EFFETS DES POUSSIÈRES SUR LA PHOTOSYNTÈSE

I. — EFFETS DES POUSSIÈRES DE CIMENT ET DE CHARBON SUR LA PHOTOSYNTÈSE DE L'ÉPICÉA

D. AUCLAIR

*Station de Recherches sur la forêt et l'environnement,
Centre de Recherches forestières d'Orléans, I. N. R. A.,
Ardon 45160 Olivet*

RÉSUMÉ

Des mesures de la photosynthèse ont été effectuées en enceinte contrôlée (SIEMENS) sur des Epicéas, dans les conditions suivantes : plants témoins, plants empoussiérés manuellement à l'aide de ciment, plants empoussiérés au charbon, afin d'étudier les effets éventuels de dépôts solides sur la croissance des forêts devant jouer un rôle de « filtres ».

Le modèle schématique $P = r + \frac{\alpha \cdot E \cdot P_{\infty}}{\alpha \cdot E + P_{\infty}}$ a été utilisé pour l'interprétation des résultats, à l'aide d'une étude statistique d'ajustement non linéaire.

Les résultats ne montrent pas, dans les conditions de l'expérience, d'effet physique de l'empoussièrément sur la photosynthèse aux éclaircissements élevés (supérieurs à $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Par contre, à des intensités lumineuses faibles et moyennes, la photosynthèse est réduite, ce qui peut entraîner sur le terrain une perte de croissance et de rendement. A long terme, on peut constater une certaine toxicité des poussières de charbon, provoquant une diminution de l'assimilation à tous les éclaircissements et même la mort de la plante.

INTRODUCTION

Les études sur les interactions entre la pollution atmosphérique et la végétation se multiplient depuis quelques années (DARLEY et MIDDLETON, 1966 ; WEBSTER, 1967), en raison de la prise de conscience des problèmes d'incompatibilité entre une crois-

sance industrielle en phase exponentielle et la conservation de la nature dans un équilibre entre l'homme, les animaux, les végétaux.

La végétation, et plus particulièrement la forêt, est souvent mise à contribution en tant que « filtre à nuisances ». En dehors de leur rôle, dont l'importance est controversée (WILLIAM, 1973 ; ROSS et PRINCE, 1972 ; BELOT *et al.*, 1974 ; KELLER, 1973), dans l'absorption des polluants et du bruit, la dispersion des poussières, des masses gazeuses, et des micro-organismes (MICHEL, 1975), les espaces verts représentent un facteur primordial dans l'équilibre psychologique de l'homme (LUGASSY, 1970). Mais pour pouvoir jouer ce rôle bénéfique, encore faut-il que ces « filtres » ne se dégradent pas sous l'effet de ces mêmes polluants.

De nombreuses usines rejettent des particules, très fréquemment de l'ordre de 2 à 3 tonnes par hectare et par an (RICKS et WILLIAMS, 1971 ; DARLEY, 1966), pouvant aller jusqu'à 50 tonnes/ha/an (un exemple aux États-Unis, ANDERSON, 1961). Ces rejets se trouvent transportés jusqu'à des distances parfois considérables (ENDERLEIN et STEIN, 1964), et se déposent sur la végétation, provoquant souvent des dégâts sérieux (KOVACS et KLINCSEK, 1974).

De nombreux chercheurs se sont penchés sur les problèmes des effets des poussières provenant d'usines diverses, sur plusieurs espèces végétales. Leurs résultats ont été rassemblés par DARLEY (1966) et plus récemment par AUCLAIR (1976 *a*).

Le présent travail fait partie d'une étude sur le « Rôle des Arbres et des Forêts dans la Protection contre les Pollutions ». Les études préliminaires de BARTOLI (1973) semblaient montrer une influence positive des poussières sur la croissance des arbres, sous certaines conditions « favorables ». Nous avons cherché ici à approfondir cette étude par des mesures de photosynthèse en chambre conditionnée sur des Épicéas soumis à un empoussièrément contrôlé.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Trente plants d'Épicéa (*Picea abies* L.) de deux ans, d'une même provenance (11 IS-BU) (Station d'Amélioration des Arbres forestiers d'Orléans, I.N.R.A.), ont été plantés en pépinière, et en mai 1974, séparés en trois lots identiques : un lot témoin, un lot empoussiéré avec des poussières de ciment, et un lot empoussiéré avec des poussières de charbon. L'empoussièrément est effectué en saupoudrant grossièrement chaque plant à la main, la quantité de poussière n'étant mesurée qu'en fin d'expérience. Trois semaines avant le début des mesures de photosynthèse en novembre 1974, les plants ont été mis en serre. En ce qui concerne les plants empoussiérés au charbon, sept sur dix étaient morts. Ils ont été remplacés, les trois autres conservés pour étude.

Les mesures de photosynthèse ont été effectuées en plaçant un rameau par plant dans une enceinte contrôlée (SIEMENS), décrite précédemment par DUVAL (1975). La température était maintenue constante à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, l'humidité à 71 p. 100 $\pm$ 3 p. 100, la vitesse de passage de l'air environ $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le débit de l'air est de $60 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ et le taux de renouvellement dans l'enceinte environ six renouvellements par heure. Les mesures de photosynthèse sont faites par analyse différentielle IR. La chambre est éclairée artificiellement par une lampe au mercure (MAZDA), placée à une distance variable, de manière à pouvoir faire varier l'éclairement. Nous avons effectué des mesures à cinq éclairagements, de manière à pouvoir étudier à la fois le palier de saturation lumineuse et le rendement lumineux.

La transpiration a également été déterminée, en mesurant l'augmentation d'humidité de l'air ambiant due à la présence du plant.

Les résultats sont rapportés à la masse de matière sèche foliaire : après la mesure, le rameau est lavé à l'eau, puis séché, et pesé avant et après dessiccation à l'étuve. L'eau de lavage est filtrée, le filtrat séché à l'étuve est pesé afin de déterminer l'empoussièrément.

Les résultats ont fait l'objet d'études statistiques à l'aide d'un programme d'ajustement non linéaire (ROUX et TOMASSONE, 1973-1974), se référant au modèle $P = \frac{bE}{1 + aE}$ (CHARTIER, 1966), que nous avons modifié en $P = r + \frac{\alpha \cdot E \cdot P_{\infty}}{\alpha \cdot E + P_{\infty}}$, afin de tenir compte de la respiration à l'obscurité et de mettre en évidence les facteurs α (rendement lumineux maximum) et P_{∞} (photosynthèse brute maximale à éclairciment infini).

RÉSULTATS

Les mesures de photosynthèse ayant été effectuées à cinq éclairciments, nous avons pu tracer la courbe de la photosynthèse en fonction de l'éclairciment. La figure 1 nous montre les courbes d'équation (1) : $P = r + \frac{\alpha \cdot E \cdot P_{\infty}}{\alpha \cdot E + P_{\infty}}$ pour les trois traitements différents.

FIG. 1. — Photosynthèse des plants témoins et empoussiérés au ciment ou au charbon (les deux courbes sont confondues), en fonction de l'éclairciment

- témoins
- △ empoussiérés au ciment
- ▽ empoussiérés au charbon

Photosynthesis of clean and dusted spruce trees (cement dust and coal dust have identical effects)

- clean
- △ cement-dusted
- ▽ coal-dusted

P représente la photosynthèse nette, exprimée en $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

E représente l'éclairement (énergie lumineuse incidente), exprimé en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

r représente la respiration à l'obscurité (en $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

Nous appellerons P_{max} la photosynthèse nette maximale à $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

— On obtient pour les plants témoins :

$$r = -1,8 \pm 1,7$$

$$\alpha = 0,169 \pm 0,136$$

$$P_{\infty} = 7,6 \pm 1,3$$

$$\text{D'où } P_{\text{max}} = 5,0 \pm 0,3$$

— Pour les plants empoussiérés au ciment :

$$r' = -1,1 \pm 0,9$$

$$\alpha' = 0,085 \pm 0,062$$

$$P'_{\infty} = 7,5 \pm 0,9$$

$$\text{D'où } P'_{\text{max}} = 5,1 \pm 0,4$$

— Pour les plants empoussiérés au charbon :

$$r'' = -0,7 \pm 1,2$$

$$\alpha'' = 0,076 \pm 0,060$$

$$P''_{\infty} = 7,1 \pm 0,9$$

$$\text{D'où } P''_{\text{max}} = 5,1 \pm 0,5$$

Les valeurs de r , α , P_{∞} et P_{max} sont données avec leur intervalle de confiance à 5 p. 100. On obtient une différence significative concernant les rendements lumineux aux faibles éclairagements incidents (α), entre d'une part les témoins, d'autre part les plants empoussiérés, que ce soit au ciment ou au charbon. Les paliers de saturation lumineuse P_{max} ne sont pas significativement différents, les valeurs de la respiration r non plus.

Il est intéressant de noter une différence, en ce qui concerne les plants empoussiérés au charbon : la figure 2 nous montre les courbes d'équation $P = r + \frac{\alpha \cdot E \cdot P_{\infty}}{\alpha \cdot E + P_{\infty}}$ d'une part pour les trois plants ayant survécu après cinq mois d'empoussièrment, d'autre part pour les plants remplaçant les sept autres.

On obtient les valeurs suivantes :

plants « survivants » :

$$r_1 = -0,9 \pm 1,4$$

$$\alpha_1 = 0,068 \pm 0,068$$

$$P_{\infty 1} = 6,7 \pm 1,1$$

$$\text{D'où } P_{\text{max} 1} = 4,5 \pm 0,5$$

plants « nouveaux » :

$$r_2 = -1,4 \pm 1,3$$

$$\alpha_2 = 0,111 \pm 0,078$$

$$P_{\infty 2} = 7,9 \pm 0,9$$

$$\text{D'où } P_{\text{max} 2} = 5,3 \pm 0,4$$

— Les résultats des mesures de transpiration ont été portés dans le tableau I. Après analyse statistique, on ne trouve aucune différence significative entre les traitements, les résultats étant très dispersés. Ceci est dû au manque de précision de la méthode (DUVAL, 1975).

TABLEAU I

Transpiration des plants, valeur moyenne pour chaque lot (en mg H₂O/g d'aiguilles/heure).

Aucune différence entre traitements n'est significative

Transpiration of young spruce shoots (mg H₂O/g dry weight/hour).

The differences are all statistically non-significant

Éclairement (W · m ⁻²)		24	39	107	182	394
Transpiration	Témoin	14,3	14,2	14,8	15,4	16,7
	Ciment	13,6	15,1	14,8	15,1	17,1
	Charbon	15,6	15,7	16,4	17,3	18,5

— Dans les trois traitements, les aiguilles avaient une teneur en eau d'environ 54 p. 100 par rapport à la masse d'aiguilles fraîches.

— L'empoussièrement moyen des plants était de 1 g de poussière par gramme d'aiguille en ce qui concerne le ciment, et de 0,25 g par gramme pour le charbon.

— Le pH du sol a été mesuré pour les trois traitements, on a obtenu les résultats suivants :

témoin : 5,5 ; ciment : 6,7 ; charbon : 5,3.

DISCUSSION

Les empoussièrelements des plants, tant au ciment qu'au charbon, ont été choisis arbitrairement, et les valeurs que nous avons obtenues sont les valeurs maximales que l'on rencontre dans la nature. D'après KELLER (1971), des pins peuvent retenir une masse de poussière trois fois plus grande que leur masse d'aiguilles, mais ce cas extrême n'est jamais rencontré, du fait du lessivage par la pluie, du vent, de la chute des feuilles. Les moyennes se situent vers quelques centigrammes par gramme d'aiguilles, pouvant aller jusqu'à plusieurs décigrammes par gramme, pour les conifères. (Les feuillus ont généralement des empoussièrelements supérieurs par unité de poids dans les mêmes conditions, présentant une surface plus grande par unité de poids).

Bien que ces empoussièrelements soient élevés, on ne constate pas d'effet significatif des poussières sur le palier de saturation lumineuse P_{max} . Ce palier est inversement proportionnel à la somme des résistances au transfert de CO₂ depuis l'air extérieur jusqu'au site de carboxylation à l'intérieur de la feuille (CHARTIER, 1966). Parmi ces résistances, la plus importante est la résistance stomatique, qui ne semble pas affectée par les poussières.

Ce résultat est à rapprocher de celui de GAUTHIER *et al.* (1974), qui ont mesuré par porométrie la transpiration foliaire sur des aiguilles de Pin empoussiérées ou non et n'ont pas trouvé de perturbation de la régulation stomatique par les poussières. D'après leurs photographies au microscope électronique à balayage des bâtonnets de cire cuticulaire empêcheraient les poussières de pénétrer dans la chambre sus-stomatique et donc d'interférer avec le mécanisme stomatique. Nous n'avons pas observé de différences significatives concernant la transpiration. Celle-ci est influencée par l'ouverture stomatique, mais également par la température. Une transpiration légèrement supérieure chez les plants empoussiérés au charbon peut être interprétée par une augmentation de la température foliaire due aux poussières noires.

Contrairement aux résultats trouvés pour les éclaircissements forts, on voit figure 1 que les plants empoussiérés par le charbon comme par le ciment ont un rendement lumineux (α), rapporté à la lumière incidente, plus faible que les témoins aux éclaircissements faibles.

Si l'on considère le modèle schématique $P(E)$ de la photosynthèse en fonction de l'éclairement, on peut poser pour des plants empoussiérés :

$$P'(E) = P(f(E)) \quad (2)$$

$f(E)$ traduit une modification, due à la poussière, de l'énergie lumineuse.

Le modèle le plus simple est le modèle linéaire :

$$f(E) = kE \quad k \text{ étant une constante.} \quad (3)$$

Reportant ceci dans l'équation (1) :

$$P(E) = r + \frac{\alpha \cdot E \cdot P_{\infty}}{\alpha \cdot E + P_{\infty}}, \quad P'(E) = r' + \frac{\alpha' \cdot E \cdot P'_{\infty}}{\alpha' \cdot E + P'_{\infty}}$$

On obtient :

$$P'(E) = r + \frac{\alpha \cdot k \cdot E \cdot P_{\infty}}{\alpha \cdot k \cdot E + P_{\infty}} \quad (4)$$

On obtient donc les valeurs suivantes :

$$r' = r; \quad \alpha' = k\alpha; \quad P'_{\infty} = P_{\infty}$$

Nous constatons effectivement que :

$$P_{\infty} = 7,7; \quad P'_{\infty} = 7,7; \quad P''_{\infty} = 7,6 \text{ sont très voisins.}$$

Ce modèle semble donc vérifié par nos données expérimentales, avec :

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = k' = 0,50$$

et :

$$\frac{\alpha''}{\alpha} = k'' = 0,45$$

Il semble donc que l'effet principal des poussières soit une diminution du rendement de captage et d'utilisation de la lumière incidente par les aiguilles, respectivement de 50 p. 100 et 45 p. 100 pour les poussières de ciment et de charbon.

Ce phénomène peut être dû à deux mécanismes différents :

— La couche de poussières se trouvant à la surface des aiguilles a pu jouer un rôle d'écran, absorbant de la lumière et n'en transmettant qu'une partie. Elle peut également avoir modifié les propriétés optiques des aiguilles. Ceci ne peut être constaté qu'aux éclairiments faibles, le point de saturation étant atteint aux éclairiments élevés.

— Les poussières ont pu avoir un effet chimique, dû aux éléments toxiques qu'elles peuvent contenir. Pendant plusieurs mois, ces éléments toxiques ont pu pénétrer dans la feuille et détériorer les éléments qui transforment l'énergie lumineuse en pouvoir réducteur et en énergie utilisable par la plante : chlorophylles, cytochromes, ferrédoxine, etc.

La figure 2 nous montre l'effet à long terme des poussières de charbon : les plants empoussiérés depuis plusieurs mois (« *survivants* ») ont un palier de saturation lumineuse inférieur à celui des plants qui n'ont subi l'empoussièrément que durant trois semaines (« *nouveaux* »). Ils ont également un rendement lumineux (α) plus faible, bien que cette différence ne soit pas significative. Les poussières de charbon ont donc une toxicité globale sur tous les mécanismes de la plante. Ceci s'est d'ailleurs traduit par la mort de la plupart des plants empoussiérés au charbon pendant six mois.

FIG. 2. — Photosynthèse des plants empoussiérés au charbon

- plants nouvellement empoussiérés
- △ plants survivants (voir explications dans le texte)
- Photosynthesis of coal-dusted spruce
- freshly dusted trees
- △ trees surviving after six months (see text for explanations).

Nous avons remarqué une prolifération de pucerons sur les plants empoussiérés au ciment, après leur installation en serre. Les autres plants étaient indemnes. Une observation identique a été effectuée par DARLEY (1966) à proximité d'une usine de ciment en Californie. Celui-ci interpréta la mauvaise croissance des plants de la manière suivante : le premier effet des poussières serait d'éliminer certains prédateurs de pucerons, permettant aux populations de pucerons de se développer et causant donc un affaiblissement de la plante elle-même. Dans notre expérience, ceci ne semble pas en être la cause, puisque les poussières de charbon et celles de ciment ont un effet identique sur la photosynthèse, mais pas sur les pucerons. D'autre part, les prédateurs de pucerons sont rares en serre et ne se trouvent pas plus sur les témoins que sur les plants empoussiérés. Dans notre cas particulier, il est possible que, les poussières modifiant par les impuretés qu'elles contiennent la composition chimique de certains constituants de la plante (acides aminés, sucres), les pucerons soient plus attirés par ces nouveaux composants.

CONCLUSION

Nos résultats montrent, contrairement aux premiers essais effectués dans ce domaine par BARTOLI (1973), que les poussières étudiées, que ce soit des poussières grises (ciment) ou noires (charbon), ont un effet négatif sur la photosynthèse de l'Épicéa. Dans les expériences préliminaires, les mesures n'avaient été effectuées que sur un individu et à un éclaircissement. Ici, sur trente individus, on obtient des résultats statistiquement significatifs : à saturation lumineuse, la photosynthèse n'est pas inhibée, sauf dans le cas du charbon qui a un effet toxique à long terme, mais en dessous de $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, elle est réduite par les poussières. Ceci peut se répercuter à long terme sur la croissance, puisque les éclaircissements sont souvent inférieurs à cette valeur par temps couvert, le matin et le soir, ou sous couvert forestier plus ou moins dense.

Nos mesures n'ont qu'une application ponctuelle et ne sont pas généralisables à toutes les poussières provenant des diverses industries. Il s'agit ici de poussières de ciment et de charbon, ayant des effets chimiques à long terme. D'autre part, les empoussièrtements étudiés étaient relativement élevés. Dans un deuxième temps, nous avons étudié les effets physiques directs des poussières sur la photosynthèse (AUCLAIR, 1976 *b*), contrôlant mieux l'empoussièrtement et éliminant l'effet chimique qui est intervenu dans le présent travail.

Reçu pour publication en avril 1976.

SUMMARY

EFFECTS OF DUST ON PHOTOSYNTHESIS

I. — EFFECTS OF CEMENT AND COAL DUST ON PHOTOSYNTHESIS OF SPRUCE

The purpose of this research was to study the possible effects of particulate matter on the growth of forests which are used as « *dust filters* ». Photosynthesis of spruce was studied in a controlled gas-exchange chamber (SIEMENS), using the IRGA method. Measurements were made

on clean reference trees (2 years old), on trees hand-dusted with cement, and others hand-dusted with coal dust.

The schematic model $P = r + \frac{\alpha \cdot E \cdot P_{\infty}}{\alpha \cdot E + P_{\infty}}$ was used for the interpretation of the results, with a non-linear adjustment statistical study.

The results show no physical effect, in the present experimental conditions, of the dusts on photosynthesis at high levels of light (higher than $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). On the other hand, for low and medium energies, photosynthesis is reduced. This may cause decreasing growth and yield. Concerning long-term effects, the coal dust is relatively toxic, as it reduces photosynthesis whatever the conditions of light, and can even cause the death of the plant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON D. M., 1961. *Pure Air for Pennsylvania*, Pennsylvania. Dept. of Health and U. S. Public Health Service, 136 p.
- AUCLAIR D., 1976 a. *Effets des particules sur la Végétation*, in *Pollution par les Particules émises dans l'Atmosphère*, Monographies scientifiques, série Environnement, la Documentation française, Paris.
- AUCLAIR D., 1976 b. *Effets des poussières sur la photosynthèse. II. Influence des Polluants particuliers sur la Photosynthèse du Pin sylvestre et du Peuplier*. *Ann. Sci. forest.*, **34**, (1).
- BARTOLI M., 1973. *Rôle des Arbres et des Forêts dans la Protection contre les Pollutions*, 2^e partie : *Expériences préliminaires à l'étude de l'influence des poussières de centrale thermique sur la production ligneuse*. Publication interne, C.N.R.F., Station de Sylviculture et de Production, Unité de recherche Forêt-Environnement. Doc. 73/2. 6 p.
- BELOT Y., BAILLE A., DELMAS J.-L., 1974. *Modèle numérique de Dispersion des Polluants atmosphériques en présence de Couverts végétaux*. Application aux couverts forestiers, Publication interne, C.E.A., Département de Protection, Laboratoire des Transferts atmosphériques. 25 p.
- CHARTIER P., 1966. *Étude théorique de l'Assimilation brute de la Feuille*. *Ann. Physiol. vég.*, **8** (3), 167-195.
- DARLEY E. F., 1966. *Studies on the Effect of Cement-kiln Dust on Vegetation*, *Journal A.P.C.A.*, **16** (3), 145-150.
- DARLEY E. F., MIDDLETON J. T., 1966. *Problems of Air Pollution in Plant Pathology*. *Ann. Rev. Phytopathology*, **4**, 103-118.
- DUVAL Y., 1975. Influence de la température et de l'humidité relative de l'air sur la photosynthèse du peuplier. D.E.A. *Applications en physiologie végétale*. Université Paris-Sud, Centre d'Orsay. 13 p.
- ENDERLEIN H., STEIN G., 1964. *Der Säurezustand der Humusaufage in den rauchgeschädigten Kiefernbeständen des staatlichen Forstwirtschaftsbetriebes Dübener Heide*. *Arch. Forstwes.*, **13**, 1181-1191.
- GAUTHIER D., GARREC J.-P., BELOT Y., FOURCY A., 1974. *Effets mécaniques des Dépôts de Pous-sières sur les échanges gazeux de Pinus sylvestris L.*, Publication interne, C.E.A., Département de Protection, Laboratoire des Transferts atmosphériques. 9 p.
- KELLER T., 1971. *Wälder, Parkbäume -und Luftverunreinigungen*, Die Schweizer Gemeinde, **8** (32).
- KELLER T., 1973. *Enge Wechselbeziehungen zwischen Wald und Luft*, Gewässerschutz-Lufthygiene, **97**.
- KOVACS M., KLINCSEK P., 1974. *Effect of Cement-dust on Street Trees*. *Bot. Köz.*, **61** (1), 71-76.
- LUGASSY F., 1970. *Contribution à une psychosociologie de l'espace urbain. La relation Habitat-Forêt : significations et fonctions des espaces boisés*. Publications de Recherches urbaines. Ministère de l'Équipement et du Logement.
- MICHEL M. F., 1975. *Les Phytoncides, Étude bibliographique*, Publication interne, C.R.F. Orléans, Station de Recherches sur la Forêt et l'Environnement, 35 p. Doc. 75/11.
- RICKS G. R., WILLIAMS R. J. H., 1974. *Effects of Atmospheric Pollution on Deciduous Woodland*, Part 2 : *Effects of Particulate Matter upon Stomatal Diffusion Resistance in leaves of Quercus petraea* (MATTUSCHKA) LEIBL. *Environ. Pollut.*, **6**, 87-109.
- ROSS F. F., PRINCE R., 1972. *Sulphur in air and soil*, Water, Air, Soil Pollut., **1**, 286-302.
- ROUX C., TOMASSONE R., 1973-74. *Moindres carrés non linéaires* HAUS 59, Publication interne I.N.R.A., laboratoire de Biométrie du C.N.R.Z., Documents 73/20 et 74/04. 47 p.
- WEBSTER C.C., 1967. *The effects of air pollution on plants and soil*, London, Agricultural Research Council, 53 p.
- WILLIAM A., 1973. (Présenté par HEINEMANN P.). *Fixation des Poussières atmosphériques par les Végétaux*. *Annales de Gembloux*, **79**, 11-24.