

# Vers une combinaison ACV / AMDEC-E en vue de l'analyse environnementale d'une cimenterie algérienne

Leila Boubaker (1), (2), Natacha Gondran (2), Mébarek Djebabra (1)

1. LARPI (Laboratoire de recherche en prévention industrielle) - Institut d'hygiène et sécurité industrielle - Université de Batna, Algérie.  
2. Centre Science de l'information et technologie de l'information (SITE), Ecole des mines de Saint-Etienne, France

Pour toute correspondance : boubaker.leila@yahoo.fr

## Résumé

La réduction des impacts environnementaux représente un enjeu stratégique pour les entreprises industrielles. Confrontées d'une part à une concurrence accrue, et d'autre part aux contraintes environnementales, plusieurs entreprises algériennes ont adopté l'intégration de systèmes de management environnemental. L'objectif de cet article est de proposer une démarche d'analyse environnementale de toutes les activités d'une entreprise afin de déterminer les impacts environnementaux (IE). Pour ce faire, nous proposons l'utilisation combinée de deux méthodes : la méthode de l'analyse de cycle de vie (ACV) et la méthode de l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité environnementale (AMDEC-E) que nous appliquons au cas d'une cimenterie algérienne.

L'utilisation de l'ACV nous permet de faire une analyse quantitative déterminant ainsi les impacts environnementaux associés aux activités de la cimenterie. La méthode AMDEC-E complète l'ACV par la réalisation d'une analyse qualitative plus fine permettant de hiérarchiser ces impacts et de définir les actions à mener.

**Mots clés** : poussières, gaz, industrie, ISO 14000, ACV, AMDEC-E.

## Introduction

L'adoption de système de management environnemental connaît une croissance récente sans précédent en Algérie (Ministère de l'Industrie, 2007). En effet, l'ouverture du marché conjuguée aux pressions réglementaires ont conduit plusieurs entreprises algériennes, notamment des cimenteries, à développer des stratégies environnementales en adoptant des outils managériaux adéquats. Nous étudierons en particulier le cas de la cimenterie d'Ain Touta de la ville de Batna.

L'objectif de ce travail est de proposer une démarche intégrant deux méthodes d'analyse environnementale :

— l'ACV, du type quantitatif, a pour objet d'estimer les émissions des gaz et poussières (CITEPA, 2004) qui seront considérées comme impacts environnementaux (IE) ;

— et l'AMDEC-E, qui permet de hiérarchiser ces IE afin de proposer des mesures de prévention et de protection de l'environnement par ordre de priorité.

Pour atteindre cet objectif, nous rappelons dans la suite de cette étude le système de management environnemental (SME) ainsi que les deux méthodes retenues et nous présentons leur application au cas d'une cimenterie algérienne.

## Le Système de Management Environnemental et ses outils d'analyse

Un SME peut être défini comme un système qui « implique l'existence de systèmes et de bases de données formelles qui intègrent des procédures et des processus pour la formation du personnel, pour le pilotage et le reporting d'informations spécifiques sur la performance environnementale, et qui sont à la disposition des parties prenantes internes et externes de l'entreprise » (Melnyk, 2002).

La norme ISO 14001 définit ce système de gestion environnementale comme « une composante du système de management d'un organisme utilisé pour développer et mettre en œuvre sa politique environnementale et gérer ses aspects environnementaux » (AFNOR, 2004).

Un aspect environnemental est défini comme un élément des activités, produits ou services d'un organisme susceptible d'interactions avec l'environnement (AFNOR, 2004). L'identification des aspects environnementaux n'est pas une tâche facile. En effet, les aspects environnementaux sont souvent plus difficiles à appréhender que les aspects techniques (Ritzén, 1999). La nécessité de faire appel à des outils tels que l'ACV et l'AMDEC-E est particulièrement importante pour des entreprises algériennes où la sensibilisation environnementale est très récente<sup>1</sup>.

L'adoption d'un SME offre plusieurs avantages. Les plus importants sont de deux ordres :

- en interne, le SME permet de structurer les pratiques de gestion environnementale à partir d'un cadre de référence éprouvé, et de promouvoir les préoccupations environnementales au sein de l'organisation ;

<sup>1</sup> La gestion environnementale devra donc être centrée sur la mobilisation quotidienne des travailleurs et sur des changements (profonds) d'ordre qualitatifs et culturels.

- en externe, il représente un moyen d'améliorer l'image et la reconnaissance de l'organisation en démontrant son engagement environnemental auprès de différentes parties prenantes (Boiral, 2001).

Ainsi, l'obtention de la certification peut contribuer à améliorer l'image de l'organisation, à défendre la légitimité de ses activités.

L'évaluation environnementale, qui est une composante importante du SME, nécessite l'utilisation des méthodes adéquates. Dans ce contexte, l'ACV est de loin la plus utilisée.

### L'analyse du cycle de vie

L'ACV est une méthodologie qui permet d'identifier les risques d'impacts environnementaux pendant les différentes phases de « vie » d'un produit. Elle constitue un outil d'aide à la décision qui permet de déterminer les priorités d'action parmi l'ensemble des mesures possibles, en tenant compte de leur efficacité environnementale, de leurs coûts et des contraintes qu'elles impliquent sur le plan économique (Loerincik, 2007). Ce besoin est justifié notamment quand les capacités financières ne sont pas disponibles, ou plutôt quand les dirigeants ne se sentent pas prêts à investir dans les problématiques environnementales, comme cela est souvent le cas notamment en Algérie où l'environnement n'est pas encore intégré à la culture industrielle. L'ACV est particulièrement intéressante dans la perspective de durabilité puisqu'elle couvre l'ensemble du cycle de vie d'un produit et permet d'éviter que les performances environnementales locales soient la résultante d'un simple déplacement des charges polluantes. En effet, elle prend en compte les impacts dans leur globalité : effets locaux, régionaux et planétaires, et à court, moyen et long termes. Par rapport à d'autres méthodes, elle présente l'avantage d'engendrer une forte interaction entre performance environnementale et fonctionnalité puisque les émissions polluantes et l'utilisation de matière première sont rapportées à la fonction du produit ou du système étudié (Loerincik, 2007).

L'ACV permet de déterminer, sur des bases quantitatives, quelles sont les étapes dans la production susceptibles d'avoir les impacts environnementaux les plus importants. Ces étapes peuvent alors faire l'objet d'une analyse environnementale plus approfondie afin d'identifier les aspects environnementaux significatifs et les actions prioritaires nécessaires. Ceci n'est possible que par le biais d'autres méthodes telles que l'AMDEC-E.

### L'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité environnementale

L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) est une méthode rigoureuse de détection des défauts potentiels qu'on peut appliquer à un produit ou à un procédé (Lyonnet, 1997). C'est un outil qui permet d'évaluer les risques potentiels pouvant survenir au cours du processus puis de les hiérarchiser et de mettre en place des actions correctives (Valance, 2003).

Appliquée aux risques environnementaux, cette méthode peut être appelée analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité environnementale ou AMDEC-E.

L'AMDEC-E fut développée dans le domaine de l'environnement en 1999 (E-FMEA) par l'agence de consultation suédoise HRM/Ritline pour être utilisée dans le processus de développement de produit (Wendel, 1999). L'AMDEC-E apporte des modifications à la méthode AMDEC en remplaçant les causes de défauts liés à une activité ou à un produit par les aspects environnementaux et les effets par les impact environnementaux.

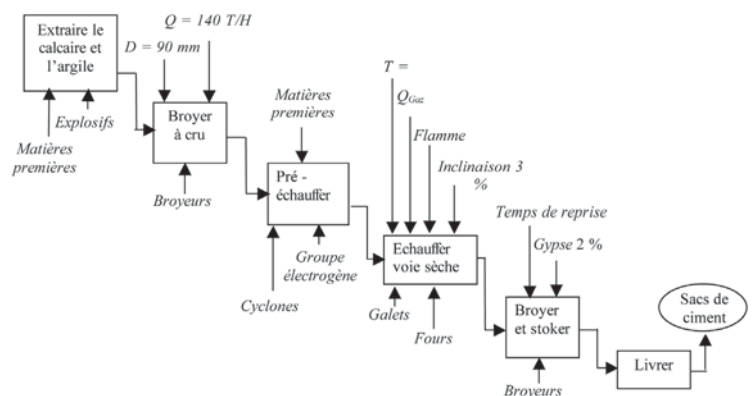
Le but de cette méthode est d'identifier, d'évaluer et de hiérarchiser les impact environnementaux significatifs d'une activité (d'une installation) ou d'un produit tout au long de son cycle de vie d'une façon systématique, dans le but de déterminer les actions nécessaires par ordre de priorité pour réduire l'impact environnemental évalué. C'est à travers cette évaluation que la méthode constitue un outil d'aide à la décision.

## Application à une cimenterie algérienne

### Représentation de l'activité « production du ciment »

Afin de mettre en application les deux méthodes proposées, l'ACV et l'AMDEC-E, nous rappelons brièvement le processus de fabrication du ciment (figure 1). Après extraction du calcaire et de l'argile, ces derniers subissent un premier broyage. Le mélange obtenu est acheminé vers les silos de stockage par des bandes transporteuses. A son arrivée, ce mélange est stocké en tas. Le mélange est broyé à cru pour obtenir de la farine qui va subir un préchauffage au niveau des cyclones puis une cuisson dans les fours rotatifs pour obtenir du clinker. Un deuxième broyage est effectué après ajout de gypse. Le ciment obtenu est stocké pour être commercialisé. La cimenterie étudiée, située à Batna, à l'est de l'Algérie, a obtenu la certification ISO 14001 en 2005. En 2007, près de 850 000 tonnes de ciment ont été commercialisées.

Figure 1. Représentation du système de production de la cimenterie



## Représentation quantitative de la cimenterie par l'ACV

Nous choisissons comme unité fonctionnelle la production, en sortie d'usine, d'une tonne de ciment ensaché. Le tableau 1 rapporte un extrait des données relatives à cette unité fonctionnelle.

### Inventaire de l'ACV

La modélisation du processus nous a permis d'estimer les quantités de poussières et de gaz regroupées dans le tableau 1. Ce dernier nous donne un profil environnemental de l'activité cuisson (zone 300) pour l'année 2007 par l'équation suivante (CITEPA, 2004) :

$$E_{s,a,t} = A_{a,t} \times F_{s,a}$$

Où : E = émission relative à la substance 'S' et à l'activité 'a' pendant le temps 't'

A = quantité d'activité relative à l'activité 'a' pendant le temps 't'

F = facteur d'émission relatif à la substance 's' et à l'activité 'a'.

**Tableau 1. Quantités de poussières et gaz émises dans l'air par la cheminée principale de la cimenterie**

Rappelons que les facteurs d'émission utilisés dans le tableau 1 sont recommandés, respectivement, par la référence (Aoudia, 2001) pour le cas des poussières et par la référence (US EPA, 1997) pour le cas des gaz SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> et CO.

Polluants	Facteur d'émission (kg/tonne)	Emission année 2007 (tonne)
Poussières	3,9	3 789
SO <sub>2</sub>	0,27	262
NO <sub>x</sub>	2,4	2 332
CO <sub>2</sub>	900	874 339
CO	0,49	476

**Tableau 2. Analyse du cycle de vie du système de production de la cimenterie**

Etape	Activités	Matières	Unité	Quantités	Impact environnemental	Fin de vie							
						Impact local	Impact régional	Impact global					
100 : Concassage	Extraction calcaire et argile	Mélange (C+A)	Tonne/ITC	0,52	Vibration du sol Emission de poussières Consommation de matières premières	Altération du site Pollution atmosphérique Ecotoxicité Pollution du sol	Pollution atmosphérique	Epuisement des ressources  Effet de serre					
		Ajouts	Tonne/ITC	0,75									
		Energie électrique Gasol	kWh/TM	28,50									
	Engins de transport	Liquides	Litres/ITC	0,56	Déversement et/ou fuite d'huile des engins Déchets de pneus Déchets de batteries, CO <sub>2</sub>	Pollution photochimique Pollution du sol/sous-sol Pollution atmosphérique	Pollution atmosphérique						
Pneus Accumulateurs batterie		Unité	37										
		Unité	10										
200 : Broyage cru	Broyage farine R1	Farine crue 1	Tonne/ITC	11,59	Fuite de matières (entrée broyeurs) Fuite des gaz de fumée	Pollution atmosphérique Pollution du sol Altération du site	Pollution atmosphérique Pollution du sol	Pollution atmosphérique Epuisement des ressources					
		Broyage farine R2	Energie électrique R1 Farine crue 2 Energie électrique 2	kWh/ITC Tonne/ITC kWh/TF					621 10,19 477				
		Eau	m <sup>3</sup> /ITKK	0,10 <sup>3</sup>									
300 : Cuisson	Conditionner farine	Eau	m <sup>3</sup> /ITKK	0,10 <sup>3</sup>	Consommation d'eau au niveau des tours de conditionnement J1/2K1ITK Emission de poussières. Production de farine non cuite lors du démarrage du four Emission des gaz : CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>	Epuisement des ressources hydriques Pollution du sol Pollution atmosphérique Altération du site Ecotoxicité	Pollution atmosphérique	Epuisement en eau Effet de serre Acidification					
		Echauffer farine four W1 & W2	Clinker (KK) Energie électrique Gaz Clinker Energie électrique Gaz	Tonne/TKK kWh/ITKK Kcal/kg KK tonne/ITkKK kWh/TKK Kcal/kg KK					36 29,71 1015,55 254 2634 1002,8				
	Broyage ciment Z1 & Z2	Ciment broyeur 1		Tonne/ITC					13,10	Emission de poussières Consommation d'eau par injection au niveau des broyeurs Z1/Z2	Ecotoxicité Pollution du sol Pollution atmosphérique	Pollution atmosphérique	Pollution atmosphérique
			Energie électrique Z1	kWh/TC					674				
			Ciment broyeur Z2 Energie électrique Z2	Tonne/ITC kWh/TC					12,43 61				
500 : Expédition	Expédition	Ciment expédié	Tonne	2 027	Déversement de matières par bourrage de la vis sans fin Production de déchets (sacs éventrés) et mise en décharge brute Emission de poussières	Ecotoxicité Pollution du sol Altération du site Pollution atmosphérique	Pollution atmosphérique	Pollution atmosphérique					
		Energie électrique	kWh/Tex	733,14									
		Sacs d'ensachage	Unité/ITC	9,83									
Fin de vie	Utilisation	Sacs d'ensachage	Unité	19 947 360	Emission de poussières Production de déchets de sacs d'emballage	Pollution du sol							

### Légende

— Zone 100 (concassage)  
Tonne/ITC = tonne/une tonne de calcaire

KWh/TM = kilowattheure/tonne de matières

— Zone 200 (broyage cru)

KW h/TC = kilowattheure/tonne de farine

— Zone 300 (cuisson)

KWh/T KK = kilowattheure/tonne de clinker

Kcal/Kg KK = kilocalorie/kilogramme de clinker

Tonne/TC = tonne/tonne de ciment

— Zone 400 (broyage ciment)

KWh/TC = kilowattheure/tonne de ciment

— Zone 500 (expédition)

KWh/Tex = kilowattheure/tonne expédié

### Commentaires des résultats issus de l'utilisation de l'ACV

L'examen des tableaux précédents (1 et 2) montre qu'en termes de pollution, la préoccupation majeure concerne la réduction et le contrôle des émissions de gaz et poussières dont les quantités émises pour l'année 2007 ont été largement supérieures aux plages d'émission des fours à ciment (An Independent Study, 2002). Ces émissions peuvent contribuer aux phénomènes des pluies acides et au réchauffement climatique.

De même, l'émission de gaz la plus significative est celle due aux émissions de CO<sub>2</sub> résultant de la réaction chimique qui transforme le calcaire (Ca CO<sub>3</sub>) en oxyde de calcium (CaO) :



Pour réduire ces émissions de procédés notamment le procédé de cuisson (fours rotatifs), il faut diminuer la part de clinker, ce qui nous amène à remplacer une partie de CaCO<sub>3</sub> par d'autres matériaux de substitution. Cependant, cette alternative risquerait de se heurter à de nombreux problèmes techniques, sociaux et économiques. La solution la plus adéquate dans l'immédiat serait de remplacer les électrofiltres par des filtres à manches efficaces pour les émissions de poussières.

Pour ce qui est des quantités de poussières, nous estimons qu'en plus des quantités de poussières émises du procédé de cuisson (fours rotatifs), une quantité de poussière fugitive est générée et déposée localement par les opérations d'extraction de transport de stockage et de distribution du ciment. Certes, elles ont un impact faible au-delà des limites immédiates de la cimenterie, mais un climat sec est plus favorable en termes de pollution (climat de la région de la cimenterie étudiée).

L'émission de SO<sub>2</sub> par la cimenterie dans l'atmosphère durant une période de 4 à 25 jours est oxydée en acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et est à l'origine des pluies acides. Si les émissions de SO<sub>2</sub> dépassent la limite tolérable, la cause réside dans la composition de la matière première (il y a très peu de soufre dans le gaz naturel algérien).

L'oxyde d'azote, est un produit de la combustion de l'azote de l'air. Le combustible utilisé, en l'occurrence le gaz naturel n'en contient pas. Mais, à 1405°C, l'oxydation de l'azote atmosphérique devient importante. Aussi, d'autres facteurs peuvent contribuer à la formation d'azote. C'est le cas : de la teneur en oxygène, de la forme de la flamme, de la géométrie de la chambre de combustion, du taux d'humidité et du temps de combustion.

Une autre préoccupation concerne les métaux lourds qui sont incorporés dans la matrice minérale du clinker et sont fixés chimiquement dans le ciment. Ce cas pourrait faire l'objet d'une autre étude plus approfondie.

En plus de ces pollutions atmosphériques, la production, la distribution et l'utilisation du ciment ont un effet visuel significatif sur le paysage en particulier lors des étapes d'extraction et de production.

### Analyse environnementale de la cimenterie retenue par une AMDEC-E

L'AMDEC-E représentée par le tableau 3 est spécifique à la zone 300 qui correspond à l'activité de cuisson. La limitation de l'AMDEC-E à ce procédé est justifiée par deux raisons : d'une part, les fours rotatifs sont considérés comme équipements stratégiques de la cimenterie, et d'autre part, les principaux rejets de la fabrication du ciment sont les émissions atmosphériques de ces fours.

Tableau 3. Exemple de l'utilisation de l'AMDEC-E pour le four de cuisson

				AMDEC-E							
Identification des impacts				Evaluation			Maîtrise				
N°	Activités	Aspect env.	Impact env.	E G	E T	R E	Recommandations	E G	E T	R E	Pérennisation en termes d'efforts
A52	Cuisson	Consommation gaz	Epuisement ressources naturelles	2	4	8	Respecter les ratios de consommation spécifique électricité (107 kWh/tonne) et gaz (873 Kcal/kgKK) Conversion des électrofiltres en filtres à manche avec opacimètres Installation en permanence d'un réseau de surveillance et de contrôle de la pollution	1	2	2	Effort moyen à important pour la maîtrise du processus
		Consommation énergie électrique	Epuisement ressources naturelles	2	4	8					
		Consommation matières premières	Epuisement ressources naturelles	2	4	8					
			<b>Pollution atmosphérique (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>)</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>16</b>					

Dans le tableau 3, chaque aspect environnemental est identifié ainsi que ses impacts environnementaux. Afin de hiérarchiser ces impacts, nous proposons deux critères de pondération : l'éten-

due géographique – EG – de l'impact (local à planétaire) ; et l'étendue temporelle de l'impact – ET – (court terme à long terme).



Le produit de ces deux critères nous permet d'évaluer un troisième critère qu'est le risque environnemental (RE). RE varie entre 1 et 16 : RE est faible s'il est compris entre 1 et 4 ; RE est moyen s'il est compris entre 4 et 12 ; RE est fort s'il est compris entre 12 et 16.

La dernière colonne représente une appréciation qualitative des efforts que les responsables des entreprises doivent faire pour pérenniser les mesures préconisées (Boubaker, 2006).

## Conclusion

L'augmentation de la demande et de la production de ciment en Algérie entraîne une augmentation inquiétante de la pollution générée par cette industrie. Afin de maîtriser cette pollution, les entreprises doivent mettre en place des systèmes de management environnemental dont la première étape est l'analyse des impacts environnementaux. Afin d'effectuer cette analyse, nous proposons une démarche reposant sur deux méthodes : l'ACV et l'AMDEC-E.

Ces deux méthodes permettent de décrire les interactions entre les procédés et la performance environnementale. Dans un premier temps, l'ACV permet de décrire et d'évaluer les impacts environnementaux du processus de fabrication dans son ensemble et d'identifier les étapes les plus polluantes des procédés mis en œuvre. Dans un second temps, l'AMDEC-E appliquée à ces procédés permet alors de cibler les actions à mettre en place pour mieux maîtriser ces impacts et pérenniser ensuite ces efforts.

## Bibliographie

1. AFNOR (2004). ISO 14001 - Systèmes de management environnemental - Exigences et lignes directrices pour son utilisation - X30-200, Paris.
2. An Independent Study (2002). « Environmental, Health, and Safety Performance Improvement », commissioned by World Business Council for Sustainable Development December.
3. Aoudia, M.T. (2001). « Les rejets atmosphériques dans le secteur de la production du ciment et leurs impacts sur l'environnement : moyens d'évaluation et de contrôle », séminaire sur l'environnement, Alger, Algérie.
4. Boiral, O (2001). « ISO 14001 Certification Multinational Firms : The Paradoxes of Integration », Global Focus, vol. 13, n° 13, pp. 79-94.

5. Boubaker, L., M. Djebabra et S. Chaabane (2006). « Professional hazards : a methodological proposal », Proceedings of the 2006 International Symposium on Safety Science and Technology – ISSST' 2006, edited by Science Press USA Inc., vol. VI, Part A, p. 527-532, October 24-27, Changsha, China.
6. CITEPA, Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (2004). « Calcul des émissions dans l'air - Principes méthodologiques généraux - Méthodologie - Emissions ».
7. Guide pour l'estimation des gaz à effet de serre (2004). « Production du ciment », Division des gaz à effet de serre, Environnement Canada, mars.
8. Lambert, G., N. Ouedraogo (2006). « Normes, routines organisationnelles et apprentissage d'entreprise », colloque Métamorphose des Organisations, 5<sup>e</sup> édition, Grefige-Ceremo, 23 - 24 novembre, Nancy.
9. Loerincik, Y., O. Jolliet (2007). « ACV et Eco conception : comparaison des filières de production d'électricité », Energie et développement durable, JEEA 2007, ENS Cachan, antenne de Bretagne, 19-23, mars 14-15.
10. Lyonnet, P (1997). « La qualité, outils et méthodes », Technique et documentation, Paris.
11. Melnyk, S.A., R.P. Sroufe (2002). « Assessing the effectiveness of US voluntary environmental programmes: an empirical study », International Journal of Production Research, Vol. 40, N° 8, pp. 1853-1878.
12. Ministère algérien de l'Industrie (2007). « Annuaire des entreprises certifiées ISO 9000/ISO 14000 et laboratoires accrédités », Direction générale de la régulation et de la normalisation.
13. Ritzén, S., J. Backmar et M. Norell (1997). « Product development - Integration of Environmental Aspects », pp. 152-162, June 26-27, Berlin.
14. US EPA, (1997). « Procedures for Preparing Emission Factor Documents », US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, Office of Air Quality Planning and Standards Office of Air and Radiation, Novembre.
15. Valance, C., J.-P. Grandhay et E. Luporsi (2003). « Amélioration de la qualité des processus dans les organisations complexes », Application à la recherche clinique initiée par le centre Alexis Vautrin, Congrès Qualita, Nancy.
16. Wendel, A., Louis S. (1999). « Integration of Environmental within the Product Development Process at Volvo Car Corporation », Sweden.

## DÉCHETS SCIENCES & TECHNIQUES, REVUE FRANCOPHONE D'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE

SAP - 9, rue de l'Arbre Sec - 69281 LYON CEDEX 01 - Mèle : olivier.guichardaz@pro-environnement.com

Service abonnement : SAP/DPE - Service abonnement - 9, rue de l'Arbre Sec - 69281 LYON CEDEX 01 - Tél. : 04 72 98 26 69 - Fax : 04 72 98 26 80

N° de commission paritaire : 0307 T 88295 - N° ISSN : 0753-3454. Dépôt légal : À parution - Imprimerie Louis Jean/Gap - Photocomposition SAP

Principaux associés : DPE