

# *Utilisation rationnelle et protection des cycles biogéochimiques des sols* <sup>(1)</sup>

par G. AUBERT <sup>(2)</sup>

Le *Sol* envisagé dans son entièreté est le résultat des réactions qui se produisent au cours des temps entre les agents climatiques, les agents biotiques et le matériau roche dans un site, topographique et de paysage. Nous l'envisageons depuis la roche ferme peu altérée jusqu'à sa surface au contact de l'atmosphère. Normalement le sol est constitué d'éléments meubles mais agrégés.

Il est, tout au long de son évolution, le lieu d'échanges d'énergie, de mouvements et de cycles de matières minérales et organiques.

Depuis le début de sa formation et jusqu'à son âge le plus avancé, parfois le plus sénile, il passe par des stades successifs, dépendant chacun des précédents et variant en fonction de l'état, à tout instant, de chaque facteur de formation, dont les variations possibles sont dues soit à des changements de conditions pour des raisons extérieures au sol, soit à l'évolution même de ce sol.

(1) Ce document n'est pas présenté comme une "Communication" mais comme un élément de réflexion qui doit pouvoir aider aux discussions consacrées à ce sujet lors du colloque d'Orléans.

(2) Office de la Recherche scientifique et Technique d'Outre-Mer 24 rue Bayard, 75008 Paris (France).

## I – Cycles et mouvements de matières dans le sol

Les constituants minéraux des sols se transforment, à partir de leur état originel, en un état nouveau le plus souvent très différent du premier. Cet ensemble de modifications peut être considéré – quoique le terme ne soit pas parfaitement adapté à ce cas – comme un premier cycle, le “*cycle géochimique*”.

Une partie des éléments ainsi plus ou moins libérés, et souvent après avoir subi des *mouvements* parfois prolongés, est reprise par les êtres vivants du sol ou qui le couvrent et y pénètrent – végétation en particulier – pour lui être ensuite retournée, mais en surface ou à faible profondeur, lors de la décomposition des résidus organiques. C'est le *cycle biogéochimique* d'évolution des sols.

Ces trois ensembles de processus sont étroitement liés, moins cependant dans les sols ferrallitiques très profonds des régions intertropicales humides que dans ceux, moins profonds, des régions tempérées comme les sols brunifiés et surtout les rendzines.

### A – Cycle géochimique

1) *L'origine des constituants* minéraux du sol est, d'abord, dans la grande majorité des cas, ceux qui forment la roche sous-jacente souvent déjà transformés, au moins certains, par rétrodiagenèse.

Les *produits de leur décomposition* sous l'action des facteurs climatiques, et, souvent, biotiques, sont, en de nombreux cas enrichis par apports éoliens ou par l'effet de remaniements à plus ou moins faible distance, de colluvionnements lentement prolongés, ou de ruissellement.

L'hydrolyse des minéraux libère certains des éléments sous des formes solubles ou facilement entraînaibles, en sépare d'autres, stables dans les conditions du milieu, et permet la formation par transformation et surtout néosynthèse de nouveaux minéraux, en particulier d'argiles ou d'hydroxydes de fer, d'aluminium, etc. dont le rôle dans la dynamique et l'évolution du sol est considérable.

Tous ces éléments du matériau originel sont transformés en *agrégats de sol* par des liaisons réalisées en fonction des conditions physico-chimiques mais aussi au cours de phénomènes où les êtres vivants du sol prennent une part essentielle. S'ils se déroulent à faible profondeur il est assez facile de les comprendre ; à 10 ou 12 m comme en sol ferrallitique cela est plus mal aisé.

2) L'utilisation possible par l'homme des produits résultant de ce premier ensemble de phénomènes dépend largement de leur nature, nature des éléments résiduels, nature des éléments de transformation ou de

néoformation, nature et devenir des éléments entraînaibles. Tout cela est fonction des *caractères de la roche*, mais, plus encore, des *conditions écologiques* et de *drainage* ou *confinement* du lieu.

a) En milieu *confiné* ou mal drainant, ou en conditions écologiques de faible percolation, les processus d'hydrolyses conduisent par néosynthèse ou aggradation, sur place ou en position de confinement maximum à une concentration d'argile du type des smectites et à l'accumulation d'éléments solubles (chlorures, sulfates, carbonates de sodium, magnésium ou calcium) en surface ou à faible profondeur (quelques centimètres).

b) En milieu *bien drainant* mais ne permettant, par suite des températures, ou des conditions de percolation (précipitations pluviales juste excédentaires), que des *hydrolyses limitées*, l'on observe une concentration d'argiles variées de type illite, chlorite, séricite, montmorillonite, parfois kaolinite héritée, et l'accumulation à faible profondeur de corps assez facilement solubles mais aisément précipitables tels que le carbonate de calcium.

Le sol, suivant les conditions écologiques exactes dans lesquelles il se développe, peut être de type isohumique (Chernozem, Castanozem, Brunizem) ou déjà de type fersiallitique.

c) En milieu *bien drainant* mais en condition *d'hydrolyse peu accentuée* (climat boréal ou tempéré froid, ou en milieu de faible activité microbienne) les transformations sont dues pour une large part, à l'action de *produits organiques*; l'argile dominante est la vermiculite, et les éléments entraînés le sont en profondeur sauf certains hydroxydes et complexes organo-métalliques.

d) En milieu normalement *drainant*, mais en conditions écologiques de *température élevée* mais de précipitations pluviales concentrées, la kaolinite devient dominante, accompagnée d'illite en quantité notable. Souvent les smectites ne sont pas absentes, concentrées à la base de profil ou à l'aval de la chaîne de sols.

e) En milieu *bien drainant* et en conditions écologiques permettant des *hydrolyses poussées* et un *entraînement rapide* des bases et de la silice, soit dès les premiers stades d'altération à la base du profil, soit tout au long de celui-ci, la désaturation du milieu peut être très prononcée – sauf en cas de recharge basique, principalement calcique, pour quelque raison – et les sesquioxydes métalliques (de fer, d'aluminium, etc.) deviennent essentiels, la kaolinite pouvant cependant être dominante, au moins dans certains cas.

3) La fourniture au sol des éléments entraînaibles ou stables indiqués ci-dessus se déroule sans arrêt à partir de la roche et du matériau originel dans la mesure où la température et le taux d'humidité du sol ainsi que la percolation de l'eau à travers ce matériau permettent aux divers phénomènes envisagés de se poursuivre. La masse ainsi transformée est, en

chaque lieu, à chaque instant, infiniment faible. Le *temps nécessaire* pour qu'elle devienne notable est extrêmement variable suivant les phénomènes et les corps en résultant.

Les données sur ce point, pourtant d'une réelle importance, sont très limitées.

Il est cependant reconnu en général par les pédologues que l'obtention d'encroûtements salins ou gypseux peut ne demander que quelques années à quelques décennies, sous un climat suffisamment aride ; l'obtention de vertisols à montmorillonite ne prend que quelques siècles de même que celle de podzols à vermiculite et hydroxydes libres ; celle de sols isohumiques (à accumulation de calcaire à leur base) nécessite plusieurs millénaires, de même que celle de certains sols ferrallitiques. Pour la plupart de ces derniers, il faut cependant plutôt des dizaines de millénaires. Pour les sols ferrallitiques, le temps diffère beaucoup, semble-t-il, suivant la nature de la roche mère et les conditions climatiques elles-mêmes : de quelques millénaires sur les matériaux basaltiques des îlots du Pacifique à 20 à 200 000 ans pour la transformation totale d'un mètre de granite dans les divers points de la Côte d'Ivoire forestière en fonction des pluies qu'ils reçoivent.

### *B – Le cycle biogéochimique*

1) Sur le sol et dans le sol se développent des *êtres vivants* qui, chaque année, déposent, en lui ou sur lui, des *résidus organiques* qui en forêt tempérée sont de 2 à 4 tonnes par hectare.

Ceux dus à la grande forêt vierge correspondent à 12 à 15 tonnes de matière sèche, par hectare et par an, contenant par exemple 100 à 180 kg de Ca et 15 à 40 kg de K. D'après des travaux récents ces valeurs représentent jusqu'à 1/3 ou 1/5 des mêmes éléments sous formes échangeables dans les sols ferrallitiques considérés.

Une autre partie non négligeable des éléments minéraux du sol, intégrés dans ce cycle est contenue dans la faune et peut-être plus ou moins rapidement rendue au sol.

En n'envisageant que le rôle joué par la végétation, ce cycle biogéochimique apparaît comme relativement simple, au moins schématiquement : prise des éléments minéraux – tels que CaO, K<sub>2</sub>O, etc. – dans le sol par le système racinaire... transmission de ces éléments dans les organes actifs des végétaux... intégration dans la matière vivante... retombée sur le sol dans les débris organiques qui s'y décomposent... plus ou moins rapidement et complètement... libération, lors de ces processus, de ces éléments dont une partie est directement réintégrée dans les êtres vivants du sol, une autre adsorbée par le complexe argilo-humique ; une autre enfin, dissoute dans la solution du sol, est réentraînée jusqu'au niveau où le

système racinaire est le plus actif ou même plus profondément ; cette dernière fraction peut, dans l'eau qui percole, passer jusqu'à la nappe phréatique et sortir du sol et de l'unité biogéodynamique superficielle toute entière.

2) En *climat tempéré* les quelques tonnes de résidus organiques annuels se décomposent plus ou moins lentement suivant leur nature (20 à 40 p. cent environ par an). Les composés humifiés fournis alors, en faible proportion (2 à 8 p. cent, habituellement, sur 20 cm, sans considérer l'humus brut, s'il y en a ; parfois un peu plus) se minéralisent eux-mêmes dans la proportion de 1,5 à 2 p. cent chaque année ; les quantités d'éléments minéraux libérés au cours de ces processus ne représentent guère plus de 1/50 de la quantité des mêmes éléments se trouvant dans l'horizon humifère sous forme échangeable. Certains, tel le calcium, peuvent présenter une dynamique un peu plus complexe, étant susceptibles de s'y trouver aussi sous une forme masquée par la matière organique.

En *climat tropical suffisamment humide* ou de type équatorial, les phénomènes sont beaucoup plus poussés ; la décomposition des résidus végétaux peut atteindre 90 p. cent annuellement, et dans certaines conditions la minéralisation des produits humifiés 20 à 25 p. cent.

La masse d'éléments minéraux en voie de "circulation" devient alors beaucoup plus importante, de l'ordre de 150 à 200 kg par hectare et par an, et la proportion de chaque élément par rapport à ce qu'il s'en trouve sous forme échangeable dans l'horizon A, atteint 1/3 pour certains d'entre eux, comme indiqué ci-dessus. Cependant la lixiviation de ces éléments par l'eau qui percole en plus grande abondance peut devenir très forte. Aussi a-t-on souvent été amené à séparer dans les sols ferrallitiques les *typiques* ou *ochrosols* des régions pas trop humiques ( $P \leq 1600-1700$  m/m en Côte d'Ivoire) dont l'horizon humifère est plus riche en bases et présente un pH plus élevé que l'horizon sous-jacent et ceux qui, en régions plus pluvieuses, sont fortement *lixiviés* dès la surface – autrefois appelés *oxysols* – et possèdent un horizon superficiel  $A_1$  plus pauvre en bases et plus acide que l'horizon de concentration des sesquioxydes, sous-jacent.

## C

1) Un grand nombre des *substances libérées* dans l'un ou l'autre des deux cycles géochimiques ou bio-géochimique, décrites ci-dessus (bases, silice, argiles, hydroxydes de fer, de manganèse, d'alumine, produits organiques, etc.) peuvent être *entraînées par l'eau qui circule* dans le sol, soit en solution, soit en dispersion ou suspension, directement ou sous forme de complexes, chélates, etc. Les processus en jeu sont sous la dépendance des conditions non seulement écologiques du lieu, mais aussi

physiques, physico-chimiques du matériau : Eh, pH, perméabilité, présence de certains corps : types d'argile, de produits organiques, etc. . .

2) La *circulation des eaux* dans le sol peut suivre deux directions différentes :

- une circulation privilégiée, *verticale*, soit de haut en bas sous l'influence de la gravité, mais en fonction du type de porosité et des exigences du matériau vis-à-vis de l'eau, autant que de la répartition dans le temps des pluies et de leur vitesse de pénétration ; de bas en haut par effet de capillarité complété par l'action de la végétation :

- une circulation secondaire quoique, parfois, de grande importance, *oblique* et plus ou moins parallèle à la surface du site à celle des différences texturales qui peuvent exister dans le matériau, ou aux directions de plus forte porosité.

Dans l'horizon superficiel ce processus correspond à une *érosion préférentielle* en nappe, ou, le cas échéant, en nappe ravinante ; complétée par certaines actions des êtres vivants, de la faune en particulier il constitue une des formes d'*appauvrissement* de l'horizon superficiel, phénomène fréquent dans les sols des régions intertropicales.

En profondeur, ce processus provoque un *lessivage oblique* de l'argile ou des ions. Il est très développé dans les chaînes de sols, en particulier en pays tropical à pluviométrie concentrée, où l'amont est constitué de sols très lessivés comme "vidés", à horizons blanchis, et l'aval de sols "bourrés" souvent dominés par les smectites ou par l'accumulation des sels ou des ions sodium, magnésium, etc. . . Ce phénomène est lent, mais devient fondamental au cours des temps.

## D

Un dernier processus de circulation de ces substances est dû aux *remaniements* constitués de mouvements de matières à faible distance, latéralement par suite de déracinements d'arbres, de glissements lents de terrains, du matériau sur la roche, ou des horizons superficiels sur ceux de profondeur, ou dans des cas plus poussés à la suite du recul des versants ; de profondeur vers la surface, par action de la faune, vers, termites, etc. . .

Les méthodes récentes de marquage au  $^{14}\text{C}$  par exemple, ou de détermination des temps de rémanence ou renouvellement de la matière organique grâce aux variations de  $^{14}\text{C}$  de l'atmosphère à la suite des explosions nucléaires permettent de tenter la quantification de certains de ces phénomènes.

## II – Utilisation rationnelle des éléments résultant des cycles géochimiques des sols

Il est possible d'envisager deux aspects de ce problème, en fonction de la nature des éléments concernés et du processus d'utilisation retenu.

Dans un premier cas il s'agit de l'utilisation directe d'éléments intéressants pour l'industrie ou les constructions, accumulés soit sur place comme résidus des cycles étudiés précédemment ou comme résultat des réactions qu'ils comportent, soit après transport d'un point à un autre, le plus souvent sous l'action de l'eau, celle des nappes phréatiques ou celle des solutions des sols. Ce sont par exemple les sables et graviers, les argiles, telles, particulièrement, les mectites, les croûtes salines, gypseuses, calcaires, les cuirasses ou indurations de fer, d'aluminium, de manganèse, de nickel, etc. . . Ces éléments ou bien ne peuvent être recyclés et l'homme ne doit les utiliser qu'en fonction des réserves qu'il en connaît, ou bien ont déjà fait l'objet de discussions dans les séances précédentes. Le second aspect, que nous envisageons ici, est celui de l'utilisation de ces éléments par l'intermédiaire de la végétation. Il s'agit alors de conserver les caractères, tant physiques que chimiques ou biologiques de fertilité des sols.

### A – Cycles géochimiques

L'action de l'homme sur ces processus est toujours très limitée, surtout lorsque le sol est très profond et que l'essentiel des réactions d'altération se produit au niveau de la roche elle-même comme en certains sols ferrallitiques. Il faut cependant remarquer que dans les sols de ces régions tropicales humides ou équatoriales les minéraux non encore complètement altérés dans les horizons supérieurs y subissent des hydrolyses à des vitesses et intensités suffisantes pour que les produits ainsi libérés puissent être aussitôt utilisés par la végétation et aider à assurer la nutrition minérale des cultures. Ce fut montré par exemple dans le cas de l'alimentation potassique des cacaoyères du Nord-Gabon.

En pays de climat tempéré ces réactions sont plus lentes. Cependant, les gros *défoncements* réalisés à certaines périodes par les cultivateurs (1 fois tous les cinquante ans lors des replantations de vignes sur sols Bruns faiblement lessivés acides sur schistes, des côteaux du Layon dans l'Ouest de la France) n'interviennent pas seulement sur l'approfondissement du sol

lutte contre l'érosion -, sur son ameublissement- cycle biogéochimique mais aussi sur sa recharge en éléments altérables. Localement aussi autrefois, l'habitude était, comme en Basse Normandie, d'apporter sur les sols très acides sableux des roches plus basiques, partiellement altérées, broyées. L'emploi des engrais, maintenant, est plus simple et plus économique.

### B – Cycle biogéochimique

Sur ce cycle l'action de l'homme est considérable, à la fois en remplaçant la végétation naturelle par ses cultures et en appliquant ses techniques culturales. Les résultats de cette influence de l'homme varient suivant ses actions elles-mêmes, ses cultures et les conditions écologiques du lieu. Un certain nombre de points doivent, cependant, être soulignés.

1) *En pays tempéré*, l'homme en remplaçant la vieille forêt par ses cultures en rotation, en réalisant tous les 4, 5 ou 10 ans des labours profonds, en appliquant en tête d'assolement ou à certaines cultures des apports massifs de fumier et, plus récemment, en compensant, et même au-delà, par des engrais, les exportations minérales de ses récoltes, est arrivé au long des siècles à *améliorer la fertilité de ses sols*. Des exemples en ont été étudiés sur les sols Bruns lessivés sur limon de la région parisienne comme en de nombreux autres points de beaucoup de pays. Le profil est partiellement homogénéisé, la structure améliorée, la porosité accrue, l'acidité diminuée, et la richesse chimique, surtout en bases échangeables, augmentée.

Il faut cependant reconnaître que les résultats ne sont pas toujours aussi favorables. L'utilisation irrationnelle ou *excessive d'engrais* non équilibrés peut provoquer soit une baisse des rendements (déséquilibre N – P, Mg – K ou carence induite en éléments traces etc.) soit même une dégradation du sol par acidification (excès d'engrais ammoniacaux) ou dégradation de la structure (engrais trop riches en Na) soit enfin une modification de l'un au moins – souvent celui situé le plus en aval – des membres de l'unité biogéodynamique (eutrophisation des lacs). Les exemples en sont nombreux.

L'utilisation, à quelque fin que ce soit, de certains *produits chimiques* (anticyptogamiques ou autres. . .) susceptibles au moins pour une part, de retourner au sol directement – lors de pulvérisations, poudrages, etc – ou indirectement – avec les résidus organiques des cultures –, peut provoquer, par accumulation de faibles doses successives d'éléments ni biodégradables ni facilement entraînés par les eaux, un phénomène d'intoxication.

Un autre cas est enfin celui de la *culture de générations successives d'espèces* – le plus souvent arborées – dont les excréments racinaires ou les résidus sont directement ou indirectement nuisibles aux sols ; reboisements trop répétés en certains conifères tels que les pins, par exemple.

2) a) *En pays tropical humide* les phénomènes sont de même type mais plus rapides ; les dangers courus lors de la mise en culture sont plus graves et les *conséquences peuvent en être plus dramatiques*.

Les raisons en sont nombreuses :

l'une des méthodes de destructions de la végétation naturelle, très souvent utilisée, la *mise à feu de la brousse*, est trop brutale et peut



provoquer des désastres par disparition de la protection contre l'érosion, destruction de la matière organique et de son matériau d'origine, gâchés de la richesse minérale du sol ;

- la mise en *contact du sol avec l'atmosphère*, en région à saison sèche suffisamment accentuée et prolongée provoque une dégradation de la structure du premier (passage de la structure très friable du sol ferrallitique à celle, très massive, du sol ferrugineux tropical) et parfois son induration s'il est très riche en sesquioxydes métalliques, de fer en particulier ;

- les conditions de température du sol permettent, lorsqu'il n'est pas trop sec, une *décomposition rapide de sa matière organique* favorisant ainsi la dégradation de sa structure, la diminution de son complexe absorbant, un accroissement de son acidité et parfois un enrichissement en éléments toxiques tels que Mn soluble ;

- la *moindre efficacité habituelle du système racinaire* des cultures par rapport à celui de la grande forêt tropicale ou équatoriale, permet une lixiviation beaucoup plus poussée de certains éléments par l'eau qui percole. Les quantités de K, Ca, Mg, etc. ainsi perdues et qu'il faut compenser par les engrais sont bien plus fortes que celles exportées dans les récoltes elles-mêmes.

b) Il reste cependant *possible d'utiliser rationnellement ces sols*, sans les dégrader et diminuer leur fertilité. Les règles en sont les suivantes :

- remplacement de la forêt naturelle par une "*forêt*" *cultivée* d'arbres de rapport ou de cacaoyers, caféiers, hévéas, palmiers à huile, cocotiers, etc. ;

- *intensification de la culture*, avec couverture quasi permanente du sol, utilisation d'espèces à enracinement rapide et profond, apport d'engrais suffisants et équilibrés, maintien des cultures en développement aussi poussé que possible ;

- introduction, au moins dans de nombreux cas, de prairies temporaires à profond enracinement, dans le cadre d'une *association agriculture - élevage*.

### III - Défense contre l'érosion

Pour que les cycles géochimique et biogéochimique du sol puissent se poursuivre et que les éléments en résultant puissent être utilisés rationnellement par l'homme, il est nécessaire que le sol se maintienne. Il faut donc le *défendre contre l'érosion*. Ce sujet a été étudié dans tous les pays du monde. Il ne paraît utile ici que d'en rappeler certains points essentiels.

### A – Erosion par le vent

Elle se développe surtout en pays à longue saison sèche, pendant laquelle le sol cultivé est nu et friable. L'emploi de la culture des arachides en pays semi-arides, tels qu'en Afrique Sahélienne en est un exemple typique. En certains points du Nord-Ouest du Sénégal, les sols sableux ont ainsi perdu plus de 50 cm en moins d'un siècle.

La plantation des brise-vents ou la protection de certains arbres à végétation de saison sèche sont des méthodes classiques de défense, de même que le maintien à la surface du sol de tous les résidus végétaux possibles. L'arrêt du phénomène au premier stade de saltation peut aussi être réalisé en maintenant debout les tiges ou les chaumes de cultures telles que les céréales.

### B – Erosion par l'eau

Elle est plus dangereuse parce que pouvant s'étendre sur des superficies beaucoup plus vastes ; ses dégâts peuvent être beaucoup plus intenses en chaque point.

La défense par les *moyens de type agricole* : disposition des cultures, mise en place de haies et barrages vivants le long des lignes de niveau, maintien d'une bonne structure et d'une forte perméabilité du sol, assainissement de sa surface, etc. est souvent plus efficace que celle nécessitant de gros travaux de terrassements ou autres. Cette dernière peut se révéler indispensable cependant sous la forme de terrasses de niveau à large base, de petits barrages en pierres sèches dans les ravins, etc. . .

La défense du sol contre l'érosion hydrique est d'autant plus importante, même sous sa forme la plus limitée (en volume enlevé en chaque point) d'érosion en nappe, que les éléments arrachés au sol sont plus riches non seulement en argile et limon mais aussi en matière organique, en bases, etc. que la couche attaquée de sol initial dans son ensemble.

Il faut signaler qu'en quelques cas particuliers *l'érosion hydrique des sols peut être profitable* :

- soit en enlevant les horizons supérieurs plus pauvres en éléments pour les plantes que ceux de profondeur ; elle n'en provoque pas moins cependant une perte de matière organique, pourtant très utile ;

- soit en accumulant en certaines zones basses, vallées, etc., où les conditions d'utilisation peuvent être plus aisées, des colluvions ou alluvions, arrachées aux sols des pentes ou des zones amont. Cependant les superficies ainsi enrichies sont beaucoup plus limitées que celles dégradées.

Les cycles géochimique et biogéochimique des sols, permettent leur formation et leur évolution. Ils libèrent ou produisent des éléments ou des

composés qui sont à l'origine de leur fertilité et, le cas échéant, de leur productivité. L'utilisation rationnelle des sols par l'homme doit donc tenir compte en premier lieu de ces cycles et ne pas les perturber inutilement. Dans la majeure partie des cas, sinon dans tous les cas, une mise en valeur intensive et équilibrée des sols est la plus rationnelle car la plus conservatrice de la fertilité.

*Modifications à apporter au texte sur*

L'UTILISATION RATIONNELLE ET PROTECTION DES CYCLES  
BIOGEOCHIMIQUES DES SOLS

par G. AUBERT

- Page 225 : 2<sup>ème</sup> paragraphe a, 2<sup>ème</sup> ligne, supprimer le s à la fin de hydrolyse.
- Page 226 – B1 : 2<sup>ème</sup> paragraphe, mettre les mots formes échangeables au singulier.  
3<sup>ème</sup> paragraphe : supprimer le trait d'union entre les 2 mots peut être.  
Dernier paragraphe, 3<sup>ème</sup> ligne après CaO, K<sub>2</sub>O, rajouter oligo-éléments au pluriel.
- Page 227 : Avant le dernier paragraphe, rajouter : *C – Les mouvements de substances.*  
Dans le dernier paragraphe 2<sup>ème</sup> ligne mettre décrits au masculin au lieu du féminin.  
décrits au masculin au lieu du féminin.
- Page 228 : Remplacer la 2<sup>ème</sup> ligne par : présence de corps particuliers : argiles de certains types, produits organiques variés etc. . .
- ” 2) : 2<sup>ème</sup> paragraphe, mettre une virgule après le mot site, 2<sup>ème</sup> ligne.
- ” : Avant dernier paragraphe après lessivage oblique mettre : de l'argile, des hydroxydes, des ions, parfois des composés organiques.
- ” D : Premier paragraphe 2<sup>ème</sup> ligne, remplacer constitués de par correspondant à des . . .
- ” : Dernier paragraphe dernière ligne rajouter : une relative avant quantification.
- Page 229 : Dernier paragraphe, 2<sup>ème</sup> ligne remplacer l par une.  
A la fin du dernier paragraphe remplacer : L'emploi des engrais par : Sur ce plan l'emploi des engrais. . .

- Page 230 - B : Cycle biogéochimique, 1<sup>er</sup> paragraphe entre la première et la 2<sup>ème</sup> phrase, 3<sup>ème</sup> ligne rajouter : Pour permettre le maintien de la productivité des terres, elle doit assurer la conservation —sinon l'amélioration— de leurs caractères de fertilité physiques, physico-chimiques, chimiques et, en particulier, biologiques (développement de l'activité microbienne).
- ” A la fin de ce même paragraphe rajouter au début de la dernière ligne : Malgré cette diversité des processus en cause, un certain nombre. . .
- ” Rajouter à la fin de l'avant dernier paragraphe : Certaines déficiences en oligo-éléments peuvent être compensées par l'apport de faibles quantités d'engrais spécifiques (exemple des sels de cuivre dans les sols podzologiques des Landes du S.O. de la France, en particulier).
- Page 230 -2-a- : 2<sup>ème</sup> paragraphe, 1<sup>ère</sup> ligne, supprimer s au mot destructions.
- Page 231 : 3<sup>ème</sup> paragraphe 1<sup>ère</sup> ligne, remplacer permettent par provoquent.
- ” : Modifier le 4<sup>ème</sup> paragraphe comme suit :  
*En général, la moindre efficacité du système racinaire* des cultures par rapport à celui de la grande forêt tropicale, permet, une *lixiviation beaucoup* plus poussée de certains éléments par l'eau qui percole. Les quantités de K, Ca, Mg, certains oligo-éléments etc. . . ainsi perdues et qu'il faut compenser par les engrais sont en général bien plus fortes que celles exportées dans les récoltes elles-mêmes.
- ” 5<sup>ème</sup> paragraphe — dernière ligne rajouter : essentielles après règles.
- ” 6<sup>ème</sup> paragraphe — 1<sup>ère</sup> ligne, rajouter : chaque fois que possible, après forêt naturelle.
- ” 7<sup>ème</sup> paragraphe — 2<sup>ème</sup> ligne, rajouter : fertilisées après enracinement.

UTILISATION RATIONNELLE ET PROTECTION  
DES CYCLES BIOGEOCHIMIQUES DES SOLS

par G. AUBERT

Extrait de :

VERS UN PLAN D' ACTIONS POUR L'HUMANITE

Problèmes et Perspectives

Congrès Sept 1973

BRGM/Le Source

Chapitre :

- Les ressources minérales à long terme  
et la croissance

p. 223 à 233

Publication de l'INSTITUT DE LA VIE 1974

15 NOV. 1974

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n°

71761edo