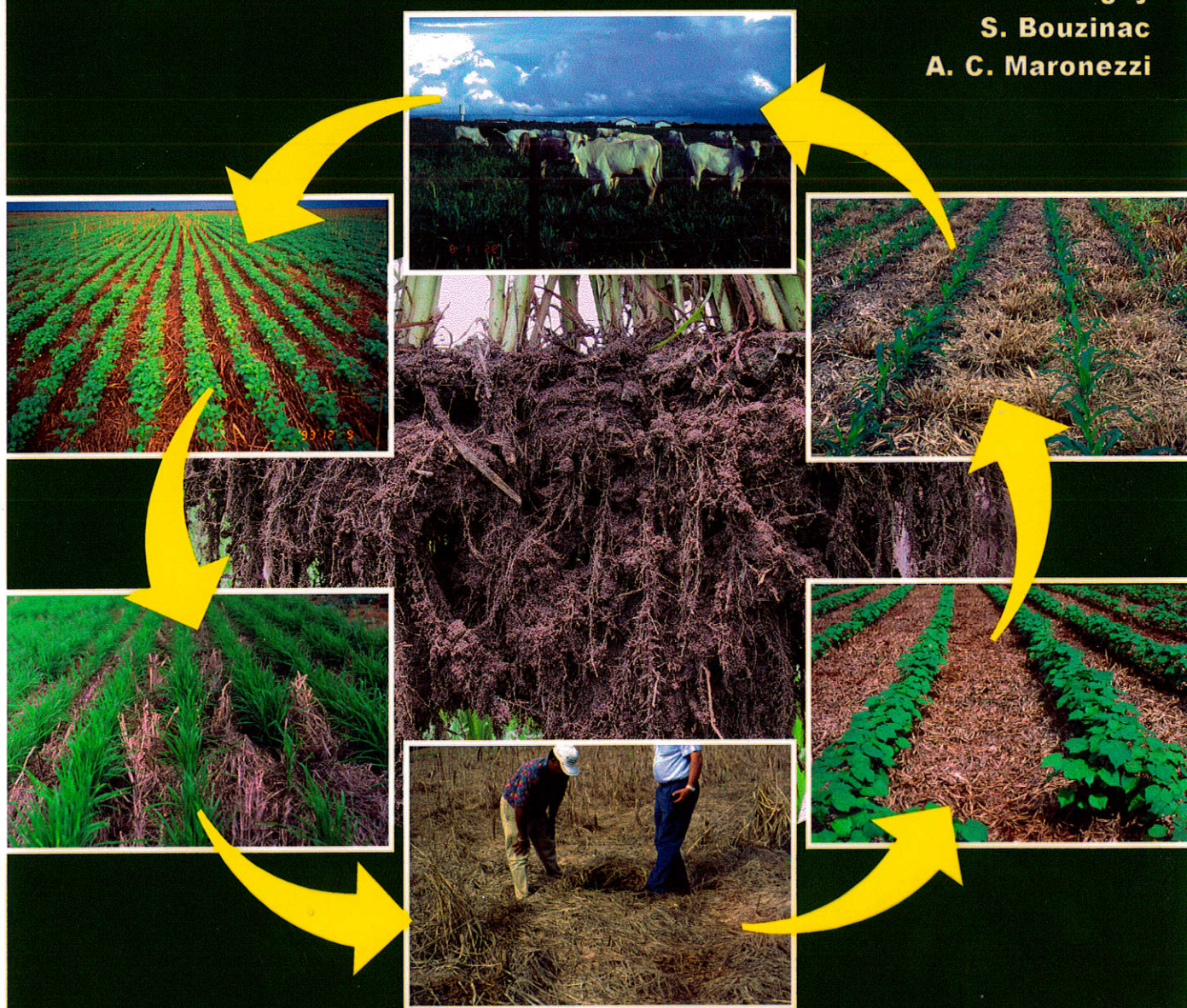


UN DOSSIER DU SEMIS DIRECT

SYSTÈMES DE CULTURE ET DYNAMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

L. Séguy
S. Bouzinac
A. C. Maronezzi



SYSTÈMES DE CULTURE ET DYNAMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

L. Seguy¹, S. Bouzinac², A. C. Maronezzi³

- 1 - Agronome du CIRAD-CA, en poste au Brésil, animateur du Réseau Semis Direct du programme GEC du CIRAD.
C.P. 504 Agência Central CEP 74001-970 - Goiânia-Go/Brésil
e-mail = lseguy@zaz.com.br
- 2 - Agronome du CIRAD-CA, travaille en équipe avec L. Séguy au Brésil et sur le Réseau Semis Direct du CIRAD
C.P. 504 Agência Central CEP 74001-970 - Goiânia-Go /Brésil
- 3 - Agronome et directeur de l'entreprise de recherche privée AGRONORTE, Partenaire du CIRAD au Brésil
Rua Colonizador Ênio Pipino, nº 993 Setor Industrial Sul
CEP 78550-000 - SINOP - MT / Brésil
e-mail = agronort@terra.com.br

Février 2001

AVANT - PROPOS

L'Histoire agronomique qui est présentée dans ce document, raconte la construction d'une révolution technologique à la portée aussi bien des grandes agricultures modernes mécanisées, engagées dans la mondialisation, que des petites agricultures familiales, même les plus deshéritées. C'est l'histoire des techniques de Semis Direct, ou comment passer des systèmes destructeurs de la ressource sol, hérités du transfert Nord-Sud de technologies, solidement ancrées dans les pratiques traditionnelles, à des systèmes de gestion durable qui permettent de préserver totalement l'environnement et d'améliorer la capacité de production du patrimoine sol, à court, moyen et long termes, avec beaucoup moins de travail à l'hectare, une grande simplification des travaux agricoles, tout en ayant une flexibilité accrue dans leur exécution et une bien moindre pénibilité.

Cette histoire agronomique est d'abord celle d'une méthodologie d'intervention de la Recherche, qui agit pour et avec les agriculteurs, dans leur milieu. Elle offre aux agriculteurs un très large choix de technologies et scénarios réels de développement, une vision, comparative au cours du temps, de leurs possibilités réelles agronomiques et technico-économiques, face aux systèmes traditionnels en vigueur. Elle permet aussi dans le même temps aux agronomes et aux chercheurs de toutes les disciplines de produire des connaissances scientifiques pour expliquer, prévoir le fonctionnement des écosystèmes cultivés, évaluer de manière anticipée par rapport à leur adoption par les agriculteurs les impacts sur l'environnement (*érosion, qualité biologique des sols*). C'est donc une démarche conceptuelle globale de Recherche-Action qui permet de mettre en regard : performances de production des systèmes, leurs modes de fonctionnement et impacts environnementaux, leurs limites d'application et possibilités d'extrapolation, dans une démarche préventive qui élabore des solutions réelles avec les agriculteurs, offre des choix stratégiques aux décideurs pour concilier les exigences de la société civile (*impacts environnementaux, qualité et traçabilité des produits*), des scientifiques (*limitation de l'effet de serre, pollution des nappes et des cours d'eau, protection des infrastructures, ...*) et les objectifs des agriculteurs et de l'agriculture durable en général.

La démarche utilisée a comme priorité principale de construire, d'abord dans la pratique, mais aussi dans la théorie, les bases d'une véritable révolution agricole bâtie sur le nouveau paradigme du Semis Direct sur couverture végétale permanente des sols. Lorsqu'elle est appliquée à des éco et agrosystèmes très différenciés de la planète, elle peut permettre d'identifier les lois essentielles de très large applicabilité du fonctionnement des systèmes de culture, pour promouvoir leur adaptation à très grande échelle. La démarche montre également que, à l'amont de toute recherche thématique qui doit alimenter le progrès constant des systèmes de culture durables, il est impératif de bâtir d'abord une modélisation raisonnée *in situ* des systèmes de culture et d'en assurer ensuite la maîtrise pratique, rigoureuse dans leur conduite (*la science doit être en connexion directe avec les réalités et possibilités agricoles d'aujourd'hui et de demain*).

A partir de cette démarche d'intervention, les auteurs analysent les performances comparées des systèmes de culture pratiqués avec travail du sol et en Semis Direct, dans diverses grandes éco-régions du monde tropical. Les résultats obtenus attirent un certain nombre de conclusions de portée très générale:

- Si la destruction de la matière organique (M.O.) des sols soumis à des modes de gestion inadaptés, peut être très rapide, sa reconstruction peut aller aussi vite en semis direct, en pratiquant les systèmes de culture construits à cet effet.
- Le pouvoir de séquestration du carbone dépend d'abord de la nature des systèmes de culture créés dans chaque région; les plus performants à cet égard

sont ceux qui produisent un maximum de matière sèche de résidus aussi bien à la surface du sol que dans le profil cultural, tout au long de la saison pluvieuse, mais aussi en saison sèche, au moment où les conditions de minéralisation de la M.O. sont ralenties. Le choix des plantes de couverture est aussi déterminant : les plus efficaces sont celles qui sont les plus puissantes, qui sont capables d'assurer le mieux les fonctions à la fois de protection de surface, de restructuration du profil, de recyclage profond des nutriments qui exige l'utilisation de l'eau profonde du sol, accroissant ainsi la capacité de production des systèmes en matière sèche, même en saison sèche, à l'image de l'écosystème forestier.

- Dans les meilleurs systèmes en Semis Direct (SD), les niveaux de M.O. peuvent ainsi rapidement rejoindre, voire dépasser ceux des écosystèmes naturels, même en partant de conditions très dégradées au départ.
- L'évolution des performances de la production agricole, qui intéresse en premier lieu les agriculteurs, accompagne celle de la M.O. = les systèmes de culture les plus productifs, les plus stables, les plus attractifs économiquement et de moindre risque, sont aussi ceux qui séquestrent le plus de carbone. Dans ces systèmes, la part de la fertilité gratuite construite en Semis Direct par voies physique et organo-biologique prend de plus en plus d'importance au cours du temps dans la capacité de production du sol : la productivité augmente avec moins d'engrais minéral, le potentiel du sol s'accroît.
- Si tous les exemples présentés sont démonstratifs à cet égard, celui des sols ferrallitiques de la ZTH, qui sont vides chimiquement, révèlent aujourd'hui des capacités de production durables, nulle part ailleurs égalées, en présence de fumure minérale très faible: sur la même année agricole, il est ainsi possible de produire (*et de reproduire*) 6 à 7 t/ha de riz pluvial (*qualité supérieure de grain*) ou 4 à 5 t/ha de soja, puis en succession 3 à 5 t/ha de céréales "pompes biologiques", associées à des espèces fourragères qui formeront un pâturage durant la saison sèche, pouvant supporter 1,5 à 2 têtes de bétail à l'hectare sur 3 mois; les résultats de ces 3 cultures annuelles successives qui couvrent les 12 mois de l'année, sont obtenus en semis direct, et consomment au total de 50N à 115N.ha⁻¹.an⁻¹, suivant que la culture en tête de succession est respectivement du soja ou du riz, 100 à 110 P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹, 100 à 130 K₂O.ha⁻¹.an⁻¹.
- Il est également possible de produire entre 3.000 et 4.600 kg/ha de coton en Semis Direct sur puissantes biomasses de couverture, en rotation avec les successions précédentes.
- Les meilleurs systèmes en Semis Direct produisent entre 26 et 32 t de résidus de matière sèche par hectare et par an ; les systèmes les plus faciles à pratiquer (*souvent les moins performants*) ont conquis plus de 6 millions d'hectares en moins de 10 ans dans les cerrados du Centre-Ouest Brésilien.
- Enfin, la ZTH apparaît comme un simulateur d'élection pour l'étude de la dynamique du carbone : elle est le lieu où la minéralisation de la M.O. est la plus active et intense, et où les cycles de destruction-accumulation de l'humus sous l'action anthropique peuvent être le plus rapidement perceptibles, analysables, et par là même permettent de raccourcir l'espace-temps pour l'évaluation de la dynamique du carbone.
- Il est évident que l'histoire de cette révolution en marche est une œuvre collective pour laquelle diverses institutions se sont cooptées, ont uni leurs

efforts, mettant ainsi en évidence la nécessité impérieuse, ressentie par tous, face à la dégradation désastreuse des systèmes cultivés, de gérer les sols tropicaux autrement.

Que soient chaleureusement remerciées les institutions qui ont contribué à construire ces nouveaux modes de gestion des sols, préservateurs de l'environnement : l'EMBRAPA (CNPAP) au départ, la Fondation ABC du Paraná, les agriculteurs M. Matsubara, W. et J. Taffarel, les coopératives COOPERLUCAS, COOASOL et COMICEL du Mato Grosso, et plus récemment l'APDC, POTAFOS, et les partenaires direct du CIRAD : les agriculteurs P. Machado, J. N. Lazarini, le groupe MAEDA et l'entreprise AGRONORTE PESQUISA.

Un tel partenariat exemplaire montre comment diverses institutions, en unissant leurs efforts, peuvent, en peu de temps et avec des moyens souvent modestes, amorcer la construction d'une véritable révolution agricole, difficilement imaginable dans le seul cadre de la recherche traditionnelle. C'est une chance unique à saisir pour la recherche, si ses objectifs sont bien de contribuer à l'amélioration rapide, et avec tous les acteurs, de la gestion durable des ressources naturelles, dont son bien le plus précieux : le patrimoine sol.

Lucien SEGUY

TABLE DES MATIÈRES

- I. INTRODUCTION

- II MATÉRIEL ET MÉTHODES
 - 2.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE DE LA RECHERCHE-ACTION ET ÉCHELLES D'INTERVENTION
 - 2.2. LA CRÉATION DE L'OFFRE TECHNOLOGIQUE "Système de culture" AVEC LES AGRICULTEURS
 - 2.3. LA VALIDATION DES SYSTEMES DE CULTURE
 - 2.4. LA FORMATION
 - 2.5. SUIVI - ÉVALUATION ET ANALYSE D'IMPACTS
 - 2.5.1. SUIVI -ÉVALUATION
 - 2.5.2. ANALYSES D'IMPACTS
 - 2.6. CHOIX DES ÉCO-RÉGIONS

- III RÉSULTATS
 - 3.1. DYNAMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES
 - 3.2. DYNAMIQUES DU CARBONE DE LA CEC ET DU TAUX DE SATURATION (V%)
 - 3.3. LES PERFORMANCES AGRONOMIQUES, TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES DES SYSTÈMES DE CULTURE ET LEUR MISE EN REGARD AVEC LA DYNAMIQUE DE LA M.O.
 - 3.3.1. ÉCO RÉGION DE LA ZONE TROPICALE HUMIDE (ZTH).
 - 3.3.2. ÉCO RÉGION DES FORÊTS TROPICALES SUR BASALTE DU CENTRE-OUEST BRÉSILIEN (*Sud de l'état du Goiás, Nord de l'état de São Paulo*).
 - 3.3.3. ÉCO-RÉGION DES HAUTS PLATEAUX MALGACHES

IV DISCUSSION

4.1. LES CONCEPTS NOVATEURS DE GESTION DURABLE DE LA RESSOURCE SOL = LE SEMIS DIRECT SUR COUVERTURE VÉGÉTALE PERMANENTE

- . Le concept de biomasse renouvelable, appelée « Pompe biologique »
- . Le concept de multifonctionnalité

4.2. ESSAI DE SYNTHÈSE

V CONCLUSIONS

VI RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

VII ANNEXES

FONCTIONNEMENT DU SEMIS DIRECT EN ZTH DES SAVANES ET DES FORÊTS DU CENTRE-OUEST BRÉSILIEN

DOSSIERS PHOTOS :

+ LA DESTRUCTION DU PATRIMOINE SOL TROPICAL OU L'ÉCHEC DU TRANSFERT NORD-SUD DE GESTION DU SOL

+ CONTRÔLE TOTAL DE L'ÉROSION ET RESTAURATION DE LA FERTILITÉ DES SOLS PAR VOIE ORGANO-BIOLOGIQUE PAR LE SEMIS DIRECT SUR COUVERTURE VÉGÉTALE

+ LES SYSTÈMES DE CULTURE EN SEMIS DIRECT LES PLUS PERFORMANTS EN ZTH

+ QUELQUES IMAGES DU SEMIS DIRECT À MADAGASCAR

I. INTRODUCTION

DEMAIN, CONCILIER = les exigences de la science et de la société civile pour la sauvegarde de la planète et la production de nourriture saine, avec les objectifs de l'agriculture durable et ceux des agriculteurs.

- À l'entrée de ce nouveau millénaire, l'agriculture mondiale va devoir effectuer une véritable révolution pour s'adapter à la fois à la mondialisation des marchés et des connaissances, à la pression croissante des consommateurs qui exigent des produits sains et de qualité, et à celle des scientifiques et de la société civile en général pour la sauvegarde de la planète.
- Les stratégies et modèles de développement vont avoir à prendre en compte la nécessité de produire plus par unité de ressources naturelles, et ce faisant, qu'il est impératif de réduire, voire supprimer les effets négatifs provoqués par l'activité agricole sur la nature.
- Si cette révolution reste encore à faire à l'échelle de la planète, la dernière décennie du siècle dernier a vu surgir, sous la pression des catastrophes écologiques mondiales à répétitions, une conscience collective en faveur de la protection de l'environnement. L'agriculture de conservation a déjà réalisé à cet égard une véritable révolution dans les pratiques et les esprits, en particulier sur le continent américain, et surtout au Brésil qui constitue l'exemple le plus significatif grâce au développement exponentiel de la gestion des sols et des unités de paysage, en Semis Direct.
- Au-delà de la question essentielle à résoudre au niveau planétaire qui concerne la préservation à long terme du potentiel de production du patrimoine sol pour répondre à la demande croissante d'aliments, se pose également la question fondamentale relative à la gestion des pollutions engendrées par l'activité agricole sur l'environnement, et en particulier, l'impact causé par le travail intensif du sol qui rejette plus de CO₂ vers l'atmosphère que le parc automobile mondial (*Reiscooky D.C., et al. 1995*), alimentant ainsi de manière significative l'effet de serre. Le stock de Carbone organique des sols du monde représente, en importance, le 3^e pool du globe, après les océans et le réservoir géologique terrestre (*Eswaran H. et al., 1993; Lal R. et al., 1995; Batjes N.H., 1996*). La perte historique du carbone organique par l'action anthropique a été estimée entre 66 et 90 milliards de tonnes dont 19 à 32 milliards dus à l'érosion du sol, 44 à 58 milliards imputables à l'oxydation provoquée par la déforestation, le brûlis de la végétation naturelle et l'oxydation microbienne stimulée par le travail du sol (*Lal R. et al., 1999*). Actuellement, des estimations issues de travaux de recherche récents (*Lal R. et al., 1995; IPCC., 1995*) montrent que le volume de CO₂ émis vers l'atmosphère contribue pour 50% de l'effet de serre, et que l'activité agricole représente plus de 23% du total émis. Ces estimations traduisent parfaitement le rôle fondamental que peut avoir la gestion de l'activité agricole dans le rejet de CO₂ vers l'atmosphère et invitent tous les responsables de la profession à bâtir rapidement des modes de gestion de l'espace cultivé qui réduisent ces émissions et permettent au contraire de stocker le carbone dans les sols, de les recharger en matière organique qui constitue "l'or noir, le sang" de la terre et dont les multiples vertus sur la capacité de production des sols à long terme et au moindre coût, ne sont plus à démontrer. Sur le continent américain, siège actuel de cette révolution agricole (*U.S.A. et surtout Brésil et pays du Cône Sud*), de nombreux travaux de recherche conduits dans des écosystèmes et agrosystèmes très contrastés sur des modes différenciés

de gestion des sols de longue durée montrent que, aussi bien sous climat tempéré que tropical et subtropical, les systèmes de culture pratiqués en semis direct¹ sans jamais travailler le sol, comparés aux mêmes systèmes de culture qui utilisent les diverses techniques conventionnelles de travail du sol, permettent d'augmenter très significativement la teneur en matière organique des sols (*Cambardella C.A et Elliot E.T., 1994; Dick W.A. et al., 1998; Bayer C. et al., 2000; Sá J.C.M. et al., 2000 a & b*).

- . Tous les spécialistes s'accordent pour avancer, qu'en 10 ans, le Brésil, qui compte aujourd'hui plus de 13 millions d'hectares cultivés en Semis Direct, a préservé plus de 1 milliard de tonnes de sol arable, économisé plus de 11 milliards de dollars, 1,3 milliard de litres de combustible et séquestré plus de 500 millions de tonnes de CO₂ (*Borges G. et al., 2000*).
- . Ces résultats, confirmés déjà sur de longues périodes, même s'ils sont très porteurs d'espoir et rassurants sur l'avenir de la planète dans sa capacité à produire plus, durablement et au moindre coût et en polluant moins (*Elliot E.T., 1986; Reicosky D.C. et al., 1995*), sont encore insuffisants pour bien expliciter scientifiquement et bien maîtriser dans la pratique, la dynamique du carbone en fonction de la nature des systèmes de culture pratiqués et surtout pour construire les systèmes conservateurs de demain, qui devront être encore plus performants à cet égard, tout en satisfaisant au cahier des charges de l'agriculture durable et aux objectifs de agriculteurs.
- . Depuis plus de 20 ans au Brésil, 15 ans à l'île de la Réunion et plus de 10 ans à Madagascar, qui est un véritable kaléidoscope des écosystèmes subtropicaux et tropicaux de la planète, et plus récemment en Asie (*Laos, Vietnam*), le CIRAD construit, avec ses partenaires du Sud de la recherche et du développement, des systèmes de culture en Semis Direct¹ qui doivent répondre à ces exigences et aux questions fondamentales suivantes qui sont au cœur du mandat de la Recherche Agronomique:
 - L'objet scientifique "dynamique du carbone avec ses vertus ou ses effets de nuisance" ne doit-il pas être replacé dans le cadre de la construction de systèmes de culture et de production appropriables par les agriculteurs et qui soient les plus performants possibles aux plans de l'écologie, de l'agronomie et de la socio-économie, au même titre que les objets "dynamique des nitrates, du potassium, du calcium et du Phosphore" dont les impacts pour l'environnement peuvent également être désastreux ?
 - Comment la Recherche Agronomique peut-elle créer et avec quels outils opérationnels, sur les moyen et long termes et avec les agriculteurs dans leurs milieux, des systèmes de culture et de production qui soient à la fois les plus efficaces pour le pouvoir de séquestration du carbone organique et qui satisfassent les objectifs des agriculteurs aussi bien à court qu'à moyen et long termes et ceux des agricultures durables en général ?

¹ Definition: le semis direct (SD) est un système conservatoire de gestion des sols et des cultures, dans lequel la semence est placée directement dans le sol qui n'est jamais travaillé. Seul, un petit trou ou un sillon est ouvert, de profondeur et largeur suffisantes avec des outils spécialement conçus à cet effet pour garantir une bonne couverture et un bon contact de la semence avec le sol. Aucune autre préparation du sol n'est effectuée. L'élimination des mauvaises herbes, avant et après le semis, pendant la culture est faite avec des herbicides, les moins polluants possibles pour le sol qui doit toujours rester couvert.

- . Dans cet état d'esprit, cet article est consacré successivement:
 - à la présentation de notre méthodologie générale d'intervention sur les systèmes de culture qui agit en prise directe dans le milieu et avec la participation effective des acteurs du développement,
 - à l'analyse des tendances d'évolution de la matière organique en fonction de la nature des systèmes de culture existants et des systèmes novateurs, préservateurs de l'environnement ; les résultats sont discutés et comparés avec ceux obtenus dans d'autres grandes éco-régions du monde, principalement aux U.S.A. en climat tempéré et au Brésil subtropical.
 - enfin, à l'évaluation des performances agronomiques, techniques et économiques des systèmes de culture, leur évolution au cours du temps ; les résultats des meilleurs systèmes appropriables sont mis en regard avec leur capacité à séquestrer le carbone et à conserver la capacité de production du patrimoine sol à moyen terme et au moindre coût.
- . Compte tenu du très grand nombre de résultats déjà accumulés en matière de performances des systèmes de culture sur le Réseau Semis Direct du CIRAD, nous ne retiendrons dans cet article que quelques exemples très contrastés aux plans écologique et socio-économique qui ont fait leurs preuves démonstratives sur la durée et qui alimentent très activement et significativement la diffusion et l'appropriation par les agriculteurs des systèmes de culture préservateurs de l'environnement.

II MATÉRIEL ET MÉTHODES

- ◆ L'essentiel du travail de Recherche-Action consiste, en partant de diverses situations pédoclimatiques et socio-économiques régionales (*diagnostic initial, typologie des exploitations qui conduisent à l'analyse des contraintes majeures pour la fixation d'agricultures durables*), à adapter, à construire, pour et avec les agriculteurs, dans leurs milieux, des systèmes de culture durables bâtis sur des techniques de gestion conservatoire des sols facilement appropriables par les agriculteurs. Ces systèmes doivent d'abord améliorer, restaurer puis maintenir la capacité de production du sol à long terme avec l'utilisation d'un minimum d'intrants, voire sans intrants, dans un environnement totalement protégé (*échelles des unités de paysage, des terroirs, des bassins versants*).

- ◆ Les objectifs sont, simultanément, et dans une démarche à la fois holistique et heuristique :
 - de bâtir avec les agriculteurs des solutions pratiques et appropriables pour surmonter les obstacles à la fixation des agricultures tropicales (*critères des agriculteurs, développeurs et chercheurs*),
 - d'expliquer et de modéliser le fonctionnement des agro-systèmes cultivés, durables, pour pouvoir les adapter rapidement à d'autres écosystèmes et agrosystèmes tropicaux,
 - d'analyser et d'évaluer préventivement leurs impacts : sur l'évolution de la fertilité des sols à l'échelle d'unités de paysage représentatives des terroirs et des bassins versants, sur le comportement et la mentalité des agriculteurs et des sociétés rurales.

2.1. DÉMARCHE GÉNÉRALE DE LA RECHERCHE-ACTION ET ÉCHELLES D'INTERVENTION

La démarche de Recherche-Action comporte 3 étapes étroitement imbriquées (Séguy L.; 1994, 2001b ; Séguy L et al., 1996, - cf. Fig 1) :

- Un diagnostic initial (*situation de départ*), puis permanent (*analyse des impacts des innovations sur le milieu*),
- La création de systèmes de culture plus performants avec les agriculteurs, en partant de systèmes traditionnels (*montage de vitrines de l'offre technologique sur critères simultanément agronomiques, techniques, socio-économiques*),
- La contribution à l'appropriation des systèmes de culture choisis par les agriculteurs (*diffusion à l'échelle des Fazendas de référence et des terroirs avec appui à l'organisation des agriculteurs = filières commerciales, crédits, intrants, transformation des produits, gestion du foncier, création d'associations de producteurs en semis direct*),
- Et la formation continue de tous les acteurs du développement (*agriculteurs, vulgarisateurs, agronomes, chercheurs*).

Les échelles d'intervention de la Recherche-Action

- D'abord 2 échelles complémentaires pour construire, dès le départ, les conditions de reproductibilité régionale des résultats appropriables par les agriculteurs:
 - + Les systèmes de culture, au niveau de la parcelle cultivée
 - + Les toposéquences ou transects des unités de paysage représentatives, encadrant la variabilité du facteur état de fertilité du sol, dans lesquelles sont inclus les systèmes de culture traditionnels (*référence*) et les nouveaux systèmes (*novateurs*) en semis direct, plus performants. Ce niveau d'échelle d'intervention constitue la "vraie grandeur" opérationnelle, qui permet de prendre en compte les flux et transferts de matières qui conditionnent le potentiel de production des unités de paysage (*flux hydriques, transports solides et en solution, gradients de fertilité, histoires parcellaires, etc... cf. Fig. 2, 3 et 4*)
- On déduit de cette première étape de construction des systèmes de culture à l'échelle des toposéquences représentatives, avec les producteurs, tous les éléments nécessaires à la fixation de scénarios d'agriculture durable au niveau de fazendas de référence et des terroirs. Ce niveau d'échelle d'application aux fazendas de référence et terroirs permet d'éprouver l'offre technologique (*systèmes de culture diversifiés en semis direct*), en prenant en compte les contraintes socio-économiques des sociétés rurales et de contribuer à la diffusion en intervenant alors sur l'organisation des agriculteurs (*filières commerciales, crédit, intrants, gestion du foncier, création d'associations de producteurs en semis direct*),
- Cette dynamique de création-diffusion et de formation permet, grâce à ces différents niveaux d'échelle :
 - + L'apprentissage de la maîtrise technique des systèmes par les agriculteurs et l'incorporation de la praticabilité dans les innovations,
 - + de faciliter la diffusion spontanée des systèmes en semis direct,
 - + d'amplifier la diffusion et de contribuer efficacement à l'appropriation des systèmes par les producteurs en révélant des agriculteurs créateurs de l'innovation, charismatiques et souvent leaders influents, qui jouent le rôle de consultant-adaptateur des technologies au sein des communautés villageoises et réalimentent efficacement l'appareil de recherche (*feed-back*).

2.2. LA CRÉATION DE L'OFFRE TECHNOLOGIQUE "Systèmes de culture" AVEC LES AGRICULTEURS

La recherche-action crée dans chaque grande éco-région avec ses partenaires du développement (*agriculteurs, vulgarisateurs*) un double dispositif opérationnel à vocations complémentaires :

- **Des unités expérimentales "systèmes de culture"**, en milieu contrôlé par la recherche et les agriculteurs = elles représentent des vitrines de l'offre technologique (*Matrices des systèmes*),
- **Des fazendas de référence, en milieu réel** où sont appliqués à très grande échelle, un ou plusieurs systèmes de culture issus des matrices, choisis par les producteurs qui les appliquent en l'état ou les réadaptent à leurs propres objectifs. Cet ensemble constitue un dispositif d'intervention multilocal de longue durée qui recouvre la variabilité pédoclimatique et socio-économique régionale (*Fig. 3, 4 et 5*).

FIG. 1 RECHERCHE-ACTION, POUR AVEC ET CHEZ LES AGRICULTEURS

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA -GEC, 1997

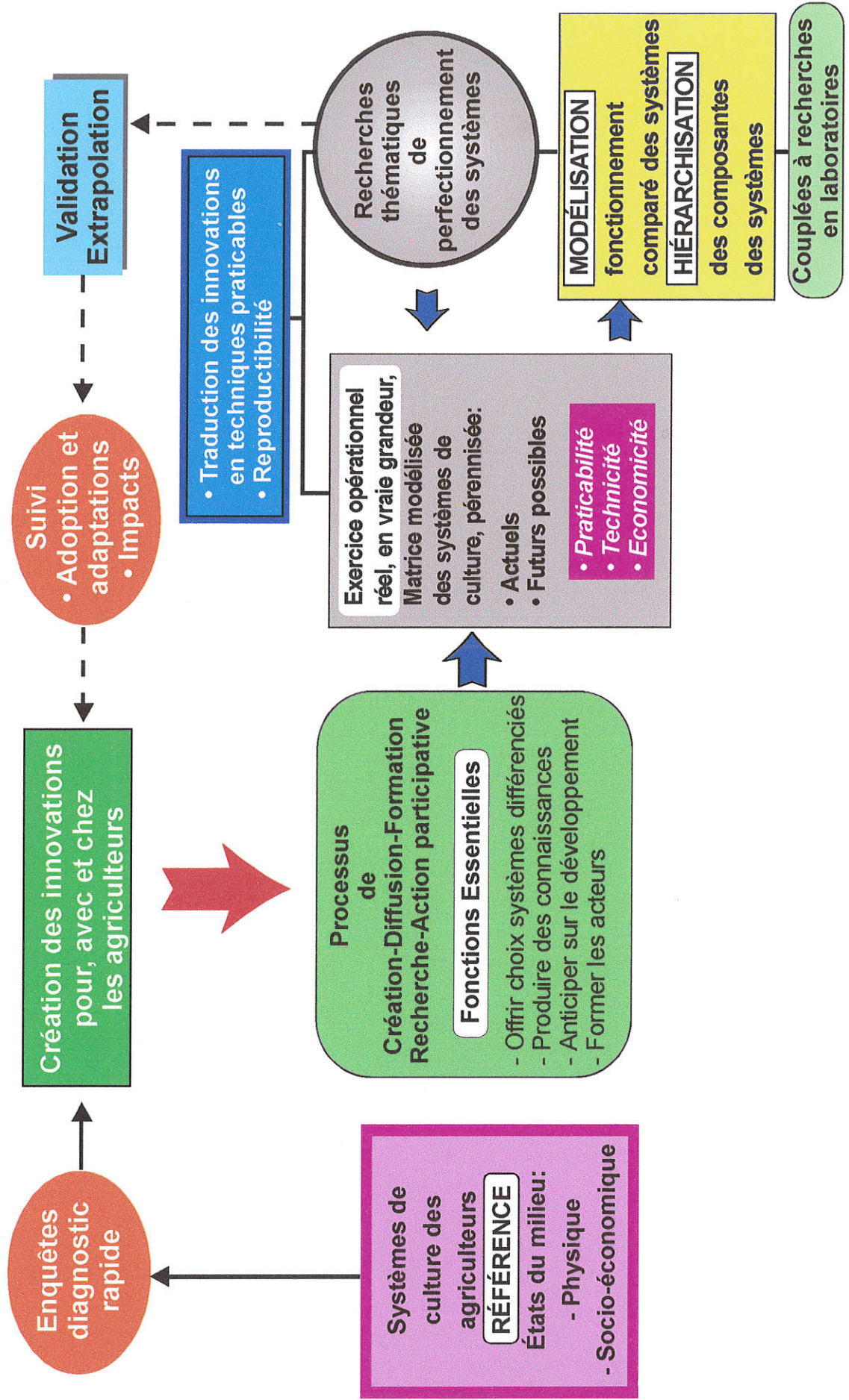
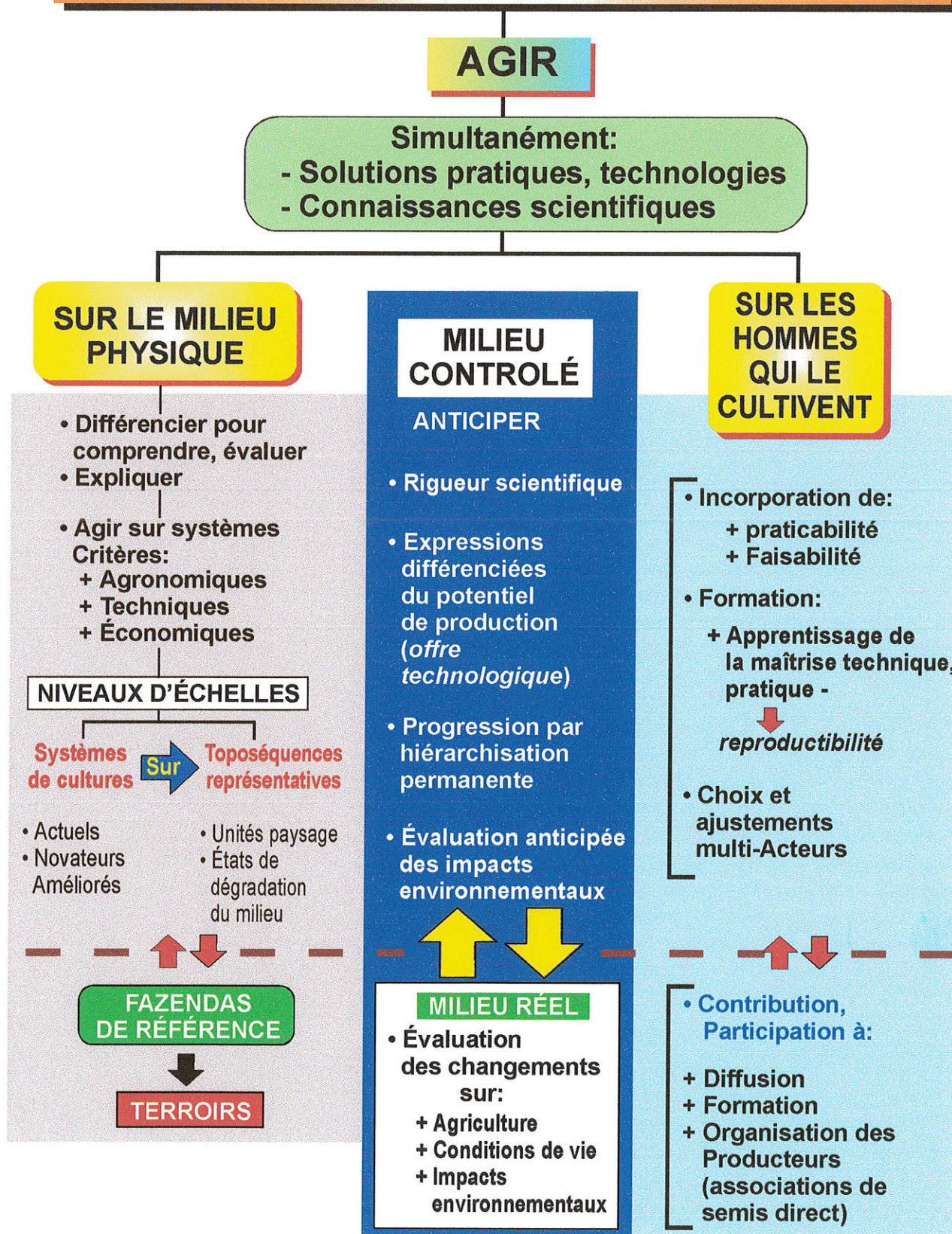


FIG. 2 - RECHERCHE - ACTION POUR, AVEC ET CHEZ LES AGRICULTEURS



SOURCE: L. Ségué, S. Bouzinac, CIRAD-CA; A. C. Maronezzi, AGRONORTE, Sinop/MT - 1978/2000

FIG. 3 ÉCHELLES D'INTERVENTION ET FONCTIONS DE LA RECHERCHE-ACTION, ADAPTATIVE DES SCV

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA - 1978/2000

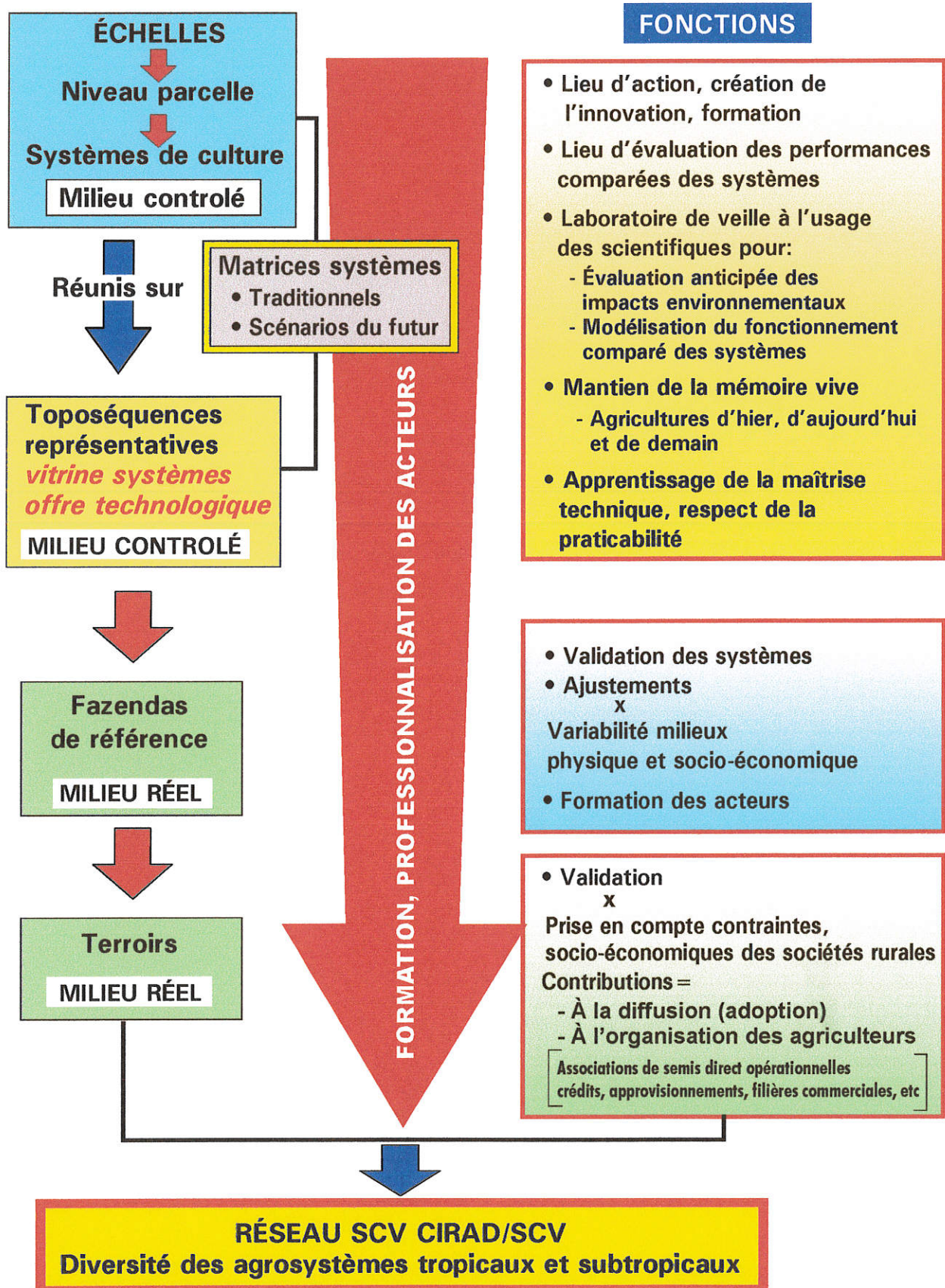
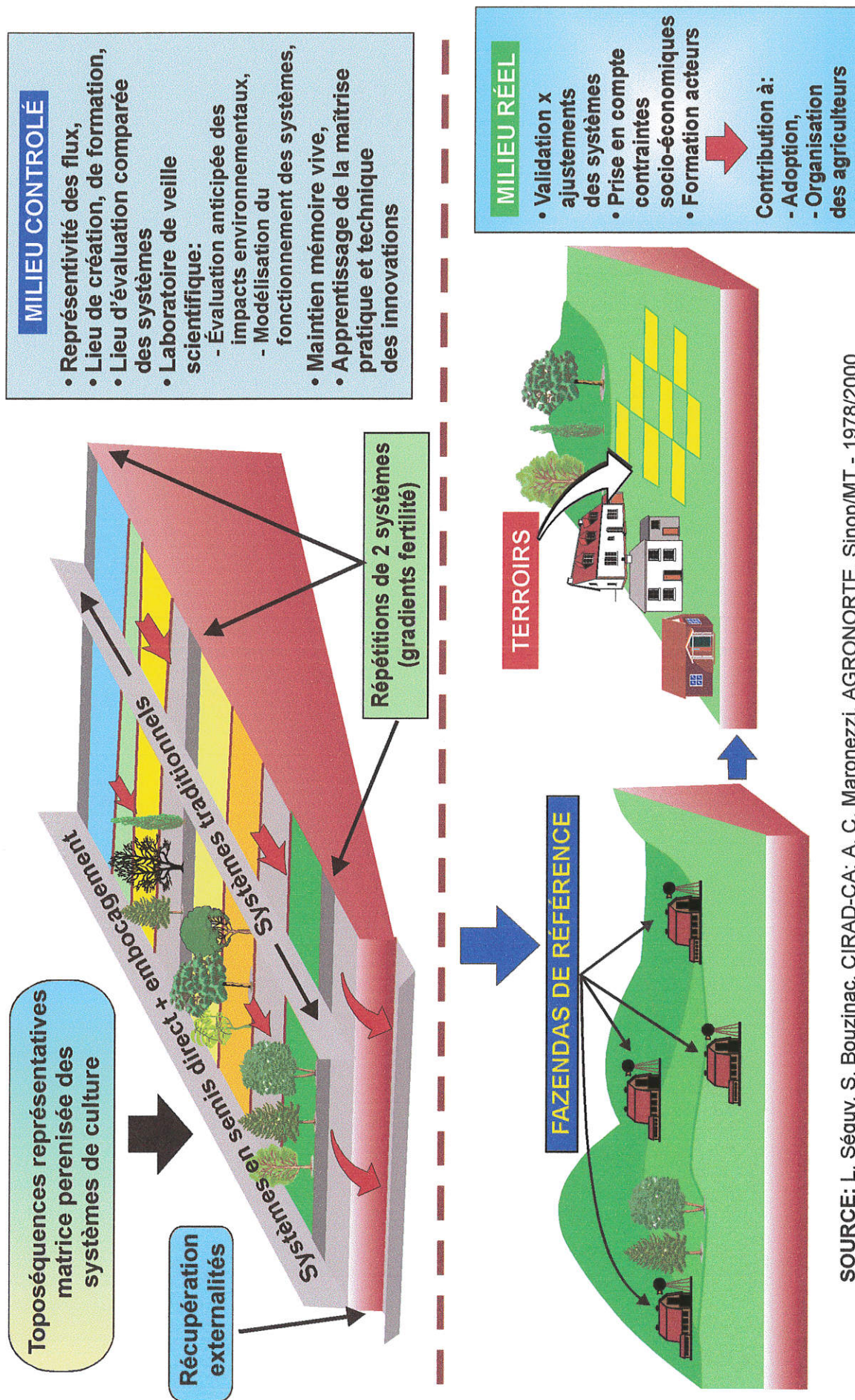


FIG. 4 DÉMARCHE DE LA RECHERCHE-ACTION, POUR, AVEC ET CHEZ AGRICULTEURS - NIVEAUX D'ÉCHELLES ET FONCTIONS -



SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA; A. C. Maronezzi, AGRONORTE, Sinop/MT - 1978/2000

FIG. 5 DÉMARCHE OPÉRATIONNELLE DE CRÉATION-DIFFUSION DES SYSTÈMES DE CULTURE ET FORMATION

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, 1997

1. Un outil régional opérationnel

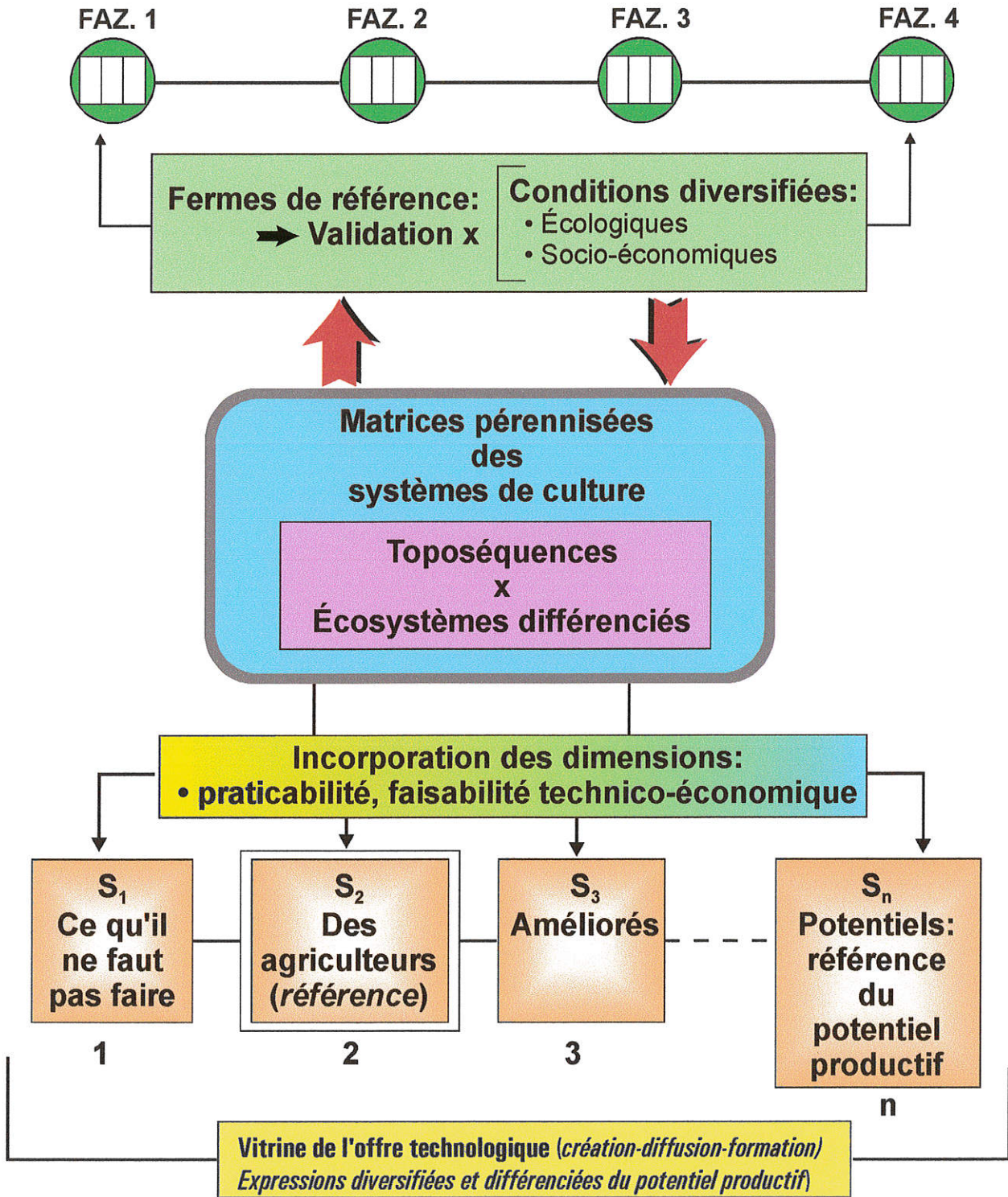
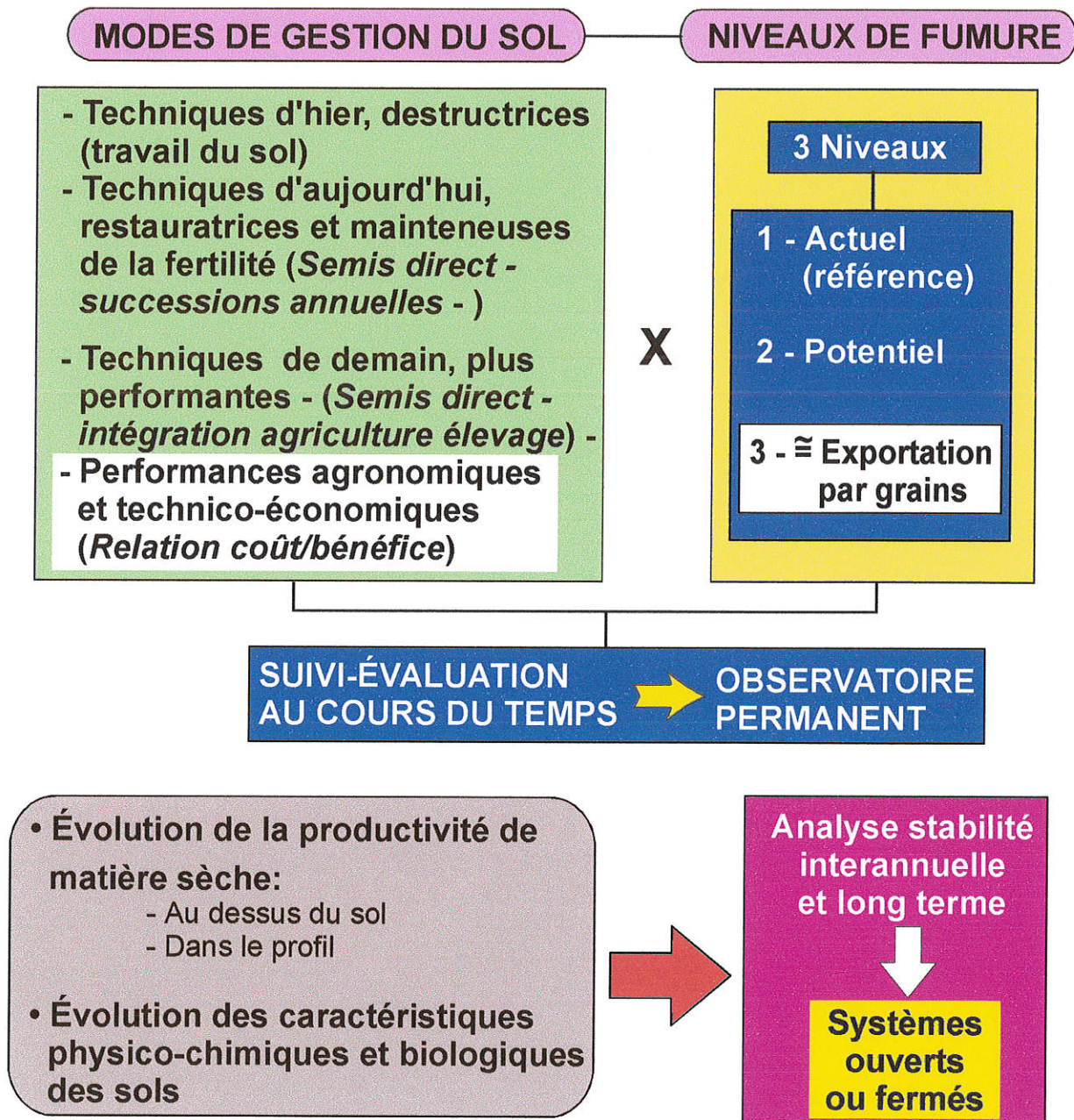


FIG. 6 MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES DE CULTURE

MODÉLISATION DES SYSTÈMES DE CULTURE → MATRICE
PÉRENNISÉE DES SYSTÈMES, EN MILIEUX ÉCOLOGIQUES
DIVERSIFIÉS, CONTRÔLÉS ET RÉELS - (Unités de paysage
représentatives)



SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac CIRAD CA - GEC; Goiânia, GO - 1998

FIG. 7 GESTION DE LA FERTILITÉ PAR LE SYSTÈME DE CULTURE

OBJECTIF = Exprimer le potentiel du sol, de manière durable, au moindre coût

COMPOSANTES DU SYSTÈME POUR UN TYPE DE SOL

Modes de gestion du sol	Rotations et/ou successions de cultures	Date de semis	Peuplement végétal	Variétés fumures traitements pesticides
X	X	X	X	X

(Précoce, tardive)

Travail du sol, semis direct

MODES DE GESTION DES SOLS ET DES CULTURES

PRODUITS THÉMATIQUES SIMPLES

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac CIRAD CA - GEC; Groupe Maeda - SP, 1998

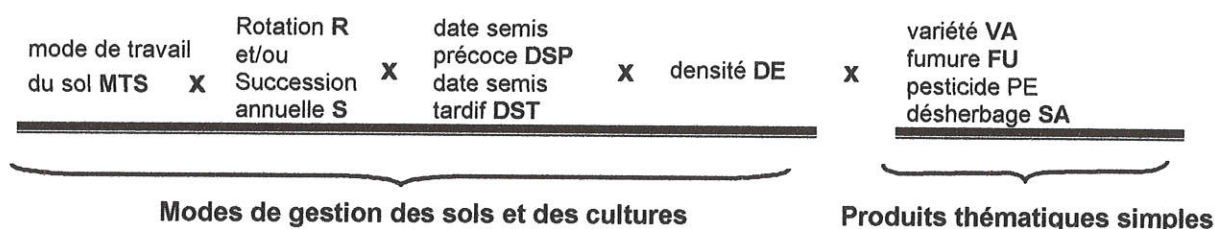
- Les systèmes de culture (*traditionnels + novateurs*) sont organisés en "matrices des systèmes", sur toposéquences représentatives du milieu physique et du paysage agricole. Partant des systèmes traditionnels, les nouveaux systèmes sont élaborés par l'incorporation progressive, systématique et contrôlée de facteurs de production plus performants (*modes de gestion des sols et des cultures, produits thématiques tels que variétés, niveaux de fumure, Fig. 6 et 7*). La construction des matrices "systèmes de culture" obéit à des règles précises (*cf. Séguy L. , 1994 , 2001b*) qui permettent l'interprétation des effets directs et cumulés des composantes des systèmes au cours du temps, aussi bien sur leurs performances de production que sur leurs impacts sur la fertilité des sols, la biologie des adventices ou des insectes ravageurs, etc... (*Tableau 1.*)

Les matrices "systèmes de culture" et le réseau multilocal de fazendas de référence, constituent les supports opérationnels de l'étude; ces dispositifs expérimentaux, qui sont de longue durée, représentent à la fois:

- **Un lieu d'action, de création de l'innovation et de formation des acteurs**, dans lequel le montage matriciel des systèmes permet d'évaluer leurs performances comparées agronomiques, techniques dans les mêmes conditions de sol et climat, et de les classer au cours du temps (*réponses de leur stabilité ou fluctuations par rapport aux risques climatique et économique*), d'extraire des lois de fonctionnement des systèmes (*conditions de reproductibilité => modélisation*) ;
 - **Un laboratoire de veille, précieux pour les scientifiques**, en permettant d'évaluer, de manière anticipée par rapport à l'adoption des systèmes leurs impacts sur l'environnement (*érosion, qualité biologique des sols, externalités, xénobiotiques*) [*cf. concepts de Chaussod R., 1996*]. C'est donc un lieu privilégié pour mettre en regard = performances de production des systèmes, modes de fonctionnement et impacts environnementaux, dans une démarche préventive qui offre des solutions réelles aux agriculteurs et décideurs pour concilier les exigences de la société civile (*impacts environnementaux*) et les objectifs des agriculteurs (*Productivités des systèmes, du travail, des marges, etc...*).
 - **Le maintien de la mémoire vive** = les systèmes traditionnels et leurs évolutions y sont maintenus pour mesurer les progrès accomplis (*performances agronomiques et technico-économiques, impacts sur l'environnement*) au cours du temps. De même, les systèmes le plus destructifs de la ressource sol doivent être représentés tout au long de l'étude; Ils sont les témoins vivants de ce qu'il ne faut pas faire, et indispensables à la formation (*chronoséquences d'évolution des systèmes contrôlés*).
 - **Un vivier de systèmes de culture qui réunit l'agriculture d'hier (avec travail du sol), l'agriculture d'aujourd'hui (les cultures des agriculteurs conduites en système de Semis Direct) et l'agriculture de demain (systèmes en Semis Direct, construits sur une plus grande diversité de cultures, sur l'intégration de l'agriculture, de l'élevage et de l'arbre dans l'espace cultivé).**
- ◆ Tous les systèmes de culture sont conduits avec 3 niveaux de fumure (*Fig. 6 et 7*):
- La fumure traditionnelle ou recommandée par la recherche, les organismes de développement ou celle qui est utilisée par la majorité des agriculteurs de la région
 - Un niveau de fumure faible, qui correspond, en gros, seulement aux exportations par grains des cultures
 - Une fumure non limitante (*expression du potentiel agronomique dans l'offre pédoclimatique locale*).

TABLEAU 1 = CONSTRUCTION DYNAMIQUE DES SYSTEMES DE CULTURE

1. Composantes des systèmes



2. Création progressive des systèmes de culture
(*t = traditionnel ; a = amélioré*)

- . Modélisation du système traditionnel (système de référence)

$$MTS_t \times R_t \times \left\{ \begin{matrix} DSP \\ DST \end{matrix} \right\} \times DE \times \left\{ \begin{matrix} VA_t \\ FU_t \\ PE_t \\ SA_t \end{matrix} \right\}$$

- . Introduction de modes de travail du sol améliorés (MTSa₁, MTSa₂...)

$$\left\{ \begin{matrix} MTS_t \\ MTS_{a1} \\ MTS_{a2} \\ \dots \end{matrix} \right\} \times R_t \times \left\{ \begin{matrix} DSP \\ DST \end{matrix} \right\} \times DE \times \left\{ \begin{matrix} VA_t \\ FU_t \\ PE_t \\ SA_t \end{matrix} \right\}$$

- . Chaque mode de travail du sol est croisé avec de nouvelles rotations incluant des successions annuelles (Ra₁, Ra₂...; S₁, S₂)

$$\left\{ \begin{matrix} MTS_t \\ MTS_{a1} \\ MTS_{a2} \\ \dots \end{matrix} \right\} \times \left\{ \begin{matrix} R_t \\ Ra_1 \\ Ra_2 \\ \dots \end{matrix} \right\} \times \left\{ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \end{matrix} \right\} \times \left\{ \begin{matrix} DSP \\ DST \end{matrix} \right\} \times DE \times \left\{ \begin{matrix} VA_t \\ FU_t \\ PE_t \\ SA_t \end{matrix} \right\}$$

- . Chaque rotation et chaque succession sont croisées avec:
 - 2 dates de semis (*précoce, tardive*);
 - 2 densités de plantation (*traditionnelle, améliorée*);
 - plusieurs variétés (*Traditionnelles, améliorées*).
 Les modes de désherbage Sont également testés.

$$MTS \times \left\{ \begin{matrix} R_{s1} \\ R_{s2} \dots \end{matrix} \right\} \times \left\{ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \end{matrix} \right\} \times \left\{ \begin{matrix} DSP \\ DST \end{matrix} \right\} \times \left\{ \begin{matrix} DE_1 \\ DE_2 \dots \end{matrix} \right\} \times \left\{ \begin{matrix} VA_1 \\ VA_2 \dots \end{matrix} \right\} \times \left\{ \begin{matrix} FU \\ PE \\ \dots \end{matrix} \right\}$$

Exemple de constitution d'une matrice expérimentale. Dans ce cas, l'ordre des facteurs limitants diagnostiqués dans les systèmes de production traditionnels est le suivant, en commençant par le plus important : le mode de travail du sol, la rotation, les dates de semis, les peuplements végétaux puis les produits thématiques simples (*variété, fertilisation...*). La nature et le niveau d'intensification des composantes de la matrice est fonction à la fois de la hiérarchisation des problèmes à résoudre et des possibilités de progrès (*technologies disponibles ou non*) (Séguy L., 1994).

Le terme de succession annuelle signifie que plusieurs plantes sont cultivées dans l'année : une succession annuelle constitue donc un élément d'une rotation.

Ces 3 niveaux de fumure combinés aux modes différenciés de gestion des sols et des cultures doivent permettre de mettre en évidence au cours du temps :

- L'importance des possibilités de restauration de la fertilité au sens large **par la voie organo-biologique** (*Vitesse de restauration, importance → productivité de matière sèche totale en fonction des niveaux de fumure minérale, expression du potentiel de production du sol au cours du temps*) et la preuve de la fermeture du système "sol-cultures" (Séguy L. et al., 1996, 1998 e) sans pertes de nutriments, grâce aux systèmes de culture en Semis Direct conduits avec la fumure faible qui couvre seulement les exportations par grains.
- L'importance capitale et prépondérante de la gestion prioritaire des propriétés physiques et biologiques (*étroitement liées*) dans l'expression des performances agronomiques des systèmes de culture au cours du temps, par rapport à celle des propriétés chimiques, dans les sols tropicaux (*ferrallitiques et ferrugineux dominants, plus ou moins dégradés*).

CONTENU DES MATRICES "SYSTÈMES DE CULTURE", pérennisées:

Elles réunissent sur la même unité expérimentale et dans les mêmes conditions pédoclimatiques =

- le ou les systèmes traditionnels représentatifs de la région,
- des systèmes novateurs, préservateurs de l'environnement en constante évolution, qui font appel à de nouvelles techniques de Semis Direct, inspirées directement du fonctionnement de l'écosystème forestier = le Semis direct sur couvertures permanente du sol (Séguy L. et al., 1996, 1998 e).

Trois grands types de systèmes de culture ont été construits par le CIRAD-CA à l'image de l'écosystème forestier (*voir Fig. 86 en annexe et Fig. 8 à 10*) :

- ceux sur couvertures mortes,
- ceux sur couvertures vivantes,
- ceux sur couvertures à vocation mixte.

+ Dans les systèmes avec couverture morte permanente, la couverture du sol est assurée, en plus des résidus de récolte des cultures commerciales, par une culture de biomasse végétale (*espèce à vocation de production de grains*), extrêmement puissante, qui est implantée avant ou après la culture commerciale, en conditions pluviométriques généralement marginales (*cf. Fig. 8*). Cette forte biomasse est desséchée aux herbicides totaux immédiatement avant le semis direct de la culture commerciale qui s'effectue dans la couverture grâce à des semoirs spécialement conçus à cet effet.

+ Dans les systèmes avec couverture vivante permanente, cette dernière est toujours une espèce fourragère pérenne grâce à ses organes de multiplication végétative (*Stolons, rhizomes*) ; la culture commerciale est implantée sur la couverture dont on a seulement desséché la partie aérienne (*en préservant totalement les organes de reproduction végétative par des herbicides appropriés peu coûteux et peu polluants*). La couverture est maintenue à l'état de vie ralentie, non compétitive pour la culture commerciale (*à l'aide d'herbicides sélectifs, utilisés à très faible dose*), jusqu'à ce que la culture commerciale gérée à cet effet, assure un ombrage total au-dessus d'elle ; dès que la culture commerciale mûrit, elle laisse pénétrer la lumière et la couverture vivante recouvre rapidement le sol à nouveau et peut être pâturée par les animaux après la récolte (*successions annuelles = production de grains + production de viande ou de lait, cf. Fig. 9*).

+ Les systèmes mixtes (*cf. Fig. 10*) sont intermédiaires entre les deux modèles précédents et sont bâtis sur des successions annuelles qui comprennent : 1

FIG. 8 "SYSTÈME MAINTENEUR DE FERTILITÉ" POUR LA CULTURE DE SOJA
LE DÉPART DU SEMIS DIRECT - 1987

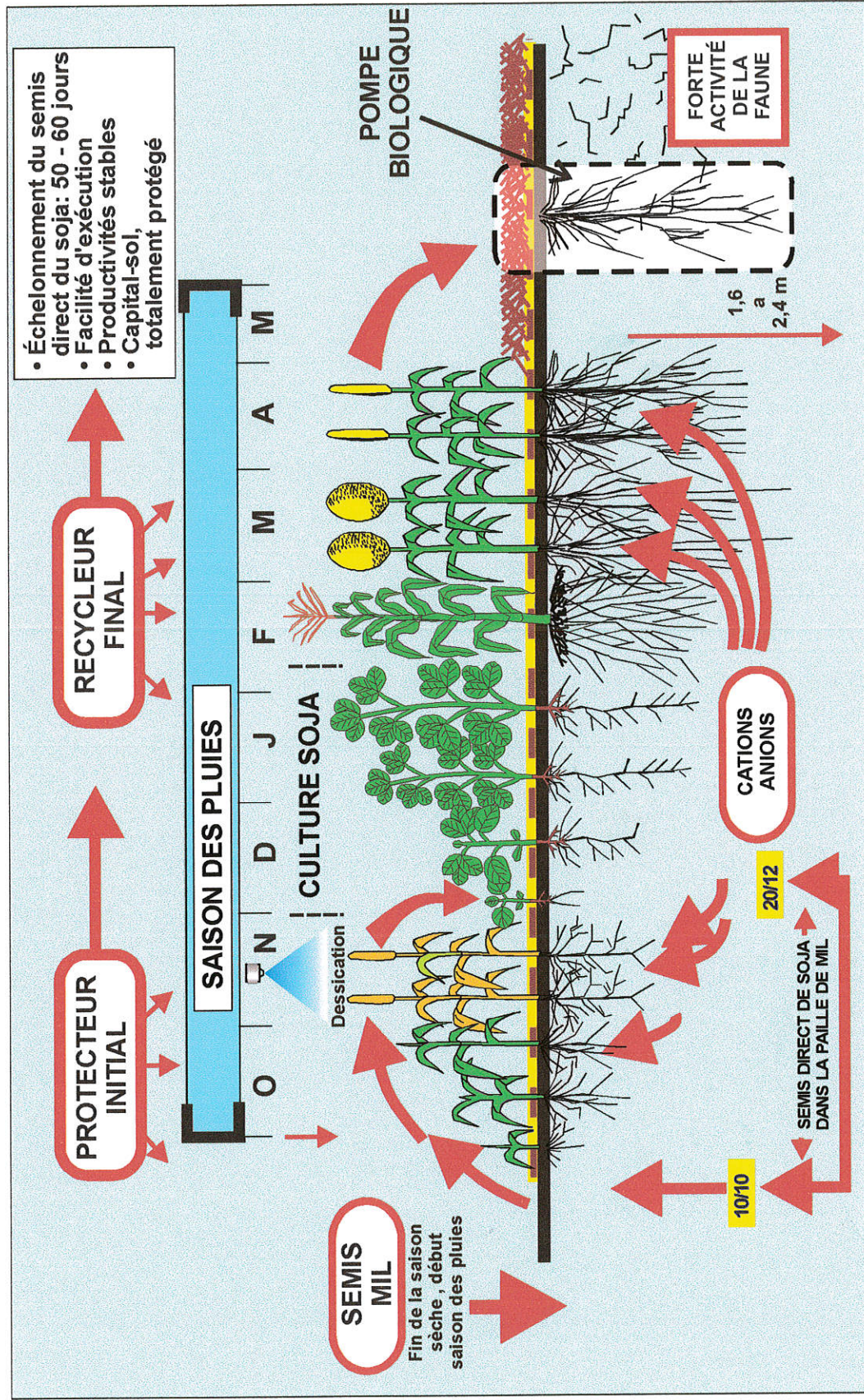
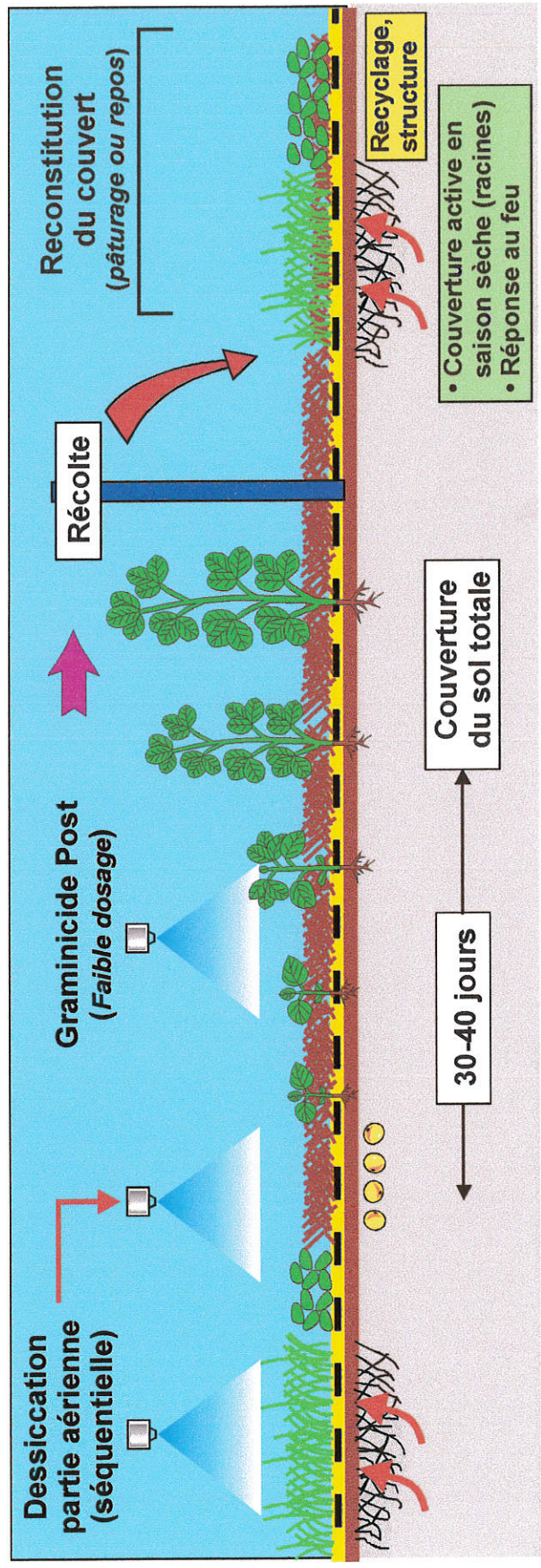


FIG. 9 LES SYSTÈMES DE CULTURE EN SEMIS DIRECT SUR COUVERTURES VIVANTES ⁽¹⁾ - PRINCIPES DE BASE

1. COUVERTURES À STOLONS ET RHIZOMES

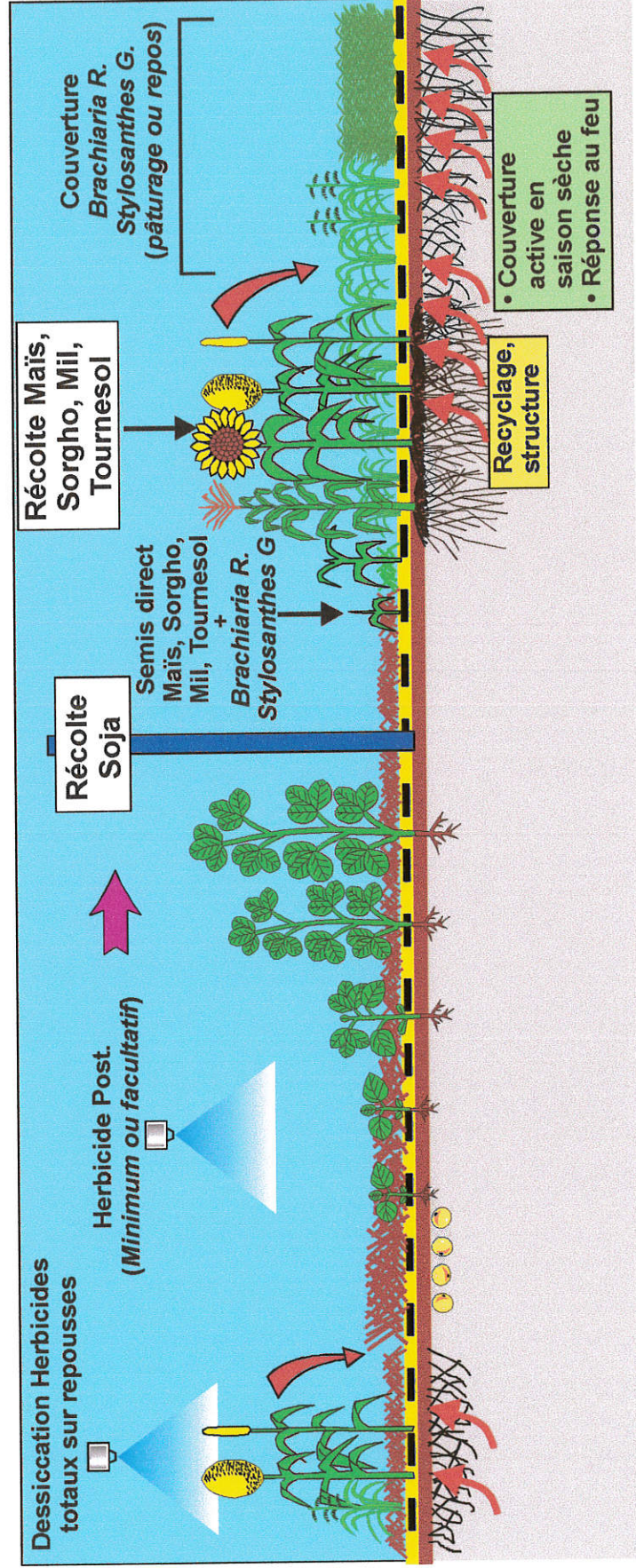


- (1)
- Genres *Cynodon* (*Tifton*), *Arachis*, *Pennisetum C.*, *Paspalum*, *stenotaphrum*, *Axonopus*
 - Systèmes: Successions annuelles
- Soja, Riz, Coton, Maïs + Pâturage

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac - CIRAD CA - GEC, 1993/98

FIG. 10 LES SYSTÈMES DE CULTURE EN SEMIS DIRECT SUR COUVERTURES VIVANTES - PRINCIPES DE BASE

2. COUVERTURES ASSOCIANT POMPES BIOLOGIQUES⁽¹⁾ + BRACHIARIA R.



- (1)
- Pompes biologiques: [Brachiaria R. Maïs, Tournesol, Sorghos, Mils, + Stylosanthes G.]
 - Systèmes possibles avec: [Soja, Riz haute technologie, Coton -

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac - CIRAD CA - GEC, 1993/98

culture commerciale + 1 culture biomasse pour production de grains, associée à une culture fourragère ; on récolte donc les 2 cultures successives pendant la saison des pluies, suivies d'une production de viande ou lait pendant la saison sèche qui est assurée par la culture fourragère (cf. Fig. 10).

Ce sont la longueur de la saison des pluies et l'importance de la pluviométrie qui déterminent les possibilités d'application de l'un ou l'autre type de système en Semis Direct sur couverture permanente des sols.

2.3. LA VALIDATION DES SYSTEMES DE CULTURE choisis par les agriculteurs (*unités de recherche ouvertes en permanence aux acteurs*), au niveau de la région se fait dans des "fazendas de référence" représentatives (*milieu physique x milieu socio-économique*) et sur des terroirs, qui sont pilotés par des agriculteurs leaders, charismatiques ; ces derniers, si nécessaire, ajustent encore, affinent les systèmes par rapport à leurs objectifs et surtout amplifient la diffusion régionale (*agriculteurs consultants*).

C'est à ce niveau des fazendas de référence et des terroirs que sont recueillies les performances des systèmes novateurs en milieu réel par rapport aux systèmes en vigueur (*critères agronomiques, techniques, économiques*) et que peuvent être aussi évalués les impacts sur l'environnement (*sols, externalités, etc. ...*), sur la mentalité des acteurs, ainsi que les possibilités d'évolution de l'économie régionale. Des banques de données de références sont ainsi établies dans chaque région.

2.4. LA FORMATION des divers acteurs du développement s'effectue tout au long du processus de création-diffusion = milieu contrôlé, milieu réel.

L'ensemble du dispositif de Recherche-Action sert de support à la formation de jeunes agronomes des pays tropicaux, des chercheurs, des vulgarisateurs et des producteurs.

Les médias sont constamment sollicités (*journaux spécialisés, presse et TV locales*) pour diffuser l'innovation.

Toutes les activités de Recherche-Action du CIRAD en partenariat avec les pays du Sud constituent un véritable réseau d'adaptation et de validation des techniques de gestion conservatoire de la ressource sol (*semis Direct sur couverture végétale*) dans le monde rural tropical et subtropical ; la démarche générale d'adaptation-validation repose surtout sur l'exploitation des lois de fonctionnement des systèmes de large applicabilité (*Travailler plutôt sur les points communs entre les divers écosystèmes et agrosystèmes que sur leurs différences*).

2.5. SUIVI - ÉVALUATION ET ANALYSE D'IMPACTS

2.5.1. SUIVI -ÉVALUATION

Il est fonction des échelles d'intervention :

+ **À l'échelle de la parcelle**, sont évaluées les performances comparées de systèmes de culture au cours du temps, en termes :

- a) **agronomiques** = productivité de matière sèche des cultures commerciales ou alimentaires (*biomasses aériennes = grains + pailles, et biomasses racinaires*), et leurs teneurs en nutriments ; Productivité des cultures "biomasses de couverture" ou "pompes biologiques" qui exercent leur

multifonctionnalité sur les sols et qui constituent le lit sur lequel s'effectue le semis des cultures commerciales ; sont enregistrés :

- Les rendements en matière sèche des parties aériennes et racinaires et leur dynamique de croissance,
- leur contenu en nutriments = C, N, P, Ca, Mg, K, S et oligo-éléments.

Ces mesures sont effectuées systématiquement :

- Avant le semis direct des cultures commerciales,
- Après leur récolte en grains et après celle des biomasses de couverture installées en succession.

L'enregistrement de ces paramètres renseigne sur la dynamique du carbone et des nutriments issus de la minéralisation des résidus de récolte de cultures commerciales et des biomasses de couverture provenant aussi bien des parties aériennes que racinaires (*Fonctions: alimentaire des couvertures, recycleuse et restructurante, de recharge en carbone*).

La fonction des biomasses de couverture relative au contrôle des adventices annuelles ou pérennes (*effets d'ombrage ou allélopathiques*) est également évaluée :

- au cours du cycle des cultures commerciales,
- après la récolte des biomasses de couverture, en saison sèche.

Sont également suivis, dans chaque système de culture, le parasitisme des sols et des cultures, l'évolution de la flore adventice.

b) techniques = faisabilité technique de systèmes de culture, capacité de travail des équipements mécanisés et de la main d'œuvre, leur flexibilité d'utilisation, leur pénibilité.

c) économiques = coûts de production, marges brutes et nettes, rapports coûts/Bénéfice; dans le cas des agricultures manuelles, le nombre de jours de travail et la valorisation de la journée de travail.

Le recueil de ces données minimums permet, dans tous les cas :

- de classer les systèmes de culture à partir de leurs performances annuelles et inter-annuelles, aux plans agronomique, technique et économique.
- de comparer et comprendre leurs modes de fonctionnement agronomiques principaux au cours du temps (*Relations Sol-Cultures*), de les évaluer, de les classer face aux risques climatiques majeurs ;
- d'identifier les systèmes les plus stables et de moindre risque du point de vue de la gestion économique face à la variabilité climatique et économique.

+ À l'échelle de la toposéquence (*Transect d'une unité de paysage*)

- Dynamique de l'érosion et du ruissellement (*qualitatif - photos*),
- Evaluation des externalités = charge solide, teneurs en nitrates, bases, P, molécules xénobiotiques, recueillis dans la partie aval des toposéquences (*Fig. 3 et 4*).

+ À l'échelle des terroirs (*milieu réel*)

- Performances comparées des systèmes de culture et de production à partir des mêmes critères, simultanément = agronomiques, techniques et économiques.

- Diffusion spontanée des systèmes de culture en Semis Direct (*importance, points forts et faibles*)
- Identification des agriculteurs leaders formateurs d'opinion (*diffuseurs - consultants*).
- Modification des systèmes de culture et de production de l'occupation de l'espace ; place de l'arbre dans l'espace cultivé, de la jachère.

À l'Echelle régionale

- À partir du réseau expérimental (*matrices + fazendas de référence*), création de références agronomiques et technico-économiques régionales (*banque de données*) sur les systèmes de culture en Semis Direct sur couvertures végétales.
- Modélisation du fonctionnement comparé des systèmes de culture (*lois de fonctionnement des agrosystèmes et possibilités d'extrapolation pour d'autres écologies*).

2.5.2. ANALYSES D'IMPACTS

SUR LE SOL

Evolution de la fertilité des sols (*échelle des toposéquences, des systèmes de culture et de production, du milieu naturel*) :

Analyses de routine : **Propriétés chimiques** dont pH, S, CEC, P total et échangeable (*Résine*), oligo-éléments ; **Propriétés physiques** = M.O., N organique, propriétés hydrodynamiques = eau utilisable, sa vitesse d'infiltration sous cultures, la typologie des agrégats et de l'espace poral ; la caractérisation et le suivi permanent du profil cultural et en particulier de la dynamique de colonisation racinaire (*vitesse, caractéristiques d'exploration du profil*).

Analyses plus fines, nécessaires pour quantifier la dynamique du carbone et des ions : la dynamique des nitrates, de Ca et K (*Type de fonctionnement du système "Sol-cultures" : ouvert ou fermé [concept Séguy L., 1996]*) . **Les Propriétés biologiques** = caractérisation de la faune (*macro et méso*), biomasse microbienne, biomasse microbienne/C, C et N organique, dynamique du C (*Cerri C. et al, 1985*) (C^{13}/C^{12}), méthode du fractionnement granulométrique des matières organiques (*Feller C., 1995*), indice d'activité biologique globale (*Bourguignon C., 1995/2000 communications personnelles*).

SUR LES EXTERNALITÉS

À l'échelle de toposéquences représentatives ou portions de bassins versants =

- Entretien des infrastructures = routes, pistes, aménagements hydrauliques (*opérations coûts*),
- Rivières, puits, nappes phréatiques = pollution au sens large.

SUR LA MENTALITÉ DES AGRICULTEURS

- Relations avec l'environnement (*culture de l'arbre, embocagement, respect de la faune*).
- Prise en compte de la qualité de la production.
- Organisation de la profession agricole (*clubs et associations de semis direct, autres types d'organisation*).
- Nature de leurs décisions, vision de leur avenir.

SUR L'ECONOMIE RÉGIONALE

- Filières commerciales, marchés, transformation de la production
- Circuits d'approvisionnements en facteurs de production, en crédits.
- Place de l'agriculture dans l'économie régionale.

2.6. CHOIX DES ECO-REGIONS

Dans le cadre de cette étude, 3 grandes écologies ont été retenues à titre d'exemples démonstratifs ; elles sont très contrastées aux plans géomorphologique, pédologique, climatique et socio-économique, et, toutes, sont soumises à une érosion intense lorsque les sols sont travaillés.

- **La zone Tropicale Humide (ZTH)**, représentée par la région des Fronts Pionniers du Sud du Bassin amazonien au Brésil (11 à 12° de latitude Sud) et la région de Boumango, au Gabon, en Afrique de l'Ouest (2° latitude N). C'est le domaine des sols ferrallitiques sur roche acide, fortement désaturés sous un climat chaud à très forte pluviométrie annuelle de type modal ou bimodal, comprise entre 2.000 et plus de 3.000 mm, répartie sur 7 à 8 mois. Les unités géomorphologiques les plus représentées sont des collines en demi-orange dont la pente varie de 2 à plus de 6%. Deux grands écosystèmes y sont juxtaposés = celui des FORÊTS et celui des CERRADOS (*Savanes*).

- **La zone des Forêts Tropicales du Centre-Ouest Brésilien** (17° de latitude Sud), représentative des sols ferrallitiques rouges-foncés à fortes potentialités sur roche basaltique (*Les trapps basaltiques occupent 750.000 km² au Brésil*); le climat est plus frais en saison sèche et la pluviométrie variable d'une année sur l'autre est comprise entre 900 et 1.600 mm, sur 6 mois. Les unités géomorphologiques sont constituées de doigts basaltiques à fortes pentes (6 à 20%).

Ces 2 grandes zones ouvertes à l'agriculture dans la fin des années 70 sont le siège d'une agriculture mécanisée pratiquée sur de grandes fazendas dominantes et centrée sur des productions de cultures industrielles telles que le soja et le coton ou alimentaires comme le riz, le maïs ou encore l'élevage extensif.

- **La région des Hauts Plateaux de l'île de Madagascar** qui bénéficie de conditions climatiques subtropicales, fraîches et humides (19° de latitude Sud), avec une altitude comprise entre 1.200 et 2.000 m, et soumise à un régime cyclonique de pluies ; La pluviométrie varie de 1.200 à 1.800 mm et les pluies peuvent être exceptionnellement agressives sous les cyclones. Les sols sont ferrallitiques sur socle cristallin (*Site d'Ibity*) ou sur alluvions lacustres anciennes (*site de Sambaina*), ils sont généralement riches en matière organique de très faible activité. Si l'agriculture concentre ses activités sur la riziculture irriguée des vallées d'altitude, pratiquée manuellement et en traction animale, sous la densité croissante d'occupation des sols, elle colonise de plus en plus les collines exondées à très fortes pentes (*Tanety*), couvertes de sols ferrallitiques humifères très fortement désaturés ; l'agriculture pratiquée manuellement est de très faible productivité sans intrants chimiques, les sols sont labourés à la pelle traditionnelle (*angady*).

Si la zone tropicale humide (ZTH) constitue le domaine où la minéralisation de la matière organique est la plus active, à l'inverse la région des hautes terres malgaches, à climat frais et humide, est le siège d'une minéralisation plus lente de la M.O. ; la zone des Forêts Tropicales du Centre-Ouest du Brésil peut être

considérée comme intermédiaire entre les deux précédentes, de ce point de vue.

- (*) *Les figures 11, 12 et 13 présentent les principaux systèmes de culture en Semis Direct, préservateurs de la ressource sol, qui ont été construits dans ces 3 grandes éco-régions, et qui sont le support de notre étude.*

FIG. 11 SYSTÈMES DE CULTURE EN SEMIS DIRECT EN RÉGIONS TROPICALES ET SUBTROPICALES D'ALTITUDE - Petites agricultures familiales -

- P annuelle = 1200 - 1800 mm
- Altitude = 1000 - 1600 m
- Sols ferrallitiques et volcaniques des hautes terres malgaches

1. CULTURES ASSOCIÉES

- Maïs + Légumineuses fourragères associées → Genres

[*Cássia r.*,
Desmodium l.,
Trifolium s.,
Lotus u.,

2. SUCCESSIONS ANNUELLES: Production de grains + Pâturage, couverture vivante

- Soja
 - Haricot
 - Blé
- Sur Kikuyu (*Pennisetum c.*)
- Blé
 - Riz pluvial
- Sur Trèfle (*Trifolium s.*)

3. SUCCESSIONS ANNUELLES: Production de grains + Biomasse Pompe biologique, couvertures morte ou vivante

- Soja cycle court + Avoine
- Avoine + Haricot
- Haricot + Avoine
- *Bracharia r.* + Haricot
- Soja cycle court + *Bracharia r.*

En rotation avec

- Mêmes successions ou
- Riz pluvial, Riz pluvial + trèfle
- Maïs, Maïs + Crotalaire,
- Maïs + Légumineuses associées (1.)
- Soja cycle moyen

➔ **GESTION DES SOLS ET DES CULTURES EN SEMIS DIRECT, AU MOINDRE COÛT, AVEC ÉCOBUAGE COMME FUMURE DE FOND + FUMIER ANNUEL (5 t/ha)**

FIG. 12 SYSTÈMES DE CULTURE EN SEMIS DIRECT, AVEC UN MINIMUM D'INTRANTS

- Zones tropicale et subtropicale d'altitude (1000-1600m)
- P = 1200 à 1800 mm, sur 6-7 mois
- Sols ferrallitiques et volcaniques des hautes terres Malgaches

I	SOLS NON DÉGRADÉS	ANNÉE 1		ANNÉE 2		ANNÉE 3		ANNÉE 4	
		BASSE ET HAUTE FERTILITÉ (1) ■ Écobuage année 1 + Fumier (5 t/ha) ■ Fumier seul années suivantes	Maïs + Leg.	Riz	Riz + Leg.	Maïs	Maïs + Leg.	Riz	Riz + Leg.
Riz + Leg.	Maïs		Maïs + Leg.	Riz	Riz + Leg.	Maïs	Maïs + Leg.	Maïs	Maïs + Leg.
→ (2) → (3) → (4)	Soja _{cc} + Avoine		Soja _{cc} + Avoine	Maïs Riz	Maïs + Leg. Riz + Leg.	Soja _{cc} + Avoine		Soja _{cc} + Avoine	
	Soja _{cm}		Soja _{cm}	Maïs Riz	Maïs + Leg. Riz + Leg.	Soja _{cm}		Soja _{cm}	
Avoine + Blé Haricot		Avoine + Blé Haricot	Avoine + Blé Haricot	Maïs Riz	Maïs + Leg. Riz + Leg.	Avoine + Blé Haricot	Avoine + Blé Haricot	Avoine + Blé Haricot	
II SOLS DÉGRADÉS (M. O.) COMPACTÉS BASSE FERTILITÉ	Brachiaria ruziziensis, Cassia rotundifolia 1 an ou 2 • Restauration fertilité + Pâturage			■ Écobuage + Fumier (5 t/ha) ↓ (1)		■ Fumier seul (1) ou (2) ou (3) ou (4)			
	SOLS RICHES EN M. O.		Soja Haricot Blé	Sur kikuyu	Soja Haricot Blé	Sur kikuyu	Soja Haricot Blé	Sur kikuyu	Soja Haricot Blé

Couverture vivante fourragère associée/an
 Couverture vivante fourragère permanente
 Couverture morte
 • CC = Cycle court • CM = Cycle Moyen

SOURCE: Séguy L., Michellon R., CIRAD-CA; ONG TAFE, ANAE, FIFAMANOR, FAFIALA, Antsirabé, 1999/2000

FIG. 13 SYSTÈMES DE CULTURE EN SEMIS DIRECT, AVEC UN MINIMUM D'INTRANTS

- Zone tropicale humide, écosystèmes des savanes et forêts humides
- P = 1800 - 3000 mm, sur 7 à 9 mois
- Sols ferrallitiques - Bassin amazonien, Côte Est Malgache.

1. Déforestation avec préservation de la M. O. et de l'activité biologique → sans brûlis digestion biomasse arbustive, par Mucuna (*Stizolobium at.*)

	ANNÉE 1	ANNÉE 2	ANNÉE 3 etc...
BASSIN AMAZONIEN ■ Systèmes Vivriers ■ Systèmes Vivriers + Pâturage ■ Systèmes Vivriers + Paturage + Maille arbustive de rente (Agrumes, Guarana, Poivre, Cupuaçu, Noix, etc...)	1 - Riz pluvial 2 - Riz pluvial + <i>Brachiaria R., B</i> + <i>Stylosanthes G.</i> Possibilité Pâturage 2 - 4 ans puis Riz + <i>Brachiaria, Stylosanthes</i> et cycle 2 - 4 ans Pâturage, etc...	1 - [Maïs, Riz pluvial] + <i>Arachis P.</i> 2 - [Soja, Vigna] + Tifton 3 - Soja + [Maïs Sorgho + Mil] + <i>Brachiarias Stylosanthes</i> 4 - Biomasses + [Coton, Riz pluvial 5 - Riz pluvial + Coton, Vigna • Amendement calcomagnésien Facultatif • NPK + micros, faible niveau	1 - [Maïs Riz pluvial] + <i>Arachis P.</i> 2 - [Soja, Vigna] + Tifton ↑ [Combinaisons 3, 4, 5, Fonction conditions économiques NPK + Micros Faible niveau
	1 - Riz pluvial 2 - Riz pluvial + Vignas NPK + Micros	1 - [Riz pluvial, Maïs] + Vigna 2 - Riz pluvial + Pâturages [- <i>Brachiarias R. B.</i> - <i>Stylosanthes G.</i> - <i>Pueraria</i>	1 - [Riz pluvial, Maïs] + Vigna 2 - Riz pluvial + Pâturages ↑ Possibilité Pâturage 1 - 4 ans
CÔTE EST MALGACHE ■ Sols ferrallitiques hydromorphes hydratés sur roche acide ■ Sols ferrallitiques sur basalte	Maille arbustive lâche de rente, associée à vivriers (plantes à épices, fruitiers) sur couverture vivante permanente <i>Arachis P.</i> et <i>R.</i>		
	1 - Riz pluvial 2 - Riz pluvial + Vigna Écobuage + NPK + Micros	1 - Maïs, Riz pluvial 2 - Maïs, Riz pluvial + Vigna NPK + Micros, faible niveau	1 - [Riz pluvial, Maïs] + Vigna 2 - Riz pluvial + Pâturages ↑ Possibilité Pâturage 1 - 4 ans

■ Couverture vivante □ Couverture morte

SOURCE: Séguy L., Bouzinac S., Charpentier H., CIRAD-CA; ONG TAFE; ANAE - Antsirabé, 2000

III RÉSULTATS

(*) Ils ont été établis à partir d'expérimentations de longue durée sur les systèmes de culture (matrices systèmes en milieu contrôlé et fazendas de référence en milieu réel), sur des surfaces représentatives des conditions réelles d'exploitation régionale (vraie grandeur opérationnelle) et sur un espace temps qui va de 4 ans au minimum à plus de 20 ans. Seules les chronoséquences les plus illustratives pour la dynamique du carbone ont été retenues. Les quantités de carbone ont été déduites de celle de la matière organique en divisant par 2 et en prenant en compte la densité apparente mesurée des horizons de sol concernés, dans chaque système de culture.

Les sols ont été analysés sur la base d'un échantillon moyen par parcelle système de 600 m², lui-même composé de 6 sous échantillons prélevés sur les diagonales de la parcelle, sur lesquels ont été analysés au préalable, les caractéristiques de distribution des propriétés physico-chimiques (Ecart type, intervalle de confiance).

3.1. DYNAMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES

Avant d'aborder cette dynamique, il est important d'en fixer les limites ; les climats tropicaux sont particulièrement agressifs pour la ressource sol dès que le couvert végétal a disparu, et leurs effets deviennent très rapidement désastreux lorsqu'ils sont amplifiés par des pratiques agricoles catastrophiques = l'érosion sous toutes ses formes, affecte le patrimoine sol et peut même l'entraîner, dans son entier, vers les parties basses du modelé. Il est difficile, dans ce cas, de différencier avec précision sous la rubrique des pertes en matières organiques, la part qui revient à l'érosion de celle qui est imputable à la minéralisation dans les systèmes pratiqués. Les bilans précis de carbone sont ainsi difficiles et coûteux à établir, à l'échelle des systèmes de culture et plus encore à celle des unités de paysage, chaque fois que les processus d'érosion sont mis en jeu. Toutefois, deux cas échappent à ces limitations expérimentales = le premier, lorsque la topographie est strictement plane, le second, lorsque le sol est totalement protégé par une couverture végétale permanente ; dans ce dernier cas, le facteur topographie n'a plus d'importance (Séguy L. et al., 1996).

Dans le cadre de notre étude dans les 3 grandes éco-régions, seules les chronoséquences "systèmes de culture" 1, 2 et 3 établies en ZTH de forêt appartiennent à une topographie plane, d'où l'érosion est quasi-absente quelles que soient les pratiques agricoles employées. Toutes les autres chronoséquences sont fortement affectées par l'érosion dès lors que le sol n'est plus couvert de manière permanente et travaillé.

Enfin, en toutes situations, quelle que soit la nature du sol et la topographie, la gestion des sols et des cultures en semis direct sur couverture permanente morte ou vive élimine totalement le processus d'érosion des sols et permet ainsi de mieux cerner la dynamique du carbone en fonction de la nature des systèmes pratiqués.

. En ZTH, dès le défrichement de la forêt, exécuté pourtant dans les conditions opérationnelles les moins préjudiciables possibles pour la ressource sol (cf. techniques Séguy L. et al. 2000), la perte en carbone est très importante sur les 2 ans qui suivent l'opération d'abattage : -2,5 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm, le plus directement exposé et de -1,25 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ dans l'horizon 10-20 cm (cf. chronoséquence 3. Fig. 16).

L'utilisation des engins à disques est incontournable pour la mise en culture au cours des 2 années qui suivent le défrichement, pour retirer progressivement les bois restés en terre, niveler le sol ; ces 2 premières années étaient, au début des années 80, consacrées à la culture de riz pluvial² avec un minimum d'intrants ; ensuite, passage au soja après amendements calco-magnésiens, ou au pâturage extensif (*Brachiaria decumbens*, puis *brizantha*). Plus récemment, le soja a été de plus en plus utilisé comme culture d'ouverture des terres neuves.

En zone forestière, le système de monoculture de soja, à une seule culture annuelle qui n'utilise pas tout le potentiel hydrique disponible, pratiqué aux engins à disques (3 à 5 passages en sol le plus souvent humide) conduit toujours sur des périodes de 5 ans des pertes moyennes en carbone de -1 à -1,2 MgC.ha⁻¹ et par an (chronoséquences 1 et 2. Fig. 14 et 15). Partant de cette situation, la poursuite du même système pendant encore 3 ans conduit encore à perdre du carbone, mais de manière plus lente, sur un rythme annuel moyen de -0,5 à -0,7 MgC.ha⁻¹ comme le montrent les chronoséquences 1 et 2 et les Fig. 14 et 15 (amortissement de la courbe de pertes en C, cf. Fig. 30).

Par contre, si immédiatement après le défrichement, on utilise un système de culture à base de graminées dominantes sur 5 ans :

. 2 ans de riz x discages, suivi de 2 ans de Semis Direct de la succession annuelle soja + maïs associé à *Brachiaria ruziziensis* et de semis direct de riz pluvial + *Brachiaria ruz.* en 5^e année, le taux de matière organique des horizons supérieurs du sol (0-10 cm et 10-20 cm) remonte très vite, pour rejoindre voire dépasser le statut organique du profil originel sous forêt: on retrouve le même niveau de M.O. dans l'horizon 0-10 cm, et un niveau supérieur dans l'horizon 10-20 cm (cf. chronoséquence n° 3 - Fig. 16).

Ce système de culture permet sur 5 ans, à partir du défrichement, soit en partant d'un profil de sol originel qui a déjà perdu entre 26 et 28% de M.O. au cours des opérations de défrichement, de séquestrer annuellement + 0,9 MgC.ha⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm et + 1,32 MgC.ha⁻¹ dans le niveau 10-20 cm.

Si, toujours en partant d'un sol déjà dégradé (propriétés physiques et biologiques) par 5 ans de monoculture de soja à une seule culture annuelle, on pratique sur les 3 ans suivants, et en semis direct, des systèmes à 2 cultures annuelles en succession (utilisation d'un potentiel hydrique supérieur) le taux de matière organique du sol remonte vite, mais de manière différenciée, en fonction de la nature des systèmes (cf. chronoséquence 1, Fig. 14), conduisant à des variations importantes des quantités moyennes annuelles de C séquestré :

- + 0,83 MgC.ha⁻¹ pour la succession annuelle soja + mil (hor. 0-10 cm),
- + 1,16 MgC.ha⁻¹ pour la succession annuelle soja + sorgho (hor. 0-10 cm),
- + 1,33 MgC.ha⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm et +1,40 Mg.ha⁻¹ dans le niveau 10-20 cm pour la succession annuelle soja + sorgho ou mil associés à *Brachiaria ruziziensis*, dans laquelle ce dernier continue à produire de la biomasse verte après la récolte du sorgho et sur toute la durée de la saison sèche (par biomasses aériennes et racinaires);
- + 1,66 MgC.ha⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm et + 1,8 Mg.ha⁻¹ dans l'horizon 10-20 cm avec le système Riz + *Eleusine coracana* en première année, suivi de soja + *Eleusine cor.* en 2^e année et de riz + *Eleusine cor.* en 3^e année, soit

² La partie relative aux 15 ans de la chronoséquence 3 en zone forestière (Fig. 16) et la chronoséquence des Cerrados (Fig. 17) comportent en réalité, 2 à 3 ans de riz immédiatement après défrichement. Cette culture fait partie intégrante de l'opération défrichement-ouverture des terres ; elle restitue entre 7 et 11 t/ha/an de résidus à C/N élevé, qui permettent de maintenir le taux de M.O. du profil cultural au départ (Séguy L. et al., 1996).

5 graminées sur 3 ans, dont 3 cycles d'*Eleusine coracana*, graminée annuelle qui possède le système racinaire le plus puissant de toutes les espèces que nous avons testées à ce jour (*biomasse sèche racinaire supérieure à 5 t/ha dans le seul horizon 0-50 cm, en 80 jours*).

Toujours en partant du même état de dégradation du profil cultural, après 5 ans de monoculture de soja x discages, les systèmes de Semis Direct du soja et maïs sur couvertures vivantes pérennes, respectivement de *Cynodon d. tifton* et *Arachis p.*, permettent également de séquestrer très efficacement le carbone; sur 3 ans la quantité annuelle de C séquestré est de :

+ 1,5 MgC.ha⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm et de + 0,8 Mg.ha⁻¹ dans le niveau 10-20 cm pour le système plus performant : soja sur Tifton,

+ 1,0 MgC.ha⁻¹, mais seulement dans l'horizon 0-10 cm, pour le système maïs sur *Arachis pintoï*.

EN SOLS DE CERRADOS DE LA ZTH (*Brésil et Gabon*)

Sous les mêmes conditions pluviométriques que sous forêt, mais sur des unités de paysage plus pentues (*de 2% au sommet des croupes à plus de 8% dans la partie basse des toposéquences*), où le ruissellement et l'érosion peuvent exercer des ravages, les sols, déjà moins bien pourvus en M.O. au départ que sous forêt, lorsqu'ils sont soumis aux mêmes systèmes à une seule culture par an de monoculture de soja pratiquée aux engins à disques (*qui succèdent en général à 1 ou 2 cultures successives de riz d'ouverture des terres neuves*), perdent en 10 ans jusqu'à 66% de la matière organique dans l'horizon 0-10 cm et 50% dans le niveau 10-20 cm (*cf. chronoséquence du Cerrado et Fig. 17*).

Cette gestion inadéquate du capital-sol conduit ainsi à une perte moyenne annuelle de -0,95 Mg.ha⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm et de -0,66 Mg.ha⁻¹ dans l'horizon 10-20 cm (*processus cumulés d'érosion laminaire + minéralisation accélérée de la M.O.*), La perte de M.O., très rapide au début, s'amortit ensuite vers le taux minimum de 1% dans l'horizon 0-20 cm (*Fig. 17 et 30*).

Partant de ce profil cultural appauvri après 10 ans de mauvaise gestion, 6 ans de pratique continue du système de Semis Direct, bâti sur la succession annuelle soja + mil ou sorgho, permet de regagner 1% de M.O. dans l'horizon 0-10 cm et 0,4% dans le niveau 10-20 cm. La séquestration annuelle de carbone dans ce système où l'érosion est complètement contrôlée, est de +0,83 MgC.ha⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm et de + 0,40 Mg.ha⁻¹ dans l'horizon 10-20 cm (*chronoséquence du cerrado. Fig. 17 et 21*).

Après cette période de 6 ans et partant de ce profil cultural en partie restauré en M.O. par le système de Semis Direct, si l'on implante, toujours en Semis Direct, des espèces fourragères qui seront pâturées pendant 5 ans d'affilée sans apport d'intrants (*1,8 UGB/ha*), le taux de M.O. du sol augmente plus rapidement et la quantité de carbone séquestré annuellement est plus élevée sous l'espèce *Brachiaria brizantha* (*cv. Brizantão*) que sous l'espèce *Panicum maximum* (*cv. Tanzânia*) :

+ 0,7 MgC.ha⁻¹ pour cette dernière dans l'horizon 0-10 cm, contre
+ 0,9 MgC.ha⁻¹ sous le brizantão dans le même horizon ;

- Dans l'horizon 10-20 cm, le taux de séquestration annuel de C est très élevé sous *Brachiaria b.* avec + 1,68 MgC.ha⁻¹ contre + 1,08 MgC.ha⁻¹ sous *Panicum m.*;

Ces espèces rechargent donc fortement le profil cultural en dessous de 10 cm de profondeur (*cf. séquence Cerrado, Fig. 17*).

Des résultats similaires de séquestration de C sous Semis Direct ont été obtenus dans les savanes gabonaises, sous des conditions pédoclimatiques proches et à partir de systèmes de culture à base de grains semblables, que nous

avons transférés depuis le Brésil (*cf. chronoséquence Gabon ; Boulakia, S. et al, 1999 - cf. Fig. 18 et 21*). Comme dans le cas des fronts pionniers de la ZTH du Brésil, le travail profond du sol pratiqué tous les ans à l'entrée d'une succession annuelle maïs + soja, conduit à la perte progressive de M.O. ; les pertes annuelles de C, sont sur 3 ans de $-1,0 \text{ MgC.ha}^{-1}$ dans l'horizon 0-10 cm, et $-0,7 \text{ MgC.ha}^{-1}$ dans l'horizon 10-20 cm, en présence d'une forte fumure minérale annuelle ; Lorsqu'un niveau moyen à faible de fumure minérale est utilisé, la perte annuelle de C est plus faible (*cf. chronoséquence Gabon. Fig. 18 et 21*).

Comme dans les cerrados brésiliens, la pratique, en Semis Direct continu, de systèmes à 2 cultures annuelles en succession dominés par les graminées, voisins de ceux utilisés au Brésil, conduit à des niveaux de séquestration annuelle de C identiques à ceux observés au Brésil : $+ 1,0 \text{ MgC.ha}^{-1}$ dans l'horizon 0-10 cm et $+ 0,8 \text{ MgC.ha}^{-1}$ dans l'horizon 10-20 cm (*cf. chronoséquence Gabon, Fig. 18 et 21*).

. DANS L'ECO-RÉGION DES FORÊTS TROPICALES SUR SOLS FERRALLITIQUES SUR BASALTE À TEXTURE ARGILEUSE (60% d'argile dans l'horizon 0-20 cm) DU CENTRE OUEST BRÉSILIEN (Sud de l'état de Goiás).

Sous culture cotonnière, la comparaison des systèmes de culture construits sur le travail annuel du sol et sur Semis Direct sur couverture morte, comme dans le cas de la ZTH, montre des tendances d'évolution de la MO similaires, mais de moindre intensité :

- + Que ce soit sur sol déjà très érodé de bas des fortes pentes ou sur sol de mi-pente peu érodé, la pratique continue du travail du sol associée à la monoculture de coton, entraîne des pertes significatives en matière organique dans les horizons de surface, par érosion laminaire conjuguée à une minéralisation forte de la M.O., non compensée par les restitutions des seuls résidus de récolte ; Sur une période de 4 ans, les pertes moyennes annuelles en C sont de $-0,25 \text{ MgC.ha}^{-1}$ dans l'horizon 0-10 cm et de $-0,45 \text{ MgC.ha}^{-1}$ dans le niveau 10-20 cm.
- + Le système de Semis Direct bâti sur les successions annuelles mil ou sorgho + Cotonnier conduit, comme dans la ZTH, à une recharge rapide en M.O. du profil cultural en 4 ans, d'autant plus importante que l'état initial du sol est plus appauvri en M.O. (*cf. chronoséquences des forêts tropicales du Sud de l'état de Goiás, voir Fig. 19 et 22*) :
 - Sur sol peu érodé de mi-pente, la recharge moyenne annuelle en C est de $+0,5 \text{ MgC.ha}^{-1}$ et ne porte que sur l'horizon 0-10 cm,
 - Sur sol très érodé de bas de pente, la quantité moyenne annuelle de C séquestré est voisine de $0,9 \text{ MgC.ha}^{-1}$ aussi bien dans le niveau 0-10 cm que dans l'horizon 10-20 cm.

. SUR LES HAUTES TERRES MALGACHES

À relief montagneux, climat subtropical fais et humide sous forte influence cyclonique, le labour profond des sols à l'outil traditionnel (*Angady*) entraîne toujours une très forte érosion du profil cultural et des pertes importantes en M.O. =

- Sur le site d'Ibity sur socle cristallin (*46% d'argile dans l'horizon 0-20 cm*), les pertes en M.O. sur 5 ans sont de 24% dans l'horizon 0-10 cm et de 40% dans le niveau 10-20 cm, ce qui correspond à des pertes moyennes annuelles de C., respectivement de $-1,0$ et $-1,4 \text{ MgC.ha}^{-1}$;
- Sur le site de Sambaina sur alluvions lacustres anciennes, sur sol plus argileux (*60% d'argile dans l'horizon 0-20 cm*) moins susceptible à l'érosion, les pertes moyennes annuelles sur 5 ans sont de $-0,48 \text{ MgC.ha}^{-1}$ dans l'horizon 0-20 cm (*cf. chronoséquences des hauts plateaux malgaches, Fig.20 et 23*).

Comme dans les grandes éco-régions précédentes, mais en conditions pédoclimatiques beaucoup plus favorable à la conservation de la matière organique, les systèmes de culture pratiqués en Semis Direct conduisent sur les 2 sites et sur 5 ans à des recharges très importantes en M.O., du profil cultural :

- Sur le site d'Ibity, dans la succession annuelle avoine + haricot, la séquestration moyenne annuelle est de + 1,7 Mg.ha⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm et de + 1,3 Mg.ha⁻¹ dans le niveau 10-20 cm ;
- Sur le site de Sambaina, sur la même période, la séquestration moyenne annuelle de C atteint + 1,8 Mg.ha⁻¹ avec Semis Direct sur couverture morte (*soja + maïs associé au Desmodium*) et jusqu'à + 2,4 Mg.ha⁻¹ sur couverture vive permanente (*soja sur Pennisetum clandestinum "kikuyu"*), dans l'horizon 0-20 cm.

En conclusion de ce chapitre, plusieurs règles générales peuvent être énoncées concernant la dynamique du carbone en fonction des systèmes de culture, dans diverses grandes éco-régions tropicales et subtropicales :

① Dans tous les cas étudiés, les techniques de travail du sol (*discage, labours*) combinées à des systèmes de monoculture à 1 seule culture par an qui n'utilise qu'une faible partie du potentiel hydrique disponible, conduisent toujours à des pertes de matière organique dont l'importance varie en fonction des conditions de climat, sol, pente, techniques de travail du sol et l'état de dégradation du profil cultural =

- En ZTH, en zone de forêt sur modelé plat, les pertes sur sols travaillés aux engins à disques portent surtout sur l'horizon 0-10 cm et varient entre -0,7 et -1,2 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ mais peuvent également affecter l'horizon 10-20 cm, comme dans le cas des cerrados où le modelé est plus pentu et l'érosion plus active.
- En zone subtropicale d'altitude à relief montagneux, les sols ferrallitiques sur socle cristallin, soumis à un régime cyclonique des pluies, peuvent perdre entre -1,0 et -1,4 Mg.ha⁻¹.an⁻¹ lorsqu'ils sont travaillés à la pelle traditionnelle (*labour profond à l'angady*).
- En zone de forêts tropicales sur coulées basaltiques à fortes pentes du Centre-Ouest brésilien (*Sud du Goiás*), les sols ferrallitiques plus argileux et à fortes potentialités se montrent moins sensibles à ces modes de gestion et ne perdent que -0,2 à -0,45 Mg.ha⁻¹.an⁻¹.

② Tous les systèmes de culture en Semis Direct sur couverture végétale permanente, permettent, dans toutes les situations pédoclimatiques, de recharger le profil cultural en M.O., et de contrôler totalement l'érosion, quelle que soit la pente, la pluviométrie et le type de sol .

③ Si l'importance de la séquestration de C dépend des conditions de sol et de climat (*le climat subtropical d'altitude frais et humide est celui qui favorise le plus l'accumulation de C*), elle est surtout conditionnée dans chaque grande éco-région par la nature des systèmes de culture pratiqués en Semis Direct et par l'état de dégradation physico-biologique du profil cultural au départ ; en ZTH, où les conditions climatiques sont idéales pour le fonctionnement maximum du "réacteur minéralisation de la M.O.", le taux de séquestration annuel de C peut ainsi varier du simple au double en fonction de la nature des systèmes pratiqués,

④ Quel que soit le type de sol et les conditions climatiques, plus le profil cultural de départ est déstructuré et appauvri en M.O. et plus la recharge en carbone est rapide ensuite, en semis direct, avec des successions annuelles où les graminées jouent

FIG. 14 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (EN %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -

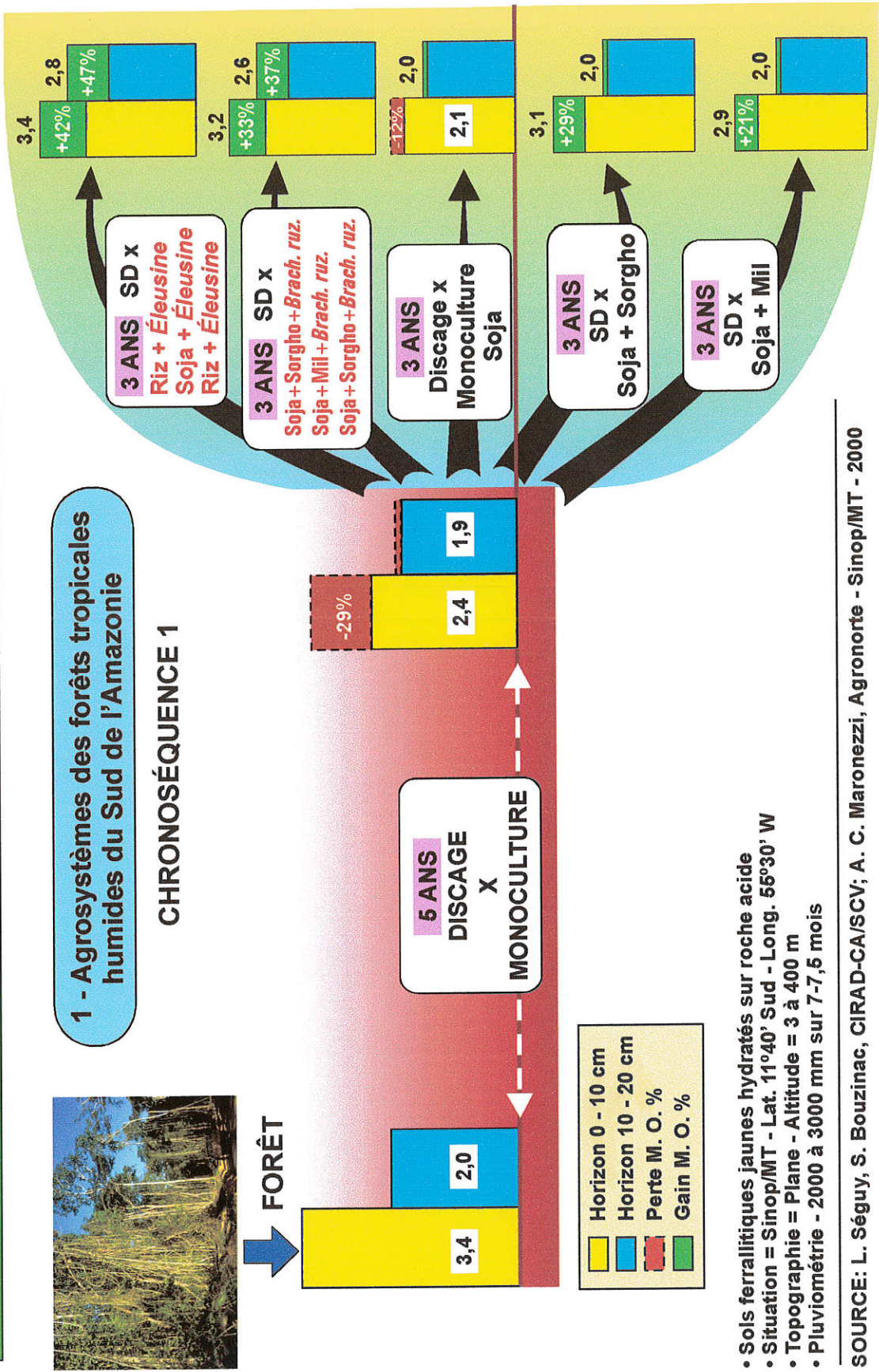
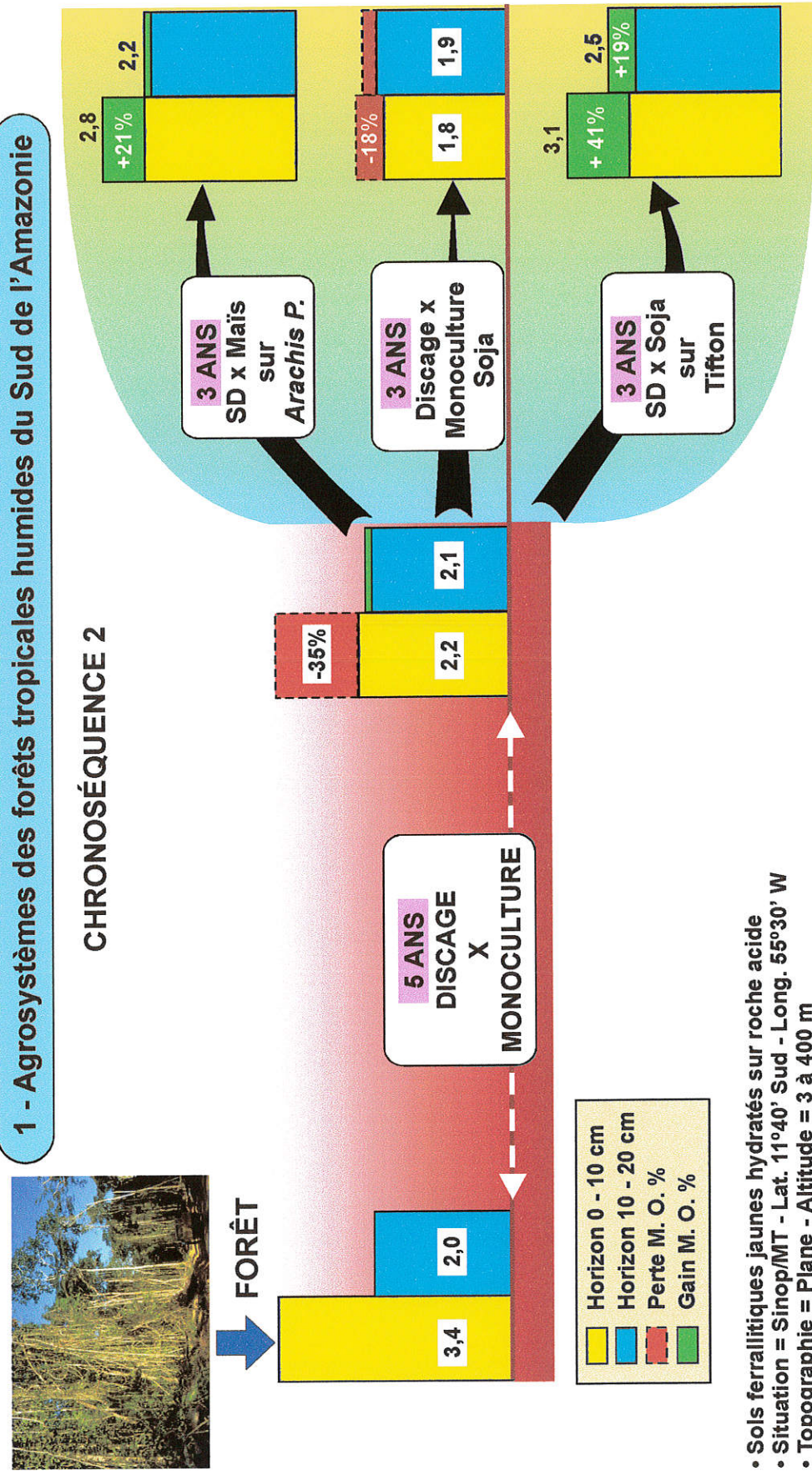


FIG. 15 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (EN %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -



- Sols ferrallitiques jaunes hydratés sur roche acide
- Situation = Sinop/MT - Lat. 11°40' Sud - Long. 55°30' W
- Topographie = Plane - Altitude = 3 à 400 m
- Pluviométrie - 2000 à 3000 mm sur 7-7,5 mois

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA/SCV; A. C. Maronezzi, Agronorte - Sinop/MT - 2000

FIG. 16 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (EN %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -

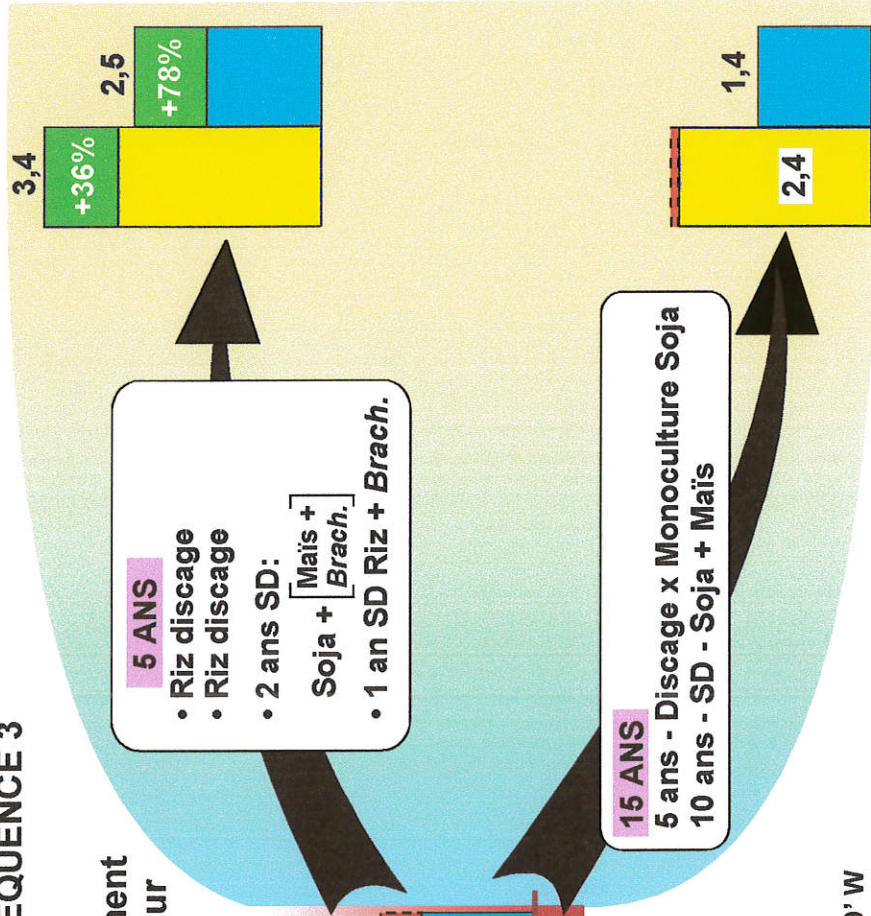
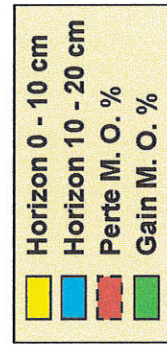
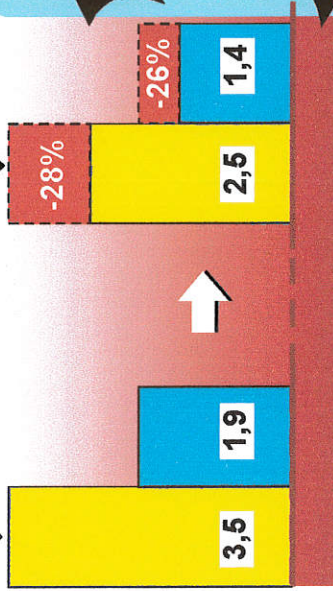
1 - Agrosystèmes des forêts tropicales humides du Sud de l'Amazonie

CHRONOSÉQUENCE 3



FORÊT

**Après défrichage
moins destructeur**



5 ANS

- Riz discaje
- Riz discaje
- 2 ans SD: Soja + [Maïs + Brach.]
- 1 an SD Riz + Brach.

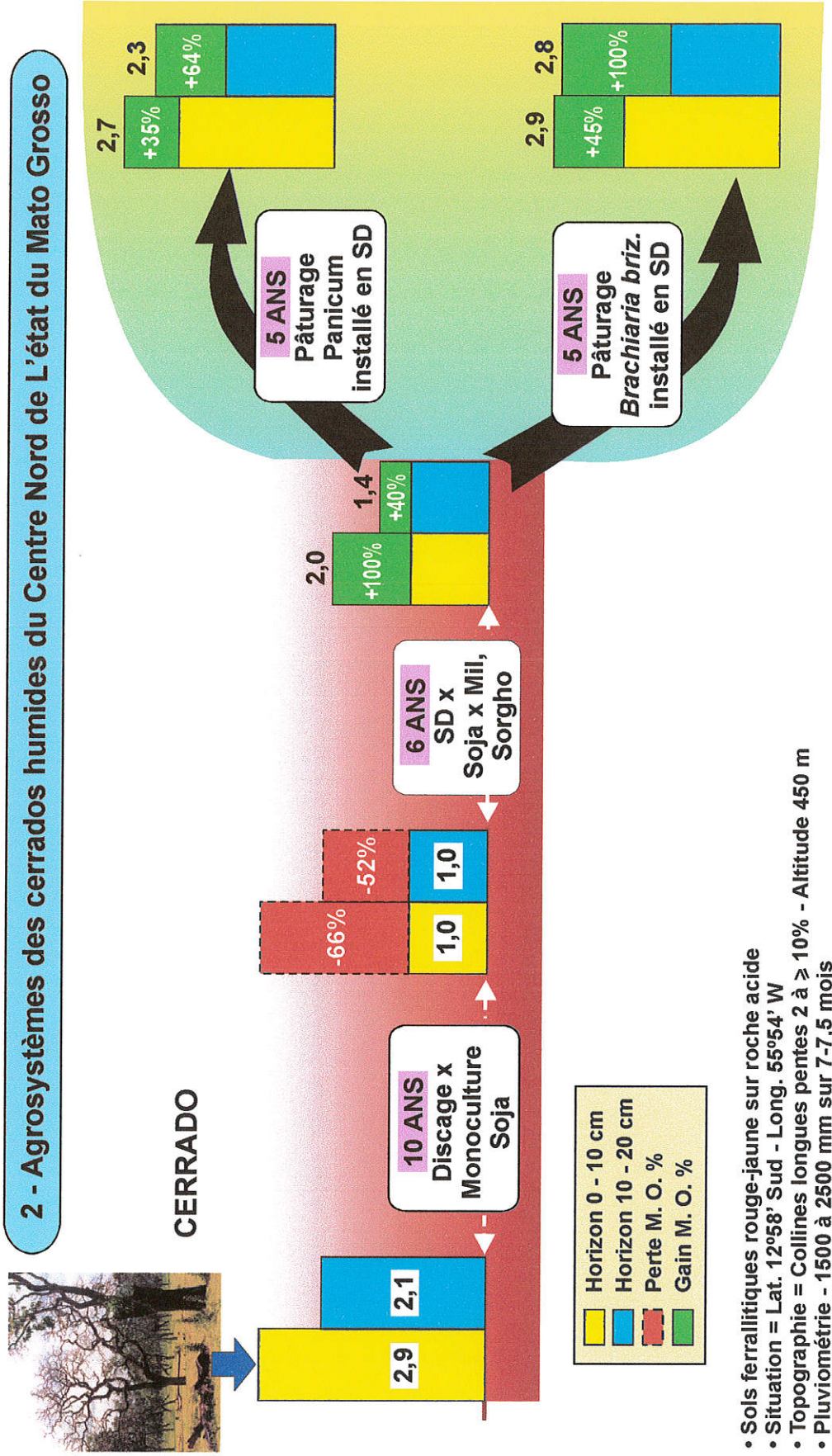
15 ANS

- 5 ans - Discaje x Monoculture Soja
- 10 ans - SD - Soja + Maïs

- Sol ferrallitique hydromorphe sur roche acide
- Situation = Sinop/MT - Lat. 11°40' Sud - Long. 55°30' W
- Topographie = Plane - Altitude = 3 à 400 m
- Pluviométrie - 2000 à 3000 mm sur 7-7,5 mois

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA/SCV; W. et J. Taffarel, Sítio Barra Verde - Sinop/MT - 1980/1999

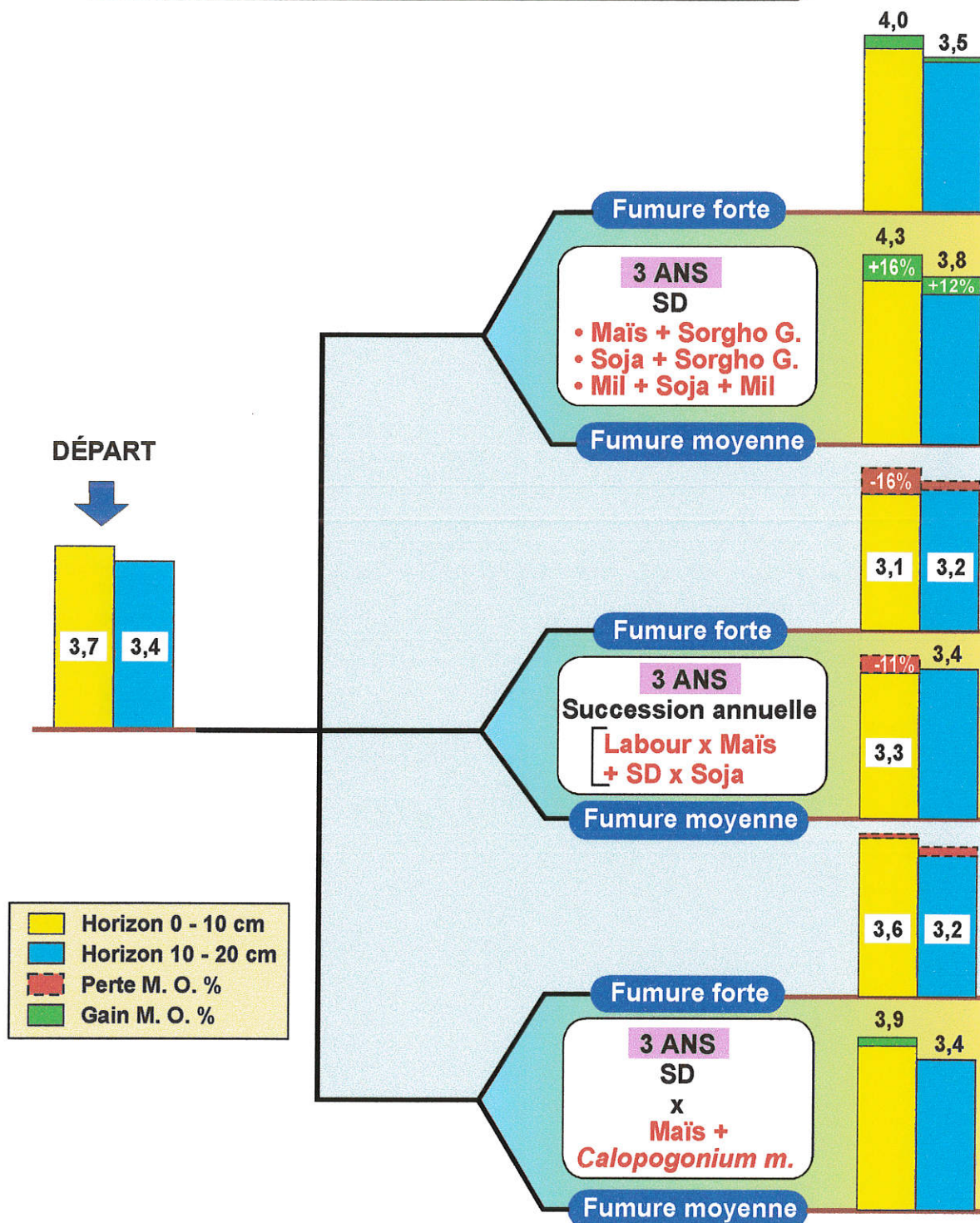
FIG. 17 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (EN %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -



SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA/SCV; Munefumi Matsubara, Fazenda Progresso - Lucas do Rio e Verde/MT - 1978/1998

FIG. 18 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (EN %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -

3 - Agrosystèmes des savanes humides du Gabon

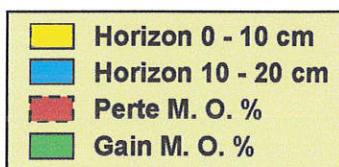
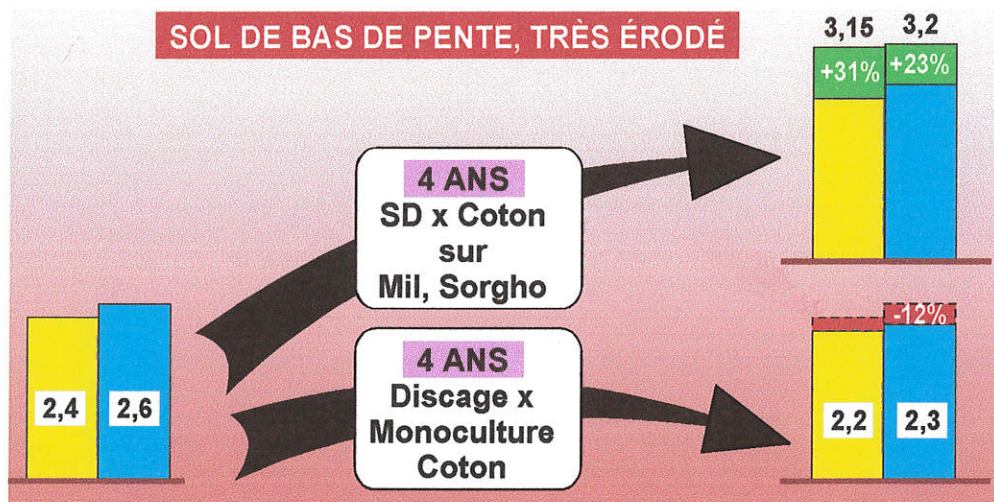


- Sol Ferrallitique jaune sur roche acide;
- Pluviométrie - 2000 à >3000 mm, bimodale
- Topographie = Collines, pentes 2 à > 8% - Altitude 7 à 800 m
- Situation = Lat. 2° Sud, Long. 13° Est.

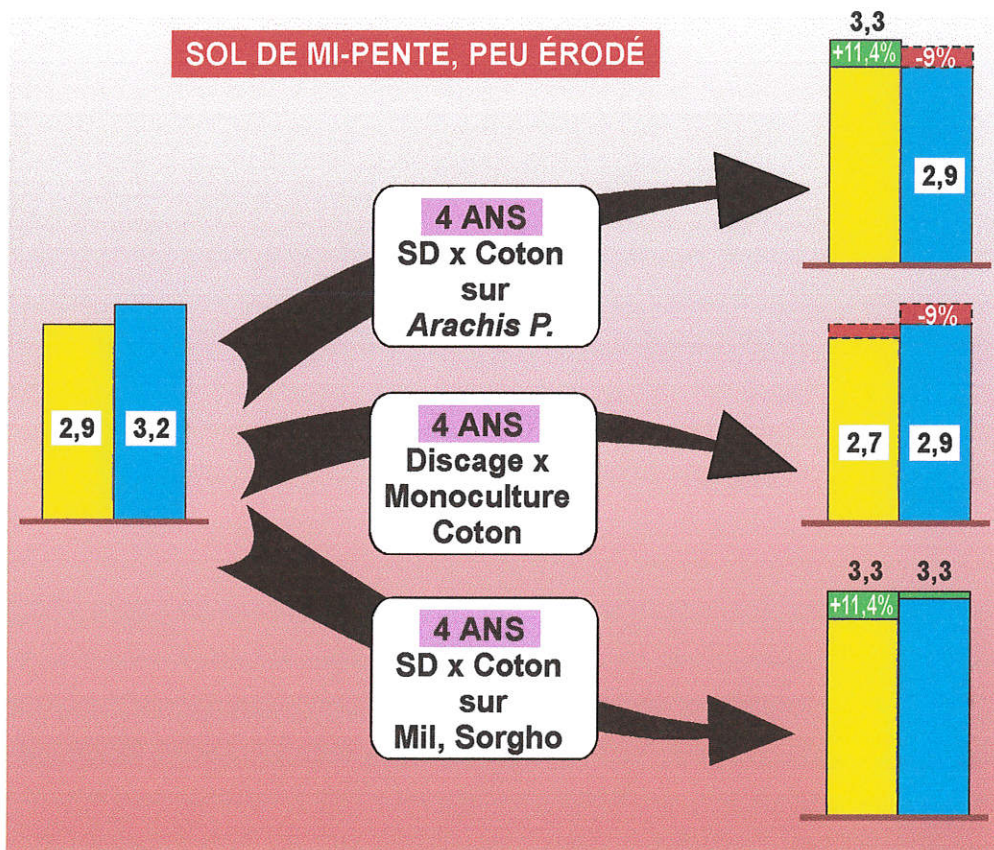
SOURCE: S. Boulakia, L. Ségué, CIRAD; C. Madjou, CRAB; Franceville, Gabon - 1999 -

FIG. 19 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (EN %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -

4 - Agrosystèmes des forêts tropicales du Sud de l'état de Goiás - Brésil



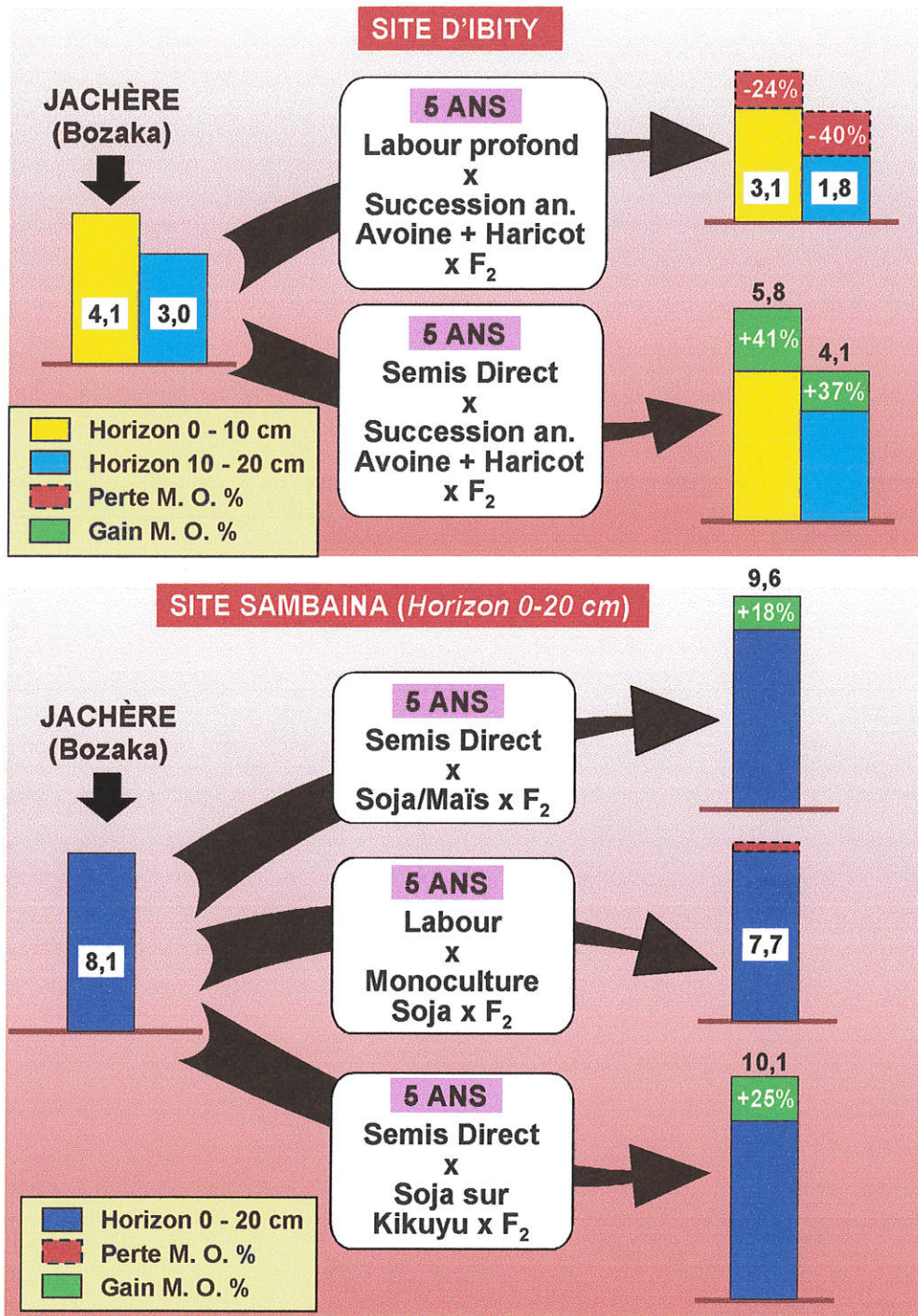
- Sol: Ferrallitique rouge foncé sur basalte
- Situation = Lat. 17° 3' S, Long. 49°54' W - Altitude 3 à 400 m
- Topographie = Collines à fortes pentes (3-20%)
- Pluviométrie - 900 à 1600 mm sur 6 mois



SOURCE: L. Ségué, S. Bouzinac, CIRAD-CA/SCV; E. Maeda, N. Maeda, M. A. Ide, Groupe Maeda Fazenda Canadá - Porteirão/GO - 1999

FIG. 20 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (EN %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -

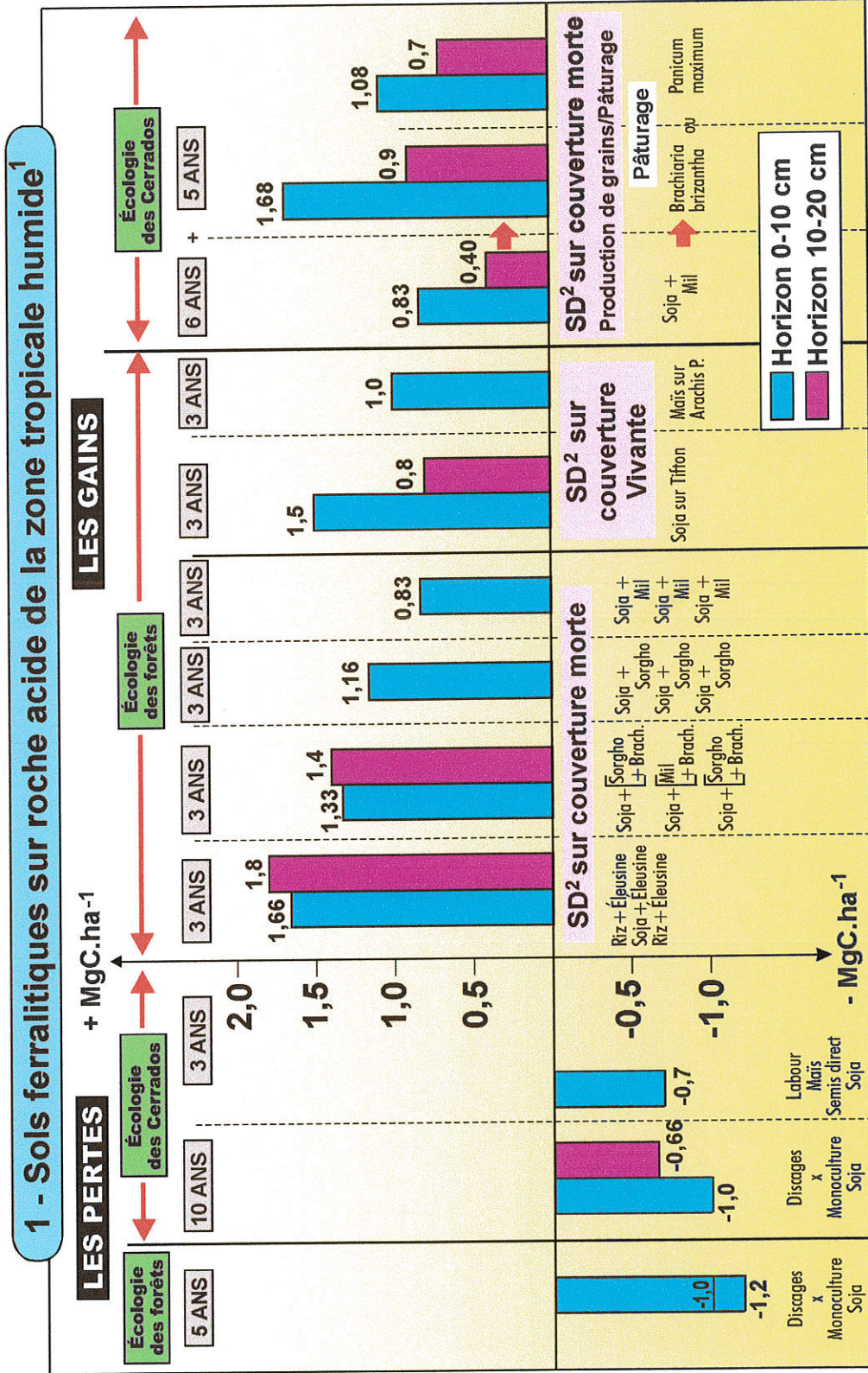
5 - Agrosystèmes des hauts Plateaux Malgaches - Sub-Tropical



- Sols Ferrallitiques sur roche acide (*Ibity*), ferrallitiques rouge-chocolat (*Sambaina*)
- Situation = Lat. 19° 44' a 57' Sud; Long. 46° a 47° Est - Altitude 1400 à 1600 m
- Topographie = De montagne, fortes pentes (3-60%) • Pluviométrie - 1600 - 1800 mm

SOURCE: L. ONG Tafa, L. Séguy, CIRAD-CA/SCV, 1993/98 - Antsirabé - MADAGASCAR

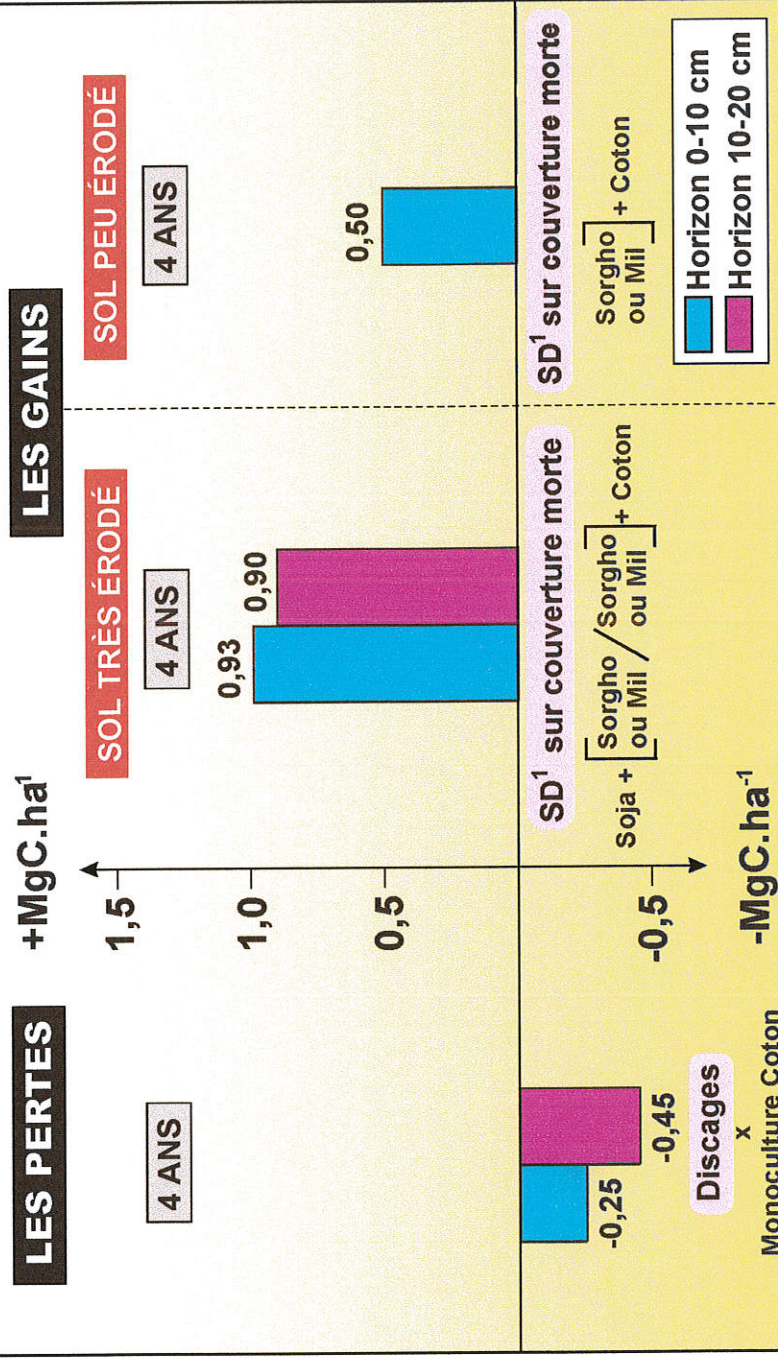
FIG. 21 RESUMÉ DES TENDANCES D'ÉVOLUTION DES TENEURS MOYENNES ANNUELLES DE CARBONE DU SOL (en Mg C.ha⁻¹), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS -



1 - Brésil et Gabon; 2 - SD = Semis direct
 SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA/GEC; M. Matsubara, Faz. Progresso; A. C. Maronezzi, Agronorte; S. Boulakia et al., CIRAD - 1994/99 - Sinop/MT

FIG. 22 RESUMÉ DES TENDANCES D'ÉVOLUTION DES TENEURS MOYENNES ANNUELLES DE CARBONE DU SOL (en Mg C.ha⁻¹), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS -

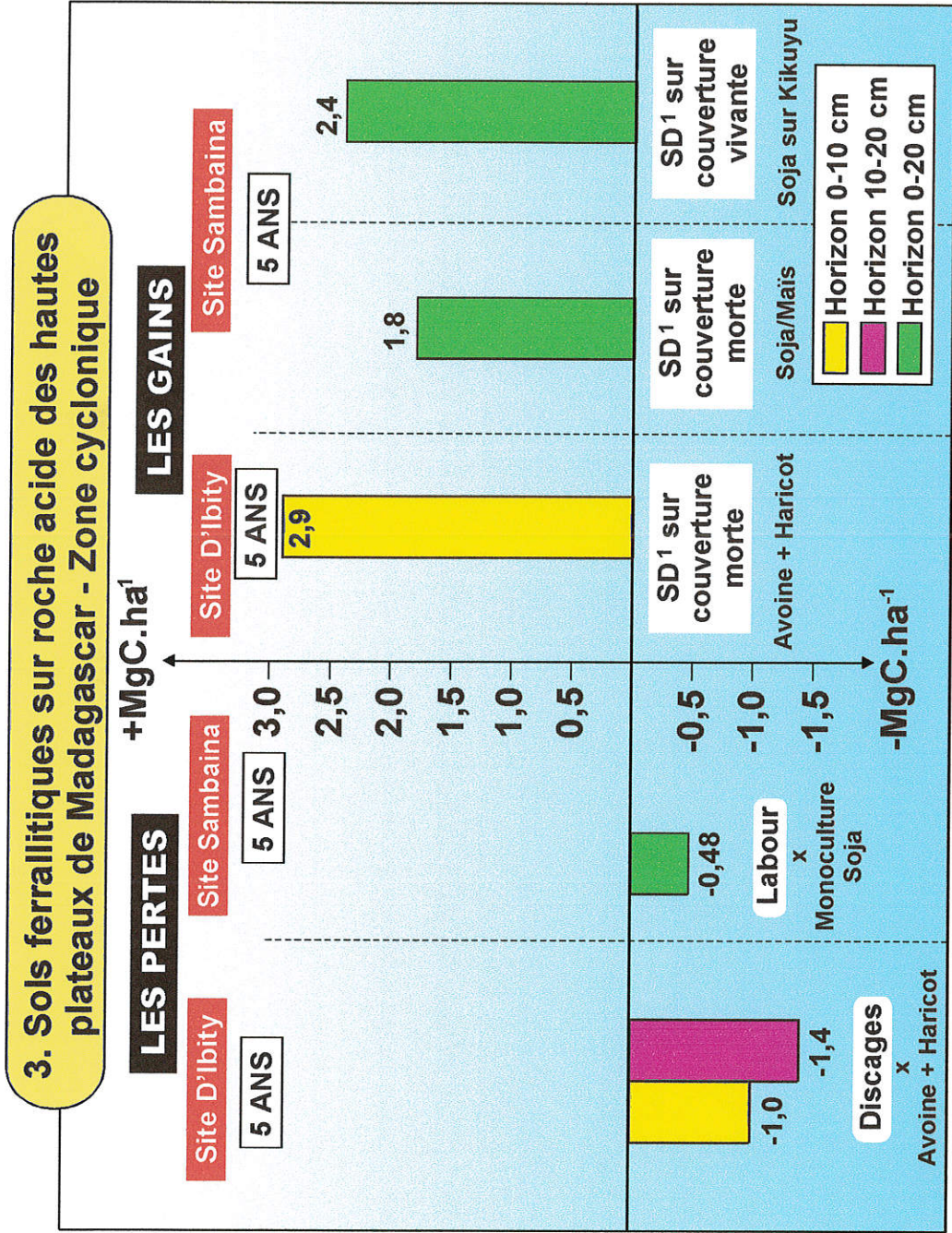
2. Sols ferrallitiques rouge-foncés sur basalte de l'écologie des forêts tropicales du Sud Goiás - Centre Ouest Brésil



1- SD = Semis direct

SOURCE: E. Maeda, M. Esaki, Groupe Maeda; L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-C/AGEC, Porteira/GO, 1995/1999

FIG. 23 RESUMÉ DES TENDANCES D'ÉVOLUTION DES TENEURS MOYENNES ANNUELLES DE CARBONE DU SOL (en Mg C.ha⁻¹), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS -



1. SD = Semis direct

SOURCE: ONG TAFa; R. Michellon, P. Julien, CIRAD-CA/GEC - Antsirabé, 1999 - MADAGASCAR

un rôle dominant (*mil, mais surtout sorgho, Eleusine cor., avoine, espèces fourragères*)

⑤ Sous moindre pluviométrie (900 à 1 600 mm), avec des sols argileux naturellement bien structurés et riches en M.O. comme les sols rouges-foncés sur basalte du Sud de Goiás, sols travaillés aux disques et en monoculture de coton sur fortes pentes, les pertes en M.O. sont nettement inférieures à celles de la ZTH et sont surtout localisées sur des griffes d'érosion (*érosion linéaire dominante*)

⑥ Le climat frais et humide d'altitude sur les hautes terres malgaches est celui qui permet de séquestrer le plus de carbone annuellement, lorsque des graminées pérennes très puissantes servent de support dominant aux systèmes de Semis Direct (*Pennisetum clandestinum*) : De +1,8 à +2,4 Mg.ha⁻¹ dans l'horizon 0-20 cm.

⑦ Le taux de séquestration de C dans les systèmes de Semis Direct les plus performants peut être aussi rapide et aussi important que le sont les pertes sous gestion inadéquate avec travail du sol ; les systèmes en Semis Direct les plus efficaces à cet égard sont ceux qui utilisent des successions annuelles à base de "biomasses de couverture" ou "pompes biologiques", très fortes pourvoyeuses de biomasse (*matière sèche aérienne et racinaire*) telles que mils, sorghos associées à *Brachiaria ruz.*, *Eleusine coracana*, *Cynodon dactylon*, en ZTH, les espèces fourragères pérennes des genres *Pennisetum (clandestinum)* et *Desmodium (intortum)* en zone subtropicale d'altitude ; ils conduisent, même sur de courtes périodes de 3 à 5 ans, à recouvrer les taux de M.O. des écosystèmes originels, voire de les dépasser.

⑧ La recharge en Carbone et à court terme du profil cultural sous les meilleurs systèmes de Semis Direct, porte de manière préférentielle sur l'horizon 0-10 cm, mais aussi sur l'horizon 10-20 cm, lorsque des espèces fourragères sont utilisées dans la rotation telles que les genres *Brachiaria*, *Eleusine*, *Cynodon*, *Pennisetum*.

La comparaison des résultats obtenus avec ceux d'autres auteurs des régions tropicales et subtropicales, met en évidence :

- Une bonne concordance avec les résultats produits par Corraza E.J. et al. (1999) dans l'éco-région des cerrados du Centre-Ouest brésilien, qui montrent un taux de séquestration annuel de C de +2,18 MgC.ha⁻¹.
- Dans la région Sud du Brésil, en conditions subtropicales, les résultats récents obtenus par Amado T.J. et al. (1999), Bayer C. et al. (2000) et Sá J.C.M. et al. (2000 a & b) avec des taux annuels de séquestration de C de + 1,6, de 1,33 et de 0,99 Mg.ha⁻¹ respectivement, sont assez comparables à ceux que nous avons obtenus sur les hauts plateaux malgaches en climat subtropical frais et humide, avec des taux variant entre 1,3 et 2,4 MgC.ha⁻¹.
- Comme dans la présente étude, des exemples au Kentucky (USA) en climat tempéré et à Ponta Grossa dans le Brésil subtropical cités par Sá J.C.M. et al. (2000) montrent que le stock de carbone accumulé pendant de longues périodes (15 à 20 ans) sous Semis Direct peut être supérieur à celui des écosystèmes sous végétation naturelle et qu'il concerne préférentiellement l'horizon 0-10 cm (*Lal R., 1997 ; Dick W.A. et al, 1998 ; Kern J.S. & Johnson M.G., 1993*).
- Autre conclusion concordante de cette étude avec ceux des auteurs déjà cités : Bien que le taux de décomposition de la M.O. en régions tropicales et subtropicales soit de 5 à 10 fois plus élevé que dans les régions tempérées (*Lal R. et Logan T.J., 1995*), les gains de M.O. dus à la pratique continue du Semis Direct peuvent y être équivalents voire supérieurs : c'est la nature des systèmes pratiqués en Semis Direct qui permet d'expliquer ce paradoxe.

3.2. DYNAMIQUES DU CARBONE DE LA CEC ET DU TAUX DE SATURATION (V%)

Les sols ferrallitiques du Brésil, support de l'étude : rouges - jaunes plus ou moins hydratés sur roche acide, appartiennent aux oxisols de la classification des USA (*acrustox*), de même que les sols ferrallitiques rouges-foncés sur basalte (*haplustox*). Dans tous les cas, 60 à 80% de la CEC est imputable à la Matière organique (*Van Raij B., 1991*) et les sols sont vides chimiquement, toujours carencés en P, Ca, Mg, K, Zn, fréquemment en Bore, Cuivre (*Sheid Lopes A., 1984*), offrent une CEC effective basse, soit une faible capacité de rétention vis à vis des ions (*donc, des engrais*) qui peuvent être facilement lessivés.

Sur toutes les chronoséquences présentées, les tendances d'évolution de la CEC, suivent strictement celles de la M.O. = Sous les systèmes de culture qui perdent de la M.O. (*avec travail du sol x monoculture*), la CEC des horizons de surface baisse ; à l'inverse, elle s'accroît et dans les mêmes proportions que la M.O., lorsque le taux de cette dernière augmente dans les systèmes en Semis Direct. Avec les techniques de Semis Direct, on crée un pouvoir de rétention des engrais minéraux proportionnel au niveau de séquestration du C, et on peut ainsi limiter leurs pertes par lixiviation (*Fig. 24 à 29*).

Le Semis Direct influence également de manière significative le taux de saturation des horizons supérieurs du profil cultural (*Fig. 24 à 29*) et principalement l'horizon 10-20 cm où les variations se montrent les plus sensibles (*Séguy L. et al 2001 c*). Pour un même niveau de fumure minérale appliqué, le taux de saturation suit les variations de la M.O. et de la CEC. Le cas le plus démonstratif à cet égard est celui de la chronoséquence cerrados de la ZTH, dans laquelle les espèces fourragères implantées en Semis Direct pendant 5 ans, jouent le rôle de "pompes à cations" et remontent fortement le taux de saturation des horizons de surface, comme si de très fortes doses d'amendements calco-magnésiens avaient été appliquées, alors qu'aucune fumure minérale, ni aucun amendement n'ont été apportés au cours de ces 5 ans (*Fig. 26*).

Des profils culturaux effectués tous les ans, dans toutes les chronoséquences, sur les cultures "biomasses de couverture" "pompes biologiques" de succession, montrent que les enracinements de ces cultures sont très profonds en sols ferrallitiques et dépassent le plus souvent 2 m à 2,5 m de profondeur à la floraison ; elles ont, de ce fait, la capacité de remonter, recycler tous les ans, les bases et les nitrates qui ont échappé aux cultures commerciales. C'est le cas des espèces des genres : sorgho, *Brachiaria*, *Panicum*, *Eleusine*, *Crotalaires*, *Pennisetum*, *Cynodon*, fermant ainsi le système « Sol-Cultures » (*concepts Séguy L. et al 1996*).

En définitive, les systèmes de culture en Semis Direct les plus performants pour la séquestration de carbone, sont également ceux qui offrent la CEC les plus élevées dans la couche 0-20 cm ; la remontée des taux de saturation en Semis Direct, plus sensiblement marquée dans l'horizon 10-20 cm que dans -0-10 cm, indique l'efficacité des "biomasses de couverture" ou "pompes biologiques" dans leur capacité, dans la même année agricole, à remonter les bases déjà hors d'atteinte des cultures commerciales ou alimentaires (*cette capacité doit aussi s'exprimer pour le recyclage des nitrates*). Ces résultats expliquent parfaitement le concept de "fermeture du système sol-culture", à l'image du fonctionnement de l'écosystème forestier où les nutriments sont constamment recyclés avec un minimum de pertes, dans le système sol-plante (*Séguy L. et al, 1998 e, 1999*).

FIG. 24 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (M. O. en %), DE LA CEC (en meq/100g) ET DU TAUX DE SATURATION (V en %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -

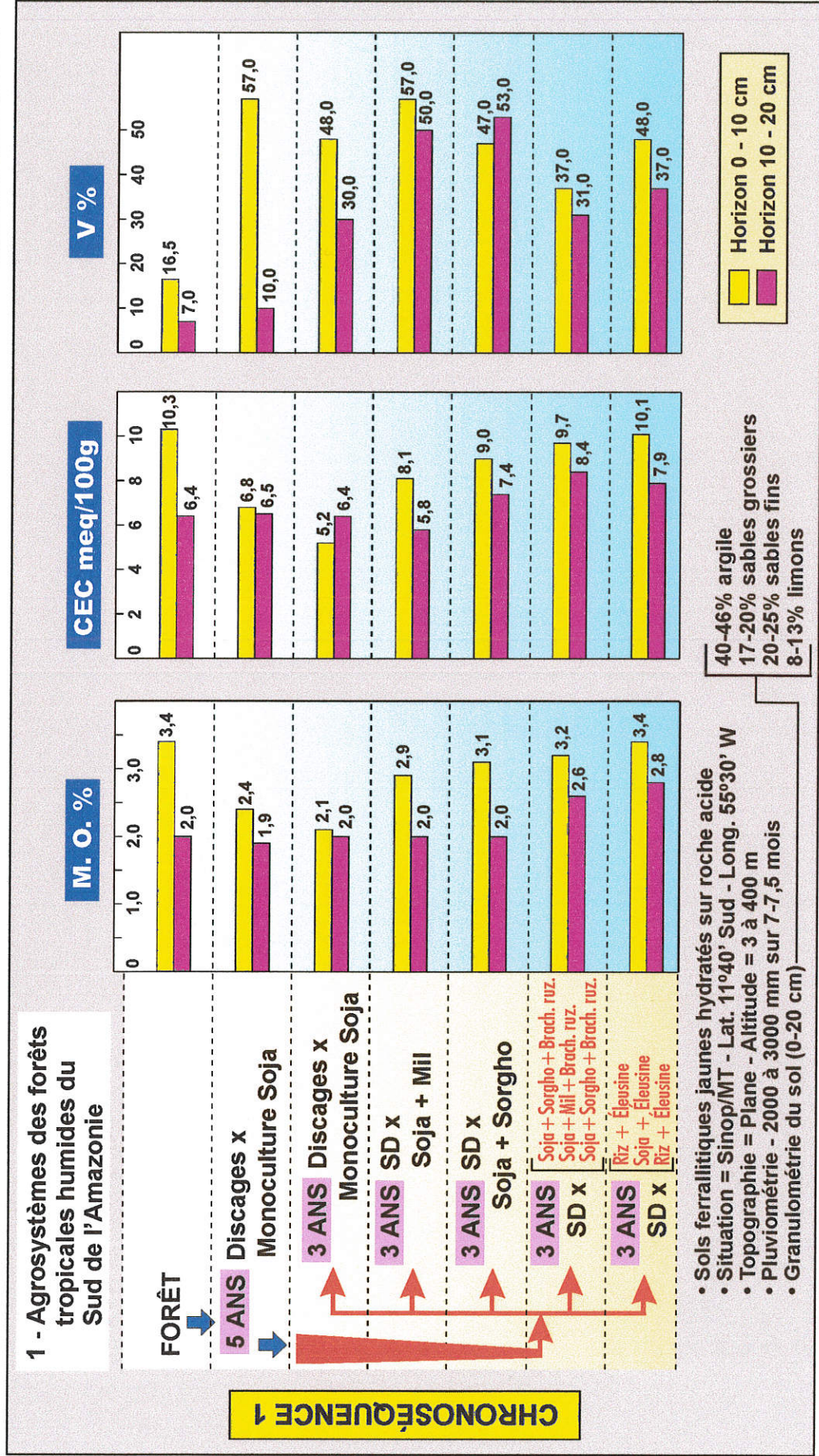


FIG. 25 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (M. O. en %), DE LA CEC (en meq/100g) ET DU TAUX DE SATURATION (V en %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -

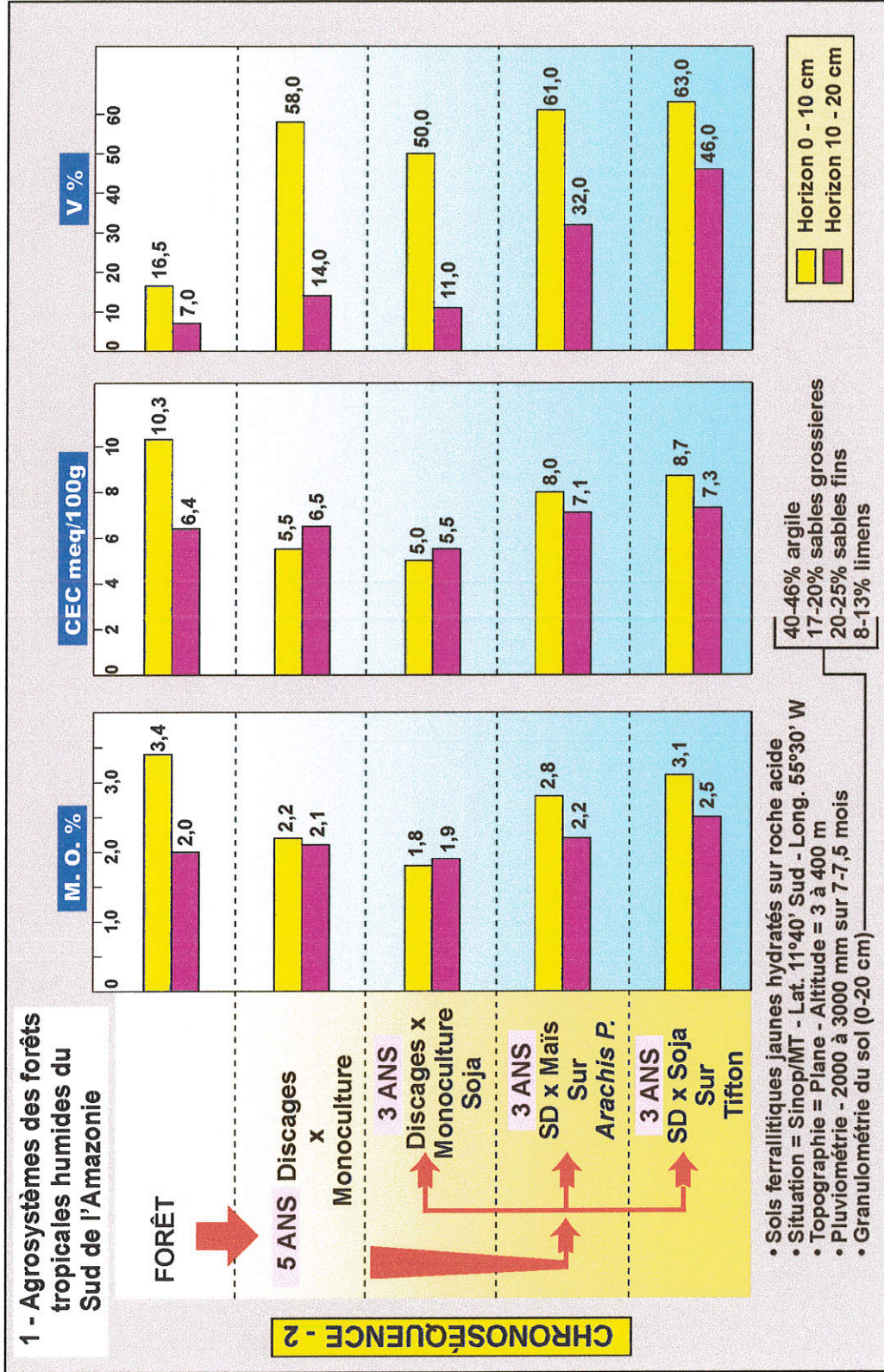


FIG. 26 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (M. O. en %), DE LA CEC (en meq/100g) ET DU TAUX DE SATURATION (V en %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -

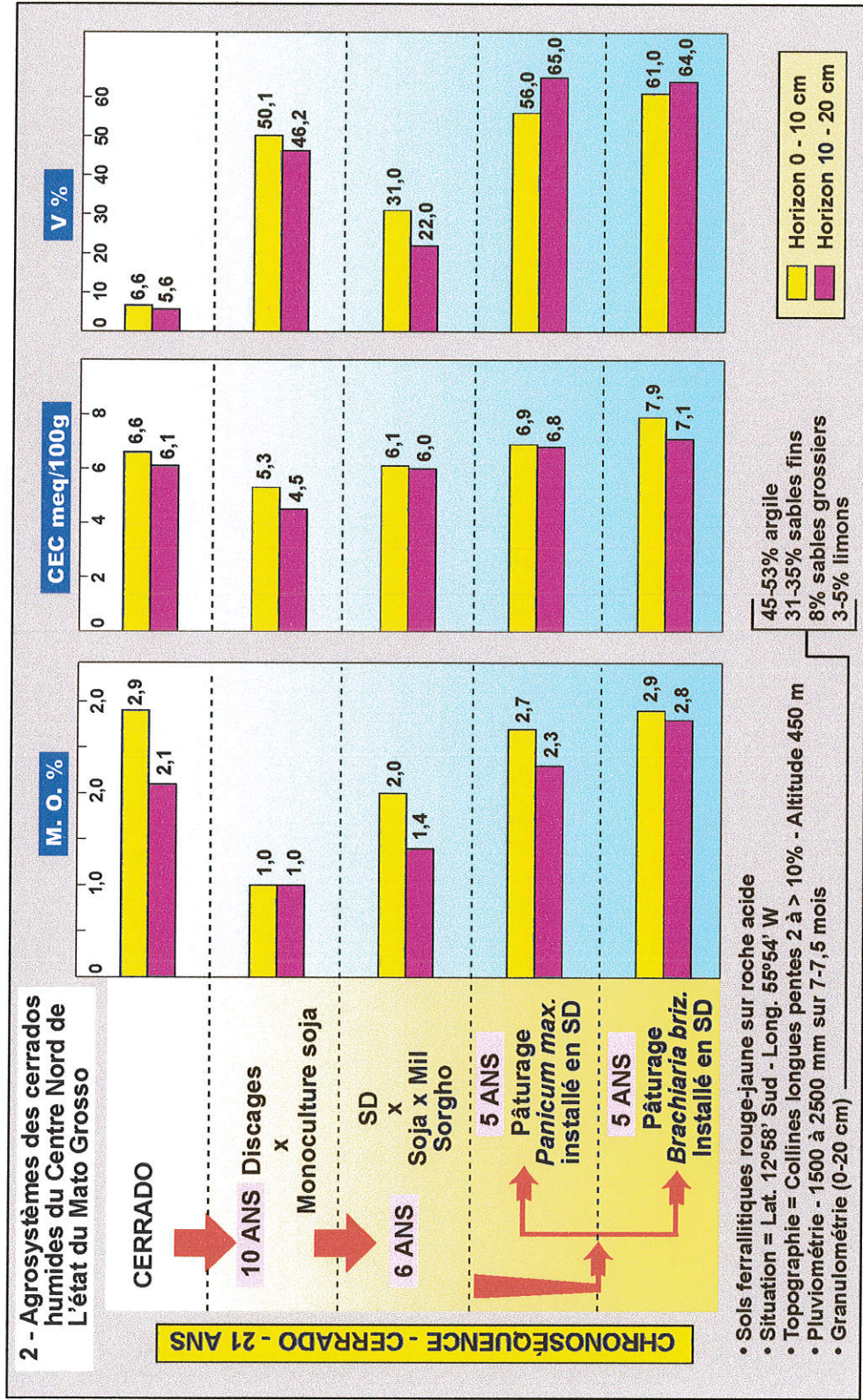
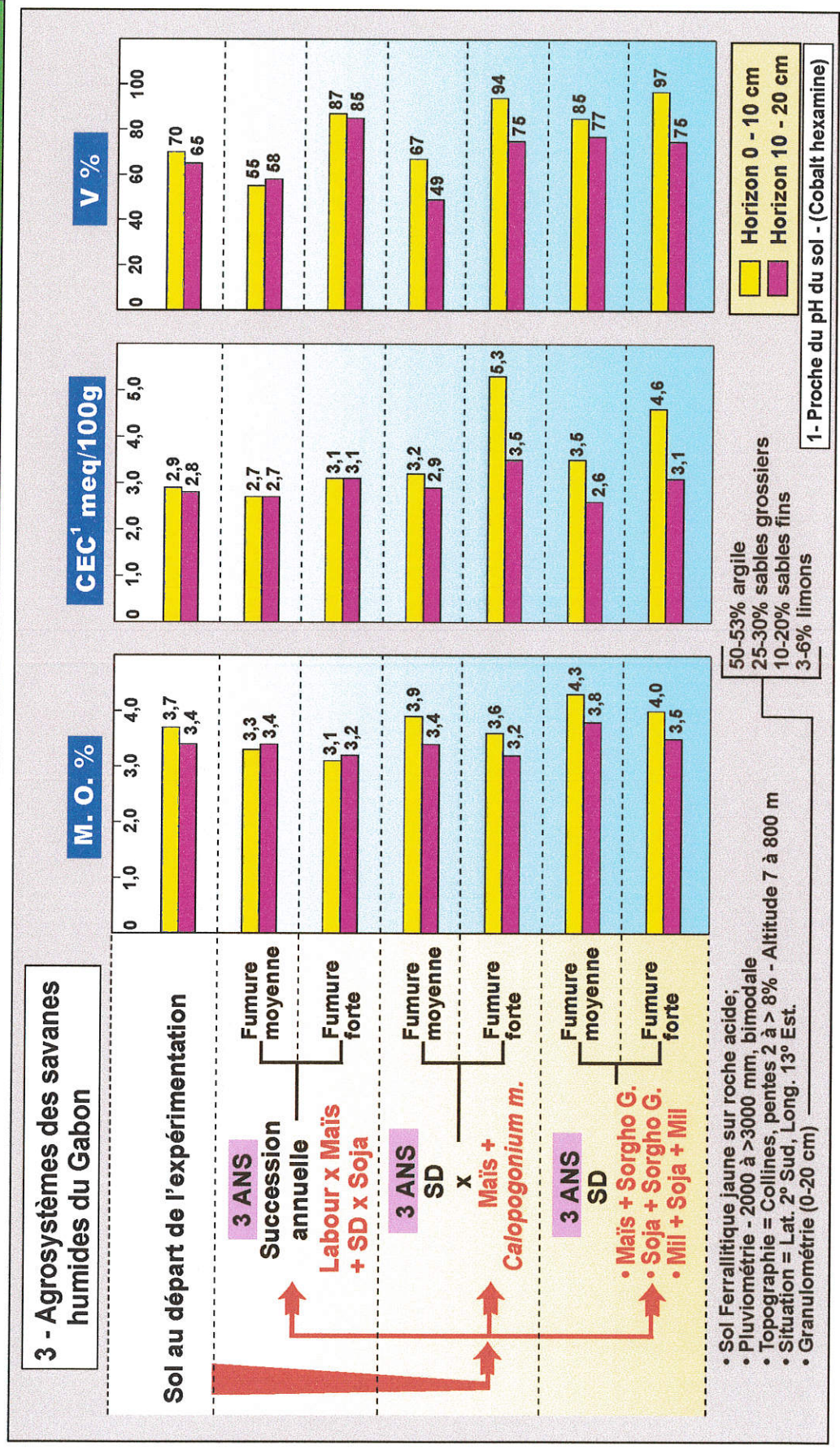
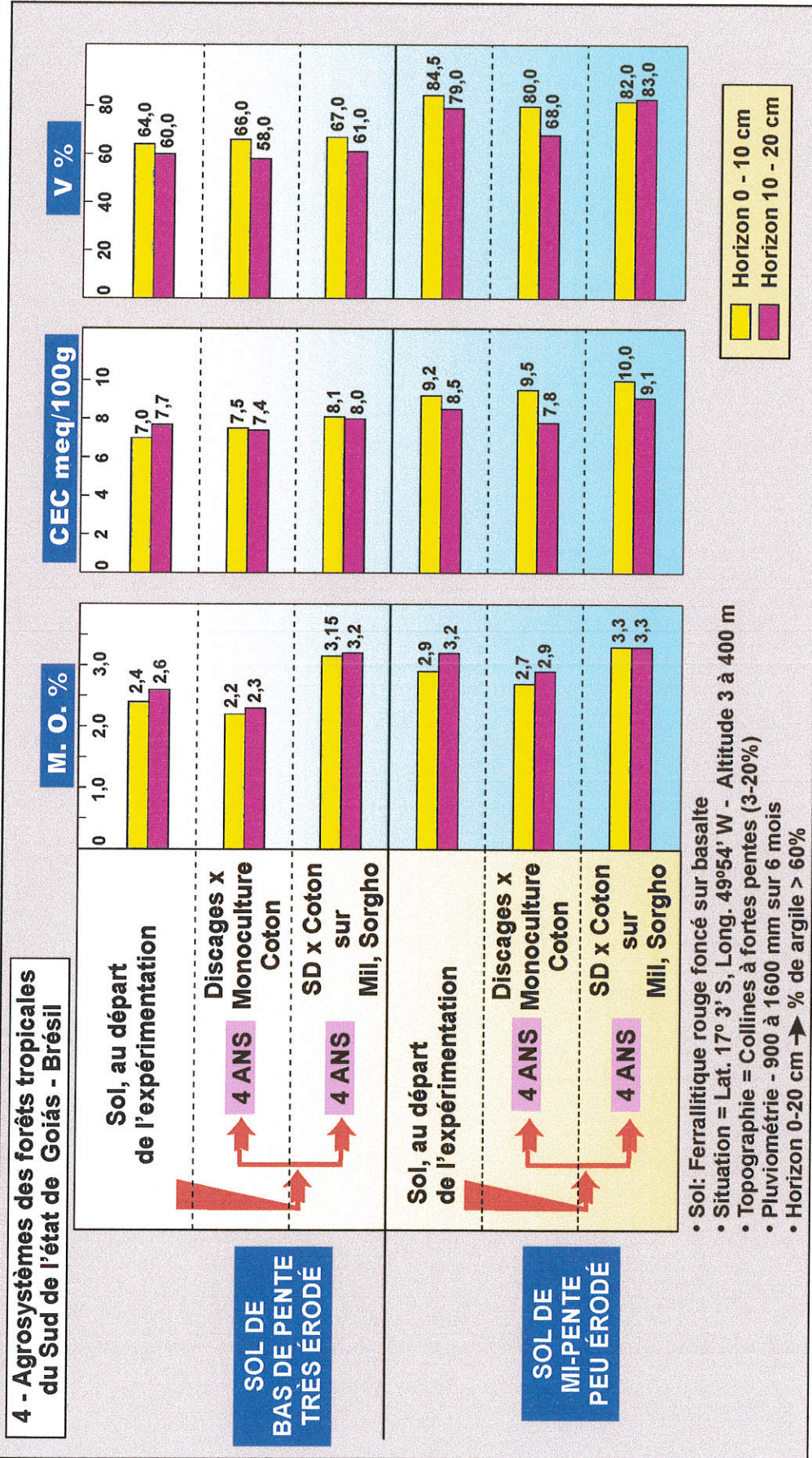


FIG. 27 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (M. O. en %), DE LA CEC (en meq/100g) ET DU TAUX DE SATURATION (V en %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -



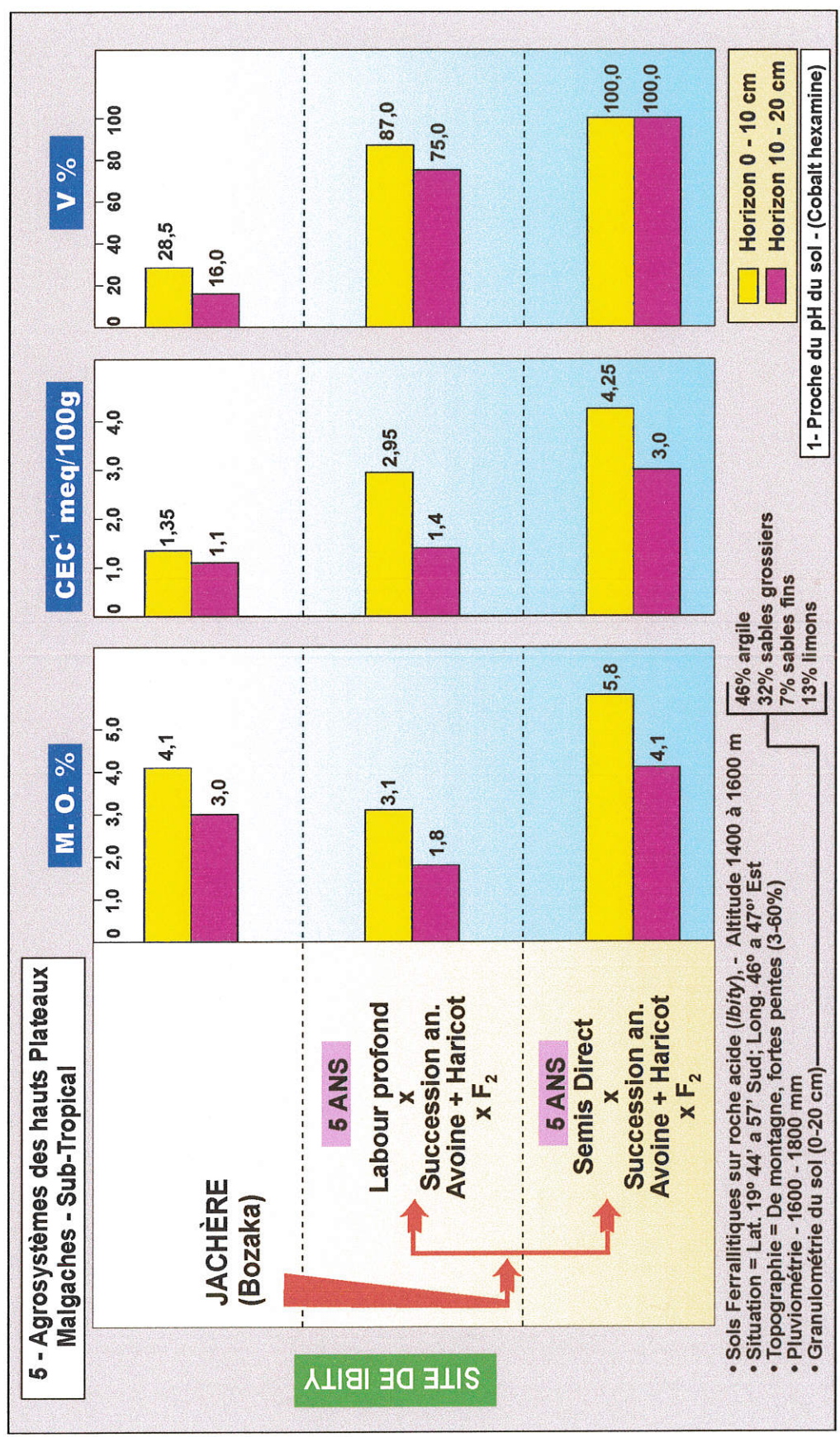
SOURCE: S. Boulakia, L. Séguy, CIRAD; C. Madjou, CRAB; Franceville, Gabon - 1999 -

FIG. 28 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (M. O. en %), DE LA CEC (en meq/100g) ET DU TAUX DE SATURATION (V en %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -



SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA/SCV; E. Maeda, N. Maeda, M. A. Ide, Groupe Maeda, Fazenda Canadá - Porteira/GO - 1999

FIG. 29 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE (M. O. en %), DE LA CEC (en meq/100g) ET DU TAUX DE SATURATION (V en %), EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE PRATIQUÉS DANS DIVERS AGROSYSTÈMES CONTRASTÉS, TROPICAUX ET SUBTROPICAUX -



SOURCE: L. ONG TAFA, L. Séguy, CIRAD-CA/SCV, 1993/98 - Antsirabé - MADAGASCAR

3.3. LES PERFORMANCES AGRONOMIQUES, TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES DES SYSTÈMES DE CULTURE ET LEUR MISE EN REGARD AVEC LA DYNAMIQUE DE LA M.O.

3.3.1. ÉCO RÉGION DE LA ZONE TROPICALE HUMIDE (ZTH).

Les travaux de recherche conduits par la CIRAD-CA et ses partenaires brésiliens de la recherche et du développement ont montré, entre 1984 et 2000, que les potentialités agricoles des sols ferrallitiques sont identiques sous forêt et sous Cerrados, dès lors que les opérations de défrichement suivies des trop nombreux passages d'engins à disques ont exercé leur œuvre destructrice sur la structure du sol et la matière organique originelle (Séguy L et al, 1996, 1998 e).

L'évolution des performances agronomiques des systèmes de culture à base de riz pluvial et soja, créés par la Recherche a été reconstituée pour la période 1986-2000 =

- a) **Sur les moyen et long termes**, les figures de synthèse 30, 31 et 32 qui retracent cette évolution, montrent comment, en partant de système de monoculture à une seule culture par an, la Recherche a bâti successivement : des systèmes à 1 seule culture par an, en rotation (*Céréale-Légumineuse*), puis des systèmes alternant 2 cultures annuelles en succession avec une seule culture l'année suivante et enfin des systèmes à 2 cultures annuelles en succession + pâturage avec embouche du bétail en saison sèche.
- Partant de systèmes à une seule culture par an qui n'utilisaient qu'une fraction du potentiel hydrique disponible, les travaux de recherches sur les systèmes de culture (*à partir des matrices pérennisées*) ont progressivement exploité la ressource sol toute l'année et une offre hydrique bien supérieure, même en saison sèche à l'image de l'écosystème forestier, en utilisant l'eau profonde (*au-delà de 2 m*).
 - L'augmentation progressive de la production agricole par hectare, a été conquise principalement par la maîtrise progressive des techniques de Semis Direct qui ont permis à la fois : l'accès permanent aux terres pour les machines avec des capacités et flexibilité d'utilisation accrues, un arrêt total de l'érosion et l'augmentation graduelle de la fertilité des sols qui a conduit à produire de plus en plus au moindre coût.
 - La productivité du soja, principale culture de la région, est passée ainsi de 1.700 kg/ha en 1986 à plus de 4.600 kg/ha en l'an 2000 ; celle du riz pluvial sur la même période et passée de 1.800 - 2.000 kg/ha à plus de 8.000 kg/ha, accompagnée d'une véritable révolution sur la qualité de grains, qui est aujourd'hui supérieure ou égale à celle des meilleures variétés irriguées (Séguy L., et al., 1998 d) [Fig. 31 et 32].
 - La productivité des cultures principales a donc pratiquement triplé en 15 ans ; les progrès spectaculaires réalisés sont imputables plus aux avancées décisives qui ont été progressivement construites et conquises en matière de gestion des sols et des cultures en Semis Direct qu'à celles de l'amélioration variétale (Séguy L., Bouzinac S. et al, 1992/2000, 1996).
 - La productivité totale par hectare des systèmes de culture qui se sont graduellement diversifiés, a considérablement avancé sur la même période grâce aux cultures de succession annuelles telles le maïs, le mil, le sorgho et l'Eleusine qui produisent entre 2.000 et 4.000 kg/ha avec un minimum d'intrants ou sans intrants (*cultures appelées "safrinhas"*) et qui peuvent être suivies d'embouche en saison sèche lorsque des cultures fourragères leurs sont associées. Si la valeur commerciale de ces cultures de succession est

encore assez dérisoire dans la région, elles peuvent toutefois servir à l'alimentation du bétail en saison sèche et être converties avec profit en production de viande ou de lait. Les meilleurs systèmes de culture en semis direct permettent ainsi de produire aujourd'hui sur une année = 4.500 kg/ha de soja ou plus de 6.000 kg/ha de riz, suivis de 1.500 à 3.000 kg/ha de maïs ou sorgho ou mil ou Eleusine cor. et de 65 à 90 kg/ha de viande en saison sèche (entre 100 et 120 \$US/ha) [Cf. Fig. 52].

La production de matière sèche aérienne totale par hectare est passée de 4 à 8 t/ha en 1986 pour les systèmes de départ à une seule culture annuelle, à 25-28 tonnes/ha en l'an 2000 pour la moyenne des meilleurs systèmes en Semis Direct (Fig. 31 et 32).

La variation des teneurs en M.O. des horizons de surface, a suivi strictement celle de la production de matière sèche totale aérienne : les systèmes les plus productifs en Semis Direct ont accumulé, en moyenne, entre 1992 et 2000 entre 1,7 et 2,1% de M.O. sur 8 ans (Fig. 31 et 32).

- b) Sur le très court terme :** La supériorité des techniques de Semis Direct sur celles de travail du sol s'exprime déjà dès les 2 premiers mois de la saison des pluies sur lesquels s'effectuent les semis échelonnés des cultures principales de soja et riz. Des expérimentations conduites en vraie grandeur qui sont parties intégrantes des chronoséquences étudiées en zone de forêt et de cerrados, montrent que, en semis direct, un semis effectué 60 jours après les premières pluies utiles ne perd que 12 à 24% de la productivité initiale pour le soja, et maintient celle du riz pluvial, par rapport aux semis précoces réalisés aux premières pluies (Fig. 33 et 34). A l'inverse sur labour, entretenu propre aux engins à disques sur la même période de 60 jours, le semis effectué 2 mois après les 1^o pluies utiles perd entre 19 et 27% de sa productivité initiale pour le soja (Fig. 33) et entre 36 et 70% pour le riz pluvial (Fig. 34), en fonction du niveau de fumure minérale appliqué.

Dès le début des pluies, le semis direct sur couverture végétale s'avère un système "mainteneur de la fertilité" par ses effets de protection sur le sol, le maintien de la structure par le système racinaire en croissance de la biomasse de couverture, et sa pleine utilisation du pic initial de minéralisation de la M.O. aux premières pluies, dont les nutriments sont recyclés dans la biomasse de couverture en croissance, alors qu'ils sont perdus sous sols nus, exposés aux pluies.

- c) Sur les 5 dernières années,** qui ont bénéficié de tous les progrès acquis dans la construction pendant 15 ans de systèmes de culture en Semis direct toujours plus performants et également d'un niveau de maîtrise technique encore affiné, l'analyse des performances agronomiques comparées des systèmes de culture dans les chronoséquences 1, 2 et 3 de l'écologie de forêt, met en évidence =

- **Concernant la culture de soja dans la chronoséquence 1,** où sont comparés, sur les 3 dernières années, divers systèmes de culture en Semis Direct sur couvertures mortes avec le système de monoculture de soja travaillé aux engins à disques =
 - . La productivité du soja, aussi bien de cycle court (cv. *Conquista*) que de cycle moyen (cv. *FT 114*) est toujours nettement supérieure sur les systèmes de semis direct que sur le témoin travaillé. L'écart de rendements s'accroît d'année en année à l'avantage du Semis Direct ; il est proportionnel à l'importance de la biomasse sèche sur laquelle est implanté le soja en semis direct = en présence d'un très faible niveau de fumure minérale (40 P₂O₅ + 40 K₂O), cet écart de rendement en faveur

du semis direct va de 13 à 17% en première année, à 30 à 42% en troisième année pour les meilleurs systèmes, quel que soit le cycle de la variété (Fig. 37, 38). Lorsque la fumure apportée double (ON + 80 P₂O₅ + 80 K₂O), les écarts en faveur des meilleurs systèmes en semis direct vont de 15 à 25% en première année pour les 2 cycles variétaux à 18-24% pour le cycle court et 31 à 47% pour le cycle moyen en troisième année (Fig. 37, 38 et 40).

À titre d'exemple, en 3^e année, le cycle court produit 2.233 kg/ha sur le témoin travaillé contre 2.957 kg/ha pour la moyenne des meilleurs systèmes en semis direct en présence de la fumure faible ; 2.984 kg/ha contre 3.500 kg/ha en présence de la fumure double (Fig. 39).

Dans les mêmes conditions, le cycle moyen produit 2.547 kg/ha sur le témoin contre 3.575 kg/ha en Semis direct avec fumure faible, et 3.166 contre 4.580 kg avec fumure double (cf. Fig. 39).

+ La productivité du Riz pluvial est, comme celle du soja, toujours plus élevée en semis direct que sur sol travaillé. La productivité moyenne des 3 meilleures variétés est en 1997/98 de 5.420 kg/ha en semis direct sur couverture morte d'*Eleusine coracana*, contre 4.260 kg/ha sur labour dans la même rotation, soit un gain de productivité de 23% en faveur du semis direct. En 1998/99, dans la même rotation le rendement moyen du semis direct pour ces mêmes cultivars est de 5.025 kg/ha contre 2.885 kg/ha sur labour, soit un gain de rendement de 43% pour le semis direct (Fig. 42). L'état sanitaire du matériel génétique est, en outre, toujours nettement meilleur sur semis direct que sur labour pour les principales maladies fongiques de l'appareil végétatif et reproducteur (Seguy L. et al, 1998 c et d) [Fig. 42].

Sur ces 3 années consécutives, les meilleurs cultivars créés par l'entreprise AGRONORTE en collaboration avec le CIRAD, confirment leurs rendements très élevés au niveau régional en semis direct : pour les cycles courts entre 3.500 et 5.000 kg/ha avec basse technologie, et de 4.500 à plus de 6.000 kg/ha avec haute technologie. Avec les mêmes niveaux technologiques, les cycles moyens produisent respectivement entre 4.800 - 5.200 kg/ha et 5.300 à plus de 6.000 kg/ha (pointes de productivité entre 7.000 et 8.500 kg/ha sur les fazendas de référence). [Cf. Fig. 41].

Si la productivité du soja en semis direct est étroitement corrélée à la production de biomasse sèche des graminées, le riz pluvial suit la même réponse dès lors que la nutrition azotée n'est pas limitante (Fig. 35 et 36). Les biomasses qui induisent les productivités les plus élevées du riz pluvial sont des associations entre des graminées qui ont les systèmes racinaires les plus puissants (Séguy L. et al., 1998 d) et des légumineuses fixatrices d'azote (Résultats 2000 et 2001 non publiés).

La productivité des biomasses de couverture s'accroît avec le temps et ceci d'autant plus rapidement que le niveau de fumure minérale appliqué à la culture principale est plus faible, mettant ainsi en évidence l'accroissement progressif de la capacité de production du sol due à la gestion biologique du profil cultural au sens large (Fig. 40).

Les systèmes de semis direct sur couvertures mortes les plus productifs en biomasse sèche par an, sont aussi ceux qui produisent le plus de soja et qui séquestrent le plus de carbone (Fig. 35 et 36).

- **Dans la chronoséquence 2**, où sont comparés sur les 3 dernières années, 2 systèmes en semis direct **sur couvertures vivantes** par rapport au témoin travaillé, l'un relatif au soja, l'autre au maïs:

- + **Sur la culture de soja** (cv. *Emgopa 313*), le système en semis direct sur tifton (*Cynodon d. hybride*, n° 85) montre une productivité de grains en accroissement tous les ans, quel que soit le niveau de fumure ; à l'inverse, sur le témoin travaillé « discages x monoculture », excepté pour le niveau de fumure non limitant qui est pratiquement stable, la productivité décroît tous les ans. Le rendement de soja sur semis direct en 3^e année avec fumure faible est ainsi supérieur de 12% à celui du témoin sur fumure forte non limitante, mettant en évidence aussi dans ce cas, l'importance de la gestion organo-biologique en semis direct pour produire plus, avec moins d'engrais. (Fig. 43 et 50).

- + **Concernant la culture de maïs**, excepté en première année où l'absence de contrôle de la couverture vivante de *Arachis p.* a fortement affecté négativement la productivité, le système de semis direct est toujours plus productif que le témoin travaillé sur les 2 ans qui suivent. L'écart de rendement en maïs en faveur du semis direct est d'autant plus important qu'une sécheresse intervient à la floraison mâle, comme ce fut le cas en 1997/98. A l'instar du soja, le maïs sur couverture vivante produit en moyenne sur les 2 dernières années 6.000 kg/ha avec fumure minérale faible, soit un rendement proche de celui du témoin travaillé avec fumure moyenne, mettant encore une fois en évidence l'importance de la gestion biologique pour économiser les engrais minéraux et produire de manière plus stable (Fig. 44 et 51).

Le système en SD soja sur tifton est celui qui séquestre le plus de carbone = 1,5 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm et 0,8 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ dans le niveau 10-20 cm, sur 3 ans. Le système SD maïs sur *Arachis p.* séquestre dans le même temps 1,0 MgC.ha⁻¹.an⁻¹ dans l'horizon 0-10 cm, tandis que le témoin travaillé continue de perdre du carbone (Fig. 43 et 44).

- **Dans la chronoséquence 3**, les résultats des rendements présentés dans la fig.45 sont obtenus en grande culture (*propriété de la famille W et J. Taffarel*); Partant de techniques de défrichement moins destructives pour la forêt, après 2 ans de travail du sol aux engins à disques pour produire du riz pluvial dont le rendement moyen est voisin de 5.000 kg/ha, le semis direct est implanté pour les 3 ans qui suivent avec la rotation = 2 ans de soja + maïs associé au *Brachiaria ruz.* et riz pluvial + *Brachiaria ruz.* en 3^e année.

Aucun amendement calco-magnésien n'a été apporté au cours des 5 ans, bien que le profil cultural, dès l'horizon 5-20 cm, présente une très forte acidité et un taux de saturation du complexe inférieur à 20%. Malgré ces conditions considérées comme limitantes pour les cultures de soja et de maïs, le soja, en semis direct, produit 2.640 kg/ha dès la 1^{ère} année, et de 3.000 à 3.320 kg/ha en 2^e année en fonction des variétés ; le maïs en succession du soja produit plus de 3.000 kg/ha et le riz pluvial en semis direct la dernière année, atteint un rendement de 4.500 kg/ha (Fig. 45).

Ces résultats montrent que le système de SD sur couverture permanente utilisé neutralise efficacement les effets nocifs de l'acidité, si bien connus en sols travaillés, et permet de se dispenser des amendements calco-magnésiens (*entre 4 et 7 tonnes d'amendements sont en général utilisés sur les 4 années qui suivent le défrichement avec la même séquence de cultures, en sol travaillé*).

Les conséquences technico-économiques de l'utilisation des systèmes de culture en SD ou en sol travaillé sont à la mesure de leurs performances agronomiques.

. La région de fronts pionniers du Centre-Nord Mato Grosso a connu depuis le tout début de son ouverture, au début des années 1980, une situation économique très chaotique, qui a subi de plein fouet les restructurations économiques du pays. Loin des grands centres de transformation, des ports d'exportation (*plus de 1.500 km*), la région ne dispose que d'une seule route, le plus souvent en état précaire, qui grève les coûts de transport. Cet isolement se traduit par une pénalisation économique qui va de 25 à 40% de surcoûts de production par rapport à ceux des grands états producteurs du Sud du pays (*Séguy L. et al., 1996*).

. Dans cette conjoncture, les coûts de production du soja, culture industrielle la plus stable, peuvent varier de 280 à plus de 430 U.S.\$/ha en fonction du niveau de technologie ; la dernière restructuration du président Fernando Henrique Cardoso en 1995 a presque doublé la production d'équilibre pour payer les coûts (*passage de 30 à 40 sacs de 60 kg à 60-70 sacs/ha*) (cf. Fig. 48).

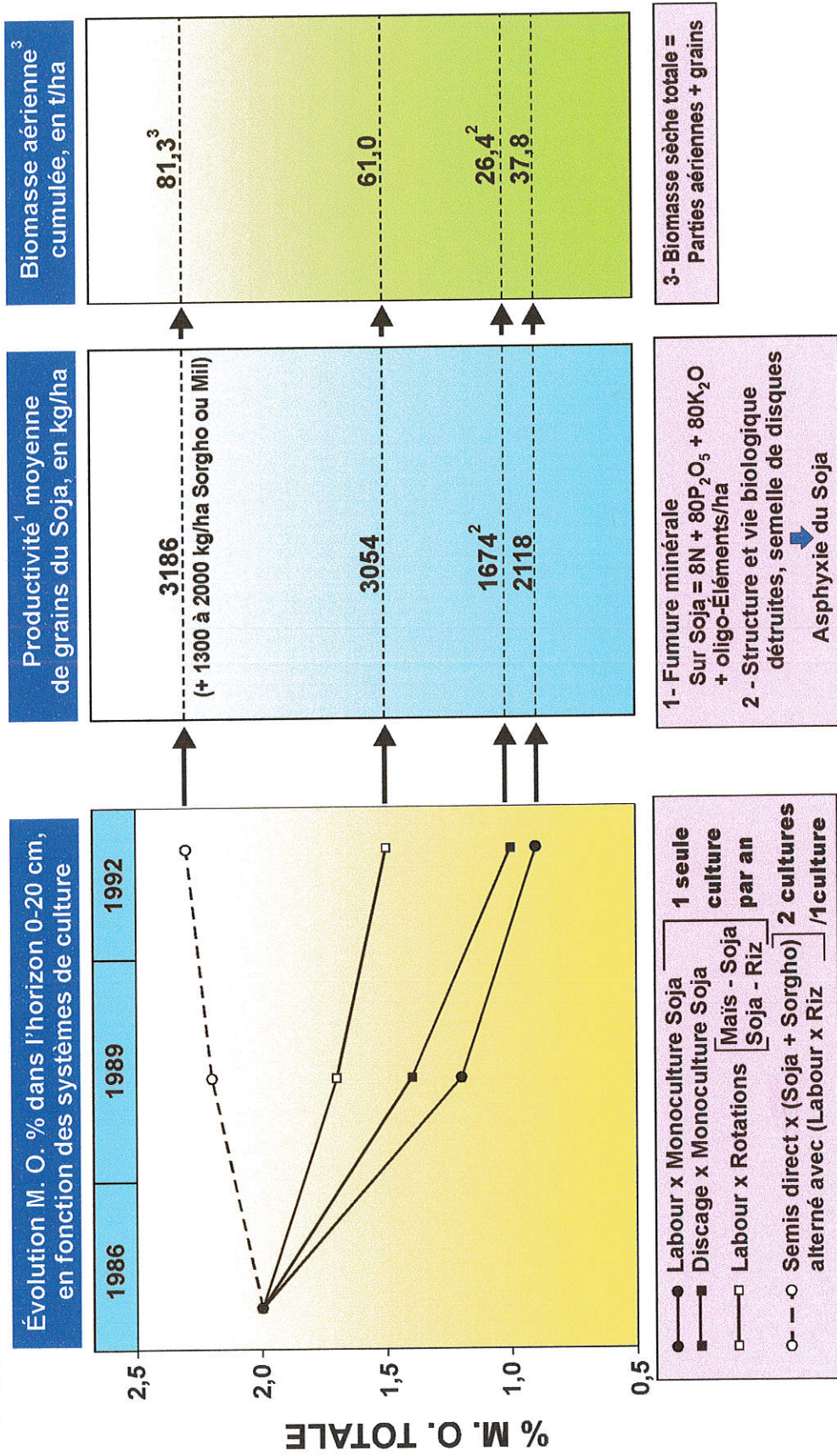
. Sur le riz pluvial, les coûts ont varié plus que du simple au double sur la période 1987/2000. Les 3 dernières années sont particulièrement désastreuses pour la culture, lorsque les prix payés au producteur sont passés de 11,5 U.S.\$/sac 60 kg en 1998 à 7,43 U.S.\$/sac en 2000, malgré la production d'un riz d'excellente qualité, égale à celle des meilleures variétés irriguées du Sud (*Fig. 47*). En 2000, il faut produire plus de 60 sacs/ha pour payer les coûts avec utilisation d'une basse technologie et près de 90 sacs/ha (*5.400 kg/ha*) avec haute technologie, soit des conditions proches des possibilités agronomiques actuelles des systèmes construits par la recherche (*Fig. 46*).

Ce sont ces contraintes économiques qui expliquent l'adoption exponentielle du Semis Direct à partir de 1995 dans la région où l'activité agricole sans subventions a dû, pour se maintenir, produire plus et le moins cher possible. Actuellement, 80% des surfaces sont en Semis Direct, mais pratiquent, pour la majorité un système dominant : soja + culture de succession maïs ou mil ou sorgho et plus récemment, à partir de 1998, la culture de coton.

. Dans un tel contexte de très faible diversification, les systèmes de culture récents créés par la recherche CIRAD-AGRONORTE, qui rendent possible l'intégration de toutes les cultures en SD avec l'élevage, sont ceux qui offrent les coûts de production les plus bas et les marges brutes les plus élevées et ceux qui doivent être le plus rapidement diffusés. Au-delà des bénéfices attractifs et de la stabilité qu'ils procurent, ils permettent de s'affranchir davantage de la politique agricole régionale très chaotique. Les performances économiques de ces systèmes de culture qui conduisent à construire des assolements plus stables et de moindre risque économique, sont exposés dans la figure 52 (*crible des fazendas de références*). En fonction du niveau de risque choisi par l'agriculteur, les coûts de production peuvent varier de 300 à 600 U.S.\$/ha avec des systèmes en SD à base de riz, soja, maïs + cultures de succession suivies d'embouche en saison sèche ou pratiquées sur couvertures vivantes (*Fig. 49 et 52*) et jusqu'à 1.300 U.S.\$/ha avec la culture cotonnière de haute technologie (*SD + fort niveau d'intrants*).

Les marges nettes par ha vont, malgré la pénalisation économique, en fonction des choix retenus et des conditions économiques annuelles de 100 à plus de 600 U.S.\$/ha (*Fig. 52*).

FIG. 30 TENDANCES D'ÉVOLUTION DU TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE SUR 6 ANS, EN FONCTION DE LA NATURE DES SYSTÈMES DE CULTURE ET CONSÉQUENCES SUR LA PRODUCTIVITÉ MOYENNE DU SOJA ET LA PRODUCTION CUMULÉE DE BIOMASSE AÉRIENNE -
 Écologie des cerrados humides du Centre Nord Mato Grosso, MT - 1986/92

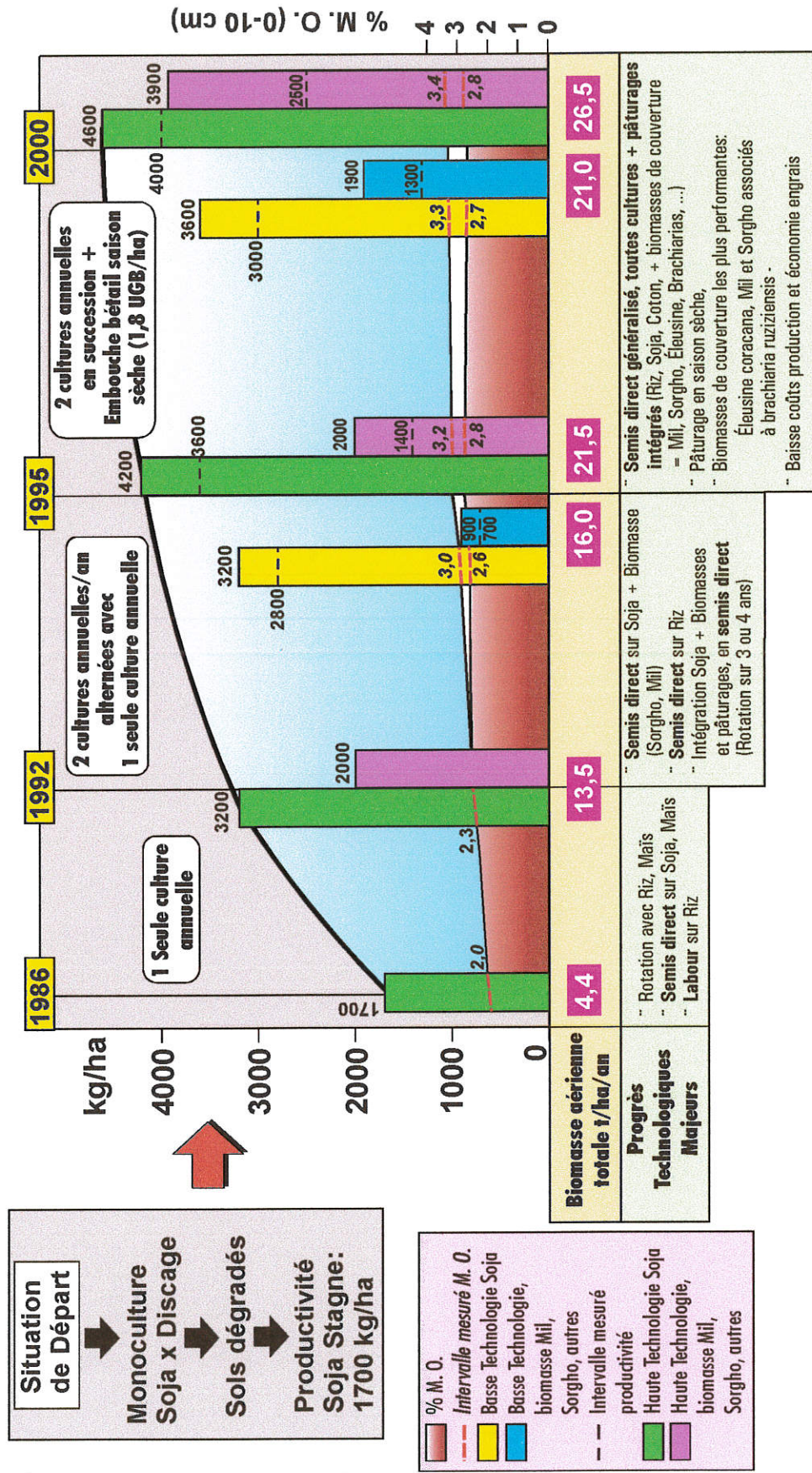


(*) Expérimentations conduites en conditions d'exploitation réelles - (Matrice systèmes = 180 ha; parcelle élémentaire = 4 ha)

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA/GEC; M. Matsubara, Fazenda Progresso; Lucas do Rio Verde/MT, 1986/92

FIG. 31 TENDANCES D'ÉVOLUTION DES PERFORMANCES DE LA CULTURE DE SOJA DANS LES SYSTÈMES DE CULTURE DURABLES, CRÉÉS PAR LA RECHERCHE ET CONSÉQUENCES SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE AÉRIENNE ET LE TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL -

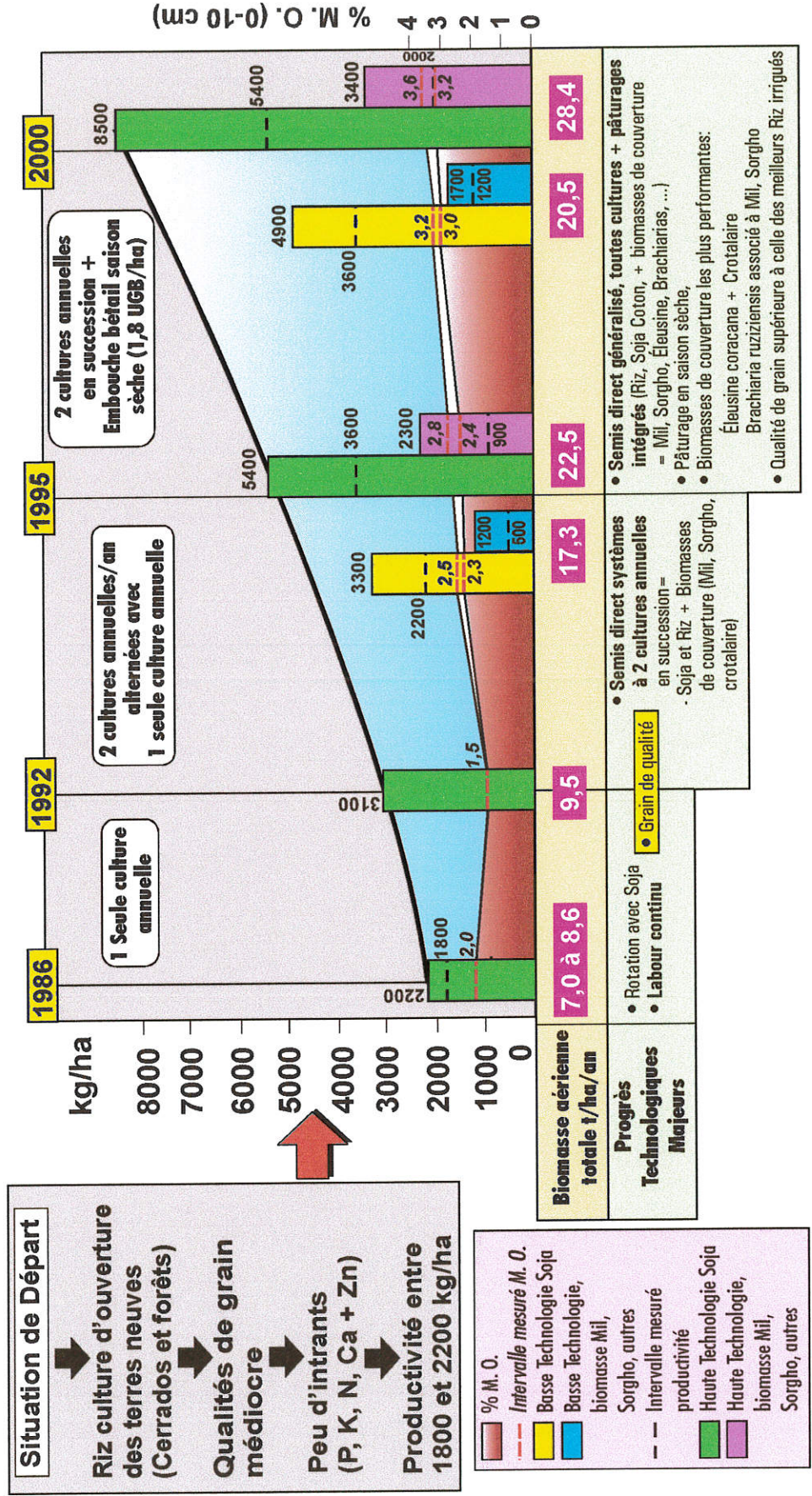
Sols ferrallitiques oxydés et hydratés sur roche acide des fronts pionniers du Centre Nord du Mato Grosso -
- Écologies des cerrados et forêts humides -



SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA; M. Matsubara, Faz. Progresso; A. Trentini, Cooperlucas; A. C. Maronezzi, Agronorte - MT, 1986/2000

FIG. 32 TENDANCES D'ÉVOLUTION DES PERFORMANCES DE LA CULTURE DE RIZ PLUVIAL DANS LES SYSTÈMES DE CULTURE DURABLES CRÉÉS PAR LA RECHERCHE ET CONSÉQUENCES SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE AÉRIENNE ET LE TAUX DE MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL -

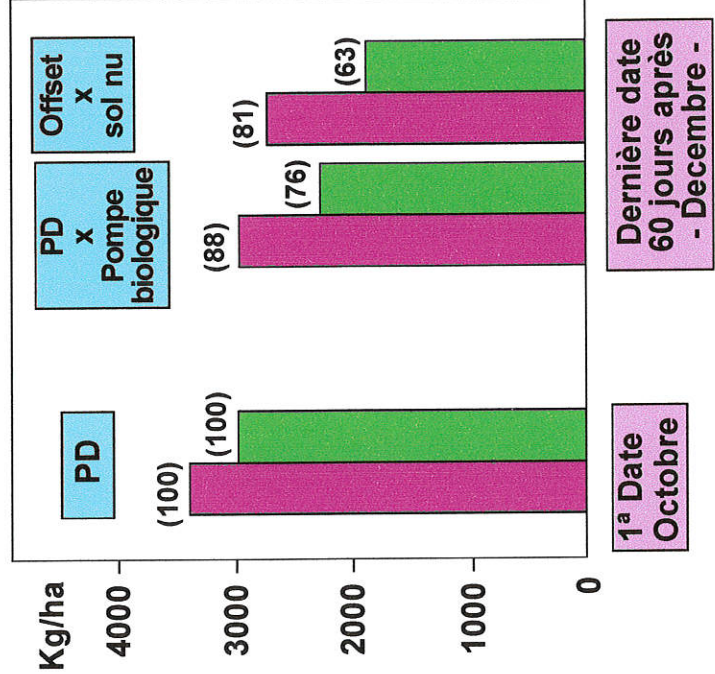
Sols ferrallitiques oxydés et hydratés sur roche acide des fronts pionniers du Centre Nord du Mato Grosso -
 - Écologies des cerrados et forêts humides -



SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac, CIRAD-CA; M. Matsubara, Faz. Progresso; A. Trentini, Cooperlucas; A. C. Maronezzi, Agronorte - MT, 1986/2000

FIG. 33 PRODUCTIVITÉ DU SOJA, EN FONCTION:

- De la date de semis
- De niveau de correction du sol
- Du mode de travail du sol

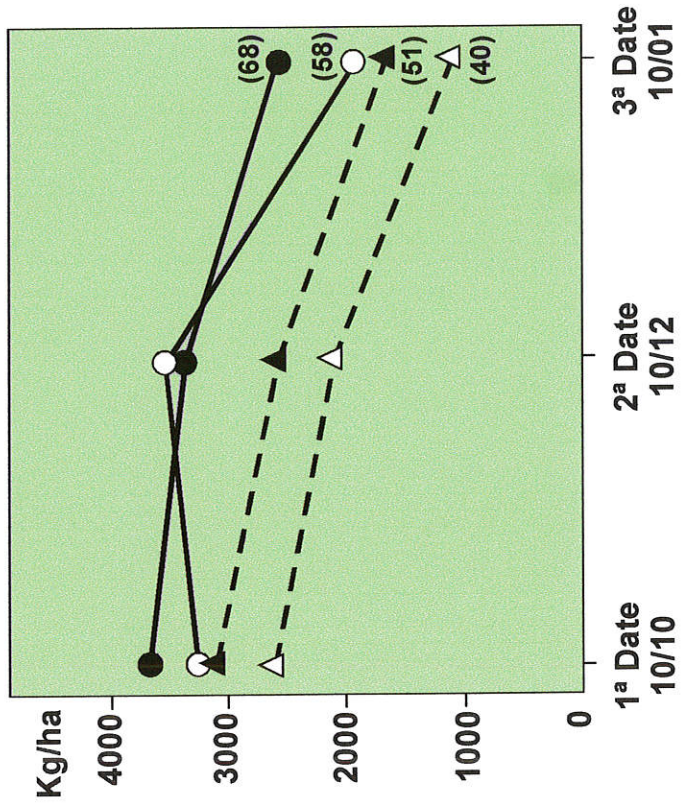


- Niveau fort de correction
 - Niveau progressif de correction
 - () Productivités relatives
 - Écologies des forêts et cerrados humides
- (*) Moyenne de 4 essais conduits en conditions d'exploitation réelles → 70 ha Sinop e Lucas do Rio Verde, MT, 1994

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac e A. Trentini., 1994

PRODUCTIVITÉ DU SOJA, EN FONCTION:

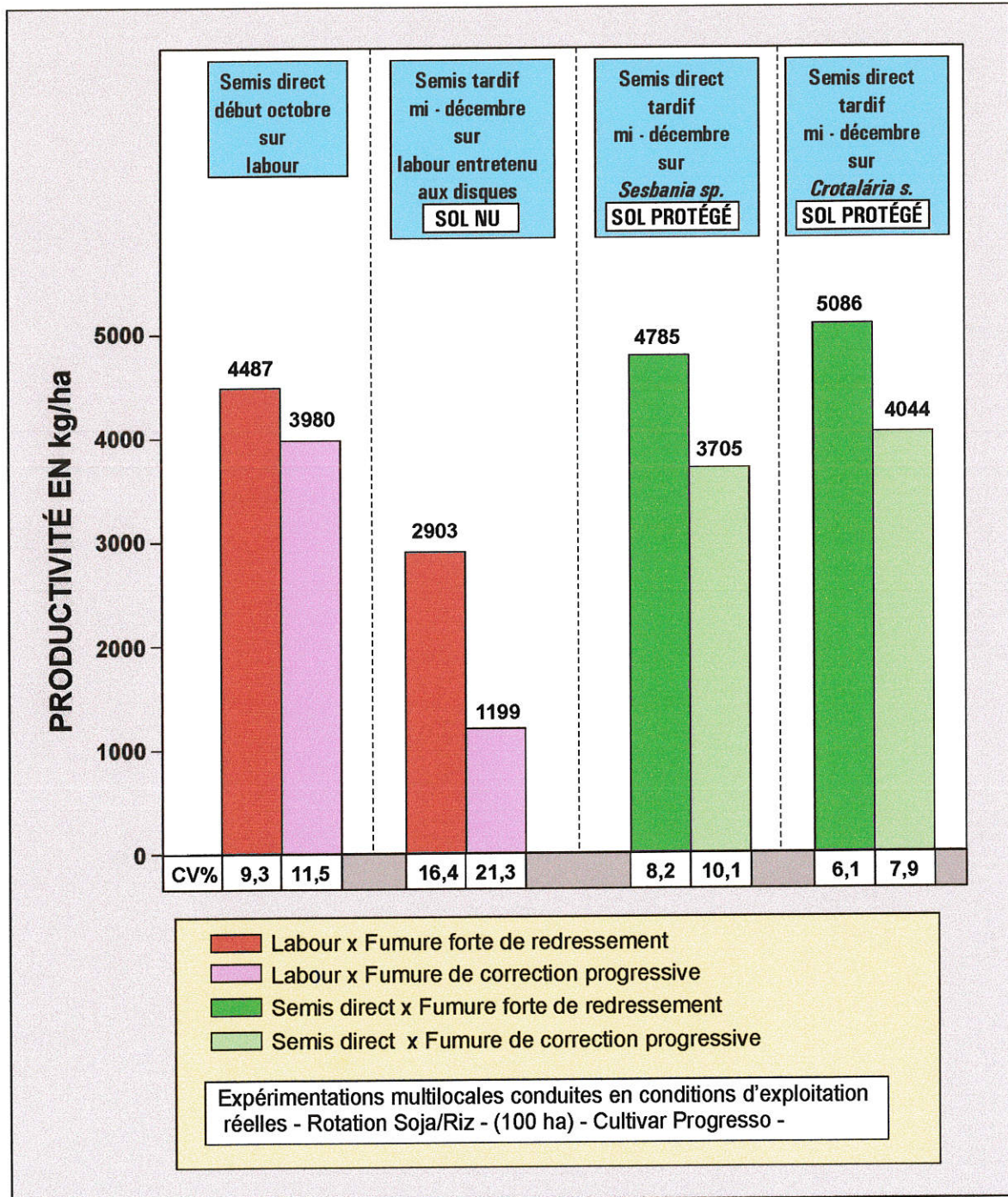
- De la date de semis
- De niveau de correction du sol
- Du mode de travail du sol



- Niveau de correction fort
 - Niveau progressif de correction
 - ▲ Niveau de correction fort
 - △ Niveau progressif de correction
 - () Productivités relatives
 - Écologies des forêts tropicales humides
- (*) Essais de 20 ha, conduits en conditions d'exploitation réelles. Sinop - MT, 1994

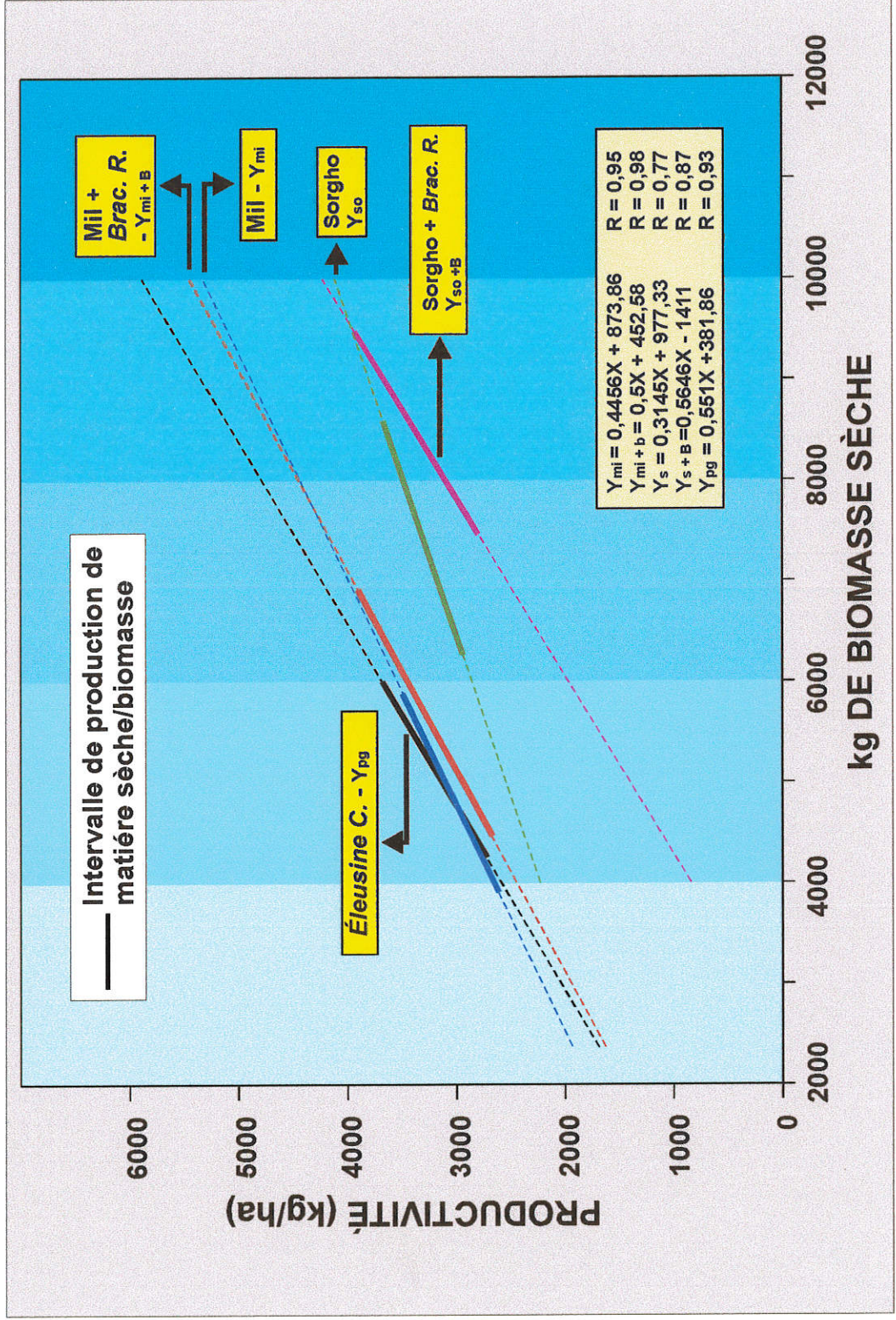
SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac e A. Trentini., 1994

**FIG. 34 LE SEMIS DIRECT SUR BIOMASSE RECYCLEUSE:
UN SYSTÈME MAINTENEUR DE FERTILITÉ SUR CULTURE DE RIZ PLUVIAL**
Écologies des savanes et forêts humides du Centre Nord Mato Grosso -
Lucas do Rio Verde, Sorriso et Sinop - MT/1994



SOURCE: L. Ségué, S. Bouzinac, CIRAD-CA;
A. Trentini, Cooperlucas, Coasul et Comicel - 1994

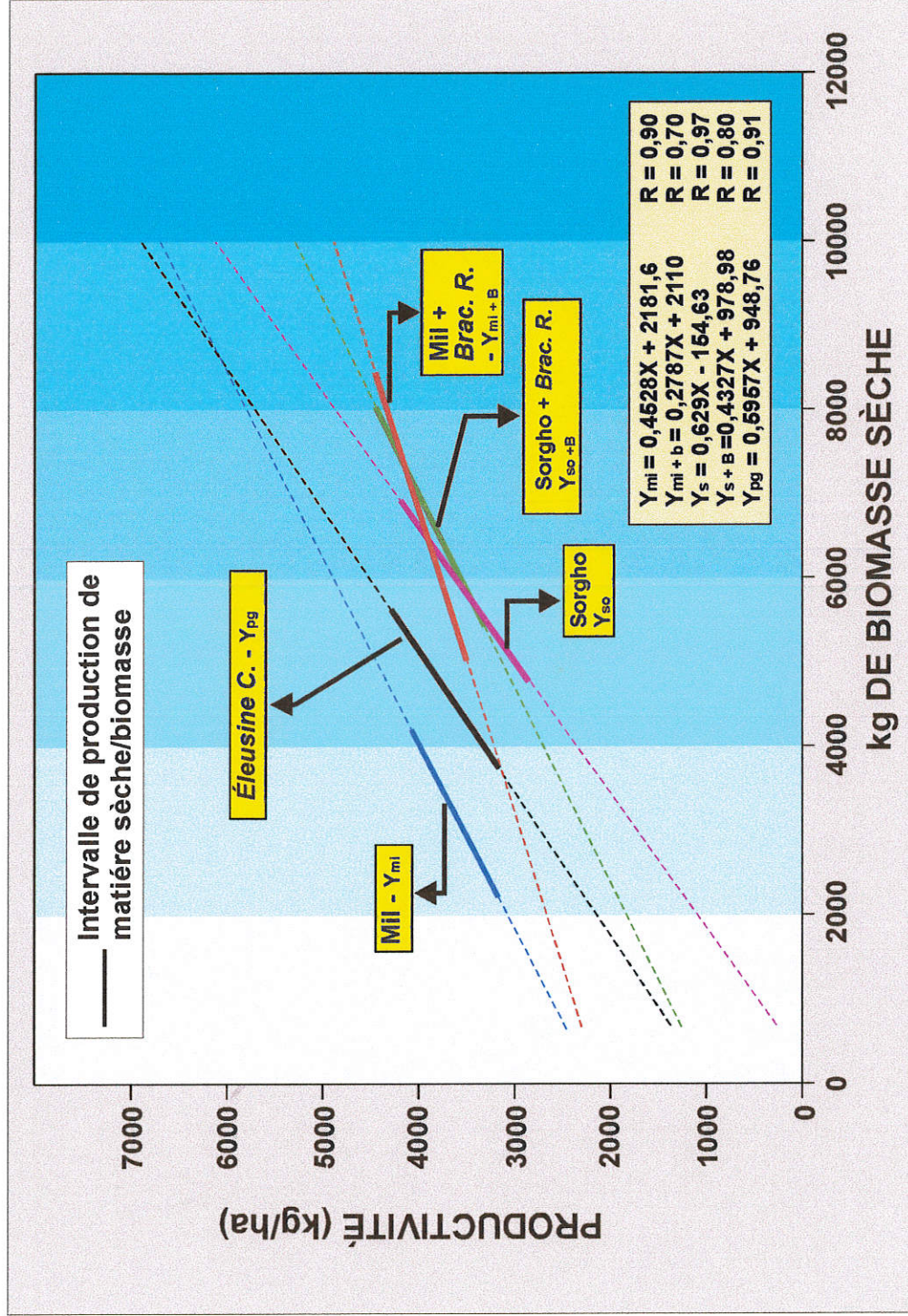
FIG. 35 EGRESSIONS¹ ENTRE LA QUANTITÉ ET LA NATURE DE LA BIOMASSE SÈCHE ET LA PRODUCTIVITÉ DU SOJA DE CYCLE INTERMÉDIAIRE (CV. Conquista) SUR 3 ANS DE SEMIS DIRECT - (1997/2000) - AGRONORTE - SINOP/MT, 2000



(1) 6 Répétitions/niveau de fumure/an

SOURCE: Séguy L., Bouzinac S., CIRAD-CA; Maronezzi A., Lucas G. L., Bianchi M., AGRONORTE - Sinop/2000

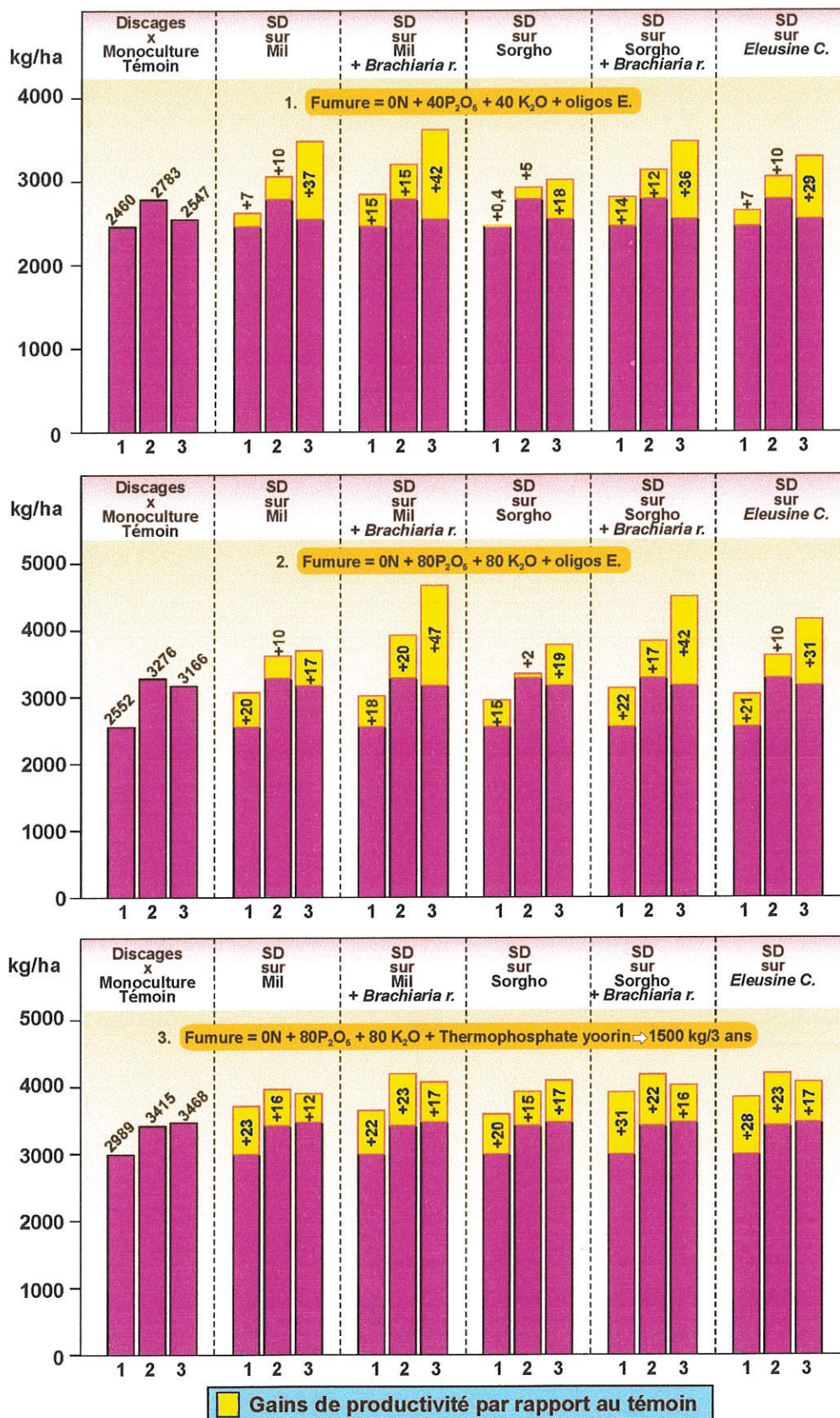
FIG. 36 REGRESSIONS¹ ENTRE LA QUANTITÉ ET LA NATURE DE LA BIOMASSE SÈCHE ET LA PRODUCTIVITÉ DU SOJA DE CYCLE MOYEN (FT 114) SUR 3 ANS DE SEMIS DIRECT - (1997/2000) - AGRONORTE - SINOP/MT, 2000



(1) 6 Répétitions/niveau de fumure/an

SOURCE: Séguy L., Bouzinac S., CIRAD-CA; Maronezzi A., Lucas G. L., Bianchi M., AGRONORTE - SINOP/2000

FIG. 37 ÉVOLUTION DE LA PRODUCTIVITÉ MOYENNE DU SOJA DE CYCLE MOYEN (FT 114) SUR 3 ANS (1997/2000), EN FONCTION DE LA NATURE ET DE LA QUANTITÉ DE BIOMASSE QUI PRÉCÈDE LE SEMIS DIRECT (SD) DU SOJA - AGRONORTE - SINOP/MT, 1999/2000



(*) Expérimentations conduites en conditions d'exploitation réelles, mécanisées
 SOURCE: Séguy L., Bouzinac S., CIRAD-CA; Maronezzi A., Lucas G. L., Bianchi M., AGRONORTE - Sinop/2000