



**Conseil Économique
et Social**

Distr.
GÉNÉRALE

EB.AIR/WG.1/2000/9
8 juin 2000

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
(Dix-neuvième session, Genève, 23-25 août 2000)
Point 4 e) de l'ordre du jour provisoire

**FLUX ET TENDANCES DES COMPOSÉS DE L'AZOTE ET DU SOUFRE
ET DES CATIONS BASIQUES**

Rapport récapitulatif du Centre du Programme international concerté de surveillance
intégrée des effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes

I. GÉNÉRALITÉS

1. Au cours des deux dernières décennies, les règlements et accords tant nationaux qu'internationaux sur l'environnement ont entraîné une forte diminution des émissions de polluants atmosphériques en Europe et en Amérique du Nord. En Europe, les émissions de composés du soufre (S) et de l'azote (N) ont reculé respectivement de 34 % (SO₂), de 14 % (NO₂) et de 18 % (NH₃) entre 1988 et 1995 (Olendrzynski, 1997). Les protocoles à la Convention et

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.

la législation de l'Union européenne sont les activités internationales auxquelles est due pour l'essentiel cette évolution positive. Les premiers signes de rétablissement d'écosystèmes vulnérables ont également été communiqués. Les programmes internationaux concertés (PIC) du Groupe de travail des effets ont constitué une source d'informations importante à cet égard (voir Stoddard *et al.*, 1999, Groupe de travail des effets, 1999).

2. La présente étude a pour but d'évaluer les effets positifs escomptés des protocoles sur l'état des écosystèmes par l'analyse des flux et tendances des composés du soufre (S) et de l'azote (N), des cations basiques et des ions hydrogène sur les sites du réseau du Programme international concerté de surveillance intégrée des effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes (PIC-SI) dans toute l'Europe. Les sites du PIC-SI sont bien adaptés à la surveillance des effets de ces réductions d'émissions, étant donné qu'ils sont situés dans des zones naturelles/semi-naturelles qui subissent un minimum de perturbations d'origine locale. On exécute en outre un programme de surveillance global, portant sur plusieurs compartiments d'écosystèmes.

3. L'évaluation des flux et tendances des éléments chimiques clefs dans les écosystèmes rejoint l'analyse des effets des politiques de lutte contre la pollution atmosphérique en ce qu'elle :

- i) fournit une description des différents processus biogéochimiques qui régissent le pouvoir tampon et la rétention des éléments, déterminant les effets à long terme des composés émis;
- ii) permet de définir les valeurs empiriques du seuil critique des dépôts; iii) permet d'expliquer l'ampleur du rétablissement ou de la dégradation des écosystèmes.

II. DONNÉES ET MÉTHODES

4. Grâce à l'information d'origine internationale que contient la base de données du PIC-SI (Kleemola et Forsius, 1999), 22 sites ont été retenus aux fins d'analyse (fig. I). Ces sites sont principalement couverts de forêts de résineux. L'évaluation des tendances a été effectuée surtout pour la période 1988/89-1998. Des séries chronologiques comprenant au moins cinq ans de données mensuelles ont été admises aux fins des analyses statistiques. Les tendances ont été évaluées pour le SO_4^* et le $(\text{Ca} + \text{Mg})^*$ (l'astérisque dénote la fraction non marine), le H^+ , le NO_3 et le NH_4 (sauf ruissellement) d'origine autre que marine. Les dépôts (dépôt global et dépôt par pluie au sol) et les flux des quantités produites (ruissellement/eau dans le sol) ont été calculés à partir de la qualité et du volume de l'eau au moyen des valeurs mensuelles moyennes pour les flux d'eau et les analyses chimiques (le cas échéant, moyennes pondérées). Les calculs ont été effectués par le Centre du PIC-SI en coopération avec les centres nationaux de liaison.



Emplacement des sites du PIC-SI compris dans les calculs des flux et tendances
Le tracé des frontières indiquées sur cette carte n'emporte ni approbation ni acceptation officielles de la part de l'ONU.

5. Les flux ont été calculés en tant que moyenne des trois dernières années afin de réduire la variabilité annuelle, les rapports C/N (g/g) dans la couche organique du sol (Oh) ont été établis pour les sites à l'aide des données disponibles. Les méthodes de collecte, de stockage et d'analyse des échantillons chimiques sont décrites dans le manuel du Programme (Manuel de surveillance intégrée, 1998).

6. Les analyses des tendances ont été réalisées en appliquant des techniques classiques bien établies et au moyen du progiciel DETECT (Cluis *et al.*, 1989), qui contient une série de méthodes non paramétriques applicables aux analyses de tendances. DETECT préconise la méthode la plus appropriée selon la présence ou l'absence de variations saisonnières statistiques. La tendance monotone a été utilisée par défaut et les essais ci-après ont été effectués : i) l'essai Hirsch et Slack pour les séries comprenant saisonnalité et persistance; ii) l'essai saisonnier Kendall pour les séries comprenant seulement la saisonnalité; iii) l'essai Kendall pour les séries chronologiques sans saisonnalité ni persistance; iv) l'essai Spearman/Lettenmaier pour les séries comprenant seulement la persistance.

7. La réduction des dépôts de composés de S et de N sur les sites, prévue par le nouveau Protocole de Göteborg relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique, a été évaluée au moyen des matrices de transfert du CSM-O de l'EMEP incorporées au modèle DAIQUIRI (Syri *et al.*, 1998) et des émissions communiquées officiellement (CSM-O de l'EMEP, 1998) pour l'année de référence 1996 et l'année cible 2010. On a estimé que l'évolution des dépôts sur les divers sites, résultant de l'application du Protocole, correspondait à la différence entre ces deux années. Les dépôts ont été interpolés à partir des quatre mailles les plus proches en utilisant une pondération inverse des distances.

III. RÉSULTATS ET EXAMEN

A. Flux d'ions

8. Les principaux résultats des calculs sont résumés au tableau 1. En ce qui concerne les flux d'ions, les résultats des sites du PIC-SI correspondent généralement à un schéma bien connu : rétention efficace des composés de N et des ions hydrogène (grâce à l'absorption de nutriments et à l'effet tampon) et libération de cations basiques (due à l'altération et à l'échange d'ions). En ce qui concerne la rétention de SO_4^* , on a observé un processus manifeste d'équilibre et de libération. Les résultats obtenus sur le site suisse (CH01) révèlent une source de S géologique avec d'importants flux de cations basiques et flux de quantités de S produites. Sur les sites NO01, SE02 et SE04 (Norvège et sud de la Suède), on a observé un fort lessivage de H^+ . Sur le site DE01 (sud-est de l'Allemagne), les résultats ont pu être influencés par une attaque d'insectes ayant porté atteinte à la santé des arbres au cours des dernières années.

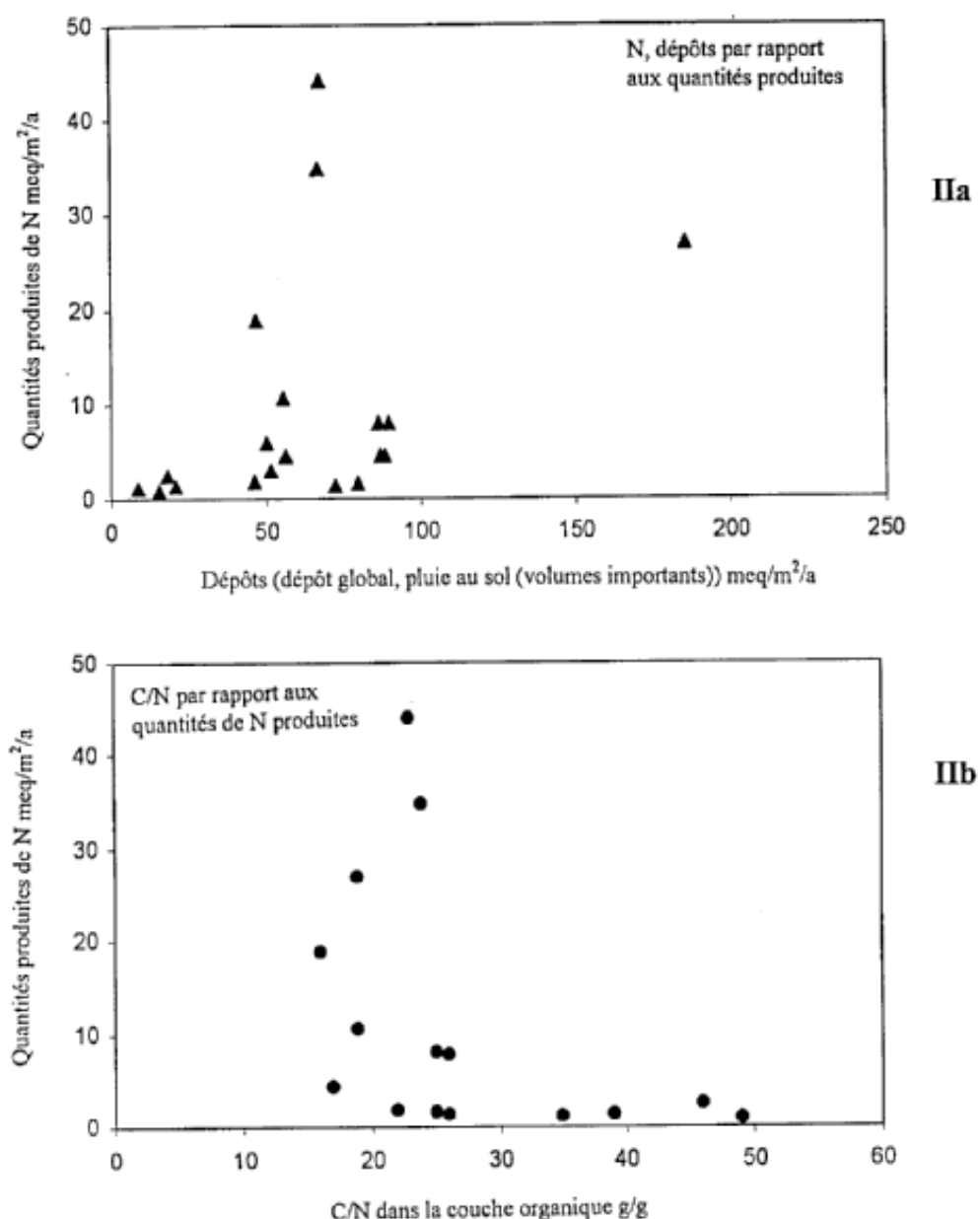


Figure II

Relation entre les dépôts de N et le flux des quantités de N produites (IIa),
et entre le rapport C/N de la matière organique du sol et le flux
des quantités de N produites (IIb) sur les sites du PIC-SI

9. Le lessivage accéléré du N dans les écosystèmes peut provoquer aussi bien une eutrophisation qu'une acidification. Selon l'évaluation des données empiriques tirées des écosystèmes forestiers européens (Dise et Wright 1995, Dise *et al.* 1998, Gundersen *et al.* 1998), trois conditions essentielles (mais non suffisantes) doivent être remplies pour qu'il y ait lessivage du NO₃ sur les sites : i) flux importants de N inorganique dissous dans les dépôts (> 65 à 70 meq m⁻² a⁻¹ = 9-10 kg N ha⁻¹ a⁻¹); ii) faible rapport C/N (inférieur à 25-30) dans la couche organique du sol; iii) pH de sol minéral peu élevé (inférieur à 4,3).

10. Les relations entre les dépôts de N et le flux des quantités de N produites (fig. IIa) et entre le rapport C/N et le flux des quantités de N produites (fig. IIb) sur les sites du PIC-SI sont généralement conformes à ces critères. Les sites où les dépôts de N sont élevés et le rapport C/N faible présentent de toute évidence un risque élevé de flux importants des quantités produites. Ces résultats ne sauraient être considérés comme une évaluation indépendante des critères ci-dessus parce qu'ils sont le produit de données provenant de quelques sites du PIC-SI. Toutefois, il serait avantageux d'utiliser ces relations, constatées sur des sites ayant fait l'objet d'études intensives, en corrélation avec des données d'enquête régionales pour l'évaluation des risques et la cartographie des effets des dépôts à l'échelle régionale, plus vaste.

B. Tendances

11. Des tendances à la baisse statistiquement sensibles du dépôt global de SO₄^{*} et de NO₃ (flux ou concentrations) ont été observées sur 11 des 22 sites du PIC-SI (tableau 1), et des tendances nettement décroissantes de H⁺ (flux ou concentrations) sur sept sites. Les tendances à la diminution de NO₃ étaient plus courantes que celles de NH₄. Ces résultats semblent correspondre aux baisses signalées pour les émissions européennes de SO₂, NO₂ et NH₃ (Olendrzynski, 1997).

12. Une tendance à la diminution des concentrations et dépôts de cations basiques, surtout pour le calcium, a été observée dans les parties septentrionales de l'Europe et aux États-Unis d'Amérique au cours des deux ou trois dernières décennies, bien que le rythme semble s'être ralenti ces dernières années (Hedin *et al.*, 1994). Les résultats de ce type ont une importance écologique parce que les effets des dépôts sur les écosystèmes dépendent de la part relative des composés acidifiants et neutralisants. Les dépôts de (Ca + Mg)* sont en baisse sur les sites du PIC-SI dans le sud de la Fennoscandie et sur les sites NL01 et CZ01. Par conséquent, la diminution observée pour le dépôt de H⁺ est inférieure à ce qu'on pourrait attendre des seules tendances du S et du N.

13. L'application du Protocole de Göteborg permettra de réduire encore les dépôts de S et de N sur les sites du PIC-SI dans l'ouest et le nord-ouest de l'Europe (tableau 1). La diminution des dépôts de SO₄ (en moyenne 36 % sur les sites étudiés) devrait dépasser celle du NO₃ (en moyenne 24 %). Les dépôts de NH₄ devraient peu varier sur l'ensemble des sites du PIC-SI. Sur les sites situés plus à l'est et au nord-est de l'Europe (États baltes, Finlande, Bélarus, Fédération de Russie), la diminution escomptée des dépôts de SO₄ et de NO₃ sera moindre, voire inexistante, car le Protocole de Göteborg permet une certaine progression des émissions par rapport au niveau actuel (année de référence 1996) dans de nombreux pays d'Europe orientale. Pour l'Europe occidentale, le Protocole suppose une nouvelle diminution sensible des émissions d'oxydes de soufre et d'azote.

14. Les résultats des tendances propres aux sites en ce qui concerne les flux dans les eaux de surface sont moins nets que pour les dépôts (tableau 1), ce qui est à prévoir, parce que les composés déposés sont présents dans de nombreux processus complexes à l'œuvre dans les écosystèmes (Likens *et al.*, 1996), dont le résultat final n'est pas toujours évident.

15. Des tendances à la baisse du SO_4^* et des cations basiques dans les flux des quantités produites et/ou les concentrations ont généralement été observées sur les sites du PIC-SI (tableau 1). Pour les cations basiques, elles sont une conséquence logique du recul de leurs dépôts comme de ceux des anions à forte acidité (Likens *et al.*, 1996, par exemple). Des tendances en baisse pour le H^+ (augmentation du pH) statistiquement sensibles ne sont observées que sur les sites SE04, SE08, NO02 et LT01. Certains sites (par exemple CH01 et LT01) sont fortement tamponnés, de sorte que les flux de H^+ ne devraient pas beaucoup varier. Des tendances décroissantes pour le NO_3 ont été constatées sur cinq sites situés dans les pays nordiques. Sur plusieurs, les séries chronologiques sont encore trop courtes (ou les données encore insuffisantes) pour permettre une analyse des tendances.

16. Les études détaillées effectuées sur le site SE04 (Gårdsjön) ont montré que l'état des eaux de surface peut se rétablir rapidement, bien avant celui des sols (Moldan, 1999). Likens *et al.* (1996) ont observé un fort épuisement du réservoir de cations basiques dans les sols de captage à Hubbard Brook (États-Unis), qui devrait retarder la réaction de l'écosystème à la diminution des émissions. Stoddard *et al.* (1999) ont noté une absence de rétablissement des eaux de surface dans plusieurs régions de l'Amérique du Nord, laquelle est imputée à une forte diminution régionale des concentrations de cations basiques, supérieure à celle observée pour le SO_4^* . Selon les calculs par modèles dynamiques effectués sur les sites du PIC-SI, le rétablissement dû aux diminutions des émissions sera souvent lent (Forsius *et al.*, 1998). On a noté en outre une interaction des changements dus au climat et des processus d'acidification (Wright, 1998, par exemple), ce qui complique encore l'évaluation des changements. Par conséquent, bien que le rétablissement soit perceptible sur de vastes régions tant en Europe qu'en Amérique du Nord, il faut admettre que, sur de nombreux sites vulnérables, le processus peut être lent et que la réaction peut varier grandement d'un site à l'autre.

IV. CONCLUSIONS

17. Des tendances à la baisse statistiquement sensibles ont été observées pour les dépôts de SO_4^* et de NO_3 (flux et/ou concentrations) sur 11 des 22 sites du PIC-SI, et un recul marqué pour le H^+ sur sept d'entre eux. Pour les dépôts de H^+ , la diminution est en deçà de ce que pourraient laisser prévoir les seules tendances pour le S et le N, cela en raison de la décroissance simultanée du dépôt de cations basiques. Les tendances à la baisse étaient plus courantes pour le NO_3 que pour le NH_4 , ce qui semble correspondre aux baisses signalées pour les émissions en Europe. L'application du Protocole de Göteborg de 1999 aura pour effet de réduire encore les dépôts de S et de N sur les sites du PIC-SI dans certaines parties de l'ouest et du nord-ouest de l'Europe. Sur les sites situés plus à l'est, la baisse sera probablement moindre, voire inexistante. Les dépôts de NH_4 devraient assez peu varier sur l'ensemble des sites du PIC-SI.

18. La relation entre les dépôts de N et le flux des quantités de N produites, et entre le rapport C/N et le flux des quantités de N produites sur les sites du PIC-SI, était conforme aux observations faites antérieurement dans les écosystèmes forestiers européens. Les sites où les

dépôts étaient élevés et le rapport C/N faible risquaient davantage d'importants flux des quantités de N produites. Les relations empiriques de ce type sont utiles aux travaux de cartographie et d'évaluation des risques à l'échelle régionale. Le lessivage accéléré du N dans les écosystèmes peut avoir des effets nocifs (eutrophisation et acidification).

19. Des tendances à la diminution du SO_4^* et des cations basiques dans les flux des quantités produites et/ou les concentrations dans les eaux de surface et l'eau dans le sol étaient couramment observées sur les sites du PIC-SI. Sur plusieurs d'entre eux, situés dans les pays nordiques, on a également noté des tendances décroissantes pour le NO_3 et le H^+ (augmentation du pH). Ces résultats confirment en partie l'efficacité des politiques de réduction des émissions appliquées en Europe. Les réactions n'étaient toutefois pas claires et nettes sur l'ensemble des sites, ce qui démontre que, sur de nombreux sites vulnérables, le rétablissement peut être lent et que la réaction peut varier beaucoup d'un site à l'autre. La poursuite des efforts de recherche et de surveillance s'impose sur les plans national et international pour obtenir des preuves scientifiques du processus de rétablissement à l'appui des politiques futures de réduction des émissions.

V. BIBLIOGRAPHIE

Cluis, D., Langlois, C., van Coillie, R. et Laberge, C. 1989. Development of a software package for trend detection in temporal series: application to water and industrial effluent quality data for the St. Lawrence River. *Environmental Monitoring and Assessment* 12: 429-441.

Dise, N.B. et Wright, R. F. 1995. Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition. *Forest Ecology and Management* 71: 153-161.

Dise, N.B., Matzner, E. et Forsius, M. 1998. Evaluation of organic horizon C:N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe. *Environmental Pollution* 102: 453-456.

CSM-O (EMEP), 1998. Transboundary acidifying air pollution in Europe. CSM-O (EMEP), Status report 1998. CSM-O (EMEP), Oslo, Norvège.

Forsius, M., Alveteg, M., Jenkins, A., Johansson, M., Kleemola, S., Lükewille, A., Posch, M., Sverdrup, H. et 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.

Gundersen, P., Callesen, I. et de Vries, W. 1998. Nitrate leaching in forest ecosystems is controlled by forest floor C/N-ratio. *Environmental Pollution* 102: 403-407.

Hedin, L.O., Granat, L., Likens, G.E., Buishand, T.A., Galloway, J.N., Butler, T.J. et Rodhe, H. 1994. Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America. *Nature* 367: 351-354.

Kleemola, S. et Forsius, M. (éd.) 1999. Programme international concerté de surveillance intégrée des effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes, 8ème rapport annuel, Institut finlandais de l'environnement, Helsinki. *The Finnish Environment* 325, 40 p.

Likens, G.E., Driscoll, C.T. et Buso, D.C. 1996. Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forested ecosystem. *Science* 272: 244-246.

Manual for Integrated Monitoring 1998. Finnish Environment Institute Helsinki.
www-version: http://www.vyh.fi/eng/intcoop/projects/icp_im/manual/index.htm

Moldan, F. 1999. Reversal of soil and water acidification in SW Sweden, simulating the recovery process. Thèse de doctorat. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae Silvestria* 117. Université suédoise des sciences agricoles, Umeå.

Olendrzynski, K. 1997. Emissions. In: E. Berge (éd.), *Rapport du CSM-O (EMEP) Partie 1; Emissions, dispersion and trends of acidifying and eutrophying agents*: 53-63. Institut norvégien de météorologie, Oslo.

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. et Wilander, A. 1999. Regional trends in aquatic recovery from acidification in North America and Europe. *Nature* 401: 575-578.

Syri S., Johansson, M., et Kangas L. 1998. Application of nitrogen transfer matrices for integrated assessment. *Atmospheric Environment* 32 (3): 409-413.

Groupe de travail des effets, 1999. Trends in impacts of long-range transboundary air pollution. Élaboré par les programmes internationaux concertés du Groupe de travail CEE-ONU des effets. Centre for Ecology and Hydrology, Royaume-Uni. ISBN 1 870 393 52X. 81 p.

Wright, R.F. 1998. Effect of increased carbon dioxide and temperature on runoff chemistry of a forested catchment in southern Norway (Projet CLIMEX). *Ecosystems*: 1: 216-225.

Notes

Les références, les chiffres et le tableau sont reproduits tels qu'ils ont été reçus.

Au tableau 1, le signe * dénote la fraction non marine; DC = dépôt global; TF = pluie au sol; RW = eaux de ruissellement; SW = eau dans le sol. L'analyse des tendances a été effectuée tant pour les flux que pour les concentrations. Les niveaux d'importance (* $P < 0,05$, ** $P < 0,01$, *** $P < 0,001$) et les pentes des tendances statistiquement importantes sont indiqués (s.i.s. = sans importance statistique; d.i. = données insuffisantes). L'orientation des tendances (+ ou -) et le taux de variation sont exprimés en valeurs de pente : $\text{meq m}^{-2}\text{a}^{-1}$ pour les flux et $\mu\text{eq l}^{-1}\text{a}^{-1}$ pour les concentrations. Les méthodes et essais statistiques utilisés sont expliqués au chapitre II. La colonne "% diff 2010" indique le changement estimé pour les dépôts de SO_4 , de NO_3 et de NH_4 entre 1996 et 2010 du fait de l'application du Protocole relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique. L'évolution des dépôts a été évaluée au moyen des matrices de transfert du CSM-O de l'EMEP. Le rapport C/N (g/g) de la matière organique du sol des sites est également indiqué.

Tableau 1

 SO_4^* , $(\text{Ca}+\text{Mg})^*$, H^+ , NO_3 et NH_4 : flux et tendances sur les sites du PIC-SI

Site	Variable	Flux DC meq/m2	Flux TF meq/m2	% diff	Flux	Flux essai	Flux DC pente	Conc. essai	Conc. pente	RW/SW essai	RW/SW pente	RW/SW essai	RW/SW pente	C/N g/g couche org.
DK01	SO4*	37,5		-48,1	27,9	4	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	26
	(Ca+Mg)*	4,7			0,1	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)		(d.i.)		(d.i.)	
	H+	9,5			34,7	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	NO3	29,8		-31,5	0,7	3	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)		(d.i.)		(d.i.)	
	NH4	42,2		-22,2	0,7	4	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)					
FI01	SO4*	15,4	35,3	-13,9	33,4	4	-2,78	1	-3,06**	1	(s.i.s.)	1	-1,30*	39
	(Ca+Mg)*	3,6	26,7		39,0	1	-0,52**	2	-0,35***	1	(s.i.s.)	1	-1,20**	
	H+	14,8	11,4		10,4	4	-1,42	1	-1,41**	1	(s.i.s.)	1	1,85**	
	NO3	12,0	6,0	-19,3	0,5	4	-0,86	1	-0,72*	1	-0,11*	1	-0,13*	
	NH4	8,7	4,2	-3,2	0,8	1	-1,36	1	-1,69*					
FI03	SO4*	13,9	16,8	-10,9	11,9	1	-2,00**	2	-1,98***	1	-1,10*	1	-1,87***	49
	(Ca+Mg)*	3,1	10,1		32,5	1	-0,23**	2	-0,16*	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	H+	15,2	14,5		0,3	4	-0,92	2	-1,29***	2	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	NO3	9,7	8,1	-11,9	0,5	4	-0,53	1	-0,69**	1	(s.i.s.)	1	-0,08**	
	NH4	5,7	4,6	-11,5	0,4	3	-0,90***	2	-0,95***					
NO01	SO4*	46,1	61,0	-43,1	82,0	3	-4,13***	1	-3,01**	1	(s.i.s.)	4	-1,75	25
	(Ca+Mg)*	5,3	27,6		35,8	3	-0,53***	2	-0,67***	1	-2,99*	4	-1,83	
	H+	46,1	42,9		22,6	1	-4,68*	4	-2,38	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	NO3	47,0	36,0	-30,0	8,0	1	(s.i.s.)	2	-1,45*	1	-0,94**	1	-0,75**	
	NH4	42,6	29,0	-9,6		3	-2,98*	3	-2,19**					
NO02	SO4*	7,3	8,3	-30,3	13,9	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	-0,71**	1	-0,29*	46
	(Ca+Mg)*	4,1	1,9		38,4	3	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	1	-0,97*	1	(s.i.s.)	
	H+	9,5	9,4		1,4	2	-0,30*	2	-0,24*	1	-0,05*	1	-0,02*	
	NO3	6,6	5,5	-21,1	2,5	2	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	0,07***	
	NH4	11,7	6,2	-5,1		2	(s.i.s.)	2	-0,14**					
SE02	SO4*	47,5	117,2	-69,0	79,8	4	-4,32	4	-1,50	1	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	26
	(Ca+Mg)*	6,1	61,5		56,7	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	-3,07*	4	(s.i.s.)	
	H+	40,0	12,3		22,7	2	-3,10*	3	-1,10**	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	NO3	42,7	31,5	-33,9	7,1	2	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	0,48**	
	NH4	43,0	15,0	-5,1	0,8	1	-3,19*	1	(s.i.s.)					
SE04	SO4*	38,0	65,7	-44,0	118,8	4	-4,85	1	-4,23**	1	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	25
	(Ca+Mg)*	6,6	39,6		40,8	3	-0,49*	3	(s.i.s.)	1	-2,98*	4	-4,48	
	H+	29,4	35,7		37,2	4	-7,13	4	-5,17	1	-1,96*	1	-1,12*	
	NO3	34,9	47,0	-31,2	0,6	1	-2,30*	2	-1,63*	1	-0,02**	3	-0,07**	
	NH4	32,1	26,4	-10,1	1,0	3	-1,66*	2	(s.i.s.)					
SE08	SO4*	8,8		-27,2	16,9	1	-1,00*	1	(s.i.s.)	2	-1,40**	4	-0,75	35
	(Ca+Mg)*	2,3			132,3	2	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	2	-15,4***	3	(s.i.s.)	
	H+	11,1			0,3	3	-0,60*	3	-0,80**	3	-0,11*	3	(s.i.s.)	
	NO3	5,8		-20,9	0,7	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	2	-0,11***	2	-0,17**	
	NH4	2,9		-4,4	0,4	4	-0,53	2	-0,58**					

(suite)

Tableau 1

SO_4^* , $(\text{Ca}+\text{Mg})^*$, H^+ , NO_3 et NH_4 : flux et tendances sur les sites du PIC-SI (suite)

		Flux DC	Flux TF		Flux	Flux	Flux DC	Conc.	Conc.	RW/SW	RW/SW	RW/SW	RW/SW	C/N g/g
Site	Variable	meq/m2	meq/m2	% diff		essai	pente	essai	pente	essai	pente	essai	pente	couche org.
BY02	SO4*	36,1		5,4		4	-2,92	2	-3,92***		(d.i.)		(d.i.)	
	(Ca+Mg)*	25,6				3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)		(d.i.)		(d.i.)	
	H ⁺	10,7				1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)		(d.i.)		(d.i.)	
	NO ₃	21,3		-2,9		4	-1,14	4	-2,13		(d.i.)		(d.i.)	
	NH ₄	24,2		-13,1		4	-5,20	4	-8,75					
LT01	SO4*	21,9	42,5	-13,6	422,0	4	-5,03	4	-9,04		(d.i.)		(d.i.)	
	(Ca+Mg)*				1190,9		(d.i.)		(d.i.)		(d.i.)		(d.i.)	
	H ⁺	3,9	6,8		0,0	4	-6,46	1	-10,3*	4	(s.i.s.)	3	-0,01*	
	NO ₃	15,1	19,7	-8,3	5,3	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)		(d.i.)		(d.i.)	
	NH ₄	23,2	30,3	21,4	0,5		(d.i.)		(d.i.)					
LT02	SO4*	33,8	53,6	-28,3	165,0	3	(s.i.s.)	3	-7,34***		(d.i.)		(d.i.)	
	(Ca+Mg)*				536,1		(d.i.)		(d.i.)		(d.i.)		(d.i.)	
	H ⁺	3,8	3,8		0,0	4	-5,30	4	-12,0	3	-0,00***	3	-0,00*	
	NO ₃	17,8	15,7	-14,0	2,4	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)		(d.i.)		(d.i.)	
	NH ₄	33,5	28,3	13,9	0,6	3	(s.i.s.)	3	-6,53**					
LV01	SO4*	45,8	67,4	-29,9	107,5	3	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)		(d.i.)	3	-16,9**	
	(Ca+Mg)*	17,1	34,7		580,1		(d.i.)		(d.i.)		(d.i.)	1	(s.i.s.)	
	H ⁺	16,3	18,9		0,0	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)		(d.i.)	4	-0,02	
	NO ₃	34,8	31,7	-22,1	1,8	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)		(d.i.)	4	(s.i.s.)	
	NH ₄	53,0	33,3	36,3	2,8	3	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)					
LV02	SO4*	34,3	37,5	-5,9	97,5	3	-6,34*	1	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	(Ca+Mg)*	18,0	26,2		587,8		(d.i.)		(d.i.)	4	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)	
	H ⁺	14,9	14,5		0,0	2	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	NO ₃	20,5	19,7	-9,9	1,8	3	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	NH ₄	35,6	20,7	34,5	2,8	3	-4,18**	4	(s.i.s.)					
RU15	SO4*	50,5		-8,9	45,7	4	-13,4	4	-14,6	3	-18,3*	4	(s.i.s.)	16
	(Ca+Mg)*	170,6	185,9		269,3	4	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	-30,6*	
	H ⁺	51,5	28,0		0,1	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	0,01*	
	NO ₃	10,4	9,0	0,4	8,5	4	-3,22	3	-2,51***	2	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	NH ₄	31,1	36,1	3,5	10,3	4	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)					

(suite)

Tableau 1

SO₄^{*}, (Ca+Mg)^{*}, H⁺, NO₃ et NH₄ : flux et tendances sur les sites du PIC-SI (suite)

Site	Variable	Flux DC meq/m2	Flux TF meq/m2	% diff	Flux	Flux essai	Flux DC pente	Conc. essai	Conc. pente	RW/SW essai	RW/SW pente	RW/SW essai	RW/SW pente	C/N g/g couche org.
AT01	SO ₄	50,6	66,5	-50,1		2	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)					
	(Ca+Mg)*													
	H ⁺													
	NO ₃	48,4	76,2	-32,8		3	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)					
	NH ₄	61,2	67,0	-15,9		4	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)					
CH01	SO ₄ *	55,3	69,9	-48,1	331,9	1	(s.i.s.)	1	-1,44*	2	8,41*	1	(s.i.s.)	19
	(Ca+Mg)*	26,2	48,9		4281,8	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	-23,6*	
	H ⁺	29,7	32,3			3	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)		(d.i.)		(d.i.)	
	NO ₃	39,8	95,0	-37,8	23,3	1	(s.i.s.)	1	-2,10*	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	NH ₄	74,0	90,6	-6,9	3,7	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)					
CZ01	SO ₄ *	42,6	114,8	-63,0	51,2	1	(s.i.s.)	3	-4,39*	4	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	17
	(Ca+Mg)*	13,5	46,4		55,4	1	-1,07**	3	-4,84**	4	2,75	4	(s.i.s.)	
	H ⁺	18,2	30,0		0,0	2	-1,16**	3	-4,06**	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	NO ₃	30,8	41,0	-30,8	4,5	2	-0,70*	2	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	4	-4,65	
	NH ₄	38,6	45,5	3,2	0,1	1	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)					
DE01	SO ₄ *	33,3	53,6	-56,9	68,2	2	(s.i.s.)	1	-4,23**	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	23
	(Ca+Mg)*	19,9	39,3		151,9	4	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	H ⁺	24,4	28,2		0,6	3	(s.i.s.)	4	-1,25	4	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	
	NO ₃	34,4	23,9	-33,7	39,9	2	(s.i.s.)	1	-2,93*	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	NH ₄	33,1	12,1	-13,5	4,2	2	-2,94*	1	-5,15*					
GB02	SO ₄ *	42,1		-59,4	84,4	3	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	24
	(Ca+Mg)*	14,2			75,3	1	0,78*	1	0,94**	1	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	
	H ⁺	20,8			15,2	4	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	NO ₃	28,5		-30,7	34,7	3	-0,77*	2	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	
	NH ₄	38,1		-6,4		1	-1,20**	1	(s.i.s.)					
NL01	SO ₄ *	36,8	74,9	-45,4		3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)					12
	(Ca+Mg)*	8,7	17,5			3	-2,50**	3	-3,02**					
	H ⁺	18,0	9,6			4	-10,2	4	-15,7					
	NO ₃	34,8	58,5	-33,8		3	(s.i.s.)	3	-6,79*					
	NH ₄	60,3	139,3	-16,0		2	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)					
IT01	SO ₄ *	25,6	30,1	-50,2	30,3	1	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	19
	(Ca+Mg)*	19,0	67,0		52,6	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	H ⁺	6,1	5,9		2,0	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	NO ₃	24,0	23,4	-39,7	9,9	1	(s.i.s.)	2	-2,62*		(d.i.)		(d.i.)	
	NH ₄	31,6	13,7	-2,1	0,7	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)					
IT02	SO ₄ *	20,8	25,2	-50,9	6,0	1	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	-8,90***	22
	(Ca+Mg)*	22,8	63,4		26,4	3	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	4	(s.i.s.)	
	H ⁺	5,3	2,0		0,4	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	3	(s.i.s.)	
	NO ₃	21,3	18,2	-40,4	1,6	1	(s.i.s.)	2	(s.i.s.)		(d.i.)		(d.i.)	
	NH ₄	24,6	23,2	0,3	0,3	1	(s.i.s.)	1	(s.i.s.)					
