



**Conseil économique
et social**

Distr.
GÉNÉRALE

EB.AIR/WG.1/2002/11
24 mai 2002

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 et unième session, Genève, 28-30 août 2002)
Point 4 f) de l'ordre du jour provisoire

**RAPPORT INTÉrimAIRE SUR LE RECOURS À LA MODÉLISATION DYNAMIQUE
DES SOLS ET DES EAUX DE SURFACE POUR DÉTERMINER L'AMPLEUR
DU DÉCALAGE ENTRE LES VARIATIONS OBSERVÉES DANS
L'ÉVOLUTION DES DÉPÔTS ET L'IMPACT DE CES
VARIATIONS SUR LES ÉCOSYSTÈMES**

Note établie par le Centre de coordination pour les effets (CCE) du Programme
international concerté de modélisation et de cartographie des niveaux et charges
critiques et des effets, risques et tendances de la pollution atmosphérique,
avec le concours du secrétariat

I. INTRODUCTION

1. La modélisation dynamique est la suite naturelle logique du processus qui a conduit à définir les charges critiques à l'état d'équilibre à l'appui des travaux relatifs aux effets menés au titre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance.

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. Des bases de données et cartes européennes des charges critiques ont été utilisées aux fins de l'élaboration des protocoles fondés sur les effets, tels que le Protocole de 1994 relatif à une nouvelle réduction des émissions du soufre et le Protocole de 1999 relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique.

3. Les charges critiques reposent sur la notion d'équilibre. Elles correspondent aux dépôts constants qu'un écosystème peut supporter sur la longue période, c'est-à-dire après être parvenu à un nouvel équilibre en réaction à ces dépôts. Mais, par rapport aux dépôts actuels ou prévus, de nombreux écosystèmes ne sont pas à l'équilibre, car différents processus (mécanismes tampons) sont à l'œuvre, qui retardent de plusieurs années, de plusieurs décennies, voire même de plusieurs siècles, le processus de rééquilibrage. Par définition, les charges critiques ne fournissent aucune information sur l'ampleur de ces retards.

4. À sa dix-septième session, en décembre 1999, l'Organe exécutif de la Convention a «souligné l'importance de ... la modélisation dynamique du processus de remise en état» [ECE/EB.AIR/68, par. 51 b)] pour permettre d'évaluer les délais de régénération dans les régions où les charges critiques cessent d'être dépassées et les délais d'apparition de dommages dans les régions où ces charges continuent d'être dépassées.

5. Les modèles dynamiques ne sont pas nouveaux. Au cours des deux dernières décennies, des scientifiques ont construit, mis à l'essai et appliqué des modèles de ce type pour simuler l'acidification des sols ou des eaux de surface, imputable essentiellement aux dépôts de soufre. Parmi les modèles dynamiques les plus connus, on peut citer le Simulation Model for Acidification's Regional Trends (SMART: de Vries *et al.*, 1989; Posch *et al.*, 1993), le Soil Acidification in Forest Ecosystems model (SAFE: Warvinge *et al.*, 1993; Alveteg et Sverdrup, 2002), the Model of Acidification of Groundwater in Catchments (MAGIC: Cosby *et al.*, 1985; 2001).

6. La modélisation dynamique constitue toutefois une activité relativement nouvelle dans les travaux axés sur les effets menés au titre de la Convention. Dans le passé, on a déjà utilisé, par exemple dans le cadre du Programme international concerté (PIC) de surveillance intégrée, des modèles dynamiques existants à l'égard d'un certain nombre de sites pour lesquels on disposait d'un nombre suffisant de données d'entrée. Mais il s'agit maintenant de construire et d'appliquer un ou plusieurs modèles dynamiques à l'échelle européenne et de les combiner autant que possible avec les travaux d'évaluation intégrée menés au titre de la Convention, en vue du réexamen et, éventuellement, de la révision du Protocole, et ce peut-être dès 2003.

7. Le «Very simple Dynamic model» (VSD) (VSD: Posch et Reinds, 2002), construit dans le cadre des activités relatives aux effets menées au titre de la Convention, représente la version développée la plus simple du modèle de bilan massique en conditions d'équilibre établi pour définir les charges critiques. Il consiste en une série d'équations élémentaires, qui sont également reprises dans les modèles SMART, SAFE et MAGIC (voir Posch *et al.*, 2002).

8. Un groupe commun d'experts de la modélisation dynamique, composé d'experts de tous les PIC relevant du Groupe de travail des effets, a été constitué en 2000 pour faire le point des travaux de modélisation dynamique menés dans le cadre de la Convention. Les résultats de ses deux réunions (Ystad (Suède), 3-5 octobre 2000 et 6-8 novembre 2001) ont été communiqués au Groupe de travail (EB.AIR/WG.1/2001/11; EB.AIR/WG.1/2002/12).

II. MODÉLISATION DYNAMIQUE DANS LE CADRE DE LA CONVENTION

9. Parmi les liens de causalité entre les dépôts d'acide fort et les dommages subis par les organismes indicateurs clefs, il y en a deux, très importants, qui peuvent être à l'origine de retards dans les réactions. Il s'agit, d'une part, des processus biogéochimiques, qui peuvent retarder la réaction chimique des sols, et, d'autre part, des processus biologiques, qui peuvent à leur tour retarder la réaction des organismes indicateurs, comme les dommages causés aux arbres dans les écosystèmes forestiers. Dans les modèles statiques utilisés pour déterminer les charges critiques, on envisage uniquement l'état d'équilibre, dans lequel le processus de réaction chimique et biologique à une variation des dépôts est achevé. Dans les modèles dynamiques, en revanche, on tente d'estimer le temps nécessaire pour que l'écosystème parvienne à un nouvel état (d'équilibre).

10. Si l'on s'en tient à la notion de charges critiques, c'est-à-dire dans des conditions d'équilibre, deux cas seulement sont possibles lorsqu'on compare ces charges aux dépôts: i) les dépôts sont inférieurs à la charge ou aux charges critiques, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de dépassement de la charge critique; ou ii) les dépôts sont supérieurs à la charge ou aux charges critiques, c'est-à-dire qu'il y a dépassement de la charge critique. Dans le premier cas, il n'y a pas (en apparence) de problèmes; autrement dit, aucune réduction des dépôts n'est jugée nécessaire. Dans le second cas, il existe par définition pour les écosystèmes un risque accru de dommages et donc les dépôts devraient être réduits.

11. Tant qu'il y a dépassement, la charge critique sert en quelque sorte d'avertissement puisqu'elle indique que les dépôts devraient être réduits. Mais, souvent, on part du principe que si les dépôts sont ramenés au niveau des charges critiques (ou en deçà), le risque d'«effets nocifs» disparaît immédiatement, c'est-à-dire que le paramètre chimique [par exemple, le rapport aluminium/cations basiques (Al/Bc)], qui fait le lien entre la charge critique et l'effet ou les effets, retrouve immédiatement une valeur non critique («sans danger»), et qu'il y a aussi immédiatement régénération biologique.

12. Mais la réaction des sols, en particulier en phase solide, aux variations des dépôts est retardée par un nombre (fini) de mécanismes tampons, dont le plus important est le pouvoir d'échanges cationiques. Ces mécanismes tampons peuvent retarder le moment où un paramètre chimique atteint une valeur critique, et des décennies, voire des siècles, peuvent s'écouler avant que l'on revienne à un état d'équilibre.

13. Ces mécanismes tampons, dont le nombre est fini, ne sont pas pris en compte pour définir les charges critiques, car ils influent non pas sur l'état d'équilibre mais uniquement sur les délais nécessaires pour atteindre celui-ci. On a donc besoin de modèles dynamiques si l'on veut estimer les délais nécessaires pour que les sols parviennent à un état chimique donné suivant différents scénarios de dépôts, par exemple les conséquences des «réductions des écarts» convenues dans le cadre des négociations sur la réduction des émissions.

14. Le processus de régénération chimique n'est pas le seul qui puisse être retardé; le retour à l'état biologique «initial» risque de l'être aussi. Même si le critère chimique est rempli (par exemple, rapport Al/Bc < 1), il faudra du temps avant que la régénération biologique soit totale.

15. L'évolution possible d'une variable chimique et d'une variable biologique (des sols) en réaction à une évolution «caractéristique» des dépôts dans le temps est présentée de façon succincte dans la figure reproduite plus loin. On peut distinguer cinq phases:

Phase 1: Les dépôts étaient et demeurent inférieurs à la charge critique et les critères fixés pour les variables chimique et biologique sont respectés. Il s'agit là de la situation «idéale» tant que les dépôts restent en deçà de la charge critique;

Phase 2: Les dépôts sont supérieurs à la charge critique mais les variables chimique et biologique sont toujours en deçà de la valeur critique. Il n'y a pas encore de risques d'«effets nocifs»; un certain temps va s'écouler avant que les critères cessent d'être respectés. En dépit du dépassement de la charge critique, aucun dommage n'est donc visible à ce stade. Nous appelons le laps de temps qui s'écoule entre le premier dépassement de la charge critique et la première violation du critère biologique (le premier cas de dommage effectivement observé) le «délai de détérioration» ($DD=t_3-t_1$);

Phase 3: Les dépôts sont supérieurs à la charge critique et ni le critère chimique ni le critère biologique ne sont respectés. Des mesures doivent être prises pour éviter une «nouvelle» détérioration de l'écosystème;

Phase 4: Les dépôts sont inférieurs à la charge critique mais les critères chimique et biologique ne sont toujours pas respectés et il n'y a donc pas eu encore régénération de l'écosystème. Nous appelons le laps de temps qui s'écoule entre le moment où la charge critique cesse pour la première fois d'être dépassée et le moment où les deux critères sont de nouveau respectés le «délai de régénération» ($DR=t_6-t_4$);

Phase 5: Cette phase est comparable à la phase 1. Les dépôts sont inférieurs à la charge critique et les deux critères sont de nouveau respectés. Ce n'est qu'à ce stade que l'on peut parler de régénération totale de l'écosystème.

16. Les phases 2 et 4 se prêtent, l'une et l'autre, à deux nouvelles subdivisions. Il est possible en effet de distinguer dans chacune d'elles: i) les délais de détérioration et de régénération chimiques ($DD_c=t_2-t_1$ et $DR_c=t_5-t_4$; en gris foncé dans la figure); et ii) les délais (supplémentaires) de détérioration et de régénération biologiques ($DD_b=t_3-t_2$ et $DR_b=t_6-t_5$; en gris clair dans la figure). Pour l'instant, faute de modèles opérationnels simulant les réactions biologiques, les délais de détérioration et de régénération concernent essentiellement les variables chimiques et les délais de régénération chimique tiennent lieu de délais de régénération globale.

17. La modélisation dynamique et les raisons qui en justifient l'utilisation (ainsi que les contraintes qui y sont liées) sont exposées en détail dans Posch *et al.* (2002), «Manual for Dynamic Modelling of Soil Response to Atmospheric Deposition». Ce manuel est également téléchargeable sur Internet à l'adresse suivante: www.rivm.nl/cce.

III. LE RECOURS À LA MODÉLISATION DYNAMIQUE AUX FINS DE L'ÉVALUATION INTÉGRÉE

18. Enfin, dans le cadre de la Convention, un lien doit être établi entre les modèles dynamiques des sols et (les modèles d') (l')évaluation intégrée, c'est-à-dire entre le Groupe de travail des effets et l'Équipe spéciale des modèles d'évaluation intégrée. Différents modes d'interaction avec les modèles d'évaluation intégrée sont envisageables, comme l'analyse de scénarios, la détermination de charges cibles, la définition et l'utilisation d'«isolignes de régénération», et l'incorporation d'un modèle dynamique dans un modèle d'évaluation intégrée (par exemple RAINS).

A. Analyse de scénarios

19. Les données obtenues au moyen de modèles d'évaluation intégrée pour différents scénarios de dépôts sont reprises comme données d'entrée dans des modèles dynamiques utilisés pour analyser l'impact de ces scénarios sur les sols et les eaux de surface (en Europe). Les résultats (délais de régénération, etc.) sont communiqués en retour aux responsables des travaux d'évaluation intégrée. Désormais, les modèles dynamiques disponibles sont bien adaptés à ce type de tâche. La question est de savoir comment faire la synthèse des résultats obtenus à l'échelle européenne. En outre, dans le plan de travail pour l'application de la Convention, ce type d'analyse prendra forcément beaucoup de temps.

B. Détermination de charges cibles

20. On utilise des modèles dynamiques pour définir des charges cibles, par exemple le dépôt maximal permis pour atteindre un objectif convenu (valeur d'une variable des sols, etc.) dans un délai donné. Ces charges cibles sont communiquées à ceux qui construisent des modèles d'évaluation intégrée pour qu'ils déterminent si elles sont réalistes (compte tenu des coûts et des technologies de réduction disponibles). Cela n'appelle aucune modification des modèles existants, mais oblige à entreprendre un certain nombre de travaux supplémentaires car il faut faire tourner les modèles dynamiques des sols «à rebours», c'est-à-dire procéder par itérations. En outre, vu que tant l'azote que le soufre contribuent à l'acidité, il ne sera pas possible d'obtenir des paires uniques de dépôts de N et de S pour atteindre un objectif donné (à comparer à la fonction de charge critique pour les charges critiques d'acidité).

C. Isolignes de régénération

21. Les fonctions de réponse (qui sont *grosso modo* comparables aux isolignes de protection pour les charges critiques) sont calculées au moyen des modèles dynamiques existants et rattachées aux modèles d'évaluation intégrée. À partir de ces fonctions de réponse («isolignes de régénération» sous la forme de «tables de recherche») obtenues en faisant tourner plusieurs fois le modèle pour analyser un grand nombre de schémas de dépôts plausibles, il est ensuite possible de déterminer par interpolation les résultats pour chaque scénario de dépôts (raisonnable).

D. Modèle dynamique intégré

22. Un modèle dynamique est incorporé dans les modèles d'évaluation intégrée (par exemple RAINS) et utilisé aux fins de l'analyse de scénarios et du processus d'optimisation. Les modèles

largement utilisés comme MAGIC, SAFE et SMART ne sont pas faciles à incorporer dans les modèles d'évaluation intégrée, et ils risquent d'être encore trop complexes pour être utilisés aux fins du processus d'optimisation. À défaut, on pourrait incorporer dans les modèles d'évaluation intégrée le modèle VSD, qui présente les caractéristiques essentielles à long terme des modèles dynamiques des sols, selon un processus comparable à celui qui a conduit à intégrer dans RAINS le modèle simple de l'ozone dérivé du modèle complexe de l'EMEP concernant les oxydants photochimiques. Mais cela exigerait tout de même un effort important, et l'une des choses les plus difficiles serait de créer une base de données européenne pour pouvoir exploiter le modèle.

23. Le développement de nouvelles interfaces appropriées entre la modélisation dynamique et l'évaluation intégrée est un sujet qui préoccupe beaucoup actuellement le PIC de modélisation et de cartographie des niveaux et charges critiques et des effets, risques et tendances de la pollution atmosphérique (PIC M&C), l'Équipe spéciale des modèles d'évaluation intégrée et le Groupe commun d'experts de la modélisation dynamique.

IV. ÉTAT D'AVANCEMENT DES ACTIVITÉS ENTREPRISES AU TITRE DU PLAN DE TRAVAIL À MOYEN TERME DU GROUPE DE TRAVAIL DES EFFETS

24. Dans le cadre du PIC M&C, des ateliers ont été organisés en octobre 2001 à Zagreb (Croatie), Bled (Slovénie) et Karzag (Hongrie) pour permettre aux participants de se familiariser avec la modélisation dynamique.

25. Le Centre de coordination pour les effets (CCE) a mis au point un manuel consacré à la modélisation dynamique (Posch *et al.*, 2002) et une version exportable du modèle VSD (Posch et Reinds, 2002). Le manuel et le modèle ont été communiqués aux centres nationaux de liaison (CNL) et sont également téléchargeables sur Internet à l'adresse suivante: www.rivm.nl/cce.

26. En collaboration avec le Ministère de l'environnement de la Suède, le CCE a aidé le CNL de la Pologne à tester le modèle au moyen de sa base de données nationale sur les charges critiques. Le CCE a également collaboré avec le CNL de la Suisse à une analyse comparée des modèles VSD et SAFE, au moyen de données nationales. Les résultats ont été présentés au douzième atelier du CCE, qui s'est tenu en même temps que la dix-huitième réunion de l'Équipe spéciale du PIC M&C à Sorrente (Italie), du 15 au 19 avril 2002. Ces résultats et les autres résultats de l'atelier peuvent également être téléchargés sur Internet à l'adresse suivante: www.rivm.nl/cce.

27. Les participants au douzième atelier du CCE et à la dix-huitième réunion de l'Équipe spéciale du PIC M&C ont recommandé au CCE de prendre les mesures suivantes conformément au plan de travail à moyen terme du Groupe de travail des effets:

a) Automne 2002: Demander que des données soient communiquées (date limite: début du printemps 2003) en vue de la mise à jour de la base de données sur les charges critiques et de l'élaboration d'un nouveau volet intégrant les variables et les données requises aux fins de l'exploitation du modèle VSD. Il importe que la base de données sur les charges critiques et le nouveau volet nécessaire pour la modélisation dynamique soient cohérents, car les données

utilisées pour établir les cartes des charges critiques et des dépassements doivent concorder avec celles utilisées pour l'évaluation dynamique de l'impact causé par ces dépassements;

b) Printemps 2003: Faire de la modélisation dynamique le thème central de son atelier (par exemple organisation d'une séance de formation) en mettant à profit les données communiquées à sa demande pour renforcer le consensus entre les centres nationaux de liaison au sujet de la modélisation dynamique et des données requises à cet effet;

c) Automne 2003: Demander que des données soient communiquées (date limite: printemps 2004) en vue de la mise à jour de la base de données sur les charges critiques et de l'élaboration d'un nouveau volet intégrant les variables et les données requises pour poursuivre les travaux de modélisation dynamique à l'appui du processus d'élaboration de la politique générale en 2004.

V. RÉFÉRENCES

Alveteg M, Sverdrup H (2002) Manual for regional assessments using the SAFE model (projet, 8 avril 2002). Département de génie chimique II, Université de Lund, Lund (Suède). www2.chemeng.lth.se

Cosby BJ, Hornberger GM, Galloway JN, Wright RF (1985) Modeling the effects of acid deposition: Assessment of a lumped parameter model of soil water and streamwater chemistry. *Water Resources Research* 21(1): 51-63.

Cosby BJ, Ferrier RC, Jenkins A, Wright RF (2001) Modelling the effects of acid deposition: refinements, adjustments and inclusion of nitrogen dynamics in the MAGIC model. *Hydrology and Earth System Sciences* 5(3): 499-517.

De Vries W, Posch M, 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.

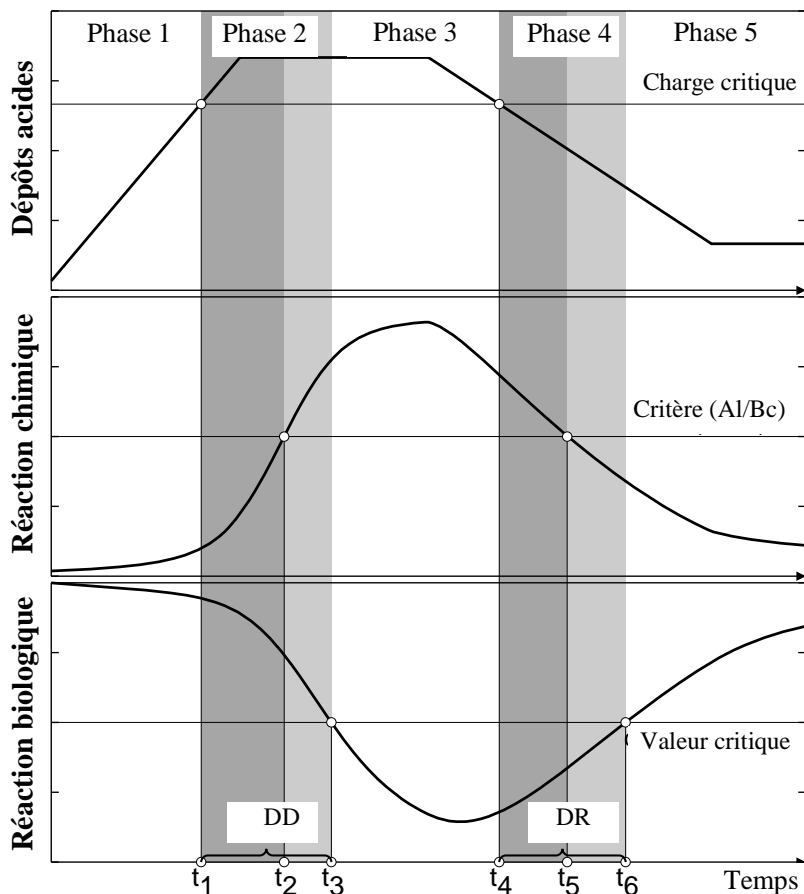
Posch M, Reinds GJ, De Vries W (1993) SMART - A Simulation Model for Acidification's Regional Trends: Model description and user manual. Mimeograph Series of the National Board of Waters and the Environment 477, Helsinki, Finland, 43 pp.

Posch M, Hettelingh J-P, De Vries W, Sverdrup H, Wright RF (2002) *Manual for Dynamic Modelling of Soil Response to Atmospheric Deposition, version 0.8* www.rivm.nl/cce.

Posch M, Reinds GJ (2002) *VSD – User Manual of the Very Simple Dynamic Soil Acidification Model*, Coordination Center for Effects, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, The Netherlands (in prep.).

Warfvinge P, Falkengren-Grerup U, Sverdrup H, Andersen B (1993) Modelling long-term cation supply in acidified forest stands. *Environmental Pollution* 80: 209-221.

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



Figure

Évolution «caractéristique» dans le temps (passée et future) des dépôts (partie supérieure), variable chimique des sols et réaction biologique correspondante. Sont également présentées les valeurs critiques de ces variables (chimique et biologique) et la charge critique calculée à partir de celles-ci. Le laps de temps qui s'écoule entre le moment où la charge critique est dépassée, le moment où le critère chimique critique cesse d'être respecté et le moment où la réaction biologique dépasse la valeur critique, et le laps de temps qui s'écoule entre le moment où la charge critique cesse d'être dépassée, le moment où le critère chimique critique est de nouveau respecté et le moment où la réaction biologique repasse en deçà de la valeur critique sont indiqués dans la figure en gris foncé et en gris clair, ces intervalles de temps correspondant au délai de détérioration (DD) et au délai de régénération (DR) du système.
