

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 115 (1989)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Solidification des cendres et des résidus du lavage des gaz des usines d'incinération d'ordures ménagères  
**Autor:** Thibaud, Danièle  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-76890>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 22.05.2025

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

# Solidification des cendres et des résidus du lavage des gaz des usines d'incinération d'ordures ménagères

Compte tenu de l'importance de ce problème, il est intéressant de faire le point sur l'état de la technique d'aujourd'hui et sur les différentes possibilités qui apparaissent dans ce domaine.

## Introduction

La dépollution des gaz de combustion telle qu'elle est, ou en train d'être, installée actuellement dans les usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM), suite à la mise en vigueur de l'Ordonnance fédérale pour la protection de l'air, de décembre 1985 (OPair), conduit à générer des résidus solides dans lesquels les polluants sont concentrés.

Il s'agit des *cendres volantes* (CV) recueillies aux électrofiltres et des *résidus du lavage des gaz*.

Actuellement, et surtout dans les usines qui ne comportent pas encore de

PAR DANIELLE THIBAUD,  
GENÈVE

laveur de gaz, les cendres sont le plus souvent mélangées aux mâchefers. Ces matériaux sont mis en décharge, ou éventuellement utilisés en construction routière, selon le cas.

Bien que possédant un pouvoir fixatif des cendres intéressant, les mâchefers utilisés en génie civil doivent dorénavant être exempts de cendres, la présence de ces dernières représentant un danger potentiel de pollution des sols ou des eaux, notamment en cas de démolition de l'ouvrage.

D'autre part, la mise en décharge des mâchefers avec les cendres présente un double inconvénient : elle entraîne le stockage de grandes quantités (de l'ordre de 250 kg de mâchefers pour 25 kg de cendres par tonne d'ordures ménagères) et elle élimine un matériau qui peut être revalorisé en génie civil. C'est pourquoi on s'efforce de trouver un *moyen spécifique et compatible avec l'environnement* d'éliminer les cendres et les résidus du lavage des gaz.

Le moyen actuellement étudié est la solidification de ces résidus avec des réactifs ou liants tels que du ciment, de manière que les polluants soient piégés et ne puissent plus être lixivés (les-sivés) par les eaux.

Des essais de solidification ont déjà été effectués, notamment par un groupe d'études constitué par l'Office fédéral pour la protection de l'environnement (OFPE), l'EAWAG, l'EMPA-LFEM et autres experts, dont les résultats ont été publiés en 1987 dans le cahier N° 62 de l'OFPE [1]<sup>1</sup>. D'autres essais sont en cours, en particulier chez des fournisseurs d'équipements, soit à l'échelle du laboratoire, soit à l'échelle du pilote (usine pilote Sulzer à Winterthur [2]). L'entreposage de ces résidus en décharge a également fait l'objet d'une étude, dont les résultats ont été publiés en juillet 1988 par l'OFPE [7].

## Caractéristiques des résidus de la dépollution des gaz

### a) Quantités de résidus solides et répartition des polluants

Les quantités respectives des rejets solides de l'incinération, rapportées à la tonne d'ordures ménagères (OM), sont environ :

- 250 kg mâchefers/t OM
- 25-28 kg cendres/t OM (y compris cendres des chaudières)
- 2-5 kg (sur sec) de résidus de lavage des gaz/t OM.

Une répartition type de la charge en polluants dans ces différents rejets est donnée à titre indicatif dans le tableau 1.

### b) Cendres des électrofiltres

Comme l'indique le tableau 1, les concentrations en métaux lourds dans les cendres sont en général nettement supérieures à celles des mâchefers.

La partie soluble des cendres, constituée principalement par les chlorures, peut varier d'un type de cendres à l'autre. On peut estimer qu'elle est de l'ordre de 10-20% en poids.

La présence de ces chlorures est un élément perturbateur aussi bien pour le processus de solidification avec un liant hydraulique que pour la fixation chimique des polluants.

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

TABLEAU 1. - Exemple type de répartition des polluants avant traitement des rejets de l'incinération (sortie four d'incinération d'ordures ménagères).

| Source                                                | Mâchefers                  |                  | Cendres (CV)               |                  | Gaz combustion                          |                  | Total polluants               |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|------------------|-----------------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Quantité                                              | 250 kg/t OM                |                  | 25 kg/t OM                 |                  | 6500 Nm <sup>3</sup> /t OM <sup>1</sup> |                  |                               |
| Polluants                                             | Concent.<br>‰ <sup>2</sup> | Charge<br>g/t OM | Concent.<br>‰ <sup>3</sup> | Charge<br>g/t OM | Concent.<br>‰ <sup>4</sup>              | Charge<br>g/t OM | Charge<br>g/t OM <sup>5</sup> |
| Cl-                                                   | 2,5                        | 625              | 50                         | 1250             | 1200                                    | 7020             | 8895                          |
| S (SO <sub>2</sub> )                                  | 4                          | 1000             | 60                         | 1500             | 300                                     | 1755             | 4255                          |
| Hg                                                    | 0,0002                     | 0,05             | 0,02                       | 0,5              | 0,2                                     | 1,2              | 1,7                           |
| Cd                                                    | 0,01                       | 2,5              | 0,5                        | 13               | 0,15                                    | 0,88             | 16                            |
| Pb                                                    | 1,3                        | 325              | 7,7                        | 193              | 1                                       | 5,9              | 523                           |
| Zn                                                    | 2,8                        | 700              | 26                         | 650              | 2,5                                     | 15               | 1365                          |
| Charge en ‰ rapportée à la charge totale en polluants |                            |                  |                            |                  |                                         |                  |                               |
| Cl-                                                   |                            | 7,0              |                            | 14,1             |                                         | 78,9             | 100                           |
| S (SO <sub>2</sub> )                                  |                            | 23,5             |                            | 35,3             |                                         | 41,2             | 100                           |
| Hg                                                    |                            | 2,9              |                            | 29,1             |                                         | 68,0             | 100                           |
| Cd                                                    |                            | 15,7             |                            | 78,7             |                                         | 5,5              | 100                           |
| Pb                                                    |                            | 62,1             |                            | 36,8             |                                         | 1,1              | 100                           |
| Zn                                                    |                            | 51,3             |                            | 47,6             |                                         | 1,1              | 100                           |

<sup>1</sup> Vol. sec de référence à 11% O<sub>2</sub> sec : 5850 Nm<sup>3</sup>/t OM pour PCI compris entre 2000 et 2500 kcal/kg OM.

<sup>2</sup> Composition type des mâchefers [1].

<sup>3</sup> Composition moyenne type des cendres [1].

<sup>4</sup> Composition type des gaz de combustion des OM, rapportée au gaz sec, à 11% O<sub>2</sub>.

<sup>5</sup> Somme des polluants provenant des mâchefers, cendres et gaz de combustion.



### c) Résidus du lavage des gaz

Les résidus du lavage des gaz par voie sèche ou semi-sèche sont recueillis avec les cendres des électrofiltres.

Dans le cas du lavage des gaz par voie humide – qui est le système recommandé par l'OFPE –, ces résidus sont recueillis séparément des cendres. Ils proviennent du traitement des rejets liquides des laveurs et sont essentiellement constitués par du sulfate de calcium, du fluorure de calcium et des métaux lourds.

Les métaux lourds se trouvent sous une forme pratiquement insoluble dans une fourchette de pH donnée: hydroxydes et complexes ou sulfures de métaux lourds. Une modification de pH pouvant conduire à une remise en solution de certains polluants, ces résidus devront également être solidifiés avant leur mise en décharge.

Le tableau 2 présente, à titre d'exemple, une répartition type des polluants après traitement des gaz, lavage des cendres et des mâchefers.

## Principes de la solidification

### a) Principes théoriques

Il s'agit donc de trouver des produits réactifs qui, en mélange avec les résidus à traiter, permettent la fixation des polluants en provoquant une solidification en masse du mélange.

La fixation des polluants peut prendre deux formes:

- une fixation «chimique», conduisant à la formation de différents composés ou complexes insolubles
- une fixation «physique», généralement par adsorption.

Ces fixations, chimique ou physique, doivent être ensuite complétées par une «prise» comparable à celle des liants hydrauliques, afin de provoquer la solidification en masse recherchée. Le produit réactif le plus courant, qui développe un milieu très alcalin provoquant les réactions chimiques indiquées plus haut, et qui de plus possède des propriétés hydrauliques, est certainement le ciment.

Cependant, certains composés nuisent au développement normal des réactions d'hydratation et de prise, et peuvent même les empêcher (certains chlorures, oxydes, phosphates, composés organiques). D'autres composés provoquent des gonflements qui détruisent la cohésion du mélange (Al, Zn, notamment).

Selon le type de résidus, il faudrait envisager d'utiliser d'importantes quantités de ciment, ou des ciments spéciaux: ciment fondu alumineux, ciments composés (avec laitier ou cendres), ou autres liants spécialement produits.

On peut envisager d'utiliser d'autres produits en remplacement du ciment tels que: chaux, cendres volantes de centrales thermiques, laitier de haut fourneau, silicates ou silice concassée, qui peuvent faire intervenir d'autres

propriétés, telles que des propriétés «pouzzolaniques» (aptitude d'un matériau à fixer l'hydroxyde de chaux pour former des composés hydrauliques).

### b) Essais de solidification avec du ciment en laboratoire

Les essais de base qui font actuellement référence sont ceux qui figurent dans [1] et qui concernent la solidification des résidus avec du ciment.

En résumé ces essais ont montré que:

- les cendres non lavées nécessitent un fort ajout de ciment de type alumineux: environ 50%; compte tenu du coût de ce ciment, cette solution est à éviter;
- les cendres lavées, c'est-à-dire débarrassées de leurs chlorures, nécessitent bien moins de ciment, soit de l'ordre de 20%, ce dernier pouvant être un ciment courant fabriqué en Suisse.

De ce fait, l'OFPE recommande de procéder à un lavage des cendres avant leur solidification.

### c) Autres techniques envisageables

Depuis une quinzaine d'années, de nombreux procédés ont été développés aussi bien aux Etats-Unis ou au Canada qu'en Europe (RFA, France, Italie) pour solidifier différents types de boues, issues de différentes branches de l'industrie. Ces procédés ont d'abord été appliqués pour la solidifi-

TABLEAU 2. – Exemple type de répartition des polluants après traitement des rejets de l'épuration (sortie différents traitements).

| Source                                                                                       | Mâchefers lavés         |               | Cendres (CV) lavées     |               | Gaz épurés                 |               | Eau traitée                |               | Résidus lavage gaz + CV |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| Mat. soluble                                                                                 | 0,2% <sup>1</sup>       |               | 15%                     |               | – <sup>2</sup>             |               | – <sup>3</sup>             |               | –                       |               |
| Quantité <sup>4</sup>                                                                        | 250 kg/t OM             |               | 21 kg/t OM              |               | 6500 Nm <sup>3</sup> /t OM |               | 600 l/t OM                 |               | 5 kg/t OM               |               |
| Polluants                                                                                    | Concent. % <sup>5</sup> | Charge g/t OM | Concent. % <sup>6</sup> | Charge g/t OM | Concent. % <sup>7</sup>    | Charge g/t OM | Concent. mg/l <sup>8</sup> | Charge g/t OM | Concent. % <sup>9</sup> | Charge g/t OM |
| Cl-                                                                                          | 1                       | 250           | 5                       | 106           | 20                         | 117           | 13 950                     | 8370          | 10                      | 52            |
| S (SO <sub>2</sub> )                                                                         | 3                       | 749           | 30                      | 638           | 50                         | 293           | 800                        | 480           | 419                     | 2097          |
| Hg                                                                                           | 0,0002                  | 0,05          | 0,018                   | 0,38          | 0,08                       | 0,47          | 0,05                       | 0,03          | 0,16                    | 0,79          |
| Cd                                                                                           | 0,01                    | 2,5           | 0,15                    | 3,2           | 0,04                       | 0,23          | 0,01                       | 0,01          | 2,0                     | 10,0          |
| Pb                                                                                           | 1,3                     | 324           | 7,6                     | 162           | 0,50                       | 2,9           | 0,20                       | 0,12          | 7                       | 34            |
| Zn                                                                                           | 2,7                     | 674           | 22                      | 468           | 1,5                        | 9             | 0,50                       | 0,30          | 43                      | 214           |
| Charge en % rapportée à la charge totale en polluants (voir charge totale dans le tableau 1) |                         |               |                         |               |                            |               |                            |               |                         |               |
| Cl-                                                                                          | 2,8                     |               | 1,2                     |               | 1,3                        |               | 94,1                       |               | 0,6                     |               |
| S (SO <sub>2</sub> )                                                                         | 17,6                    |               | 15,0                    |               | 6,9                        |               | 11,3                       |               | 49,3                    |               |
| Hg                                                                                           | 2,9                     |               | 22,2                    |               | 27,2                       |               | 1,7                        |               | 45,9                    |               |
| Cd                                                                                           | 15,7                    |               | 20,1                    |               | 1,5                        |               | –                          |               | 62,7                    |               |
| Pb                                                                                           | 62,0                    |               | 30,9                    |               | 0,6                        |               | –                          |               | 6,6                     |               |
| Zn                                                                                           | 49,4                    |               | 34,3                    |               | 0,6                        |               | –                          |               | 15,7                    |               |

<sup>1</sup> Estimation (lavage à l'eau brute).

<sup>2</sup> Vol. sec de référence à 11% O<sub>2</sub>, sec: 5850 Nm<sup>3</sup>/t OM pour PCI compris entre 2000 et 2500 kcal/kg OM.

<sup>3</sup> Estimation de l'eau provenant du lavage des gaz, des CV et des mâchefers (variable selon le procédé).

<sup>4</sup> Les quantités de mâchefers, cendres et résidus du lavage sont données sur base sèche.

<sup>5</sup> Estimation, à titre d'exemple. La composition dépend du procédé de lavage adopté.

<sup>6</sup> Estimation fondée sur les résultats donnés dans [1] (lavage à l'eau brute).

<sup>7</sup> Composition type après lavage des gaz, conforme à l'OPair de 1986.

<sup>8</sup> Composition type après traitement des rejets liquides, conforme à l'ordonnance sur le déversement des eaux de 1975.

<sup>9</sup> Obtenu par différence (bilan entrée-sortie des polluants).



cation des boues organiques (contenant par exemple des hydrocarbures), puis pour des boues minérales diverses, contenant par exemple des hydroxydes métalliques.

On peut mentionner notamment les techniques Petrifix, Soliroc, Chemfix, DCR, GFS, KFA, Salsgitter, etc. [6]. On peut penser que certains de ces procédés pourraient donner de bons résultats avec ce type de résidus et qu'ils pourraient éventuellement être applicables à des résidus non lavés.

Cependant, on se heurte à plusieurs difficultés pour comparer ces procédés entre eux et juger de leur efficacité :

- protection des procédés par le secret de la « recette »
- diversité de tests de lixiviation visant à juger de l'efficacité de la fixation des polluants
- absence d'expérience industrielle avec ce type de résidus.

Il est cependant important de continuer les recherches dans ce sens, en vue de minimiser le coût de la solidification, par exemple en utilisant des produits moins « nobles » que le ciment.

#### d) Critères à respecter

A défaut de « recette » générale de solidification, l'OFPE a fixé des critères sur la qualité des résidus solidifiés :

- la résistance à la compression doit être d'au moins 1 N/mm<sup>2</sup> après 7 à 14 jours ;
- le lessivat obtenu dans les tests de lixiviation doit être conforme à l'ordonnance sur le déversement des eaux, colonne II, et, de plus, ne doit pas contenir plus de 0,5‰ de la teneur initiale en polluant. Un projet de méthode pour le test de lixiviation est en préparation à l'OFPE.

### Application industrielle

#### a) Principes applicables

Dans l'état actuel des connaissances, et tant qu'un produit ou une recette « miracle » n'a pas encore fait ses preuves, les cendres doivent être lavées. Les procédés à mettre en application industrielle sont donc le lavage des cendres et la solidification avec un réactif approprié, en principe du ciment.

Le schéma de la figure 1 montre comment le lavage des cendres et la solidification des résidus peuvent s'intégrer dans le procédé d'incinération des ordures ménagères avec lavage des gaz (voie humide).

#### b) Lavage des cendres

Ce système comporte deux phases qui sont, schématiquement :

- *lavage des cendres* avec, par exemple, les rejets liquides des laveurs de gaz humides, sinon avec de l'eau brute ;

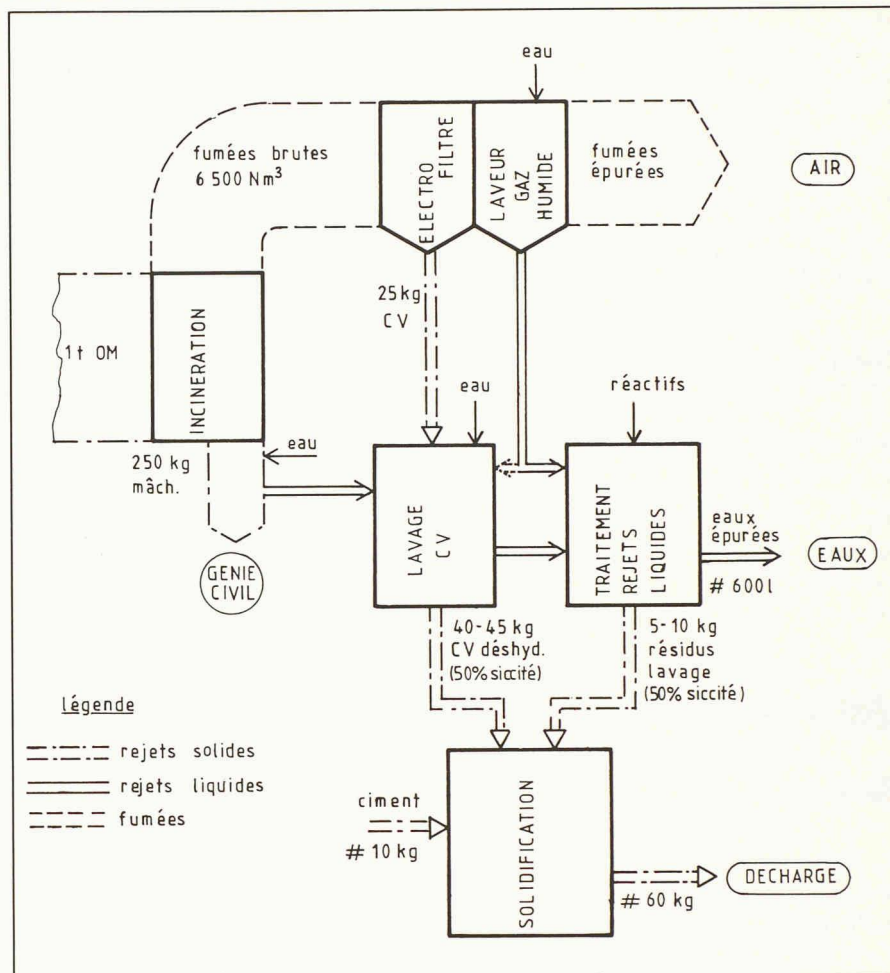


Fig. 1. – Schéma de principe et bilan quantitatif des rejets.

les cendres lavées sont en principe filtrées sur filtres à bandes ;

- *traitement des eaux de lavage* des gaz et de lavage des cendres réunies : neutralisation, floculation, précipitation des métaux lourds (TMT15 par exemple), décantation et filtration des boues sur filtre-pressé ; les eaux de lavage des mâchefers – lorsque ce lavage est prévu – peuvent également être traitées dans ces installations.

#### c) Solidification des résidus

Les cendres lavées et les résidus du lavage peuvent être solidifiés ensemble ou séparément.

Actuellement, il est envisagé de les solidifier ensemble, tant qu'aucun traitement spécifique aux résidus du lavage n'est praticable.

Les opérations nécessaires à la solidification des résidus comportent deux phases.

1. *Le mélange des cendres lavées* et des résidus du lavage avec le ou les réactifs appropriés. Ce mélange peut se faire dans des installations classiques comportant, outre les silos de stockage des réactifs et de stockage des résidus, un ou plusieurs malaxeurs.

L'installation de ces équipements peut être prévue soit à l'usine elle-même, soit à la décharge, selon les caractéris-

tiques du produit obtenu et les conditions propres à chaque cas.

2. *La solidification* proprement dite des mélanges. Celle-ci peut également s'effectuer soit à l'usine elle-même, soit à la décharge [7].

#### Bibliographie

- [1] TOBLER, H. P. et al. : « Traitement de solidification des résidus de l'incinération de déchets urbains », *Cahiers de l'environnement*, N° 62 OFPE, août 1987.
- [2] BRÜGGER, A.; MÜLLER, U. : « Mise en décharge de résidus contenant des éléments polluants », *Ingénieurs et architectes suisses*, 6/88, 9 mars 1988.
- [3] BACCINI, P.; BRUNNER, P. H. : « Behandlung und Endlagerung von Reststoffen aus Kehr-Verbrennungsanlagen », *gaz - eaux usées*, N° 7, 1985.
- [4] LEMANN, M. : « The wet flue gas scrubbing process system », *Phoenix International*, No. 2, 1987.
- [5] CONNER, J. R. : « Fixations and solidification of wastes », *Chemical Engineering*, No. 10, 1986.
- [6] KLAUS, G. : « Chemical solidification of waste », *Recycling Int.*, Berlin, 1986.
- [7] SIEBER CASSINA + PARTNER : « Konzept für eine Reststoffdeponie », *Schriftenreihe Umweltschutz*, Nr. 93, Juli 1988.



Trois systèmes peuvent être a priori envisagés :

- fabrication de blocs et mise en place des blocs déjà durcis dans la décharge
- transport en vrac et solidification *in situ* du résidu
- fabrication de granules ou de « boulettes » à l'usine et utilisation de ce produit dans un « béton » coulé dans la décharge.

### Conclusions

Le choix parmi les différentes techniques de solidification des cendres et des résidus du lavage des gaz, et en particulier le choix du site (usine ou décharge), dépend du comportement propre de ces résidus et, pour cela, des essais doivent être réalisés dans chaque cas.



Cet article nous a été soumis par le Groupe romand des ingénieurs de l'industrie.

Les avis qui y sont exprimés n'engagent que leur auteur et ne reflètent pas forcément ceux du Groupe des ingénieurs.

Les questions de transport, de place, de capacité et de coût doivent aussi être prises en compte.

Dans la mesure du possible, il faudra adapter le dosage à un comportement et une prise du résidu compatibles avec une solidification *in situ*, afin de minimiser le coût de la manutention, du transport et de la mise en place dans la décharge.

Indépendamment de la question du coût, la fabrication de blocs à l'usine

présente l'inconvénient de nécessiter une place importante pour le stockage, place qui souvent fait défaut dans les UIOM existantes.

La solution de la solidification finale des résidus à la décharge est certainement la plus simple et apparaît a priori comme la plus appropriée au problème posé.

Adresse de l'auteur :

Danièle Thibaud, ing. INSA  
I.C. Impact-Concept SA/PEG SA  
2-4, rue du Lièvre  
Case postale 356  
1211 Genève 24

## Actualité

### Servons-nous du mot juste vient de paraître

En Suisse, le problème des traductions de documents techniques se pose de façon permanente : les bons traducteurs sont rares et les professionnels bilingues n'ont guère de temps à consacrer à la traduction de documents, si importants soient-ils.

La création de la Commission SIA des traductions en langue française, à l'initiative de l'architecte genevois Claude Grosgrain, a répondu au souci d'offrir aux ingénieurs et aux architectes de langue française des normes claires, exemptes d'erreurs de traduction, de lourdeurs dues à une fâcheuse fidélité à la lettre des textes allemands ou de sources de confusion.

Claude Grosgrain a inauguré en juin 1985 dans ces colonnes une série d'articles consacrée aux difficultés spécifiques des traductions dans le domaine de la construction, sous le titre *Servons-nous du mot juste*. Cette rubrique a connu un succès immédiat (un premier tiré à part a été rapidement épuisé), ce qui a incité l'auteur à remettre son ouvrage sur le métier. C'est ainsi que plusieurs compléments ont été publiés dans *Ingénieurs et architectes suisses* jusqu'à l'an dernier.

Plutôt que de grouper simplement des parutions en un tiré à part, il a été décidé d'un commun accord d'éditer un petit livre, à l'intention de tous ceux que concerne le problème des traductions. L'auteur a non seulement groupé l'ensemble des parutions selon l'ordre alphabétique, mais il y a inséré de nouvelles définitions, ajouté un chapitre « Les tournures qui font obstacle » et dessiné une trentaine de figures illustrant la matière traitée.

Auteur et éditeur sont conscients de ce qu'un tel ouvrage ne saurait être définitif ; les utilisateurs pourront y consigner leurs propres remarques, une douzaine de pages vierges étant réservées à ces notes. Pour en faciliter la consultation, ce livre se présente sous la forme d'un robuste cahier à anneaux au format A5.

Nul doute qu'il ne trouve le chemin de la table de travail non seulement des

traducteurs professionnels ou occasionnels, mais également des ingénieurs et architectes dont le travail dépend d'une compréhension correcte des documents dont ils disposent. Un bulletin de commande se trouve en p. 12 des annonces de ce numéro.

*Servons-nous du mot juste*, par Claude Grosgrain. Un volume de 64 pages avec 30 illustrations, format A5 (14,5 x 21 cm), avec reliure à anneaux, couverture laminée. Editions SEATU - Ingénieurs et architectes suisses, 1024 Ecublens, 1989. Prix : Fr. 18.-.

