

Sur la production des ^7Be et ^{32}P dans l'air et l'utilisation de leur rapport d'activité

Par ALAIN MARENCO et JACQUES FONTAN, *Université Paul Sabatier, Centre de Physique Atomique, Physique des Aérosols et Echanges Atmosphériques (Equipe de recherche associée au C. N. R. S.), Toulouse, France*

(Manuscrit reçu le 29 mai 1973; révisé le 7 septembre 1973)

ABSTRACT

A study of the values of the $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ activity ratio, measured during several years by means of short time samplings, shows that the production efficiency of ^{32}P by cosmic rays in the atmosphere has very likely been underestimated and that one should consider a corrected value of about 37 for the ratio between the production rates of ^7Be and ^{32}P . Moreover, the theoretical studies by simulation on models and the experimental results obtained at Toulouse show the important influence of vertical movements of air upon the variation of the $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ ratio in the troposphere.

Introduction

Les ^7Be et ^{32}P sont des éléments cosmogéniques qui semblent intéressants, du fait de leurs périodes (respectivement 53.7 et 14.45 j), pour étudier certains phénomènes atmosphériques. On a ainsi envisagé d'utiliser le rapport d'activité $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ pour caractériser, dans la troposphère, l'air d'origine stratosphérique (Lal et al., 1958; Peters, 1959; Rama & Honda, 1961; Rama, 1963), pour déterminer des temps de séjour (Bhandari et al., 1970; Marengo & Fontan, 1972; Lal et al., 1960) ou pour estimer des coefficients d'échange troposphériques (Hartwig & Sittkus, 1972).

Nous avons cependant montré dans une précédente publication (Marengo & Fontan, 1974) qu'il existait un désaccord important entre les valeurs expérimentales moyennes du rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ et les résultats théoriques donnés par les modèles de simulation en régime stationnaire.

Afin d'expliquer ce désaccord ainsi que les variations obtenues expérimentalement, nous avons donc réexaminé les taux de production de ces éléments et étudié en régime dépendant du temps l'influence de divers phénomènes.

I. Resultats à Toulouse

Nous avons réalisé, durant plusieurs années, des mesures de ^7Be et ^{32}P (ainsi que de divers autres éléments) à Toulouse dans le Sud-Ouest de la France, en nous efforçant de réduire les temps de prélèvement et d'augmenter la précision des analyses. Nous avons ainsi analysé les ^7Be et ^{32}P de manière continue dans l'air au niveau du sol (1965 à 1969), avec une durée moyenne de prélèvement de 2 jours (1 à 4 jours). Nous avons par ailleurs mesuré ces éléments dans les précipitations et dans l'air en altitude. Les méthodes d'analyse ont été présentées précédemment (Marengo et al., 1968; Marengo & Fontan, 1974). La récupération des entraineurs étant mesurée à chaque analyse, et les rendements de comptage ayant été déterminés de manière précise par des méthodes diverses donnant des résultats concordants, l'erreur sur la détermination des ^7Be et ^{32}P n'excède pas 7%.

Nous avons dépouillé les résultats en utilisant des méthodes statistiques (corrélations) et nous avons mis au point des modèles de simulation numérique pour étudier l'influence de divers paramètres.

Les résultats présentés dans un précédent

article (Marenco & Fontan, 1974) montrent que les variations d'activité des ^7Be et ^{32}P , dans l'air des basses couches, dépendent beaucoup des phénomènes de lessivage.

La simulation sur modèle de la variation dans le temps des phénomènes de lessivage et de production troposphérique permet ainsi de retrouver, pour les activités des ^7Be et ^{32}P , des variations périodiques qualitativement comparables à celles enregistrées expérimentalement. L'accord n'est cependant quantitatif que dans le cas du ^7Be , car ni l'amplitude de variation ni les niveaux d'activité ne correspondent pour le ^{32}P .

Le régime stationnaire, bien que parfois éloigné des conditions réelles, permet de décrire les conditions moyennes d'échange et de lessivage régnant dans l'atmosphère. Il est possible d'estimer, à partir de la distribution verticale moyenne du rapport $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$, l'ordre de grandeur des coefficients de lessivage (Λ_1 , entre 2 et 6 km, de $1/30$ à $1/40 \text{ j}^{-1}$) et d'échange vertical dans la troposphère (3 à 6 m^2/s). Les valeurs théoriques, obtenues dans ces conditions opératoires pour les activités des ^{210}Po , ^{210}Pb et ^7Be , correspondent aussi avec les mesures expérimentales. On note par contre un désaccord prononcé pour le rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ entre les valeurs expérimentales moyennes, de l'ordre de 30, et les résultats théoriques, de l'ordre de 50, donnés par les modèles. D'autre part, la variation des paramètres en régime stationnaire (lessivage, coefficient d'échange troposphérique) ne permet pas d'expliquer la variation périodique obtenue expérimentalement pour le rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$, passant de 38–40 en hiver à environ 24 en automne.

Nous avons donc recherché d'une part si une mésestimation des taux de production n'était pas responsable des désaccords enregistrés, et étudié d'autre part, au moyen d'expériences de simulation en régime dépendant du temps, quelle pouvait être l'influence directe de certains paramètres sur la valeur du rapport d'activité $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$.

II. Etude de la production des éléments cosmogéniques

II.1. Rappel des travaux antérieurs

La formation des éléments cosmogéniques a fait l'objet de nombreuses études (Benioff, 1956; Peters, 1959; Lal et al., 1958; Rochester, 1962).

Tellus XXVI (1974), 3

Tableau 1. *Différents rapports de taux de production considérés dans la littérature*

Auteurs	Année	$Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}}$
Lal	1958	170
Peters, Goel	1959	100
Rama	1960	180
Lal & Arnold	1960	110
Lal & Rama	1960	60
Rama	1961	100
Rochester; Walton	1962	100
Lal	1963	100
Rama	1963	100
Bhandari	1970	60

Lal a ainsi déterminé, à partir du taux d'étoiles nucléaires F et du rendement de spallation R_i pour chaque élément i , les variations des taux de production Q_i avec la latitude et l'altitude ($Q_i = F \cdot R_i$). Ces taux restent entre eux dans un rapport fixe (R_i constant) et augmentent avec la latitude et surtout l'altitude. On constate que la production stratosphérique — intégrée sur une colonne verticale d'air — varie beaucoup entre l'équateur et les fortes latitudes (où elle devient prédominante dans la production totale), ce qui n'est pas le cas de la production troposphérique, l'augmentation vers les pôles du taux de production étant alors compensé par l'abaissement de la tropopause.

Les efficacités R_i initialement calculées (Lal et al., 1958) étaient de l'ordre de 4.2×10^{-2} pour le ^7Be et de 2.46×10^{-4} pour le ^{32}P . Ces valeurs ont toutefois été souvent reconsidérées (augmentation de l'efficacité du ^{32}P), en raison notamment des rapports minima d'activité $(^7\text{Be}/^{32}\text{P})_{\min}$ expérimentalement constatés dans les précipitations. On a en effet :

$$Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}} = R_{\text{Be}}/R_{\text{P}} \leq (\lambda_{\text{P}}/\lambda_{\text{Be}}) \cdot (^7\text{Be}/^{32}\text{P})_{\min}$$

Le Tableau 1 résume les divers rapport, considérés.

II.2. Etude des taux de production

Les taux de production Q_i dépendent donc de deux facteurs : le taux d'étoiles nucléaires F , et le rendement de spallation R_i qui est fonction de l'élément considéré. Le taux F est déduit des flux de particules à différents niveaux, assez bien connus dans la haute troposphère et la stratosphère (Simpson, 1951; Meyer

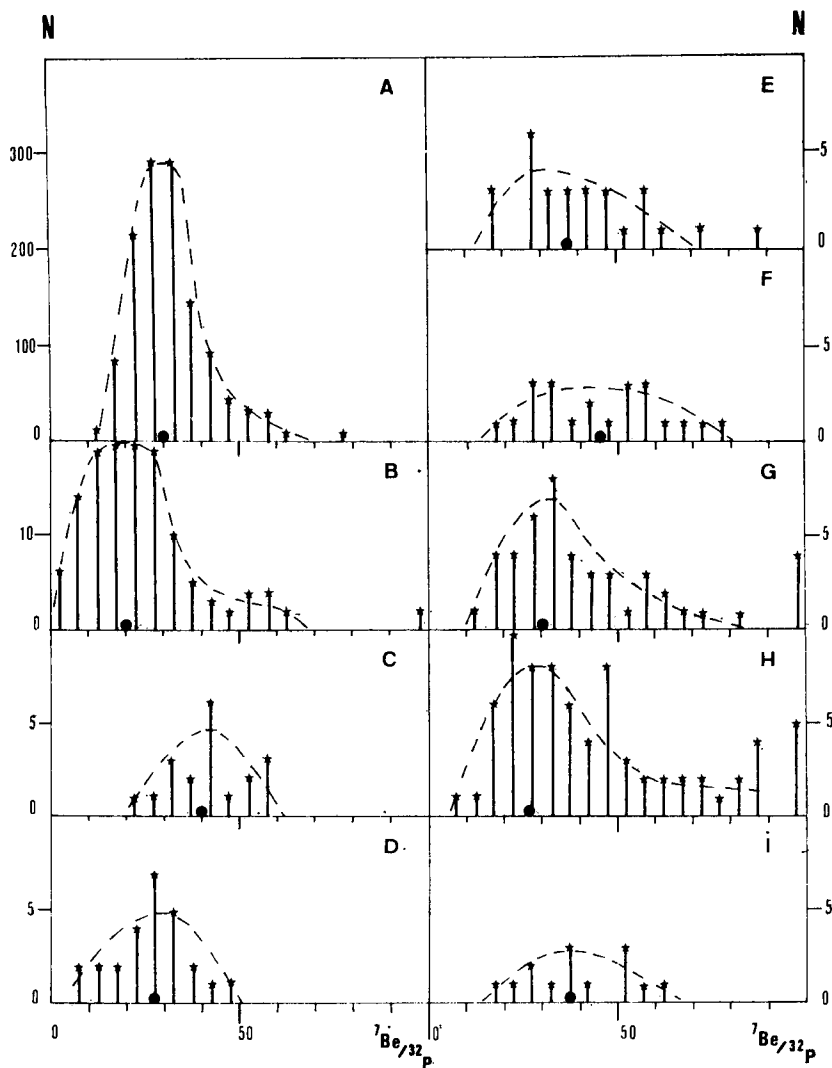


Fig. 1. Répartition statistique des rapports d'activité ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$. (A) Toulouse (air) (prélèvements 1 à 4 j) (Marenco & Fontan, 1974); (B) Spitzberg (air 3 000 m) (prélèvements 1 j) (Reiter et al., 1970); (C) Bern (air) (prélèvements 7 j) (Aegerter et al., 1966); (D) Vilnius (air) (prélèvements 3 j) (Luyanas et al., 1970); (E) Bombay-Kandala (pluie) (Bhandari et al., 1970); (F) Indes (air en altitude) (Rama & Honda, 1961); (G) Bombay-Kodaikanal (pluie) (Rama, 1960; Lal et al., 1960; Peters, 1959); (H) Toulouse (pluie) (Lacombe, 1968); (I) Westwood (pluie) (Walton & Fried, 1962).

& Simpson, 1955; Soberman, 1956); dans la basse troposphère les déterminations sont plus rares et l'on extrapole en général les courbes obtenues en altitude. Nous avons essayé, dans les modèles de simulation, de modifier de manière arbitraire la répartition verticale du facteur F , en diminuant notamment le gradient dans la basse troposphère; il est possible d'obtenir des valeurs plus faibles du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$,

en particulier dans les basses couches, mais la modification à apporter au profil vertical de F est si importante qu'elle est très peu probable. Il semble, en l'absence d'éléments nouveaux et après les études très sérieuses de Lal & al. (1958) et de Peters (1959), qu'il ne soit pas possible de remettre en question le taux d'étoiles nucléaires F . Les rendements de spallation R_i par contre sont plus incertains, étant donné la

difficulté de réaliser des mesures absolues, et le rapport des taux de production a été souvent révisé comme nous l'avons vu. La dernière valeur considérée est de l'ordre de 60, ce qui correspond à un rapport minimum d'activité de 16. Lorsque l'on étudie les rapports $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ obtenus dans le monde (air et pluie), on trouve toute une gamme de variations (Fig. 1). On constate que de nombreux auteurs ont obtenu des rapports d'activité inférieurs à 16. Il faut toutefois tenir compte de la durée des prélèvements et de leur représentativité. En effet :

- plus le prélèvement dans l'air est court et plus on a de chance d'obtenir des rapports $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ proches de la valeur minimale;

- les pluies, même analysées individuellement, ne sont pas spécialement représentatives d'un échantillonnage de courte durée, étant donné le temps d'existence des nuages;

- enfin, on peut avoir des erreurs de mesure pour les valeurs extrêmes du rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$.

On constate que les valeurs les plus faibles de ce rapport sont obtenues à Vilnius (prélèvements de 3 jours), au Spitzberg (prélèvements de 1 jour) et à Toulouse (prélèvements de 1 à 4 jours). La valeur de 10 pour le rapport minimum d'activité $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ semble être la plus probable, bien que des valeurs inférieures aient parfois été trouvées; leur fréquence est cependant bien plus faible, et elles sont à considérer avec réserve.

Les résultats obtenus par Reiter et al. (1970) par exemple, tout en présentant une dispersion comparable aux autres, sont en moyenne plus faibles et présentent surtout de telles valeurs exceptionnelles (2 à 8) du rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$. Il est possible d'attribuer la faible valeur moyenne (20) au fait que les mesures sont réalisées en altitude à 3 000 m, où les rapports doivent être plus faibles comme le montrent les modèles en régime stationnaire. Cependant les très faibles valeurs peuvent être discutées. Étant donné la période de mesures (novembre 1969 à mars 1970), il ne faut pas exclure la possibilité d'une formation artificielle de ^7Be et surtout de ^{32}P , à la suite des essais chinois du 29 septembre 1969, amenant de plus faibles valeurs du rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$. Il est en effet à remarquer que les très faibles valeurs du rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ sont obtenues au début de la période de mesure et coïncident souvent avec des pics d'activité de produits de fission. Il faut d'autre part noter que les rendements chimiques

des analyses semblent ne pas avoir été mesurés systématiquement; or nous avons, en ce qui nous concerne, noté dans nos analyses des variations parfois importantes de ces rendements.

La valeur minimale la plus probable, se retrouvant à des périodes diverses et pour des mesures d'origines distinctes, semble être de l'ordre de 10; elle correspond à un rapport des taux de production de 37. Le rapport moyen $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ obtenu avec les modèles dans les basses couches passe alors de 50 à 31, ce qui est plus compatible avec les résultats expérimentaux. Étant donné les résultats donnés par les modèles (^{32}P trop faible par rapport à la réalité), il semble plus juste de conserver la valeur de l'efficacité pour le ^7Be , qui concorde bien avec les mesures et les bilans, et de relever celle du ^{32}P qui devient ainsi :

$$R_p = 1.13 \times 10^{-3}$$

Remarque. Les faibles valeurs du rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ obtenues à Toulouse ne sont pas imputables à une contamination en ^{32}P d'origine artificielle. Leur fréquence est la même que l'on soit ou non en période d'essais nucléaires, et l'on ne constate en particulier aucune relation entre ce rapport et la présence de produits de fission à courte et moyenne période.

III. Simulation numérique en régime dépendant du temps

La modification du rapport des taux de production pose cependant le problème d'expliquer les fortes valeurs du rapport $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ (répartition entre 10 et 60) souvent supérieures à la valeur d'équilibre (37). Lal et al. (1958) ont montré qu'il était possible d'avoir des rapports d'activité $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ bien supérieurs à la valeur d'équilibre, en considérant une masse d'air d'origine stratosphérique évoluant dans la troposphère. Or, nous avons montré (Marenco & Fontan, 1974) que les descentes stratosphériques, bien que possibles, n'avaient pas de contribution importante sur les variations de concentrations des ^7Be et ^{32}P et ne pouvaient expliquer la fréquence des fortes valeurs observées, notamment dans les basses couches (absence en particulier de corrélation entre les rapports $^{90}\text{Sr}/^7\text{Be}$ et $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$).

Nous avons essayé de voir, par des expériences sur modèles, si des phénomènes purement

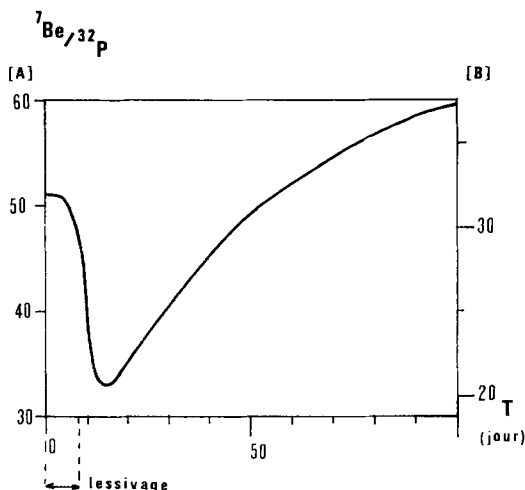


Fig. 2. Simulation numérique : influence d'un lessivage (durée 8 j). Evolution en fonction du temps du rapport d'activité ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ dans l'air des basses couches (Kz troposphérique : $6 \text{ m}^2/\text{s}$). (A) Echelle conventionnelle ($Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}} = 60$); (B) Echelle modifiée ($Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}} = 37$).

troposphériques pouvaient amener, en régime dépendant du temps, des variations du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ comparables à celles envisagées par Lal. En effet, le gradient accusé de la répartition verticale des taux de production ainsi que la différence d'évolution dans le temps des ${}^7\text{Be}$ et ${}^{32}\text{P}$ (en raison de leurs périodes différentes) font que toute rupture de l'état d'équilibre à un niveau donné peut se traduire ensuite, lors du retour à l'équilibre, par une variation importante du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$.

III.1. Modèles de simulation

Nous ne rappellerons ici que le principe des modèles de simulation utilisés qui ont déjà été présentés dans des articles antérieurs (Marenco & Fontan, 1972; 1974). Ces modèles, reposant sur l'équation de diffusion, correspondent à un schéma simplifié d'atmosphère allant jusqu'à 40 km, avec une tropopause située généralement à 11 km. Ils permettent de simuler en régime stationnaire ou dépendant du temps :

- les échanges verticaux, avec un profil tenant compte de la couche limite, de la troposphère (Kz de 1 à $20 \text{ m}^2/\text{s}$) et de la stratosphère (Kz : $0.4 \text{ m}^2/\text{s}$);
- les phénomènes de lessivage entre 2 et 6 km, soit par un coefficient en régime station-

naire, soit en annulant les concentrations dans la zone en régime transitoire;

- le dépôt au sol ($\beta = 0.2 \text{ cm/s}$);
- la répartition verticale des taux de production des ${}^7\text{Be}$ et ${}^{32}\text{P}$ (prise en général pour 40° de latitude).

Les expériences de simulation, réalisées en régime dépendant du temps, partent comme conditions initiales des profils verticaux en régime stationnaire (conditions moyennes) et l'on étudie, après simulation des phénomènes, l'évolution dans le temps du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ dans les basses couches.

III.2. Expériences sur modèles

Phénomènes de lessivage (Fig. 2). La simulation d'un lessivage de plusieurs jours, dans la zone de 2 à 6 km, entraîne une diminution rapide du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ dans les basses couches, suivie d'une augmentation plus rapide que l'évolution normale (due à la production continue des éléments) car il s'y ajoute la contribution des couches supérieures, relativement plus importante en ${}^7\text{Be}$ qu'en ${}^{32}\text{P}$. On note cependant que le rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ ne dépasse pas la valeur du rapport des taux de production et que par ailleurs la valeur minimale, atteinte dans les jours suivant le lessivage, reste relativement élevée. Les phénomènes de lessi-

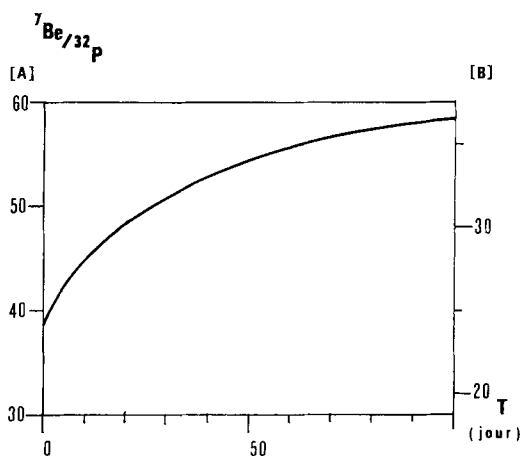


Fig. 3. Simulation numérique : influence d'un changement de stabilité. Evolution en fonction du temps du rapport d'activité ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ dans l'air des basses couches (Kz troposphérique : $3 \text{ m}^2/\text{s}$). (A) Echelle conventionnelle ($Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}} = 60$); (B) Echelle modifiée ($Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}} = 37$); (conditions initiales : Kz = $20 \text{ m}^2/\text{s}$; $\Delta_1 = 1/30 \text{ j}^{-1}$).

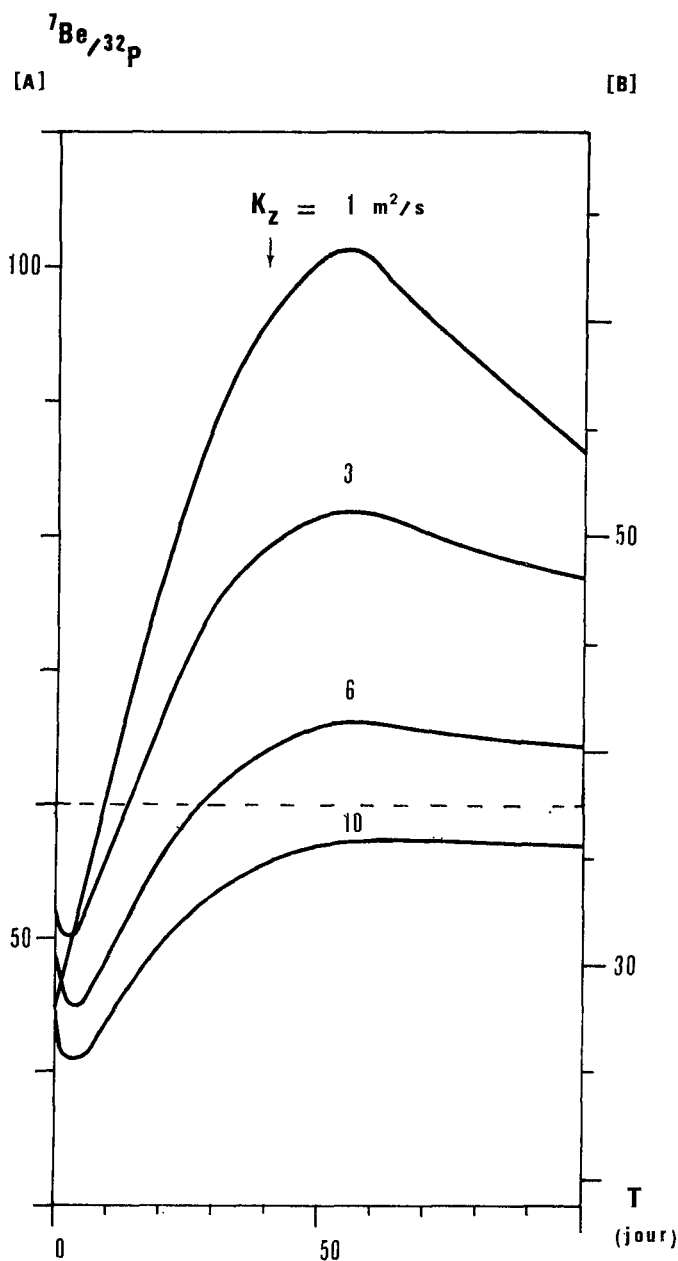


Fig. 4. Simulation numérique : influence d'une subsidence. Evolution en fonction du temps du rapport d'activité $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ dans l'air des basses couches (pour diverses valeurs de K_z troposphérique). (A) Echelle conventionnelle ($Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}} = 60$); (B) Echelle modifiée ($Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}} = 37$).

vage ne permettent donc d'expliquer, ni les rapports supérieurs à la valeur d'équilibre, ni les faibles valeurs constatées dans les basses couches, dans le cas où l'on considère l'ancien rapport de 60 des taux de production.

Variation du coefficient d'échange troposphérique. Les résultats obtenus en régime stationnaire montrent que les activités des ^7Be et ^{32}P sont supérieures aux valeurs d'équilibres locales (déduites des taux de production) dans la tropo-

sphère inférieure (0 à 4 km), et que la tendance s'inverse dans la troposphère supérieure. Lorsque le coefficient d'échange est élevé, les gradients verticaux sont faibles et les différences précédentes sont d'autant plus accusées. Lorsque l'on simule sur modèle (Fig. 3) une stabilisation de la troposphère, succédant à un mélange important, on vérifie bien que le rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ dans les basses couches augmente en fonction du temps. Cependant l'évolution est relativement lente et les rapports ne dépassent pas, ici non plus, le rapport des taux de production.

Variation rapide de la hauteur de tropopause. Nous ne traiterons pas ici de la montée de la tropopause, donnant lieu à des introductions stratosphériques (étudiées par Lal), étant donné leur faible contribution dans les basses couches en ${}^7\text{Be}$ et ${}^{32}\text{P}$. On peut inversement envisager le cas d'une baisse rapide de la hauteur de tropopause; la production troposphérique diminue et les activités initialement présentes décroissent jusqu'au nouvel état d'équilibre. On vérifie avec les modèles que l'on a bien alors une augmentation du rapport d'activité ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$, mais celle-ci reste faible (10%).

Phénomènes de subsidence. Les phénomènes de divergence ou de convergence, se produisant à moyenne et grande échelle dans la troposphère, provoquent des déplacements verticaux de l'air dont la vitesse peut atteindre quelques cm/s. Les subsidences, résultant de phénomènes de divergence, ont ainsi un effet analogue à celui d'une descente stratosphérique, en amenant dans les couches moyennes ou inférieures de la troposphère des concentrations bien supérieures à l'équilibre local de production, mais sans contribution relative importante en produits d'origine stratosphérique.

Nous avons étudié ce phénomène pour diverses conditions de stabilité verticale dans la troposphère; pour cela nous avons simulé, sur un modèle ayant atteint un régime d'équilibre indépendant du temps, le résultat final d'une subsidence de quelques jours — donnant lieu à un déplacement maximum vers 5 km d'altitude (abaissement de 3 km) et diminuant rapidement vers 0 dans la haute et basse troposphère — et étudié l'évolution en fonction du temps du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ dans l'air des basses couches (Fig. 4). On constate une augmentation assez rapide (quelques dizaines de jours) et importante de ce rapport, l'effet étant d'autant plus accusé que la stabilité de la troposphère est élevée. On

note que le rapport d'activité ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ dépasse en général la valeur du rapport des taux de production. Lorsque l'on diminue l'amplitude de la subsidence les variations sont encore importantes, et lorsqu'on l'augmente on atteint rapidement des rapports élevés, pouvant être par exemple supérieurs à 100 pour $Kz = 3 \text{ m}^2/\text{s}$, avec la nouvelle valeur (37) du rapport des taux de production.

(Remarque : Il est également possible d'étudier l'effet des phénomènes de convergence amenant, inversement, une élévation de l'air. On constate la diminution du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$, mais la variation reste assez limitée.)

III. Discussion

Lorsque l'on désire utiliser le rapport d'activité ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ pour étudier certains phénomènes atmosphériques, il est indispensable de connaître le rapport exact des taux de production des ${}^7\text{Be}$ et ${}^{32}\text{P}$. L'étude de résultats expérimentaux de sources diverses montre que l'efficacité du ${}^{32}\text{P}$ semble avoir été sous-estimée et que le rapport des taux de production ($Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}}$) est vraisemblablement de l'ordre de 37, plutôt que de 60. En effet, s'il est possible, comme nous l'avons vu, d'expliquer les valeurs élevées du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$, il est impossible — en l'absence de formation artificielle ou d'incertitude importante sur la valeur du rapport — d'expliquer autrement les valeurs inférieures à la limite minimale théorique obtenues pour ce rapport. Cette modification se justifie d'autre part lorsque l'on considère les résultats du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$, donnés par les modèles de simulation ($Q_{\text{Be}}/Q_{\text{P}}$), systématiquement trop élevés par rapport aux valeurs expérimentales moyennes.

Les expériences de simulation sur modèles montrent l'influence importante des déplacements verticaux sur la variation du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$. On observe ainsi une bonne corrélation entre le rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ et les situations anticycloniques, ce qui peut s'expliquer par les phénomènes de descente de l'air au sein de ces masses d'air.

Un exemple particulièrement intéressant de variation du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ est observé durant l'hiver 1967–1968 (Fig. 5). Nous avons porté les valeurs journalières du rapport d'activité ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ mesuré à Toulouse dans l'air au niveau du sol; on obtient des variations très irréguli-

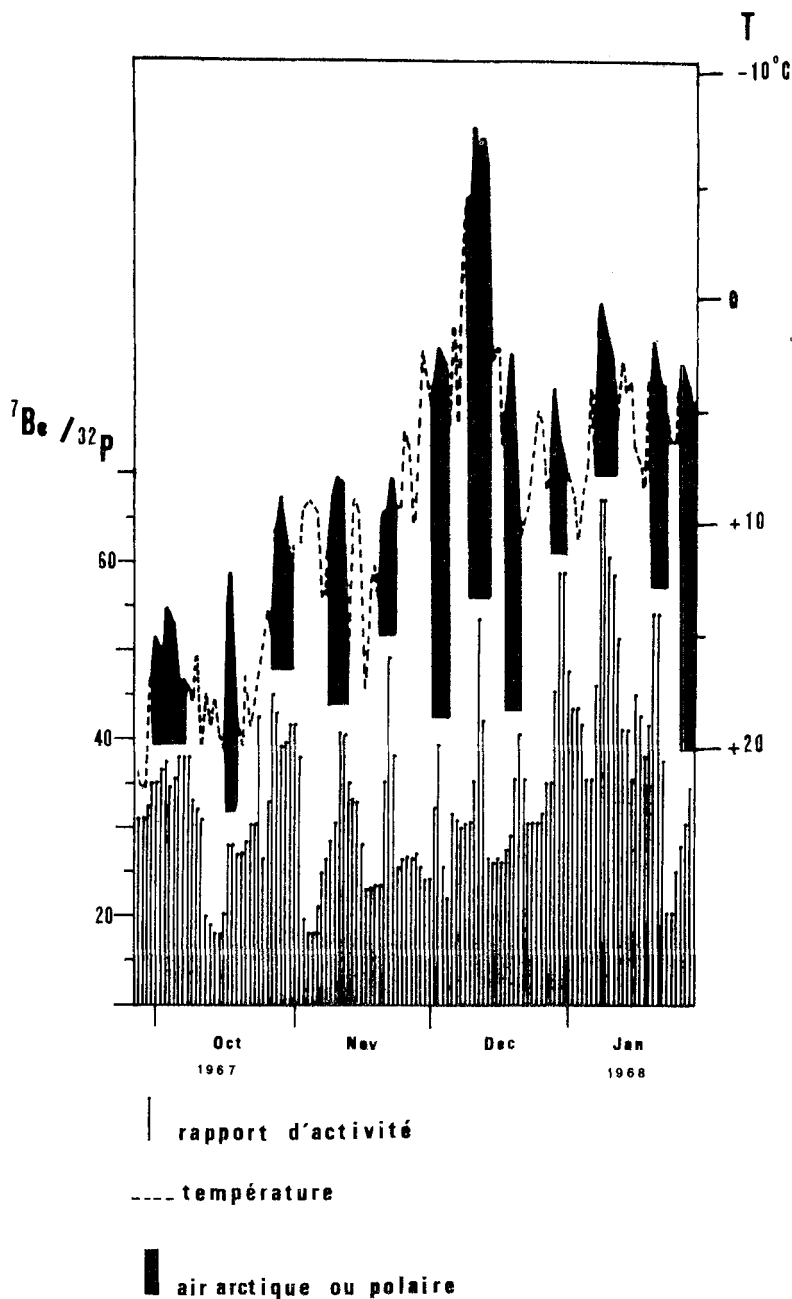


Fig. 5. Variation du rapport d'activité $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$, mesuré dans l'air au niveau du sol à Toulouse, comparée à la présence de masses d'air arctiques ou polaires (portées sur la courbe de variation de température).

lières, les valeurs augmentant en moyenne au fur et à mesure jusqu'en janvier 1968. Nous avons porté également la courbe des tempé-

tures journalières à Toulouse (en négatif), en indiquant (zones ombrées) les périodes de passage des masses d'air arctiques ou polaires

(données par une analyse de la nature et de l'origine des masses d'air arrivant à Toulouse). On constate une très bonne correspondance entre les fortes valeurs du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ et la présence de ces masses d'air. Il est possible de donner une interprétation de ces variations, grâce aux études précédentes. Les masses d'air arctiques (ou polaires) sont à l'origine très stables (faibles Kz), ce qui peut permettre au rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ d'atteindre, à la suite de phénomènes tels que des subsidences, des valeurs élevées, supérieures à celles existant dans l'air plus mélangé des latitudes inférieures. Les échanges avec l'air des latitudes moyennes s'effectuent de manière discontinue à travers le front polaire (perturbations). Chaque arrivée d'air arctique (ou polaire) à Toulouse correspond ainsi à un échantillonnage relativement récent (plus ou moins évolué) de la masse d'air arctique. Il est donc logique d'observer une bonne correspondance entre ces masses d'air et les valeurs élevées du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$. La montée progressive de ces fortes valeurs fait d'ailleurs penser à l'évolution caractéristique, en fonction du temps, de ce rapport dans la masse d'air arctique stable, après des phénomènes tels que des subsidences.

Des exemples analogues de variation se répètent à plusieurs reprises au cours de nos mesures (entre 1966 et 1969) et on observe alors une très bonne corrélation entre le rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ et les masses d'air arctiques ou polaires. En dehors de ces périodes on ne retrouve pas de telle variation. Les études sur modèles en régime stationnaire montrent d'ailleurs que le rapport moyen ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ n'évolue pas beaucoup avec la latitude, car l'influence des lessivages importants (diminution du ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$) aux faibles latitudes est compensée par la hauteur élevée de la tropopause (augmentation du ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$), les choses

étant inversées aux fortes latitudes. La correspondance, existant à certaines périodes seulement entre les valeurs élevées du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ et les masses d'air arctiques (ou polaires), explique donc que, lorsqu'on considère l'ensemble des résultats, on obtienne une corrélation entre le rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ et ces masses d'air, celle-ci étant cependant bien moins élevée que dans les exemples précédents. Il semble donc finalement que l'air arctique ne présente pas, en temps normal, de rapports ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ très différents de ceux des autres latitudes, mais que les conditions de stabilité qui y règnent permettent, en certaines occasions, à ce rapport d'atteindre des valeurs bien plus élevées qu'ailleurs.

Lorsque l'on fait le point sur l'utilisation du rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$, on constate qu'il n'est guère applicable aux études initialement prévues. Nous avons en effet montré que les descentes d'air stratosphérique dans la troposphère n'apportent pas, au niveau du sol, de contribution importante en ${}^7\text{Be}$ et ${}^{32}\text{P}$ (Marenco & Fontan, 1974). Nous avons également signalé que le rapport ${}^7\text{Be}/{}^{32}\text{P}$ se prêtait mal à la détermination de temps de séjour troposphériques, étant donné les erreurs engendrées par la désintégration plus rapide du ${}^{32}\text{P}$ (Marenco & Fontan, 1972). Il semble par contre que ce rapport dépende de manière importante des phénomènes de stabilité et de déplacements verticaux se produisant dans la troposphère.

Remerciements

Nous remercions Monsieur A. Cachon (Chargé de recherches au CNRS), de l'Observatoire du Pic du Midi, pour ses conseils compétents et ses fructueuses critiques sur les questions de rayonnements cosmiques.

REFERENCES

- Aegerter, S., Bhandari, N., Rama & Tamhane, A. S. 1966. ${}^7\text{Be}$ and ${}^{32}\text{P}$ in ground level air. *Tellus* 18, 212.
- Benioff, P. A. 1956. Cosmic-ray production rate and mean removal time of Be-7 from the atmosphere. *Phys. Rev.* 104, 1122.
- Bhandari, N., Lal, D. & Rama 1970. Vertical structure of troposphere as revealed by radioactive tracer studies. *J. Geophys. Res.* 75, 2974.
- Hartwig, S. & Sittkus, A. 1972. Determination of atmospheric diffusion by measurements of the concentration of spallation products. *Z. Naturforsch.* 27a, 1413.
- Lacombe, J. P. 1968. Contribution à l'étude de la radioactivité des précipitations. Thèse de spécialité, Faculté des Sciences de Toulouse.
- Lal, D., Malhotra, P. K. & Peters, B. 1958. On the production of radioisotopes in the atmosphere by cosmic radiation and their application to meteorology. *J. Atmos. Terr. Phys.* 12, 306.
- Lal, D., Arnold, J. R. & Honda, M. 1960. Cosmic-ray production rates of ${}^7\text{Be}$ in oxygen, and ${}^{32}\text{P}$,

- ^{33}P , ^{35}S in argon at mountain altitudes. *Phys. Rev.* 118, 1626.
- Lal, D., Rama & Zutshi, P. K. 1960. Radioisotopes ^{32}P , ^7Be and ^{35}S in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 65, 669.
- Luyanas, V. Y., Yasyulyonis, R. Y., Shopauskiene, D. A. & Styra, B. I. 1970. Cosmogenic ^{22}Na , ^7Be , ^{32}P and ^{33}P in atmospheric dynamics research. *J. Geophys. Res.* 75, 3665.
- Marenco, A., Blanc, D., Fontan, J., Lacombe, J. P. & Crozat, G. 1968. Dosage par analyse chimique des traces de Be-7, P-32, Sr-90, Pb-210 et Po-210 présentes dans l'air et dans les précipitations. *Chimie Analytique* 50, 133.
- Marenco, A. & Fontan, J. 1972. Etude par simulation sur modèles numériques du temps de séjour des aérosols dans la troposphère. *Tellus* 24, 429.
- Marenco, A. & Fontan, J. 1974. Etude des variations des ^7Be , ^{32}P , ^{90}Sr , ^{210}Pb et ^{210}Po dans la troposphère. *Tellus* 26, 386.
- Meyer, P. & Simpson, J. A. 1955. Changes in the low-energy particle cutoff and primary spectrum of cosmic radiation. *Phys. Rev.* 99, 1517.
- Peters, B. 1959. Cosmic-ray produced radioactive isotopes as tracers for studying large-scale atmospheric circulation. *J. Atmos. Terr. Phys.* 13, 351.
- Rama, 1960. Investigations of the radioisotopes ^7Be , ^{32}P and ^{35}S in rain water. *J. Geophys. Res.* 65, 3773.
- Rama & Honda, M. 1961. Natural radioactivity in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 66, 3227.
- Rama, 1963. Atmospheric circulation from observations of natural radioactivity. *J. Geophys. Res.* 68, 3861.
- Reiter, R., Sladkovic, R., Pötl, K., Carnuth, W. & Kanter, H. J. 1970. Measurement of airborne radioactivity and its meteorological application. Annual report (April 1969–March 1970). USAEC, NYO-4061-2.
- Rochester, G. D. 1962. Cosmic-rays and meteorology. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 88, 369.
- Simpson, J. A. 1951. Neutrons produced in the atmosphere by the cosmic radiations. *Phys. Rev.* 83, 1175.
- Soberman, R. K. 1956. High-altitude cosmic-ray neutron intensity variations. *Phys. Rev.* 102, 1399.
- Walton, A. & Fried, R. E. 1962. The deposition of Be-7 and P-32 in precipitation at north temperate latitudes. *J. Geophys. Res.* 67, 5335.

К ПРОИЗВОДСТВУ В ВОЗДУХЕ ^7Be И ^{32}P ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ АКТИВНОСТИ

Изучение величин отношения активности $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$, измеренных в течение нескольких лет с помощью короткопериодных проб, показывает, что эффективность образования в атмосфере ^{32}P космическими лучами до сих пор, весьма вероятно, недооценивалась и что для отношения количеств образующихся

^7Be и ^{32}P следует использовать исправленную величину, равную 37. Более того, теоретические результаты, полученные на моделях, и экспериментальные данные, полученные в Тулузе, указывают на важную роль вертикальных движений воздуха на вариации отношения $^7\text{Be}/^{32}\text{P}$ в тропосфере.