage du gaz naturel ou du naphte. Les dérivés du méthanol sont décrits au tableau (1). Cependant, il est intéressant de noter qu'un des dérivés du méthanol, le M.T.B.E. (Méthyl-Terbutyl-Ether) est de plus en plus utilisé comme additif pour les carburants remplaçant le tétra-éthyle de plomb dans la fabrication de l'essence sans plomb.

De nouvelles synthèses obtenues à partir du méthanol et de certains mélanges (CO , H_2) ont atteint un développement industriel avancé en vue de produire des carburants synthétiques (procédé Mobil en Nouvelle-Zélande), des

oléfines et de l'éthylène de glycol (5). La rentabilité de ces procédés dépend étroitement des fluctuations du prix du pétrole. Un diagramme simplifié de la production du carburant synthétique et autres dérivés (6) est représenté à la figure (2).

Utilisation du gaz naturel

Le gaz naturel utilisé comme matière première est en pleine croissance et ce, pour les raisons suivantes:

1. Le prix compétitif du gaz naturel et l'amélioration de l'efficacité énergétique des différents procédés cités précédemment (récupé-

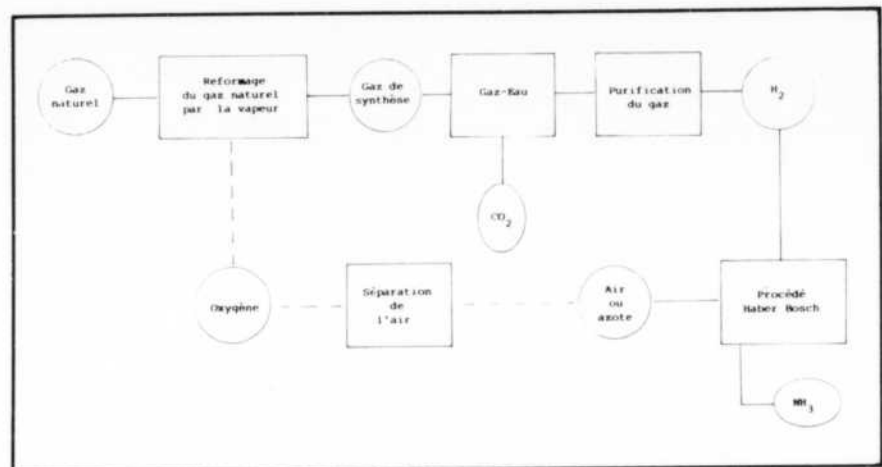


Figure 1 Production de l'ammoniac: Procédé simplifié Haber-Bosch

ration de la chaleur, équipements plus performants);

2. La mise au point de procédés plus efficaces pour la fabrication de produits intermédiaires tels que le formaldéhyde et l'acide acétique. Ceci a permis au gaz naturel de remplacer le pétrole, traditionnellement utilisé comme matière première;

3. Le développement de nouveaux procédés pour améliorer la qualité de l'environnement:

3a. la production d'additifs aux carburants remplaçant ceux à base de plomb;

3b. la récupération des émissions atmosphériques du dioxyde de soufre (SO₂) dans les usines de métaux non ferreux, pour la fabrication du soufre, par un procédé développé par Allied Chemical (7).

La consommation du gaz naturel par tonne de produit ou inter-

médiaire chimique est représentée au tableau (1).

Recherche et développement

De nouvelles avenues s'ouvrent peu à peu en recherche et développement pour la production de produits chimiques et pétrochimiques. Ainsi, un projet pilote utilisant le procédé Benson pour la fabrication de l'éthylène et le monomère de chlorure de vinyle à partir du gaz naturel, sera mis à l'essai cette année par la compagnie Kinetics Technology International de Californie. D'autres projets de recherche portent présentement sur la chimie du carbone simple et plus particulièrement sur la conversion directe du méthane en produits supérieurs par voie catalytique.

Ces recherches visent à mettre au point des catalyseurs pouvant opérer dans des conditions moins sévères qu'auparavant. Les résultats obtenus sont prometteurs et offrent des possibilités d'applications industrielles à moyen terme. Ainsi en va-t-il des voies catalytiques de conversion directe du méthane pour la production des oléfines: la catalyse superacide, hétérogène et organométallique.

D'autres procédés utilisant la pyrolyse et la biotechnologie pour la fabrication de produits de haute valeur sont actuellement en développement à travers le monde. Par exemple, la pyrolyse est actuellement utilisée pour la fabrication des fibres de carbone qui entrent dans la composition des carrosseries d'automobiles et d'avions. Toutefois, ce procédé fait encore l'objet d'expériences.

Conclusion

L'utilisation du gaz naturel comme matière première est en pleine expansion. Les recherches en cours, portant notamment sur la conversion directe du méthane, ouvriront de nouveaux marchés aux produits dérivés du gaz naturel. La société Gaz Métropolitain est déjà engagée dans cette voie avec différents partenaires de recherche. Les fruits de ces travaux permettront d'assurer l'avenir de l'industrie chimique et pétrochimique québécoise et favoriseront son expansion, tout en lui évitant de subir les soubresauts du marché pétrolier et les crises d'énergie connues récemment.

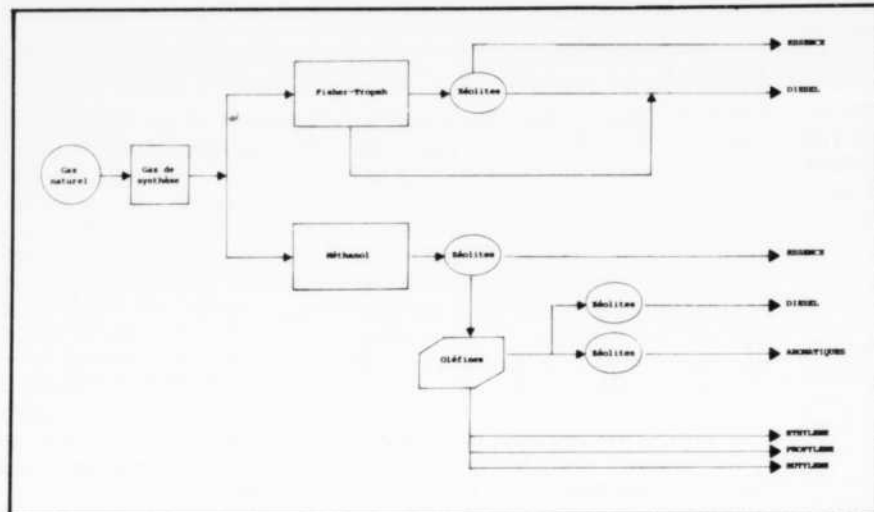


Figure 2 Diagramme simplifié de la production du carburant synthétique

Produit	Gaz naturel	
	Matière première	Volume équivalent (m ³)
M.T.B.E.	0,37 T. méthanol	290
Ammoniac	0,60 T. gaz naturel	855
Mélange d'alcool	0,37 T. gaz naturel	1.220
Butane 1-4 Diol	0,31 T. acétylène	765
	0,67 formaldéhyde	595
Carburant	1,45 T. gaz naturel	2.030
Fibres de carbone	1,33 T. gaz naturel	1.870 (stoechiométrique)
Noir de carbone	4,05 T. gaz naturel	
Soufre	0,40 T. gaz naturel	532
<i>Produits intermédiaires</i>		
Méthanol	0,570 T. gaz naturel	790
Formaldéhyde	0,64 T. gaz naturel	890
Acétylène	1,77 T. gaz naturel	2.480
Hydrogène	4,1 T. gaz naturel	5.620

Note: Il est à remarquer que ces produits peuvent être produits à partir d'autres fossiles (pétrole, charbon, hydrogène) et par électrolyse.

Tableau 1 Gaz naturel requis par tonne de produit

Références

- (1) J. Saint-Just et A. Garat, «Le gaz naturel: une matière première de l'industrie chimique et pétrochimique». *Revue de l'énergie*, p. 681-689, août/septembre 1986.
- (2) Consodine, *Chemical and process technology encyclopedia*. McGraw-Hill, 1974.
- (3) *Études internes*, Gaz Métropolitain, 1985.
- (4) Michael E. Samsa et al., «Status and outlook for natural gas use as chemical feedstock». *Gaz Research Insights*, p. 1-20, août 1984.
- (5) «Ethylene and vinyl chloride monomer production from natural gas». *Chemical Engineering*, p. 9, 13 avril 1987.
- (6) John J. Wise et A. J. Silvestri, «Mobil process efficiently converts methanol to gasoline». *Oil and Gas Journal*, p. 140-142, 22 novembre 1976.
- (7) «New Processes and Technology Alert». *Chemical Engineering*, p. 140, 17 juillet 1978.

Commande électronique d'injection de gaz naturel dans les moteurs à combustion interne

Michel Gou,
Claude Guernier,
Bruno Detuncq,
Mathieu Perrault
et Gilles Allard

Même si le Canada est particulièrement riche en ressources naturelles, ses importations de pétrole en 1979 atteignaient 34 000 m³ par jour. À cette date, la flambée des coûts du pétrole et leur incidence négative sur l'économie canadienne obligea le gouvernement à instaurer un programme énergétique national. Ce programme visait une diminution des importations par une diversification des combustibles et par la rationalisation de l'utilisation de ressources énergétiques nationales. Trois ans plus tard, grâce à la promotion principalement de l'électricité et du gaz naturel dans les secteurs industriels et résidentiels, le Canada était redevenu un exportateur net de pétrole.

Les efforts du gouvernement ne s'arrêtaient pas là puisqu'un programme visant le secteur du transport fut établi et le gaz naturel fut alors identifié comme carburant de remplacement par excel-

Les auteurs sont membres du groupe de recherches sur l'utilisation du gaz naturel comme carburant de l'École Polytechnique de Montréal. Le groupe, subventionné par Gaz Métropolitain Inc., Pétroles Esso Canada et Énergie, Mines et Ressources Canada, est engagé dans le développement d'une trousse d'injection électronique et dans l'étude de l'influence de divers additifs, sur la combustion du gaz naturel, dans les moteurs.

Michel Gou, ing., est professeur titulaire au département de génie mécanique de l'École Polytechnique.

Claude Guernier, ing., est professeur agrégé au département de génie mécanique de l'École Polytechnique.

Bruno Detuncq, ing., est chargé d'enseignement au département de génie mécanique de l'École Polytechnique.

Mathieu Perrault, ing. était inscrit au 2^{ème} cycle, au département de génie mécanique de l'École Polytechnique lors de la réalisation de ces travaux. Il est actuellement à l'emploi de la compagnie Bombardier.

Gilles Allard, ing., de la Direction des études et techniques nouvelles de Gaz de France, était chercheur invité au département de génie mécanique lors de la réalisation de ces travaux.

lence. Le secteur du transport est particulièrement important puisqu'au Québec, par exemple, il représente 30% de la consommation énergétique totale de la Province [1]. Malheureusement, la seule volonté gouvernementale n'est pas suffisante pour arriver à remplacer l'essence, le carburant de référence pour tous les autres. L'essence, telle qu'elle est connue aujourd'hui, a bénéficié de plus de 100 ans de développements technologiques et la technologie du gaz naturel comme carburant a donc un long chemin à parcourir avant de pouvoir offrir les mêmes avantages. Actuellement, les seuls avantages du gaz naturel carburant sont l'importance de ses réserves au Canada et ailleurs et son coût de production moindre et ils le seront sans doute encore pour plusieurs années. Par contre, plusieurs inconvénients en réduisent l'attrait.

Nous présentons donc ici certains des travaux de recherche terminés et en cours, visant à améliorer la technique d'induction et de combustion du gaz naturel dans les moteurs à combustion interne.

La situation actuelle

Même si en Italie plus de 300 000 véhicules sont en opération depuis l'après guerre, c'est la Nouvelle Zélande qui a ravivé l'intérêt porté au gaz naturel carburant en adoptant, en 1979, un plan de remplacement visant la conversion de 200 000 véhicules d'ici 1990. Actuellement 80 000 véhicules utilisent ce carburant en Nouvelle-Zélande.

Quant au Canada, sa situation est décrite par le tableau 1 [2] qui montre la répartition démographique Canadienne des véhicules circulant au gaz naturel au 31 août 1986.

Province	Véhicules
Québec	2952
Ontario	2176
Saskatchewan	16
Alberta	616
Colombie Britannique	3743
Manitoba	15
Total	9518

Tableau 1 Population de véhicules convertis au gaz naturel

Comparé à une population totale de plus de 15 millions de

véhicules, il est visible que le gaz naturel carburant ne touche encore que les pionniers et on est bien loin des prévisions Canadiennes établies par certains à 100 000 véhicules pour 1990. Il faut avouer que le prix du pétrole n'est plus aussi élevé qu'il l'était et que l'essence ne coûte que 0,58\$/litre alors que le gaz naturel coûte 0,34\$/litre équivalent.

La différence de prix entre le gaz naturel et le pétrole, même si elle est maintenant réduite, a favorisé l'essor de la recherche et du développement sur les utilisations du gaz naturel comme carburant moteur. À l'origine et encore très largement à l'heure actuelle, la plupart des équipements de conversion des moteurs au gaz naturel provenaient d'Italie. Leurs limitations sont maintenant bien connues ce qui a suscité des développements techniques récents, par des compagnies canadiennes, développements qui permettent d'espérer que la tendance sera bientôt renversée et que le Canada pourra devenir, dans un avenir rapproché, un exportateur de technologie et d'équipement dans ce secteur. En effet, plusieurs groupes de recherche se sont créés et des investissements de plusieurs millions de dollars ont été consentis pour favoriser la recherche et le développement.

Les avantages et les inconvénients du gaz naturel carburant

Certaines caractéristiques physiques du gaz naturel le rendent particulièrement attrayant en tant que carburant et en particulier, il faut citer:

- une augmentation possible du rendement du moteur par l'utilisation d'un taux de compression plus élevé grâce à son indice d'octane d'environ 130;
- une combustion plus complète grâce à l'état gazeux du carburant. Cet état devrait favoriser le démarrage à basse température et offrir généralement une diminution de la formation de gaz polluants;
- une diminution des coûts d'entretien du moteur par une augmentation de la durée des bougies et de l'huile de lubrification et une diminution de la formation des dépôts à l'intérieur du cylindre;

— une sécurité accrue puisque le gaz naturel étant plus léger que l'air se dissipe rapidement en cas de fuite.

L'état actuel de la technologie de conversion et le faible développement du réseau de distribution ne permettent pas toujours de profiter de ces avantages. Au contraire l'utilisateur doit faire face à certains inconvénients qui ne sont pas tous inhérents au carburant. Citons par ordre d'importance :

— une perte de puissance de l'ordre de 18 à 20%. Cette perte de puissance est causée en grande partie (10 à 12%) par l'état gazeux du carburant qui, en se substituant à l'air qui remplit les cylindres, contribue à la diminution du rendement volumétrique. L'autre partie (8%) provient de la présence d'un mélangeur qui n'est rien d'autre qu'une buse supplémentaire, introduit en amont du carburateur et jouant pour le gaz le même rôle que le carburateur pour l'essence. Dans la majorité des cas, l'automobiliste voulant convertir son véhicule au gaz naturel se voit quand même obligé de conserver un système bi-combustible du fait de la rareté des postes de ravitaillement en gaz naturel et il faut noter que cette dernière perte se fait aussi sentir en fonctionnant à l'essence;

— une diminution du rendement thermique causée par une vitesse de combustion plus lente. Pour réduire cette perte, il faut avancer l'allumage de façon significative;

— une faible autonomie causée par la petite capacité et l'encombrement des réservoirs et une augmentation de la masse du véhicule causée par leur installation;

— finalement, une consommation spécifique élevée, des difficultés de démarrage par très grand froid et même des ratés à chaud; tous ces problèmes sont causés par un contrôle inadéquat du débit du carburant dans l'état actuel de la technologie.

Trousses de conversion

En raison de l'étendue du territoire Canadien et du faible développement du réseau de distribution de gaz carburant, les moteurs convertis au gaz naturel peuvent être utilisés indifféremment à l'essence ou au gaz naturel. Ainsi, on ajoute au circuit d'alimentation du véhicule existant, les composants

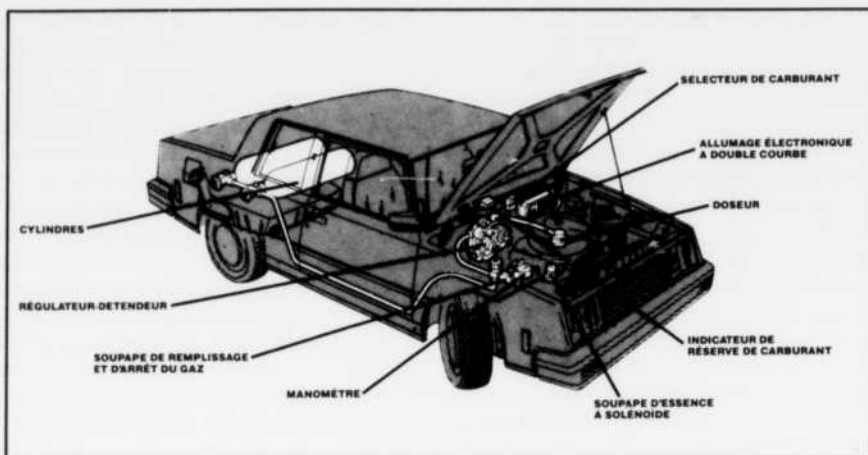


Figure 1 Installation typique d'un système mixte: gaz naturel-essence

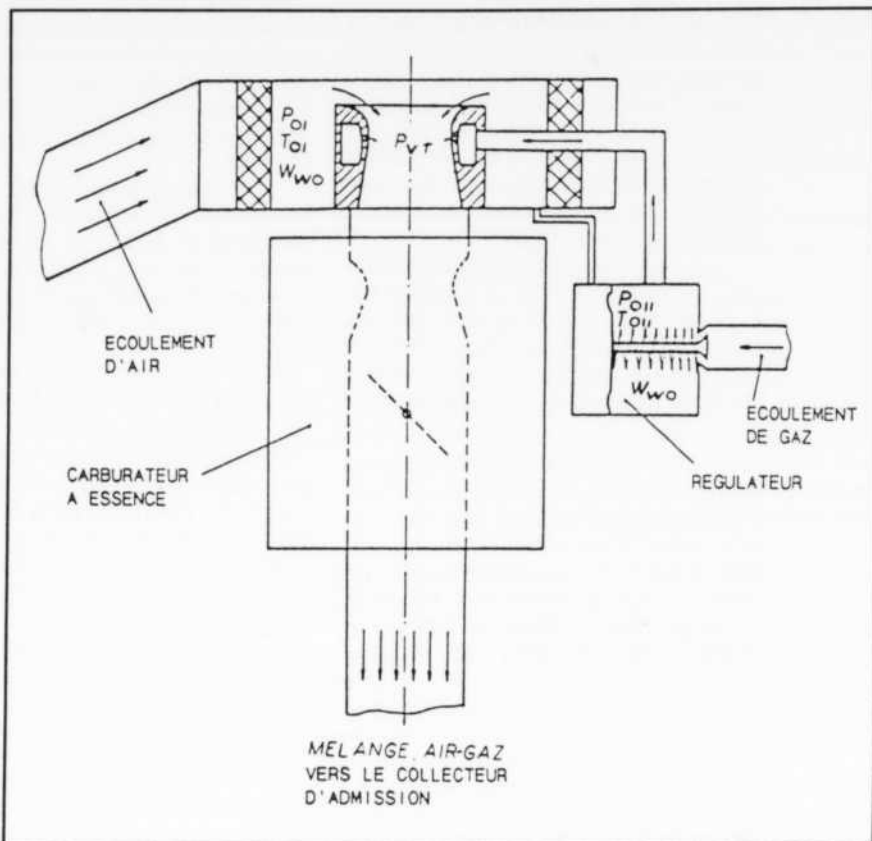


Figure 2 Disposition du mélangeur et principe de fonctionnement (tiré de [9])

suivantes: un ou deux réservoirs de stockage, un régulateur et un mélangeur.

Le gaz naturel est emmagasiné sous une pression maximale réglementée de 20,4 MPa (3000 lb/po²) dans les réservoirs et est admis au moteur à la pression atmosphérique, après avoir été détendu dans le régulateur à trois étages situé sous le capot moteur. Du régulateur, le gaz naturel passe au moteur par le mélangeur de

type Venturi installé par dessus le carburateur existant et n'empêchant donc pas le fonctionnement à l'essence. La figure 1 montre l'agencement général tandis que la figure 2 en montre le principe de fonctionnement.

Il est utile de rappeler ici que la dépression, induite au col du Venturi et utilisée pour régler le débit de gaz naturel admis au moteur, est régie par les variables suivantes:

- température de l'air ambiant;
- débit massique de l'écoulement;
- pression en amont du Venturi;
- dimensions physiques du Venturi (sections d'entrée et du col);
- caractéristiques physiques du fluide (densité et chaleur spécifique).

Conditions d'opération

Même si les troupes de conversion actuellement utilisées ont été développées au début des années 50, elles fonctionnent relativement bien à température constante. Pourtant, ce n'est pas toujours le cas dans des conditions climatiques canadiennes.

La fonction des principaux éléments de la trousse est décrite ci-dessous.

(1) Le régulateur doit:

- fournir le débit de gaz requis à une pression constante, et ce, quelles que soient les conditions ambiantes et de stockage. Par elle-même, la détente provoque une forte variation de la température d'alimentation du gaz. Ainsi, on peut fixer les conditions suivantes d'opération [7]:

- pression de stockage: de 1,35 à 20,5 MPa
- températures: air ambiant: de -40°C à 120°C — GNC: de -140°C à 120°C .

(2) Le mélangeur doit quant à lui:

- créer un différentiel de pression qui sera perçu par le régulateur; ce signal très faible peut être aussi bas que 300 Pa dans certaines conditions de fonctionnement, posant ainsi de graves problèmes d'opération;

- admettre au moteur le mélange adéquat; à cause des régimes transitoires de fonctionnement du moteur des véhicules, le rapport stoechiométrique est normalement appelé à varier dans le temps suivant le régime et la charge. Les essais effectués sur moteur Ricardo montrent que cette variation, même si elle est moins importante que lors du fonctionnement à l'essence, devrait être de l'ordre de grandeur suivant:

- économie: Λ optimal = 1,05 (mélange pauvre)
- puissance: Λ optimal = 0,95 (mélange riche)

dans laquelle Λ est le rapport du quotient des débits massiques d'air et de carburant aux

conditions réelles au quotient des débits massiques d'air et de carburant aux conditions stoechiométriques;

- mélanger l'air et le gaz naturel de façon homogène; en fait, même si le mélange est homogène à cet endroit, il ne l'est souvent plus à la soupape d'admission à cause des coudes dans les conduits d'admission, ces coudes agissant alors comme séparateurs mécaniques (centrifuges);

- occasionner une perte de charge minimale afin de ne pas trop pénaliser le fonctionnement à l'essence.

Pour mieux comprendre le fonctionnement du régulateur et pour évaluer l'influence de divers paramètres, dans le but d'améliorer cet appareil, une simulation mathématique des débits d'air et

de gaz naturel obtenus dans le mélangeur, en fonction de conditions variables de température et de pression de stockage, fut réalisée en utilisant les bornes déterminées ci-haut.

Des logiciels furent développés pour décrire le débit massique de gaz naturel admis au moteur en fonction des bornes posées. Les principaux résultats de cette simulation indiquent la variation importante du mélange de part et d'autre de la valeur d'étalonnage. La simulation a donc permis de constater le besoin de tenir compte des températures des gaz admis au mélangeur et le besoin de contrôler le mélange dans des proportions massiques plutôt que volumétriques comme c'est le cas dans les mélangeurs utilisés actuellement.

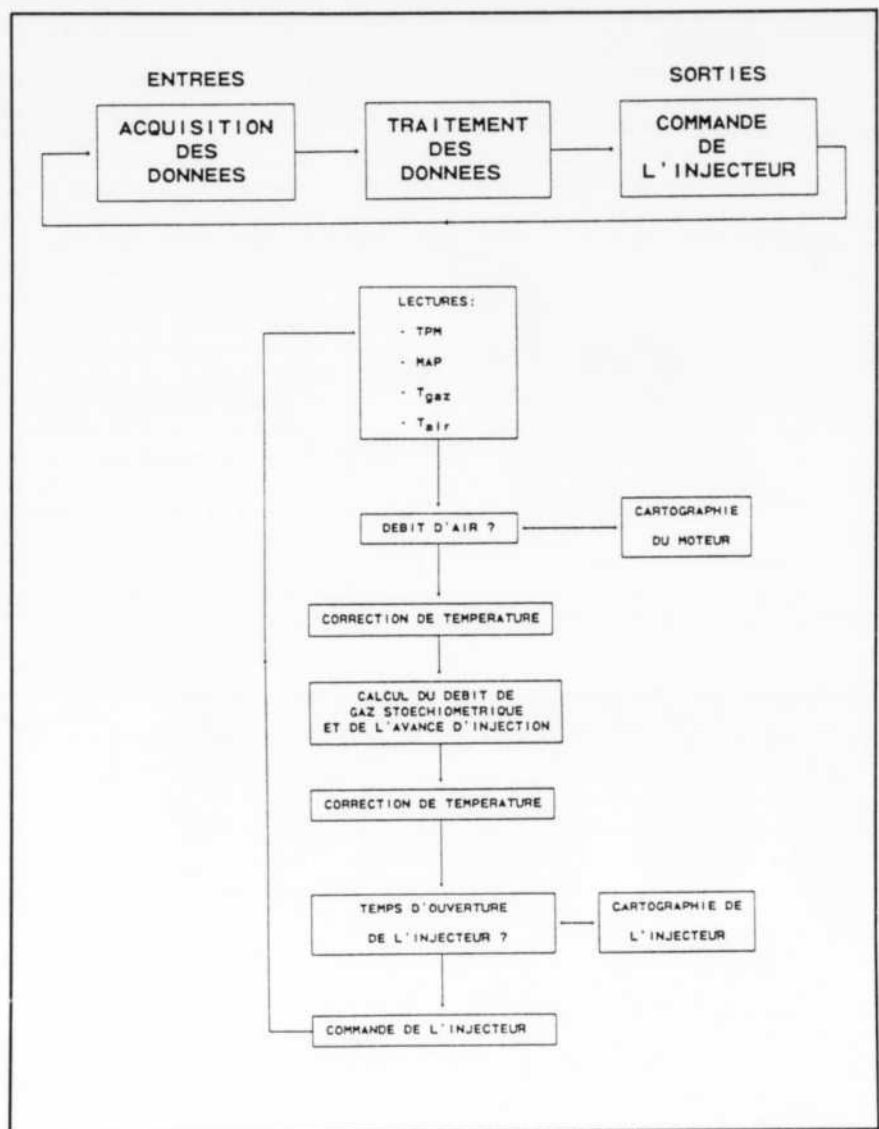


Figure 3 Séquence de la commande (tiré de [5])

La régulation électronique

La performance des trousse de conversion basée sur un mélangeur s'avérant parfois insatisfaisante et ne satisfaisant pas les objectifs modernes de dosage de carburant, la conception d'une trousse d'injection à commande électronique basée sur un système en boucle fermée, autoadaptative, fut réalisée [6]. Cette stratégie permettrait éventuellement, et à partir d'un nombre restreint d'essais en laboratoire pour caractériser le moteur, d'adapter continuellement et de façon autonome la demande en carburant tout au long de la vie utile du moteur.

Dans un premier temps, afin de simplifier le problème et faute d'une sonde à oxygène adéquate il fut décidé d'opérer avec le mélange stœchiométrique (16,52:1 pour le gaz naturel du réseau). Ainsi, le processus de commande en boucle ouverte décrit à la figure 3, basé sur une caractérisation préalable du moteur, fut utilisé.

Il faut donc, sur banc d'essai, mesurer des instrants qui permet-

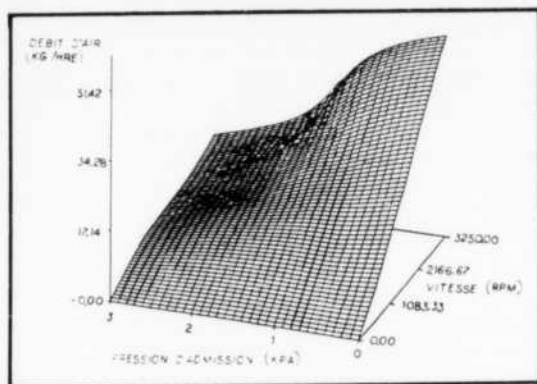


Figure 4 Cartographie du moteur Ricardo (tiré de [5])

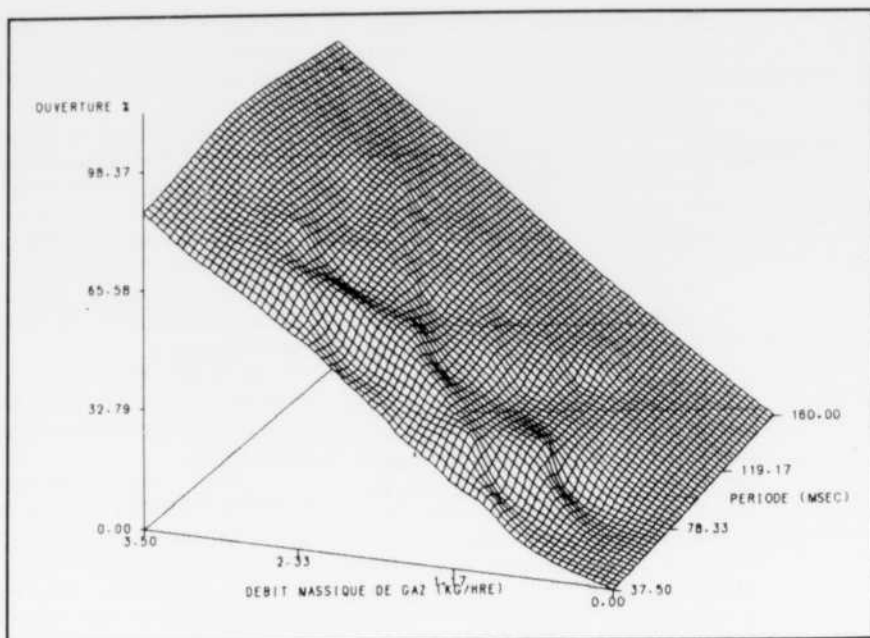


Figure 5 Cartographie de l'injecteur (tiré de [5])

tront, à l'aide de programmes d'interpolation, de dresser une cartographie tri-dimensionnelle du moteur, les coordonnées considérées étant le débit d'air (kg/hr), la pression du collecteur d'admission (KPa) et la vitesse de rotation (tr/min). Afin de limiter le temps d'essais et le temps de calcul en temps réel, les valeurs obtenues furent soumises au système SAS (Statistical Analysis System) à l'École Polytechnique de manière à générer, par interpolation spline bi-dimensionnelle, les points intermédiaires et la cartographie montrée à la figure 4. Cette cartographie est ensuite emmagasinée dans l'espace mémoire de l'ordinateur de commande. Présentement l'ordinateur est un IBM PC équipé d'un co-processeur 8087

et d'une carte d'acquisition et de commande Labmaster PGL-40.

De même, des mesures d'étalonnage d'un injecteur Solex ayant montré un comportement non linéaire, une cartographie de l'injecteur fut établie tel que montré à la figure 5 et emmagasinée en mémoire vive.

Comme il existe un couple distinct TPM-MAP (régime moteur-pression d'air à l'admission) pour chaque état de charge du moteur en opération, on mesure au moins une fois par cycle la vitesse de rotation du moteur, la pression du collecteur d'admission, ainsi que les températures de l'air d'admission et du gaz détendu.

À partir de ces données et de la cartographie, on détermine le



QUÉFORMAT LTÉE

591 LE BRETON
LONGUEUIL, P. Q.
J4G 1R9
674-4901

FORAGES
ÉTUDES GÉOTECHNIQUES
CONTRÔLE DES MATÉRIAUX

- CONTRÔLE DES MATÉRIAUX
- ÉTUDES GÉOTECHNIQUES
- ANALYSES CHIMIQUES

Tél.: 336-5650



Les Laboratoires Industriels et Commerciaux Limitée
190 Benjamin-Hudson, St-Laurent
Quebec, Canada H4N 1H8

fondée en 1928

débit massique d'air admis au moteur et corrigé pour la température ambiante. Le débit théorique de gaz naturel est alors calculé avec le rapport stœchiométrique choisi puis corrigé pour la température du gaz détendu.

Le logiciel de commande calcule alors la période et le pourcentage d'ouverture requis à l'injecteur pour admettre le débit adéquat et envoie le signal, par l'intermédiaire d'un circuit de commande, à l'injecteur. Le processus se répète ainsi à chaque cycle moteur et assure donc un contrôle adéquat du débit de gaz.

La stratégie employée, même si elle est imparfaite, offre quand même les avantages suivants:

— elle élimine toute restriction à l'admission,

— elle permet la maîtrise du mélange,

— elle permet de réduire les essais de caractérisation à leur plus simple expression,

— elle offre la possibilité d'utiliser une sonde Lambda pour:

a) varier le mélange en fonction des conditions d'opération, et

b) affiner la cartographie sur une base continue par une boucle fermée autoadaptative,

— elle offre la possibilité d'ajouter la commande de l'allumage.

Perspectives d'avenir

Outre le développement de troupes d'injection du gaz naturel dans les directions énoncées ci-haut, divers projets portant sur l'amélioration de la combustion du gaz naturel sont en cours à Polytechnique et ailleurs.

Ainsi, des chercheurs de l'Université de Colombie Britannique font des travaux visant à augmenter la vitesse de propagation de flamme et à réduire le délai d'allumage par des modifications à la chambre de combustion et par l'utilisation d'un allumage au plasma.

L'équipe de recherche de l'École Polytechnique espère atteindre le même but par l'emploi d'additifs et, entre autres, l'enrichissement par oxygène semble intéressant.

L'avenir du gaz naturel carburant semble donc prometteur; il pourrait trouver sa place à côté des carburants liquides à long terme. Le succès est lié au développe-

ment technologique requis pour assurer au gaz naturel une combustion aussi parfaite que celle de l'essence depuis la généralisation des systèmes d'injection électronique.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les compagnies Gaz Métropolitain Inc. et Gaz de France qui ont subventionné ces travaux de recherche et ont ainsi contribué au développement de l'équipe de recherche sur le GNV de l'École Polytechnique.

Références

- [1] Les Statistiques de l'Énergie au Québec, Publication annuelle, Énergie et Ressources, Éditeur Officiel du Québec.
- [2] LIKO, K. et DEEG, K., «Natural gas For Vehicles, Industry Survey 1986», Report TE87-3, Internal Report from Transportation Energy Branch, Energy Mines and Resources Canada, 1987.
- [3] GOU, M., GUERNIER, C. et DETUNCO, B., «Étude expérimentale comparative du comportement d'un moteur Ricardo fonctionnant au gaz naturel et à l'essence», Rapport technique EPM/RT-86-4, École Polytechnique 1986.
- [4] PERRAULT, M., «Étude de la carburation dans un moteur à allumage commandé alimenté au gaz naturel», Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées, École Polytechnique 1987.
- [5] GOU, M., PERRAULT, M. et GUERNIER, C., «Simulation et analyse du comportement d'un système de carburation pneumatique pour véhicules à gaz naturel sous différentes conditions de température et de pression», Rapport technique EPM/RT-86-2, École Polytechnique 1986.
- [6] ALLARD, G., «Projet d'un système d'injection électronique pour un moteur monocylindre à allumage commandé fonctionnant au gaz naturel», Mémoire de maîtrise ès Sciences Appliquées, présenté à l'École Polytechnique 1986.
- [7] CARTER, S., «New under the hood CNG Fuel System or GEN II, Non Petroleum Vehicular Fuels V. CNG Fuels», Arlington Virginia, 1985.
- [8] EVANS, R.L., «The combustion duration of Isooctane, Propane and Methane under engine like conditions», University of British Columbia report AFL-83-04, 1984.
- [9] TROESH, E.R., «An investigation of Venturi type Air-Fuel Mixers for Gaseous Fuelled engines», University of British Columbia report AFL-83-02, 1983.
- [10] CROUSE, W.H., «Mécanique automobile», 3ième édition, Mc Graw-Hill, 1979.

*La technologie dont vous avez besoin,
lorsque vous en avez besoin.*

Le Programme d'aide à la recherche industrielle (PARI) du Conseil national de recherches peut aider à relever les défis techniques qui se posent à votre entreprise et vous mettre sur la voie du succès — sans entraves.

Le réseau du PARI donne accès à des ressources scientifiques et techniques partout au Canada, ainsi qu'à l'étranger. Nos programmes couvrent toute une gamme de services: consultation technologique, programmes à frais partagés, entreprises technologiques à l'échelle internationale.

Vous nous trouverez dans les Pages jaunes sous la rubrique "Technologie".

Le CNRC: la technologie à la portée de l'entreprise.



Conseil national
de recherches Canada

National Research
Council Canada

Canada

GESTECH-ART INC.

- assistance à la gestion de projet
- aménagement et expansion des installations industrie et construction

jean-eudes simard ing.
directeur

3273 Boul. Gouin Est # 104
Montréal-Nord, Qc H1H 1A9

(514) 325-2857

La Raptière

RESTAURANT FRANÇAIS
spécialités pyrénéennes

le confit d'oie, le cassoulet,
le jambon de Bayonne.

Table d'hôte lundi au vendredi:
midi à 15h. — 17h30 à 22h30
Samedi 17h30 à 22h30
Fermé le dimanche

Réservations : 844-8920
1490 rue Stanley,
(métro Peel, sortie Stanley)

Bandes pour reprise
de bétonnage entre radier et murs

BFL MASTIX R4

Nous désirons recevoir une documentation technique
- BFL MASTIX -
Nom/Entreprise _____

Adresse _____

NP/Localité _____

PRODEC

293, rue du Parc,
St-Louis de Pintendre, Qc GOR 2K0
Tél. (418) 626-9683



SAUVÉ

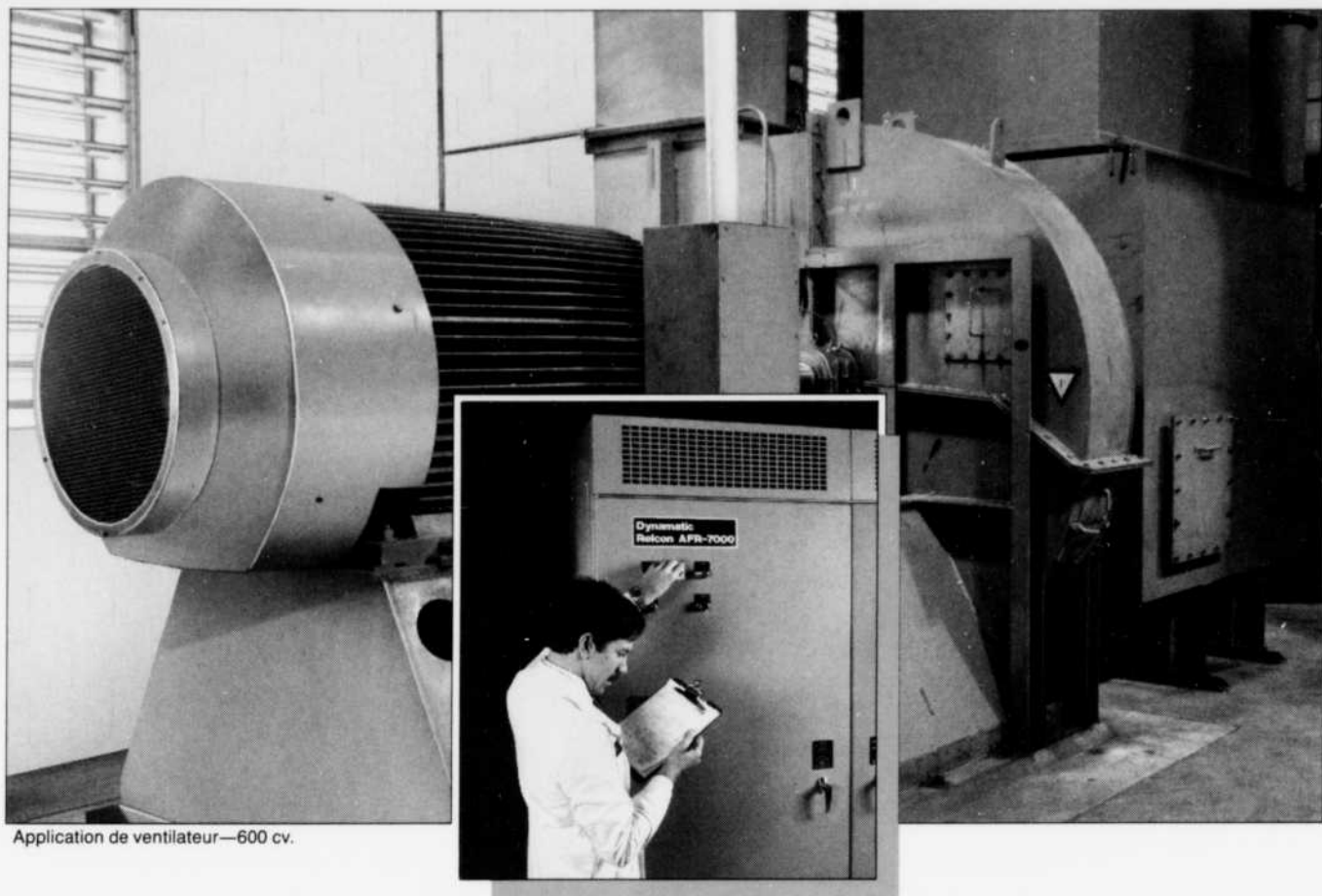
ASSURANCE INC

Mesdames les ingénieures,
Messieurs les ingénieurs,

Vous avez toujours de bonnes raisons de communiquer avec nous.

COMPOSEZ LE 384-7371,
vous serez agréablement surpris!

RICHARD SAUVÉ ASSURANCE INC.
130 HENRI-BOURASSA EST MONTRÉAL H3L 1B7
TÉLÉPHONE: 384-7371
LIGNE WATS: 1-800-361-3922/1-800-361-3925



Application de ventilateur—600 cv.

RETROUVEZ VOS FACTURES D'ÉLECTRICITÉ D'IL Y A 3 OU 5 ANS AVEC NOS ENTRAÎNEMENTS À VITESSE VARIABLE RELCON.

On ne peut freiner la hausse des coûts d'électricité. Cependant, vous pouvez consommer moins d'énergie électrique en opérant à vitesse variable vos ventilateurs, pompes, compresseurs et autres équipements centrifuges.

QUATRE TYPES D'ENTRAÎNEMENTS

Que votre moteur électrique soit fractionnel ou d'une puissance de 5000 hp ou plus, l'un de nos quatre types d'entraînements à vitesse variable Relcon, vous donnera le contrôle efficace de vitesse que vous désirez. En plus, vous économiserez entre 20 et 35% en énergie électrique si vous comparez nos contrôleurs aux

systèmes de valves modulantes ou de volets variables.

Les économies d'énergie électrique réalisées sur une période de trois ans ou moins, suffisent habituellement pour financer l'achat d'un de nos entraînements Relcon.

Nous sommes en mesure de vous offrir des entraînements: à fréquence variable, à courant continu, à courant de Foucault ou à récupération d'énergie, dépendamment du type d'équipement qui se prête le mieux à votre application.

SERVICE COMPLET

Considérez ce qui suit: Nos entraînements Relcon sont fabriqués au Canada. Ils sont conçus en utilisant ce qu'il y a de plus récent comme technologie. Nous vous

offrons de plus: assistance à la conception de vos systèmes, une gamme complète d'entraînements à vitesse variable, l'accès aux pièces de rechange de quatre endroits à travers le Canada et finalement, un service après-vente incomparable.

Tous ces avantages font partie des systèmes d'entraînements à vitesse variable Relcon.

VÉRIFIEZ

En plus de la fiabilité de nos équipements, vous devez considérer l'économie d'énergie substantielle réalisée et la facilité d'installation. Demandez-nous de vous faire parvenir notre littérature sur nos entraînements Relcon pour voir ce que vous avez à y gagner.

CHEF DE FILE DE L'INDUSTRIE CANADIENNE

Relcon

Relcon Inc.

(Anciennement Les Equipements Rumble Limitée)
80 Walker Drive, Brampton, Ont. L6T 4H6
(416) 458-1100. Telex: 06-97646. Fax: (416) 458-1200

Quebec and Maritimes

2535 boul. Cavendish
Montréal (Québec) H4B 2Y5
(514) 487-6111 Telex: 055-66347
Fax: (514) 487-6537

Les électrotechnologies: efficaces et rentables

Si vous êtes administrateur d'une entreprise d'extraction ou de fabrication, vous pouvez peut-être profiter du Programme d'aide à l'implantation des électrotechnologies.

Hydro-Québec vous offre en effet:

1. une aide technique gratuite pour déterminer les procédés qui peuvent être améliorés par une électrotechnologie;
2. une aide financière pour effectuer les études d'avant-projet et de faisabilité;
3. une aide financière pour réaliser le projet.

Les électrotechnologies peuvent réduire vos coûts de production, augmenter la productivité de votre entreprise, améliorer le contrôle de la qualité et accroître la sécurité de vos installations.

Pour obtenir plus de renseignements, communiquez avec le service de la Clientèle (dont le numéro de téléphone paraît sur votre facture) et demandez la brochure intitulée *Programme d'aide à l'implantation des électrotechnologies*. Ce programme s'applique aussi bien aux entreprises existantes qu'à celles qui sont à l'état de projet.

Les électrotechnologies, ça vaut le coût!



L'ÉLECTRIFICACITÉ

