N° d'ordre au CNRS : 2524

T H E S E

présentée

à l'UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

pour obtenir le titre de Docteur 3e Cycle

SPECIALITE : ECOLOGIE VEGETALE

par

Cengiz DARICI

Effet du type d'argile sur quelques activités microbiennes dans divers sols tropicaux. Comparaison d'un sol à allophane, d'un vertisol à montmorillonite et d'un sol ferrugineux tropical à illite et kaolinite.

Soutenue le 26 Octobre 1978 devant la Commission d'examen :

MM.	G.	LEMEE	) Président
	M.	LAMOTTE	)
	P.	KAISER	) Examinateurs
	B.	SAUGIER	)
	R.	SCHAEFER	)

AVANT-PROPOS

Ce mémoire est le résultat d'un travail de recherche qui a trouvé son orientation et son aboutissement grâce au Laboratoire d'Ecologie Végétale de la Faculté d'Orsay. C'est donc tout naturellement à son directeur, Monsieur le Professeur Georges LEMEE que vont en premier lieu mes remerciements.

Monsieur P. KAISER, Chef de Laboratoire (Institut Pasteur) auprès de la chaire de Microbiologie à l'INA, a bien voulu accepter de faire partie de mon jury et se charger de la tâche de rapporteur. Je lui en sais gré.

Monsieur B. SAUGIER, Professeur et Directeur actuel au laboratoire d'Ecologie végétale et Monsieur M. LAMOTTE, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure me font l'honneur de juger cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma vive reconnaissance.

Monsieur R. SCHAEFER, Maître de Recherche au CNRS, a dirigé mon travail. Sa compétence dans le domaine de l'écologie microbienne tropicale et sa formation large de naturaliste m'ont aidé à aborder avec efficacité un sujet entièrement nouveau pour moi. Il a été un interlocuteur précis, sévère même et critique et je lui en sais gré. Grâce à son expérience j'ai été à même de réaliser ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à MM. J. GUITTET et A. FAILLE, Maître-Assistants à l'Université de Paris XI et Paris VI, pour les conseils qu'ils m'ont prodigués.

Je ne voudrais pas omettre de citer mon ami G.H. RASHID, Professeur assistant à l'Université de Dacca (Bangladesh) qui durant ces années passées en France, loin de notre milieu familial et culturel, m'a été un frère dans les moments de vicissitude comme dans l'échange quotidien au laboratoire.

J'assure de mon amitié et de ma reconnaissance tous ceux qui m'ont apporté leur aide, en particulier Mme LE GOFF, Mle PELE, Mme REYDELLET, pour leur contribution efficace à la réalisation pratique du mémoire.

Enfin, j'exprime mes remerciements très sincères à mes professeurs en Turquie pour leur bienveillance et l'estime qu'ils me portent ainsi qu'aux Autorités turques pour l'aide qu'ils ont bien voulu m'apporter tout au long de mon séjour en France.

SOMMAIRE

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I -MATERIEL ET METHODES 4

A. MATERIEL 4

- Données générales et situation

a) Situation géographique

b) Le climat

c) La végétation

d) Les sols : Caractéristiques générales
Récapitulation des sols échantillonnés
Caractérisation des profils

B. METHODES 18

- Propriétés physico-chimiques des sols

a) Granulométrie du niveau de surface (Sols de Lamto)

b) Caractéristiques hydriques : Humidité actuelle
Capacité au champ
Point de flétrissement permanent(PFP)

c) pH

d) Capacité totale d'échange (T) et taux de saturation (V)

e) Détérmination de l'allophane (Test au fluorure)

f) Caractères de la matière organique :

- Teneur en C organique et en N total
- Teneur en N minéral

CHAPITRE II - ACTIVITES MICROBIOLOGIQUES ET BIOCHIMIQUES..... 37

- Divergence des sols dans la dégradation de la matière organique

A..MINERALISATION DU C ORGANIQUE..... 38

I..Dégagement de CO_2 in vitro

a) Actimité potentielle (niveau témoin) en conditions contrôlées

b) Tests d'activation répétitive en présence de divers substrats organiques (C et N) et minéraux (P et Al)

c) Essais de stimulation des horizons organiques profonds de l'Andosol

B. MINERALISATION DE N ORGANIQUE 62

a) Accumulation de N minéral dans les sols "témoin"

b) Dynamique de la minéralisation de N en présence de différents types de substrats organiques et minéraux.(Tests d'activation)

CHAPITRE III - DISCUSSION 83

a) Comparaison de l'activité biologique dans les divers types de sols et dans les différents horizons étudiés

b) Interdépendance et interaction des cycles du carbone et de l'azote

CONCLUSION 89

a) Taux et qualité des ressources énérgetiques en éléments biogènes et action du feu comme facteurs limitants dans les sols de Côte d'Ivoire

b) Caractères spécifiques de l'Andosol :Comportement vis-à-vis du phosphore et de l'aluminium,effet des tanins activité potentielle des horizons subactuels et des horizons minéraux profonds

c) Convergence et dissemblance des divers types de sols analysés

d) Perspective et prospective

BIBLIOGRAPHIE 93

INTRODUCTION

Le présent travail constitue une contribution aux recherches entreprises depuis une dizaine d'années par R. SCHAEFER et ses collaborateurs, recherches qui ont pour thème, la comparaison de sols tropicaux, ferrallitiques, alluviaux et vertisols et d'andosols du point de vue de la dynamique de la matière organique et par là du flux d'énergie dans divers écosystèmes naturels et agrosystèmes.

Les sols que nous avons étudiés sont les suivants : Andosol à allophane,(La Réunion), sols ferrugineux tropicaux à illite et kaolinite et vertisol à montmorillonite (Savane de Lamto,Côte d'Ivoire)

Les andosols, dérivés de cendres volcaniques, se distinguent par la présence d'allophane .Cette argile, formée en conditions perhumides à partir de verre volcanique, est amorphe aux rayons-X et sa charge globale nette est de nature (+).Cette propriété a pour conséquence une très forte adsorption et rétention d'anions, d'où à la fois une protection contre la biodégradation des substances humiques fixées, et une carence en phosphore assimilable par les végétaux.Cette carence limite la production primaire et par là, une exploitation rentable de ces sols(SCHAEFER, 1975).

Le gel d'allophane persiste s'il ne subit pas de phases d'assèchement prolongé et de gel-dégel.Dans le cas contraire,une évolution irréversible de l'allophane en argiles de charge globale nette (-), halloysite et/ou gibbsite est observée.

L'humification des litières et des racines mortes se fait facilement, alors qu'au contraire, la minéralisation des composés humiques accumulés est différée en raison de leur intime mélange avec la matrice minérale du sol.Le rôle de la population microbienne des andosols sur leur évolution, et l'effet de l'allophane sur la microflore et son activité métabolique sont encore peu connus.Le blocage des ressources énérgetiques, et par conséquent le freinage du flux d'énérgie à travers le sous-système sol représente un mécanisme de

régulation extrêmement efficace.

Bien que l'allophane soit connue depuis fort longtemps sur le plan minéralogique, l'écologie microbienne des andosols reste largement à développer.En France,actuellement, ces derniers sont envisagés sous l'angle pédologique (ORSTOM) et minéralogique.A l'échelle internationale quelques actions se développent dans le domaine agronomique (Turrialba , Costa-Rica), biochimique (Japon) et pédologique (USA), mais peu de chercheurs se sont intéressés à l'ensemble des mécanismes du fonctionnement du système-andosol, où l'écologie microbienne, fortement orientée par les propriétés spécifiques de l'allophane, intervient de façon décisive.

La pauvreté habituelle des sols tropicaux, ferralitiques ou alluviaux, contraste d'une façon étonnante avec la forte teneur des andosols tropicaux en matière organique humifiée , apparemment stabilisée et protégée contre la biodégradation. Seuls les vertisols montrent ce caractère, mais à un moindre degré.

Toute transformation du gel d'allophane induit des phénomènes d'érosion et de diminution spéctaculaire de la fertilité.

L'étude des activités microbiennes sur le plan biochimique est une voie efficace pour élucider les mécanismes de fonctionnement du sous-système édaphique et, à travers les liens d'interdépendance entre le cycle du carbone et celui de l'azote, pour mettre en relief la qualité des ressources énérgetiques et leur évolution.

Nous avons utilisé des moyens d'approche techniquement très simples et surtout peu onéreux.En effet, les expériences de respirométrie du sol ainsi que de la minéralisation de l'azote nécessitent très peu d'investissements matériels.

Ces essais <u>in vitro</u> ne permettent certes pas de conclure de façon univoque à ce qui a lieu <u>in situ</u>, mais ils représentent un moyen sûr pour explorer l'effet qualitatif de la matière organique

globale du sol, ainsi que celui des fractions définies extraites de ce même sol et rajoutées dans une gamme de doses (essais factoriels).

On ne saurait trop répéter l'intérêt d'une étude approfondie et détaillée des activités métaboliques de la microflore tellurique, dans le cadre du bilan énergétique, de dynamique de fonctionnement et de régulation biochimique de systèmes écologiques.

Les numérations ou l'identification taxinomique des germes en cause répondent à un autre objectif, celui de l'analyse du peuplement et de la dynamique des populations microbiennes.

CHAPITRE I

MATERIEL ET METHODES

A. MATERIEL

- Données générales et situation

a) Situation géographique

La savane de Lamto se situe à 6° 13' N; 5° 02' W environ à 100 km au Nord de la Golfe de Guinée, à la pointe du "V Baoulé" en bordure d'une forêt pluviale.(Fig. 1)(LAMOTTE, 1975)

Le paysage est composé de savanes humides de type guinéen, découpées par le réseau des galeries forestières des cours d'eau et par des lambeaux forestiers qui occupent parfois les plateaux.

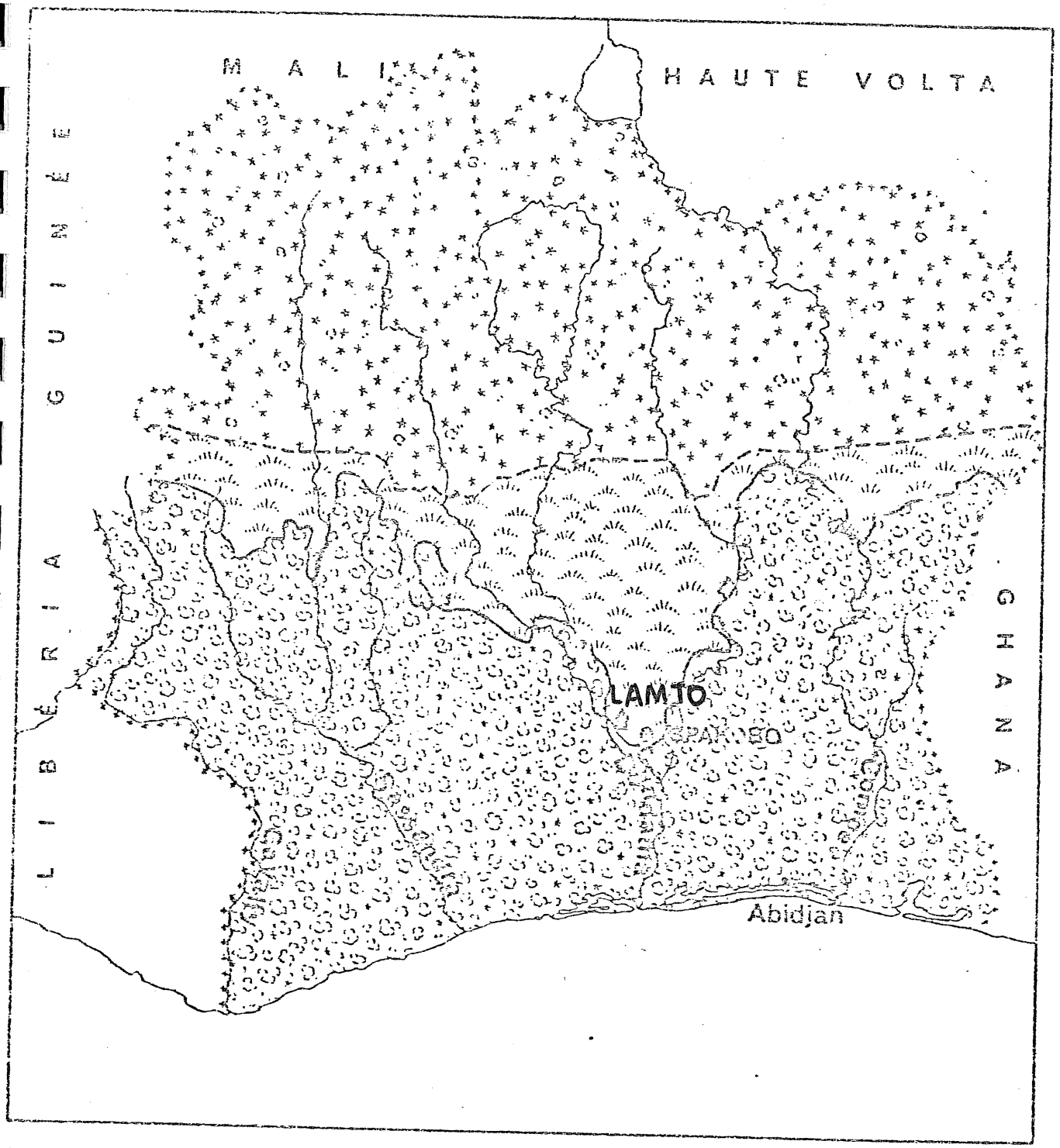
Cette savane se présente comme un milieu naturel où la seule intervention de l'homme est la mise à feu annuelle.Le feu saisonnier est un facteur important dans le devenir de la savane,davantage que certains incidents climatiques,tels la sécheresse de janvier ou les pluies de juin.Ainsi se trouve retardée l'évolution du paysage vers la forêt semi-decidue qui constitue le veritable climax de cette région: La savane de Lamto se boise très rapidement si elle est protégée du feu.

La Réunion située dans la partie occidentale de l'Océan indien par 21° de latitude sud,est une terre montagneuse,de forme elliptique d'une superficie de 2511 km^2.D'origine entièrement volcanique et constituée surtout par des basaltes comme les autres Mascareignes. L'île comprend une partie ancienne (entre deux millions d'année et 450.000 ans,le massif du Piton de la Neige) et une partie plus récente avec un volcanisme actuel (Piton de la Fournaise).C'est dans le domaine d'émission de ce dernier volcan qu'a été échantillonné le profil étudié.

b) Le climat

Le climat qui règne dans la zone de Lamto,en Côte d'Ivoire est de type tropical humide à deux saisons: Une saison chaude et sèche de novembre à mars et une saison fraîche et humide, d'avril à octobre (LECORDIER, 1974)

La pluviosité relativement élevée (1300 mm en moyenne) peut



forêt dense

savanes guinéennes

savanes septentrionales

Fig.1 : Situation géographique de la station de LAMTO (Côte d'Ivoire)

d'après ADJANOHOUN (1963)

fluctuer entre 900 mm et 1800 mm selon les années.La répartition saisonnière est caractérisée par une alternance entre quatre mois secs (moins de 50 mm d'eau) de novembre à mars et une saison de pluies marquée par quelques semaines sans pluies aux mois de juillet et août. ("petite saison sèche").Les variations interannuelles sont importantes.

Les températures moyennes journalières varient entre 24 et 30° C en saison sèche,entre 25 et 28° C en saison des pluies.Les températures moyennes mensuelles sont comprises entre 25,1°C (août) et 28,3°C (mars).Un minimum de 16°C et un maximum de 34°C correspondent aux températures extrêmes.L'écart maximal est donc de l'ordre de 18°C en période chaude qui s'étale de décembre à février et de 8°C en saison pluvieuse (juillet,août).

La température du sol, à une profondeur donnée, est essentiellement déterminée par le climat local et par l'épaisseur et la nature du couvert végétal.En savane non-brûlée, les maximums de température dans la strate 0-10 cm sont toujours inférieurs aux valeurs atmosphériques correspondantes,alors que les minimum sont ,le plus souvent, superieurs.

Dans la savane non brûlée, les maxima sont ,de février à juin,supérieurs dans le sol par rapport à l'atmosphère.Après le passage du feu le sol étant mis à nu,les températures maximales redeviennent inférieures dans le sol, à celles de l'atmosphère.Les températures minima et moyennes suivent le même rythme.Les températures maximales journalières dans un sol non protégé du feu peuvent dépasser 50°C entre 0 et -2 cm et 38°C vers - 20 cm.En savane non brûlée,la température atteint,entre 0 et -2 cm, 25 à 30°C.

La Réunion possède une dissymétrie climatique marquée :Une pluviosité moyenne annuelle de 4 m. à Saint-Benoît, 9m. à Takamaka. La façade occidentale sous le vent est beaucoup plus sèche, avec 700 mm à Saint-Paul.La saison des pluies qui correspond à la saison chaude (nov. à mai) est aussi celle des cyclones qui périodiquement ravagent l'île.La température moyenne annuelle est, au niveau de la mer et à 1000 m; d'altitude respectivement de 23 et 18°C du côté au vent et de 25 et 20°C du côté sous le vent.

c) La végétation

Divers travaux (CESAR, MENAUT, 1974) décrivent la végétation de Lamto. Le paysage général est celui des formations herbacées à palmiers et à arbustes. A la suite des grandes variations dans la densité des peuplements arbustifs, les savanes deviennent très polymorphes. On y trouve tous les stades, depuis la savane herbeuse jusqu'à la savane boisée. Ces formations sont entrecoupées de galeries forestières qui occupent le lit des marigots (Fig 2).

On a reconnu, essentiellement, trois types de végétation : savane peu arbustive (herbeuse), savane arbustive, forêt galerie. (Fig 3).

La savane herbeuse est de l'association à Brachiaria brachylopha, sous-association à Loudetia simplex. De nombreux palmiers rôniers (Borassus aethiopum)au milieu d'arbustes épars, dominent la savane herbeuse émaillée de forêts galeries. (Fig 4 et 5).

La flore des savanes de Lamto comprend environ 400 espéces, pour la majeure partie, des savanicoles vraies auxquelles s'ajoute un certain nombre d'éléments de forêt primaire ou de fourrés secondaires, quelques hydrophytes dans les bas-fonds marécageux et des rudérales.

Dans la strate herbacée, les graminées sont dominantes. (75 à 99 % de la biomasse). En revanche ; Cypéracées,Composées et Rubiacées dans les savanes arbustives ne sont pas négligeables. Les Légumineuses, souvent rares, ont une participation assez faible. Les espèces ligneuses reflètent bien les disparités du milieu : Il n'y a pas d'espèces autochtones. On observe soit des espèces forestières développées en savane grâce aux conditions particulières, soit des espèces septentrionales résistantes au feu et adaptées à l'humidité forestière.

La Réunion fut primitivement couverte par une forêt du côté au vent et par une fruticée xérophile au-dessous de 600m d'altitude du côté sous le vent. Aujourd'hui la canne à sucre occupe les basses pentes. Au-dessus de 1000m demeurent des peuplements de bambous et de tamarins, remplacés en altitude par des brandes à Ericacées (Philippia montana)qui montent jusqu'aux sommets. (Fig 6 et 7) (CADET, 1974).

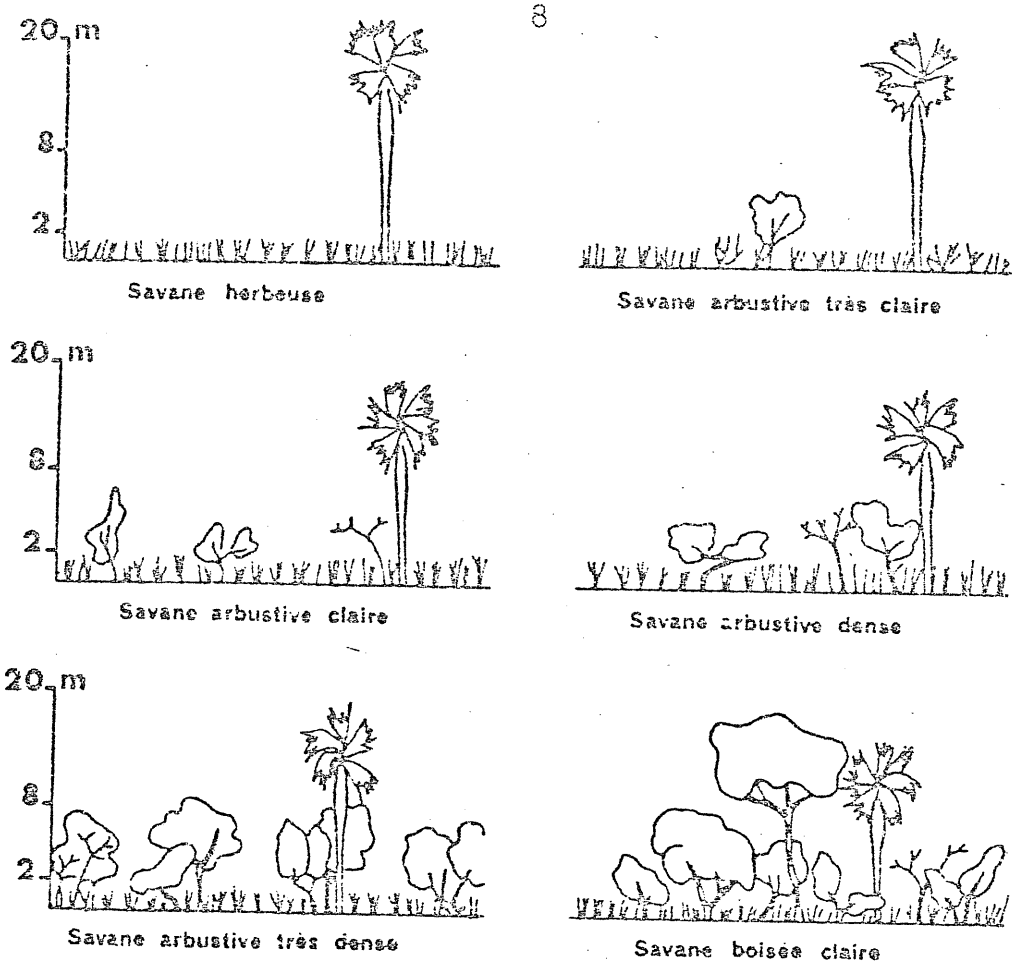


Fig: 2 Principaux types de savane à Lamto (d'après Menaut 1971)

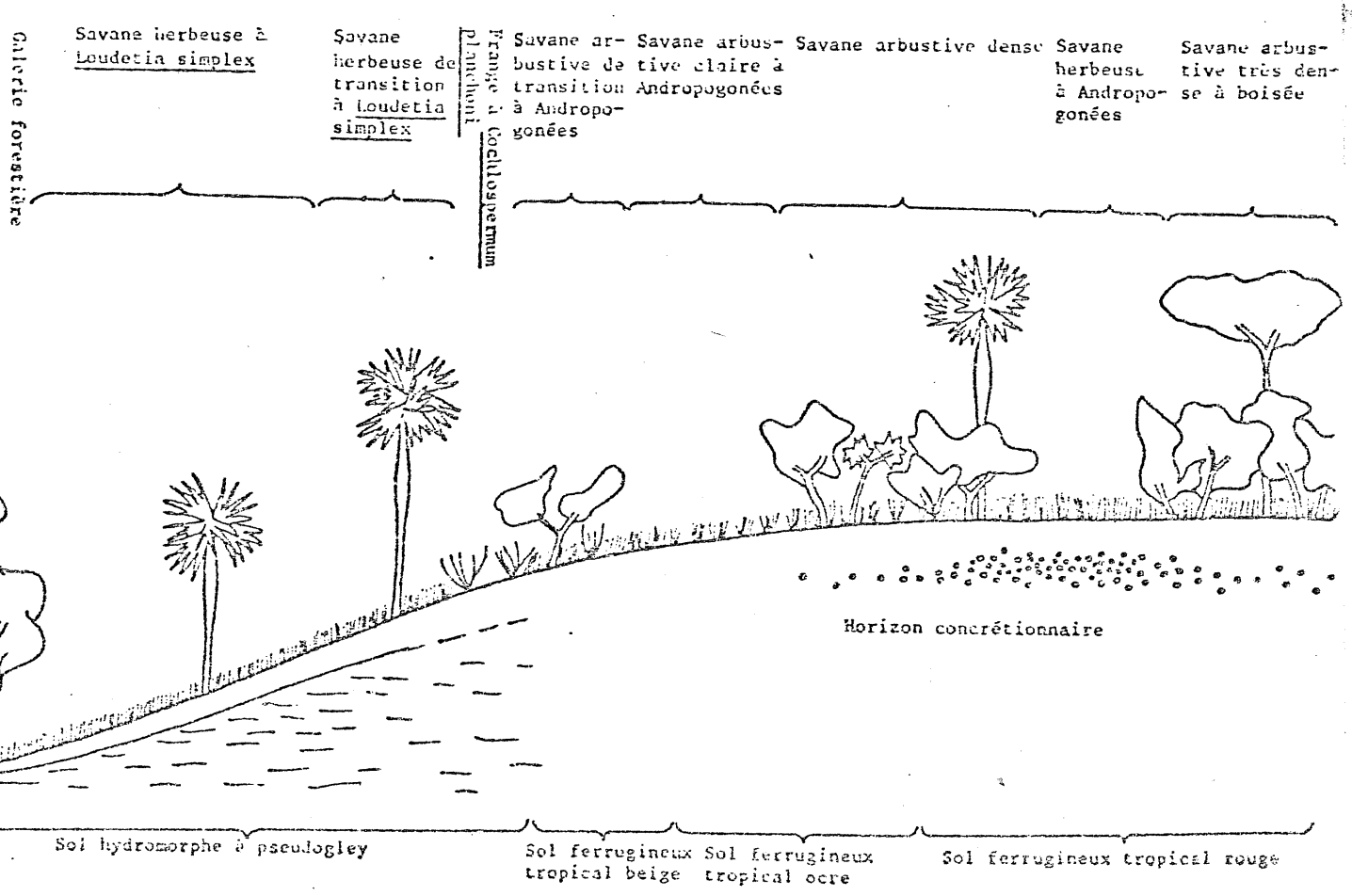


Fig: 3 Répartition des principaux types de savanes selon une catena schématique.



Fig. 4 - Faciès de savane herbeuse à LOUDETIA SIMPLEX sur sol sableux à pseudogley de pente.



Fig. 5 - Faciès de savane herbeuse à Andropogonées (HYPARRHENIA sp.) sur sol ferrugineux tropical rouge de plateau.

Savane guinéenne de Lamto, COTE D'IVOIRE (6° 13' N; 5° 02' W)



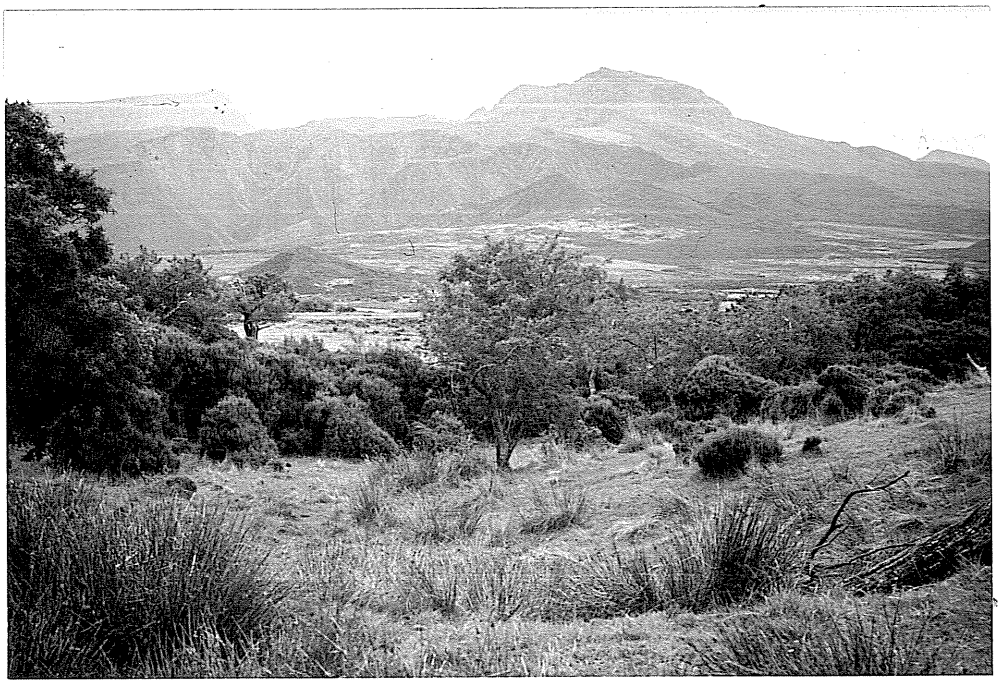


Fig. 6 et 7 - Paysage général et végétation naturelle au lieu dit "Nez de Boeuf" (2135 m, 7 km à l'W du Piton de la Fournaise, LA REUNION)

-Cycle annuelle de la végétation

L'analyse de la biomasse des savanes présente un très grand intêret écologique.Elle est plus influencée par le substrat que par la composition floristique de la formation.En effet, le substrat fait varier les proportions des biomasses spécifiques sans modifier la valeur de la biomasse globale.Ainsi pour deux stations en savane à Loudetia simplex typique à même composition floristique et en position topographique de bas de pente,sur sol hydromorphe sableux à pseudogley à nappe phréatique,on trouve des biomasses globales annuelle de 6,5 t/ha et 11,9 t/ha de matière sèche.Cette différence est attribuée à la richesse du substrat en éléments nutritifs puisque la seconde station se trouve en contrebas d'une savane très fertile.

Les savanes herbeuses possèdent un maximum de matière vivante entre 12 et 25 cm de hauteur.Les mesures effectuées sur une année montrent que la biomasse aérienne des herbacées varie largement durant l'année et tombe à zéro juste après le passage du feu.Elle est maximale en novembre dans la savane à Loudetia avec 6,9 à 7 t/ha et en décembre dans les savanes arbustives à Andropogonées (7 à 11 t/ha).

Quant à la biomasse racinaire, elle est de : 19 t/ha en savane herbeuse à Loudetia simplex, 14 t/ha en savane herbeuse à Andropogonées et 10 à 11 t/ha en savane arbustive ou boisée.

d) Les sols : Caractéristiques générales

Les sols de Lamto se rattachent à deux grands groupes : les sols ferrallitiques ou ferrugineux tropicaux sur roche mère granitique et les Vertisols lithomorphes sur roche mère amphibolitique (RIOU,1974)

La grande diversité de faciès parmi les sols ferrugineux tropicaux est due aux modes d'érosion et au drainage suivant leur position topograhique.Ce sont des sols à texture sableuse,pauvres en matière organique (1 à 2,5 % de 1 à 10 cm.) et en divers éléments minéraux.Le pH de ces sols se situe entre 5 et 7.Leur argile est de type illite-kaolinite.Les illites sont typiques des climats tempérés.Elles sont riches en silice et leur caractéristique est proche des micas. Leur capacité d'échange est moyenne.La kaolinite,pauvre en silice, caractérise les milieux acides en climat chaud et humide.Sa capacité d'échange est faible.

Les vertisols ou "terres noires" sont des sols à texture argileuse (17 à 40 %),richesen matière organique (3 à 6 %) et en Mg^{++} mais pauvres en K^{+}.La fraction colloïdale minérale est ici une argile gonflante de néoformation (montmorillonite),intimement liée à un humus très polymérisé, d'où la couleur noire.Leur capacité d'échange élevée, est supérieure à 30 m.e.Le pH varie autour de 6,3-6,8.Les vertisols sont les sols les plus fertiles des régions tropicales. Ils présentent, en saison pluvieuse,un défaut d'aération très net (hydromorphie) alors qu'ils durcissent en se dessèchant pendant la saison sèche d'où leur productivité restreinte (fig. 8)

Les andosols ou sols à allophane dérivent par météorisation des andésites,pyroxènes et plagioclases,principalement de la fraction vitreuse des cendres volcaniques.L'allophane est un gel d'hydroxyde de fer et d'aluminium amorphe aux rayons X qui se distingue par la position tétraédrique de l'aluminium provenant d'une substitution isomorphique (BIRRELL, 1952)

L'allophane peut évoluer, et ceci de façon irreversible, par suite de dessiccation qui entraîne sa transformation en gibbsite (caractérisée par un déficit en silice) ou en halloysite (enrichissement relatif en silice) qui sont des argiles à réseau cristallisé.

Les andosols se rencontrent des régions froides subalpines aux tropiques humides équatoriaux en conditions perhumides (fig. 10).

L'allophane se différencie de toutes les autres argiles par sa charge globale positive.Cette particularité donne lieu à une très forte adsorption anionique.C'est pourquoi l'allophane immobilise les matières humifiées (anions humiqes et fulviques).Ainsi le stock énérgetique du sol devient difficilement biodégradable.

L'allophane a d'autres propriétés spécifiques :

- très forte capacité de rétention de l'eau
- le gel colloïdal est thixotrope (passage à l'état liquide par agitation et régénération au repos)
- sa capacité d'échange varie avec le pH et sa charge éléctrique augmente avec celui-ci (MEHLICH, 1960 - SUMNER, 1963 -, DESHPANDE, 1964)
- l'aluminium complexé par les acides fulviques perd sa toxicité.

- l'allophane peut posséder une surface externe de 800 m^2/g.
- en présence d'une solution aqueuse de fluorures à pH supérieur à 7, une réaction avec les positions Al-OH de l'aluminosilicate (alumine réactive) à pouvoir catalytique, libère des ions OH^- qui élèvent fortement le pH et forme des fluoaluminates (voir plus loin, test au fluorure)

- Récapitulation des sols échantillonnés

Le tableau ci-dessous illustre, en résumé, les sols étudiés :

Types de sols	Origine	Dénomination, niveaux étudiés	
1) sol sableux à pseudogley (sol de pente) à Loudetia simplex	Station de Lamto (Côte d'Ivoire)	Faciès brûlé 0 à 95 cm (9 niveaux) Faciès non brûlé 0 à 39 cm (7 niveaux) 0 à 30 cm (2 niveaux)	LB LNB LNB_a LNB_b
2) sol ferrugineux tropical rouge de plateau à Andropogonées (Hyparrhenia sp.	Station de Lamto (Côte d'Ivoire)	0 à 39 cm (7 niveaux) 0 à 45 cm (2 niveaux)	Hyp_a Hyp_b
3) vertisol à Loudetia simplex	Station de Lamto Côte d'Ivoire)	0 à 65 cm (4 niveaux)	V
4) andosol (sol dérivé de cendres volcaniques, sol à allophane)	Plaine des Cafres, Nez de Boeuf, 2136 m. Ile de la Réunion	0 à 95 cm (10 horizons) 0 à 10 cm (5 échantillons)	

- Caractérisation des profils

Les sols de Côte d'Ivoire ont été prélevés pendant la petite saison des pluies (octobre-novembre) en savane herbeuse à Loudetia simplex et en savane à Andropogonées (Hyparrhenia sp).Le sol à Loudetia est un sol sableux à pseudogley de pente ou un vertisol, alors que celui à Hyparrhenia est ferrugineux tropical de plateau. (fig. 3)

Dans le sol à pseudogley de pente et dans celui de plateau on distingue trois horizons :

- un horizon humifère de 0 à 15 cm
- un horizon lessivé de 15 à 40 cm allant parfois jusqu'à 1 m
- une couche d'argile (sol à pseudogley) ou de graviers (sol de plateau)

La figure 11 illustre les profils des sols de Côte d'Ivoire.

Le profil de vertisol est peu évolué de type AC ou A(B)C. L'horizon (B) n'est pas un horizon d'altération mais un horizon structural. La structure est prismatique caractérisée par des fentes de retrait très larges en saison sèche (fig. 8 et 9)

Quant au profil de l'andosol, on est en présence d'un profil composé (selon DUCHAUFOUR, 1977) de trois sols superposés (fig. 12 et 13). Le sol le plus profond a été recouvert par deux retombées successives de cendres. La première a donné naissance au second sol et la deuxième retombée est, à l'heure actuelle, un sol peu évolué. Chacun de ces sols a évolué indépendamment des autres. Il n'y a donc aucune corrélation entre eux sinon qu'ils sont superposés. On constate une migration du fer vers la profondeur. On peut supposer qu'il s'agit d'un sol andopozolique.

Ce sol est très pulverulent à l'état sec. A l'état humide par contre, tous les niveaux présentent un caractère thixotrope.

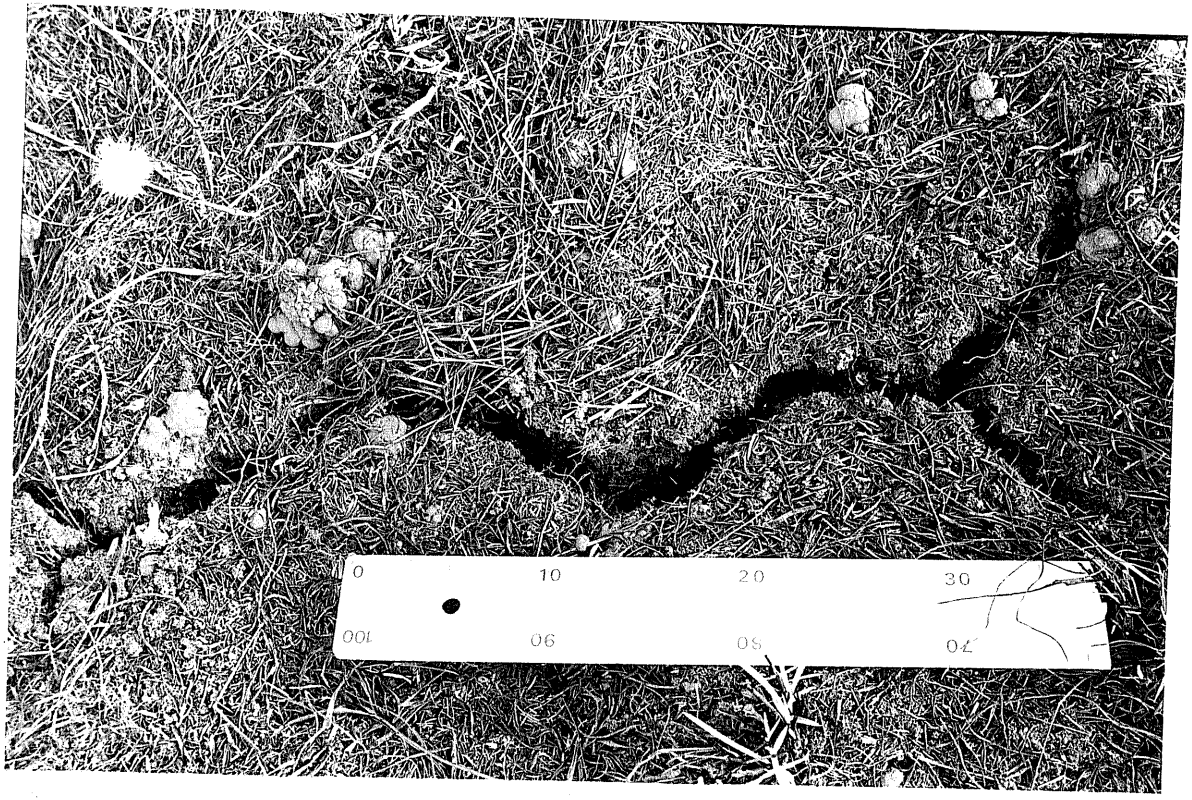


Fig. 8 - Réseau polygonal de fentes de retrait sur vertisol en saison sèche.



Fig. 9 - Profil de vertisol sous faciès de Loudetia

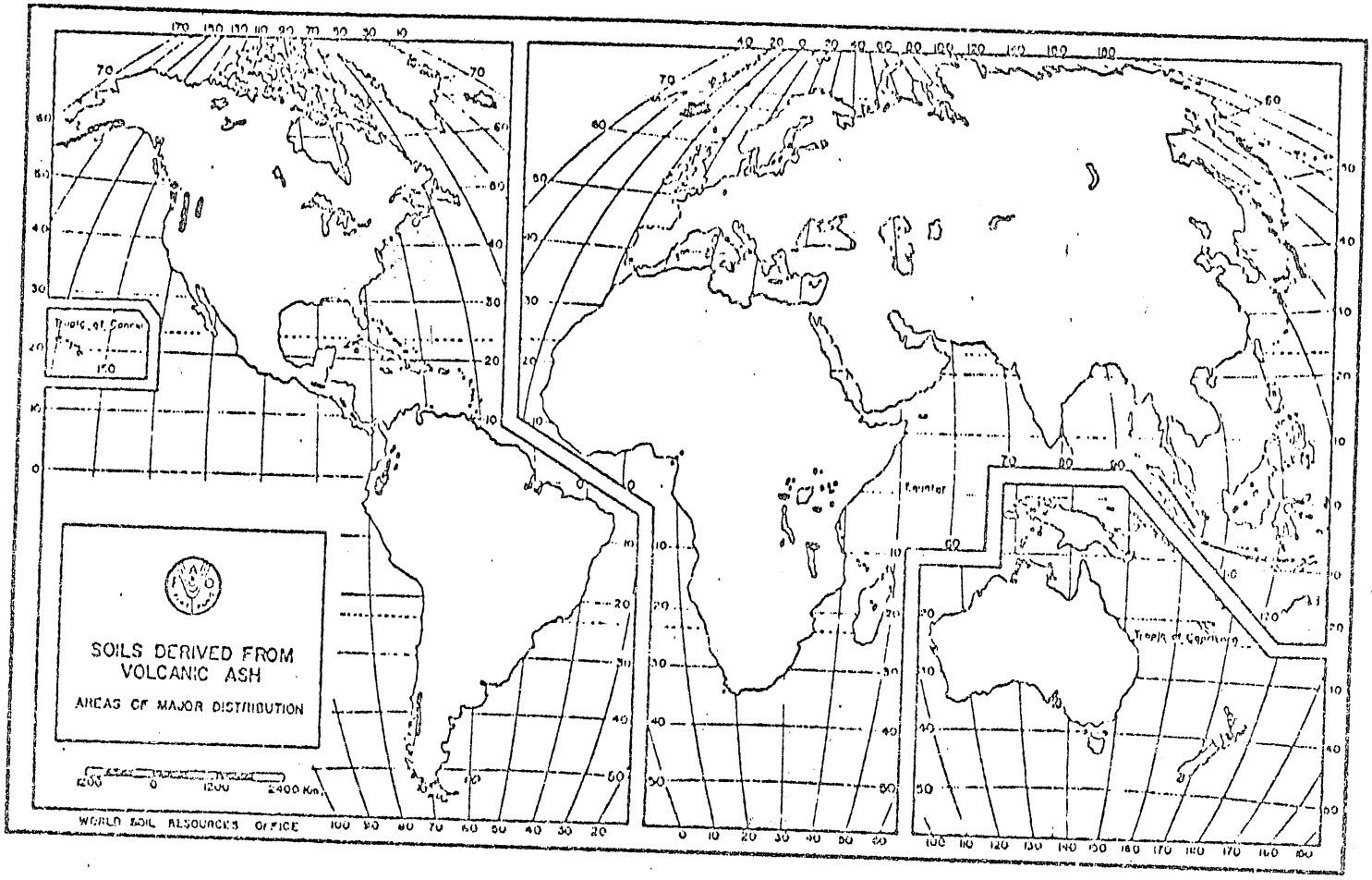
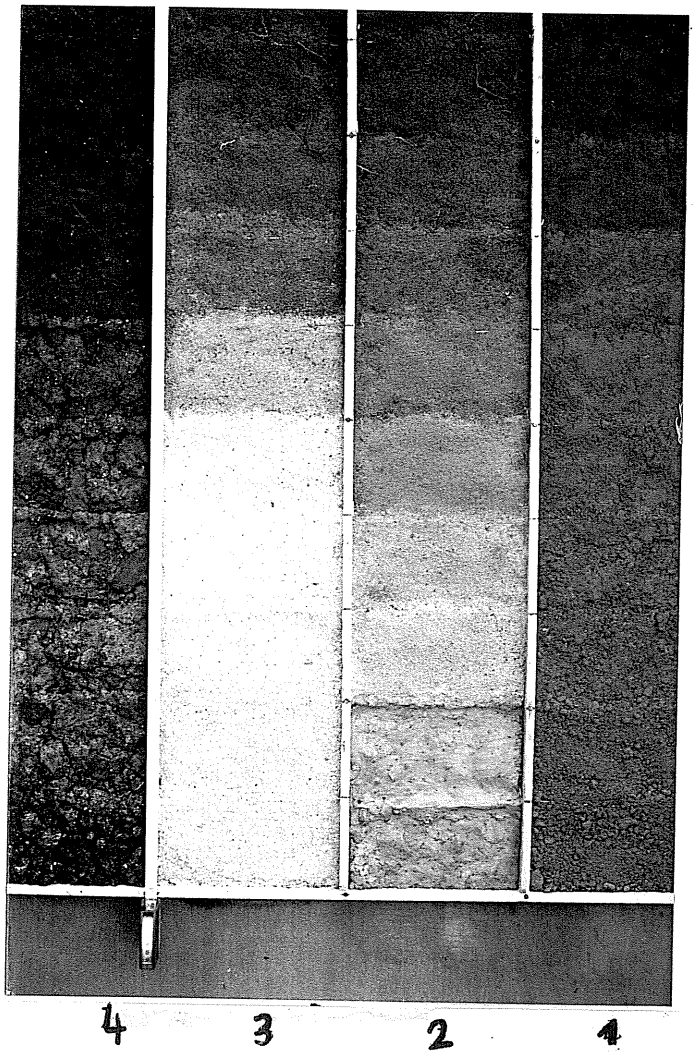


Fig.10 - Localisation géographique des andosols : axe équatorial, sous tropiques humides, et aires disjointes (groupe boréal et groupe septentrional) en climat tempéré.



1) Sol ferrugineux tropical rouge
2) Sol sableux à pseudogley
3) Sol sableux de plateau
4) Vertisol

Fig. 11 - Profils des sols de Lamto



10 cm

Fig. 12 - Profil de l'andosol

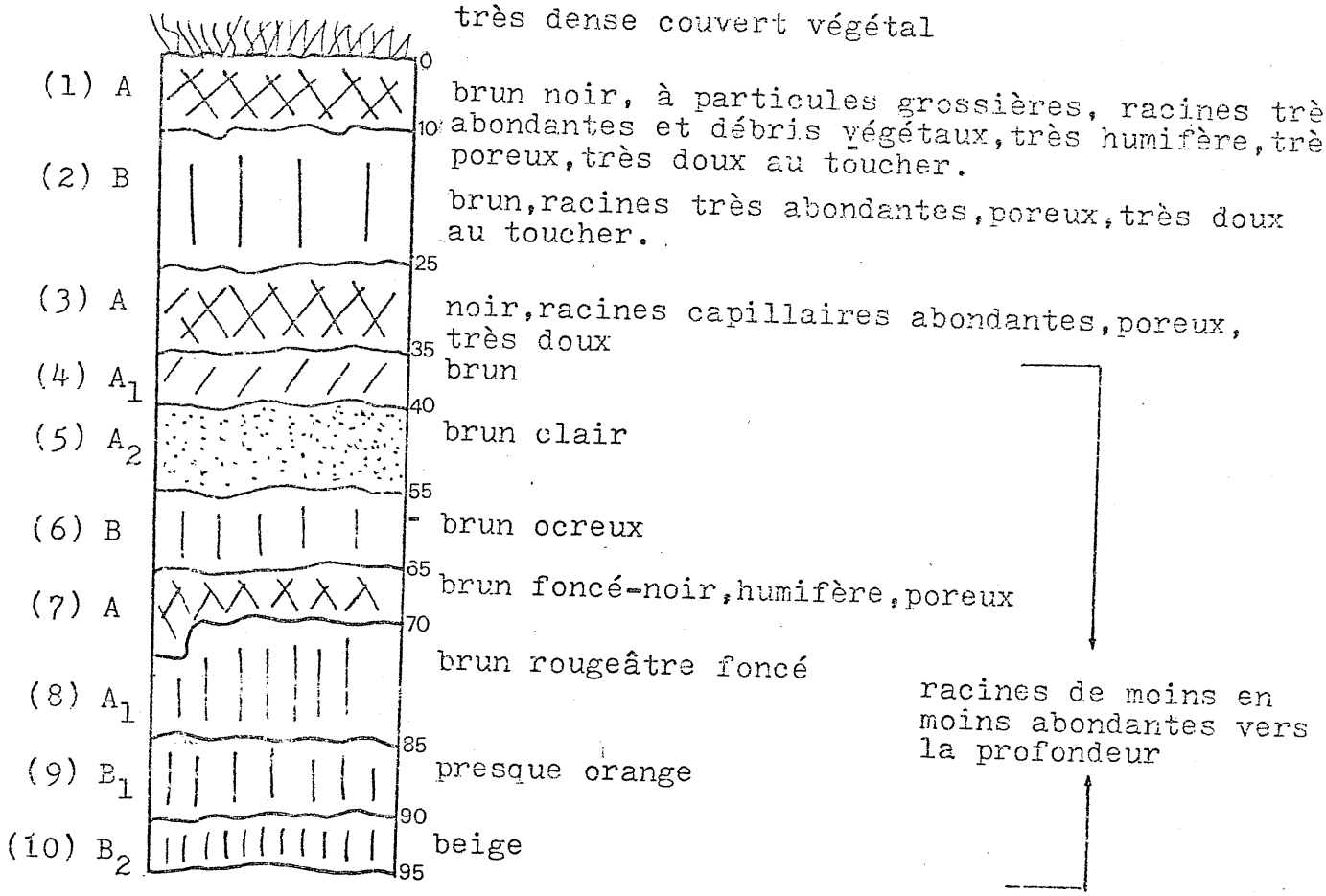


Fig. 13- Profil du sol volcanique (les symboles sont ceux de DUCHAUFOUR)

B METHODES

- propriétés physico-chimiques des sols

a) granulométrie de l'horizon de surface

On dispose de données concernant les sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia (Tableau 1) La forte teneur en sable de ces sols est à remarquer (75 et 72 %)

b) caractéristiques hydriques

- Humidité actuelle

Elle est déterminée en séchant les échantillons à l'étuve à 105°C pendant 2 jours. En ce qui concerne les sols séchés à l'air, l'humidité des sols de Lamto est très basse. En effet, leur teneur

en eau ne dépasse guère 1% (fig. 14).Par contre, le vertisol contient à l'état sec, entre 2,7 et 5,5 % d'eau suivant la profondeur.Pour l'andosol cette valeur se situe autour de 26 %.

éléments / milieu %	sol de pente sous Loudetia (Pseudogley)	sol ferrugineux tropical rouge. sol de plateau sous Hyparrhenia
Argile < 2	6,0	7,1
Limon fin 2-20 µ	6,8	8,0
Limon grossier 20-50 µ	9,0	10,5
Sable fin 50-200 µ	28,0	29,0
Sable grossier 200µ-2mm	47,0	43,0

Tableau 1- Granulométrie des sols de 0 à 10 cm (en pour 100) sous Loudetia et sous Hyparrhenia

- Humidité équivalente (capacité au champ)

Afin de déterminer l'humidité équivalente des sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia, on a procédé à un essai de centrifugation en fonction du temps et de la vitesse de rotation (de 3 à 5 minutes et de 2100 rpm à 2700 rpm), ceci par niveau et jusqu'à 15 cm de profondeur (tableau 2).

Une valeur de 10 % et une de 15 % ont été respectivement adoptées pour le sol sous Loudetia et le sol sous Hyparrhenia.

Dans le cas du vertisol, la capacité au champ,élevée, se situe entre 22 et 24 %.

Quant à l'andosol, son humidité équivalente a été déterminée par une centrifugation de cinq minutes à 2440 tours / minute.Cette vitesse correspond à pF 2,7 (théoriquement à 3 pF)(DOMMERGUES, 1962). La valeur de celle-ci pour chaque horizon est inférieure à celle de leur humidité actuelle après une pluie ressuyée, différence qui s'explique par le caractère thixotrope de l'allophane.Nous présentons au tableau 3 la teneur en eau de ce sol après le prélèvement et sa capacité au champ.

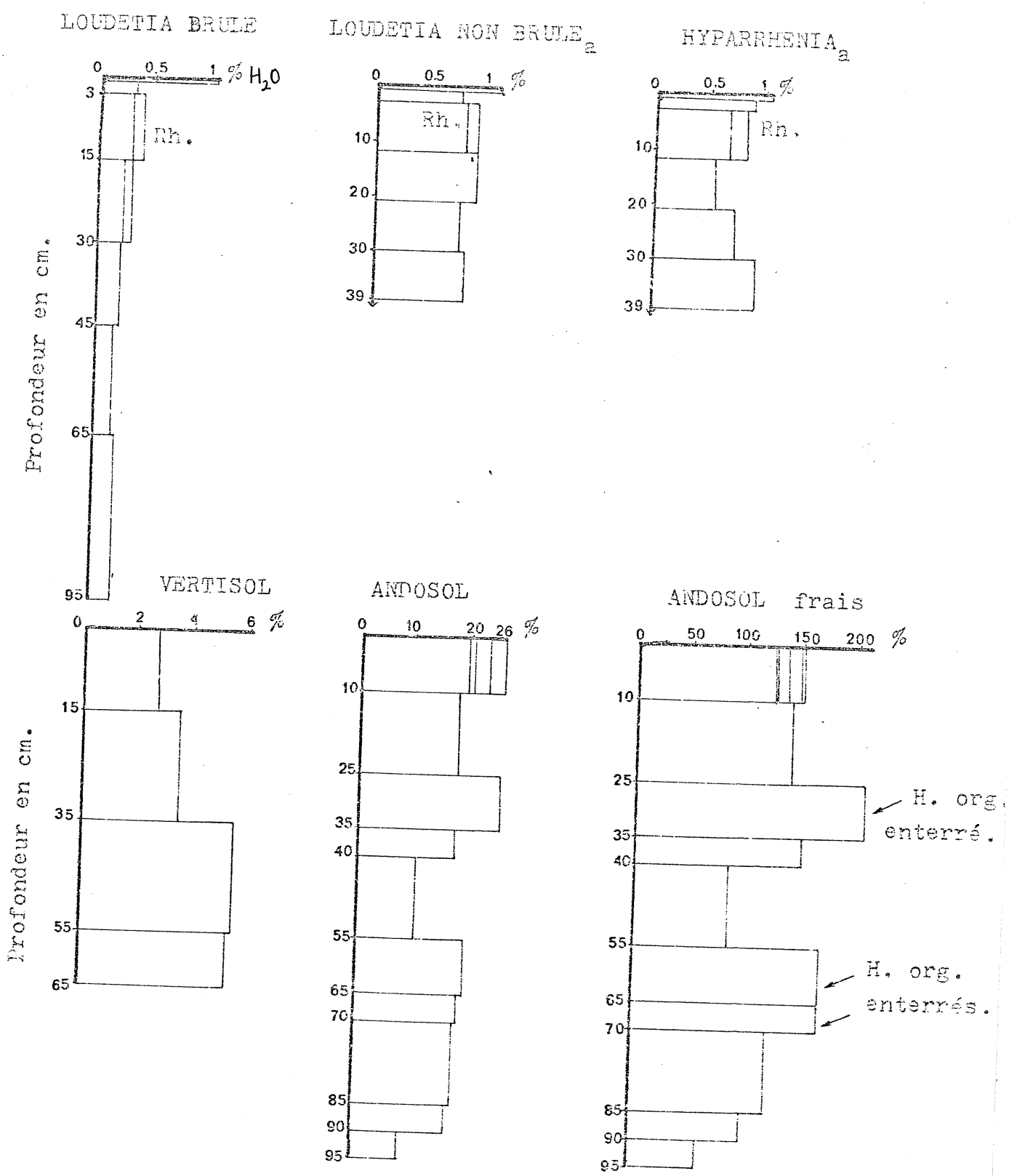


Fig. 14- Humidité actuelle (en p. 100 du poids sec) en fonction de la profondeur des sols séchés à l'air. (Pour l'andosol, on a prélèvé cinq échantillons entre 0 et 10 cm.)

Rh. : niveau rhizosphérique.

Sol	Niveaux cm	3' min	6' min	10' min	15' min	1'	3'	6'	1'	3'	6'
		2100 rpm				2400 rpm			2700 rpm		
LOUDETIA BRULE	0 - 1	8,1	7,2	7,0	7,0	5,6	5,5	5,6	3,9	3,7	3,5
	1 - 3	8,3	7,8	7,4	6,9	6,2	6,0	5,7	4,5	4,2	4,0
	3 - 15Rh	8,6	8,2	8,2	7,7	7,1	6,3	6,3	4,9	4,5	4,4
	3 - 15	8,8	7,0	6,7	6,1	5,7	4,4	5,1	4,3	4,0	3,8
LOUDETIA NON BRULE	0 - 1	18,3	17,3	16,5	15,0	16,5	15	15,0	10,7	10,0	9,6
	1 - 3	14,0	13,5	13,3	12,7	11,8	11,8	11,3	9,9	9,5	9,2
	3 - 12Rh	22,5	20,9	17,6	15,6	13,2	12,8	13,1	10,2	9,6	9,2
	3 - 12	13,6	12,6	12,5	11,9	11,3	10,0	10,7	6,8	6,4	6,1
HYPARRHENIA	0 - 1	13,6	13,3	13,0	12,0	12,5	12,2	12	7,1	6,9	6,6
	1 - 3	12,3	11,9	11,8	11,7	10,9	10,6	10,5	8,5	8,2	7,9
	3 - 12Rh	11,4	11,2	11,1	10,7	10,9	10,1	10,1	5,5	5,4	5,1
	3 - 12	10	9,7	9,6	9,4	8,2	8,6	8,4	6,0	6,0	5,8

Tableau 2- Humidité équivalente des sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia en fonction du temps et des vitesses de rotation.

N°	Horizon cm.	Hum. actuelle H_2O %	Cap. au ch. H_2O %	Point de fl. H_2O %
1_a	0 - 10	123,9	118,2	
1_b	0 - 10	125,4	124,8	
1_c	0 - 10	136,0	131,2	60
1_d	0 - 10	150,4	147,6	
1_e	0 - 10	148,3	145,8	
2	10 - 25	140,0	135,7	78,1
3	25 - 35	206,6	203,6	95,4
4	35 - 40	151,4	150,4	80,4
5	40 - 55	84,8	85,0	47,6
6	55 - 65	168,0	169,3	93,7
7	65 - 70	167,7	167,6	88,6
8	70 - 85	122,5	91,9	78,0
9	85 - 90	100,4	98,4	61,5
10	90 - 95	61,0	58,4	35,3

Tableau 3 - Humidité actuelle, capacité au champ et point de flétrissement permanent (en p 100 du poids sec) du sol volcanique.

- Point de flétrissement permanent (PFP)

Sa mesure est faite à l'aide de la presse à membrane (soil test), sur quatre niveaux des sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia et sur tout le profil dans d'autres sols.

Les valeurs du PFP pour les sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia varient entre 2 et 6 %. Les valeurs élevées n'appartiennent qu'au sol sous Hyparrhenia plus riche que le sol sous Loudetia tant en argile qu'en matière organique (fig. 15). On constate sur la figure que les horizons rhizosphériques renferment plus d'eau que les autres. Dans ces sols la réserve d'eau utile est importante.

Pour le vertisol, les valeurs ont tendance à croître vers la profondeur. Très élevées par rapport à celles sous Loudetia et sous Hyparrhenia, elles fluctuent entre 11,7 et 17,8 %. Compte tenu des valeurs élevées de la capacité au champ, la réserve d'eau utile apparaît limitée.

Le point de flétrissement de l'andosol est très élevé et correspond à une teneur en eau qui est à peu près de l'ordre de la moitié de la capacité au champ (15 et tableau 3).

c)pH

Le pH du sol exerce, de façon évidente, une action importante sur l'action microbienne générale, et par là, sur la vitesse de l'humification biologique. Elle est plus active et plus rapide dans les milieux neutres ou peu acides que dans les milieux très acides. Le facteur pH ne dépend pas uniquement du milieu minéral, mais de l'interaction du milieu minéral, du cycle biogéochimique des bases et de l'activité microbienne elle-même.

Les sols que nous avons étudiés sont tous acidiques et se rapprochent par leurs valeurs du pH. Contrairement à ce qui se passe dans le sol ferrugineux tropical sous Hyparrhenia, le pH semble augmenter vers la profondeur dans le sol sous Loudetia, surtout dans le faciès non brûlé(fig. 16).

Le vertisol a un pH presque neutre. Il oscille, en effet, entre 6,3 et 6,8.

Quant à l'andosol, il est très acide sur tout le profil, les valeurs du pH variant peu entre 4 et 4,8.

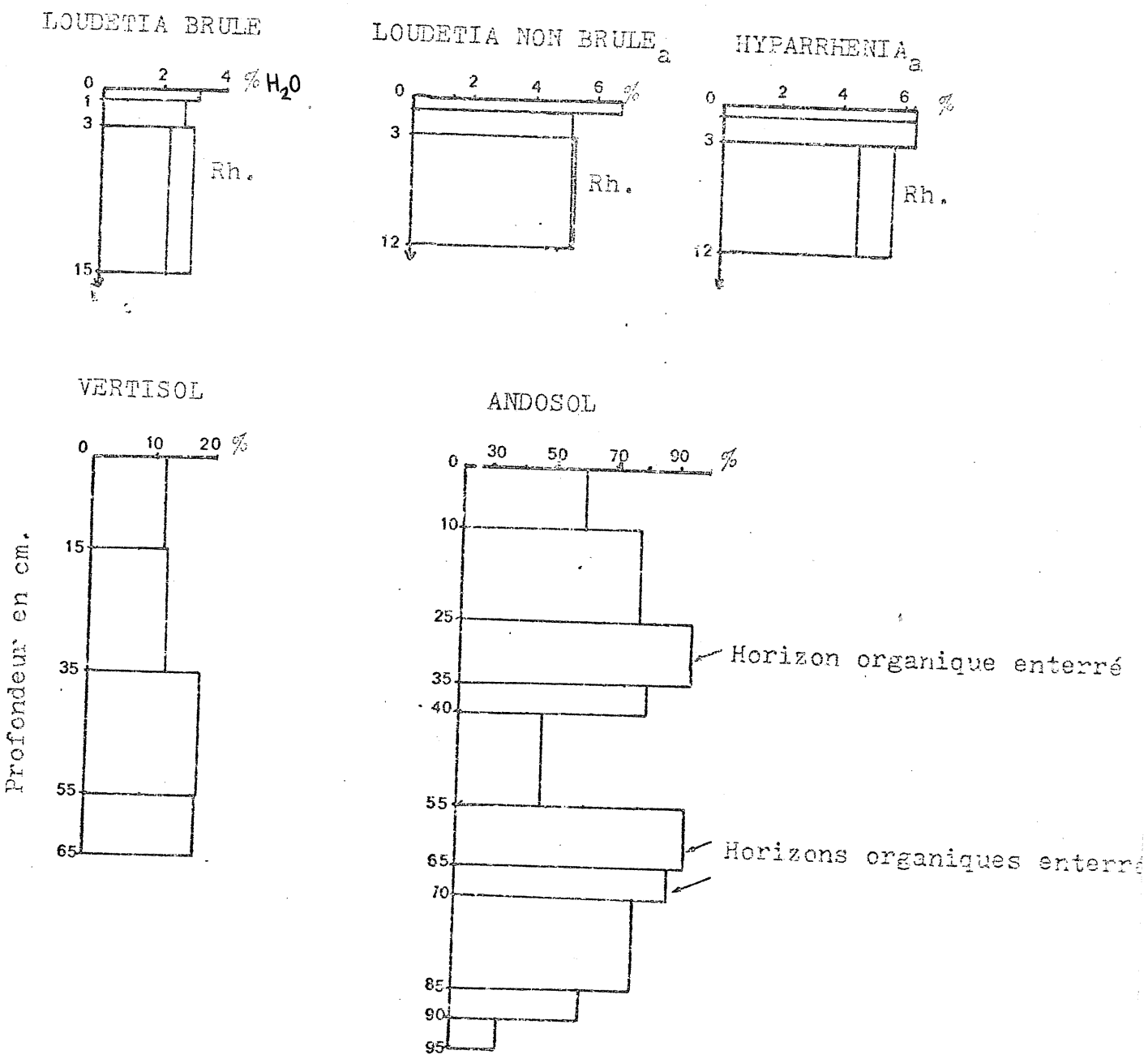


Fig. 15- Point de flétrissement permanent (en p. 100 de sol seché à 105°C) des sols étudiés.

Rh. : niveau rhizosphérique.

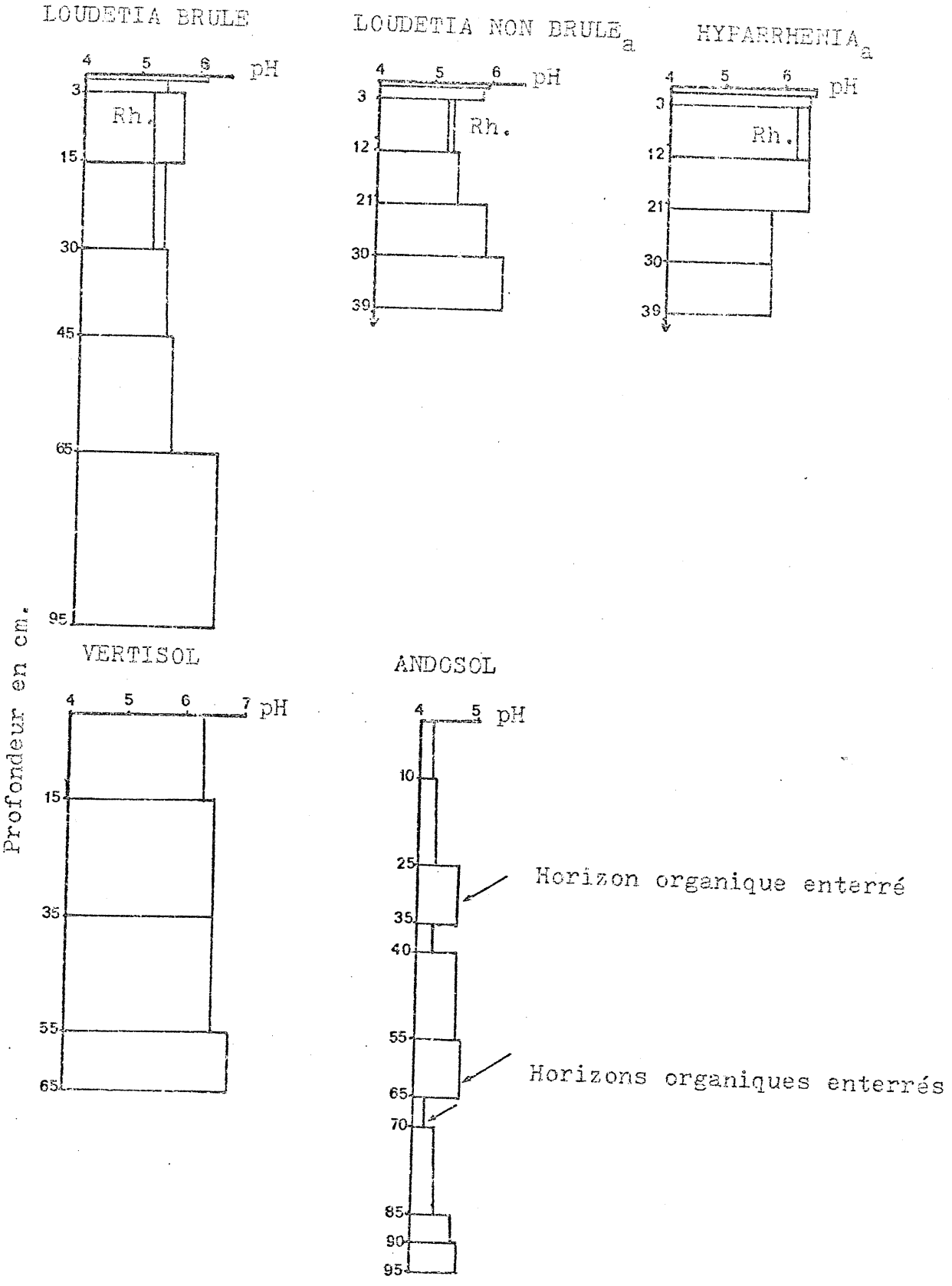


Fig. 16- pH des sols en fonction de la profondeur.
(proportion terre/eau : 1/1)

Rh. : niveau rhizosphérique.

d) Capacité totale d'échange (T) et le taux de saturation (V)

Ils ont été détérminés, par percolation à l'acetate d'ammonium N à pH 7, sur les niveaux faisant l'objet des études de l'activité microbienne.Le tableau 4 illustre les résultats de ces dosages.

La capacité totale d'échange de l'andosol,en général de l'ordre de 50 à 100 m.e. pour 100 g de terre sèche, se situe ici entre 13 et 50.Elle est constituée,pour la majeure partie,de charges variables avec le pH.Lorsqu'elle est mesurée au pH du sol qui est acide,elle peut être réduite à la moitié ou même au tiers de la valeur obtenue au pH 7 (tableau 4).De ce fait,le taux de saturation est souvent sous-estimé par rapport à la réalité,la corrélation de sa valeur avec le pH devenant alors non significative (DUCHAUFOUR, 1977).Ces propriétés particulières sont en fait celles des deux éléments principaux du complèxe colloïdal renfermant des composés humiques et l'allophane.

On trouve des quantités plus élevées de cations K^+, Ca^{++} et Mg^{++} en surface qu'en profondeur dans le cas de l'andosol,contrairement à ce qui s'observe dans le vertisol.Ce dernier est très pauvre en K^+, mais riche en Ca^{++} et Mg^{++}.Le rapport Ca/Mg joue un rôle dans le pH et le taux de saturation de ce sol .Lorsqu'il est normal (Ca > Mg), les valeurs du pH et de V sont élevées (pH 7 et V 95), elles diminuent lorsque ce rapport s'inverse (Ca < Mg).La capacité d'échange élevée du ce sol est due presque exclusivement à l'abondance des argiles gonflantes

Les faibles valeurs de la capacité d'échange des sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia (2,3 à 4,55 %) semblent être due à l'abondance des argiles de type kaolinite.

e) Détérmination de l'allophane (Test au fluorure)

Une des propriétés de l'allophane est qu'en présence de fluorures à pH supérieur à 7 elle libère des ions OH^- de l'aluminosilicate qui élèvent fortement le pH et forme des fluoaluminates (Test de FIELDES, 1966)

La réaction qui se déroule après addition de NaF dans un échantillon de sol peut être considérée comme une réaction d'échange entre les ions F et OH^- qui se trouvent sur les arêtes du complèxe minéral contenant Al et Fe.Elle peut s'ecrire par la formule suivante:

Sol	Niveaux cm	K^+ méq/100gTS	Ca^{++} méq/100gTS	Mg^{++} méq/100gTS	S K+Ca+Mg	T NH_4^+	V=S/T X100	pH
Andosol	0 - 10*	1,6	12,4	5,26	19,26	50,6	38,0	4,2
	10 - 25	0,18	4,68	0,76	5,62	34,1	16.5	4,3
	25 - 35	-	-	-	-	-	-	4,7
	35 - 40	0,09	5,9	0,98	6,97	34,5	20,2	4,3
	40 - 55	0,44	5,03	1,05	6,52	19,2	34,0	4,7
	55 - 65	0,09	4,96	1,07	6,12	24,8	24,7	4,8
	65 - 70	0,05	5,23	1,01	6,29	28,4	22,1	4,2
	70 - 85	0,07	3,88	0,63	4,58	17,95	25,5	4,0
	85 - 90	0,11	3,29	0,58	3,98	17,54	22,7	4,7
	90 - 95	0,09	3,47	0,99	4,55	13,17	34,6	4,8
Vertisol	0 - 15	0,43	11,17	11,12	22,72	20,57	110,5	6,3
	15 - 35	0,61	11,46	11,86	23,93	28,56	83,8	6,5
	35 - 55	0,25	15,21	17,25	32,71	19,32	169,3	6,5
	55 - 65	0,36	13,34	17,34	31,04	27,29	113,7	6,8
sol sous Loud.	0 - 5	0,20	3,05	0,89	4,14	2,97	139,4	6,4
	5 - 30	0,11	2,50	0,66	3,27	2,32	140,9	6,2
sol sous Hyparrhenia	0 - 15	0,23	3,76	1,22	5,21	4,55	114,5	6,5
	15 - 45	0,17	2,86	0,67	3,70	3,72	99,5	5,7

Tableau 4- Capacité totale d'échange (T) et le taux de saturation des échantillons. (méq/100gTS)

(* mélange de cinq échantillons)

$$\text{minéral-OH}^- + F^- \longrightarrow \text{Minéral-F}^- + OH^-$$

Quant à la réaction du fluorure avec Al et Fe, elle peut s'exprimer ainsi :

$$Al(OH)_3 + 6\,MF \longrightarrow M_3AlF_6 + 3MOH$$

$$10\,MF + Fe_2O_3 + 3\,H_2O \longrightarrow 2M_2FeF_5 + 6\,MOH \qquad M: \text{minéral}$$

Les ions F^- peuvent solubiliser Al^{3+} et Fe^{3+} libérant ainsi les ions OH^- en accord avec les équations ci-dessus;La libération des OH^- est très rapide durant les premières minutes après addition d'une solution de fluorure et se stabilise après 30 minutes.Par ailleurs,on a mis en évidence le fait que la quantité d'OH^- s'accroît avec l'augmentation de la proportion de fluorure dans l'échantillon.

Les sols analysés à cette fin sont les suivants :

- Andosol à allophane
- Sol sableux à pseudogley de pente (Loudetia à kaolinite)
- Sol ferrugineux tropical rouge de plateau (Hyparrhenia kaolinite,illite)
- Vertisol (Loudetia, argile de type montmorillonite)

La méthode exige la mise en oeuvre d'un gramme de terre sèche sans matière organique.Le premier pas consiste donc à calculer l'équivalent d'un gramme de terre dépourvue de matière organique et d'humidité. Pour ce faire,il suffit de tenir compte de la teneur en C en H_2O des sols.

La destruction de la matière organique se fait au moyen de H_2O_2 à 30 % à chaud, sur un bain de sable.Cette opération est réitérée jusqu'à disparition de la mousse dans le cas du vertisol (on ne parvient pas à faire disparaître la couleur noire) et jusqu'à obtention d'une couleur blanchâtre dans le cas des sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia Ensuite on lave les échantillons avec de l'acétone à 50, 75 et puis 100 % en centrifugeant après chaque lavage.Ainsi on obtient des échantillons de sols prêts à l'analyse.

Par ailleurs,on prépare une solution de NaF 0,5 N et on la transvase très rapidement dans un récipient en plâstique,vu l'effet corrosif de NaF vis-à-vis du verre.

La partie la plus délicate de la manipulation se situe au moment de l'addition de NaF.(Rappelons ici que le rapport terre/NaF est de 1/50) En effet,en raison de la velocité des réactions d'échange ayant lieu après adjonction de NaF,il est indispensable d'agiter l'échantillon tout en versant NaF pour obtenir une homogénéisation aussi parfaite que possible.Mais celle-ci n'est pas toujours réalisable, car la masse d'allophane se délite très mal et ainsi on risque de ne pouvoir respecter l'intervalle du temps de mesure (d'où la mesure tardive de l'échantillon n° 7 de l'andosol)(Fig. 17).Pour faire face à cet inconvénient,nous avons procédé à l'addition, dans les échantillons n° 6,7,8 et 9 ajusté , chacun, à 51 g (50 ml d'eau + 1 g de terre sèche) de NaF en poudre de façon à obtenir une solution 0,5 N.Puis on a lu immédiatement la réaction (tableau 5 et fig. 18).

Calcul de la concentration des ions OH^- dissous après addition de NaF 0,5 N

On sait que le pH est le logarithme de l'inverse de la concentration des ions H^+, exprimée en ions-gramme par litre.

$$pH = - \log I H^+ I \qquad -1-$$

D'autres part,si on considère la concentration des ions OH^-, elle peut être exprimée comme

$$pOH = - \log I OH^- I \qquad -2-$$

Dans une solution neutre,le pH est égal à 7,puisque la concentration des ions H^+ est égale à 10^{-7}.En employant la même notation analogue pour définir la concentration des ions OH^-, on aura ;

$$pH + pOH = 14 \quad -3- \qquad \text{et} \quad pOH = 14 - pH \quad -3_a-$$

Cette égalité est la base de nos calculs.A partir des valeurs du pH, il suffit de faire une soustraction (3_a) pour obtenir le pOH qu'il est facile,par la suite, de convertir, à l'aide de l'équation (2) en nombre donc en concentration (mol/litre) des ions OH^-.

Un exemple de calcul :

Prenons l'échantillon n° 1. Au bout de 2 minutes après addition de NaF, on obtient un pH de 7,3.Puisque pH + pOH = 14,

$$pOH = 14 - 7,3 = 6,7$$

D'autre part, $pOH = - \log |OH^-|$

$6,7 = - \log |OH^-|$ ----- $\log I\ OH^-\ I = - 6,7$

$$OH^- = \frac{1}{10^{+6,7}} = 0,02 \times 10^{-5} \text{ mol/litre.}$$

On constate que l'allophane libère OH^- continuellement en quantités très largement supérieures à celles provenant d'autres argiles. L'augmentation du pH est très rapide et au bout de deux minutes après addition de NaF on obtient des valeurs de pH variant entre 9,3 et 10,7 (fig. 17)

Nos résultats font ressortir que l'andosol se distingue très nettement des autres sols. La quantité d'OH^- libérée par l'allophane de notre sol oscille entre 16×10^{-5} et 100×10^{-5} mol/litre/60 minutes, alors que pour des sols du Chili on a obtenu $9,9 \times 10^{-5}$ et 79×10^{-5} mol OH^-/litre/60 minutes. (Rodriguez 1971, Urbina, 1969).

Les sols de Côte d'Ivoire n'ont manifestement pas d'allophane. Les ions OH^- libérés au bout de 60 minutes varient entre $0,04 \times 10^{-5}$ et $0,8 \times 10^{-5}$ mol OH^-/litre. Le sol ferrugineux tropical rouge se distingue par une valeur plus élevée, par rapport au sol sableux. Ceci est à mettre en relation avec la présence d'éléments granitiques. Les sols sans allophane du Chili donnent des valeurs de $0,08$ à $0,37 \times 10^{-5}$ mol/litre.

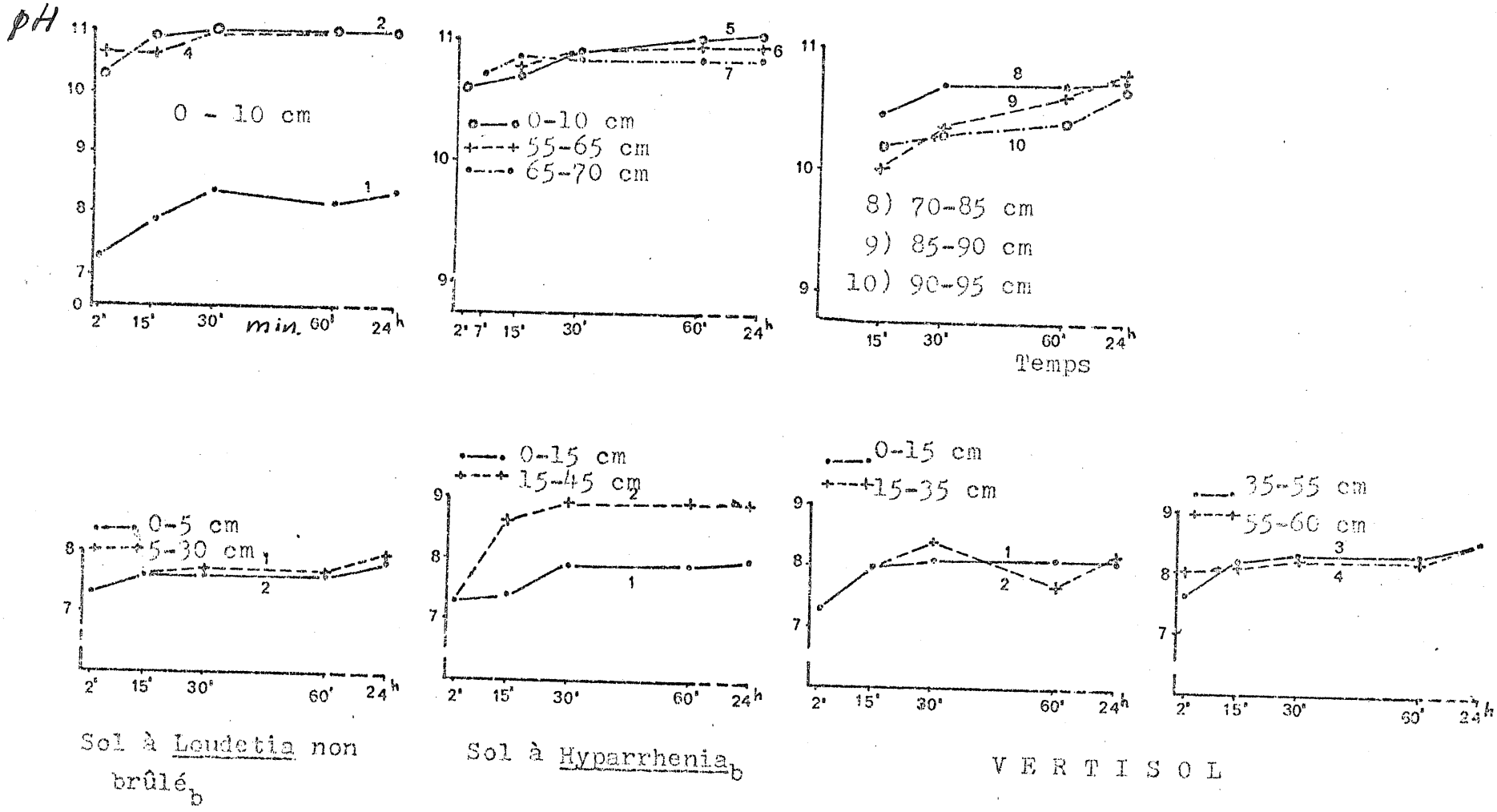
On sait que les sols libérant au dessus de 10×10^{-5} mol OH^-/l peuvent être considérés comme des sols allophaniques.

f) Caractéristiques de la matière organique des sols

Nous avons déterminé la teneur en C, en N total et minéral des sols.

Pour le carbone on a appliqué la méthode ANNE, pour l'azote la methode KJELDAHL. L'azote minéral a été estimé selon la méthode DROUINEAU et GOUNY (1947) (extraction au $CaCl_2$ N ou au KCl 2N, déplacement de $N.NH_4^+$ par MgO et entraînement de celui-ci par la vapeur d'eau dans l'acide borique contenant, comme indicateur, le réactif de MA et ZUAZAGA, $N.NO_3^-$ est titré après réduction par l'alliage DEVARDA et une deuxième distillation).

A N D O S O L



Sol à Loudetia non brûlé$_b$

Sol à Hyparrhenia$_b$

V E R T I S O L

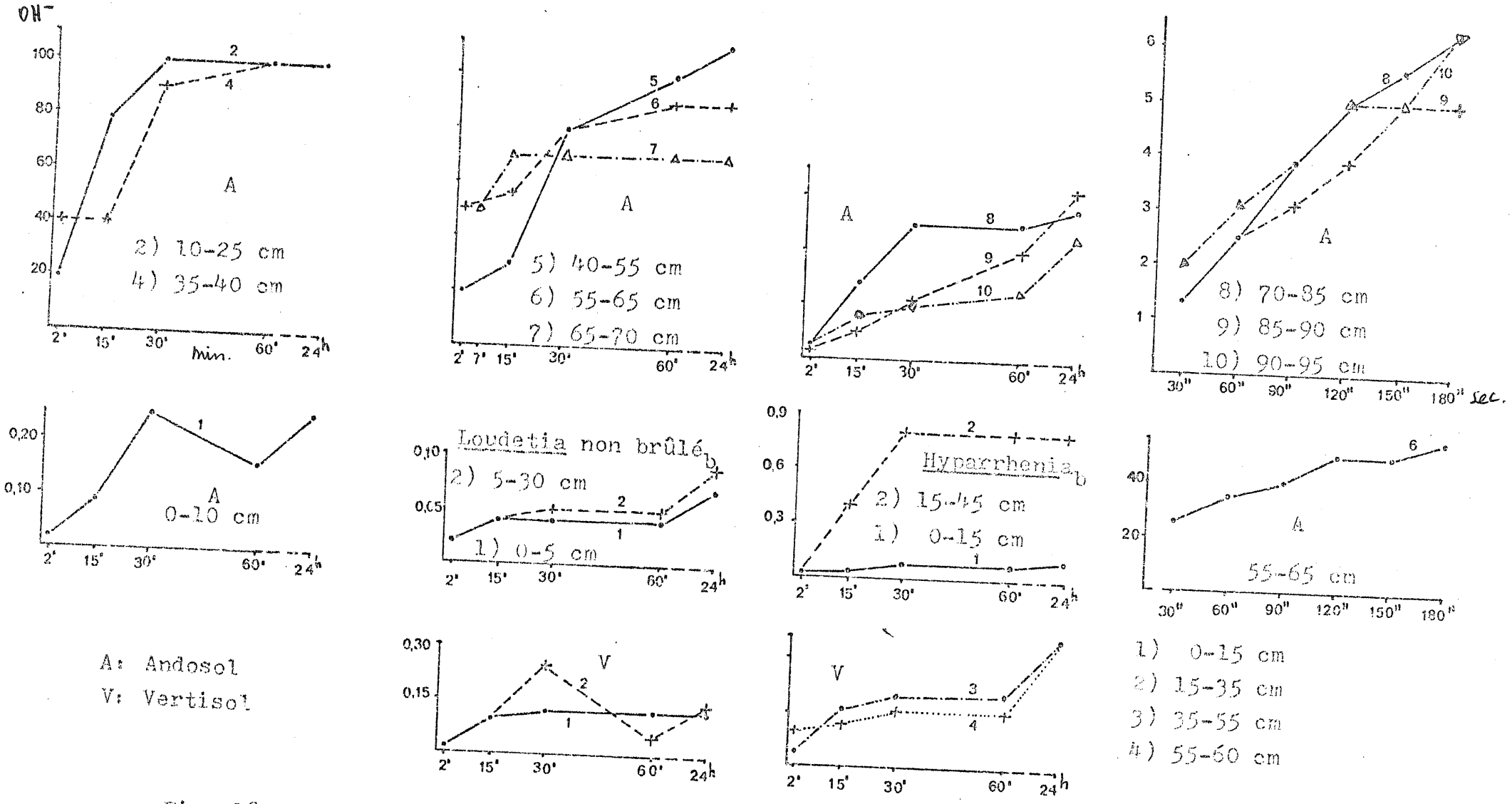
Fig. 17 - Augmentation du pH après addition de NaF 0,5 M dans des échantillons de sols analysés (voir également le tableau 5)

Sol	Profondeur cm	Temps en minutes lecture du pH 2'	15'	30'	60'	24h	OH^- mol/1X10^{-5} au bout de : Temps en minutes 2'	15'	30'	60'	24h
ANDOSOL	1. 0 - 10	7,3	7,9	8,4	8,2	8,4	0,02	0,08	0,25	0,16	0,25
	2. 10 - 25	10,3	10,9	11,0	11,0	11,0	20	79	100	100	100
	3- 25 - 35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4- 35 - 40	10,6	10,6	10,9	11,0	11,0	40	40	90	100	100
	5- 40 - 55	10,6	10,7	10,9	11,0	11,05	40	50	80	100	112
	6- 55 - 65	10,7	10,75	10,9	10,95	10,95	50	56	80	90	90
	7- 65 - 70	-	10,85	10,85	10,85	10,85	-	70	70	70	70
	8- 70 - 85	9,7	10,45	10,7	10,7	10,75	5,0	28	50	50	56
	9- 85 - 90	9,6	10,0	10,35	10,6	10,8	3,0	10	22	40	63
	10- 90 - 95	9,7	10,2	10,3	10,4	10,65	5,0	16	20	25	45
LOUDETIA b	0 - 5	7,3	7,6	7,6	7,6	7,85	0,02	0,04	0,04	0,04	0,07
	5 - 30	7,3	7,6	7,7	7,7	7,95	0,02	0,04	0,05	0,05	0,09
HYPARR b	0 - 15	7,3	7,4	7,9	7,9	8,0	0,02	0,03	0,08	0,08	0,10
	15 - 45	7,3	8,6	8,9	8,9	8,9	0,02	0,40	0,80	0,80	0,80
VERTISOL	0 - 15	7,3	8,0	8,1	8,1	8,1	0,02	0,10	0,12	0,12	0,12
	15 - 35	7,3	8,0	8,4	7,7	8,15	0,02	0,10	0,25	0,05	0,14
	35 - 55	7,6	8,2	8,3	8,3	8,55	0,04	0,16	0,20	0,20	0,36
	55 - 60	8,0	8,1	8,2	8,2	8,55	0,10	0,12	0,16	0,16	0,36

Tableau 5- Valeurs de pH à 20°C de 1 g de sol sec dépourvu de matière organique mélangé dans 50 ml de NaF 0,5 M (pH initial :7,95) en fonction du temps.

ANDOSOL

n°	Prof. cm	Lecture du pH Temps en secondes 30"	60"	90"	120"	150"	180"	OH^- mol/1 X 10^{-5} au bout de: Temps en secondes 30"	60"	90"	120"	150"	180"
6	55-65	10,4	10,55	10,6	10,7	10,7	10,75	25	35	40	50	50	56
8	70-85	9,1	9,4	9,6	9,7	9,74	9,8	1,3	2,5	3,9	5,0	5,6	6,3
9	85-90	9,1	9,4	9,5	9,6	9,7	9,7	1,3	2,5	3,1	3,9	5,0	5,0
10	90-95	9,3	9,5	9,6	9,7	9,7	9,8	2,0	3,1	3,9	5,0	5,0	5,3
7	65-70	pH à 7':10,7 OH^- mol/1 X 10^{-5} :50											



A: Andosol
V: Vertisol

Fig. 18 - Concentration des ions OH^- (mol/l X 10^{-5}) dissous après addition de NaF 0,5 M.
Noter la disparité des échelles.

Les valeurs obtenues confirment la grande richesse en C des andosols.Les horizons organiques enterrés sont reperés par leur forte teneur.Dans l'ensemble du profil,la quantité du carbone diminue progressivement vers la profondeur (tableau 6), depuis 27,2 % à 1,4 %. Il en est de même pour l'azote.Les valeurs varient entre 17,5 ‰ et 1,2 ‰.Le rapport C/N suit le même rythme que ces deux éléments.

Parmi les sols de Lamto, le vertisol est,comme on pouvait s'y attendre, très distinct par une teneur double en C par rapport aux autres sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia.En outre,la matière organique diminue progressivement vers la profondeur.L'azote montre une répartition analogue à celle du carbone.Le rapport C/N a des valeurs élevées en surface (20) qui décroissent en profondeur (13,3).Ces teneurs élevées du vertisol sont dues au complèxe dans lequel argile et humus sont intimement liés.

Le sol sous Loudetia brûlé est plus pauvre tant en C qu'en N par rapport au faciès non brûlé.Le feu semble n'avoir une action que sur les trois premiers cm.La répartition en profondeur des racines entraîne une accumulation des debris végétaux dans les horizons profonds où l'on trouve presque autant de C qu'àla surface des sols.Cette quantité du carbone des niveaux rhizosphériques est d'ailleurs à l'origine des fortes valeurs du rapport C/N (22,7 et 29,1) dans le cas du sol sous Loudetia brûlé, 17,3 dans le faciès non brûlé.Les autres niveaux oscillent entre 16,6 et 18,7 pour le premier faciès, 12;5 et 16 pour le deuxième.Si l'on tient compte de la date de prélèvement de ces sols (petite saison des pluies) le lessivage joue aussi un rôle dans la distribution du C/N (tableau 6).

Le sol ferrugineux tropical rouge sous Hyparrhenia se distingue sensiblement du sol hydromorphe sableux de Lamto.Sa teneur en C est double en surface et davantage en profondeur.Le rapport C/N est compris entre 14 et 20, avec un maximum pour le niveau rhizosphérique.

En ce qui concerne l'azote minéral, l'andosol se situe à part (tableau 7).On remarque surtout la teneur élevée en $N.NO_3^-$ dans le niveau superficiel (0-10 cm).Ensuite les valeurs décroissent rapidement.Cette diminution peut être expliquée par l'adsorption des ions NO_3^- par l'allophane.

Sol	Profondeur cm	n°	C %	N ‰	C/N	M.O./100g TS C% X 1,724
Andosol	0 - 10	1_a	14,8	9,1	16,3	25,5
	"	1_b	17,9	11,2	16,0	30,9
	"	1_c	27,2 18,3	16,5 13,8	16,5 13,3	46,9 31,5
	"	1_d	25,8	17,5	14,7	44,5
	"	1_e	20,2	13,6	14,9	34,8
	10 - 25	2	10,3	9,4	10,9	17,8
	25 - 35	3	14,1	8,6	16,4	24,3
	35 - 40	4	10,9	8,6	12,7	18,8
	40 - 55	5	3,4	3,2	11,3	5,8
	55 - 65	6	6,4	5,7	10,6	11,0
	65 - 70	7	8,6	7,7	11,1	14,8
	70 - 85	8	4,7	2,6	15,6	8,1
	85 - 90	9	2,4	2,9	8,0	4,1
	90 - 95	10	1,4	1,2	11,3	2,4
Loudetia brûlé	0 - 1	1	0,69	0,37	18,6	1,2
	1 - 3	2	0,61	0,37	16,6	1,1
	3 - 15 Rh	3	0,93	0,41	22,7	1,6
	3 - 15	4	0,58	0,31	18,7	1,0
	15 - 30 Rh	5	0,76	0,26	29,1	1,3
	15 - 30	6	0,40	0,22	18,2	0,7
	30 - 45	7	0,30	0,11	27,7	0,5
	45 - 65	8	0,19	-	-	0,3
Loudetia non b. a	0 - 1	1	1,6	1,0	16,0	2,8
	1 - 3	2	1,1	0,75	14,6	1,9
	3 - 12 Rh	3	1,3	0,75	17,3	2,2
	3 - 12	4	0,9	0,60	15,0	1,6
	12 - 21	5	0,7	0,45	15,5	1,2
	21 - 30	6	0,5	0,37	13,5	0,8
	30 - 39	7	0,4	0,32	12,5	0,7
b	0 - 5	1	0,85	0,51	16,7	1,5
	15 - 30	2	0,57	0,37	15,6	1,0
Hyparrhenia a	0 - 1	1	1,4	0,8	17,5	2,4
	1 - 3	2	1,2	0,6	20,0	2,1
	3 - 12 Rh	3	1,2	0,6	20,0	2,1
	3 - 12	4	0,8	0,5	16,0	1,4
	12 - 21	5	0,7	0,4	17,5	1,2
	21 - 30	6	0,7	0,5	14,0	1,2
	30 - 39	7	0,8	0,5	16,0	1,4
b	0 - 15	1	1,0	0,65	15,4	1,7
	15 - 45	2	0,6	0,42	14,3	1,0
Vertisol	0 - 15	1	2,6	1,3	20,0	4,5
	15 - 35	2	1,9	1,1	17,3	3,3
	35 - 55	3	1,2	0,8	15,0	2,1
	55 - 65	4	0,8	0,6	13,3	1,4

Tableau 6- La teneur en C, en N et le rapport C/N des sols. (les chiffres verticaux soulignés sont ceux du mélange de cinq échantillons de surface)

Dans le cas des sols de Lamto, la teneur en NH_4^+ est plus importante que celle en NO_3^- . Mais elle n'est souvent que de l'ordre de 1 à 5 ppm, ce qui est à la limite de la détérmination.Le sol sous Loudetia non brûlé contient plus de NH_4^+ (24,4 ppm en surface), il est suivi de Hyparrhenia$_a$. Par contre l'azote minéral accumulé dans le sol sous Loudetia brûlé est presque nul.

Sol	n°	N.NH_4^+	N.NO_3^-	Sol	n°	N.NH_4^+	N.NO_3^-
ANDOSOL allophane	1_a	119,2	33,6	sol sous LOUDETIA brûlé X	1	1,0	-
	1_b	72,0	134,5		2	1,0	4,4
	1_c	2,1	302,4		3	-	-
	1_d	2,3	419,5		4	-	-
	1_e	-	117,6		5	6,0	-
	2	-	20,8		6	-	2,2
	3	7,1	-		7	1,6	1,6
	4	2,3	18,5		8	1,0	-
	5	-	6,5		9	1,0	-
	6	-	9,9				
	7	-	5,9				
	8	-	8,0				
	9	-	-				
	10	-	-				
sol sous HYPARRH. X	1	4,4	-	sol sous LOUDETIA non brûlé X	1	24,4	-
	2	1,6	-		2	8,8	1,6
	3	1,0	-		3	6,0	4,4
	4	1,0			4	3,2	3,8
	5	1,6	1,0		5	-	-
	6	7,8	2,8		6	5,6	-
	7	7,3	1,6		7	1,0	-

Tableau 7 - Teneur en N minéral (en ppm) des sols analysés.
(X dosage effectué sur sols sèchés à l'air)

CHAPITRE II

- RESULTATS :Activités microbiologiques et biochimiques.

- Divergence de sols dans la dégradation de la matière organique

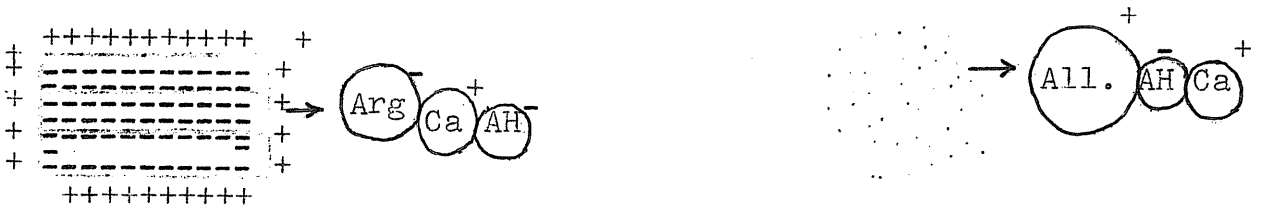
Dans ce travail de recherche, nous avons utilisé des échantillons de sols de caractères phisyco-chimiques différents.

Le constituant principal du sol volcanique est l'allophane, argile de charge globale nette positive, alors que toutes les autres argiles portent une charge globale (-).

Les sols prélèvés à Lamto ont des argiles de type montmorillonite (vertisol) et de illite-kaolinite (sols sous Loudetia et sous Hyparrhenia

La plus grande divergence de ces sols dans la dégradation de la matière organique provient de la disposition de leurs argiles.On sait que montmorillonite et illite-kaolinite ont une disposition en feuillets tandis que l'allophane est amorphe aux rayons X.

On connaît la faible capacité de rétention des illite et kaolinite Par conséquent nous ne jugeons utile de comparer que les sols à montmorillonite et les sols à allophane.Le schéma suivant explicite la nature phisique des deux fractions colloïdales minérales des sols que nous étudions :



Montmorillonite -1- Allophane -2-

Dans le cas -1- les ions Ca^{++} sont directement fixés à la surface des argiles.Dans le cas -2-, ce sont les acides humiques et les anions qui sont adsorbés sur l'allophane et Ca^{++} vient se fixer sur les acides humiques.Ces derniers sont de type gris dans les sols à montmorillonite et constituent un complèxe argilo-humique floculé sous l'influence de l'ion Ca^{++}.Ce complèxe est très stable.

Dans le cas de l'allophane,c'est cette dernière qui prend le rôle de Ca^{++} et stabilise l'humus.

A) Minéralisation du C organique

La principale source de la matière organique, donc d'énergie est constituée par les debris végétaux, aériens et souterrains. Ceux-ci sont soumis à la biodégradation selon les modalités imposées par l'environnement global physico-chimique, microclimatique et biotique.

La matière organique fraîche se transforme peu à peu et donne naissance d'une part, à des élements minéraux solubles ou gazeux (NH_4^+ , NO_3^- , CO_2), c'est le phénomène de minéralisation, et d'autre part à des complèxes colloïdaux relativement stables et résistants à l'action microbienne : C'est l'humification (SCHAEFER, 1976)

I- Dégagement de CO_2 in vitro

L'activité biologique d'un sol peut se mesurer par le dégagement de CO_2, produit terminal des chaînes de dégradation en conditions aérobies.

En opposition à la respiration, et en conditions d'aération réduite, jusqu'à l'anaérobiose stricte, les processus de fermentation entraînent l'accumulation des métabolites intermédiaires et, par là, le faible dégagement de CO_2.

La minéralisation du carbone organique est le reflet du métabolisme de la totalité du peuplement du sol (SCHAEFER, 1974). Le dégagement de CO_2 est un indice d'activité globale qui permet de situer l'importance du peuplement et sa vitalité, en fonction du taux de substrat énérgetique disponible et des conditions physiques et chimiques du microenvironnement. Le flux de CO_2 provenant de l'activité du peuplement microbien est un maillon fondamental dans le bilan énergétique d'un écosystème donné.

Fondamentalement le dégagement de CO_2 d'un type de sol donné est fonction, à un moment précis, de :

- la teneur en eau,
- la teneur en élements biogènes (N,P),
- la teneur en substrats énergétiques et de leur accessibilité,

et par conséquent de l'abondance, de l'activité et de la diversité spécifique de la microflore. In situ, intervient, de plus, la modulation de ces paramètres.

En conditions tropicales humides, l'activité microbienne, accélérée par des conditions thermiques et hydriques optimales, est aussi

à l'échelle de la biomasse végétale disponible.Le dégagement de CO_2 est donc ici un critère particulièrement utile.

Technique : Le principe en est simple.On mesure le dégagement de CO_2 in vitro, en conditions contrôlées de température, d'humidité et d'aération dans des Erlenmeyers de 500 ml contenant des échantillons de sol tamisé à 2 mm.Ces sols sont ou à l'humidité du prélèvement (ici,sol volcanique) ou ajustés à 80 % de la capacité au champ (sols de Lamto)(Fig. 19).Ces fioles sont portées à l'étuve à 28°C ,régime constant.L'humidité des échantillons est réajustée constamment.

En général, on fait une mesure après 2-3 jours d'incubation puis tous les 4 jours.

Le CO_2 dégagé est absorbé par $Ba(OH)_2$ qui donne naissance à $BaCO_3$ insoluble.La baryte est titrée par de l'acide oxalique, de titre empirique N/22 (2,8652 g/l; 1ml ---> 1 mg de CO_2), en présence de l'indicateur phénolphtaléine.

On opère par dépression : tout le CO_2 occlus dans les pores est échangé (Fig. 20).

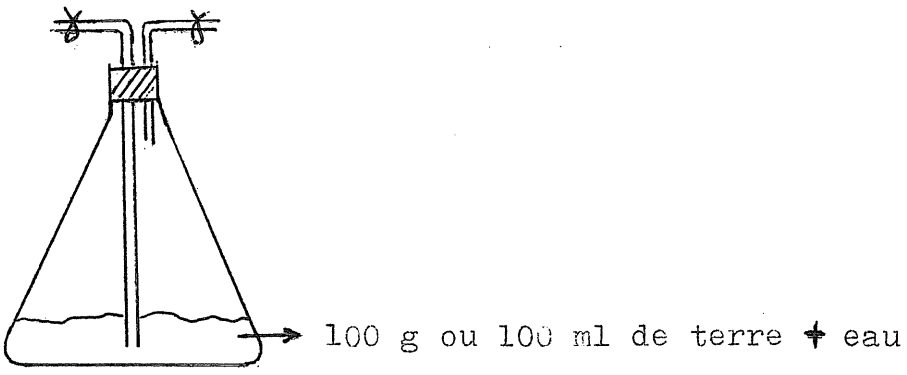


Fig. 19- Unité respirometrique (in vitro)(Fiole de 500 ml)

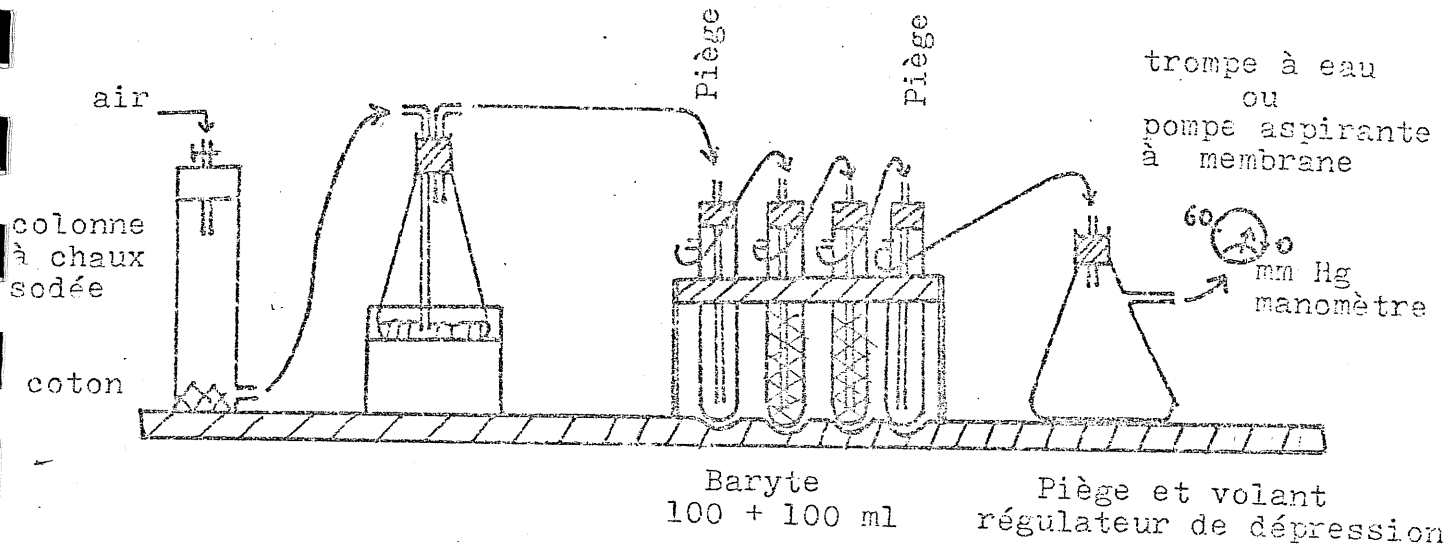


Fig. 20 - Unité de mesure du dégagement de CO_2

a) Activité potentielle (niveau témoin) en conditions controlées

Afin de réaliser cette expérience, nous avons utilisé des échantillons frais de sol volcanique, alors que les sols de Lamto étaient séchés à l'air.

Les sols volcaniques ont été incubés à leur humidité actuelle qui correspond plus ou moins à leur capacité au champ (tableau 3). Afin de disposer de l'espace suffisant à l'aération dans les fioles, nous avons pris 50 g de terre fraîche dans chaque horizon correspondant. L'expérience a duré 45 jours pour les cinq échantillons de 0 à 10 cm et 30 jours pour les horizons sous-jacents, ceci en raison de la faible activité de ces derniers.

On constate que les échantillons de 0 à 10 cm s'écartent d'une façon éclatante des échantillons profonds (fig. 21). On voit aussi qu'à partir de 70 cm il n'y a aucun dégagement de CO_2 dans le cas de ces sols témoins. La figure 21 rassemble deux groupes d'échantillons de surface qui se distinguent facilement. Ces groupements sont sans doute dûs à la teneur initiale en C des sols concernés. En effet, les sols 1_a et 1_b ont respectivement 14,8 et 17,9 % de C, et les valeurs de 27,2 et 25,8 % C correspondent aux échantillons n° 1_c et 1_d. Ces deux lots semblent également liés à l'humidité actuelle (initiale) des échantillons (tableau 3) (123,9 et 125,4 % pour 1_a et 1_b, 136 et 150,4 % pour 1_c et 1_d). L'échantillon 1_c se situe à peu près à

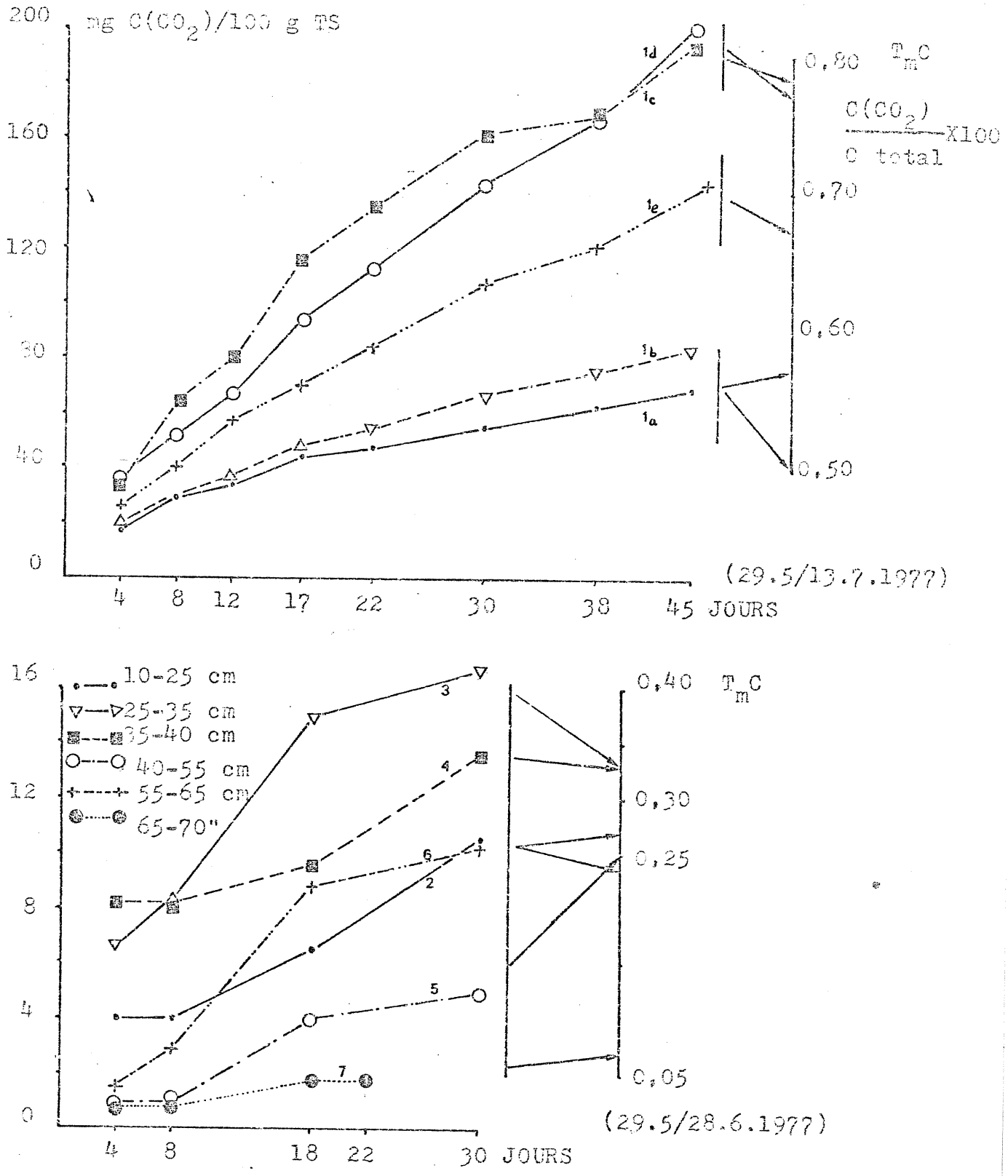


Fig. 21 - Minéralisation du C organique: Dégagement de CO_2. Courbes cumulatives et taux de minéralisation (T_mC).
(Andosol de La Réunion, incubé à 28°C constants è à l'humidité du prélèvement)

Noter la disparité des échelles.

équidistance des autres.Malgré son humidité proche(148,3 %) de celle du lot l_c-l_d, sa teneur en C est à l'intermediaire des valeurs des autres échantillons.Bien que l'expérience fût arrêtée au terme de 45 jours, nous sommes convaincu que le dégagement plus ou moins fort de CO_2 aurait continué.

Il découle donc de ces courbes que l'activité microbienne globale est directement liée à la matière organique disponible.Cette confirmation s'ajoute à celles de nombreux auteurs (SCHAEFER, 1966 RASHID, 1977).

En ce qui concerne les échantillons profonds, la minéralisation du C y a été très faible, même au début de l'incubation.C'est pourquoi les dosages de respirometrie ont été distancés de 8 à 10 jours,sans toutefois dépasser cette durée afin d'eviter une forte concentration de CO_2 dans les fioles, qui pourrait mpdifier l'activité microbienne.

Le taux de minéralisation du C organique est un bon indice de l'activité biologique globale du sol.Il est lié,dans les conditions naturelles, à de multiples facteurs, tels que d'une part la quantité et la qualité de la matière organique métabolisable, et d'autre part les conditions physico-chimiques du milieu : facteurs climatiques (humidité, température) et pedologiques (structure, pH, rH_2 etc.)Dans le cas des sols soumis à des conditions contrôlées, ce taux présente des variations saisonnières liées à la nature des substrats métabolisables et de la population microbienne au moment du prélèvement.

Le taux de minéralisation du C (carbone minéralisé en pour 100 du carbone total) du sol volcanique est nettement inférieur à 1 % (tableau 8 et fig. 25).L'écart devient plus important vers la profondeur. L'horizon n° 7 (65-70 cm) pour une teneur en C plus que double de celle de l'horizon n° 5 (40-55 cm) a un taux pourtant trois fois moins élevé. Ceci signifierait la non-accessibilité de la matière organique et surtout l'absence d'une population microbienne susceptible de dégrader celle-ci, ou bien encore l'effet d'un ou plusieurs facteurs limitants.

Les sols de Lamto étaient sèchés à l'air.Par souci d'homologie avec diverses études antérieures, nous avons ajusté leur humidité à 80 % de leur capacité au champ.De plus, la faible quantité d'échantillon disponible nous a obligé à ne prendre que 40 g de terre de chaque niveau étudié.

Echantillon n°	30 jours	45 jours
1_a	0,46	0,57
1_b	0,39	0,50
1_c	0,65	0,78
1_d	0,55	0,77
1_e	0,50	0,67
2	0,24	
3	0,33	pas
4	0,33	de
5	0,25	dosage
6	0,27	
7	0,07	

Tableau 8 : Taux de minéralisation du C du sol volcanique.
Sol non enrichi. $\frac{C(CO_2)}{C \text{ total}} \times 100$

Pour les sol sous faciès Loudetia brûlé (LB) et non brûlé (LNB) et le sol sous $Hyparrhenia_a$ (H) nous avons analysé quatre niveaux dont un rhizosphérique en vue de comparer ce dernier à un niveau non rhizosphérique qui se trouve à la même profondeur. La profondeur maximum des quatre niveaux étudiés atteint 15 cm. Les niveaux plus bas ont été exclus de ces études en raison de leur pauvreté en éléments biogènes (C, N)

Les sols sous $Loudetia\ non\ brûlé_b$ et sous $Hyparrhenia_b$ qui ont chacun deux niveaux, ainsi que le vertisol ont été analysés sur tous les niveaux prélèvés.

Les courbes cumulées de dégagement de CO_2 (fig. 22 A) indiquent une phase initiale caractérisée par une poussée métabolique due à la réhumidification. Le rôle du tamisage est également très important dans cette poussée métabolique, car il permet la redistribution des microorganismes et des substrats énérgetiques. Cette phase s'étale jusqu'à 7 jours; ensuite le dégagement de CO_2 s'infléchit et tend à être linéaire pour tous les niveaux étudiés.

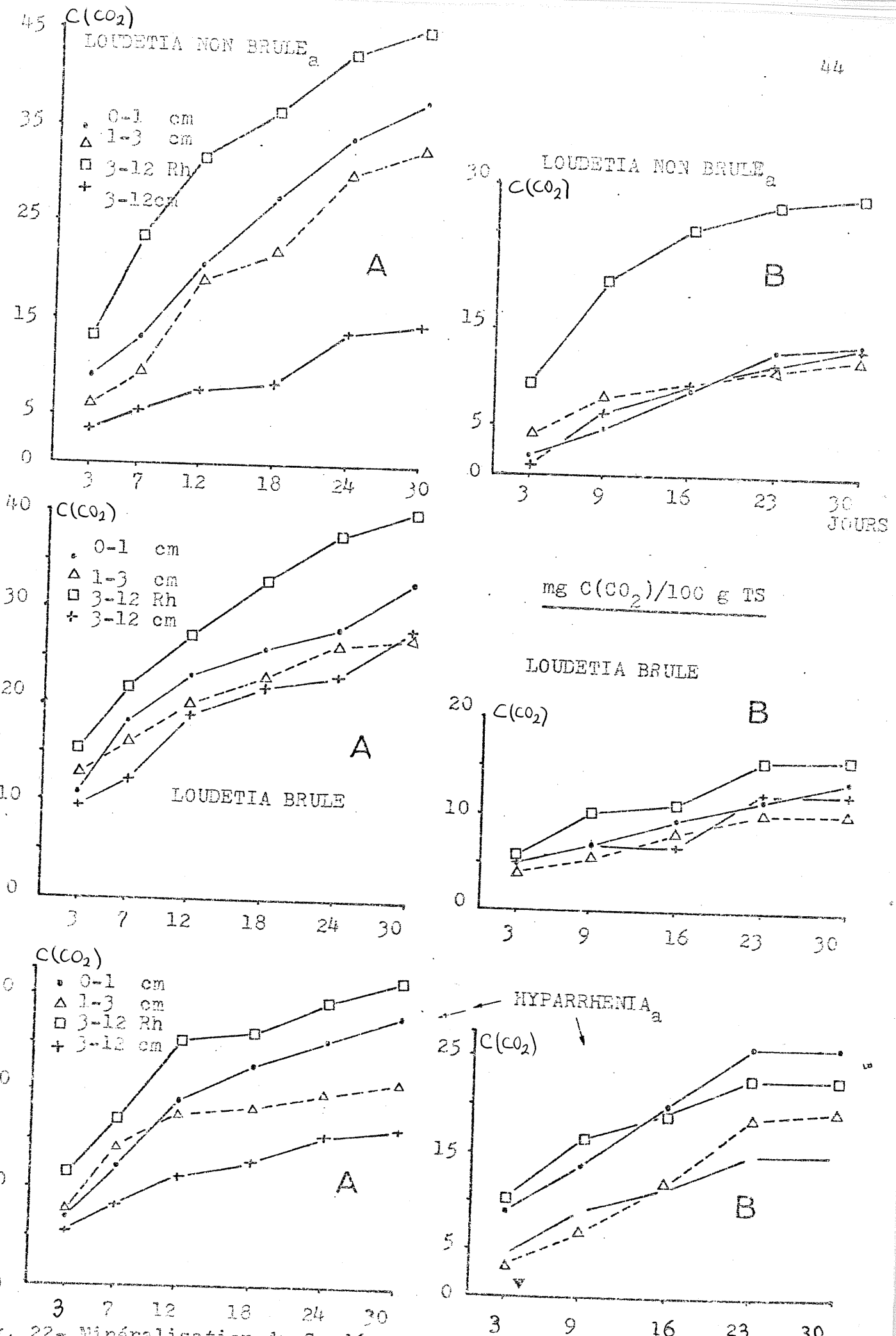


Fig. 22- Minéralisation du C; dégagement de CO_2, courbes cumulatives. A: Témoin, B: en présence de 200 ppm de $N\text{-}NO_3NH_4$ apporté (témoin non déduit) Sols de Lamto.

Les échantillons de niveau rhizosphérique manifestent une activité plus intense que les autres, bien que cette activité dans le sol sous Loudetia soit légèrement supérieure à celle dans le sol sous Hyparrhenia, ce qui est lié, sans doute à la richesse du premier.

Dans le cas du vertisol, le dégagement de CO_2, maximum au niveau de 0 à 15 cm, diminue avec la profondeur(Fig.24).En effet,les courbes correspondant aux différents niveaux sont très distinctes les unes des autres.Ce dégagement paraît donc être régi par la teneur en C de chaque niveau.Il en est de même pour les sols sous Loudetia non brûlé$_b$ et sous Hyparrhenia$_b$ (Fig. 23).

Le taux de minéralisation du C des sols de Lamto est très élevé par rapport au sol volcanique.Parmi ceux-ci, c'est le sol sous Loudetia brûlé qui présénte les taux les plus forts (Fig. 25).Par contre et en opposition avec les autres sols, on observe que ,ici; la respiration du niveau rhizosphérique est légèrement inférieure à celle du même niveau non-rhizosphérique.

On constate parfois que le taux de minéralisation est plus élevé dans les niveaux profonds par rapport à ceux de surface.Il serait donc inversement proportionnel à la teneur en C des niveaux concernés. RASHID (1977) qui a travaillé sur un anmoor à gley et un mull acide prélèvé dans une chaîne de sols forestiers a observé un dégagement in vitro de CO_2 plus important dans le premier que dans le second.Par contre il a obtenu un taux de minéralisation plus élevé dans le mull acide que dans l'anmoor, bien que ce dernier ait une teneur en C supérieure à celle du premier.

b) Tests d'activation répétitive en présence de divers substrats organique (C et N) et minéraux (P et Al).

Pour évaluer la capacité métabolique potentielle de la micropopulation du sol in vitro vis-à-vis de différents substrats, on a ajouté aux échantillons divers substrats dont le catabolisme a été suivi par rapport à un témoin, par le dégagement comparé de CO_2 et la minéralisation de N.

Le volume des échantillons disponibles limitant le nombre des répétitions, nous avons mélangé les cinq échantillons de 0 à 10 cm du sol volcanique.Les essais ont été poursuivis pendant 3 mois en ajoutant chaque mois,en quantité croissante, les substances suivantes(Tableau 9).

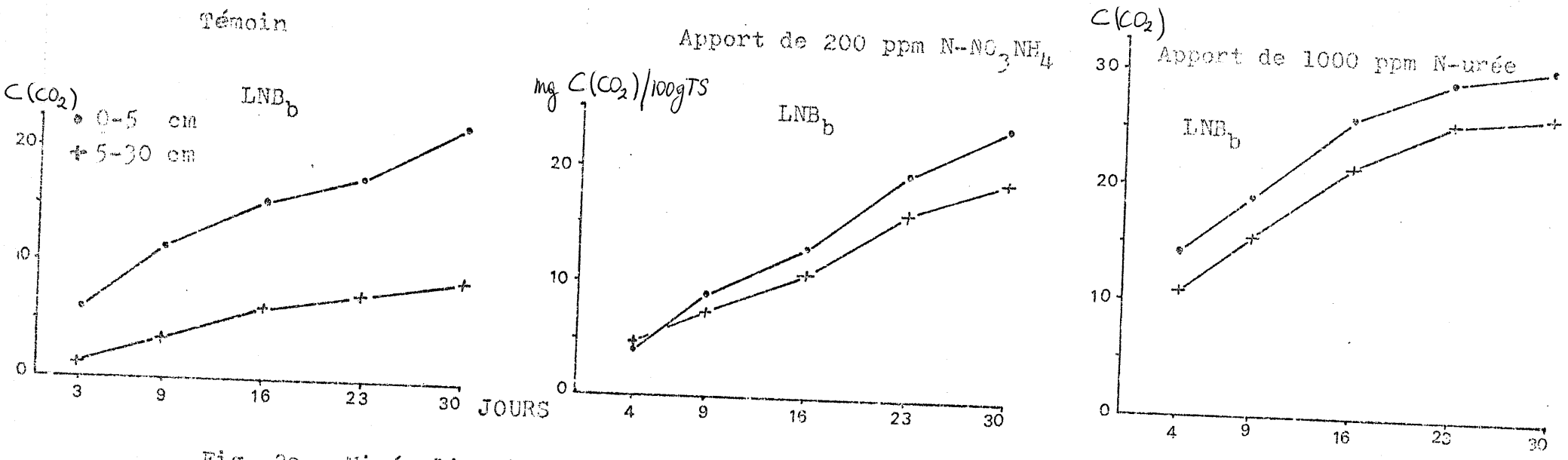
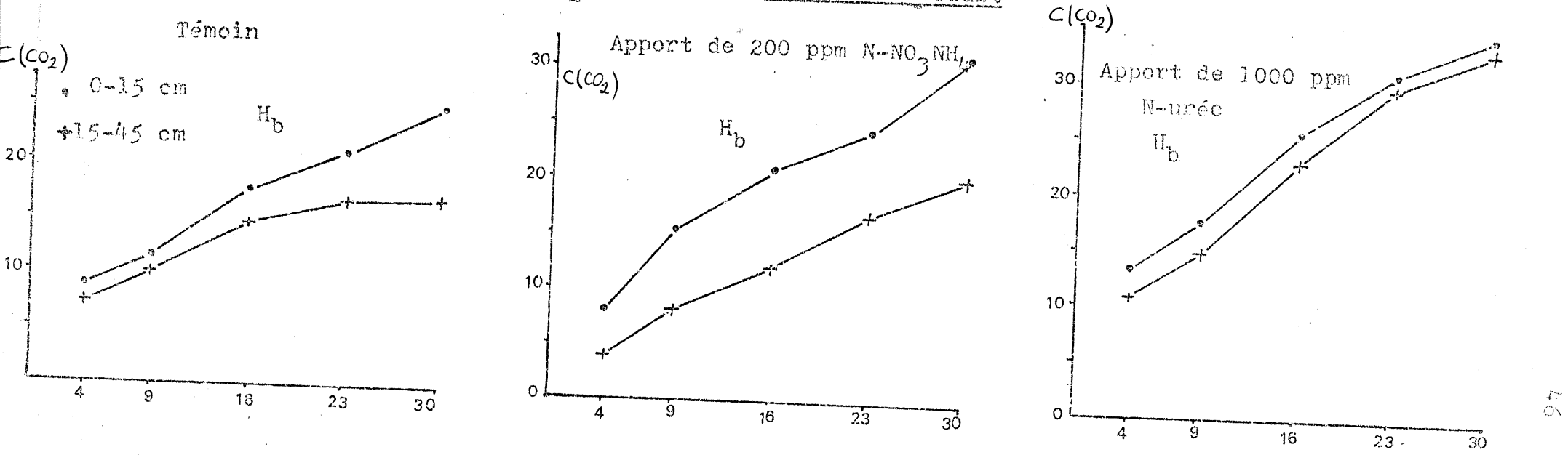


Fig. 23 - Minéralisation du C; dégagement de CO_2, courbes cumulatives :Sols de Lamto.

LNB_b :Loudetia non brûlé$_b$ H_b: sol sous Hyparrhenia$_b$

mg $C(CO_2)$/100 g TS, témoin non déduit



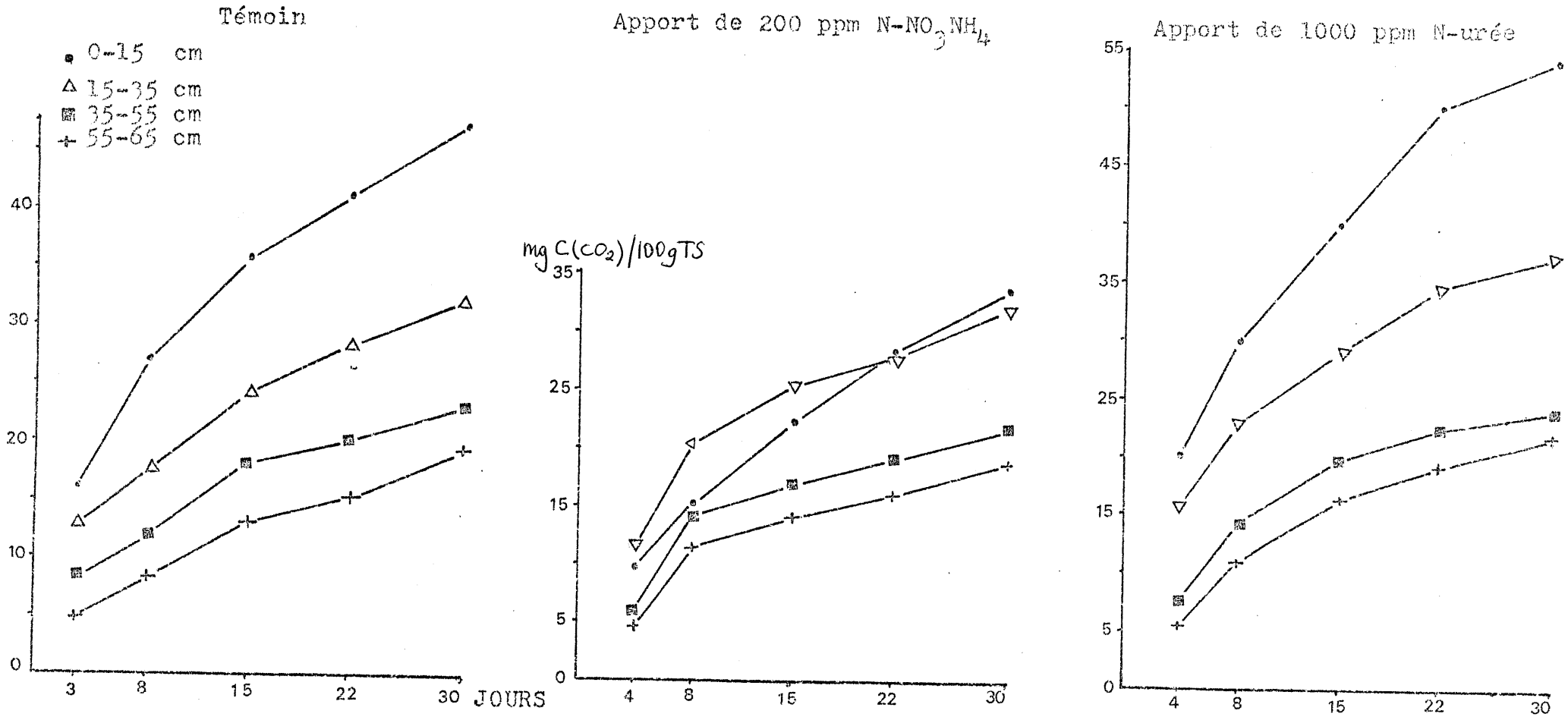
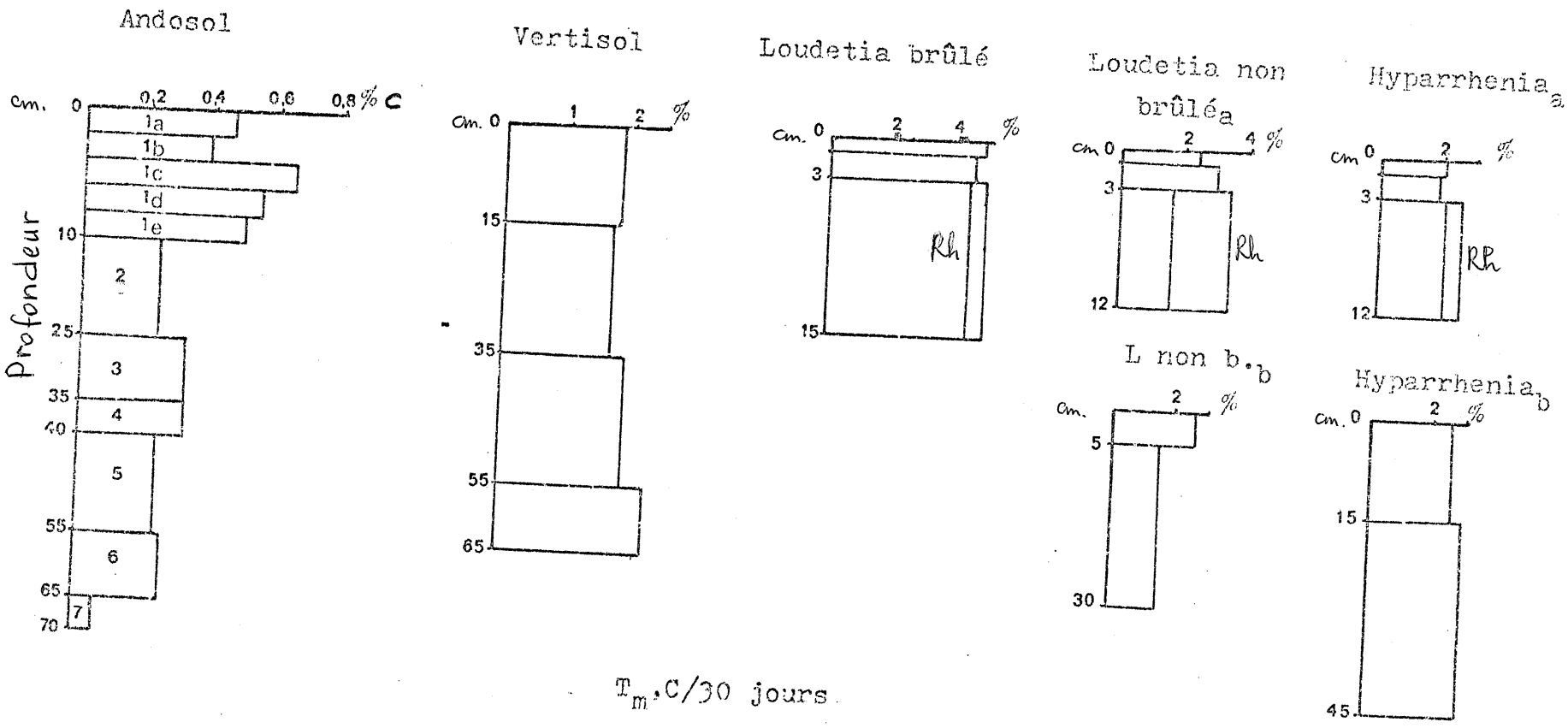


Fig. 24 - Minéralisation du C; dégagement de CO_2 , courbes cumulatives.: Le vertisol.

mg $C(CO_2)$/100 g TS, <u>témoin non déduit</u>



T_m, C/30 jours

Fig. 25 - Le taux de minéralisation (pour 100) du C des sols "témoin"

N°	élement	Substrat	Quantités en ppm			
			1er mois	2ème mois	3ème mois	Total
1	Al	$Al_2(SO_4)_3$	1000	2000	3000	6000
2	C	$CH_3COCOONa$	1800	1800	3600	7200
3	N org	Alanine DL				7200 C
		$C_3H_7NO_2$	700	700	1400	2800 N
4	N min	NO_3NH_4	700	1800 C pyruvate	700	1400 N 1800 C
5	P	KH_2PO_4	400	3600	12000	16000

Tableau 9 - Substrats ajoutés au mélange de cinq échantillons de surface du sol volcanique.

Dans le cas de l'Alanine DL, un apport de 700 ppm de N correspond à 1800 ppm de C, soit au total un apport de 7200 ppm de C.

Nous avons déterminé la teneur en C et en N de ce mélange:

C %	N %	C/N	
18,3	1,5	12.2	H_2O % : 137,9
			H. éq% : 126,9

L'équivalent à l'humidité équivalente de 30 g de sol volcanique sec est étalé en couche mince sur une feuille en plastique. Ensuite on ajoute les substrats en les incorporant de façon homogène au sol. Le mélange est mis dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml et incubé à 28°C. Le CO_2 dégagé est mesuré périodiquement pendant 30 jours. Ensuite on ressort des fioles l'échantillon où on apporte la seconde dose prévue de substrats. La même opération se répète pour le troisième apport.

On observe un parallélisme entre les courbes du premier mois d'incubation (Fig. 26). En effet, après la petite pente qui correspond au début de l'expérience le dégagement devient presque égal dans tous les échantillons. On sait que le degré de cette pente est lié à l'addition des substrats. L'effet de ceux-ci ne paraît pas durer longtemps. On peut supposer une adsorption des substances par le gel allophanique. La réaction de ce sol à la seconde adjonction est plus nette. Les fortes pentes correspondent aux substrats carbonés. Le témoin accusant le même rythme durant toute l'éxpérience, on peut dire que la dégradation de la matière organique y est de caractère progressif. L'écart entre la courbe du témoin et celle de l'aluminium semble devenir plus important vers la

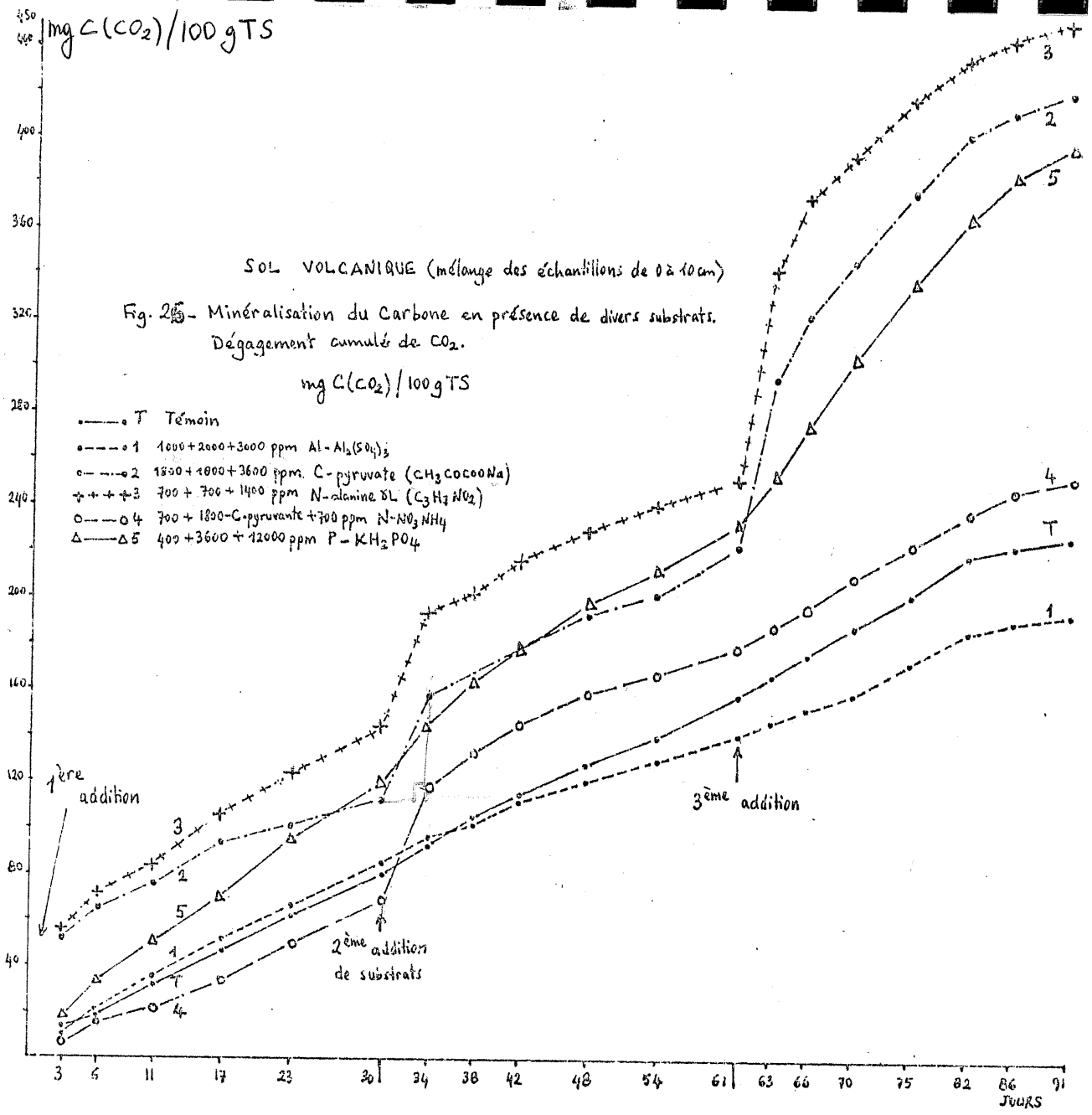


Fig. 25 - Minéralisation du Carbone en présence de divers substrats. Dégagement cumulé de CO_2.

la fin du deuxième mois, mais il peut être négligé.L'effet toxique de l'aluminium est donc presque tamponné par l'allophane.

L'effet du phosphore ajouté est différé dans le temps et progressif.

Le dégagement de CO_2 dans le sol enrichi en C par l'alanine DL ($C_3H_7NO_2$) est toujours le plus fort, comme dans le premier et dans le troisième et dernier mois.Ceci indiquerait une incorporation de N dans la biomasse microbienne.

L'effet de tanins: L'effet des tanins sur les sols volcaniques, en particulier sur l'allophane a été en général peu étudié.Afin d'observer celui-ci, nous avons ajouté un certain nombre de produits taniques à diverses doses (0,5 et 5 % de C du substrat ajouté, pour 100 g de sol) dans ce mélange des échantillons de surface.

Les produits utilisés sont les suivants :

Nom du produit	Formule	C (c%) Poids mol	Poids M.	quantité ajoutée 0,5 %	5 %
1- Acide tanique	$C_{76}H_{52}O_{46}$	0,1536	1701,23	0,93	9,3 g.
2- Ac. gallique	$C_7H_6O_5;H_2O$	0,1446	188,13	1,12	11,2 g
3- Ester gallate ethyl	$(HO)_3C_6H_2COOC_2H_5$	0,1545	198,18	0,92	9,2 g
4- Ester gallate octyl	$(HO)_3C_6H_2COO(CH_2)_7CH_3$	0,64	282,34	0,78	7,8 g
5- Ester gallate lauryl	$(HO)_3C_6H_2COO(CH_2)_{11}CH_3$	0,67	338,45	0,74	7,4 g

L'expérience a duré 30 jours, le dégagement de CO_2 a été mesuré périodiquement.

On distingue deux groupes de courbes correspondant,chacun, à la dose apportée (Fig. 27).En effet les échantillons enrichis par un apport de 0,5 de C du substrat concerné pour 100 g de terre séche ont un dégagement de CO_2 inférieur à celui des autres ayant reçu un apport de 5 %.Après une pente initiale plus ou moins forte suivant la dose, le CO_2 dégagé devient linéaire dans tous les cas.En particulier dans le cas de 0,5 % d'apport, tous le échantillons enrichis montrent une courbe parallèle au sol témoin.Parmi tous les substrats utilisés, les acides tanique et gallique à 5 % paraissent stimuler le plus l'activité microbienne.Ces deux derniers possèdent les plus forts taux en carbone.

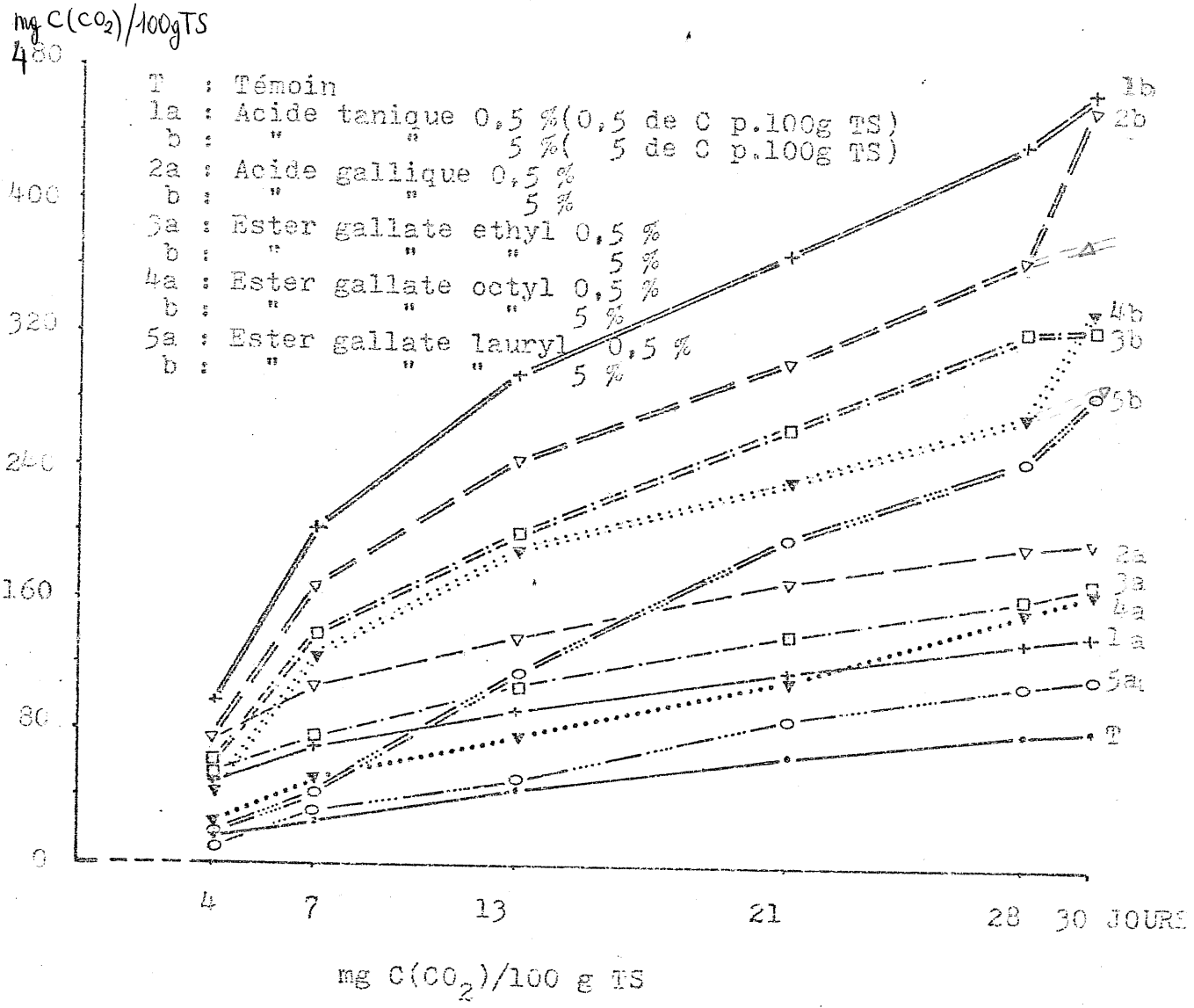


Fig. 27 - Minéralisation du C en présence des tanins: Dégagement de CO_2, courbes cumulatives.

(mélange de cinq échantillons de 0 à 10 cm du sol) volcanique.

TS: Terre sèche.

Le taux de minéralisation des échantillons enrichis en substrats organiques et minéraux autres que les tanins, varie suivant la substance considérée.Il s'accroît avec le temps et présente,dans le cas de l'aluminium, des valeurs légèrement supérieures au début et par la suite inférieures à celles de l'échantillon-témoin.Il est suivi par l'échantillon contenant de NO_3NH_4. Une augmentation,en second mois de l'ordre de la moitié des valeurs précedentes a été observée pour le pyruvate et l'alanine DL.Les taux deviennent ensuite plus importants ($\mp$ 1 %).Seul le phosphore induit un taux de minéralisation qui va en se multipliant par deux.L'échange entre cet ion et l'allophane est donc progressif,(Fig.31),comme l'est la libération des composés humiques énergétiques adsorbés qui sont ensuite minéralisés.

Parmi les substrats à la dose de 0,5 % de C, c'est l'acide gallique qui a le plus fort taux de minéralisation (0,56 %) en rapport avec sa teneur en C également élevée (19,42 %).(Fig. 30).Il précede ainsi dans l'ordre, ester gallate ethyl, acide tanique et ester gallate lauryl.Lorsque la dose augmente, les rôles changent.Cette fois c'est l'acide tanique qui prédomine sur les autres (1,23 %) malgré le contenu en C moins important (27,6 %) par rapport à l'acide gallique.L'ester gallate ethyl à teneur en C presque égale à celle de l'acide tanique est,cette fois-ci, dépassé par celui-ci.L'écart du taux de CO_2 entre les deux substrats atteint 0,48 %.L'ester gallate octyl paraît aussi mineralisé davantage que lui.Se trouve toujours le dernier l'ester gallate lauryl qui n'est pourtant pas très éloigné des autres du point de vue de sa teneur en C (25,7 %) mais est connu pour son pouvoir anti-oxygène.

Les sols de Lamto ont reçu d'autres types de substrats par rapport au sol volcanique.D'une part nous avons étudié l'effet d'un apport de N minéral (NO_3NH_4) et d'autre part celui des substrats carbonés et azotés (urée et gélatine).

Comme pour le sol volcanique, 40 g de terre sèche pris dans chaque niveau des sols de Lamto jusqu'à 15 cm de profondeur sont étalés sur une feuille en plastique.Puis on ajoute le substrat et effectue un brassage jusqu'à obtention d'un mélange homogène.Ensuite on humidifie l'échantillon jusqu'à 80 % de sa capacité au champ et on le met dans les fioles qui sont tout de suite portées à l'etuve à 28°C constants.

Les dosages de CO_2 sont effectués, suivant l'activité, tous les 2 à 7 jours durant 30 jours.

Nous rappelons, pour mémoire, les valeurs de la capacité au champ des sols de Lamto et celles qui correspondent à 80 % de celle-ci (Tableau 10)

Sol	Capacité au ch.%TS	80 % de C.a;c.
Loudetia brûlé	10	8
Loudetia non brûlé a et b	10	8
Hyparrhenia a et b	15	12
Vertisol 0-35 cm	22	17,6
35-65 cm	24	19,2

Tableau 10 - Capacité au champ des sols de Lamto

Les substrats ajoutés dans les sols sont NO_3NH_4, urée et gélatine. Voilà les doses apportées :

Substrat	Doses ppm
NO_3NH_4	200 N du substrat 571,14 mg/100 g
Urée ($CO(NH_2)_2$)	1000 N du substrat 2141,28 mg p. 100 g.
Gélatine	1000 N du substrat 5699,51 mg p. 100 g.

Les teneurs en C et en N de la gélatine ont été déterminées avant l'expérience. Pour ceci, nous l'avons sechée pendant 2 jours, à l'étuve à 70°C, cette température étant à la limite de la décomposition de ce produit.

	C %	N %	C/N	H_2O %
Gélatine	49,89	17,56	2,8	11,2

L'apport en N des substrats carbonés entraîne *a fortiori* celui du carbone, tels urée, gélatine. Il est donc nécessaire de prendre en considération leur teneur en cet élement. Aussi avons nous calculé que 1000 ppm de N -urée correspondaient à 428,5 ppm de C et que 1000 ppm de N-gélatine en contenaient 2841 ppm. (de C)

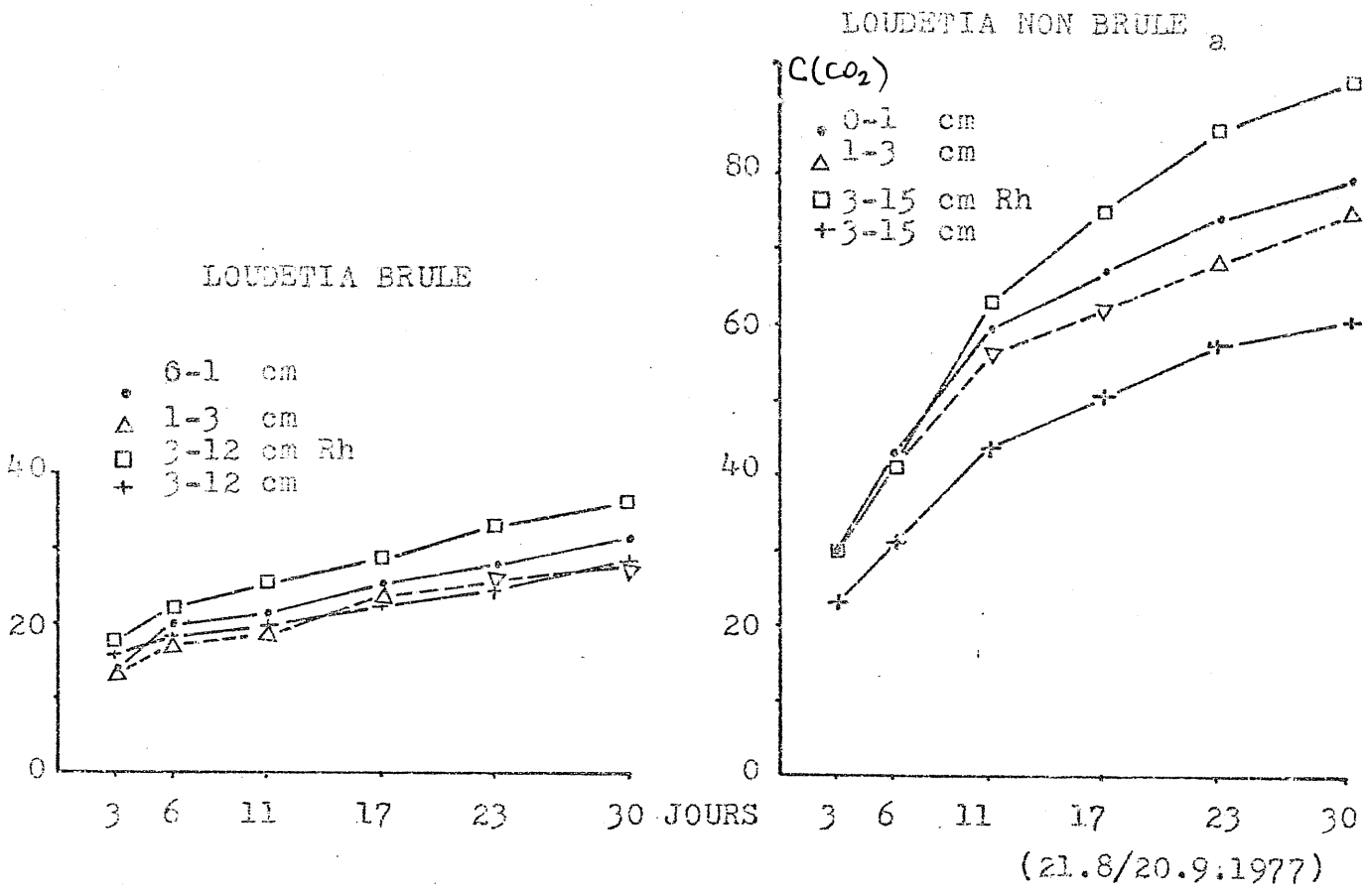
Dans le cas d'un apport de $N\text{-}NO_3NH_4$, l'activité microbienne semble être inhibée (Fig. 22 B).En effet, la quantité de CO_2 dégagé dans les échantillons enrichis en ce substrat est, durant toute l'expérience, inférieure à celle du témoin.Les niveaux rhizosphériques se détachent, ici aussi, des autres.Le dégagement le moins fort est observé dans le sol sous Loudetia brûlé.Il semble par ailleurs que, l'activité dans le sol sous $Hyparrhenia_a$ ne soit pas beaucoup affectée par cet apport;Le taux de CO_2 est voisin de celui du témoin.

On constate, dans le niveau de 0 à 5 cm du sol sous Loudetia non $brûlé_b$ un leger infléchissement du CO_2 jusqu'à 16 jours par rapport au témoin.Ensuite la quantité de CO_2 devient plus importante que dans ce dernier.Le niveau inférieur de ce sol enrichi en NO_3NH_4 manifeste une activité importante en comparaison avec l'échantillon-témoin.

Les courbes de CO_2 du sol sous $Hyparrhenia_b$ qui partent des niveaux plus bas que celles du témoin le dépassent au bout de 20 jours. Par conséquent, en fin d'expérience le taux de CO_2 calculé s'avère plus élevé.(Fig. 23).

La distinction des niveaux de vertisol est, dans ce cas aussi, facile.Il sont rangés, comme dans le témoin, en fonction de la profondeur(Fig. 24).Mais cette fois,la pente initiale des courbes est plus forte, la quantité de CO_2 moindre et les niveaux sont plus rapprochés. Le parallélisme des deux derniers niveaux profonds est à noter.

L'enrichissement par 1000 ppm de N-urée (428,5 ppm de C) des sols a des effets variant d'un sol à l'autre.Le sol sous Loudetia brûlé a une activité moins intense en présence de ce substrat.Il paraît même entravé par cet apport (Fig. 28).La respiration du sol sous Loudetia $non\ brûlé_a$ est presque double de celle du témoin.La pente correspondant à l'effet du substrat ajouté est forte et longue.Cet effet semble continuer jusqu'à 11 jours, ensuite les corbes s'infléchissent vers un plateau.Dans le sol sous Loudetia $non\ brûlé_b$ aussi, on costate presque la même allure des courbes (Fig. 23), la pente se termine au seizième jour.L'autre différence importante est que dans ce second sol les valeurs finales cumulées de CO_2 sont beaucoup moindres que dans le premier.Le sol à $Hyparrhenia_a$ se comporte comme Loudetia $non\ brûlé_a$, (Fig. 22).Les valeurs cumulées sont presque doubles de celles du témoin. $Hyparrhenia_b$ paraît avoir la même allure que les sols précédents.Son niveau inférieur a produit plus de gaz carbonique que le niveau supérieur (Fig. 23).



mg $C(CO_2)$/ 100 g TS Apport de 1000 ppm de N-urée

Témoin non déduit (voir page 44)

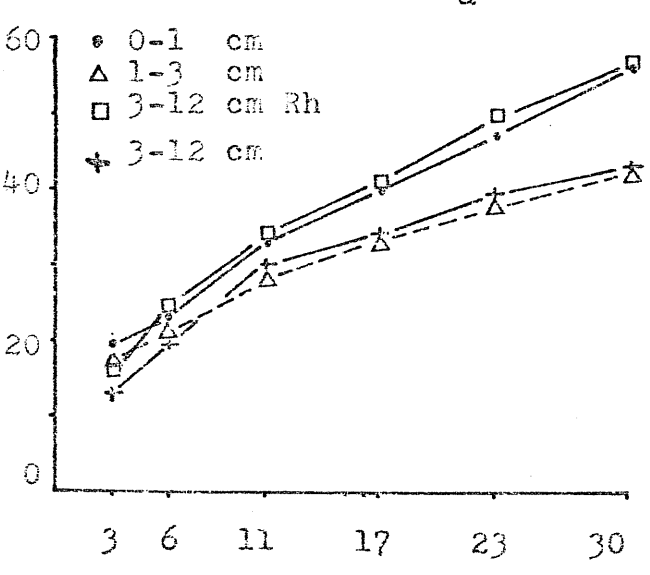


Fig. 28 - Minéralisation du C en présence de divers substrats : Dégagement de CO_2, courbes cumulatives.
Sols de Lamto.

L'apport de 1000 ppm de N-urée n'a rien changé à la hiérarchie des niveaux du vertisol (Fig. 24).Comme toujours, les deux niveaux supérieurs sont séparés de ceux inférieurs.Il semble même que cet apport soit sans effet sur les deux niveaux inférieurs.Cet effet n'est pourtant pas plus prononcé pour les niveaux supérieurs.La différence entre les quantités de CO_2 libéré par le sol enrichi en urée et le témoin est négligeable,(régularisation de la décomposition de la matière organique par l'argile).

Quant à l'apport de 1000 ppm de N-gélatine (2841 ppm de C), on costate dans tous les sols de Lamto une poussé spéctaculaire de l'activité métabolique qui aboutit à un dégagement abondant de CO_2 (Fig. 29).Les valeurs cumulées de celui-ci atteignent jusqu'à quatre à cinq fois de celles des témoins.La stimulation surprenante de Loudetia brûlé propre à ce substrat est à remarquer.

La figure 30 regroupe les taux de minéralisation du C dans les sols enrichis.

c) Essais de stimulation des horizons organiques profonds de l'andosol

Au cours de l'incubation in vitro du profil de sol volcanique non-enrichi nous avions constaté que les horizons organiques profonds avaient une activité microbienne à laquelle on ne s'attendrait pas.En effet, si l'on considère le phénomène géologique par lequel ces horizons ont été enterrés (retombées de cendres) on pouvait penser que le peuplement microbien ait été détruit.Mais d'après nos premiers résultats il n'en était rien.Nous avons donc cherché à savoir si on pouvait activer cette population apparemment en état de vie ralentie.

Pour ceci, nous avons introduit des substances énergétiques (carbonées et phosphorées) dans les échantillons d'horizons en question.

Rappelons les caractères physico-chimiques de ces horizons :

n°	Profondeur cm	C %	N %	C/N	pH	H_2O % TS à 1ère expérience	H.é %
3	25 - 35	14,1	0,86	16,4	4,7	193,5	203,6
4	35 - 40	10,9	0,86	12,7	4,3	142,0	150,4
7	65 - 70	8,6	0,77	11,1	4,2	159,0	167,6

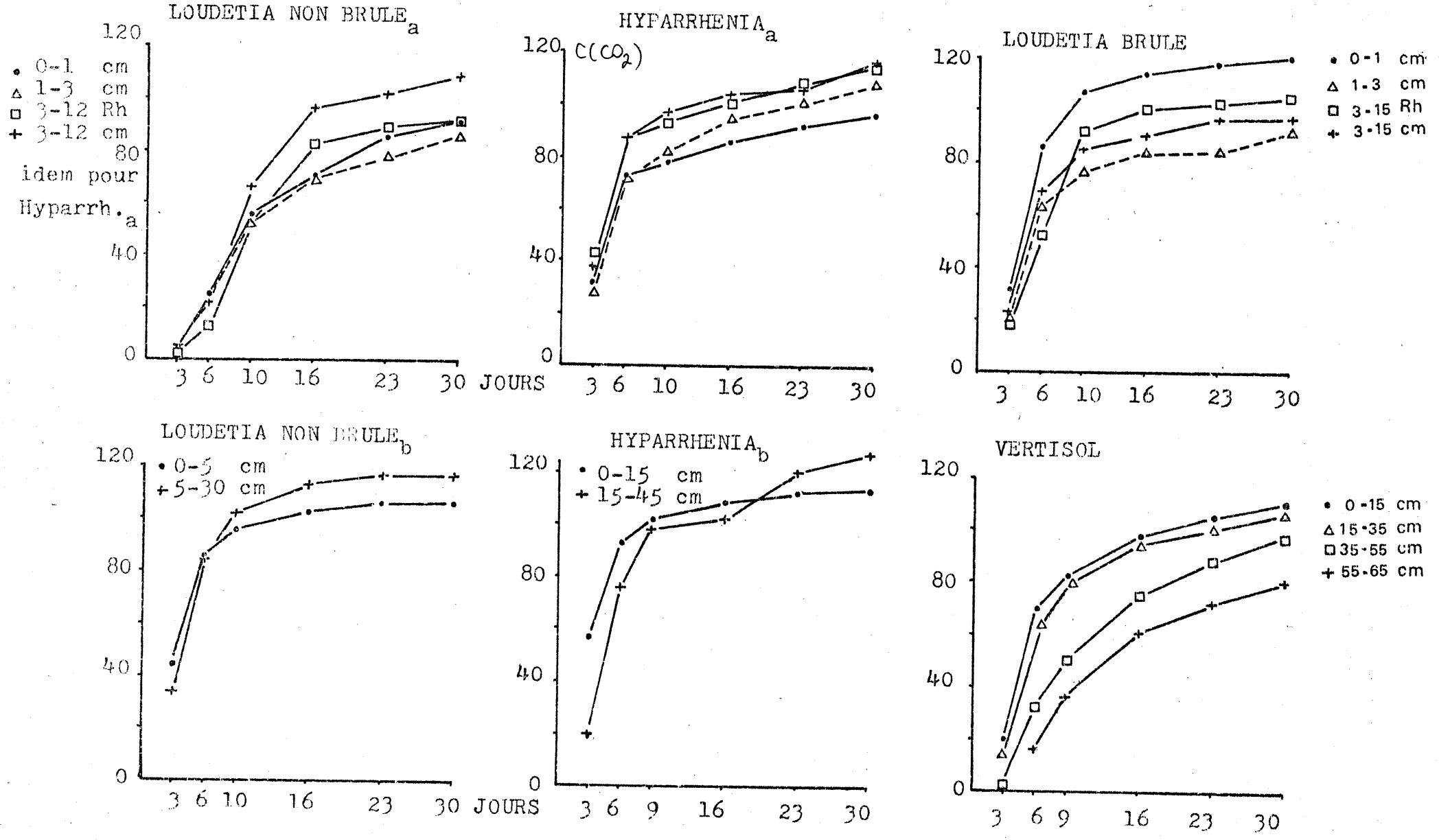


Fig. 29 - Minéralisation du C dans des sols enrichis en 1000 ppm de N-gélatine (2841 ppm de C)

Dégagement de CO_2 - mg $C(CO_2)$/ 100 g TS -, Témoin déduit Rh:Rhizosphère

Sols de la savane de Lamto, saison sèche.

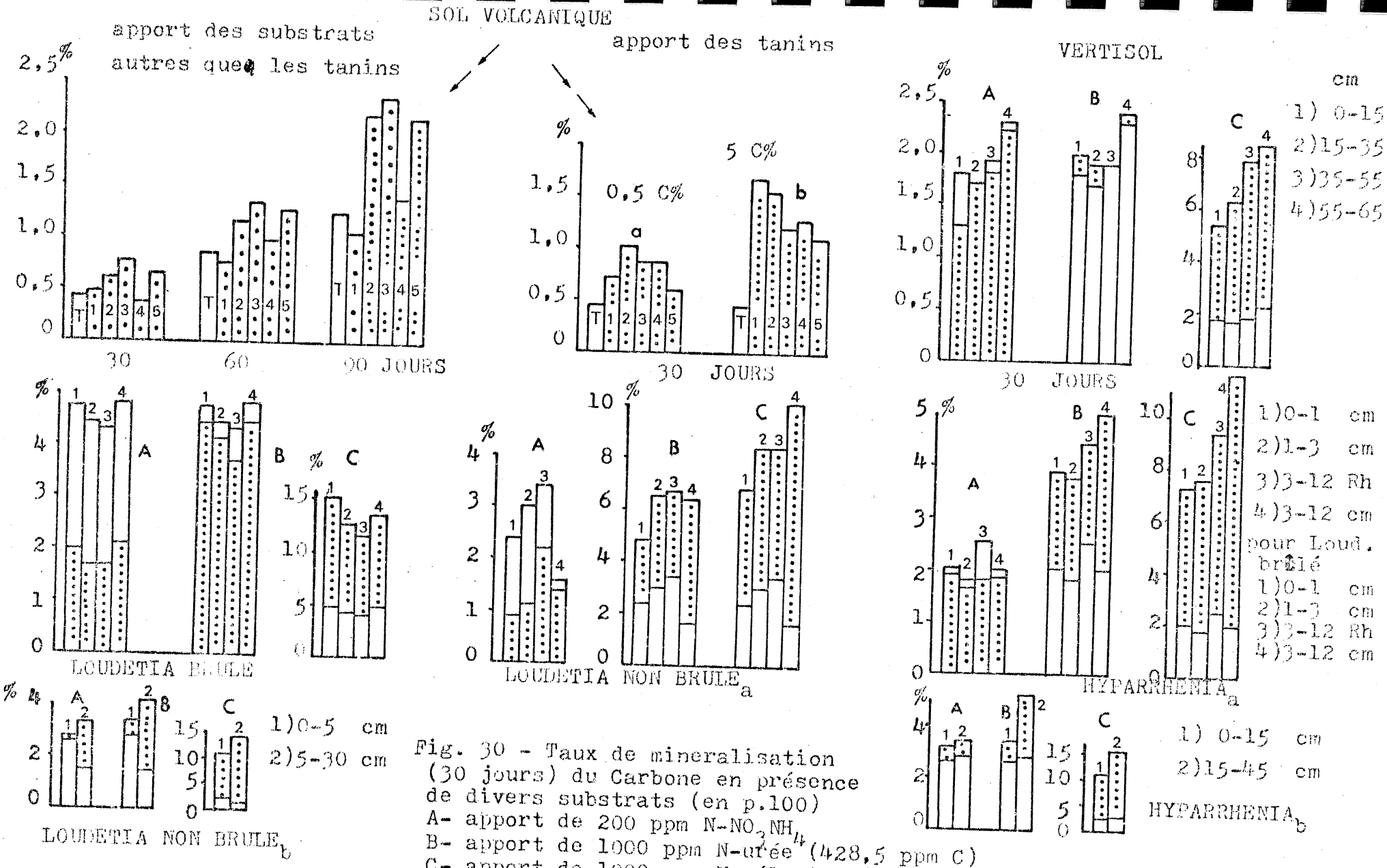


Fig. 30 - Taux de mineralisation (30 jours) du Carbone en présence de divers substrats (en p.100)
A- apport de 200 ppm $N\text{-}NO_3NH_4$
B- apport de 1000 ppm N-urée (428,5 ppm C)
C- apport de 1000 ppm N-gélatine (2841 ppm C)

(les n° sur le sol volcanique correspondent aux substrats apportés, voir le texte)

□ Témoin
⊡ avec substrat
Rh: Rhizosphère

Le segment supérieur des colonnes doit être prolongé jusqu'au niveau 0. Le segment inférieur correspond au traitement.

Les substrats utilisés sont ;

1800 ppm de C de pyruvate de Na et
16000 ppm de P de KH_2PO_4

Après homogénéisation de chaque échantillon de terre, on a pris l'équivalent de 30 g de terre sèche dans chaque horizon concerné.Et puis on a ajouté les substances dont le catabolisme a été observé par rapport à un témoin.

Les échantillons ont été incubés à leur humidité au moment de l'expérience (tableau ci-dessus) à 28°C constants.Les dosages de la réspiration des sols ont été opérés pendant 31 jours.

La figure 31 illustre le dégagement cumulé de CO_2 et le taux de minéralisation de carbone (Tm C/ 31 jours).On y constate,dans les trois échantillons, l'effet incontestable de l'apport de phosphore.Les courbes cumulées de celui-ci,progressives, témoignent de l'échange entre l'allophane et le phosphore qui met ainsi des composés énergétiques à la disposition des microorganismes.

L'apport du carbone semble avoir un effet trois à quatre fois moins important par rapport au phosphore dont l'effet est de plus en plus manifeste comme celui du C-pyruvate.

Les taux de minéralisation reflètent ce que l'on observe sur les graphiques de dégagement de CO_2 (Fig. 31).

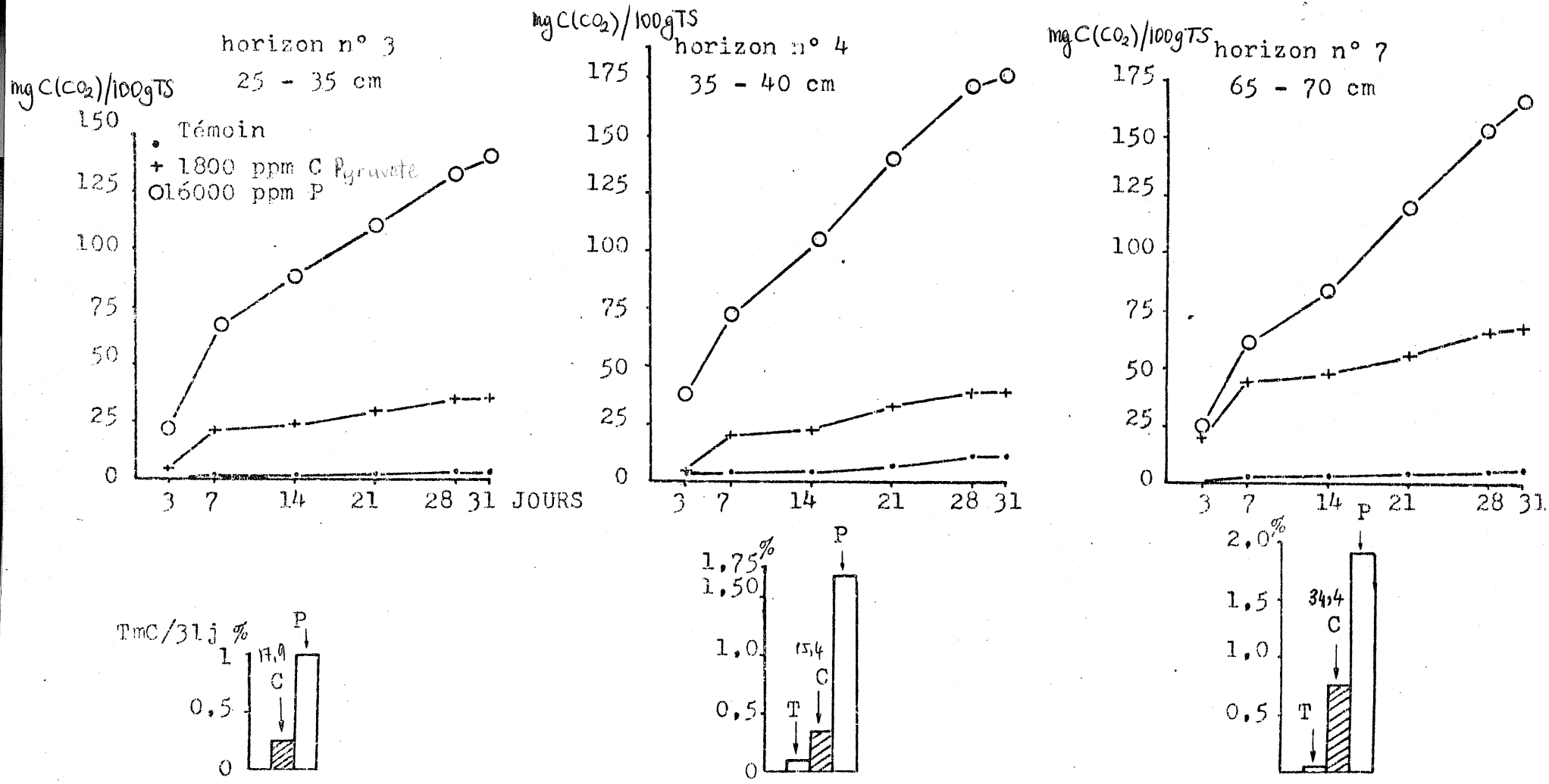


Fig. 31 - Essais de stimulation des horizons organiques profonds de l'andosol:Apport de Carbone et Phosphore.

- Dégagement cumulé de $C(CO_2)$, mg $C(CO_2)$/ 100 g TS
- Taux de minéralisation du carbone (Tm C/ 31 jours)

Témoin non déduit

B) MINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE

L'azote total (N gazeux, N organique et N minéral) constitue la réserve globale d'azote contenu dans les litières, les humus, les racines et les microorganismes.La rapidité de sa minéralisation varie suivant les conditions physiques, chimiques et biologiques du milieu où elle se déroule.

L'azote présente, comme les autres élements, un cycle qui est sous la dépendance essentielle de l'activité de la biosphère.Ce cycle commence à partir de l'azote atmosphérique à la différence de la plupart des élements minéraux originaires d'une roche-mère minérale. Le cycle de l'azote désigne l'ensemble des transformations subites par l'azote dans l'atmosphère.Ces transformations, essentiellement de nature microbienne jouent un rôle considérable sur le plan agronomique puisqu'elles régissent les gains et les pertes du sol en azote et la teneur du sol en formes assimilables par les plantes (DOMMERGUES,1970)

Parmi les processus régulateurs des gains et pertes du sol, on en distingue deux :

1) Processus de nature microbienne :
   a- Fixation d'azote atmosphérique par les microorganismes symbiotiques,
   b- Fixation d'azote atmosphérique par les microorganismes fixateurs libres.

2) Processus de nature non microbienne :
   a- Apport par la pluie et l'irrigation,
   b- Adsorption de l'ammoniac atmosphérique par les colloïdes,
   c- Absorption par les plantes,
   d- Apport par les engrais et semences.

Pour les pertes en N du sol, sont responsables :
   a- Dénitrification (réduction desassimilative),
   b- Volatilisation de l'ammoniac,
   c- Réactions chimiques diverses,
   d- Lessivage, érosion, feu,
   e- Exportation par les récoltes et fixation par les plantes.

La minéralisation et la libération de l'azote fixé sur les colloïdes argileux sont des moyens pour régler la teneur du sol en azote assimilable par les plantes.

L'azote organique constitué surtout par des débris végétaux aériens et souterrains est attaqué par les microorganismes qui libèrent N minéral sous forme ammoniacale, qui peut être transformée en nitrates lorsque les conditions du milieu sont favorables.

L'étude de la minéralisation de l'azote organique dans des conditions contrôlées permet d'une part d'avoir un aperçu sur la dynamique de l'activité qui assure la biodégradation des substances organiques et d'autre part de montrer l'interdépendance entre les cycles de l'azote et du carbone qui ne peuvent être dissociés.

Technique : On extrait, par agitation d'une heure après addition d'une solution de KCl 2 N, l'azote minéral accumulé dans le sol incubé qui est échangé et/ou entraîné par KCl. Une aliquote de cet extrait est portée à ebullition en présence de MgO calciné. NH_4^+ ainsi libéré est complexé dans de l'acide borique à 4 % additionné de l'indicateur de MA et ZUAZAGA. Dans une deuxième étape et dans le même échantillon, NO_3^- est transformé, à l'aide de l'alliage de Devarda, en NH_4^+ reçu lui-même dans l'acide borique. Ces extraits sont ensuite titrés par de l'acide sulfurique N/50.

Pour l'incubation in vitro des échantillons, on utilise des fioles Erlenmeyer de 500 ml. Une quantité précise d'un échantillon de sol amené à 80 % de sa capacité au champ (sols de Lamto) ou à son humidité actuelle au moment de l'expérience (sol volcanique, La Réunion) est introduite dans une des fioles avec soin, pour ne pas tasser la terre et éviter la formation de grumeaux. Les fioles ainsi préparées et bouchées au coton pour permettre l'aération, sont portées à l'étuve à 28°C pendant 30 jours. Le réajustement de leur humidité est assuré régulièrement.

Grâce à la formule $\frac{N.NH_4^+ + N.NO_3^-}{N \text{ total du sol}} \times 100$ on calcule le taux de minéralisation de l'azote (Tm).

a) Accumulation de N minéral dans les sols "témoin"

Il n'a pas été effectué une incubation spéciale pour le sol volcanique, mais les échantillons de CO_2 nous ont permis de faire des dosages de N minéral en fin d'expérience de respiration, c'est-à dire après la dernière extraction du gaz carbonique au 30^{e} jour, nous avons procédé,dans le même échantillon, à l'extraction de N minéral. Les valeurs de N minéral initial étant connues aussi, on se fait ainsi une idée de l'évolution de l'azote dans le sol.

Le tableau 11 illustre l'azote minéral initial et celui dosé à la fin de 30 jours d'incubation du sol volcanique "témoin" et le taux de minéralisation de l'azote (Tm N %).

N°	Profondeur cm	N min initial NH_4^+ ppm	NO_3^-	N min final NH_4^+ ppm	NO_3^-	N tot %	Tm N %
1_a	0 - 10	119,2	33,6	16,9	319,9	0,9	2,0
1_b	"	71,9	134,5	5,7	367,4	1,1	1,5
1_c	"	2,1	302,4	7,9	637,2	1,7	2,0
1_d	"	2,3	419,5	18,9	507,3	1,8	0,6
1_e	"	-	117,6	2,1	502,5	1,4	2,8
2	10 - 25	-	20,8	10,1	68,5	0,9	0,6
3org	25 - 35	7,1	-	2,6	15,5	0,8	0,1
4org	35 - 40	2,3	18,5	2,1	36,0	0,8	0,2
5	40 - 55	-	6,5	-	1,6	0,3	-
6	55 - 65	-	9,9	-	6,8	0,6	-
7org	65 - 70	-	5,9	-	18,3	0,8	0,2
8	70 - 85	-	8,0	-	3,7	0,3	-
9	85 - 90	-	-	-	-	0,3	-
10	90 - 95	-	-	-	-	0,1	-

Tableau 11 - N minéral initial et final, le taux de minéralisation de l'azote dans le sol volcanique "témoin".

On constate une forte teneur en NO_3^- des échantillons de 0 à 10 cm, ce qui est étonnant dans ce sol à caractère acide (tableau 11 fig. 32).Ces valeurs témoignent,par ailleurs, de conditions favorables à l'activité microbienne:taux de C et température élevés, humidité

moyenne, bonne aération du sol.On sait également que plus il y a de C disponible dans un sol, plus l'activité minéralisatrice est accentuée (SCHAEFER, 1966).Cette constatation est entièrement confirmée par nos essais.

Les horizons organiques profonds se distinguent des horizons minéraux ne serait-ce que par leur taux de minéralisation de l'azote. Les micro-populations des horizons profonds non-organiques semblent, comme dans le cas de la minéralisation du carbone, être en état de vie ralentie(Fig. 32).

Les sols de Lamto montrent une grande irrégularité de minéralisation de N (Fig. 33).L'accumulation de NO_3^- est presque nulle dans ces échantillons non enrichis.Elle est, à l'exception de 12 jours de l'expérience, toujours inférieure à 10 ppm, ce qui est à la limite des dosages.

Les sept premiers jours d'incubation semblent être, pour les microorganismes, une période d'adaptation.Ici, on n'observe pas l'effet initial activateur de la réhumidification.La montée spectaculaire des courbes, qui correspond au douzième jour de l'incubation indique que les microbes se comportent de la même façon dans tous les sols de Lamto. Le sol sous Loudetia brûlé se distingue ; par contre, des autres par ses plus faibles teneurs de $NH_4^+ + NO_3^-$ .A partir du douzième jour, la minéralisation paraît arrêtée et accuse une chute aussi rapide que l'était sa montée.Il semblerait qu'ici interviennent d'autres facteurs limitants.

Dans les sols sous Loudetia non brûlé$_b$ et sous Hyparrhenia$_b$ "témoin" aucune accumulation de NO_3^- n'a été observée (Fig. 34).On constate cependant des valeurs de NH_4^+ jusqu'à cinq fois plus importantes dans le premier sol.On peut donc penser que l'azote de ce dernier est plus disponible aux microorganismes par rapport à celui du sol sous Hyparrhenia$_b$.Il conviendrait aussi de tenir compte de la profondeur des niveaux dans chaque sol.En effet, dans le sol sous Loudetia non brûlé$_b$, les niveaux sont moins profonds que dans celui sous Hyparrhenia$_b$ En outre la teneur en argile des deux sols n'est pas identique.Sur ce plan, le Hyparrhenia$_b$ est plus riche.On peut donc considérer ici l'effet régulateur des argiles sur la minéralisation de l'azote.

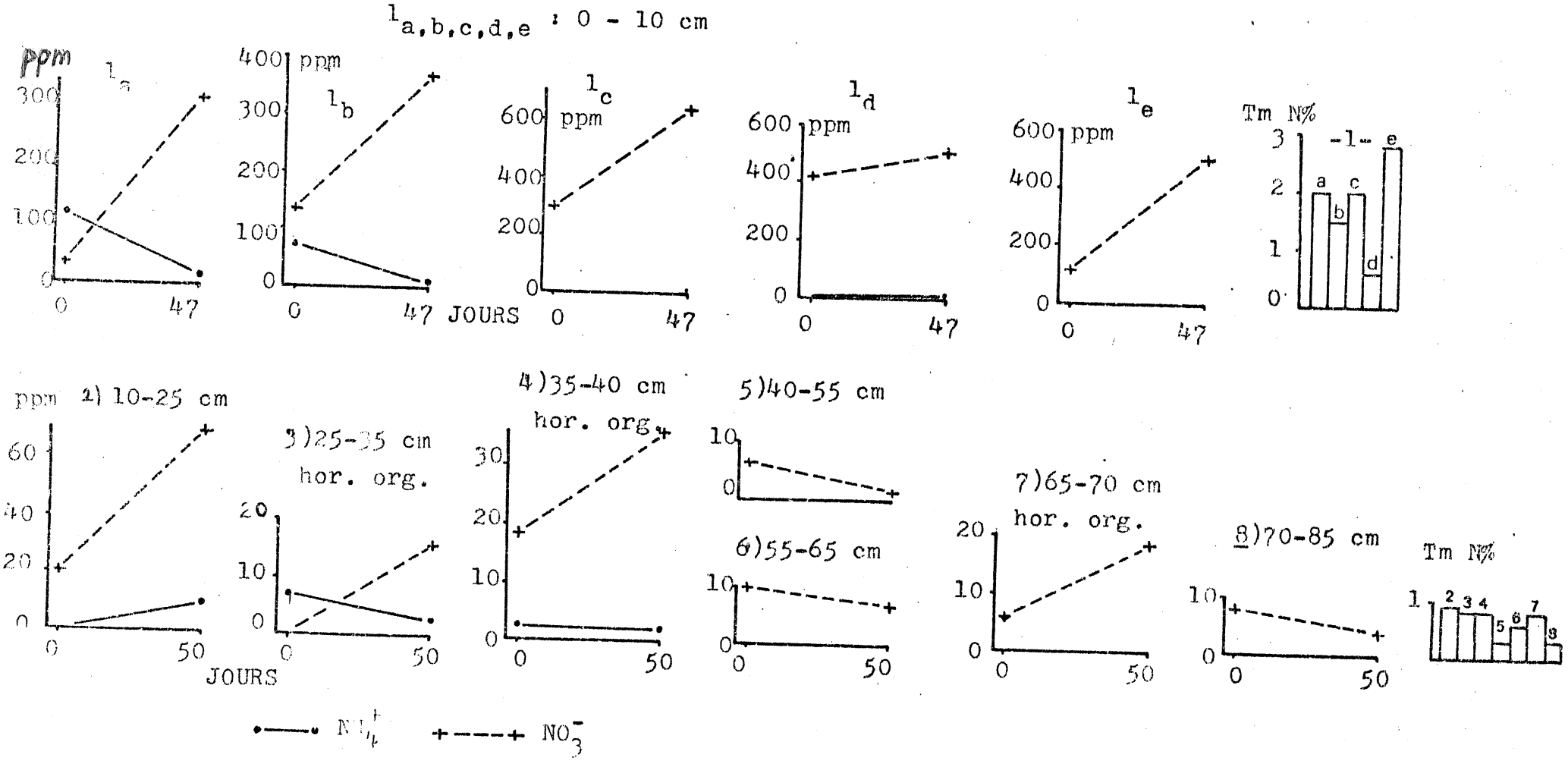


Fig. 32 - N minéral (ppm) et taux de minéralisation de l'azote (Tm N %) dans le sol volcanique "témoin".

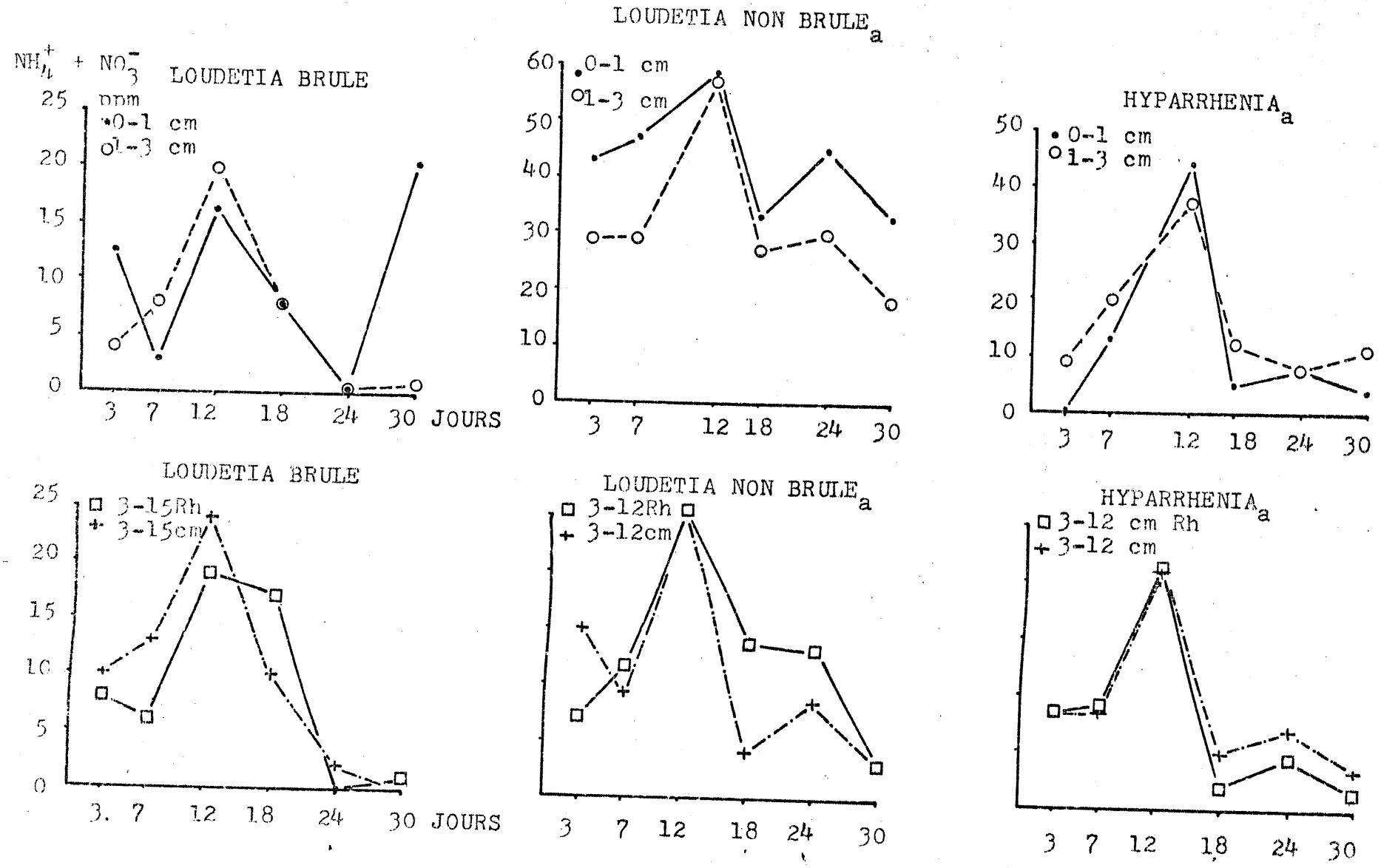
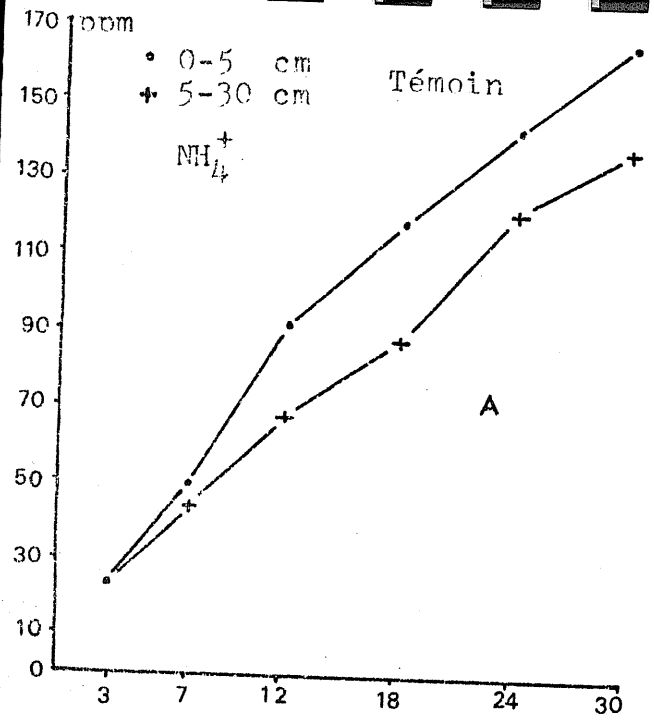
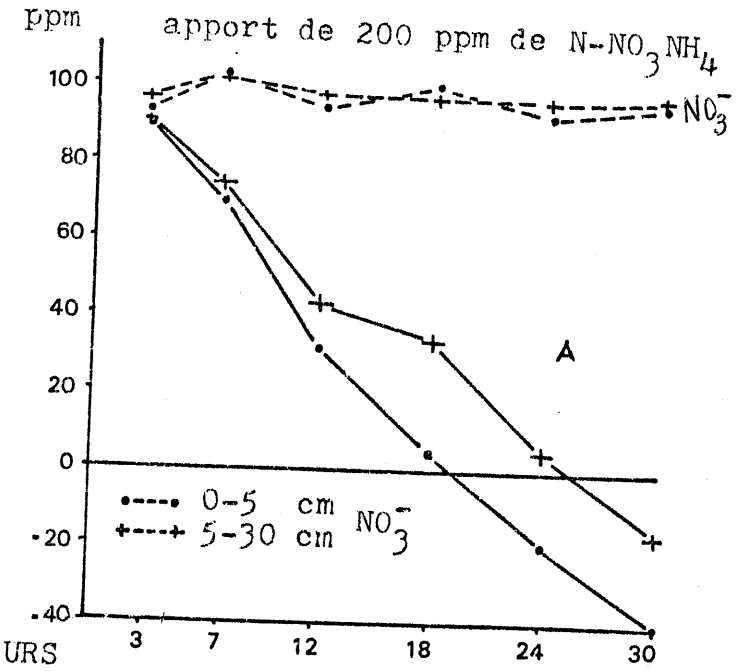


Fig. 33 - Minéralisation de l'azote dans les sols "témoin" de la savane de Lamto.

ppm $NH_4^+ + NO_3^-$





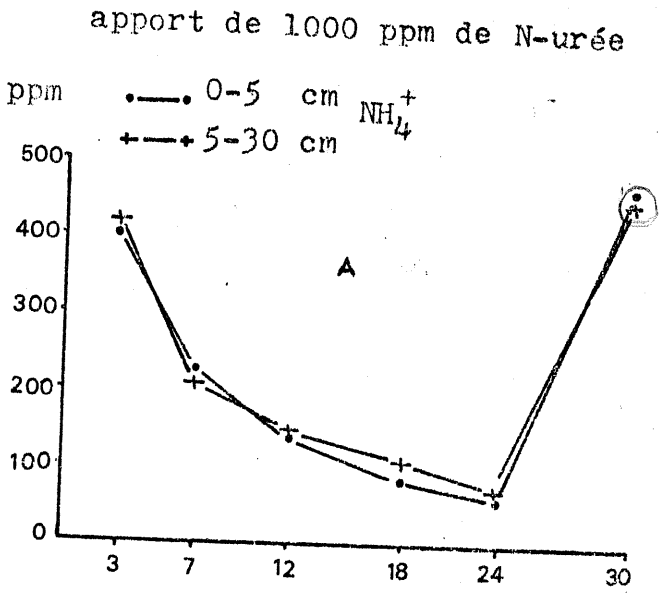
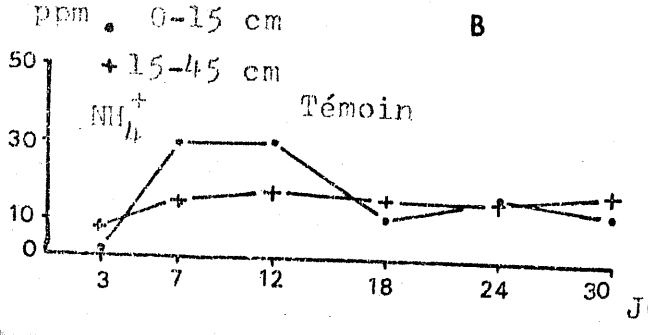


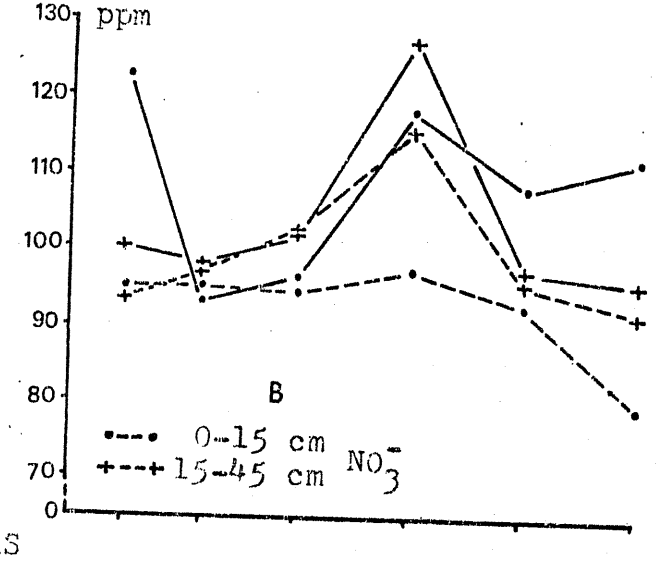
Fig. 34 - Minéralisation de l'azote, Sols de la savane de Lamto, (ppm).

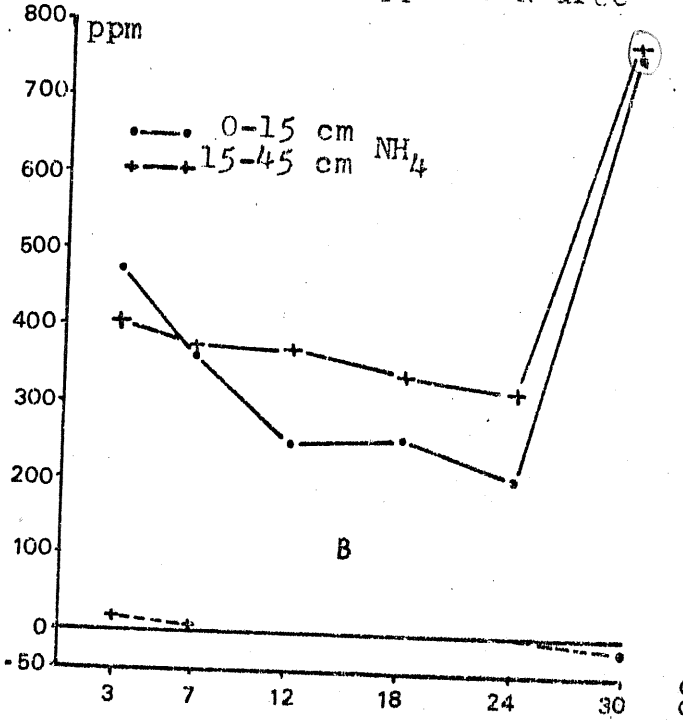
Témoin déduit

A - Loudetia non brûlé$_b$

B - Hyparrhenia$_b$







Dans le cas du vertisol (fig. 35), il est intéressant de remarquer une fois de plus que les deux niveaux profonds montrent presque la même allure et se distinguent des niveaux supérieurs comme dans la minéralisation du carbone. Quant à l'échelle du profil, on observe une accumulation de NH_4^+ relativement importante jusqu'à 13 à 18 jours, et puis le sol désorbe NH_4^+. Il en découle une baisse de NH_4^+ qui est suivie d'une légère augmentation vers la fin des dosages (30 jours), à l'exception, toutefois, du niveau de 0 à 15 cm. Ce dernier a une allure caractérisée par une diminution continue de NH_4^+ jusqu'à la fin de l'expérience. Cette baisse se solde même par une quantité de NH_4^+ inférieure à celle en début d'incubation (fig. 35).

b) Dynamique de la minéralisation de N en présence de différents types de substrats organiques et minéraux (Tests d'activation).

Il nous a paru intéressant d'explorer la capacité métabolique des différents niveaux des profils et, par cette activité potentielle, d'obtenir une information supplémentaire sur la population microbienne de ces sols.

On n'a pas procédé à l'incubation de sol volcanique enrichi pour la minéralisation de l'azote. Toutefois les échantillons de réspirometrie ont permis le dosage de l'azote minéral accumulé.

Rappelons les substrats ajoutés dans le mélange d'échantillons de 0 à 10 cm du sol volcanique :

1) $Al_2(SO_4)_3$ ---------- Al (6000 ppm)
2) Pyruvate de sodium ($CH_3COCOONa$) ----- C (7200 ppm)
3) Alanine-DL ($C_3H_7NO_2$) ---------- N (2800 ppm)
4) Pyruvate de sodium ---------- C (1800 ppm)
   NO_3NH_4 ---------- N (1400 ppm)
5) KH_2PO_4 ---------- P (16000 ppm)

Dans un deuxième temps, on a utilisé des substrats taniques (fig. 36).

En ce qui concerne les horizons organiques profonds de l'andosol,

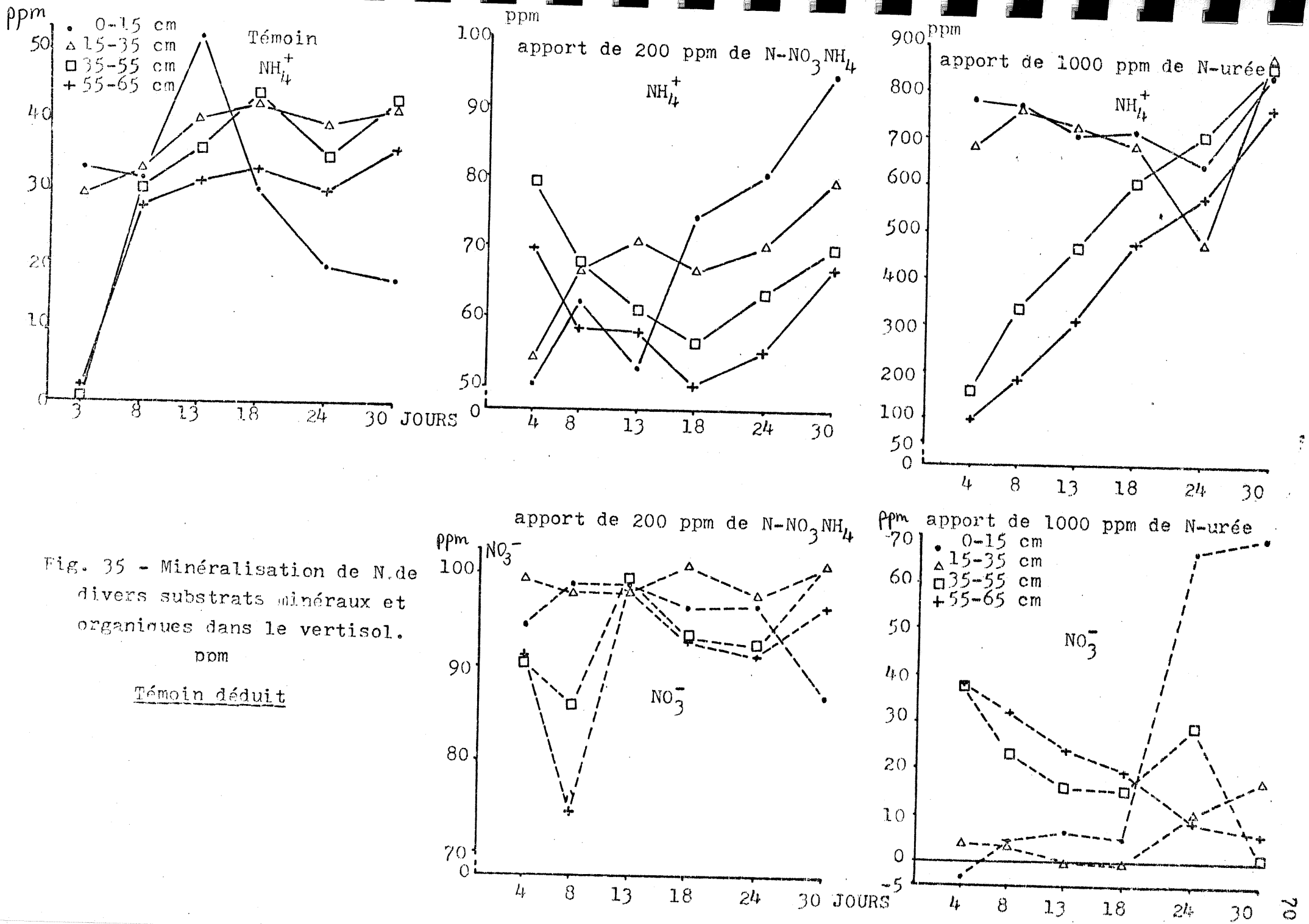


Fig. 35 - Minéralisation de N.de divers substrats minéraux et organiques dans le vertisol.

ppm

Témoin déduit

ils ont reçu 16.000 ppm de phosphore-KH_2PO_4 et 1800 ppm de C-pyruvate. On a extrait l'azote minéral de ces échantillons,qui avaient en fait servi pour les dosages réspirometriques,au bout de 30 jours,terme de l'expérience.

On observe sur la figure 36 que l'adjonction de Al et de C - pyruvate a entraîné une forte baisse de NO_3^- .Cette baisse est relativement moins importante dans le cas de l'azote-alanine et de phosphore. Par ailleurs, un apport succesif de C-pyruvate et de $N\text{-}NO_3NH_4$ semble favoriser légèrement l'accumulation de NO_3^- .

NH_4^+ accumulé est considérable dans l'échantillon ayant reçu 2800 ppm de N-alanine DL.Dans celui-ci, 1860 ppm de NH_4^+ ont été minéralisés en 30 jours, ce qui est plus de moitié de l'apport (2800 ppm). L'échantillon n° 4 se place juste après ce dernier par 710 ppm de NH_4^+, environ 50 % de l'azote apporté ont donc été utilisés.

La production de NH_4^+ paraît affectée par l'aluminium.

Pour ce qui est des substrats taniques,l'ammonification est quasiment absente (fig. 36).Par ailleurs, le bilan de NO_3^- est, la plupart du temps, négatif.Une plus forte diminution de NO_3^- dans les échantillons contenant 5 % de C du substrat est à noter.On pourrait donc penser que les substrats taniques à forte dose inhibent la nitrification.Les valeurs négatives les plus élevées sont obtenues dans le cas de l'ester gallate octyl à 5 %.Il est suivi par l'ester gallate lauryl à 5 %.

En ce qui concerne les horizons organiques profonds; la production de NH_4^+ et NO_3^- ne semble être favorisée que par un apport de phosphore (tableau 12).L'apport d'un substrat carboné n'a apparemment pas d'effet.

Le taux de minéralisation de l'azote (en p. 100 de N total contenu dans le sol) a sa valeur la plus élevée pour l'échantillon enrichi en 2800 ppm de N-alanine DL (12 %)(fig. 36).Un apport de l'azote sous forme minérale a donné un taux inférieur à celui de l'azote organique (8 %).

A la suite de l'enrichissement par des tanins on obtient des taux négatifs par rapport au témoin (fig. 36).Les valeurs varient entre -0,1 % et -6,4% (témoin + 6,4 %).

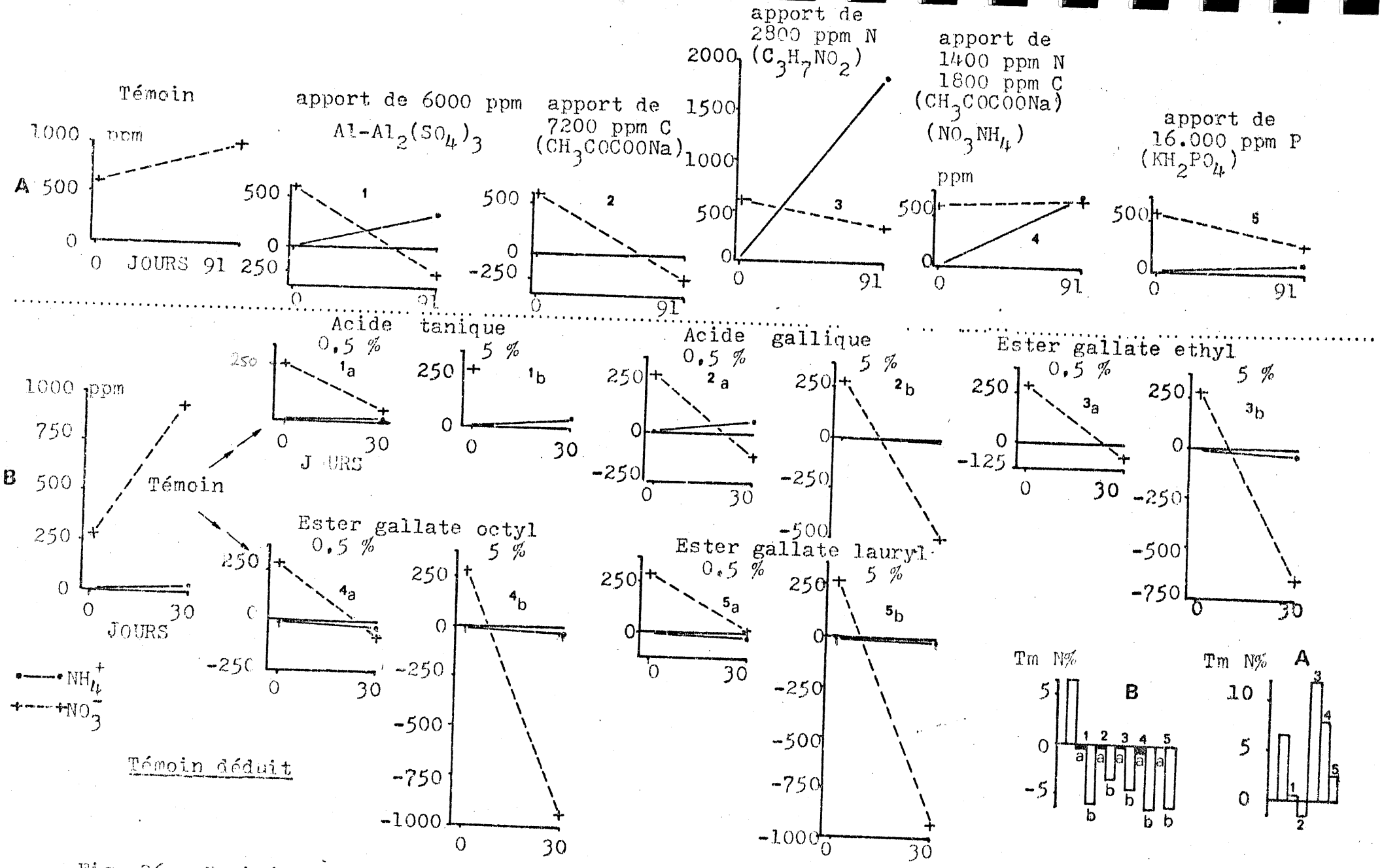


Fig. 36 - N minéralisé en présence de substrats et taux de minéralisation de N (en p.100) ; Andosol 0-10 cm

A- Echantillons enrichis en substrats carbonés et azotés. B-échantillons enrichis en tanins

Profondeur cm	N°		N total ppm	N initial NH_4^+ ppm	N initial NO_3^-	N final NH_4^+	N final NO_3^-	Tm N % avec témoin	Tm N% sans témoin
25 - 35	3	T	8600	-	9,3	-	35,1	0,4	0,4
		C				1,5	-	-	-
		P				80,0	25,0	1,2	0,8
35 - 40	4	T	8600	-	15,1	3,9	70,0	0,8	0,8
		C		-		-	8,0	0,1	-
		P				99,7	46,0	1,7	0,9
65 - 70	7	T	7700	-	-	-	17,7	0,2	0,2
		C				1,4	-	-	-
		P				68;0	6,8	1,0	0,8

Tableau 12 - N minéral initial et final et taux de minéralisation de l'azote dans les horizons organiques profonds de l'andosol, (C:apport du C, P:apport du phosphore, T:Témoin).

Les taux de minéralisation de l'azote des horizons organiques profonds, inférieurs à 1 %, s'écartent nettement de ceux des échantillons de surface contenant les même substrats.Ces écarts peuvent être partiellement expliqués par le fait que les échantillons de 0 à 10 cm ont une teneur double en N total initial.

Pour l'incubation des sols de Lamto, les substrats utilisés sont les mêmes que ceux apportés aux échantillons de respirométrie:

200 ppm de $N\text{-}NO_3NH_4$

1000 ppm de N-urée

1000 ppm de N-gélatine.

L'évolution des échantillons contenant les deux premiers substrats a été suivie pendant 30 jours.Quant à l'échantillon enrichi en gélatine, il nous a permis,à la fin de l'incubation (30 jours), le dosage de l'azote minéral accumulé.

L'adjonction de ces substrats a été faite comme dans les essais de la minéralisation du carbone.

Dans le cas d'un apport de 200 ppm de N-NO_3NH_4, on retrouve en fin d'expérience, tout l'azote apporté, voire davantage (fig. 37). Le sol sous Loudetia brûlé a en effet libéré jusqu'à 227 ppm de l'azote minéral (témoin déduit), sol sous Loudetia non brûlé$_a$ 250, et sol sous Hyparrhenia$_a$ 229 ppm. On costate par ailleurs que les plus fortes valeurs de $NH_4^+ + NO_3^-$ correspondent aux niveaux rhizosphériques. La part de NH_4^+ est toujours plus importante que NO_3^- dans ces quantités.

Bien que les allures des courbes de NH_4^+ et NO_3^- soient fort semblables dans tous les échantillons, le sol sous Hyparrhenia se distingue des autres par ses courbes de NH_4^+ plus régulières. La variation quantitative de celui-ci n'y paraît pas aussi brutale que dans les autres sols. En ce qui concerne les courbes de NO_3^-, elles montrent des pentes fortes et assez irrégulières. Le NO_3^- accumulé est toujours inférieur à 100 ppm dans tous les échantillons.

L'enrichissement par 1000 ppm de N-urée des sols n'a pas provoqué de nitrification (fig. 38). Quoiqu'avec des quantités variables les courbes de NH_4^+ ont une allure semblable. Les valeurs les plus élevées de cet azote ammoniacal sont observées dans les sols sous Loudetia non brûlé et sous Hyparrhenia$_a$. La baisse continue de NH_4^+ depuis le début de l'expérience est subitement interrompue au 24^{è} jour pour accuser une montée spectaculaire dans tous les sols jusqu'à la fin de l'incubation (30 jours). Ceci peut être expliqué par le fait qu'une légère anaérobiose a pu être créée dans les fioles qui nous ont servi aussi pour le dosage respirométrique. On sait d'ailleurs que seule l'ammonification reste active dans les conditions d'anoxybiose (DOMMERGUES, 1970). En ce qui concerne la diminution de NH_4^+, elle pourrait provenir de l'accumulation de l'azote minéral dans le milieu qui favorise la réorganisation et provoque ainsi la diminution de la minéralisation (LEFEVRE et HIBOUX, 1960).

L'absorption de NH_4^+ est nettement plus importante dans le sol sous Loudetia brûlé par rapport aux autres. On peut dire que cette absorption correspond à un besoin en N. Les autres paraissent donc plus pourvus en cet élément. Les courbes de NH_4^+ par niveau font bien ressortir la hiérarchie des sols (fig. 38).

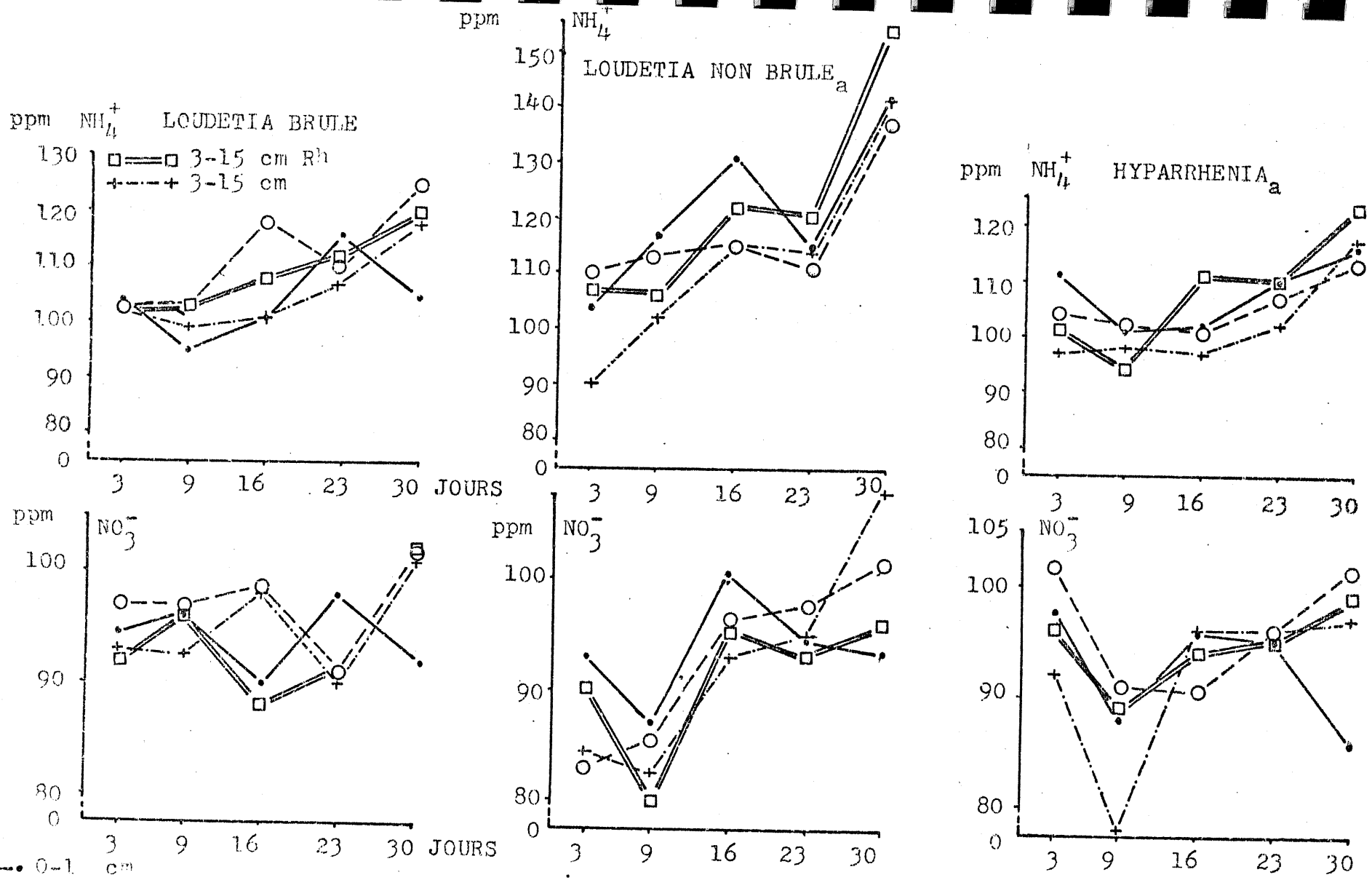


Fig. 37 - Accumulation de N en présence de 200 ppm de $N\text{-}NO_3NH_4$:Sols de Lamto

ppm NH_4^+ et NO_3^- Témoin déduit

Rh : Rhizosphère

p. 67

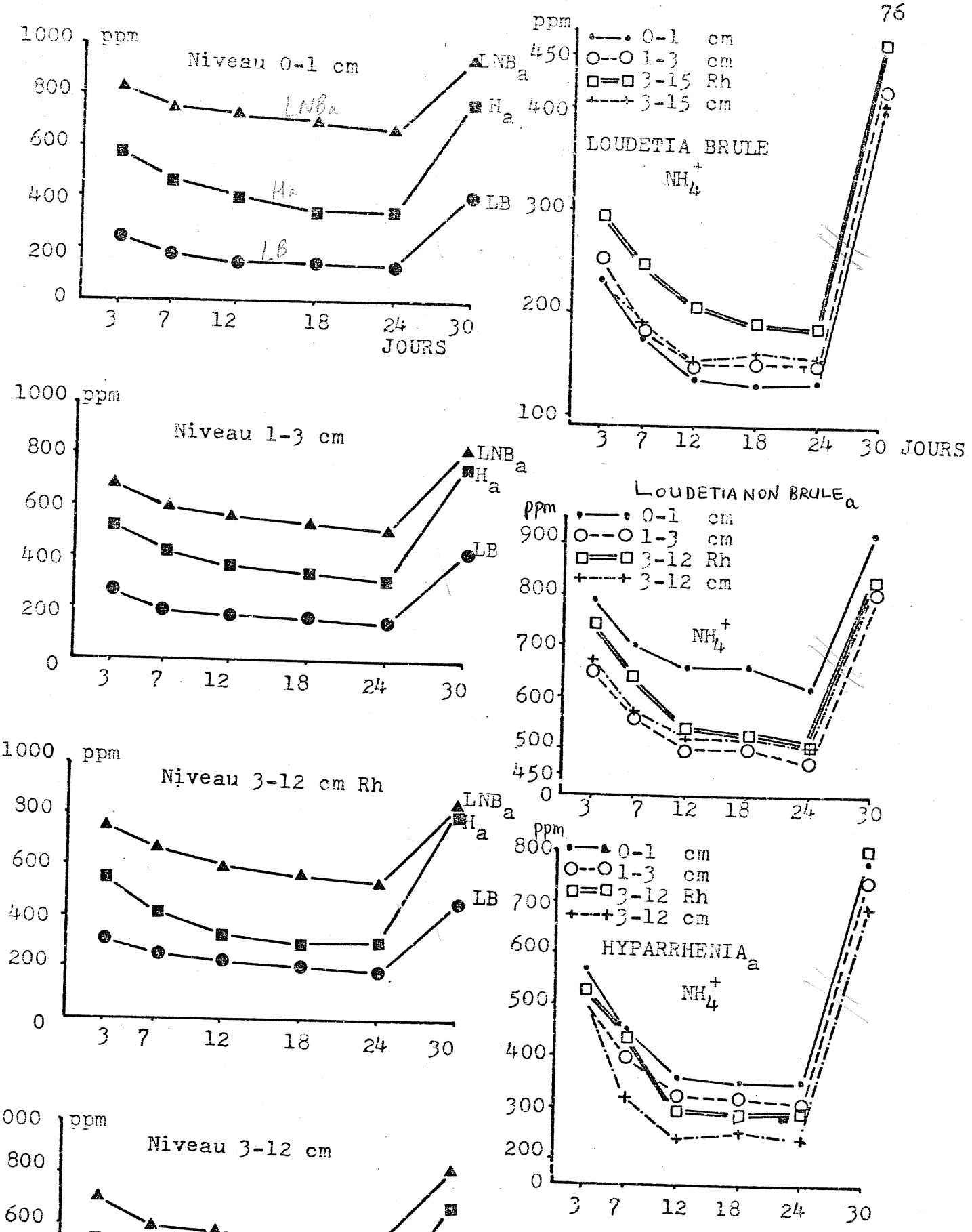


Fig. 38- Accumulation de N min. (NH_4^+) en présence de 1000 ppm de N-urée (en ppm NH_4^+).
à gauche: Par niveau
à droite: Par sol

Témoin déduit Rh:Rhizosphère

L'apport de 1000 ppm de N-gélatine confirme le besoin en N du sol sous Loudetia brûlé (tableau 13).Les valeurs finales de NH_4^+ accumulé dans ce dernier cas sont très voisines de celles du même sol enrichi en 1000 ppm de N-urée.Les autres sols se comportent de la même façon que ce dernier.

La production de NO_3^- est, dans ce cas aussi, nulle.

Le sol sous Loudetia non brûlé$_b$ enrichi en 200 ppm de $N\text{-}NO_3NH_4$ diffère de tous les autres sols de Lamto (fig. 34).La diminution de NH_4^+ par conséquent son immobilisation biologique continue jusqu'à la fin de l'expérience.Le sol absorbe même plus d'azote que l'on en a apporté. L'évolution de la nitrification est sans variation et même très stagnante.On pourrait supposer ici deux faits : soit les microorganismes nitrificateurs sont absents ou inhibés par concurrence trophique, soit il existerait un ou plusieurs facteurs limitants qui restent à explorer.

Le sol sous Hyparrhenia$_b$ qui a reçu le même traitement d'addition a cependant une allure très proche des autres sols dans le même cas.On y observe un pic de NH_4^+ et de NO_3^- au 18^{è} jour comme pour les sols sous Loudetia non brûlé$_a$ et sous Hyparrhenia$_a$ où le même fait s'était manifesté au 16^{è} jour.

Le vertisol, dans lequel ont été ajoutés 200 ppm de N minéral semble conserver le comportement de ses niveaux qui représentent deux groupes: les deux niveaux de 0 à 35 cm et ceux de 35 à 65 cm (fig.35). En effet, comme dans les essais précédents de respirométrie, les deux niveaux inférieurs vont ensemble.A quelques exceptions près,les deux courbes de NH_4^+, ainsi que celles de NO_3^- de ces niveaux en question sont parallèles. En ce qui concerne les deux niveaux supérieurs, l'échantillon de 0 à 15 cm semble être indépendant de celui sous-jacent, aussi bien pour le NH_4^+ que pour le NO_3^- .La désorption de NH_4^+ y est très importante et correspond même presque à 100 ppm de $N\text{-}NH_4^+$, ce qui n'est autre que la dose apportée.Ce phenomène est de moins en moins important avec la profondeur.

Grosso modo, NO_3^- ne paraît pas avoir subi l'action des microorganismes, puisque on retrouve partout 100 ppm de N nitrique qui ne correspond d'ailleurs qu'à l'apport, comme le cas de N ammoniacal (fig. 35).

Sol	Niveaux cm	Tém. initial ppm NH_4^+	Tém. initial ppm NO_3^-	Final ppm NH_4^+	Final ppm NO_3^-	Final ppm $NH_4^+ + NO_3^-$	Gél.-Tém. $NH_4^+ + NO_3^-$	Tm N% 30j Tém.déd.
LOUDETIA BRULE	0-1	16,7	4,0	514,9	3,2	518	497	32,2
	1-3	1,0	-	513,9	-	514	513	37,2
	3-15 Rh	1,0	-	565,5	4,2	570	569	40,2
	3-15	-	-	497,1	4,2	501	501	38,4
LOUDETIA NON BRULE a	0-1	27,2	5,6	891,2	6,3	897,5	865	41,8
	1-3	16,8	1,0	818,5	-	818,5	801	44,4
	3-12 Rh	5,7	-	816,6	7,4	824,0	818	46,3
	3-12	5,7	-	808,3	5,3	814,0	808	50,2
LOUDETIA NON BRULE b	0-5	165,5	4,3	641,0	2,2	643,2	473,4	9,3
	5-30	138,6	-	655,0	2,9	658,0	519,4	10,5
HYPARRHENIA a	0-1	1,4	2,9	785,6	6,6	792,0	789	44,2
	1-3	4,3	7,2	746,2	-	746,0	735	44,1
	3-12 Rh	1,4	1,4	737,7	4,2	742,0	739	45,6
	3-12	-	7,2	718,4	4,2	723,0	715	45,8
HYPARRHENIA b	0-15	13,1	19,0	795,5	1,5	797,0	765	43,1
	15-45	18,7	5,8	840,3	3,7	844,0	819,5	54,3
VERTISOL	0-15	18,0	11,9	855,3	33,2	888,5	858,6	35,8
	15-35	42,0	1,5	859,5	1,5	861,0	817,5	37,0
	35-55	43,0	0,8	747,5	-	747,5	704,0	35,2
	55-65	36,4	0,8	720,0	8,4	728,4	691	38,2

Tableau 13 - N minéralisé (en ppm) et taux de minéralisation de l'azote en présence de 1000 ppm de N-gélatine.

Rh : Rhizosphère

Sous l'influence d'un apport de 1000 ppm de N-urée, les sols sous Loudetia non brûlé$_b$ et sous Hyparrhenia$_b$ manifestent le même comportement malgré les quantités d'azote ammoniacal différantes (fig. 34). Ce dernier échantillon a un taux de NH_4^+ plus élevé. Le pic que l'on remarque à partir de 23 à 24^{è} jour de l'incubation nous rappele les autres sols -a- de Lamto (fig. 38).

Dans le vertisol enrichi par 1000 ppm de N-urée, on observe surtout la libération progressive de l'azote ammoniacal par les deux niveaux inférieurs (fig. 35). On pourrait penser là, à l'action des argiles de type montmorillonite qui jouent un rôle régulateur dans la décomposition de la matière organique.

La part de N nitrique est très peu importante dans les formes transformées de l'azote, dans le vertisol (fig. 35). Si l'on tient compte des valeurs totales des deux formes d'azote, on constate que presque tout l'azote apporté sous forme de l'urée a été transformé en azote ammoniacal. NH_4^+ absorbé par les niveaux varie entre 100 et 230 ppm, le restant de 1000 ppm d'N apporté étant retrouvé en fin d'expérience.

Les figures 39, 40, et 41 résument nos observations grâce au taux de minéralisation de l'azote dans les sols "témoin" ou enrichis en divers substrats.

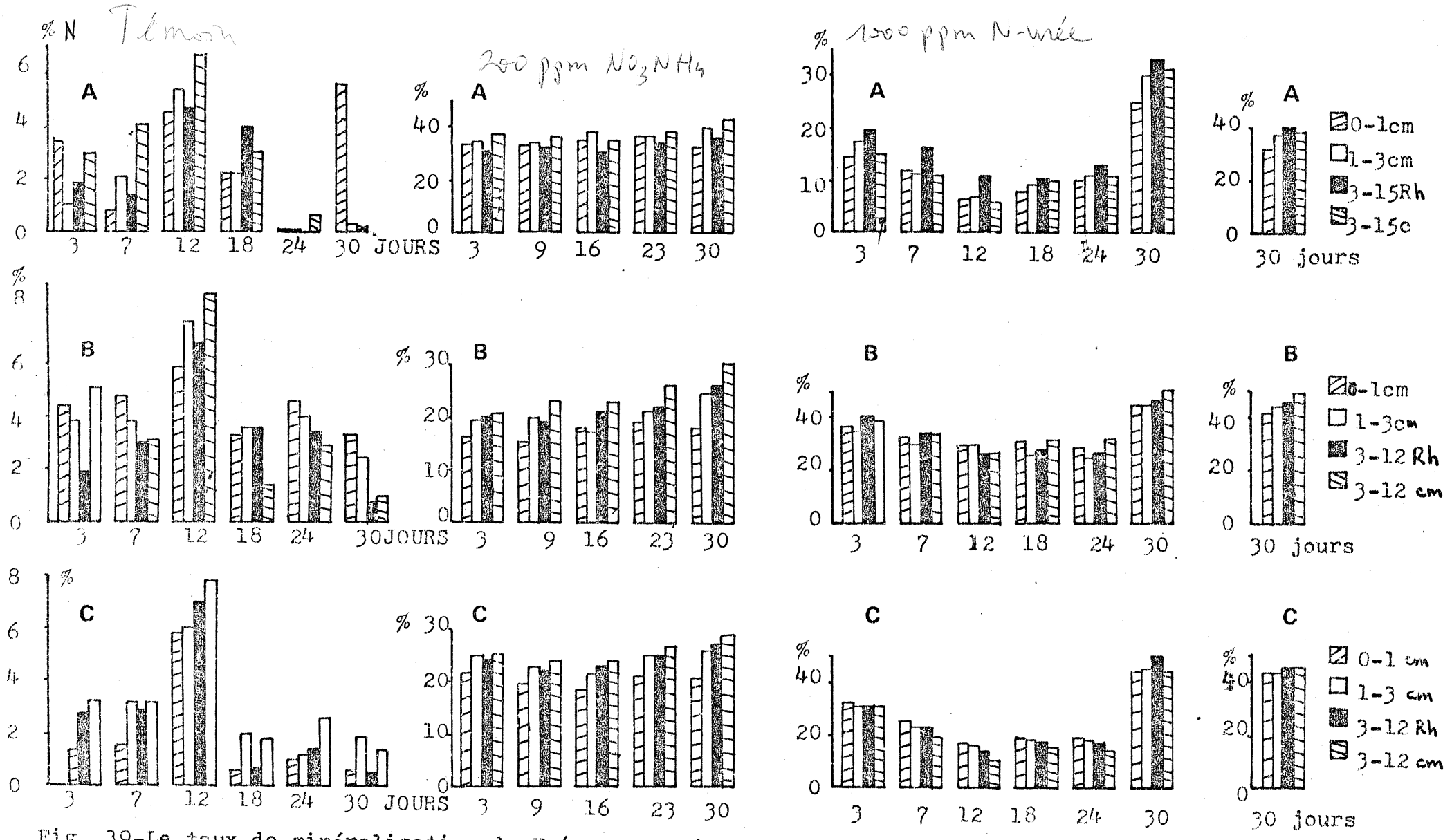


Fig. 39-Le taux de minéralisation de N (en p. 100) A-sol sous Loudetia brûlé, B-sol sous Loudetia non brûlé$_a$ et C- sol sous Hyparrhenia$_a$

Rh: Rhizosphère

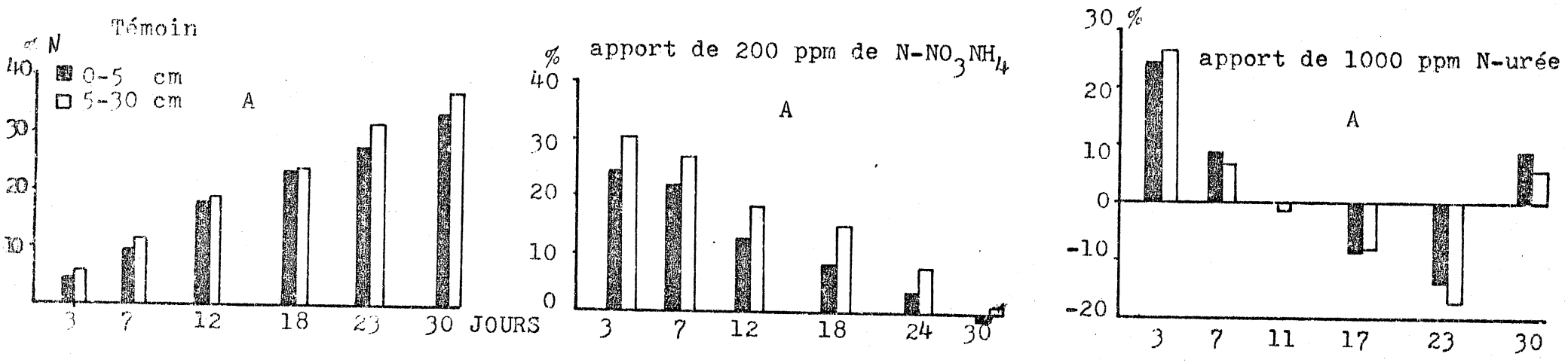
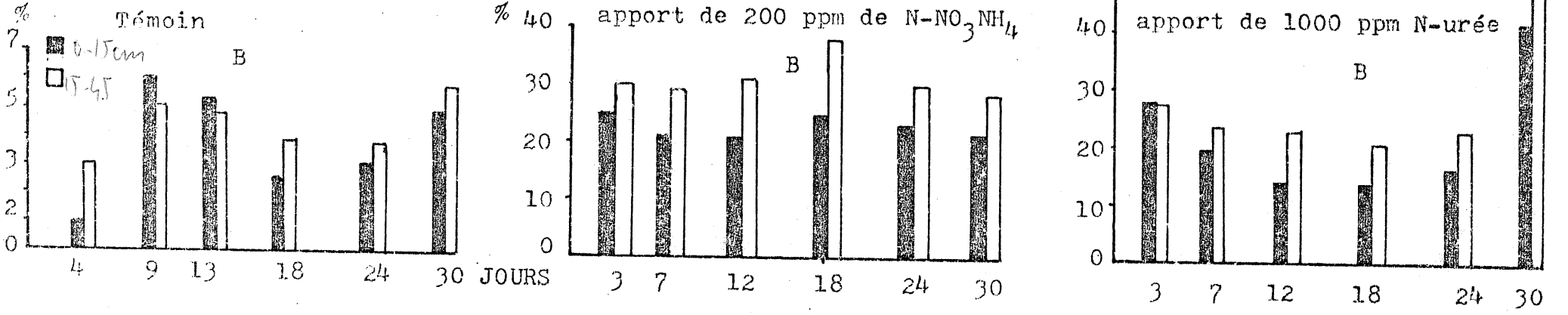


Fig. 40- Le taux de minéralisation de N (en p. 100) . Témoin déduit

A- sol sous Loudetia non brûlé$_b$ B- sol sous Hyparrhenia$_b$



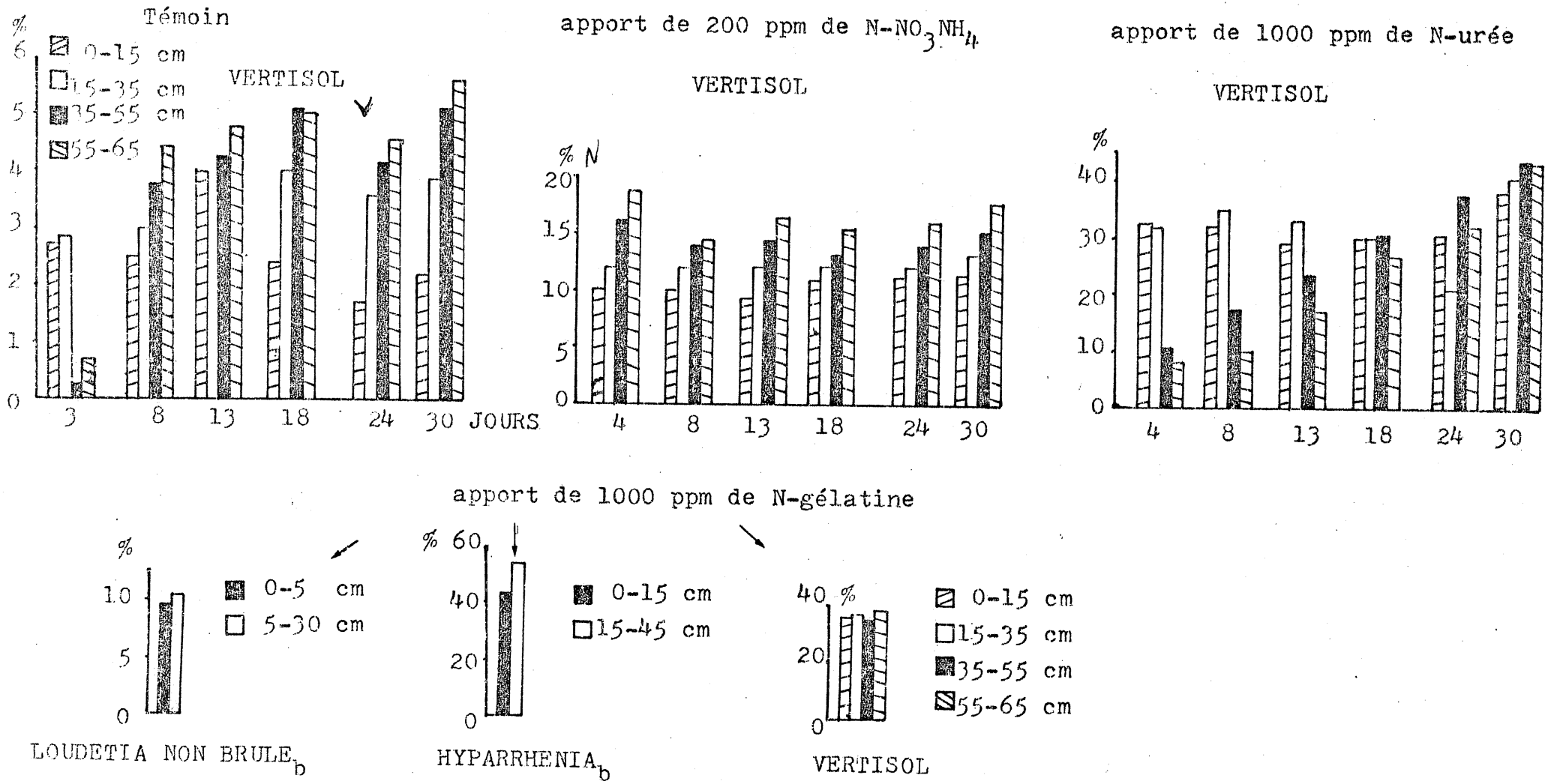


Fig. 41- Le taux de minéralisation apparent de N (en p. 100) dans les sols de Lamto enrichis.

Témoin déduit en fonction de NH_4^+ accumulé.

CHAPITRE III

DISCUSSION

Le présent travail nous a permis d'étudier l'activité microbienne actuelle et potentielle dans quelques sols de Lamto (Côte d'Ivoire) et dans un sol dérivé de cendres volcaniques prélèvé à La Réunion.

L'activité des microorganismes a été mesurée in vitro dans des conditions contrôlées et en présence de substrats organiques et minéraux:Le dégagement du gaz carbonique, la minéralisation de l'azote organique dépendent à la fois de la teneur en eau et en éléments organiques minéralisables, facteurs dont le rôle a été exploré pour différents types de sols par ENGEL (1934), FEHER (1935), ELKAN (1960), GAWLICK (1963), DOMMERGUES (1964), SCHAEFER (1966) parmi d'autres.

a) Comparaison de l'activité biologique dans les divers types de sols et dans les différents niveaux étudiés.

En ce qui concerne la minéralisation du carbone organique dans les sols non enrichis; le sol volcanique n'a pas eu une activité très intense par rapport aux sols de Lamto en dépit de sa teneur en éléments biogènes importante.Si l'on etudie les courbes cumulatives du dégagement respiratoire, on trouve,dans le cas de l'andosol, des taux jusqu'à cinq fois plus élevés de $C(CO_2)$ par rapport aux sols de Lamto, mais avec un taux de minéralisation de C moindre.Cependant nos résultats concernant le sol à allophane concordent bien avec ceux des sols de Chili, de Java et de Zaïre (SCHAEFER et all., 1969, URBINA et all., 1969, URBINA et all., 1971, BENLOT, 1977).

On observe que le sol volcanique minéralise, en quatre jours, entre 17 et 35 mg de $C(CO_2)$/ 100 gr Terre sèche dans les échantillons de 0 à 10 cm.Ces chiffres descendent jusqu'à 1 mg dans l'horizon de 65 à 70 cm qui paraît moins actif que les deux horizons précédents, bien que ces derniers aient une teneur en C inférieure à la sienne.On pourrait penser d'une part, à une rétention de la matière organique par l'allophane et d'autre part, aux conditions défavorables du milieu.En effet, le pH de cet horizon est inférieur, donc plus acide,ce qui peut entraver

l'activité microbienne (DOMMERGUES; 1970).

Dans le même délai de quatre jours, la quantité de carbone minéralisée par les sols de Lamto ne dépasse guère 15 mg de $C(CO_2)$. En tenant compte de la quantité de $C(CO_2)$ cumulé en 30 jours, on peut déterminer le taux de $C(CO_2)$ dégagé in vitro par jour et pour 100 g de terre sèche. Ainsi on obtient des valeurs entre 0,3 mg (Loudetia non brûlé$_b$, niveau 5-30 cm) et 1,6 mg (vertisol, niveau 0-15 cm), les autres niveaux étant souvent de l'ordre de 0,8 à 1,1 mg de $C(CO_2)$/100g terre sèche/par jour. VILLECOURT (1973) nous rapporte des valeurs de respirométrie in situ dans les sols de Lamto qui rendent bien compte de l'effet de l'humidité et du feu sur l'activité biologique. Des travaux d'autres auteurs (DOMMERGUES, 1962, SCHAEFER, 1974) ont contribué à la mise en évidence de l'effet de l'humidité sur l'activité métabolique des sols tropicaux. D'après SCHAEFER (1974), les valeurs de CO_2 dégagé, pour les sols de Lamto ajustés à la capacité au champ, seraient proches de celles in situ du bilan annuel.

Parmi les niveaux incubés des sols savanicoles de Lamto, la prédominance des niveaux rhizosphériques est apperente. Ils se distinguent par un dégagement de CO_2 plus important par rapport aux autres. Ceci est sans doute lié à la présence des débris végétaux souterrains abondants, donc des substrats abondants et facilement minéralisables, ce qui implique une population microbienne abondante. A l'intérieur même de ces couches rhizosphériques, celle sous Loudetia non brûlé$_a$ paraît la plus active, avec néanmoins une teneur en C un peu plus élevée et une teneur en N presque identique à celle des autres. Dans ce cas, on peut penser que d'autres facteurs que N et C interviennent. Il est probable en effet, que dans le cas du sol sous Loudetia brûlé, un des facteurs soit le feu et dans celui du sol sous Hyparrhenia, l'argile, puisque nous savons que le feu détruit la matière organique, gîte de la microfaune et des microbes, qui repose dans la couche superficielle. La microfaune et les microbes ainsi détruits ne remplissent plus leur rôle de brassage et de décomposition des débris végétaux et animaux, surtout s'il s'agit de vers de terre. Ce rôle important a été souligné par KURCHEVA (1960) et plus récemment par LAVELLE (1978).

Le sol sous Hyparrhenia ayant une teneur en argile plus élevée, le rôle régulateur de celle-ci dans la dégradation de la matière organique peut être mis en cause.

En dehors des niveaux rhizosphériques, les autres couches de ces sols ont une allure très semblable avec un ordre de rangement commun(de couches superficielles aux niveaux profonds).

Dans le vertisol, c'est le niveau de surface (0-15 cm) qui montre une activité plus intense en rapport, sans doute, avec sa plus forte teneur en C (2,6 %).Les trois niveaux sous-jacents se rangent dans l'ordre de la profondeur, donc comme les sols ci-dessus.

CO_2 dans les sols enrichis

- Sol volcanique : On a pu observer qu'un apport de 1000 ppm de l'aluminium-$Al_2(SO_4)_3$ au premier mois n'affecte pas l'activité respiratoire, donc le dégagement du gaz carbonique.Son effet inhibiteur n'apparaît qu'à partir d'une dose de 3000 ppm.On peut donc penser que l'Al a été adsorbé par l'allophane et ainsi son effet toxique tamponné. Nous savons par ailleurs que cet élément perd sa toxicité en formant un complèxe avec les acides fulviques.D'après RODRIGUEZ et all.(1971) ceux-ci complexent environ 300 mg d'Al par gramme de Carbone.

1800 ppm de C-pyruvate et 700 ppm de N-alanine (=1800 ppm C) semblent produire une activation analogue.Celle-ci peut être attribué au carbone facilement métabolisable contenu dans ces substrats.La pente de courbe qui apparaît après la seconde addition de substances indique qu'un apport de 1800 ppm de C-pyruvate a fait minéraliser environ 45 mg de $C(CO_2)$, soit 1/4 de l'apport, et que 700 ppm de N-alanine en dégagent 50 mg.Avec l'augmentation des doses apportées la quantité de $C(CO_2)$ forme des pics.Ainsi, à la suite de la troisième adjonction, un apport de 3600 ppm de C-pyruvate accélère la production du gaz carbonique qui libère ainsi, en deux jours, 70 mg de $C(CO_2)$, alors que 3600 ppm de C-alanine ont provoqué la minéralisation de 90 mg de $C(CO_2)$ toujours dans un délai de deux jours.On costate donc que le dégagement du gaz carbonique n'est pas proportionel aux doses apportées.Après la pente initiale, les courbes des échantillons enrichis en C de alanine et de pyruvate deviennent presque parallèles, ce qui signifie que c'est la matière organique déjà existant dans les sols qui se dégrade progressivement.

L'apport au premier mois de 700 ppm de N minéral semble inhiber la respiration du sol.Cette échantillon qui a reçu au second mois

1800 ppm de C-pyruvate a montré une allure identique à celle de l'échantillon qui n'a été enrichi que par ce substrat à doses croissant. On calcule environ 45 mg de $C(CO_2)$ minéralisé,à la suite de cet apport, par cet échantillon qui a reçu au troisième mois un nouvel apport de 700 ppm de N minéral.Celui-ci ne semble pas avoir d'effet sur la minéralisation puisque la courbe suit l'allure du témoin.

L'effet d'un apport de phosphore se manifeste très progressivement.D'après la pente initiale, 400 ppm de $P\text{-}KH_2PO_4$ ont produit environ 20 mg de $C(CO_2)$, 3600 ppm 25 mg de $C(CO_2)$ et un apport de 16.000 ppm ne libère guère que 20 mg de $C(CO_2)$.Si l'on tient compte de la quantité globale de carbone du gaz carbonique libérée en présence de phosphore, on constate que 16.000 ppm de celui-ci correspondent à l'apport de 1800 ppm de C-pyruvate.On connaît d'ailleurs le pouvoir que possède P de libérer une part du carbone absorbé par l'allophane qui s'ajoute à la fraction carbonée du composé de P organique.Ce carbone est très facilement minéralisable (SCHAEFER, 1975)

Parmi les substrats taniques ajoutés dans le mélange des échantillons de surface de 0 à 10 cm, c'est l'acide tanique à 5 % qui semble favoriser le plus, la respiration.En sept jours, 176 mg de carbone de CO_2 ont été produits, tandis que l'acide gallique à même dose a libéré 78,8 mg de $C(CO_2)$.Le fait important à observer est celui que les tanins ne paraissent pas avoir un effet toxique vis-à-vis du sol à allophane.La minéralisation n'est pas du tout affectée par leur présence. Leurs taux de minéralisation de C aussi élevés que ceux des pyruvate et alanine en témoignent d'une façon évidente.

Sols de Lamto : L'enrichissement par 200 ppm de N minéral des échantillons a entraîné,dans tous les sols, une diminution de la minéralisation de Carbone en accord avec les observations de JONG et all. (1974)Les niveaux rhizosphériques sont distincts des autres que l'on retrouve dans l'ordre de profondeur, ordre qui est sans doute lié à la quantité de C répartie dans le profil des sols concernés.(Une très légère baisse de la minéralisation de C en présence de N minéral ($N\text{-}NO_3NH_4$) avait été aussi notée dans le sol volcanique)

L'apport de 1000 ppm de N-urée (=428,5 ppm C) a provoqué une légère diminution de la minéralisation du Carbone dans le sol sous Loudetia brûlé et, par contre, une augmentation dans les autres sols.

Cette diminution peut être expliquée par une immobilisation du C et de N apportés sous forme d'urée.L'immobilisation de N est très nette. D'ailleurs on sait que plus il y a de C assimilable au départ plus grande est l'immobilisation initiale de N (SCHAEFER, 1965).Ce qui est à remarquer dans ces sols enrichis en urée, c'est que les niveaux les plus profonds semblent minéraliser le plus de C.Ces niveaux montrent une " faim de C " de plus en plus prononcée.

La gélatine provoque une montée spectaculaire et rapide du dégagement du gaz carbonique dans tous les sols de la savane de Lamto.

Minéralisation de l'azote : Le sol volcanique "témoin" montre une intense activité de nitrification qui masque la production d'ammoniaque.Il convient de tenir compte, vu la percolation facile des andosols, du fait que les nitrates initialement accumulés in situ dans un horizon donné peuvent provenir de la lixiviation des niveaux supérieurs du profil.

Dans les sols de Lamto, on n'observe in vitro qu'une très médiocre accumulation d'azote minéral, tant NH_4^+ que NO_3^- .Le même phénomène est constaté in situ (RHAM, 1970, RHAM, 1972, SCHAEFER, 1974)

Dans le sol volcanique enrichi, l'apport de 2800 ppm de N-alanine provoque, à court terme, une forte accumulation d'ammoniaque. En général et à long terme, c'est la nitrification qui prédomine.

L'apport des tanins occasionne une diminution continue de la quantité de l'azote nitrique.Ceci peut résulter d'une immobilisation par les microorganismes ou d'une réduction désassimilative des nitrates (RUSSELL, 1962, WOLDENDORP, 1962) ou serait même à attribuer à d'autres facteurs (Biodégradation déprimée pour les complexes (protéines-tanins).

Les sols de Lamto enrichis en 200 ppm de N minéral ($N\text{-}NO_3NH_4$) n'ont montré qu'une succession de vagues d'immobilisation et de minéralisation dont le bilan global est nul.Il paraît évident qu'un ou plusieurs facteurs limitants interviennent dans cette fluctuation épisodique.

L'adjonction de N-urée et de N-gélatine donne lieu dans tous les sols de Lamto, à une forte ammonification qui est d'ailleurs très très intense dans le cas d'une anaérobiose relative (cas des fioles

servant au dosage de respiration).

On costate que le sol sous Loudetia non brûlé$_a$ se comporte d'une façon différente des autres sols sous Loudetia brûlé et sous Hyparrhenia$_a$

b) Interdépendance et interaction des cycles du carbone et de N

L'interdépendence des cycles du C et de N se manifeste à travers des phénomènes de l'immobilisation biologique de N et de la réduction désassimilative des nitrates.L'intensité de ces processus est déterminée par la quantité et la qualité du C disponible.Par des essais factoriels, nous avons essayé de mettre en évidence l'importance de ce facteur.Les réponses variables données par la micropopulation présente dans les échantillons de sols, aux apports de substrats carbonés et/ou azotés nous ont permis de comprendre, un peu plus, le rôle de ce facteur capital d'une part et l'orientation et la marche de leur dégradation en fonction de conditions expérimentales d'autre part. L'accroissement de l'activité biologique provoqué par une telle addition de substrats énérgetiques peut entraîner une stimulation de la dégradation de la matière organique du sol.Cet effet dit de "priming" a été bien illustré par BARROW (1960).

Dans le cas de l'allophane,nous avons observé une adsorption prononcée des éléments biogènes (C, N, P) qui se sont ainsi trouvés soustraits à l'accessibilité pour les microbes.L'effet de P sur le complèxe absorbant de l'allophane est remarquable:Comme bien d'autres auteurs, nous avons pu démontrer qu'une haute dose de P (16.000 ppm) pouvait mettre à la disposition des microorganismes autant de C qu'un apport de 1800 ppm de C-pyruvate.

Nos résultats illustrent et confirment le fait que le facteur limitant principal dans les sols de Lamto est le Carbone, et non pas l'azote.On a vu, en effet que l'apport de N minéral n'a pas eu d'effet stimulant sur la minéralisation.Par contre, urée et gélatine,sources de N et d'énergie ont nettement activé les microorganismes.

Nous pouvons donc conclure,dans le cadre de nos études, que c'est le carbone qui représente le facteur limitant majeur du métabolisme microbien dans les sols d'écosystèmes naturels.Dans les agrosystèmes où du materiel végétal, donc des éléments biogènes sont exportés, cette règle n'est plus valable.

La minéralisation du carbone permet accessoirement l'utilisation de l'azote.

Le phosphore peut, par son effet désorbant, dans le cas d'un sol à allophane, fournir, dans une certaine mesure, les composés énérgetiques nécessaires aux activités hétérotrophes.Les doses excessives de P, toutefois risquent de gaspiller le stock humique adsorbé sur l'allophane et préservé de cette manière.

CONCLUSION

Toutes les expériences mentionnées ont été réalisées *in vitro* en conditions contrôlées.Le caractère maintenu constant pour des paramètres essentiels comme l'humidité et la température exerce une influence certaine sur la dynamique et l'activité biochimique des micropopulations.Cette influence est sans doute différente *in situ* où ces paramètres sont soumis à des variations cycliques de différentes périodes (journalières, saisonnières etc.) ou épisodiques.

On sait depuis lontemps qu'en conditions contrôlées on stimule certains microorganismes et par contre on en inhibe d'autres, en attenuant ou en renforçant l'effet de certains facteurs (SCHAEFER, 1966). La période de récolte, les conditions de stockage des échantillons peuvent aussi influer sur les résultats d'incubation *in vitro* (DOMMERGUES, 1962, LEMEE, 1967, BONNEAU, 1971).

Dans un système fermé que constitue une incubation *in vitro* permanente, les métabolites hydrosolubles peuvent s'accumuler et ainsi influencer et orienter l'activité microbienne, comme c'est le cas *in situ* en période sèche.Les mesures s'effectuent donc sur l'activité potentielle en fonction de l'ensemble du substrat y compris les matières hydrosolubles qui sont entraînées rapidement dans les conditions naturelles (VARNERO et SCHAEFER, 1974).

a) Taux et qualité des ressources énérgetiques en éléments biogènes et action du feu comme facteurs limitants dans les sols de Côte d'Ivoire

Parmi les apports de divers substrats, seul N minéral (200ppm)

a un effet négligeable sur la population microbienne présente dans le sol.Les variations quantitatives de N ammoniacal et nitrique au cours de l'incubation témoignent néanmoins de l'existence d'un ou plusieurs groupes de microbes telluriques qui par défaut d'une source énérgetique sont plus ou moins inhibés.L'adjonction des substrats carbonés, tels que urée et gélatine suffit à stimuler cette micropopulation.Parmi ces deux substrats, la gélatine paraît plus efficace et plus accessible aux microorganismes.

Quant au feu, contrairement à nos suppositions, il ne semble pas altérer le déroulement normal du cycle d'N, sinon que le niveau de surface de 0 à 1 cm a transitoirement une activité quelque peu moins intense.Le feu ne paraît donc avoir une action que dans la mesure où il détruit la litière superficielle, et aussi par la lente combustion occasionelle du système racinaire en profondeur.

b) Caractères spécifiques de l'andosol : Comportement vis-à-vis de P et de Al, effet des tanins, activité potentielle des horizons subactuels et des horizons minéraux profonds.

Nous avons vu, à la suite de l'addition de P, la libération par échange, de la matière organique adsorbée jusqu'alors sur l'allophane, libération qui est proportionnelle à la dose de cet élément et très régulière.La faible dose n'a apparemment pas eu d'effet, puisque tout le phosphore apporté a été adsorbé.L'action de celui-ci ne commence donc à se manifester que lorsque la capacité d'échange anionique de l'allophane est saturée en cet élément.Par conséquent, des essais de doses croissantes s'avérent indispensables pour situer des seuils d'action éventuels.

L'Al et les tanins à faibles doses se comportent, dans une certaine mesure, comme P.Mais ils n'ont pas le même fort pouvoir d'échange de cet élément.Une dose allant jusqu'à 3000 ppm de Al n'est pas toxique, puisqu'elle est détoxifiée par compléxation avec des molécules humiques à faible poids moléculaire.

Quelques essais de stimulation métabolique nous ont démontré que les horizons organiques et minéraux subactuels d'andosol peuvent être activé.Mais in situ, contrôlés par certains facteurs limitants, ils montrent une très faible activité microbienne.Au delà de 70 cm, les échantillons "témoin " n'ayant fait preuve d'aucune activité,on n'a pas

effectué d'essais de stimulation.

c) Convergence et dissemblance des divers types de sols analysés

La plus grande dissemblance réside dans la nature des argiles et les propriétés qui en découlent.Par contre, leur convergence se trouve dans leur réaction aux apports de substrats.Dans les sols de Lamto *a fortiori* et même dans le sol volcanique on a observé un grand déficit, un grand besoin en carbone et quelque fois en azote.C'est donc presque toujours le problème de la source énérgetique qui gouverne le turn-over des éléments biogènes.

Même pourvu de tous les autres éléments biogènes mais non énérgetiques ou *vice versa* un sol souffre de perturbation de son équilibre.On peut assimiler ce phénomène au fait que les plantes s'adaptent à la quantité moindre d'un élément dans le sol même si tous les autres sont à quantités optimum (Loi du Minimum de LIEBIG, in LEMEE, 1967).

d) Perspective et prospective

L'écologie microbienne des sols tropicaux est encore très mal connue:Les activités biochimiques et le bilan des éléments biogènes dépendent, en effet, des contraintes climatiques dans une mesure qui ne se compare guère à celles qui régissent la Nature dans les aires à climat tempéré.L'accélération des phénomènes d'évolution du sol, et des processus de biodégradation, rendent nécessaires des études approfondies dans les milieux tropicaux humides, où la transposition des résultats obtenus sous climat tempéré n'est pas justifiable.

En particulier, l'étude des sols à allophane et à montmorillonite, où la matière organique humifiée est fortement adsorbée par le complèxe colloïdal argileux, et par là soustraite à une biodégradation potentiellement extrêmement active, permet de mettre en évidence un mécanisme de régulation très efficace.Cette stabilisation relative d'un stock énergétique humique accru contribue à diminuer l'entropie du système.Toute intervention humaine mobilisant ce stock conduira à des agrosystèmes éminement fragiles, dont la gestion devra obéir à des impératifs définis.Les recherches que nous proposons et envisageons sont orientées vers une exploration systématique de cette thématique.

Plan et objectifs détaillés à atteindre

- Etude integrée dans un programme de recherche à long terme sur les andosols et les vertisol.
- Originalité et cohésion du projet, axé sur deux thèmes :
  - . mécanismes microbiologiques et biochimiques de régulation de ces sols,
  - . modalités du flux d'énergie.
- Impact assuré sur le plan fondemental et sur le plan d'applications agrologiques.

Méthodologie

- Analyse de l'humus : - extraction, fractionnement, caractérisation
  - propriétés des diverses fractions :
    - . valeur énergétique
      pouvoir complexant (vis-à-vis de Al, Fe, Ca)
- Effets d'un apport énergétique : divers substrats, dont P organique, tanins et composts à divers degrés d'humification, à diverses doses. Analyse factorielle de la minéralisation.
  Etude de la réponse de la microflore (divers groupes métaboliques ou "fonctions physiologiques").
  Compétition : allophane-microflore et montmorillonite-microflore pour ces substrats ?
- Mobilisation de la matière organique fixée par l'allophane ou par la montmorillonite; conséquences pour la microflore.
  - exploration de l'effet désorbant de divers phosphates, de saponines, de silicates, de tanins etc. à diverses doses. Mise en évidence par l'activation des fonctions microbiennes hétérotrophes.
  - effets d'une dilution par divers substrats (poudre de quarz, silice colloïdale, kaolin, montmorillonite, allophane).
- Effets du taux d'humidité du sol et d'une dessication prolongée sur les activités microbiennes et l'évolution du sol. In situ : effet du régime pluviométrique (densité).
- Dynamique de la nitrification dans le milieu acide des andosols.

- Allophane et montmorillonite et activités enzymatiques (deshydrogénase, phosphatase).

But de la recherche envisagée : Inventaires détaillés et connaissances approfondies sur trois plans :

= fonctionnement du compartiment hypogé des systèmes sur andosols et sur vertisols.
  . modalités du flux d'énergie, régies par la présence et le taux d'allophane et de montmorillonite,
  . mobilisation de la M.O adsorbée.
  . comportement de la M.O. sous régime d'irrigation
  . interdépendance énergétique des cycles biogéochimiques
- évolution du système par la transformation d'allophane (+) en argiles (-), sous l'effet de façons culturales.
- comparaison des activités microbiennes sous climat perhumide, frais et tropical; effet de l'altitude, sous régime tropical, sur le comportement de la microflore.
- analyse causale de la convergence apparente entre sols dérivés de cendres volcaniques et vertisols :
  . existence d'un fort potentiel humique sous les tropiques, par l'effet d'une biodégradation restreinte.
  . conséquences de cette stabilisation par l'allophane ou la montmorillonite.
  . voies possibles, effets immédiats et à long terme d'une déstabilisation.
  . mécanismes biologiques comparés de régulation.
- incidence des modalités de l'exploitation agricole et forestière sur la conservation du potentielle de fertilité climacique des andosols.

Le coût operationnel, in vitro et in situ, sera maintenu à un minimum, car nous nous attachons à mettre en oeuvre des moyens matériels et des méthodes transposables et utilisables dans les conditions de pays tropicaux où les contraintes locales commendent un choix impératif.

BIBLIOGRAPHIE

BARROW N.J., 1960 - Stimulated de decomposition of soil organic matter during the decomposition of added organic material.Austr. J. Agr. Res., 11 (3), 331-338.

BENLOT C., 1977 - Recherches sur les activités biochimiques dans les successions topographiques de sols dérivés de cendres volcaniques sous climat tropical humide (Zaire - Indonesie) Rapport de D.E.A. d'Ecologie Univ. Paris VI, ENS Lab. de Zool.

BIRRELL K.S., FIELDES M., 1952 - Allophane in volcanic ash soils. J. Soils Sci. 3 (2) ; 156-166.

BONNEAU M., 1971 - Nouvelles observations sur la minéralisation de l'azote dans deux sols des Hautes Vosges.Sci. du sol, 1, 31-46.

CADET Th., 1974 - Etude sur la végétation des hautes altitudes de l'île de la Réunion (Océan Indien).Vegetatio, vol. 29, 2 : 121-130.

CESAR J., MENAULT J.C., 1974 - Analyse d'un écosystème tropical humide: La savane de Lamto (Côte d'Ivoire).II- Le peuplement végétal : Le peuplement végétal des savanes de Lamto (Côte d'Ivoire).Publ. Lab. Zool. ENS n° spécial, II,161 p.

DESHPANDE T.L., GREENLAND D.J., Mc. NICOLL J., 1964 - Influence of iron and aluminium oxides on the charges of soils and clay minerals.Trans., 8 th. Intern. Congr. Soil Sci., Bucharest.

DOMMERGUES Y., 1962 - Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche. Ann. Agron., 13, 265-324.

DOMMERGUES Y., MANGENOT F., 1970 - Ecologie microbienne du sol.Masson et C^{ie}. 796 p.

DROUINEAU et GOUNY, 1947 - Contribution à l'étude du dosage de l'azote nitrique par la méthode Devarda.Ann. Agron., 2, 155 p.

DUCHAUFOUR Ph., 1970 - Précis de Pédologie, Masson et C^{ie}, 481 p.

DUCHAUFOUR Ph., 1977 - Pédologie : 1- Pédogènese et classification. Masson et C^{ie}, 477 p.

ELKAN G.H., MOORE W.E.C., 1960 - The effects of temperature,moisture and initial levels of organic matter uppon differential microbial counts, CO_2 activity and organic matter decomposition in soil.J. El. Mitch. Sci. Soc. USA, 76 (1), 134-140.

ENGEL H., 1934 - Kritische Bemerkungen zur "Bodenatmung" Zbl. Bakt. II, 90 , 158.

ESPINOZA, Waldo G., 1968 - Antecedentes bibliográficos del alofán y su determinación en les suelos de Ñuble.Universidad de Concepción, Escuela de Agronomía, Departamento de suelos, Chile.

FEHER D., 1935 - Untersuchungen über die Schwankungen der Bodenatmung. Arch. Mikrob., 5 , 421-442.

FIELDES M., PERROTT K.W. 1966 - The nature of allophane in soils.Part 3. Rapid field and laboratory test for allophane.New Zealand Journal of Science. 9 (3): 623-629.

GAWLICK J., 1963 - Le changement de la composition de l'air du sol dans les tourbeux évolués à partir de marais,en rapport avec l'humidité, la température et le niveau de l'eau souterraine.Rocz. gleboznaw, Polska 13 , suppl.,174-176.

JONG E.de , SCHAPPERT H.J.V., Mac DONALD K.B., 1974 - Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate.Can. J. Soil Sci., 54 , 299-307.

KURCHEVA G.F., 1960 - Role of invertebrates in the decomposition of oak litter.Soviet Soil Sci., n° 4, 360-365.

LAMOTTE M., 1975 - Chapter 15 : The structure and function of a tropical savannah Ecosystem. 179-222.

LAVELLE P., 1978 - Les vers de terre de la savane de Lamto (Côte d'Ivoire).Peuplements, populations et fonctions dans l'écosystème.Publications de Lab. de Zool. n° 12,ENS.

LECORDIER Ch., 1974 - Analyse d'un écosystème tropical humide:La savane de Lamto (Côte d'Ivoire).I- Les facteurs physiques du milieu : Le climat. Pub. Lab. Zool. ENS n° spécial , II : 45-104.

LEFEVRE G., HIROUX G., 1960 - Considérations sur la minéralisation et l'utilisation des réserves azotées du sol.Ann. Agron., 11, n° 2, 135-162.

LEMEE G., 1967 - Précis de Biogéographie, Masson et C^{ie}, 358 p.

LEMEE G., 1967 - Investigation sur la minéralisation de l'azote et son évolution annuelle dans les humus forestiers in situ. Oecol. Plant., 2, 285-324.

MEHLICH A., 1960 - Charge characterization of soils.Trans. 7 th. Intern. Congr. Soils Sci. 11 : 292.

RASHID G.H., 1977 - Dynamique de la minéralisation du carbone et de l'azote dans deux sols d'une catena forestière :Incidence de l'hydromorphie.Thèse de docteur-ingénieur.Univ. Paris Sud, Centre d'Orsay,Lab. d'Ecologie Végétale, 123 p.

RHAM De P., 1970 - L'azote dans quelques forêts, savanes et terrains de culture d'Afrique tropicale humide (Côte d'Ivoire) Veröffentlichungen des geobotanischen Intitutes der eidg. techn. Hochschule, Stiftung Rübel, Zürich.

RHAM De P., 1972 - Recherches sur la minéralisation de l'azote dans les sols des savanes de Lamto (Côte d'Ivoire) - Revue d'écologie et de biologie du sol. 10 , n° 2, 169-196.

RIOU G., 1974 - Analyses d'un écosystème tropical humide : La savane de Lamto (Côte d'Ivoire).I- Les facteurs physiques du milieu : Les sols de la savane de Lamto.Publ. Lab. Zool. ENS n° spécial, I : 3-43.

RODRIGUEZ S.A., SCHAEFER R., 1971 - Interaccion entre materia organica y aluminio en un suelo hydromórfico derivado de cenizas volcánicas (Nadi, Sur de Chile). Turrialba, 21 , n° 2; 149-156 (trimestre Abril-Junio, 1971).

RUSSELL E.J., 1962 - Soil conditions and plant growth.London,Longmans Green, 688 p.

SCHAEFER R., 1965 - Aspect du cycle de l'azote dans un mull et un anmoor calcique.Minéralisation de l'azote organique et immobilisation de l'azote minéral; influence, sur ces processus d'un addition de carbone organique, d'azote organique ou minéral, d'ions Ca^{++} ou K^{+}.Ann. Inst. Pasteur, 109 : 301-315.

SCHAEFER R., 1966 - Caractères et évolution des activités microbiennes dans une chaîne de sols hydromorphes mésotrophiques de la plaine d'Alsace, III - Activités de la population microbienne.Thèse Sciences, Orsay, AO n° 1970/CNRS, 1966.

SCHAEFER R., URBINA A., SAN MARTIN E., 1969 - Actividades microbianas como un sistema de regulación del ecosistema en suelos hidromórficos derivados de cenizas volcánicas de Sur de Chile. - Primer panel latino-americano de suelos derivados de cenizas volcanicas.Turrialba, Costa-Rica, B.6.1-B.6.14.

SCHAEFER R., 1974 - Analyse d'un écosystème tropical humide : La savane de Lamto (Côte d'Ivoire) II- Activité métabolique du sol : Fonctions microbiennes et bilan biogéochimique dans la savane de Lamto.Publ. Lab. Zool. ENS n° spécial, III, 167-184.

SCHAEFER R., 1975 - Formations végétales, dynamique de l'humus et activités microbiennes dans une succession de sols dérivés de cendres volcaniques, soumis à divers régimes hydriques.Comptes-rendus du 100e Congrès Nat. des Sociétés savantes, (Paris, 1975), fasc. 11, 199-214.

SCHAEFER R., 1976 - La matière organique du sol.Sa dynamique liée aux facteurs de l'environnement.Son rôle de régulation dans les écosystèmes.- Cas particulier des sols calcimorphes et des sols halomorphes sous climat de type mediterranéen. Extrait de :Ann. Inst. Nat. Agron. (El-Harrach), VI,n°2.

SUMNER M.E., 1963 - Effect of iron oxides on positive and negative charges in clays and soils.Clay min. Bull.,5 :218-226.

URBINA A., SAN MARTIN E., SCHAEFER R., 1969 - La actividad metabolica de algunos grupos fisiologicos de microbios en suelos Nadi de Chile. I-Mineralizacion del carbono y del nitrogeno organico, en condiciones de laboratorio. Agricultura Técnica (Chile), 29, n° 4, 145-160.

URBINA A., SAN MARTIN E., SCHAEFER R., 1971 - La activadad metabolica de algunos grupos fisiologicos de microbios en suelos Nadis de Chile. II- Mineralizacion del carbono et nitrogeno organicos en condiciones de campo.Agricultura Técnica (Chile), 32, n° 1, 1-10.

VARNERO M.T., SCHAEFER R., 1974 - Etude écologique de la dégradation et de l'humification des feuilles de hêtre (Fagus silvatica): Effet des conditions de l'incubation (oxybiose et anoxybiose) sur le bilan chimique.Coll. Internat. Biodégradation et Humification, Nancy, 340-351.

VILLECOURT P., 1973 - Contribution à l'étude du bilan du carbone dans un sol de la savane de Lamto en Côte d'Ivoire.Revue d'Ecologie et de Biologie du sol. 10, n° 1, 19-23.

WOLDENDORP J.W., 1962 - The quantitative influence of the rhizosphere on denitrification.Pl. and soil, 17, 267-270.