

Données environnementales d'un procédé d'enrobage : quelles incertitudes ?

Anne Ventura*, Pierre Monéron & Agnès Jullien

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Section Développement Durable
Route de Bouaye BP 4129 – 44341 Bouguenais cedex
* anne.ventura@lcpc.fr

Résumé :

Des contraintes environnementales croissantes sont exercées sur le secteur industriel. Pour y répondre, celui-ci s'organise pour produire et diffuser des données environnementales d'Inventaire de Cycle de Vie (ICV). Cette méthode est actuellement fortement émergente au niveau européen pour l'évaluation des performances environnementales des produits. La qualité des résultats d'un ICV, n'étant qu'aussi bonne que celle des données qu'il utilise, mais leurs méthodes d'obtention ne sont pourtant que rarement décrites. Cet article propose, à partir des méthodes utilisées pour mesurer les émissions atmosphériques d'un procédé d'enrobage à chaud, de mener une réflexion plus large concernant la qualité des données des ICV. Après une brève présentation du procédé, les méthodes de calcul des flux et des incertitudes sont présentées, pour les polluants atmosphériques mesurés. Alors que les données environnementales d'inventaire sont toujours considérées proportionnelles à la masse produite, il apparaît que d'autres paramètres seraient plus sensibles, comme, ici, ceux du processus de combustion.

Abstract :

Growing environmental constraints are exerted on industrial sector. Industries answer to this pressure by organising itself to produce and disseminate Life Cycle Inventory (LCI) environmental data. This method is indeed currently strongly emerging in the European policy to assess environmental performances of products. The quality of a LCI results is only as good as the quality of used data, but their obtaining methods are however rarely described. This article proposes, from methods used to measure airborne emissions of a hot mix asphalt process, to conduct a general reasoning concerning LCI data. After a brief presentation of the studied process, calculations methods of inventory flows and uncertainties are presented for the measured atmospheric pollutants. Whereas general inventory data are always considered proportional to the mass of product, it appears that other parameters could be more sensitive, such as, in the presented case, those of the combustion process.

Mots-clefs : Pollution atmosphérique, Analyse de Cycle de Vie, Calcul d'incertitudes

1 Introduction

Des contraintes environnementales croissantes sont exercées sur les différents secteurs industriels. Pour y répondre, les professions du génie civil s'organisent notamment pour produire et diffuser des bases de données environnementales (contenant des inventaires massiques de consommations et d'émissions) adaptées à leur utilisation dans des Analyses de Cycle de Vie (ACV). Cette approche est actuellement fortement émergente au niveau européen pour évaluer les performances environnementales des matériaux de construction du génie civil.

Les méthodologies utilisées pour obtenir ces données sont cependant rarement décrites. Or, cet aspect est primordial, car la qualité des résultats d'une étude ACV est au mieux aussi bonne que la qualité des données qu'elle utilise. Cet article propose, à partir des méthodes utilisées

pour mesurer les émissions à l'air d'un procédé d'enrobage à chaud, de mener une réflexion concernant la qualité des données d'inventaire produites. Après une brève présentation du procédé centrale d'enrobage, les méthodes de calcul des flux et des incertitudes pour les polluants atmosphériques mesurés sont présentées.

2 Présentation du procédé centrale d'enrobage et des méthodes de mesures des émissions atmosphériques

La fabrication des enrobés en centrale à chaud impose le séchage et le chauffage de granulats, effectué à l'intérieur d'un tambour sécheur enrobeur (TSE), qui assure également leur mélange avec un liant bitumineux (FIG. 1). Chaque constituant granulaire est admis dans le tambour à des conditions de température et de teneur en eau qui dépendent des conditions de stockage. Le TSE est mis en dépression pour dépoussiérer et canaliser les rejets à l'atmosphère. Les sources d'émissions gazeuses sont ainsi systématiquement issues de la combustion et du bitume chauffé.

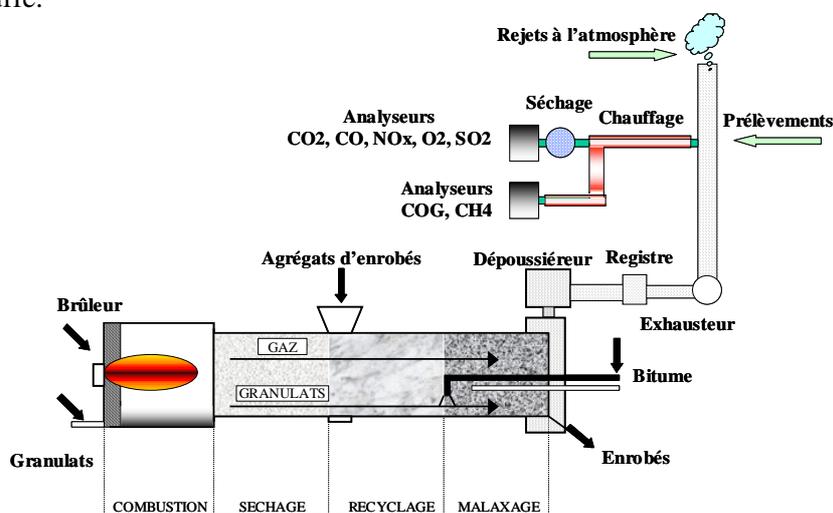


FIG. 1 Schéma du procédé centrale d'enrobage

Les mesures doivent être effectuées au niveau de la cheminée destinée aux rejets à l'atmosphère, selon des procédures normalisées. A cet effet, cette cheminée est munie d'une bride permettant le passage de l'appareillage conformément aux dispositions de la norme NF X 44 051. Les procédures de prélèvements utilisées sont schématisées sur la (FIG. 1) ci-contre. Selon l'arrêté de février 1998, les mesures sur centrales d'enrobage se font sur des gaz humides. Les analyseurs en CO₂, CO, NO_x, O₂ et SO₂, nécessitent cependant un mélange gazeux sec, et donc l'utilisation d'un dispositif de séchage par condensation en amont. Les COG et CH₄ sont directement mesurés sur les gaz humides. Les HAP ne sont pas abordés dans cet article, l'exploitation des résultats faisant l'objet d'une publication à part Ventura et al. (2007). La teneur en eau des gaz est déterminée par condensation à 5°C du gaz échantillonné et par pesée du condensat piégé par le dispositif de prélèvement durant toute la durée du prélèvement gazeux dans la cheminée.

3 Calcul des flux

Le calcul des flux (masse de composé émis) est effectué selon le schéma de la FIG. 2 à partir des mesures de fractions volumiques (concentrations) en continu des différents composés chimiques suivis (éq. ①). Le débit utilisé pour calculer le flux dépend des conditions des gaz

m_i : flux du composé i ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
 $f_{i \text{ ou } j}$: fraction volumique du composé i ou j (ppm ou %vol)
 V_i^0 : volume du composé i dans les conditions normales (Nm^3)
 V^0 : volume molaire normal ($22,4\cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$)
 P^0 : pression normale (101 325 Pa)
 T^0 : température normale (0 K)
 Q^0 : débit gazeux dans les conditions normales ($\text{Nm}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
 Q_{total}^0 : débit du mélange gazeux total dans les conditions normales ($\text{Nm}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
 Q_{sec}^0 : débit du mélange gazeux séché dans les conditions normales ($\text{Nm}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
 D : diamètre intérieur de la cheminée (m)
 T : Température (K)
 P : pression statique dans le conduit (Pa)
 $\overline{v_{\text{total}}}$: vitesse moyenne du mélange gazeux total dans la cheminée ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 $v_{\text{total}}(x)$: vitesse du mélange gazeux total au point x ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 $v_{\text{total},x=0}$: vitesse du mélange gazeux total au point $x = 0$ (centre de la conduite) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
 x : abscisse du point de mesure de vitesse dans le conduit de cheminée
 V_p : volume de prélèvement de la vapeur d'eau
 V_p^0 : volume de prélèvement de la vapeur d'eau dans les conditions normales (Nm^3)
 $m_{\text{H}_2\text{O}}$: masse de vapeur d'eau prélevée (kg)
 $\rho_{\text{H}_2\text{O}}^0$: masse volumique de la vapeur d'eau dans les conditions normales ($\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$)
 $M_{\text{H}_2\text{O}}$: masse molaire de l'eau ($18\cdot 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$)
 $f_{\text{H}_2\text{O}}$: fraction volumique de la vapeur d'eau sur gaz humides (%)
 P_{dyn} : pression dynamique au point de mesure (Pa)
 ρ_{total} : masse volumique du mélange gazeux total dans les conditions de mesure ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
 ρ_{total}^0 : masse volumique du mélange gazeux total dans les conditions normales ($\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$)
 M_j : masse molaire du composé j ($\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$)

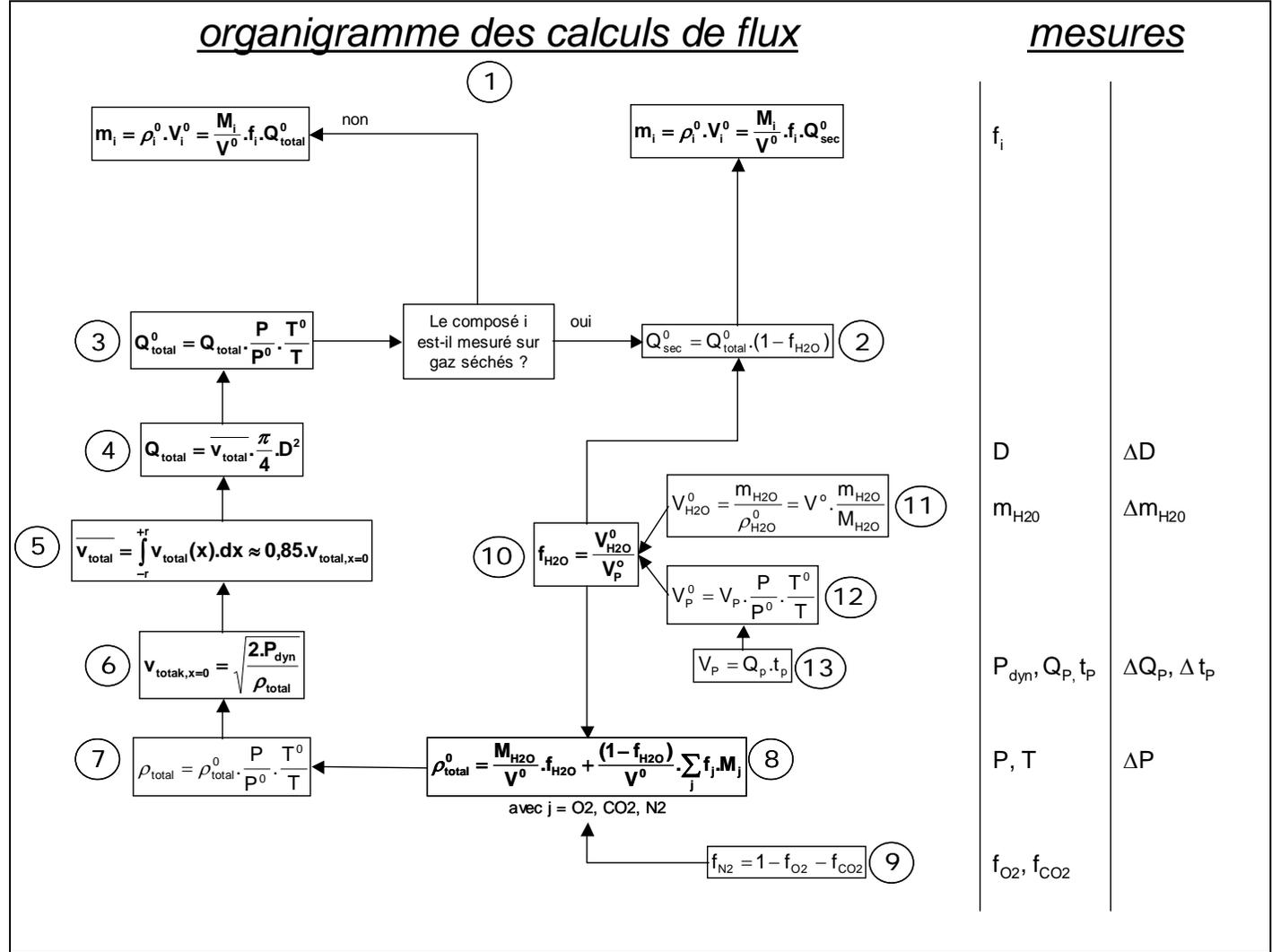


FIG. 2 - Organigramme de calcul des flux de polluants atmosphériques mesurés à la cheminée

pouvant circuler dans l'analyseur (voir figure 1). Pour des gaz séchés, le débit est celui du mélange gazeux sec (éq. ②), sinon, le débit est celui du mélange gazeux total. Le débit utilisé dans ces deux équations est converti aux conditions normales de température et de pression, à partir du débit obtenu expérimentalement (éq. ③). Le débit expérimental est obtenu à partir de la vitesse des gaz et du diamètre du conduit de la cheminée (éq. ④). La vitesse moyenne de circulation du mélange gazeux total est fonction de la vitesse maximale (éq. ⑤) au centre de la conduite ($x = 0$), le régime d'écoulement étant vérifié turbulent à partir d'une carte des vitesses établie préalablement. La vitesse du mélange gazeux total est obtenue à partir d'une mesure de pression dynamique effectuée au centre de la conduite (éq. ⑥). Cette relation nécessite de connaître la masse volumique du mélange gazeux total dans les conditions de mesure (éq. ⑦). La masse volumique du mélange gazeux total dans les conditions normales est déterminée à partir des mesures des fractions volumiques des constituants gazeux majoritaires (éq. ⑧). La fraction volumique de l'azote est calculée sur la base des mesures sur gaz secs des autres constituants gazeux (éq. ⑨). La teneur en eau des gaz (éq. ⑩) est obtenue à partir du volume de vapeur d'eau correspondant aux conditions normales et calculé à partir de la masse d'eau prélevée lors de la mesure (éq. n°11). Le volume de gaz prélevé aux conditions normales est calculé à partir des mesures de débit humide et de la durée du prélèvement (éq. n°12 et 13).

4 Calcul des incertitudes

Le calcul d'incertitude fait appel à l'étude statistique lorsque les mesures sont répétées. Dans ce contexte, les mesures de fractions volumiques f_i , de pressions dynamique P_{dyn} et statique P , et de température T , sont effectuées en continu avec une fréquence d'échantillonnage inférieure à la minute. Pour un suivi s'étalant sur 30 minutes, les effectifs des différents échantillons sont grands ($n > 30$) et fournissent les estimations \bar{y}^* et σ^* des caractéristiques moyenne (m) et écart type (σ) de la distribution normale. Avec la probabilité $1-\alpha$, l'incertitude absolue statistique est :

$$\Delta y = u \frac{\alpha}{2} \times \frac{\sigma^*}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Les estimations utilisées dans les formules de la FIG. 2, sont des moyennes calculées sur une période qualifiée de phase stabilisée. La zone est considérée stabilisée lorsque la température des enrobés reste dans la tolérance de $\pm 5^\circ\text{C}$ fixée dans la norme NF P 98-150.

Pour des raisons techniques ou pratiques, certaines mesures ne peuvent être effectuées qu'une seule fois par fabrication, voire une seule fois pour l'ensemble des fabrications. L'incertitude relative est alors fonction de l'erreur de mesure et de l'erreur de lecture. L'erreur de mesure est liée à la précision de l'appareillage (P), exprimée en % de la valeur y par l'intermédiaire de la lecture ($lect$). Avec un appareil numérique caractérisé par un calibrage (cal) et un nombre de points d'affichage (N), l'évaluation de l'incertitude sur une mesure directe est effectuée selon :

$$\Delta y = P \times lect \times \frac{cal}{N} + \frac{cal}{N} \quad (2)$$

L'évaluation de l'incertitude sur une mesure indirecte, à partir de mesures directes supposées indépendantes, est effectuée selon :

$$\text{Pour } y = f(x_0, \dots, x_i, \dots, x_n), \quad dy = \sum_{i=0}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot dx_i, \quad \text{et :} \quad \Delta y = \sum_{i=0}^n \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \cdot \Delta x_i \quad (3)$$

Ces incertitudes sont utilisées dans les calculs de la FIG. 2, selon le détail présenté dans la colonne mesures.

5 Résultats et discussion

La méthodologie présentée ici a été appliquée à des mesures, effectuées en 2003 et destinées à comparer l'effet de différents taux de recyclage sur les émissions atmosphériques d'une centrale d'enrobage Nouvion et al. (2005). Comme détaillé plus haut, le calcul des incertitudes des mesures directes ou indirectes implique le relevé ou la fixation arbitraire de certaines erreurs (d'appareillage ou relatives). Les valeurs utilisées dans les calculs sont présentées dans le TAB. 1

| Grandeurs | Erreur absolue | Unité | Erreur relative |
|---|----------------|--------------------|-----------------|
| Pression absolue P | | Pa | ± 5% |
| Diamètre interne cheminée D | ± 0.01 | m | |
| Débit de prélèvement sonde Q_p | ± 0,001 | $m^3 \cdot s^{-1}$ | |
| Durée prélèvement t_p | ± 30 | s | |
| Masse d'eau condensée prélevée m_{H_2O} | ± 0,001 | kg | |

TAB. 1 – Incertitudes relevées ou fixées arbitrairement

La FIG. 3 présente les résultats de calculs de flux et leurs incertitudes. On constate que les incertitudes concernant les émissions de NO_x (FIG. 3a) ne permettent pas de considérer le flux comme différents entre les différentes modalités. Pour les CO_g, on constate que le taux de recyclage 20% émet significativement moins que les autres modalités testées. Pour le CO, c'est le taux de recyclage de 0% qui émet significativement plus que les autres modalités testées. Pour le CO₂ (FIG. 3b), l'ensemble des modalités ne semble pas se différencier les unes des autres. Les incertitudes relatives varient de 16% à 42%, pour l'ensemble des flux. La modalité indiquée 10w correspond à 10% de taux de recyclage fabriqué avec du sable artificiellement mouillé.

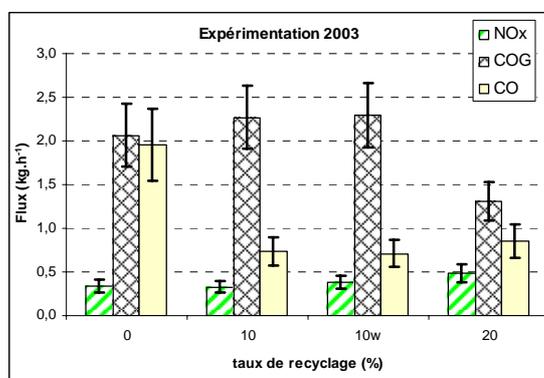


FIG. 3A. NO_x, CO_g ET CO

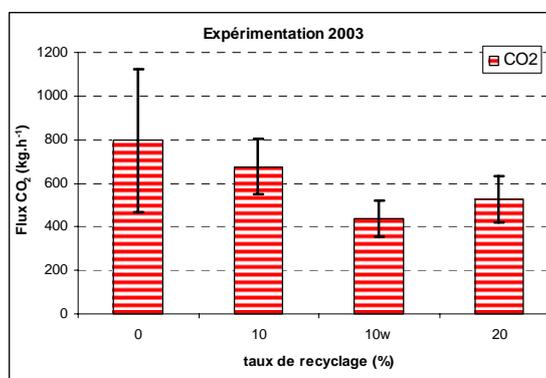


FIG. 3B. CO₂

FIG. 3 – Calculs de flux réalisés en 2003 et leurs incertitudes

Certaines incertitudes ne sont pas incluses dans les calculs présentés car elles sont difficiles à évaluer. Pour l'humidité des fumées, les mesures correspondent à une masse totale prélevée sur toute la durée de la fabrication. Le démarrage du prélèvement est toutefois décidé en cours d'expérimentation, comme correspondant, selon les paramètres de fonctionnement observés, au début d'une phase stabilisée (entre 5 et 10 minutes après le démarrage de la fabrication). S'il est constaté par la suite que cette période n'était pas stabilisée, il n'est cependant plus possible d'intervenir sur le résultat. Une part d'incertitude est dans ce cas non évaluée. Pour une meilleure maîtrise de la mesure et des incertitudes, il serait préférable de disposer d'une technique permettant de suivre l'humidité en continu. D'autre part, certaines incertitudes sont

probablement sous-estimées. En effet, les incertitudes assimilées à celles des appareillages, négligent les erreurs liées à l'opérateur et à la variabilité due au procédé. Notamment, parmi les valeurs du TAB. 1, l'incertitude sur la pression absolue (somme de la pression statique et de la pression atmosphérique) pourrait être améliorée. En effet, les valeurs de pression statique n'ont été mesurées que de façon sporadique (on dispose de 3 à 10 valeurs par modalité). Or on constate lors des expérimentations que ces grandeurs peuvent varier sur des temps très courts. Ainsi une fréquence d'échantillonnage inférieure à la seconde serait souhaitable afin d'appréhender correctement leur variabilité. Il faut souligner par ailleurs que le calcul de la vitesse des gaz repose sur une mesure sporadique de pression dynamique (équation n°6 sur la FIG. 2) effectuée au centre du conduit. A cela il faut préciser d'autre part que la carte des vitesses permettant de vérifier que le régime d'écoulement des gaz est bien turbulent, n'est effectuée qu'une fois dans la journée. Il serait ainsi préférable de disposer de mesures en continu à échantillonnage fréquent et simultanées en différents points du conduit, afin d'approcher au plus près la vitesse réelle ainsi que sa variabilité.

6 Conclusion

Le calcul de flux massiques de polluants atmosphériques requiert une approche pluridisciplinaire. Il est nécessaire d'aborder les processus d'analyses chimiques de façon suffisamment fine, concernant la composition de l'air, les procédés de séchage et de prélèvement des polluants. Il requiert également des approches liées à la physique, concernant les propriétés des gaz à température et pression variables. Ainsi, beaucoup de paramètres non directement liés à l'environnement doivent être relevés, sans lesquels l'évaluation des flux est imprécise, voire impossible.

On constate d'après les résultats présentés dans cet article, qu'avec une maîtrise relativement bonne des conditions de mesures, les incertitudes sont élevées : les erreurs relatives minimales obtenues sur les flux étant de l'ordre de 15%. De plus, lors d'un procédé que l'on peut qualifier de stabilisé du point de vue de la production, on observe des variabilités importantes des données environnementales. Ainsi, il est apparaît que dans le cas présent, le paramètre que l'on veut observer (le taux de recyclage) n'est vraisemblablement pas pertinent du point de vue de la sensibilité des flux environnementaux mesurés, et que d'autres facteurs interviennent de façon plus significative.

Références

- Nouvion, S., Ventura, A., Jullien, A., Monéron, P. & Schemid, M. 2005 Émissions à l'atmosphère liées à l'élaboration d'enrobés en centrale d'enrobage à chaud. *Colloque européen Orgagec Matériaux organiques pour la construction - risques sanitaires et environnementaux, Nantes, 4-5 octobre 2005*, pp. 177-186
- Paranhos, R., Ventura, A., Monéron, P. & Jullien, A. 2005 Smoke-stack airborne emissions of a hot mix asphalt plant for life cycle inventory available data. *2nd International Conference on Green and Sustainable Chemistry of American Chemical Society, Washington DC (USA), June 20-24, 2005*
- Ventura, A., Monéron, P., Jullien, A., Paranhos, R. & Schemid, M. 2005 Approche multi-échelle de la collecte des données sur une centrale d'enrobage. *Colloque européen Orgagec Matériaux organiques pour la construction - risques sanitaires et environnementaux, Nantes, 4-5 octobre 2005*, pp. 187-197
- Ventura, A., Monéron, P. & Jullien, A. 2007 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons emitted from a hot mix asphalt process : study of the influence of recycled bitumen use, *Journal of Environmental Engineering and Science, accepted*.