

Une méthodologie de détection et de hiérarchie des facteurs limitant la production à l'échelle régionale.

Application à la culture bananière.

X. PERRIER et B. DELVAUX*

A METHODOLOGY FOR THE DETECTION AND RANKING OF LIMITING FACTORS IN PRODUCTION AT REGIONAL SCALE.
Application to banana cultivation.

X. PERRIER and B. DELVAUX.

Fruits, May-Jun. 1991, vol. 46, n° 3, p. 213-226.

ABSTRACT - In some situations, the responses to the problems submitted to agronomic research cannot be easily or rapidly obtained by conventional methods : experimental designs and associated tests. A survey-diagnosis method is proposed in which data gathered *in situ* compared. The different phases - drawing up the procedure, performance and analysis of results - are described with stress laid on the conditions of maximum effectiveness of the statistical methods used. Analysis of the parameters of the physical, biological and human environments and their interactions in a necessarily multi-field approach enables detailed description of production conditions and the detection of factors which account for the yield variability observed. The advantages and limits are discussed with special attention paid to the conditions of extrapolation.

UNE METHODOLOGIE DE DETECTION ET DE HIERARCHIE DES FACTEURS LIMITANT LA PRODUCTION A L'ECHELLE REGIONALE.

Application à la culture bananière.

X. PERRIER et B. DELVAUX.

Fruits, May-Jun. 1991, vol. 46, n° 3, p.213-226.

RESUME - Dans certaines situations, les réponses aux problèmes posés à la recherche agronomique ne peuvent être, facilement ou rapidement, obtenues par les méthodes classiques : dispositifs expérimentaux et tests associés. Il est proposé une méthode d'enquête-diagnostic qui procède par comparaison d'informations recueillies *in situ*. Les différentes phases : établissement du protocole, réalisation, analyse des résultats, sont présentées en insistant sur les conditions d'efficacité maximum des outils statistiques. L'analyse des paramètres de l'environnement physique, biologique, humain, et de leurs interactions permet, dans une approche nécessairement pluridisciplinaire, une description détaillée des conditions de production et la détection des facteurs expliquant la variabilité de production observée. Intérêt et limites, en particulier les conditions d'extrapolation, sont discutés.

INTRODUCTION

Les questions posées par les producteurs ou les agronomes des structures de développement à la recherche sont de nature très variée. Elles trouvent des réponses rapides quand le chercheur peut, par analogie, utiliser des résultats acquis dans d'autres conditions. Ou à terme, s'il peut formuler la demande sous forme accessible par les méthodologies qu'il utilise habituellement.

Cependant certains problèmes échappent à ce schéma, soit parce que l'on ne possède aucun référentiel pour le domaine concerné - c'est souvent le cas en agronomie tropicale où les zones d'intervention sont extrêmement varia-

bles et souvent qu'imparfaitement connues. Soit parce que le problème se situe à l'intersection de plusieurs domaines de l'agronomie, sans que l'on sache a priori ordonner le rôle de chacun et appréhender l'importance des interrelations.

Dans les deux cas, le chercheur doit expliquer certains phénomènes (traductions de la question posée) et diagnostiquer leurs causes à partir d'un vaste ensemble de facteurs de nature très diverse, tout autant que par leurs interactions.

L'approche expérimentale classique, basée sur la comparaison de traitements au sein de dispositifs planifiés, n'est dans cette situation que d'un faible secours : (1) elle ne peut prendre en compte simultanément qu'un petit nombre de facteurs, les autres étant supposés constants, (2) il faut alors multiplier les expérimentations d'où des coûts et des temps de réponse démesurés, sans pour autant être sûr d'avoir couvert l'ensemble des situations possibles,

* - PERRIER - Laboratoire de Biométrie IRFA-CIRAD - B.P. 5035 - 34032 MONTPELLIER CEDEX
DELVAUX - Unité des Sciences du Sol - Faculté des Sciences agronomiques - Place Croix du Sud, 2 - 1348 LOUVAIN-LA-NEUVE (Belgique)

(3) elle souffre surtout du manque d'hypothèses de départ qui permettraient de bâtir un schéma d'expérimentation logique et progressif.

Devant cette situation, une approche possible est celle que nous avons appelée «enquête-diagnostic». La base de raisonnement est, comme dans l'expérimentation classique, de comparer des situations différentes, mais en analysant la variabilité existant naturellement dans la zone étudiée, plutôt que de la recréer partiellement et imparfaitement. C'est par enquête, en multipliant les points observés que l'on estime cette variabilité.

L'analyse comparée, à l'aide d'outils statistiques appropriés, de la variabilité des phénomènes étudiés et des facteurs pouvant avoir une action, permet de proposer un diagnostic.

ENQUETE ↔ collecte de l'information existante.
 DIAGNOSTIC ↔ comparaison des situations pour déterminer les facteurs explicatifs.

Une telle démarche n'est pas nouvelle, elle a été utilisée sur culture betteravière en Algérie (CONESA *et al.*, 1975, 1976) ou en Alsace (METTAUER *et al.*, 1978 ; CONESA *et al.*, 1979), sur des problèmes de dépérissement du Lavandin (GRAS et CHIAVERNI, 1980).

Nous avons essayé en formalisant les différentes étapes et en complétant la panoplie des méthodes statistiques d'en faire un outil opérationnel pour la recherche agronomique en culture bananière.

Les différentes enquêtes réalisées :

- . Cameroun 1982 (DELVAUX *et al.*, 1984, 1986 (a) ; 1986 (b))
- . Martinique 1984 (DELVAUX *et al.*, 1990)
- . Guadeloupe 1987 (DOREL et PERRIER, 1990)
- . Rwanda 1989 (LASSOUDIÈRE, 1989 ; GODE-FROY *et al.*, 1991)

ont permis de préciser la méthodologie, le domaine d'application et les limites de cette approche.

Les principales phases d'une enquête (figure 1) seront présentées successivement :

- définition des objectifs et de la zone d'étude,
- rédaction d'un protocole d'enquête,
 - . stratégie d'échantillonnage,
 - . choix des variables observées,
- analyse des résultats,
- interprétation.

LA DEFINITION DES OBJECTIFS

Cette phase préliminaire est de la plus grande importance, elle concerne la définition claire du domaine et des buts, replacés dans leur contexte. On peut résumer à titre d'exemple les problématiques des différentes enquêtes réalisées.

- Cameroun - La production nationale qui est le fait de quelques grandes plantations dans des zones géographiques limitées était en baisse régulière. Les autorités souhaitaient restructurer ces plantations en favorisant les zones les plus favorables où les progrès techniques seraient les plus faciles à obtenir.

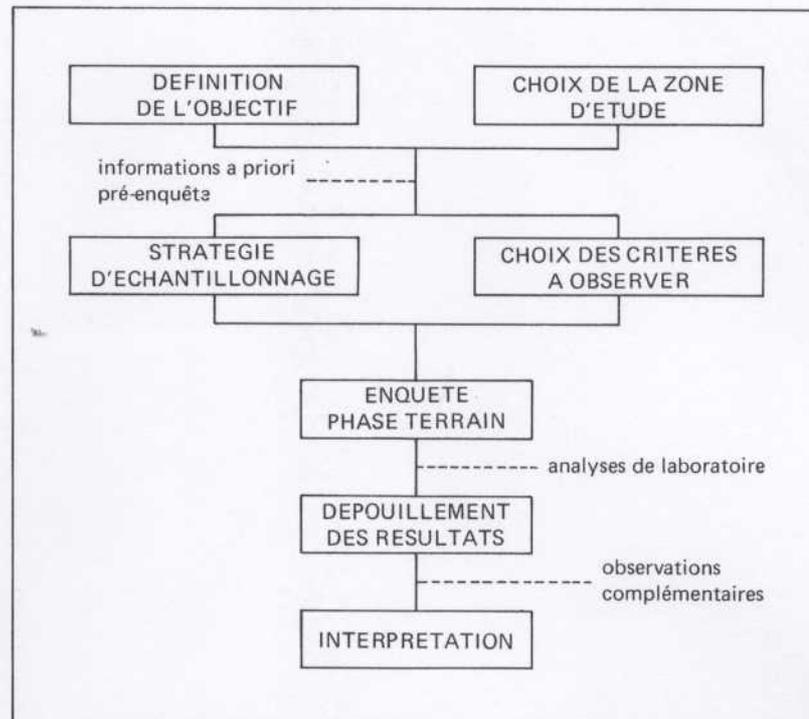


FIGURE 1 - Les différentes étapes d'une enquête-diagnostic.

● **Rwanda** - Ce pays, extrêmement peuplé, ne peut espérer un accroissement des productions agricoles que par une intensification des techniques. La banane à cuire fait partie de l'alimentation de base ; sa forte production à l'unité de surface, par rapport à d'autres vivriers, en fait la culture la plus apte à assurer un niveau de nutrition correct de la population. L'objet était de décrire le niveau de fertilité des différentes régions de production et de définir, pour chacune, les modalités possibles d'une augmentation des productions.

● **Martinique** - Les grandes exploitations intensives à technicité élevée voyaient leur production diminuer, avec toutefois des différences marquées en fonction des milieux écologiques, alors qu'aucune dégradation des techniques culturales n'était constatée. Chaque spécialiste d'une discipline émettait une hypothèse sans que l'on sache hiérarchiser leur importance. L'objectif était la mise en évidence des principaux facteurs limitants.

● **Guadeloupe** - Des rendements très variables d'une exploitation à l'autre et d'un niveau global insatisfaisant étaient observés. Les objectifs étaient d'identifier les facteurs contribuant à cette variabilité et de définir les zones pédo-climatiques en y précisant la hiérarchie des facteurs de production.

Le thème commun est donc la détection des facteurs d'environnement ou culturaux pouvant agir sur la production, cette réponse devant être identifiée par type d'unité de production.

Cette définition exige aussi une délimitation claire de la zone d'étude. Ce peut être l'ensemble d'un secteur géographique ou un sous-ensemble homogène de ce secteur caractérisé par certains paramètres techniques ou du milieu. L'enquête Martinique, par exemple, ne concernait que les exploitations agricoles intensives ; la prise en compte des petites exploitations, présentant des problèmes de nature tout à fait différente (technique en général), aurait introduit une variabilité sans rapport avec les objectifs de l'enquête et qui, par son poids statistique, aurait masqué les phénomènes recherchés.

A l'inverse, l'enquête réalisée en Guadeloupe, s'adressait principalement aux petites exploitations de la Basse Terre, zone de production bananière.

Définitions des objectifs et de la zone d'étude sont donc totalement liées; en découlent directement stratégie d'échantillonnage et choix des paramètres à observer, paramètres mesurant les phénomènes étudiés et paramètres décrivant les facteurs que l'on peut penser agir sur les objets de l'étude.

STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE

Les objectifs étant fixés et la zone d'étude précisée, il s'agit de choisir les sites qui seront échantillonnés.

Ces points d'enquête, pour être représentatifs, doivent traduire la variabilité existant dans le domaine d'étude, il convient donc d'en avoir une connaissance préalable.

Divers documents peuvent être disponibles : cartes

géographiques, pédologiques, climatiques, enquêtes agricoles... De plus, une prospection préalable de la zone par le concepteur de l'enquête permettra d'identifier certaines particularités concernant les systèmes de production, les techniques culturales.

Il faudra tenir compte également de contraintes pratiques : disposer de parcelles de même âge où un nombre suffisant de plants seront au même stade au moment de l'enquête, obtenir l'accord de l'exploitant pour intervenir dans sa parcelle ...

Un échantillonnage systématique de la zone où, par exemple, chaque type de sol serait représenté proportionnellement à sa superficie, ne doit pas être recherché obligatoirement. L'information pourrait alors être très pauvre pour certains types et, à la limite excessive pour d'autres. Cette couverture systématique n'aurait d'intérêt que si on se limitait au volet enquête ; l'idée de diagnostic implique une logique de comparaison et doit traiter d'objets décrits avec une précision comparable.

Il est souvent souhaitable d'adopter un plan d'échantillonnage stratifié présentant autant de niveaux que de facteurs à contrôler (GRAS, 1980), cependant il ne peut s'agir d'un échantillonnage stratifié rigoureux : certaines combinaisons n'existent pas (chaque type de sol à chaque altitude par exemple) ou sont beaucoup trop rares, le taux de sondage (nombre d'unités enquêtées sur nombre total d'unités) ne peut être constant, cela conduirait à représenter également des combinaisons d'intérêt très variable.

La solution passe par un compromis à raisonner dans chaque cas, à partir des informations disponibles et des conclusions de l'étude préalable.

On se souviendra, à l'interprétation, que la population, dont cet échantillon est représentatif, constitue le champ d'application des résultats.

CHOIX DES VARIABLES

Principes généraux.

Les différentes variables, observées sur chaque site échantillonné, n'ont pas un rôle identique. On peut distinguer :

• **les variables à expliquer** : ce sont les variables caractérisant le ou les phénomènes dont on étudie les variations. Souvent ces variables décrivent un niveau de production ou plus efficacement, les principales composantes de cette production (nombre de fruits, poids d'un fruit ...) mais une enquête peut avoir d'autres objets : qualité d'une récolte, niveau sanitaire ...

En cours d'étude, d'autres facteurs peuvent être considérés temporairement comme facteurs à expliquer.

Ces facteurs doivent présenter une amplitude de variation suffisante pour que l'on puisse espérer détecter les causes de cette variation. L'enquête Martinique qui concernait des exploitations très intensives, avec des productions plus ou moindres mais toujours à un niveau élevé, a été la plus difficile à analyser.

. **les variables explicatives** : ce sont les paramètres dont les variations expliquent (au sens statistique) les niveaux des variables à expliquer. Ces paramètres doivent (1) bien sûr être variables sur le domaine étudié, (2) couvrir l'ensemble des sources de variations possibles (on ne sait pas a priori quelles seront les variables pertinentes), (3) rester cohérents avec les objectifs de l'enquête, (4) être techniquement observables dans le cadre d'une enquête.

Il est nécessaire de distinguer deux types de variables explicatives qui jouent un rôle différent dans l'élaboration des résultats :

1) **les variables explicatives au sens strict**, ou variables externes, sont tous les facteurs extérieurs au peuplement végétal et pouvant agir sur son développement, ce sont des caractères d'environnement pédologique, climatique, parasitaire ... ainsi que toutes les interventions culturales sur le cycle de végétation observé et sur les cycles antérieurs ou le précédent cultural.

Ultérieurement, ce seront les facteurs qu'il faudra connaître pour appliquer les résultats de l'enquête à une zone donnée (comprise dans l'aire d'application de l'étude).

2) **les variables intermédiaires**, ou internes, caractérisent la population végétale à l'instant de l'enquête, elles permettent de comprendre l'action des variables explicatives sur les paramètres étudiés, elles peuvent être temporairement des variables à expliquer. Par exemple, le rôle de la composition chimique du sol sur le développement de la plante peut être analysé et interprété avec l'aide des informations intermédiaires apportées par les analyses foliaires et les observations de l'état fonctionnel du système racinaire.

On s'efforcera dans la présentation des facteurs agissant sur le phénomène à expliquer, et de leur hiérarchie, de n'utiliser que des variables explicatives au sens strict, seules à pouvoir être appréhender dans d'autres situations.

Cependant les variables intermédiaires permettent souvent des résultats additionnels d'intérêt certain.

L'origine de l'information permettant l'attribution d'une valeur à une variable conduit à distinguer les **variables observées** et les **variables informées**. Les variables observées font l'objet d'une mesure concrète (qu'elle soit qualitative ou quantitative) prise au cours de l'enquête sur les individus réels alors que les variables informées sont fournies par une tierce personne sensée bien connaître le point d'enquête.

Certaines données concernant en particulier les techniques culturales ne peuvent être qu'informées : année de mise en culture, amendements à la plantation, traitements sanitaires. D'autres peuvent être appréhendés par les deux voies (questions sur le travail du sol avant plantation ou examen direct de profils culturaux - DELVAUX et GUYOT, 1989).

L'avantage certain des variables informées est d'intégrer parfois une dimension temporelle : le choix d'un qualificatif pour le niveau de production d'une parcelle intègre les résultats de plusieurs années. Cet aspect est évidemment intéressant pour le degré de généralité des résultats de l'enquête. Cependant leur inconvénient majeur est d'être souvent très subjectives et d'être estimées sans référence avec

les autres points enquêtés.

Nous privilégions donc, quand cela est possible, les variables observées même si parfois il peut s'agir d'observations exceptionnelles ou accidentelles ne reflétant pas la valeur réelle du point d'enquête.

Le dernier aspect important à prendre en compte, particulièrement au cours de l'analyse, est celui de la **simultanéité des variables**. Il importe en effet que les facteurs que l'on suppose explicatifs aient effectivement pu agir. La pluviométrie moyenne des 10 dernières années ne peut être mise en relation avec le poids de récolte observée sur une parcelle à une date donnée. En pratique, les exemples ne sont pas toujours aussi simples et une attention particulière est nécessaire.

Dans le même ordre d'idée, il importe que la phase terrain de l'enquête soit la plus courte possible afin que les facteurs que l'on n'observe pas - et qui implicitement sont donc supposés constants - le restent réellement.

L'analyse statistique et l'interprétation souhaitent l'**indépendance** des variables, cependant elle n'est en pratique que rarement vérifiée. De plus une certaine **redondance** peut être recherchée pour permettre une validation réciproque entre variables.

Les variables sont **quantitatives** ou **qualitatives** : pour les variables qualitatives les différentes modalités doivent être clairement définies afin que chaque échantillon réponde à une modalité et une seule. On préférera augmenter le nombre de classes pour éviter les ambiguïtés au cours de l'enquête, des regroupements pouvant être réalisés, si nécessaire, pour l'analyse.

L'**unité statistique** est la parcelle ; toute observation doit donc être représentative de cette parcelle. Certaines variables (altitude, climat, techniques culturales ...) n'ont qu'une occurrence par site, d'autres doivent faire l'objet d'un échantillonnage au sein de la parcelle (analyse de sol sur le mélange de plusieurs carottes), d'autres enfin sont observées sur des sous-unités à l'intérieur de la parcelle (nombre de fruits par plant). On s'efforcera dans ce cas d'observer un nombre suffisant de ces sous-unités pour obtenir une moyenne représentative. La variabilité (exprimée par l'écart-type) pourra être retenue, en complément de la moyenne, pour caractériser le site.

Les variables des enquêtes-diagnostic en culture bananière.

La figure 2 résume les différentes observations réalisées au cours des enquêtes-diagnostic sur bananier.

- le **facteur à expliquer** est une production, ce devrait être un poids de récolte ; on n'en a, en fait, qu'une composante qui est le nombre de fruits du régime mesuré au stade floraison. En pratique, il est impossible d'exiger du producteur qu'il ne récolte pas sa parcelle afin que l'on puisse trouver, au jour de l'enquête, un nombre suffisant de régimes au stade de maturité désiré. L'observation sur le régime ne porte donc que sur le nombre de fruits ; ce comptage est beaucoup plus facile, sans couper le régime, au stade floraison. De plus, les normes d'interprétation des analyses foliai-

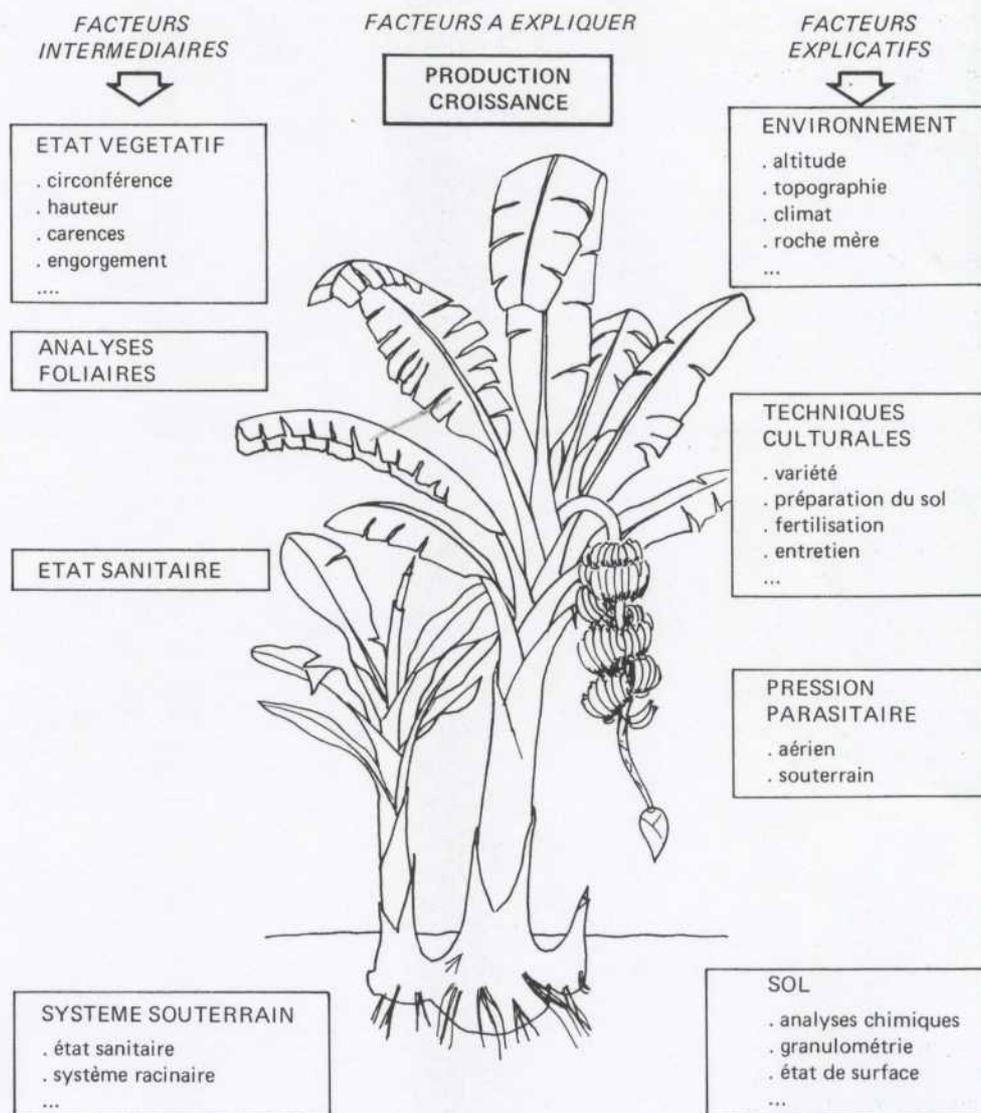


FIGURE 2 - Les types d'observations réalisées au cours d'une enquête-diagnostic en culture bananière.

res ont été établies au stade floraison (MARTIN-PREVEL, 1984).

Pour obtenir une moyenne représentative, la mesure est faite sur au moins 20 bananiers au stade floraison et de développement comparable.

Le nombre de fruits est en général un bon estimateur de la production, il ne prend cependant pas en compte les variations possibles de remplissage du fruit au cours de son développement, qui peuvent sous certaines conditions biaiser sensiblement l'estimation. On le complète donc par l'observation de la circonférence des pseudotruncs qui a été montrée dans plusieurs études comme représentative du potentiel de la plante (LOSSOIS, 1963). Il a parfois également été utilisé, en complément, un indicateur qualitatif de l'aspect du régime.

Les facteurs explicatifs.

. description de l'environnement : ce sont les variables caractérisant la pente, l'exposition, l'altitude, le climat ... Il est rare de disposer de données climatiques pour chaque site, il est parfois possible d'utiliser des cartes météorologiques pour avoir des estimations de la pluviométrie et des températures moyennes. En l'absence d'informations et si la zone étudiée est étendue et regroupe des situations contrastées, l'altitude renforcée éventuellement de l'exposition, donne une assez bonne image du climat.

. techniques culturales : variété, année de plantation, préparation du sol, intervention en cours de cycle ..., ces variables sont en général informées, mais il est utile de les compléter par des observations sur le site : état de l'enherbement, examen du profil cultural pour juger du travail du sol... Certaines sont directement observées : densité de plantation, nature de l'irrigation, etc.

. sol : ce chapitre regroupe des variables issues de l'analyse chimique (teneurs en K, Ca, Mg, ...), des observations physiques (granulométrie, compaction ...) et des informations provenant de l'examen du profil cultural (horizons, hydromorphie ...). Les carottes constituant l'échantillon de terre pour analyse chimique sont prélevées au pied des bananiers observés.

Les facteurs intermédiaires.

. état végétatif : mesures de hauteur et de circonférence, symptômes de carence, d'engorgement, ... Ces observations sont bien sûr effectuées sur les plants choisis pour l'estimation de la production.

. analyse foliaire : des prélèvements suivant un protocole précis permettent la mesure dans divers organes (limbe, nervure) des teneurs en N, P, K, Ca, ...

. état sanitaire : notations des symptômes d'attaques sur les parties aériennes (cercosporiose sur les feuilles ...) ou sur les parties souterraines : comptages des larves de charançon dans les bulbes, comptages de nématodes dans les racines, examen de l'état du système racinaire.

. système souterrain : ces variables observées dans le profil cultural concernent la densité racinaire, l'importance du chevelu, la profondeur d'enracinement, etc.

Le nombre de facteurs observés est élevé, plus de 120 variables différentes ont été observées par exemple, au cours de l'enquête menée au Rwanda.

Cette liste de variables est indicative, elle doit être réfléchie pour chaque enquête en fonction des objectifs établis et de la zone géographique concernée.

LA REALISATION PRATIQUE

Elle est entièrement guidée par les choix effectués à la rédaction du protocole d'enquête.

On a souligné la nécessité de la réaliser dans un intervalle de temps aussi réduit que possible. Compte tenu de l'éloignement des sites, plusieurs équipes seront souvent nécessaires.

On s'assurera par des exercices préalables que leurs méthodes sont identiques ; en particulier pour les observations réalisées par notation, qui intègrent souvent une part subjective, on définira clairement en commun les différentes modalités.

Certaines observations, indépendantes des effets climatiques, peuvent être effectuées au cours d'un deuxième passage sans contrainte particulière de temps. Il s'agit par exemple des variables de type altitude, pente, exposition, roche mère ... ou des questions posées à l'agriculteur : année de mise en culture, préparation du sol, etc.

Les échantillons prélevés pour analyse de laboratoire : analyse chimique du sol ou de la plante, comptage de nématodes dans les racines ... seront regroupés et traités simultanément par un même laboratoire.

De la qualité des observations réalisées dépendra la fiabilité des résultats de l'enquête.

METHODOLOGIE STATISTIQUE

La nature statistique différente, les rôles différents, les domaines différents (plante, sol ...), la masse des observations impliquent une stratégie d'analyse progressive tendant à chaque étape à extraire l'information essentielle et à éliminer l'information inutile ou redondante. Le but est d'obtenir dans les dernières phases les tableaux synthétiques les plus riches possibles et restant de taille raisonnable pour être analysables et interprétables.

Les informations forment des lots homogènes par le domaine abordé, ces lots vont former les unités de base de l'analyse. Dans le cas des enquêtes-diagnostic en culture bananière, on peut distinguer :

. les données concernant le sol, sur le plan physique et chimique (facteurs explicatifs),

. les données provenant de l'analyse chimique des feuilles (facteurs intermédiaires),

. les observations concernant l'état sanitaire des plants (facteurs explicatifs quand il s'agit de l'observation d'une pression parasitaire, charançon par exemple, ou facteurs intermédiaires pour la notation de l'état sanitaire des racines par exemple),

. les notations des techniques culturales et de facteurs du milieu (facteurs explicatifs),

. les observations sur le bananier (facteurs à expliquer : production, croissance ou intermédiaires : symptômes d'engorgement ou de carence, développement du système racinaire ...).

Outre les méthodes habituelles de la statistique descriptive, le traitement des données a recours aux méthodes d'analyse multidimensionnelle, principalement dans l'esprit de l'école française (description concise dans BOUROCHE et SAPORTA, 1987 ou détaillée dans CAILLEZ et PAGES, 1967).

- analyse en composantes principales (ACP) traitant des tableaux individus - variables quantitatives.

- analyse factorielle des correspondances (AFC) qui, appliquée à des types particuliers de tableaux, permet des approches différentes. Ces utilisations sont résumées sur la figure 3. En particulier, l'AFC sur des juxtapositions de tableaux de contingence permet une approche de type régression qualitative et la détection de relations non linéaires (CAZES, 1976).

- segmentation, cette méthode, peut-être moins connue, est brièvement décrite en annexe. Elle génère une structure arborescente représentant l'enchaînement de facteurs agissant sur une variable à expliquer qualitative ou quantitative (BASSINI, 1975).

Le déroulement de l'analyse peut être résumé par 6 étapes principales (figure 4).

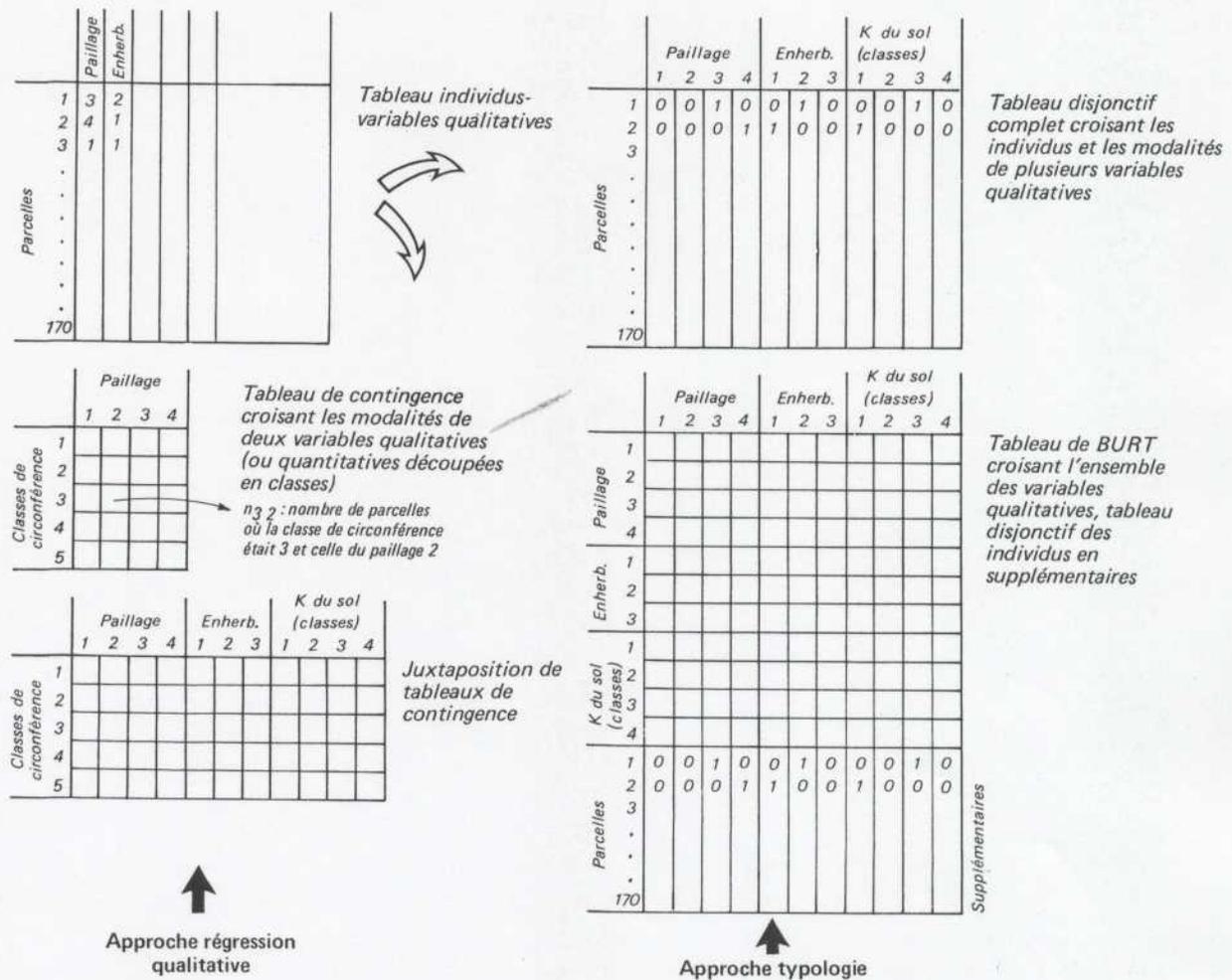


FIGURE 3 - Différents types de tableaux analysables par analyse factorielle des correspondances.

Première approche de chaque lot de données.

Les premières méthodes utilisées sont de simples calculs de paramètres statistiques (moyenne, écart-type, extrêmes, corrélations entre deux variables ...) ou d'édition de graphiques (histogrammes, graphiques entre deux variables en identifiant éventuellement les points par les valeurs d'une 3e variable).

L'objet est de prendre connaissance des données, de constituer des fichiers validés par détection des erreurs ou données aberrantes, de décrire les domaines de variation.

Etude approfondie de chaque lot.

Il s'agit là de caractériser la variabilité entre sites, d'étudier les relations entre variables ... Sur les données quantitatives, la méthode d'ACP est utilisée. Les techniques de variables supplémentaires ou d'identification des points par les modalités d'une variable qualitative sont très utilisées ; elles permettent en particulier une première approche des relations avec les facteurs à expliquer.

Etudes des relations entre lots de données.

Les méthodes utilisées sont surtout descriptives (graphiques entre deux variables, analyses multidimensionnelles avec identificateurs variés, etc.). Cette étape traite en particulier des relations entre facteurs explicatifs et intermédiaires.

Cette étape débouche sur des résultats intermédiaires par exemple relations entre teneur du sol et contenu de la plante pour un élément, contrainte d'ordre pédologique sur le développement racinaire ...

Constitution d'un tableau synthétique.

A ce stade, il a pu être extrait de chaque lot de données, les variables les plus riches d'information. Elles sont qualitatives ou quantitatives ; devant être analysées ensemble, il est nécessaire de toutes les ramener à un état qualitatif en découpant les facteurs quantitatifs en classes. Ce découpage (en 4 ou 5 classes) doit avoir si possible un sens logique et respecter un certain équilibre des effectifs.

	METHODES	OBJECTIFS
	<i>Paramètres statistiques</i> <i>Distribution</i>	connaissance des données Validation
par lots homogènes	<i>ACP sur données quantitatives</i> <i>AFC sur données qualitatives</i> <i>tableaux disjonctifs complets</i> <i>variables supplémentaires</i> <i>individus supplémentaires</i> <i>projection d'autres identificateurs</i>	Etudes par lots Recherche des redondances Relations avec facteurs à expliquer
entre lots	<i>graphiques binaires</i> <i>ACP ou AFC</i> <i>Régression - corrélations</i>	Relations entre facteurs intermédiaires et explicatifs
	<i>Recodage</i> <i>Découpage en classes des variables</i> <i>quantitatives</i>	Tableau élaboré des facteurs explicatifs potentiels
tableau élaboré	<i>AFC sur tableau disjonctif complet</i> <i>Classifications</i>	Typologie des points d'enquête Structure de la variabilité
	<i>AFC sur juxtaposition de tableaux de</i> <i>contingence</i> <i>Segmentation</i>	Recherche des facteurs limitants Hiérarchisation

FIGURE 4 - Enchaînement des différentes phases de l'analyse statistique.

La perte d'information entraînée par le découpage en classes est largement compensée par la possibilité de traiter simultanément l'ensemble des variables.

Il est souhaitable de ne rencontrer à ce stade que des variables explicatives.

Caractérisation des sites.

L'objectif de cette étape est de caractériser les sites, d'en établir une typologie et de déterminer les facteurs responsables des ressemblances ou différences constatées.

On utilise l'AFC sur tableau disjonctif complet ou sur tableau de BURT avec les parcelles en individus supplémentaires (figure 3).

Les structures observées concernent les sites, on ne donne pas aux facteurs à expliquer un rôle particulier, ils peuvent intervenir comme les autres pour expliquer la typologie des points d'enquête.

Explication des facteurs de production.

Dans cette étape, on ne s'intéresse plus aux sites en eux-mêmes mais à la détermination des facteurs les plus liés aux facteurs à expliquer (on dirait les mieux corrélés s'il s'agissait de variables quantitatives). Deux méthodes sont utilisées :

- l'AFC sur juxtaposition de tableaux de contingence croisant la variable à expliquer avec les différentes variables retenues, dans une approche de régression qualitative (figure 5),

- la méthode de segmentation qui permet de hiérarchiser l'importance des facteurs explicatifs (figure 6).

Ces deux méthodes peuvent bien sûr être utilisées en cours d'analyse pour expliquer certains facteurs à expliquer intermédiaires.

Ce schéma permet d'avancer dans l'analyse d'un ensemble de données qui, au départ, de par sa taille et sa complexité paraît inabordable. Ce n'est là que le canevas de l'analyse, chaque enquête est un cas particulier et demande des développements particuliers.

INTERPRETATION ET UTILISATION DES RESULTATS

Pluridisciplinarité de l'analyse.

Il faut remarquer la nécessaire simultanéité de l'analyse et de l'interprétation. Chaque étape conduit à des conclusions partielles qui serviront de points de départ aux étapes suivantes. Cela implique la réunion sur un même site et le dialogue constant de l'agronome spécialiste de la plante qui a élaboré et conduit l'enquête, d'un pédologue, d'un physiologiste, d'un spécialiste de défense des cultures et d'un statisticien.

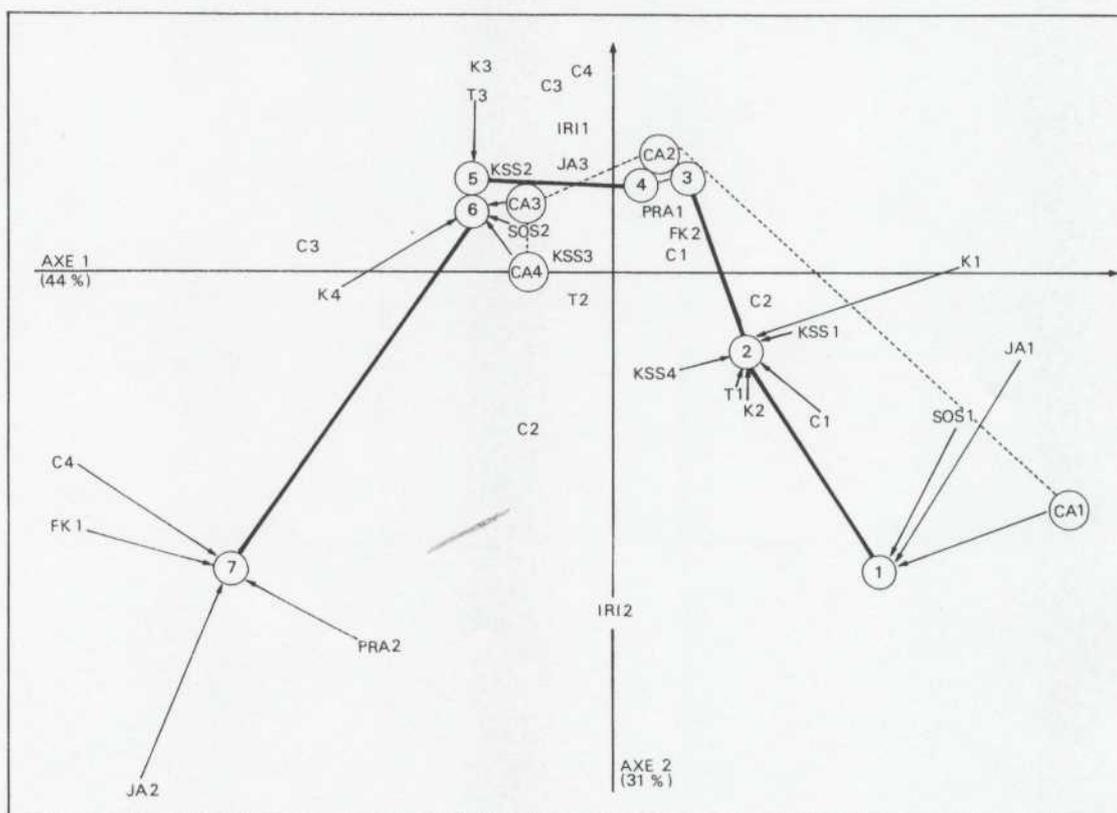


FIGURE 5 - Approche régression qualitative par analyse factorielle des correspondances : incidence des facteurs pédologiques et techniques sur le potentiel de production. Enquête-diagnostic Cameroun (DELVAUX *et al.*, 1986).

Les faibles productions (1) sont liées à une forte acidité des sols (CA1), l'absence de jachère (JA1) et de sous-solage (SOS1). De faibles teneurs en potassium (K1), les déséquilibres cationiques (KSS1, KSS4), de fortes teneurs en argile (T1) et de faibles teneurs en matière organique (C1) sont également des facteurs limitants importants. Sur sols à fertilité adéquate (CA4, C4, T3, K3) et sous-sols (SOS2), les productions sont satisfaisantes (5,6). Pour atteindre les plus forts niveaux (7), il faut ajouter des techniques culturales appropriées : pratique de la jachère propre (JA2), du pralinage (PRA2) et de la fertilisation potassique (FK1).

Facteurs de diagnostic	Codes des classes	Signification
Facteurs pédologiques		
Texture	T1	argile
	T2	argile limoneuse
	T3	autre
Carbone organique (%)	C1	< 2
	C2	2-3
	C3	3-4
	C4	> 4
Teneur en Ca (méq/100 g)	CA1	< 3
	CA2	3-6
	CA3	6-9
	CA4	> 9
Teneur en K (méq/100 g)	K1	< 1
	K2	1-2
	K3	2-3
	K4	> 3
Proportion en K (K/Ss) *	KSS1	< 8
	KSS2	8-16
	KSS3	16-24
	KSS4	> 24
Contenu en graviers (%)	G1	0-3
	G2	3-15
	G3	15-35
	G4	> 35

Techniques culturales		
Irrigation	IRI1	non
	IRI2	oui
Jachère	JA1	pas de jachère
	JA2	jachère propre
	JA3	défriche
Sous-solage	SOS1	non
	SOS2	oui
Pralinage	PRA1	non
	PRA2	oui
Fertilisation potassique	FK1	oui
	FK2	non

* Ss = K + Ca + Mg en méq/100 g de sol

Classes de circonférence du faux-tronc (en cm)						
1	2	3	4	5	6	7
< 45	≥ 45 et < 49	≥ 49 et < 53	≥ 53 et < 57	≥ 57 et < 61	≥ 61 et < 65	> 65

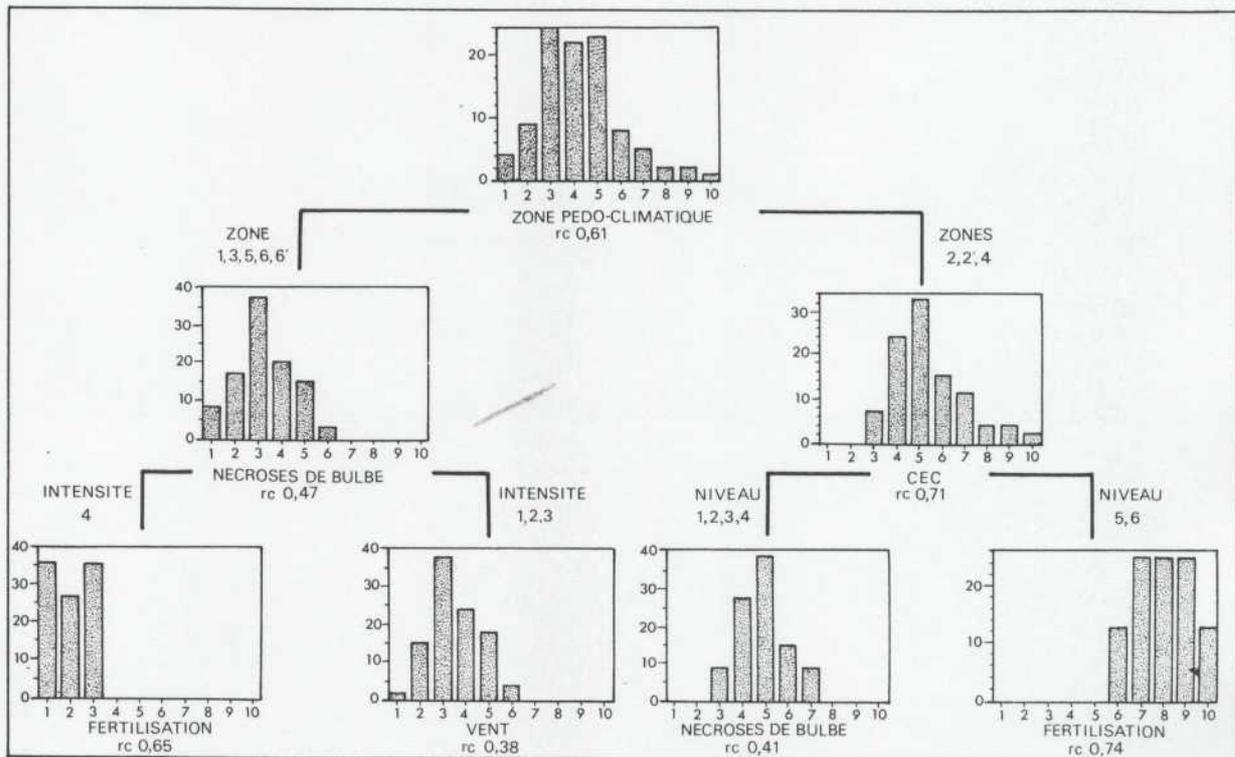


FIGURE 6 - Application de la méthode de segmentation aux données d'une enquête-diagnostic menée auprès des petites plantations de bananes en Guadeloupe (DOREL et PERRIER, 1990).

La variable à expliquer est la circonférence des plants (variable quantitative). A chaque étape sont donnés :

- une représentation de la répartition des parcelles suivant les valeurs de la variable circonférence arbitrairement découpée en 10 classes ;
- la variable donnant la meilleure dichotomie ;
- le rapport de corrélation correspondant (rc).

Cette pluridisciplinarité est un prolongement logique de l'esprit même d'une démarche de type enquête-diagnostic qui s'intéresse tout autant aux interactions qu'aux facteurs eux-mêmes.

Les enquêtes analysées ont toutes montré l'efficacité d'un tel dispositif et l'enrichissement des conclusions issu du dialogue, et éventuellement des oppositions, entre les divers partenaires.

Les domaines des conclusions.

1. Les principales conclusions concernent la mise en évidence des variables agissant sur les facteurs à expliquer. Leur hiérarchie est un apport du plus grand intérêt ; elle n'est pas toujours aisée à établir. L'approche régression qualitative par AFC souffre des limites de la régression classique. Par exemple, la production peut s'avérer très dépendante du type de sol, c'est le premier facteur explicatif ; on montrera ensuite que le deuxième facteur limitant est le parasitisme aérien. C'est la variable la plus explicative, mais en moyenne, pour chaque type de sol. On conçoit les limites d'un tel raisonnement, le facteur limitant suivant peut très bien ne pas être le même sur chaque type de sol. L'approche segmentation, bien que souffrant de certaines faiblesses sur le plan statistique, en travaillant indépendamment sur les différentes branches de l'arbre

des facteurs limitants, permet certainement de mieux appréhender la réalité. La figure 7 résume l'importance des facteurs de production, pour chaque type de sol mis en évidence au cours de l'enquête Martinique (DELVAUX *et al.*, 1990).

2. Le deuxième apport important, lié au volet enquête, est la typologie des situations étudiées qui permet de définir des sous-ensembles homogènes pour les conditions d'environnement ou les techniques de production.

3. Parmi les facteurs limitants détectés, certains sont propres à l'environnement (altitude, pente, climat ...) sans modification possible. Ils fournissent des éléments utilisables pour une cartographie des potentialités de la zone.

4. D'autres facteurs, qu'ils soient biologiques, agronomiques, humains, sont susceptibles d'évolution. Si l'agronome connaît les états souhaitables de ces facteurs et les modalités pour les faire évoluer, il pourra, par la connaissance du contexte acquise au cours de l'enquête, définir des conseils techniques adaptés à chaque situation.

5. Lorsque les problèmes apparaissent ne pas avoir de solutions connues, ils doivent être considérés comme des objectifs de recherche prioritaires qui pourront être abordés par les méthodes classiques. Dans l'exemple de l'enquête menée en Martinique, des phénomènes de nécroses sur

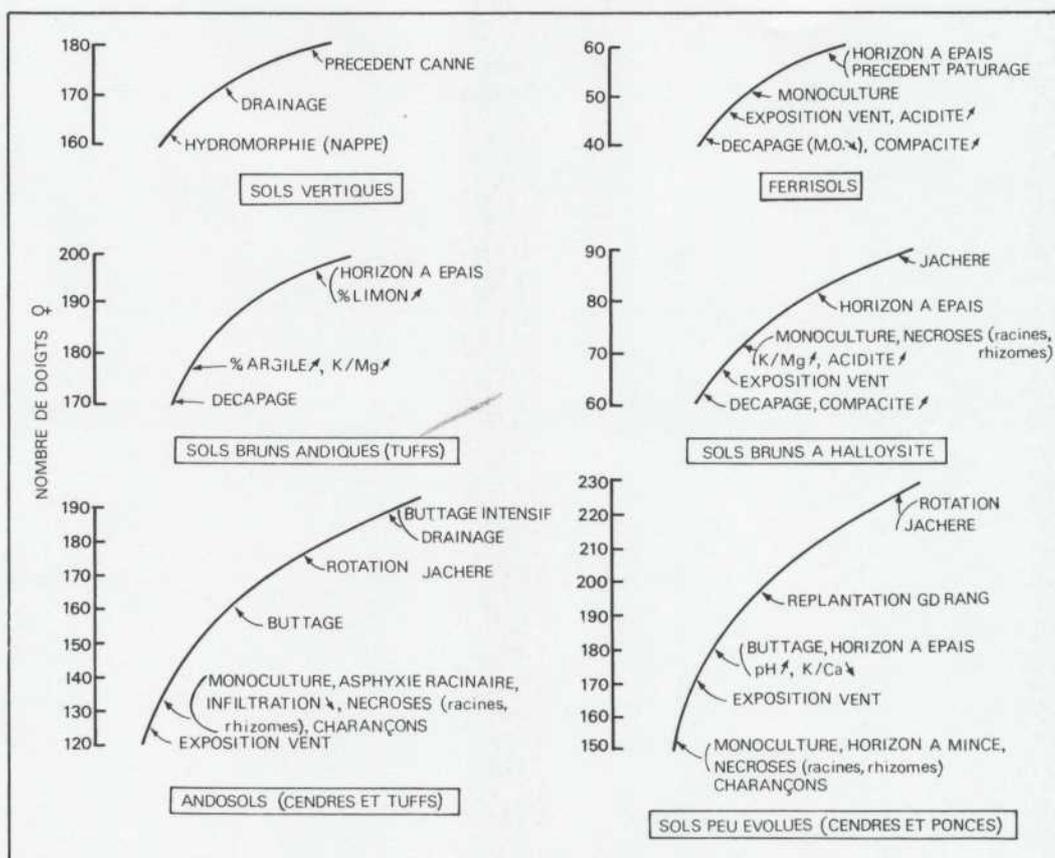


FIGURE 7 - Schémas illustrant la hiérarchie des facteurs limitants de la production des bananeraies intensives de la Martinique, dans chaque zone pédoclimatique (DELVAUX et PERRIER, 1990).

bulbes ou sur racines se sont avérés particulièrement importants et ont conduit à initier un programme de recherche sur le complexe nématodes-champignons du sol.

6. Des résultats intermédiaires obtenus en cours d'analyse, en particulier par les relations des facteurs explicatifs et intermédiaires, ont un intérêt certain, soit pratique et concernant la zone enquêtée - relations entre certaines techniques culturales par exemple - ou plus théorique concernant le fonctionnement de la plante et les relations avec son environnement. Il a, par exemple, été possible dans l'enquête Cameroun d'établir les relations entre teneurs en cations dans le sol et dans la plante et de déterminer des seuils de nutrition adéquats. Il a, également, été montré que les symptômes dits de «bleu magnésien» habituellement attribués à une déficience magnésienne induite par un excès de potassium, sont en fait liés à un excès de potassium relativement aux cations calcium et magnésium, situation rencontrée dans les sols particulièrement acides.

Précision et validité des résultats.

Par définition, une méthode d'enquête-diagnostic est descriptive et qualitative. L'objet est de décrire et d'expliquer la variabilité de certains paramètres ; ce n'est pas d'établir des modèles de fonctionnement d'un peuplement végétal même si des indices précieux peuvent être produits

par une démarche enquête. En particulier, des facteurs très importants pour l'élaboration du rendement ne ressortiront jamais d'une enquête-diagnostic s'ils sont constants dans le domaine étudié.

Les résultats, issus de l'analyse statistique, doivent être très soigneusement interprétés en ayant à l'esprit les différentes sources de biais possibles :

1. les points échantillonnés ne peuvent, pour des raisons pratiques, être aussi nombreux que souhaitable. Leur sélection repose en partie sur des hypothèses initiales avec un risque d'erreur qui est minimisé par une étude préalable soigneuse.
2. certains facteurs importants, au moins localement, peuvent être absents de la liste des variables observées. La prudence veut que l'éventail des variables soit le plus large possible, ceci ne pose pas de problème particulier à l'analyse mais peut avoir une limitation pratique pour la réalisation sur le terrain.
3. les liaisons entre facteurs explicatifs sont fréquentes ; les relations mises en évidence ne doivent pas être interprétées directement en terme de causalité : un paramètre peut présenter un bon pouvoir explicatif sans être lui-même déterminant, mais parce qu'il est lié fortement à un facteur agissant effectivement sur le niveau de production.

4. les relations établies au cours de l'analyse représentent les tendances générales, il est indispensable de retourner aux données initiales pour vérifier ces tendances mais surtout pour détecter certains comportements particuliers souvent très instructifs.

5. une enquête-diagnostic présente un aspect instantané. L'image que l'on étudie est celle d'un instant donné correspondant à une certaine séquence climatique, séquence agissant sur la plante mais aussi sur son environnement (population de parasites par exemple).

Cette limitation, qui est certainement la plus importante, peut être contournée par la répétition de l'enquête à plusieurs périodes de l'année mais sur un échantillon de sites et de variables beaucoup plus petit, déterminé à l'issue de la première enquête comme étant pertinents et représentatifs.

L'extrapolation des résultats est liée à leur précision ; ils sont valables pour les sites étudiés et par extension pour les sites comparables appartenant à la même zone. Leur extrapolation à des zones de conditions voisines doit être faite avec prudence en examinant dans chaque cas l'amplitude des différences.

On remarquera que cette limite à l'extrapolation est beaucoup moins contraignante qu'en expérimentation classique dans la mesure où les facteurs dont on contrôle les variations sont beaucoup plus nombreux.

CONCLUSIONS

L'approche décrite ici peut se résumer simplement :

- par voie d'enquête, on mesure et on décrit la variabilité d'un domaine défini dans le cadre d'objectifs précis.

- la mesure de la variabilité est utilisée pour détecter les facteurs du milieu physique, biologique, humain qui peuvent agir sur les phénomènes que l'on étudie (des paramètres de production en général). Ce souhait de diagnostic nécessite certaines adaptations du protocole par rapport à une enquête classique : le choix des variables à observer et la stratégie d'échantillonnage devront tenir compte de cet aspect.

Les applications de cette approche, dans des conditions différentes, ont montré l'efficacité à produire des résultats pertinents dans des délais très courts, quelques mois au

maximum pour l'ensemble des phases. Ces résultats sont de nature qualitative, ils n'ont pas prétention à la précision d'un modèle quantitatif. L'interprétation ne doit pas outrepasser les limites liées aux conditions d'obtention des résultats.

La mise en oeuvre de cette méthode ne pose pas de problèmes techniques majeurs, mais nécessite, dans une approche pluridisciplinaire, la réunion de compétences de divers spécialistes possédant une bonne connaissance de la culture.

Cette démarche ne doit pas être vue comme une alternative aux méthodes d'expérimentation, au sens agronomique habituel, mais plutôt comme un complément. Un processus de recherche peut se résumer par une succession d'étapes (GOUET, 1978) :

- identification des problèmes,
- recherche des solutions,
- vérification de ces solutions,
- vulgarisation des résultats.

La méthode d'enquête-diagnostic est un outil efficace pour identifier les problèmes, en particulier lorsque les conditions de production sont peu ou mal connues ; ceci est souvent le cas en agronomie tropicale dès que l'on sort des quelques grandes stations de recherche. Elle permet la définition d'hypothèses de travail pour de nouveaux axes de recherche connectés directement aux réels besoins de la zone étudiée.

Cette approche peut également renforcer considérablement l'efficacité de la vulgarisation des résultats : (1) la mise en évidence et la hiérarchisation des facteurs limitants (volet diagnostic) qui ont pour la plupart des solutions connues, permettent l'établissement d'itinéraires techniques optimaux, (2) la délimitation des grandes zones pédo-agronomiques peut déboucher sur la mise en place d'avertissements agricoles adaptés à chaque situation (volet enquête).

Par contre, cette méthode, formellement, se limite à un constat et à une explication de l'existant, elle n'apporte pas réellement d'innovation sur le plan strictement agronomique (DELVAUX *et al.*, 1986 b) ; la méthode d'expérimentation reste la plus appropriée pour la recherche et la vérification des solutions aux problèmes nouveaux mis en évidence.

Cependant la prise en compte, au cours d'une enquête-diagnostic, d'un grand nombre de facteurs, et donc la possibilité d'étudier les interactions entre ces facteurs, permet des apports certains sur la connaissance de la plante et de son fonctionnement.

ANNEXE : Méthode de segmentation

Cette méthode (BACCINI, 1975) d'analyse multidimensionnelle n'est pas factorielle comme l'ACP ou l'AFC, elle serait plutôt à rapprocher de la régression multiple pas à pas. L'objet est de mettre en relation une variable à expliquer (Y) qualitative ou quantitative et une série de variables explicatives (X_i) qualitatives, à modalités ordonnées ou non, par une procédure pas à pas. Ces variables sont observées sur une population de n individus.

Soit X_1 la première variable explicative à 3 modalités par exemple. On sépare la population de départ en deux

parties : la sous-population des n_1 individus prenant la modalité 1 de X_1 et celle des n_2 ($n = n_1 + n_2$) individus prenant les modalités 2 ou 3. A chaque sous-population correspond une distribution de la variable à expliquer Y , on calcule un critère qui mesure la ressemblance entre ces deux distributions : χ^2 si Y est qualitative, rapport de corrélation si Y est quantitative. Ce critère est élevé si les deux distributions sont très différentes (par exemple, une majorité de valeurs faibles pour l'une et de valeurs fortes pour l'autre).

On répète cette opération mais en comparant les sous-populations de modalités 1 ou 2 contre 3, puis, si la variable X_1 n'est pas ordonnée, les modalités 1 ou 3 contre 2. On retient finalement la dichotomie correspondant à la plus forte valeur du critère, c'est-à-dire aux distributions de Y les plus différentes.

Cette série d'opérations est réalisée pour toutes les variables X_i , on sélectionne pour le premier pas la variable et sa dichotomie conduisant à la plus forte valeur du critère.

On recommence alors cette série de calculs séparément sur chaque sous-population issue de la dichotomie du premier pas, on obtient alors une dichotomie d'une deuxième variable X_i pour une sous-population et celle d'une autre variable (ce peut être la même) pour l'autre sous-population. Les pas ultérieurs s'obtiennent de la même façon à partir des sous-populations issues du pas précédent.

La représentation graphique de ces dichotomies forme une arborescence (exemple figure 6). Une branche se termine lorsqu'aucune variable ne permet une valeur suffisante du critère ou lorsque la population est trop faible pour être séparée.

Cette méthode souffre de certaines limites :

- pas d'estimation du potentiel explicatif du modèle proposé,
- pas de comparaison possible entre branches,
- modèle obligatoirement dichotomique, même si une variable peut être sélectionnée plusieurs fois (par exemple modalités 2 contre 1, 3 ou 4 d'abord puis dans la deuxième branche 1 contre 3 ou 4).
- on ne sait pas si la succession des variables sélectionnées sur une branche correspond réellement au meilleur pouvoir explicatif,
- si les variables explicatives ne sont pas indépendantes, la sélection d'une variable enlève une partie du pouvoir explicatif des variables corrélées.

On remarquera que ces dernières limitations existent à l'identique en régression multiple.

Malgré certains défauts, cette méthode, utilisée avec prudence, peut être très utile : son intérêt est de travailler dans le domaine qualitatif et sans contrainte de linéarité. De plus, traitant de façon indépendante les branches de chaque dichotomie, elle permet de détecter les variables qui, dans chaque cas, sont les plus explicatives. La régression pas à pas, au contraire recherche à chaque étape la variable qui «en moyenne» est la plus explicative, ce «en moyenne» pouvant n'avoir aucun sens pratique.

Ce traitement séparé des branches est très utile dans une approche enquête-diagnostic : si, par exemple, le premier pas correspond au type de sol, il n'y a aucune raison pour que le facteur intervenant ensuite soit le même sur chaque type de sol.

BIBLIOGRAPHIE

- BASSINI (A.). 1975.
Aspect synthétique de la segmentation et traitement de variables qualitatives à modalités ordonnées.
Thèse de 3e cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- BOUROCHE (J.M.) et SAPORTA (G.). 1987.
L'analyse des données.
Presses Universitaires de France, 3e édition, 126 p.
- CAILLEZ (F.) et PAGES (J.P.). 1976.
Introduction à l'analyse des données.
SMASH, 616 p.
- CAZES (P.). 1976.
Régression par boule et par analyse des correspondances.
Revue de Statistique appliquée, XXIV (4), 5-22.
- CONESA (A.P.), ROUX (M.), BAILLON (P.), HADJ-MILOUD (D.), MAGINIEAU (C.) et LEMAIRE (G.). 1975.
Etude globale de la culture de la betterave à sucre sur le périmètre du Haut Chélif.
I.- Analyse factorielle des correspondances.
Annales d'Agronomie, 26 (6), 709-740.
- CONESA (A.P.), CAZES (P.), TOMASSONNE (R.), BAILLON (P.), HADJ-MILOUD (D.), MAGINIEAU (C.) et LEMAIRE (G.). 1976.
Etude globale de la culture de la betterave à sucre sur le périmètre du Haut Chélif.
II.- Analyses en régression.
Annales d'Agronomie, 27 (1), 61-84.
- CONESA (A.P.), METTAUER (M.), HAEFLINGER (R.), TRENDEL (R.), TUAL (Y.) et GROSS (P.). 1979.
Etude de la productivité de l'agrosystème betteravier en Alsace.
Essai d'établissement d'un modèle empirique prédictif.
Annales d'Agronomie, 30 (3), 281-303.
- DELVAUX (B.), LASSOUDIÈRE (A.) et PERRIER (X.). 1984.
Influence des conditions pédologiques et des techniques culturales sur la production bananière au Cameroun.
I.- Les caractéristiques de la bananeraie camerounaise.
II.- Méthodologie.
III.- Relations sol-plante et définition des niveaux critiques.
Revue Science et Technique - Série sciences agronomiques, Cameroun, 1 (1), 67-124.

- DELVAUX (B.), LASSOUDIÈRE (A.), et PERRIER (X.). 1986 a.
Influence des conditions pédologiques et des techniques culturales sur la production bananière au Cameroun.
IV.- Utilisation des cartes pédologiques pour les avertissements fertilisation.
V.- Effets des facteurs diagnostics.
VI.- Conclusions et perspectives.
Revue Science et Technique - Série sciences agronomiques, Cameroun, 2 (2), 5-46.
- DELVAUX (B.), LASSOUDIÈRE (A.), PERRIER (X.) et MARCHAL (J.). 1986 b.
Une méthodologie d'étude des relations sol-plante. Techniques culturales par enquête diagnostic.
Application à la culture bananière camerounaise. Synthèse des résultats.
Fruits, 41 (6), 359-370.
- DELVAUX (B.) et GUYOT (P.). 1989.
Caractérisation de l'enracinement du bananier au champ. Incidences sur les relations sol-plante dans les bananeraies intensives de la Martinique.
Fruits, 44 (12), 633-647.
- DELVAUX (B.), PERRIER (X.) et GUYOT (P.). 1990.
Diagnostic de la fertilité de systèmes culturaux intensifs en bananeraies à la Martinique.
Fruits, 45 (3), 223-236.
- DOREL (M.) et PERRIER (X.). 1990.
Influence du milieu et des techniques culturales sur la productivité des bananeraies de Guadeloupe. Enquête-diagnostic.
Fruits, 45 (3), 237-244.
- GODEFROY (J.), RUTUNGA (V.) et SEBAHUTU (A.). 1991.
Etude du milieu physique des bananeraies de la région de Kibungu au Rwanda.
Influence de l'âge de la bananeraie et du système de culture sur la fertilité des sols.
Fruits, 46 (2), 109-124.
- GOUET (J.P.). 1978.
L'élaboration d'un protocole d'enquête.
Publication ITCF, 98 p.
- GRAS (R.) et CHIAVERNI (J.). 1980.
Incidences du milieu et des techniques culturales sur la longévité du lavandin « Abrial ».
Annales d'Agronomie, 31 (2), 191-218.
- LASSOUDIÈRE (A.). (Collectif sous la direction de). 1989.
Enquête-diagnostic sur la culture bananière. Préfecture de Kibungu Rwanda.
Rapport final ISAR-IRFA/CIRAD, 154 p. et annexes.
- LOSSOIS (P.). 1963.
Recherche d'une méthode de prévision des récoltes en culture bananière.
Fruits, 18 (6), 283-293.
- MARTIN-PREVEL (P.). 1984.
Bananier.
in : *L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales*.
Ed. Lavoisier, Paris, 715-751.
- METTAUER (H.), TUAL (Y.), HAEFLINGER (R.), CONESA (A.P.) et TRENDEL (R.). 1978.
Influence des propriétés physiques et mécaniques du sol sur la morphologie et le rendement en racine de la betterave à sucre.
Annales d'Agronomie, 29 (2), 147-167.

METODOLOGIA PARA LA DETECCION Y LA JERARQUIZACION DE LOS FACTORES QUE LIMITAN LA PRODUCCION A UNA ESCALA REGIONAL.

Aplicación en el cultivo del plátano.

X. PERRIER y B. DELVAUX.

Fruits, May-Jun. 1991, vol. 46, n° 3, p. 213-226.

RESUMEN - En ciertas situaciones, las respuestas a los problemas planteados a la investigación agronómica, no pueden ser obtenidas, en forma fácil y rápida, por los métodos clásicos tales como los diseños experimentales y sus pruebas asociadas. Se propone un método de encuesta-diagnóstico que funciona por la comparación de la información recogida *in situ*. Las diferentes fases: establecimiento del protocolo, realización y análisis de los resultados, son presentadas insistiendo sobre las condiciones de eficiencia máxima de las herramientas estadísticas. El análisis de los parámetros del medio ambiente físico, biológico, humano, y de sus interacciones permite, dentro de un enfoque necesariamente pluridisciplinario, una descripción detallada de las condiciones de producción y de la detección de los factores que explican la variabilidad de producción observada. La importancia y las limitantes de este método, en particular las condiciones de extrapolación, son discutidos.

