



**Conseil économique  
et social**

Distr.  
GÉNÉRALE

EB.AIR/WG.1/2005/9  
21 juin 2005

FRANÇAIS  
Original: ANGLAIS

COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE

ORGANE EXÉCUTIF DE LA CONVENTION  
SUR LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE  
TRANSFRONTIÈRE À LONGUE DISTANCE

Groupe de travail des effets  
(Vingt-quatrième session, Genève,  
31 août-2 septembre 2005)  
Point 5 v) de l'ordre du jour provisoire

**MODÉLISATION DES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR  
LA RÉGÉNÉRATION DES EAUX DOUCES ACIDIFIÉES**

Rapport établi par les centres des Programmes internationaux concertés de surveillance  
intégrée des effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes (PIC-Surveillance  
intégrée) et d'évaluation et de surveillance de l'acidification des cours d'eau  
et des lacs (PIC-Eaux)

**Généralités**

1. Aussi bien le PIC-Eaux que le PIC-Surveillance intégrée, ainsi que plusieurs projets de l'Union européenne (RECOVER 2010, EMERGE) (Stoddard *et al.* 1999, Evans *et al.* 2003, Forsius *et al.* 2001, Skjelkvåle *et al.* 2001), fournissent une bonne documentation sur la régénération chimique à grande échelle des eaux de surface acidifiées d'Europe et d'Amérique du Nord, mais on en sait beaucoup moins sur la régénération biologique à l'échelle régionale. Selon des études de modélisation à l'échelle régionale fondées sur les plans actuels de réduction des émissions, la régénération chimique devrait s'intensifier (Jenkins *et al.* 2003a, Wright *et al.* 2005a), mais ces scénarios comportent des incertitudes qui tiennent tout d'abord aux effets des changements climatiques et au futur comportement de l'azote dans les écosystèmes, ensuite à la réaction biologique.

Les documents établis sous les auspices ou à la demande de l'Organe exécutif de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance aux fins d'une distribution GÉNÉRALE doivent être considérés comme provisoires tant qu'ils n'ont pas été APPROUVÉS par l'Organe exécutif.

2. De façon générale, on a retenu les conditions climatiques actuelles dans les prévisions modélisées des effets des futurs scénarios de dépôt (c'était notamment le cas des études de Jenkins *et al.* (2003a) et de Wright *et al.* (2005a)). Cependant, on anticipait d'importants changements dans les régions acidosensibles d'Europe et d'Amérique du Nord (GIEC, 2001, par exemple), et l'orientation et l'ampleur de ces changements pourraient peser lourdement sur le comportement des composés acidifiants dans les écosystèmes, tant terrestres qu'aquatiques (Skjelkvåle *et al.* 2003, par exemple). Plusieurs facteurs entrent en jeu, dont les plus importants sont les suivants:

- a) La fréquence et la gravité accrues des épisodes de dépôt de sel marin;
- b) Les modifications des flux hydrologiques;
- c) L'évolution des processus d'altération météorologique et d'absorption au niveau des captages;
- d) Les changements survenant dans le taux de décomposition et la minéralisation azotée du sol.

3. Il faudrait obtenir des données à long terme provenant de sites ayant fait l'objet d'études intensives afin d'analyser et modéliser les interactions complexes qu'entretiennent ces processus.

4. Dans le cadre de son vaste projet EURO-LIMPACS ([www.eurolimpacs.ucl.ac.uk](http://www.eurolimpacs.ucl.ac.uk), 2004-2009), l'Union européenne étudie les incidences des changements planétaires sur les écosystèmes d'eau douce. Les instituts qui ont participé à ce projet ont utilisé des données recueillies sur les sites du PIC-Surveillance intégrée, du PIC-Eaux et d'autres sites, ces éléments ayant été essentiels aux travaux sur la modélisation et les séries chronologiques ainsi qu'aux travaux expérimentaux. Ce projet a livré une première évaluation, sur modèle, des incidences des changements planétaires sur la neutralisation de l'acidification (Wright *et al.* 2005b).

## I. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### A. Sites

5. On a utilisé, pour l'évaluation, des données provenant de 14 sites clefs situés dans des régions acidosensibles. Il s'agissait de captages qui avaient été étudiés de façon intensive à l'aide d'ensembles de données à long terme et d'abondantes informations sur les dépôts, la chimie du sol et de l'eau et la biologie. Ces sites étaient couverts de forêts et/ou de landes et étaient affectés d'un large gradient de charges de dépôt et de conditions climatiques:

- a) Birkenes (Norvège);
- b) Gårdsjön (Suède);
- c) Svartberget (Suède);
- d) Valkea-Kotinen (Finlande);
- e) Lysina (République tchèque);

- f) Lac Certovo (République tchèque);
- g) Lac Starolesniakse (Slovaquie);
- h) Lac Paione Superiore (Italie);
- i) Lac Redo (Espagne);
- j) Lochnagar (Royaume-Uni);
- k) Scoat Tarn (Royaume-Uni);
- l) Gwy (Royaume-Uni);
- m) Plastic Lake (Canada);
- n) White Oak Run (États-Unis d'Amérique).

## **B. Modèles**

6. Deux modèles dynamiques de l'acidification bien connus ont servi au travail de modélisation. Le modèle MAGIC – à paramètres agrégés – de complexité intermédiaire, élaboré pour établir des prévisions des effets à long terme des dépôts acides sur la chimie des eaux de surface (Cosby *et al.* 2001), a simulé la chimie de la solution du sol et celle des eaux de surface afin de prévoir les concentrations moyennes des principaux ions. Ce modèle a calculé, pour chaque tranche temporelle (en l'occurrence une année), les concentrations des ions principaux en présumant une simultanéité des réactions liées à l'adsorption de sulfates, à l'échange de cations, à la dissolution-précipitation-spéciation de l'aluminium et à la dissolution-spéciation du carbone inorganique et organique. Ce modèle rendait compte du bilan massique des ions principaux dans le sol par le calcul des flux résultant des intrants atmosphériques, des apports chimiques liés aux conditions météorologiques, de l'absorption nette par la biomasse et des pertes dues au ruissellement.

7. Le deuxième modèle employé, le modèle SMART, qui ressemblait à bien des égards au modèle MAGIC, se composait d'un ensemble d'équations de bilan massique décrivant les relations entrées-sorties des ions principaux dans le sol, y compris les anions organiques, et d'un ensemble d'équations décrivant les processus du sol (faible cinétique et état d'équilibre). Pour une description détaillée du modèle SMART, on se rapportera à De Vries *et al.* (1989) et Posch *et al.* (1993).

8. Les données d'entrée nécessaires à l'étalonnage des modèles MAGIC et SMART étaient les suivantes: caractéristiques des lacs et des captages, caractéristiques physico-chimiques du sol, flux entrées-sorties d'eau et d'ions principaux et absorption nette de cations basiques par la végétation. Le modèle SMART a été appliqué sur le site de Valkea-Kotinen et le modèle MAGIC sur les autres sites. L'un et l'autre avaient déjà été utilisés pour évaluer les incidences des scénarios des dépôts futurs sur la régénération des sols et des eaux de surface des sites du PIC-Surveillance intégrée (indépendamment des interactions avec les changements climatiques) (Forsius *et al.* 1998, Jenkins *et al.* 2003b).

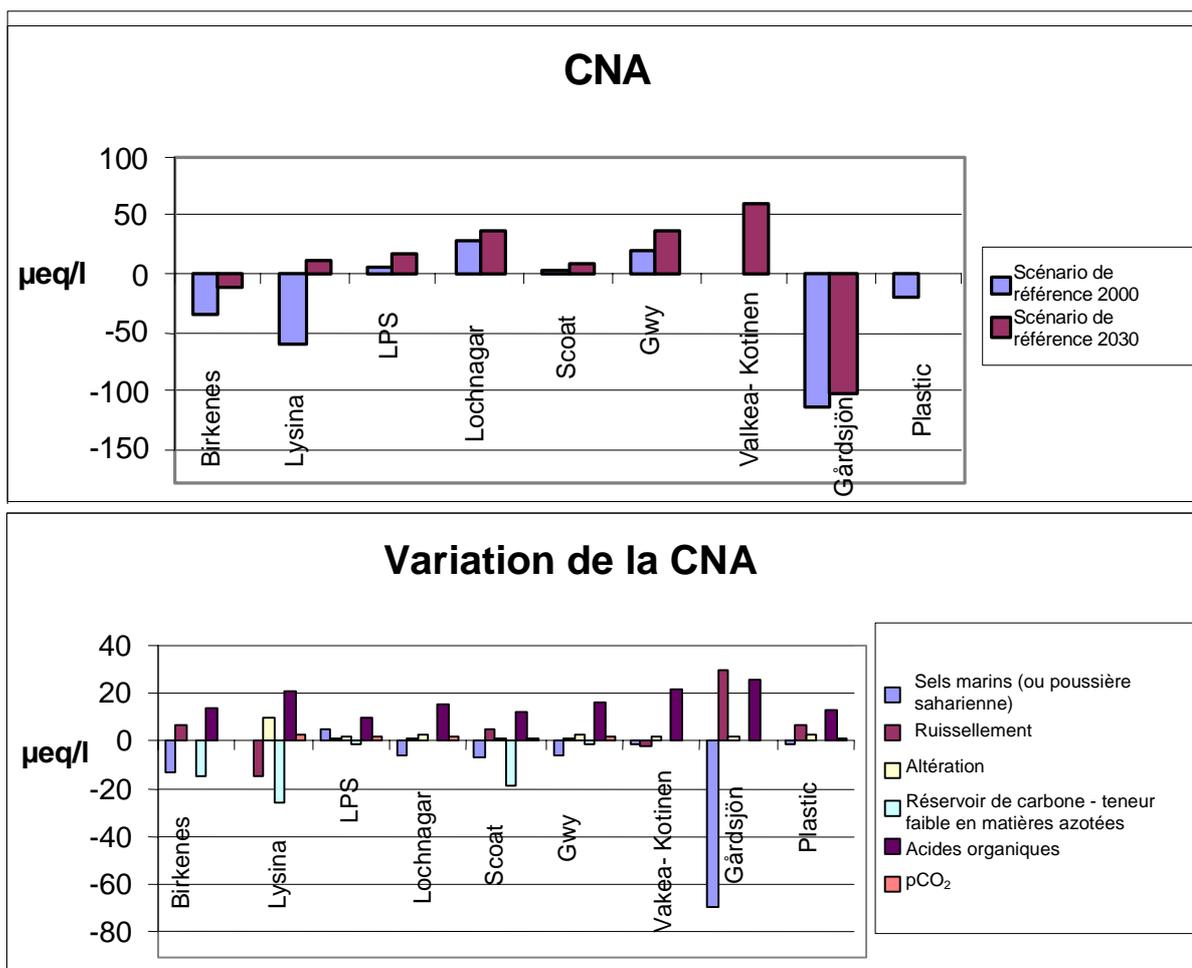
### **C. Simulations**

9. La modélisation a été réalisée sous forme d'analyse de sensibilité, les paramètres clefs ayant été modifiés sur des fourchettes larges, mais viables. Les modèles ont été tout d'abord étalonnés à l'aide de valeurs mesurées, puis il leur a été appliqué les scénarios suivants:

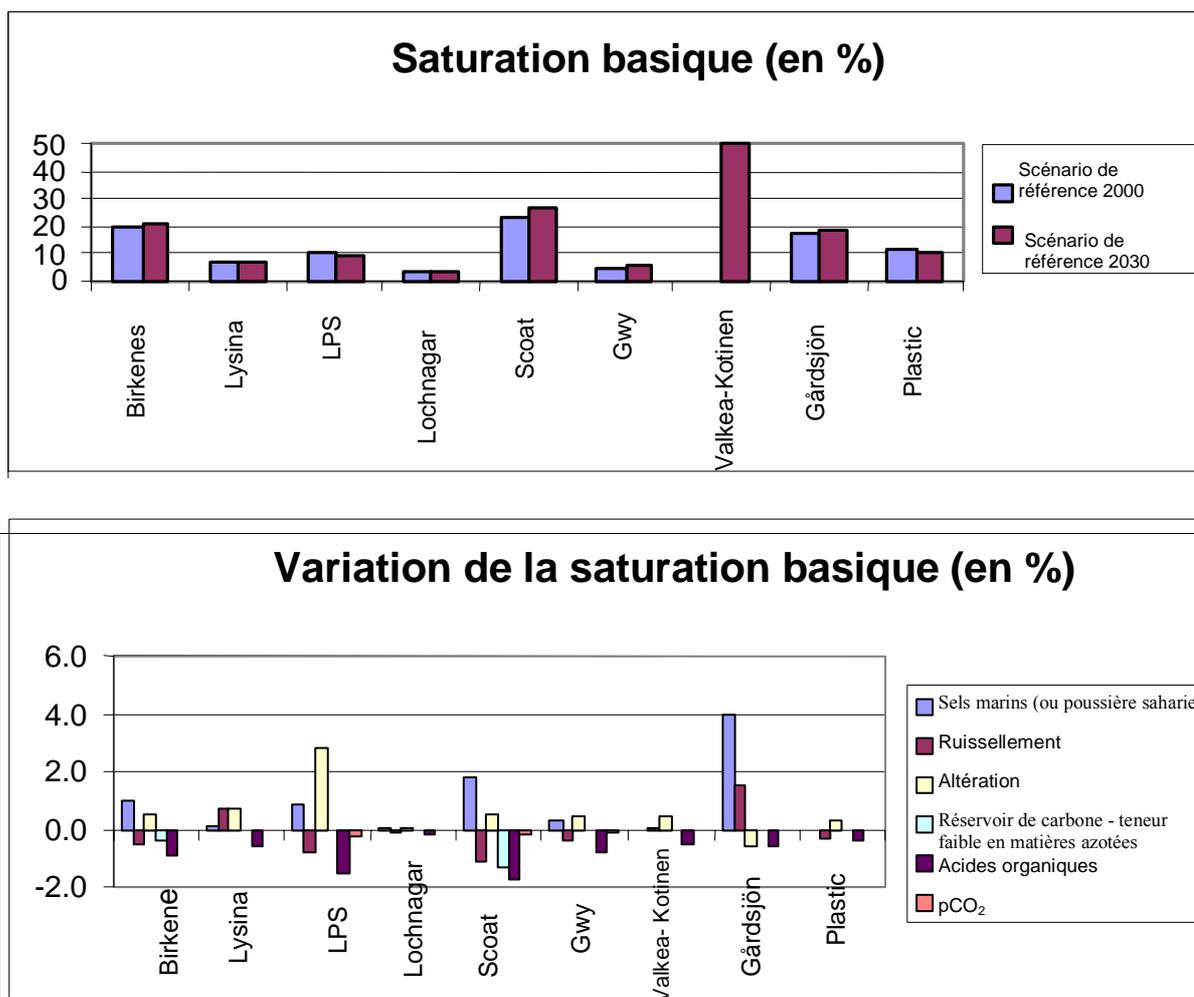
- a) Cas de référence (dépôts futurs selon le Protocole de Göteborg de 1999);
- b) Accroissement des dépôts de sel marin (Na, Mg, Cl) ou de poussière saharienne (50 %);
- c) Intensification du ruissellement (20 %);
- d) Accroissement des taux d'altération météorologique (20 %);
- e) Accélération de la décomposition et de la minéralisation azotée (N) du sol;
- f) Augmentation des acides organiques (50 %);
- g) Accroissement de la pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) (30 %);
- h) Plus grande absorption de l'azote (N) et des cations basiques (50 %).

## **II. PRINCIPAUX RÉSULTATS**

10. Les principaux résultats de la modélisation sont résumés à la figure I (chimie des eaux de surface) et à la figure II (chimie du sol). Deux grandes variables ont été retenues pour indiquer les réactions sur modèle: la capacité de neutralisation de l'acidification (CNA) des eaux de surface et la saturation basique (en pourcentage) du sol. Ces variables sont couramment utilisées en tant qu'indicateurs clefs pour étayer les mécanismes de l'acidification de ces compartiments de l'écosystème. Le panneau supérieur des figures indique la situation pour l'année d'étalonnage 2000 et les prévisions pour 2030 en posant comme hypothèse l'absence de changement climatique (scénario de référence), le panneau inférieur les changements prévus en 2030 par rapport au scénario de référence. Les résultats donnés correspondent aux sites choisis.



**Figure I:** Panneau supérieur: Moyenne annuelle pondérée en volume de la capacité de neutralisation de l'acidification (CAN), concentrations dans les eaux de ruissellement pour l'année d'étalonnage (2000) et prévisions pour 2030 selon le scénario de référence (pas de changement climatique). Panneau inférieur: Variation de la CNA prévue pour 2030 par rapport au scénario de référence (Wright *et al.* 2005b). LPS = Lac Paione Superiore.



**Figure II:** Panneau supérieur: Saturation basique (en %) du sol des sites étudiés pour l'année d'étalonnage (2000) et prévisions pour 2030 selon le scénario de référence (pas de changement climatique). Panneau inférieur: Variation de la saturation basique (en %) prévue pour 2030 par rapport au scénario de référence (Wright *et al.* 2005b). LPS = Lac Paione Superiore.

### III. PRINCIPALES CONCLUSIONS

Plusieurs conclusions présentant de l'importance au plan du choix des orientations à venir se dégagent des résultats des modèles:

a) Le scénario de référence a indiqué dans la plupart des cas une nette régénération de la chimie des eaux de surface dans les sites étudiés mais une lente modification, voire une poursuite, de l'acidification des sols. Ces résultats traduisent la lenteur des processus de régénération chimique des sols;

b) Les modifications induites par les changements climatiques ou les changements planétaires pourraient de toute évidence avoir des incidences importantes sur les futurs mécanismes de neutralisation de l'acidification et doivent être appréhendées si l'on veut pouvoir établir des prévisions fiables (à l'échelle décennale). Cependant, l'importance relative des

différents scénarios appliqués était largement déterminée par des caractéristiques sito-spécifiques. Ainsi, les changements au niveau des dépôts de sel marin ne présentaient de l'importance que sur les sites côtiers et les modifications de la décomposition de la matière organique que sur les sites qui étaient déjà saturés en azote;

c) Les changements retenus par hypothèse dans la concentration des acides organiques acidifiaient le sol mais augmentaient la CNA dans l'eau. Des tendances, statistiquement significatives, à l'augmentation au niveau des matières organiques dissoutes (à partir desquelles se forment les acides organiques) étaient observées dans de grandes parties de l'Europe (Skjelkvåle *et al.* 2001) et des États-Unis d'Amérique (Stoddard *et al.* 2003). Les raisons de ces tendances étaient à l'étude et leur durée est incertaine;

d) Cette étude était une analyse «de sensibilité» relativement simple, le but étant de poursuivre les travaux dans ce domaine afin d'obtenir des prévisions plus affinées et plus réalistes concernant les régénérations et l'acidification. Il faudra pour cela appliquer des scénarios climatiques provenant des modèles de la circulation générale (MCG) et établir des relations empiriques entre les variables climatiques (ou des substituts tels que l'indice de l'oscillation nord-atlantique) et la chimie des ruissellements ou les processus des captages. Ceux-ci pourraient être ensuite combinés à des scénarios climatiques minorés à partir des modèles de la circulation générale pour obtenir des simulations des modèles MAGIC ou SMART sur les différents sites;

e) Les changements planétaires à venir pourraient induire des modifications au niveau des captages terrestres et des eaux de surface qui n'étaient pas prévus (ou incorporés) dans les modèles; c'est notamment le cas des modifications de la couverture terrestre et de leur incidence sur la chimie des ruissellements. Des modèles couplés et d'autres modèles pourraient être utiles à l'évaluation d'interactions aussi complexes;

f) Les données à long terme provenant des captages qui ont fait l'objet d'études intensives étaient très utiles à la modélisation des incidences à long terme des polluants atmosphériques sur les écosystèmes et des variables confusionnelles que sont les changements climatiques et les changements planétaires. Il faudra entretenir ces sites clefs à l'avenir.

### Références

Cosby, B. J., Ferrier, R. C., Jenkins, A., and Wright, R. F. 2001. Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model. *Hydrology and Earth System Sciences* 5: 499-518.

De Vries, W., Posch, M. and Kämäri, J. 1989. Simulation of the long-term soil response to acid deposition in various buffer ranges. *Water, Air and Soil Pollution* 48: 349-390.

Evans, C.D., Cullen, J., Alewell, C., Kopáček, J., Marchetto, A., Moldan, F., Prechtel, A., Rogora, M., Vesely, J. and Wright, R.F. 2001. Recovery from acidification in European surface waters. *Hydrology and Earth System Sciences* 5: 283–298.

Forsius, M., Alveteg, M., Jenkins, A., Johansson, M., Kleemola, S., Lükewille, A., Posch, M., Sverdrup, H. and Walse C. 1998. MAGIC, SAFE and SMART model applications at Integrated Monitoring Sites: Effects of emission reduction scenarios. *Water, Air and Soil Pollution* 105: 21-30.

Forsius, M., Kleemola, S., Vuorenmaa, J. and Syri, S. 2001. Fluxes and trends of nitrogen and sulphur compounds at Integrated Monitoring Sites in Europe. *Water Air and Soil Pollution* 130: 1641-1648.

IPCC 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis – Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of IPCC*. 944 p.

Jenkins, A., Camarero, L., Cosby, B.J., Ferrier, R., Forsius, M., Helliwell, R., Kopacek, J., Majer, V., Moldan, F., Posch, M., Rogara, M., Schöpp, W. and Wright, R.F. 2003. A modelling assessment of acidification and recovery of European surface waters. *Hydrology and Earth System Sciences* 7: 447-455.

Jenkins, A., Larssen, T., Moldan, F., Hruška, J., Krám, P., Kleemola, S. 2003b. Dynamic modelling at Integrated Monitoring sites - Model testing against observations and uncertainty. *The Finnish Environment* 636, p. 37. Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland. ISBN 952-11-1440-1.

Posch, M., Reinds, G.J. and de Vries, W. 1993. SMART - A Simulation Model for Acidification's Regional Trends: Model description and user manual. Mimeograph Series of the National Board of Waters and the Environment 477, Helsinki, Finland, 43 pp.

Skjelkvåle, B.L., Stoddard, J.L. and Andersen, T. 2001. Trends in surface waters acidification in Europe and North America (1989–1998). *Water, Air and Soil Pollution*: 787–792.

Skjelkvåle, B.L., Evans, C., Larssen, T., Hindar, A. and Raddum, G. 2003. Recovery from acidification in European surface waters: a view to the future. *Ambio* 32 (3): 170-175.

Stoddard, J.L., Jeffries, D.S., Lükewille, A., Clair, T.A., Dillon, P.J., Driscoll C.T., Forsius, M., Johannessen, M., Kahl, J.S., Kellogg, J.H., Kemp, A., Mannio, J., Monteith, D.T., Murdoch, P.S., Patrick, S. Rebsdorf, A., Skjelkvåle, B.L, Stainton, M.P., Traaen, T., van Dam, H.,

Webster, K.E., Wieting, J. and Wilander, A. 1999. Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe. *Nature* 401: 575- 578.

Stoddard, J.L., Kahl, J.S., Deviney, F.A., DeWalle, D.R. Driscoll, C.T., Herlihy, A.T., Kellogg, J.H., Murdoch, P.S., Webb, J.R. and Webster, K.E. 2003. Response of Surface Water Chemistry to the Clean Air Act Amendments of 1990. EPA/620/R-03/001, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon. 92 pp.

Wright, R.F., Camarero, L., Cosby, B.J., Ferrier, R.C., Forsius, M., Helliwell, R., Jenkins, A., Kopáček, J., Larssen, T., Majer, V., Moldan, F., Posch, M., Rogora, M., and Schöpp, W. 2005a. Recovery of acidified European surface waters. *Environmental Science and Technology* 39: 64A-72A.

Wright, R.F., Aherne, J., Bishop, K., Camarero, L., Cosby, B.J., Erlandsson, M., Evans, C.D., Forsius, M., Hardekopf, D., Helliwell, R., Hruska, J., Jenkins, A., Moldan, F., Posch, M. and Rogora, M. 2005b. Modelling the effect of climate change on recovery of acidified freshwaters: relative sensitivity of individual processes in the MAGIC and SMART models. *Science of the Total Environment* (submitted manuscript).

Note: Les références sont reproduites telles qu'elles ont été reçues par le secrétariat.

-----