

# ENVIRONNEMENT ET TECHNICO-ÉCONOMIE DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS

## PARTIE 1 : LA NUISANCE DES PRODUITS

Pierre Le Goff et Jalel Labidi\*

Laboratoire des sciences du génie chimique, CNRS-ENSIC

Les interactions de tout procédé industriel avec son environnement, se placent, soit en amont du fait de la rareté des ressources naturelles utilisées, soit en aval par le rejet de sous-produits et les nuisances qui en résultent. On définit l'intensité de nuisance de chaque agent polluant. On décrit une méthode simple de calcul de la nuisance totale d'un produit industriel quelconque, comme la somme des nuisances provenant de chacun des processus d'élaboration de ce produit. On présente, à titre d'exemple, l'inventaire des diverses pollutions de l'air, de l'eau et des déchets solides, dues à la production d'un kilogramme d'acier.

The interactions of any industrial process with its environment, are located either upstream due to the rarity of natural resources, or downstream due to the rejection of noxious by-products. The nuisance intensity is defined for each polluting agent. A simple method for calculating the total nuisance of any industrial product is defined, as the sum of the nuisances produced by each process of the product manufacture. As an example, the inventory of the air, water and rejected solids pollutions during the production of one kilogramme of steel is presented.

### LES CONTRAINTES ÉCOLOGIQUES

Pour chaque opération industrielle, on sait classiquement établir les bilans matière (bilan global, bilan par élément chimique, etc.) ainsi que les bilans *énergétiques* (en énergie primaire, en énergie utilisable, en exergie, etc.).

Au cours de ces deux dernières décennies, de nombreuses études ont été consacrées à la détermination de ces bilans, tout au long des principales filières industrielles. Des livres entiers leur ont été consacrés. On connaît désormais, avec une bonne précision, le contenu énergétique (p. ex : en « Tonnes d'équivalent-pétrole ») des divers matériaux et objets, par exemple d'un kilogramme d'acier, ou de pain, ou même d'un kilogramme d'automobile ou de réfrigérateur ! Un nouveau type de bilan doit désormais être fait, celui des ressources naturelles rares.

Le qualificatif de « rares » peut signifier :

– Ou bien que la quantité totale de cette ressource disponible dans la croûte terrestre accessible, n'est pas infiniment grande, comparée à la quantité déjà exploitée par l'homme et/ou à celle qui va être exploitée dans le proche avenir. Un exemple est celui du métal platine.

– Ou bien que cette ressource est une substance que les hommes *consomment* et qui n'est pas renouvelable. Un exemple typique est celui des combustibles fossiles.

Dans l'équation du bilan de ces ressources rares il conviendra donc d'introduire un *indice de rareté*, d'autant plus grand que la probabilité d'épuisement rapide de cette ressource sera plus grande.

La 2<sup>ème</sup> partie de ce rapport, qui sera publiée au prochain numéro, sera consacrée au calcul de ces indices de rareté. La seconde contrainte écologique vient des sous-produits rejetés dans l'environnement et des nuisances qui en résultent. On peut classer ces diverses nuisances en trois catégories :

1. *Les nuisances toxiques*, à action directe : substances agissant sur la santé des êtres humains, rejetées :

- dans les eaux d'alimentation,
- dans les terrains agricoles,
- dans l'atmosphère des villes.

2. *Les nuisances physiologiques indirectes* : substances qui modifient les équilibres naturels au sein desquels l'espèce humaine s'est épanouie :

- substances gazeuses augmentant l'effet de serre,
- substances détruisant la couche d'ozone,
- substances attaquant la couverture végétale de la planète,
- etc.

3. *Les nuisances sensorielles de nature* :

- auditives : production de bruits insupportables,
- olfactives : production d'odeurs insupportables,
- visuelles : altération du paysage et des voisinages chers aux êtres humains.

Pour chacune de ces catégories de nuisances, il convient de définir et d'évaluer un « coefficient de nuisance » caractéristique.

A la vérité, cette tentative d'évaluation quantitative des

diverses nuisances a fait l'objet de multiples publications scientifiques (et pseudo-scientifiques !) au cours de ces dernières années.

Dans ces publications, il est souvent difficile de distinguer les facteurs objectifs, basés sur des critères biologiques indiscutables, et les facteurs subjectifs, propres à l'opinion de chaque être humain.

Notons que divers auteurs ont cherché à définir une fonction-objectif globale à optimiser, fonction faisant la synthèse des divers facteurs de nuisance, par exemple :

- l'Ecieg (Évaluation comparative de l'impact environnemental global)<sup>[1]</sup>;
- le coût global des nuisances<sup>[2]</sup>;
- le « Pollution Penalty Factor »<sup>[3]</sup>;
- le « taux de saturation écologique » et les Écoprofiles<sup>[4]</sup>.

### L'INTENSITÉ DE NUISANCE DE CHAQUE AGENT POLLUANT

Soit  $\dot{m}$  le débit massique d'une matière émise par un procédé et contenant un « agent » qui pollue l'environnement. Soit  $g_i$ , l'intensité de cet agent polluant. Le flux de nuisance est :

$$G_i = g_i \cdot \dot{m} \quad (1)$$

Supposons comme premier exemple que  $\dot{m}$  soit le débit de fumées issues d'une chambre de combustion d'un charbon contenant du soufre et que  $g_i$  soit la concentration en  $SO_2$  dans ce gaz.

Comme deuxième exemple, nous supposons que  $\dot{m}$  est le débit d'eau chaude résiduaire issue d'un appareil quelconque, et  $g_i = C_p \cdot T$  est son contenu thermique.

Soit  $g_o$  l'intensité « naturelle » de l'agent polluant dans le milieu récepteur. C'est celle qui correspond par exemple, à la concentration d'équilibre entre le  $SO_2$  produit « naturellement » et celui absorbé par l'eau de mer. Dans le cas de l'effluent thermique, il vient :  $g_o = C_p \cdot T_o$  où  $T_o$  est la température moyenne de l'environnement.

L'équation (1) s'écrit encore :

$$G_i = \underbrace{(g_i - g_o) \dot{m}}_{\text{fraction polluante}} + \underbrace{g_o \dot{m}}_{\text{fraction non polluante}} \quad (2)$$

Il est intéressant de déduire de l'équation (2) une expression de  $\dot{m}$ , soit :

$$\dot{m} = \frac{g_i}{g_i - g_o} = \left[ 1 - \frac{g_o}{g_i} \right]^{-1} \dot{m} + \frac{g_o}{g_i} \dot{m} \quad (3)$$

Dans le cas de l'eau chaude résiduaire, le flux de chaleur  $\dot{Q}$  porté par cette eau chaude, est ainsi :

$$\dot{Q} = \underbrace{\left( 1 - \frac{T_o}{T} \right) \dot{Q}}_{\text{exergie}} + \underbrace{\frac{T_o}{T} \dot{Q}}_{\text{anergie}} \quad (4)$$

Dans ce cas particulier, le flux de pollution thermique s'identi-

fie au flux d'exergie.

L'analogie mathématique des relations (3) et (4) est intéressante. Elle montre que l'on pourra transposer aux bilans écologiques certains logiciels développés pour établir les bilans exergetiques.

### L'INTENSITÉ MAXIMALE ADMISSIBLE :

Soit  $g_i^*$  l'intensité maximale acceptable.

Les nuisances maximales admissibles des divers polluants sont des grandeurs relativement arbitraires. Elles sont tirées des réglementations légales dans chaque pays, pour autant qu'elles existent. A défaut, on s'appuie sur des conventions internationales. A défaut, encore, on se contente d'estimations subjectives, tirées de l'expérience passée dans des situations techniques semblables.

L'Ofefp (Office fédéral Suisse de l'environnement des forêts et du paysage) a publié en 1991-92 une liste de valeurs des flux  $G_i$  pour les principaux agents polluants, exprimés en tonnes par an, rapportés à l'ensemble du territoire de la Suisse. Ils sont donnés dans la 3<sup>ème</sup> colonne du tableau I.

La 2<sup>ème</sup> colonne de ce tableau donne les valeurs maximales admissibles (estimées par l'Ofefp).

$$G_i^* = \dot{m} \cdot g_i^*$$

La 4<sup>ème</sup> colonne donne les valeurs du rapport  $\frac{G_i}{G_i^*}$  parfois appelé « taux de saturation écologique ».

On constate que pour environ la moitié des agents polluants, ce rapport est largement supérieur à 1, ce qui amène l'Ofefp à conclure qu'il faut prendre des mesures énergiques pour diminuer ces pollutions inadmissibles.

### LES ÉCOPPOINTS - ÉCOFACTEURS - ÉCOPROFILS

Si maintenant on veut calculer la nuisance totale produite par un ensemble de matières polluantes, on ne peut additionner les diverses nuisances élémentaires que si elles sont normées, c'est-à-dire exprimées dans une unité commune.

Si par exemple, on veut évaluer la nuisance d'un mélange de deux gaz dont l'un est très toxique même à faible concentration (p. ex. :  $NO_x$ ) et l'autre n'est polluant qu'indirectement et à forte concentration (p. ex. :  $CO_2$ ), il convient de choisir un facteur de conversion de l'un à l'autre.

C'est ainsi que l'Ofefp a défini pour chaque agent polluant une unité de nuisance appelée Écopoint et définie comme la nuisance d'une tonne de produit, à son intensité maximale acceptable. Finalement, l'expression (1) du flux de nuisance se met sous la forme suivante :

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Flux de nuisance} \\ \text{en nombre d'éco-} \\ \text{points par an} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Débit de} \\ \text{matière en} \\ \text{tonne par an} \end{array} \right] \times \left[ \begin{array}{c} \text{Ecofacteur en} \\ \text{nombre d'écopoints} \\ \text{par tonne} \end{array} \right]$$

$$G_i = \dot{m} \times g_i$$

Les valeurs des écofacteurs des divers polluants sont données dans la colonne 5 du tableau I en nombre d'écopoints

**Tableau 1 : Nuisances (en écopoints/an) pour l'ensemble du territoire de la Suisse<sup>4</sup>**

Colonne 1	2	3	4	5	6
Substance	G <sub>i</sub>	G <sub>i</sub>	G <sub>i</sub> /G <sub>i</sub>	Ecofacteur (par g)	Ecopoints de la subst. 10 <sup>+12</sup>
<b>Air</b>					
NO <sub>x</sub> (comme NO <sub>2</sub> )	67 200 t	191 000 t	284 %	4,23E + 01	8,08
SO <sub>x</sub> (comme SO <sub>2</sub> )	54 400 t	68 000 t	125 %	2,30E + 01	1,56
CO <sub>x</sub> (comme CO <sub>2</sub> )	34 700 000 t	43 400 000 t	125 %	3,60E - 02	1,56
H-C (sans CH <sub>4</sub> )	146 900 t	308 000 t	210 %	1,43E + 01	4,40
HCL	-	5 770 t	-	4,23E + 01	0,24
CFC (somme)	1 075 t	5 200 t	484 %	4,50E + 03	23,40
<b>Eau</b>					
DOC (en C)	88 000 t	89 000 t	101 %	1,15E + 01	1,02
COD (3*DOC)	264 000 t	267 000 t	101 %	3,83E + 00	1,02
Phosphore (en P)	2 300 t	4 000 t	174 %	7,56E + 02	3,02
Chlorure (Cl)	4 420 000 t	5 11 000 t	12 %	2,62E - 02	0,01
Nitrate (en N)	57 000 t	57 000 t	21 %	9,05E - 01	0,05
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	4 420 000 t	1 500 000 t	34 %	7,66E - 02	0,11
Ammonium (en N)	22 000 t	5000 t	23 %	1,03E + 01	0,05
<b>Énergie</b>					
Énergie brute	4 500 000 TJ	1 004 000 TJ	100 %	1,00E + 00 pro MJ	1,00
<b>Déchets</b>					
Déchets urbains	4 500 000 t	4 500 000 t	100 %	2,22E - 01	1,00
Déchets spéciaux (combustibles)	8 000 t	13 000 t	163 %	2,03E + 01	2,64

par gramme (et non pas par tonne). On appelle Écoprofil l'ensemble des écofacteurs donnant la répartition des nuisances dues aux diverses composantes d'un ensemble.

### EXEMPLE DE L'ACIER

Dans le long enchaînement des opérations qui partent des ressources naturelles (roche) jusqu'aux pièces métalliques (tôles, profilés, ...) qui servent à fabriquer des machines, on distingue habituellement 4 stades :

- l'extraction des minerais,
- la concentration de ces minerais (minéralurgie),
- leur transport vers les usines métallurgiques,
- leur transformation en métal (métallurgie).

A chacun de ces stades, on détermine les consommations d'énergie et de matières premières, à la fois sous forme directe et sous forme indirecte.

Les équipements de productions industrielles sont en majorité composés d'acier à 80-85 %. Et la consommation d'énergie pour produire cet acier est à 80 % dans le dernier stade, celui de la métallurgie.

**Tableau 2 : Ecoprofil d'1 kg d'acier**

	Nombre d'écopoints
Consommation d'énergie : 30,686 mJ	30,68
Pollution de l'air	535,87
Pollution de l'eau	0,124
Déchets solides	27 681,50
<b>Total</b>	<b>28 248,14</b>

**Tableau 3 : Ecobilan de l'acier - Bilan par kg d'acier**

	Masse (en grammes)	Nombre d'écopoints
<b>Pollution de l'air</b>		
Particules	27,163	-
CO	1,172	0,042
HC	18,012	257,572
NO <sub>x</sub>	2,026	85,699
N <sub>2</sub> O	0,373	15,778
SO <sub>2</sub>	7,686	176,755
Aldéhyde	0,007	-
F	0,0000	-
HF	0,005	-
NH <sub>3</sub>	0,0730	-
<b>Autres composés organiques</b>		
Goudron	0,0001	-
<b>Total</b>		<b>535,85</b>
<b>Pollution de l'eau</b>		
Sédiments	0,8170	-
Corps en suspension	0,3180	-
BOD	0,052	-
COD	0,0013	0,05
Ammoniaque	0,0065	0,067
Chlorures	0,0000	0
Cyanures	0,0001	0
Ions Fe	0,1000	-
Fluorures	0,0334	-
Sulfures	0,0002	-
HCl	2,0000	0,052
Ions Na	0,0002	-
Nitrates	0,0003	0,0003
Phénols	0,5142	-
Sulfates	0,0003	-
Goudrons	0,0002	0,0000
<b>Total</b>		<b>0,124</b>
<b>Déchets solides</b>		
<b>Production d'acier</b>		
Combustion	70	
Agents énergétiques	2,3	
Précombustion	285,7	
Production d'électricité	5,62	
<b>Total production</b>	<b>363,62</b>	
<b>Élimination</b>		
Incinération	800	
Décharge	200	
<b>Total production + élimination</b>	<b>1363,62</b>	<b>27 681</b>

Les valeurs numériques données dans les tableaux 2 et 3 sont extraites du « Cahier de l'Environnement » n° 133, édité par l'Ofsep<sup>4</sup> et adaptées aux données françaises de production d'énergie. On y observe que les déchets solides produisent 98 % de la pollution totale.

## L'APPLICATION DE LA LÉGISLATION COMMUNAUTAIRE ENVIRONNEMENT EN FRANCE

Ouvrage collectif de mises à jour permanentes, rédigé par l'Institut pour une Politique Européenne de l'Environnement (IPEE).

*Présenté d'une façon didactique, il aborde les 38 principales directives environnement selon le plan suivant :*

- historique et objet de la directive,
- résumé,
- transposition formelle,
- impact pratique,
- mesures d'applications en France.

*Composé de 2 tomes, le premier traitant de l'air et de la chimie et biotechnologie, le deuxième de l'eau, les déchets, la nature et les généralités.*

*Simple et efficace d'utilisation, il permet de connaître le contenu des directives, leurs textes d'application et les autorités chargées de les appliquer.*

Prix : Classeur 600 F TTC  
Abonnement 600 F TTC

Édition P.

37, cours de la Martinique - 33000 Bordeaux  
Tél. : 05 56 79 10 55 - Fax : 05 57 87 56 20.



Le tableau 2 présente l'écoprofil d'un kilogramme d'acier et le tableau 3 donne les écobilans dans chacun des 4 composants : pollution de l'air, de l'eau, des déchets solides et de l'énergie.

### CONCLUSIONS

Il est facile d'écrire la formulation mathématique d'un bilan de nuisance, par extension des bilans classiques de matières et d'énergie, pour un procédé industriel quelconque.

Les difficultés apparaissent aux étapes principales suivantes :

- Définition de la frontière du système auquel on applique le bilan. Pour reprendre l'exemple d'une centrale thermique brûlant du charbon et située dans une vallée sans vent, les conclusions seront nettement différentes selon que la frontière sera celle des collines entourant la vallée, ou bien celle de toute une vaste région plus ou moins montagneuse incluant la vallée.

- Définition de la nuisance maximale admissible :  $G_i$  Comme expliqué plus haut, la valeur de  $G_i$  résulte souvent d'une simple estimation subjective. Même lorsqu'elle est tirée d'une réglementation légale, il apparaît que cette réglementation a souvent elle-même été fixée d'après une ancienne estimation arbitraire. Nous n'en voulons pour preuve que le fait que les valeurs de  $G_i$  de la colonne 2 du tableau n° 1, publiées par un organisme suisse, sont différentes de celles publiées par des organismes similaires en Allemagne et aux États-Unis.

\* Pierre le Goff et Jalel Labidi

Laboratoire des sciences du génie chimique, CNRS - ENSIC - BP 451 - 54001 Nancy cedex

## Actes du congrès international sur les Procédés de Solidification et de Stabilisation des Déchets

Proceedings of the international Congress on  
Waste Solidification-Stabilisation Processes

28 novembre - 1<sup>er</sup> décembre 1995 - Nancy - France

**89 communications dont 39 en anglais**

- Gisement et analyse : typologie des déchets, analyse élémentaire, spéciation des eaux, minéralogie.
- Procédés (liants hydrauliques, autres liants minéraux, bitumes, plastiques, vitrification).
- Évaluation des procédés : tests de contrôle, suivi de la qualité de la production, aspects économiques.
- Devenir des produits stabilisés, stockage, utilisation-valorisation. Évolution dans le temps et analogues naturels.

Format 15\*21, 536 pages  
Prix à l'unité : 580 F (dont 30,23 F TVA 5,5 %)  
+ 25 F (port)

SAP - 7, chemin de Gordes - F-38100 Grenoble  
Tél. : 04 76 43 28 64 - Fax : 04 76 56 94 09

### Bibliographie

[1] Rousseaux P. *Évaluation comparative de l'impact environnemental global (ECIEG) du cycle de vie des produits*, Thèse de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon, mai 1993.

[2] Gaivao A., Jaumotte A.L. *Évaluation économique de la pollution de l'environnement par une activité industrielle. Application aux centrales électriques*, Entropie n° 121, pp. 5-11, 1985

[3] Frangopoulos CA, Von Spakovsky M.R., *Global Environmic approach for energysystems analysis and optimisation*, Part I, Part II, Energy Systems and Ecology, Cracow (Poland), July 5-9, 1993

[4] Ofefp (Office fédéral Suisse de l'environnement, des forêts et du paysage). Cahiers de l'environnement n° 132 et 133. Berne. Octobre 1991