

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 113 (1987)
Heft: 22

Artikel: Evaluation d'additifs et d'émulsions visant à réduire les émissions d'oxydes d'azote
Autor: Noir, Dominique
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76445>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 11.01.2026

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

Evaluation d'additifs et d'émulsions visant à réduire les émissions d'oxydes d'azote¹

par Dominique Noir, Lausanne

1. Introduction

1.1. Combustion et polluants

Rappelons que l'on désigne globalement par NO_x les oxydes d'azote, essentiellement le monoxyde NO qui se forme dans la flamme et le dioxyde NO₂ qui résulte de l'oxydation subséquente du NO. La proportion de NO₂ est toujours très inférieure à celle de NO.

La combustion d'huile extra-légère conduit essentiellement à la formation de NO thermique par réaction à température élevée de l'oxygène et de l'azote de l'air comburant. Les principales grandeurs favorisant sa formation sont la température, la teneur en oxygène et le temps de résidence. La température de flamme est maximale aux conditions stœchiométriques ($\lambda = 1$)²; il manque en revanche d'air pour permettre l'oxydation de l'azote et la formation de NO est faible. Aux excès d'air élevés ($\lambda \geq 1,5$), la température est trop basse pour conduire à un taux de formation de NO élevé. La formation de NO est maximale aux environs de 18% d'excès d'air. Le niveau de ce maximum dépend, mais peu, du brûleur et de la chaudière. Il croît avec la charge thermique.

La situation est exactement inverse pour le monoxyde de carbone CO, témoin d'une combustion incomplète. Aux faibles excès d'air, le mélange n'étant jamais parfait, une petite partie du carbone n'est que partiellement oxydée et se dégage sous forme de CO. Aux excès d'air élevés, la température est trop basse pour permettre l'oxydation complète du carbone. L'émission de CO est minimale aux environs de 20% d'excès d'air. Le niveau de ce minimum dépend du brûleur et de la chaudière utilisée. Par ailleurs, ce niveau varie avec la charge du brûleur; il est minimal à pleine charge. La combustion d'huile extra-légère (EL) peut donner lieu à la formation de suies. Il convient de rappeler que les suies sont créées à partir de composés carbonés en phase gazeuse et présentent une dimension caractéristique de l'ordre de 0,1 μ m. C'est la présence de suies incandescentes qui donne aux flammes «jaunes» leur

rayonnement caractéristique. Ces suies se forment à des températures supérieures à 1400-1450°C. Si l'on réduit la température de flamme en dessous de cette valeur, par exemple par la recirculation externe des fumées ou l'injection d'eau, on évite la formation de ces suies, et la flamme devient «bleue».

1.2. Techniques de réduction des émissions d'oxydes d'azote

Les améliorations successives apportées aux techniques de combustion ont permis d'accroître le rendement des installations de chauffe tout en réduisant le niveau des émissions polluantes. Plusieurs techniques fondées sur des modifications de la combustion ont été développées au cours des dernières années.

Parmi ces modifications, il faut relever:

- la réduction de l'excès d'air de combustion
- l'étagement de la combustion
- la recirculation des fumées
- la diminution de la température de préchauffage de l'air de combustion
- la diminution de la charge thermique
- l'injection d'eau ou de vapeur.

Chacune des méthodes ci-dessus, prise individuellement, entraîne une formation d'oxydes d'azote réduite, généralement sans conséquence néfaste sur les autres polluants. L'efficacité de ces méthodes varie avec le type d'installation et le combustible utilisé. Par ailleurs, le recours à plusieurs modifications simultanées conduit à des résultats cumulatifs.

1.3. Additifs

Au cours des vingt dernières années, plusieurs études [1-5]³ ont été consacrées aux additifs améliorant la combustion, en particulier:

- au méthylcyclopentadienyl-manganèse-tricarbonyle (MMT)
- au dicyclopentadienyl de fer ou ferrocène

TABLEAU 1. — Récapitulation des résultats des essais préliminaires.
Chaudière Cipag - brûleur Oertli - 39 kW - $\lambda = 1,15$.

N°	Caractéristiques principales	Conc. ‰	Δ NO _x ppm	Δ NO _x %	Δ CO ppm	Δ CO %
1	Nitropropane, nitroéthane, etc.	12,5	+91	+169	-120	-42
		1	+11	+22	-60	-18
2	Ferrocène + solvant	1	-2	-4	0	0
3	Nitropropane, nitroéthane, etc.	12,5	+88	+163	-130	-45
4	Sulfonate de potassium et de calcium	1	+4	+7	0	0
5	Agent émulsionnant + 2,5% H ₂ O + 5% H ₂ O	1	-2	-4	0	0
		1	-3,5	-7	0	0
6	Fe (III)-2-ethylhexanoat	1	0	0	+80	+21
7	Naphténate de calcium + solvant	1	0	0	0	0
8	Composé à base de fer et de potassium	1	+2	+4	+80	+21
9	Fer organométallique	1	-1	-2	-20	-5
10	Sulfonate (?) de calcium	1	-1	-2	-20	-5
11	Sulfonate de fer + solvant	1	-1	-2	-60	-16
12	Sulfonate de calcium	1	-1	-2	-60	-16
13	Sulfonate de magnésium	1	-1	-2	-40	-10
14	Composé à base de fer et de nickel	1	0	0	-20	-5
15	Ester hydroaromatique de l'acide nitrique	10	55	+102	-130	-45
17	Ionisation de l'air	-	0	0	0	0
18	MMT, etc. dans EL	1	-6	-12	+70	17
18	MMT, etc. dans l'air	0,7	-3,5	-7	+60	+21
19	MMT	1	-4	-7	+90	+31
20	1-Pentanol	10	0	0	0	0
21	n-Butanol	10	0	0	0	0
22	Ferrocène pur	1	-1	-2	+100	+35
23	Oxyde de propylène	10	0	0	-50	-16
24	NH ₄ OH + 2,5% H ₂ O	5	+1	+2	+40	+11
25	Naphténate de manganèse (6%)	1	-4	-8	+40	+15
26	Naphténate de fer (6%)	1	-1	-2	+50	+15
27	Octoate-2-éthyl de fer (7,5%)	1	0	0	+20	+6
28	Hexanoic acid de cobalt (10%)	1	-1	-2	+20	+6

¹ Cette étude a été effectuée par Battelle, Centres de recherche de Genève, avec l'appui du Fonds national pour la recherche énergétique (Projet NEFF 300.1).

² λ = coefficient d'air = $M_{air}/M_{stœchiométrique}$.

³ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

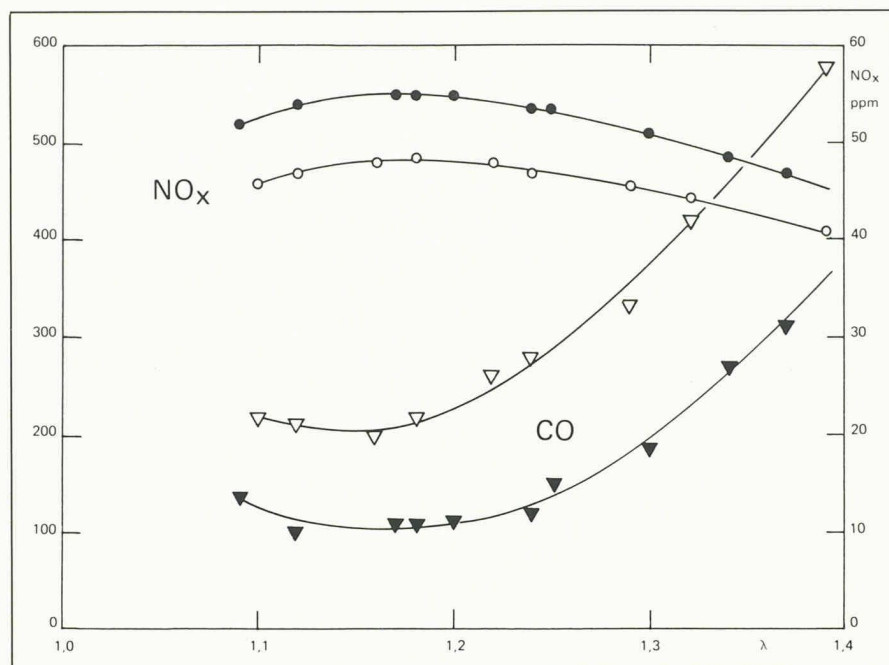


Fig. 2. - Variation des niveaux de NO_x et de CO avec le coefficient d'air λ . 2 ‰ de MMT (additif 19) - Chaudière Cipag - brûleur Cuenotherm - 39 kW.

- aux naphthénates de fer, de manganèse, de plomb et de cobalt
- aux sulfonates de calcium, de fer et de magnésium.

La plupart des essais ont été exécutés aux Etats-Unis, sur des chaudières expérimentales, dans des conditions assez éloignées de celles rencontrées en Suisse dans la pratique.

La présente étude vise à évaluer les différents additifs susceptibles de réduire les émissions d'oxydes d'azote dans des conditions expérimentales représentatives du parc actuel, sur la base d'essais comparatifs spécifiques, *en maintenant tous les autres paramètres constants*.

De nombreux additifs, même en quantité minime, permettent une réduction signi-

ficative des suies [6]. Les additifs pour l'huile de chauffage extra-légère sont généralement des composés organométalliques à base de fer, de manganèse, de cobalt ou de calcium. Ces additifs agissent la plupart du temps comme catalyseurs de la combustion.

En matière de réduction des oxydes d'azote, il faut distinguer les produits permettant de réduire *directement* la formation du NO et ceux qui, du fait d'une combustion améliorée, peuvent conduire à une réduction *indirecte* des NO_x du fait d'un excès d'air réduit.

L'interprétation des mécanismes d'action des additifs sort du cadre de cette étude. Mentionnons simplement que les additifs peuvent agir suivant l'un ou l'autre des trois mécanismes suivants :

- recombinaison des atomes O par certains gaz (SO₂, H₂O)
- inhibition des réactions d'oxydation
- amélioration des réactions de pyrolyse des composés organiques azotés.

Il semblerait, à première vue, que ce soit le second mécanisme qui soit à la base de l'action du MMT.

Certains fabricants proposent d'injecter les additifs dans l'air de combustion au moyen d'un appareil doseur. Cette solution s'impose dans le cas d'additifs non solubles dans l'huile EL. Les quelques essais comparatifs effectués avec l'additif 18 à base de MMT ajouté successivement dans l'air et dans l'huile n'ont pas mis en évidence de différence fondamentale.

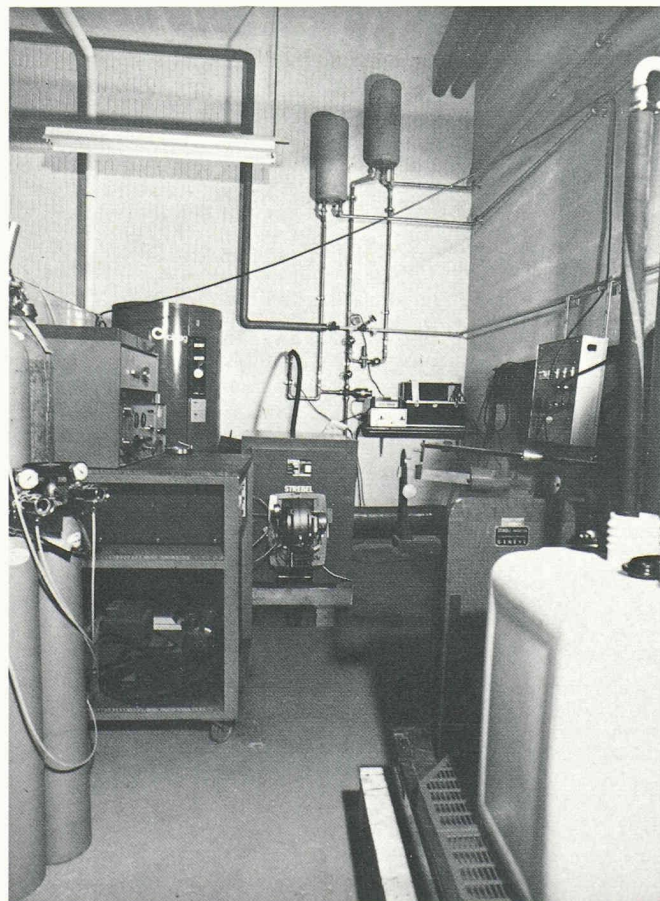


Fig. 1. - Photographie du stand d'essais (de gauche à droite : gaz d'étalonnage, analyseurs, chaudières, système de refroidissement).

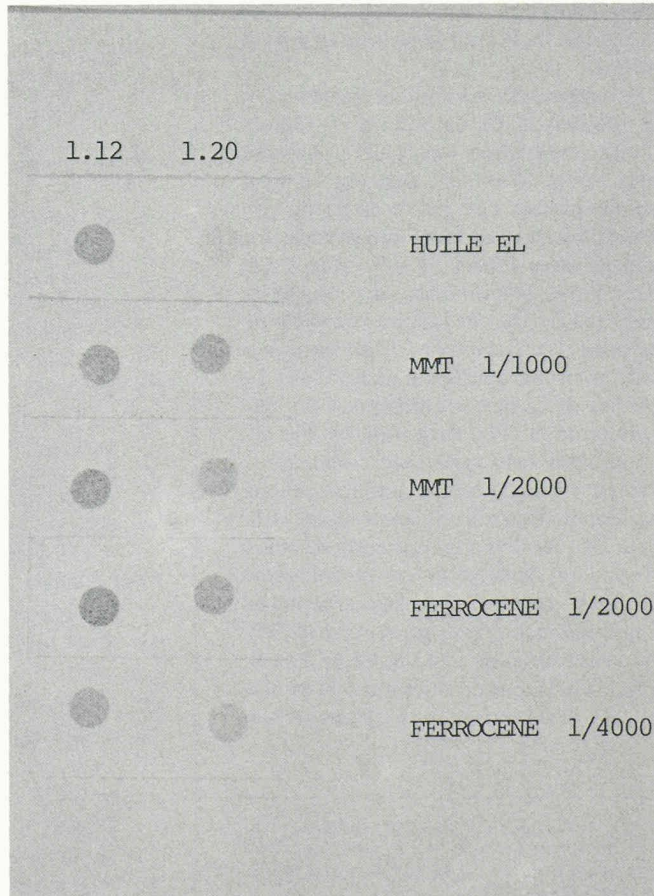


Fig. 3. - Photographie de prélèvements de suie (test Bacharach). Huile extra-légère, MMT et ferrocène. Chaudière Cipag - brûleur Cuenotherm - 39 kW - $\lambda = 1,12$ et $1,20$.

1.4. Mélanges et émulsions huile-eau

L'addition d'eau à l'huile extra-légère entraîne une réduction de la température de flamme et, par conséquent, une diminution des émissions de NO_x . Comme la recirculation des fumées, cette technique modifie les propriétés radiatives de la flamme, interférant éventuellement, de ce fait, avec le procédé de surveillance de flamme. Ce phénomène peut constituer une limite impérative à la teneur en eau des mélanges. Il semble que l'on puisse brûler sans problèmes un mélange à 5% d'eau, alors qu'une concentration de 7% est déjà excessive pour les deux brûleurs utilisés.

2. Stand d'essais

Les chaudières sont montées sur le stand d'essai selon les exigences des «Directives sur l'expertise type de chaudières et de brûleurs à pulvérisation en fonction des exigences de la protection de l'air», du 1^{er} mai 1984 (fig. 1).

Afin d'obtenir des résultats représentatifs, on a choisi de répéter les essais sur une chaudière acier CIPAG CDS «spécial» 32-38 d'une vingtaine d'années et sur une chaudière fonte Strebel Camino Ca6S-4 de conception récente, équipées successivement d'un ancien brûleur Oertli OE-1 NLOE 218C et d'un brûleur Cuénotherm DF4 des années quatre-vingts.

Pour l'analyse des fumées, on utilise trois appareils différents :

- un analyseur à chimiluminescence Beckman 951 pour les oxydes d'azote NO et NO_x . Cet appareil est équipé d'une pompe incorporée. Les gaz sont prélevés dans la cheminée à l'aide d'un tube en silicone. Un piège placé à proximité immédiate du prélèvement permet d'abaisser le degré d'humidité des fumées au niveau voulu ;
- un analyseur à ionisation de flamme Beckman 402 pour les hydrocarbures imbrûlés ;
- un analyseur/calculateur MSI 2000 utilisant des cellules électrochimiques pour la mesure de la teneur des fumées en oxygène O_2 , monoxyde de carbone CO , dioxyde de soufre SO_2 .

3. Résultats

3.1. Critères d'évaluation

En incorporant au combustible une proportion même minime d'additif ou d'eau, on peut agir sur la cinétique des réactions de la combustion. S'il est possible de réduire ainsi la formation du NO , on agit également sur les autres polluants, CO , suies, hydrocarbures imbrûlés, etc. Il s'agit donc d'identifier les additifs susceptibles de réduire les oxydes d'azote sans provoquer une augmentation prohi-

TABLEAU 2. — Récapitulation des résultats.
Chaudière Cipag - brûleur Cuénotherm - 39 kW - $\lambda = 1,15$.

N°	Additif	Conc. ‰	ΔNO_x ppm	ΔNO_x %	ΔCO ppm	ΔCO %
2	Ferrocène, etc.	2	-1	-2	+30	+27
9	Fer organométallique	2	-1,5	-3	+30	+27
10	Calcium + Soufre	2	0	0	0	0
11	Sulfonate de fer	2	-1	-2	0	0
12	Sulfonate de calcium	2	-1	-2	-30	-27
13	Sulfonate de magnésium	2	0	0	-20	-18
17	Ionisation de l'air	0	0	0	0	0
18	MMT	2	-7	-14	+100	+91
19	MMT pur	2	-7	-14	+100	+91
22	Ferrocène	0,5	-6	-11	+50	+55
22	Ferrocène	1	-7,5	-14	+65	+68
22	Ferrocène	2	-10	-18	+50	+55
25	Naphténate de Mn (6%)	2	-2	-4	+10	+9
26	Naphténate de Fe (6%)	2	-2	-4	0	0
27	Octoate-2-éthyl de Fe (7,5%)	2	-2	-4	+10	+9
28	Hexanoic acid de Co (10%)	2	-3	-6	+10	+9
5	Emulsifiant + 2,5% H_2O	1	-3	-6	+20	+20
5	Emulsifiant + 5% H_2O	1	-5,5	-10	+20	+20

bitive des autres polluants. Il faut également éviter d'introduire dans le combustible des substances nocives, telles que des métaux lourds ou toxiques, des produits cancérigènes.

A ce propos, le chiffre 142 de l'OPair dit : «L'huile de chauffage extra-légère ne doit contenir aucun additif qui :

- a) renferme des composés halogénés ou des composés de métaux lourds (excepté les composés du fer) ;
- b) renferme des substances telles que des composés de magnésium, qui pourraient fausser les résultats de la détermination de l'indice de suie lors des contrôles des chauffages alimentés à l'huile.»

3.2. Essais préliminaires — Chaudière CIPAG — Brûleur Oertli

Les essais préliminaires avaient pour but d'identifier les additifs susceptibles de réduire les NO_x de plus de 15%. Ils ont été exécutés avec la chaudière CIPAG et le brûleur Oertli.

Pour faciliter l'interprétation des résultats, on a reporté sur le tableau 1 la variation des NO_x et du CO mesurée à 15% d'excès d'air ($\lambda = 1,15$). Ces valeurs sont exprimées en ppm et en %.

Plusieurs additifs tendent à augmenter le niveau de NO_x , de manière importante ou modérée. Ils entraînent en revanche une diminution sensible du CO .

De nombreux additifs ne donnent lieu qu'à une réduction de 1 ppm des NO_x , soit du même ordre que la précision des mesures.

Seul le MMT, pur ou combiné, semble exercer une influence positive perceptible sur les NO_x .

3.3 Chaudière CIPAG — Brûleur Cuénotherm

La deuxième série d'essais a été exécutée sur la chaudière CIPAG équipée d'un brûleur Cuénotherm.

Outre les additifs 2, 18, 19 et 25 sélectionnés à la suite des essais préliminaires, on a également retenu quelques additifs susceptibles de réduire quelque peu les NO_x en concentration plus élevée (ici 2‰). A titre d'exemple, la figure 2 représente la variation des NO_x et du CO avec le coefficient d'air λ , d'une part pour de l'huile extra-légère, d'autre part pour 2‰ de MMT (additif 19). L'additif entraîne une réduction des NO_x de 7 ppm (-14%) et une augmentation du CO de 100 ppm (+91%).

La variation des niveaux de NO_x et de CO à 15% d'excès d'air mesurée au cours de la deuxième série d'essais fait l'objet du tableau 2. Ces résultats confirment ceux des essais préliminaires. Le MMT et le ferrocène ont un effet significatif. La plupart des autres additifs ont une influence sensible, mais si faible que leur emploi ne se justifie pas.

Au vu de ces résultats, il semblerait qu'il soit possible de diminuer les émissions de NO_x de 15% environ par addition de 1/500 de MMT. Malheureusement, une telle concentration d'additif fausse la détermination de l'indice de suie, ce qui interdit son utilisation. La photographie de la figure 3 montre plusieurs échantillons de gris prélevés à l'aide d'une pompe Bacharach. Les différents échantillons correspondent à des coefficients d'air de 1,12 et 1,20. Les deux premiers points correspondent à des indices de 3,5 et 1 (combustion sans additif). Les points obtenus avec le MMT à des concentrations de

1/1000 et 1/2000 présentent une coloration brunâtre qui interdit toute comparaison avec l'échelle de référence.

A supposer qu'une concentration en MMT de 1/4000 ne fausse pas la mesure de l'indice de suie, la réduction correspondante des NO_x n'est plus que de l'ordre de 1 ppm (2%) et ne justifie pas l'utilisation d'un tel additif.

L'effet du ferrocène (additif 22) sur la mesure de l'indice de suie est semblable à celui de l'additif 19: les particules d'oxyde de fer colorent les échantillons de gris au point de rendre toute interprétation impossible, tout au moins aux concentrations nécessaires à la réduction des NO_x . La photographie de la figure 3 montre également des échantillons obtenus avec des coefficients d'air de 1,12 et 1,20, pour des concentrations de 1/2000 et 1/4000.

3.4. Chaudière Strebel – Brûleur Cuénotherm

Le tableau 3 résume les résultats obtenus avec la chaudière Strebel équipée du brûleur Cuénotherm, d'une part avec une concentration d'additif de 1/2000 (1/1000 dans le cas du 16), d'autre part avec des émulsions conventionnelles (5) ou prototype (32).

Les courbes de la figure 4 montrent les résultats obtenus avec une microémulsion en cours de développement à Battelle, qui contient de relativement faibles quantités d'eau ainsi que des additifs tensioactifs. Les résultats correspondent à une concentration en eau de 2%. On constate une diminution des NO_x de 18%. A titre de comparaison, les émulsions courantes donnent lieu à des réductions de NO_x de 2% environ par pour-cent d'eau. On parvient donc, en dosant correctement les autres composants du mélange, à multiplier son efficacité par un facteur de l'ordre de 5.

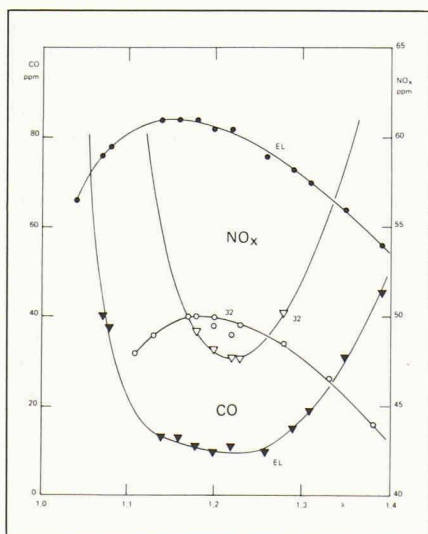


Fig. 4. – Variation des niveaux de NO_x et de CO avec le coefficient d'air λ . Échantillon 32 à 2% d'eau – Chaudière Strebel – brûleur Cuénotherm – 39 kW.

La teneur en CO augmente en revanche de manière sensible, tout en restant très basse (30 à 40 ppm).

4. Discussion

4.1. Influence des équipements

La comparaison directe des résultats obtenus avec les deux chaudières CIPAG et Strebel équipées des deux brûleurs Oertli et Cuénotherm est très instructive. Elle permet notamment de tirer les conclusions suivantes :

- Alors que les niveaux maximaux de NO_x mesurés avec les quatre combinaisons possibles varient de $\pm 10\%$ environ, les niveaux minimaux de CO varient dans un rapport de 1 à 32.
- Les équipements les plus récents (Strebel – Cuénotherm) donnent le moins de CO (10 ppm); les équipements les plus anciens (CIPAG – Oertli) donnent le plus de CO (320 ppm). L'influence de la chaudière, et en particulier des dimensions de la chambre de combustion, est primordiale. L'effet du brûleur, quoique très net, semble moins important.
- L'effet des dimensions de la chambre de combustion sur les émissions de NO_x et de CO est directement lié à l'intensité de la combustion, c'est-à-dire à la puissance calorifique par unité de volume (kW/m^3). Une intensité de combustion élevée tend à diminuer le CO et à augmenter le NO_x .
- En cherchant à minimiser les émissions de CO, on tend à augmenter les émissions de NO_x , mais dans une proportion beaucoup plus faible.

4.2. Influence des additifs

Indépendamment de leurs effets sur les émissions de suie, les produits susceptibles d'être ajoutés à l'huile extra-légère en vue de réduire la formation et par conséquent l'émission de NO_x sont peu efficaces.

Il convient de rappeler tout d'abord que trois produits commerciaux tendent à augmenter les NO_x de 100 à 170%, tout en réduisant le CO de 40 à 45% (à la concentration préconisée par le fabricant). Compte tenu de la toxicité respective de ces deux gaz, ce type d'additif est à déconseiller.

Les seuls additifs ayant un effet positif significatif sur les NO_x sont le MMT (méthylcyclopentadienyl-manganèse-tricarbonyl) et le ferrocène (dicyclopentadienyl de fer).

D'une manière générale, ces additifs permettent de réduire les NO_x de 14 à 18% pour une concentration de 1/500 et de 5 à 11% pour une concentration de 1/2000. Ils faussent malheureusement la mesure de l'indice de suie et sont donc interdits par l'OPair. Une concentration plus faible serait éventuellement possible, mais une

Bibliographie

- [1] MARTIN, G. B.; PERSHING, D. W.; BERKAU, E. E.: *Effects of Fuel Additives on Air Pollutant Emissions From Distillate-Oil-Fired Furnaces*, U. S. EPA, Office of Air Programs, Publication No. AP-87, June 1971.
- [2] GIAMMAR, R. D.; WELLER, A. E.; LOCKLIN, D. W.; KRAUSE, H. H.: *Experimental Evaluation of Fuel-Oil Additives for Reducing Emissions and Increasing Efficiency of Boilers*, Final Report by Battelle-Columbus on EPA Contract et No. 68-02-0262, EPA Report No. EPA-600/2-77-008b, January 1977.
- [3] KRAUSE, H. H.; HILLENBRAND, L. J.; WELLER, A. E.; LOCKLIN, D. W.: *Combustion Additives for Pollution Control – A state-of-the-art review*, Final Report by Battelle-Columbus on EPA Contract No. 68-02-0262, EPA Report No. EPA-600/2-77-008a; January 1977.
- [4] ELIOT, R. C., ed.: *Boiler Fuel Additives for Pollution Reduction and Energy Saving*, Noyes Data Corporation, 1978.
- [5] LOCKLIN, D. W.; KRAUSE, H. H.; ANSON, D.; REID, W.: *Electric Utility Use of Fireside Additives*, EPRI Report CS-1318 prepared by Battelle-Columbus Laboratories, Project 1035-1, January 1980.
- [6] «Bessere Verbrennung, Heizöladditive», *test*, 5/1986, pp. 494-497.

réduction des NO_x inférieure à 5% ne justifie pas l'utilisation d'un additif.

4.3. Emulsions et microémulsions

Alors qu'un pour-cent d'eau sous forme d'émulsion classique donne lieu à une réduction de 1,6% des NO_x , cette réduction est de l'ordre de 14% dans le cas de la microémulsion. Dans le premier cas, on a essentiellement à faire à un phénomène physique (diminution de la température de flamme). Dans le second cas, on superpose à l'effet physique des phénomènes de cinétique chimique, recombinaison des atomes O et/ou inhibition des réactions.

Par ailleurs, en recourant à la microémulsion, on résout du même coup le problème de la stabilité à long terme du mélange.

5. Conclusions

Mis à part trois additifs qui augmentent considérablement les NO_x , la grande majorité des additifs n'ont qu'une influence minime sur les NO_x . Les meilleurs résultats sont obtenus avec des composés organométalliques à base de manganèse et de fer (MMT, ferrocène). Cependant, aux concentrations requises pour entraîner une diminution sensible des NO_x , ces additifs faussent la mesure de l'indice de suie et sont donc interdits par l'OPair. Ces conclusions ne préjugent en rien les propriétés des additifs en matière de réduction des suies ou de

TABLEAU 3. — Récapitulation des résultats.
Chaudière Strebel - brûleur Cuénotherm - 39 kW - $\lambda = 1,15$.

N°	Additif	Conc. ‰	ΔNO_x ppm	ΔNO_x %	ΔCO ppm	ΔCO %
2	Ferrocène (2,5%), solvants, etc.	0,5	0	0	0	0
16	Solution aqueuse de chlorure de cuivre	1	0	0	0	0
18	Additif à base de MMT	0,5	-3	-5	+2	+15
19	MMT pur	0,5	-3,5	-6	-4	-36
22	Ferrocène pur	0,5	-4,5	-8	-2	-18
29	Fer organométallique + tensioactif	0,5	0	0	0	0
30	Fer organométallique + tensioactif	0,5	+0,5	+1	+2	+15
5	Emulsifiant + 5% H ₂ O	1	-4	-7	-5	-45
31	Solution aqueuse de métaux (Fe, Mn)	~0,5	-0,75	-1	0	0
32	Emulsion prototype à 1% d'eau		-7,5	-12	+24	+240
32	Emulsion prototype à 2% d'eau		-11	-18	+20	+200

leurs effets à long terme sur l'encrassement des équipements.

L'addition d'eau à l'huile extra-légère semble être le meilleur procédé pour réduire les émissions de NO_x. L'efficacité du procédé est cependant liée aux caractéristiques physico-chimiques de telles émulsions. Les émulsions standards permettent de diminuer les NO_x de 1 à 2% par pour-cent d'eau. Les microémulsions en revanche permettent de réduire les NO_x de 15 à 20% par pour-cent d'eau. Cette différence est essentiellement liée à l'utilisation de quantités importantes de surfactants et de cosurfactants.

Adresse de l'auteur:

Dominique Noir,
ing. dipl. EPFL/SIA, PhD
Bonnard et Gardel,
ingénieurs-conseils SA
61, av. de Cour
1001 Lausanne

Câbles sous-marins oui, câbles souterrains non : pourquoi ?

A propos d'une journée d'étude

par Jean-Jacques Morf, Lausanne

Le problème du remplacement des lignes aériennes à très haute tension par des câbles souterrains a suscité bien des passions en Suisse romande ; le résultat très net d'une votation n'a toutefois pas mis un terme aux discussions à ce sujet. Les journées d'étude qui lui seront prochainement consacrées à l'EPFL permettront de mieux cerner les perspectives et les limites des câbles souterrains. L'article qui suit constitue une introduction et une invitation à cette importante manifestation¹.

Dans la controverse concernant la possibilité de mettre sous terre des lignes à très haute tension, une contradiction flagrante frappe les esprits scientifiques : D'une part, plusieurs lignes sous-marines à très haute tension existent et sont en service depuis plusieurs années. D'autre part, aucune entreprise d'électricité, sauf une, ne s'est hasardée à inclure un tronçon de câbles souterrains dans une ligne à très haute tension du réseau d'Europe.

Il y a plusieurs raisons à cette réticence. L'EPFL, en collaboration avec plusieurs sociétés techniques, organise, les 3 et 4 novembre, deux journées internationales destinées à donner toute la clarté sur ce sujet controversé.

Pendant la première journée, les exploitants d'installations existantes exposeront les problèmes et le mode de fonctionnement de leurs câbles sous-marins et souterrains à très haute tension :

- Canada Vancouver : 30 + 6 km, 500 kV, 60 Hz, 1200 MW, avec réserve de 100% ;

- Italie Messine : 27 km, 400 kV, 50 Hz, 1000 MW ;
- Autriche Vienne : 12+6+4 km, 400 kV, 50 Hz, 1000 MW ;
- France-GB : 7+45+18 km, \pm 270 kV continu, 2000 MW ;
- Spreitenbach : 2,5 km, 220 kV, 50 Hz, 900 MW.

L'utilisation de câbles à très haute tension pose de multiples problèmes qui seront présentés les 3 et 4 novembre ; l'un d'eux est l'effet capacitif des câbles qu'il convient de compenser par des bobines d'inductance. On trouvera ci-après un extrait de l'introduction consacrée à ce problème, mais les journées donneront une information plus complète.

Courants induits dans les gaines, mode de mise à la terre des gaines, tensions induites entre les gaines, échauffement, refroidissement forcé, insertion d'un tronçon de câble dans un réseau maillé à très haute tension, comportement en régime normal, lors de manœuvres, lors de coups de foudre, taux de disponibilité, coûts globaux comprenant le génie civil, les câbles, les bobines de compensation, les dispositifs de surveillance et de sécu-

rité, l'entretien, le personnel d'exploitation...

Les techniques de l'isolation à l'hexafluorure de soufre (SF₆) et l'utilisation de la supraconductivité seront également montrées.

Le texte complet des conférences sera remis aux participants des journées.

Effet capacitif, courant à vide, compensation

Alors que les problèmes liés aux courants dans les gaines se posent dès les premiers mètres d'une installation câblée, l'effet capacitif ne prend de l'importance qu'à partir de plusieurs dizaines de kilomètres pour les câbles et de plusieurs centaines de kilomètres pour les lignes aériennes. La figure 1 illustre en trois étapes les raisons pour lesquelles la capacité électrique des câbles est si élevée : faible distance d'isolement, gaine entourant le conducteur, permittivité élevée (effet capacitif) de l'isolant.

Le rapport R/r entre le rayon intérieur R de la gaine mise à la terre et le rayon r du conducteur est déterminant pour la capacité électrique d'un câble. Pour une ligne aérienne, ce sont les rapports h/r et d/r qui sont déterminants (h = hauteur au-dessus du sol, d = distance entre deux conducteurs de phase).

La figure 2 montre l'intensité du courant à vide qui passe dans un câble alimenté d'un seul côté lorsqu'il n'y a pas d'utilisateur à l'autre extrémité. Si le câble est assez long, ce courant ne peut plus être négligé. Dans le cas des câbles de Vancouver, qui présentent une capacité de 290 nF/km, le courant capacitif à 60 Hz et sous une tension de 525 kV/ $\sqrt{3}$ est de 33 A/km. Pour une longueur de 36 km, le courant à vide atteindrait 1190 A, ce qui est proche du courant maximal admissible au point de vue thermique.

¹ On trouvera le programme de ces journées en p. B 158 de ce numéro.