

Diagnostic de l'élaboration du rendement des cultures

Jean-Marc Meynard, Geneviève David

Quelle que soit la culture, la quantité de produit récolté est extrêmement variable, d'une parcelle à l'autre, d'une année à l'autre, d'un agriculteur à l'autre. Cette variabilité nous interroge : il n'y a qu'en identifiant et en hiérarchisant les facteurs et les conditions limitant le rendement qu'on pourra définir les modifications techniques susceptibles d'améliorer la production. C'est une démarche de diagnostic, que nous devons adopter, semblable à celle de médecins qui, face à un syndrome, en recherchent l'origine. Nous tentons de faire le point, dans cette communication, sur les moyens théoriques dont nous disposons pour effectuer un tel diagnostic : quelle démarche, quelles connaissances, quelles observations ou mesures... ?

La démarche de diagnostic

Le diagnostic agronomique vise à identifier *a posteriori* les caractéristiques du milieu et du système de culture ayant influé sur la production.

Une méthode couramment pratiquée, facilitée par les moyens informatiques disponibles aujourd'hui, consiste à confronter directement, sur un nombre important de parcelles, les niveaux de production aux critères techniques, climatiques et pédologiques immédiatement accessibles. On impute alors les résultats jugés défavorables aux caractères qui leur sont fréquemment associés dans le réseau étudié.

Cette méthode comporte un risque important de confusion d'effets : les liaisons entre techniques et rendement,

climat et rendement, type de sol et rendement, ne sont pas stables et les interactions sont nombreuses et complexes ; pour vérifier la réalité des liens de cause à effet, il est nécessaire d'entrer dans la boîte noire, de contrôler des variables d'état du système constitué par le champ cultivé, susceptibles de révéler spécifiquement l'effet des différents facteurs limitants [1].

Le *Tableau 1* [2] donne un exemple typique de confusion d'effets. On observe sur le vignoble de grands vins du Médoc que plus le vin est réputé excellent (colonne de gauche), plus le taux de matière organique du sol est élevé. On serait tenté de conclure à un effet de la matière organique sur la qualité du vin ; mais pour démontrer que cet effet est réel, il faudrait établir :

- que les états physiques, chimiques ou biologiques des sols du Médoc sont améliorés de manière sensible par les augmentations constatées de taux de matière organique ;
- que ces améliorations du sol ont un effet sur la croissance ou le développement de la vigne, favorable à la qualité du raisin.

En fait Delas [2], à qui l'exemple a été emprunté, montre que le lien de cause à effet, entre qualité et matière organique, est inverse : les taux d'humus élevés proviennent d'apports de fumier

Tableau 1

Teneur en matière organique des sols des grands crus du vignoble du Haut Médoc

	Classement des crus				
	Grands crus classés			Crus bourgeois	Crus non classés
	Premiers crus	Deuxièmes crus	Cinquièmes crus		
Teneur (%) en matière organique	2,07 a*	1,89 ab	1,78 ab	1,72 bc	1,50 c
Nombre de parcelles	78	47	69	169	41

(d'après Delas [2])

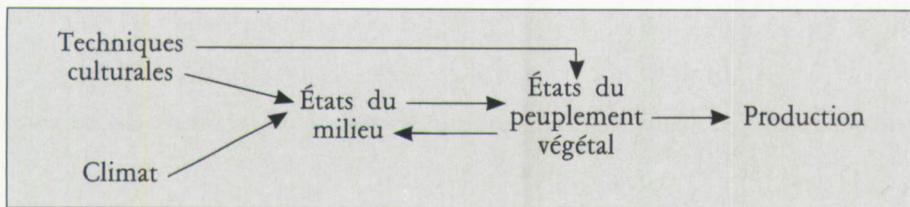
* Deux moyennes suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de probabilité 5 %.

J.-M. Meynard : INRA Laboratoire d'Agronomie, 16, rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05, France.

G. David : Chaire d'Agronomie, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 16, rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05, France.

fréquents ; les viticulteurs de la région n'ayant pas de bétail, ce fumier est acheté ; ce sont les viticulteurs qui vendent leur vin le plus cher (ceux des premiers crus) qui achètent le plus de

fumier, donc en épandent le plus... Le diagnostic vise donc à reconstituer *a posteriori* le processus d'élaboration de la production :



C'est un processus dynamique : les états du milieu changent au cours du cycle, de même que les exigences de la culture ou les conséquences d'un état défavorable sur la production. La réalisation du diagnostic suppose donc deux étapes :

- détermination de la (des) phase(s) du cycle où la production a été affectée (en quantité ou qualité) ;
- identification des facteurs ou conditions du milieu qui ont été défavorables pendant cette (ou ces) phase(s). On resserre ainsi progressivement le champ des hypothèses et, quand on

conclut qu'une technique culturale donnée a été à l'origine des variations de production, c'est avec un degré élevé de certitude.

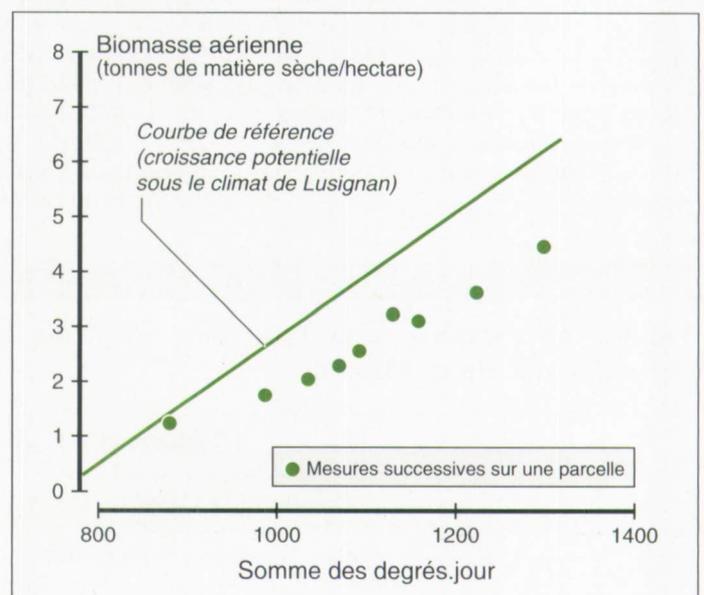
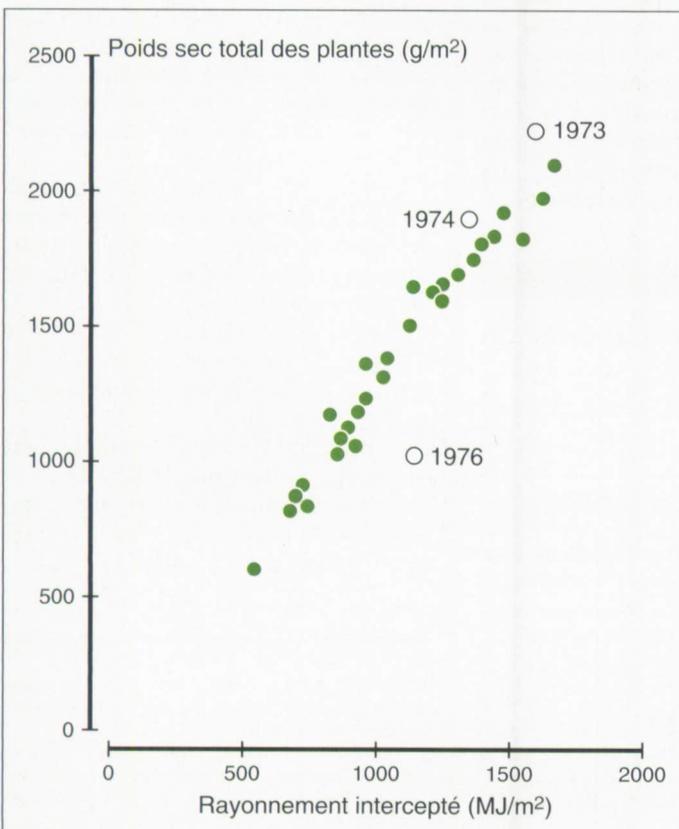
Comme chaque fois qu'on étudie des systèmes complexes, les modèles sont d'une grande utilité. La confrontation des résultats expérimentaux aux modèles d'élaboration du rendement permet d'identifier les facteurs limitants et de quantifier leur incidence. Ceci peut être illustré à partir de la *figure 1*, empruntée à Scott et Allen [3]. Ces auteurs montrent que la production de biomasse totale potentielle qu'on peut

atteindre sur une parcelle de betterave sucrière ou de pomme de terre est directement fonction du rayonnement intercepté (points noirs). Les résultats de trois situations culturales (années 1973, 1974 et 1976) pour lesquelles des rendements très différents ont été obtenus, sont confrontés au modèle.

- Pour 1973 et 1974 : la position des points est cohérente avec le modèle ; il n'y a probablement pas eu d'autre limitation au rendement que l'interception de l'énergie lumineuse. La production de biomasse plus faible en 1974 est due à une quantité de rayonnement intercepté plus faible (cycle plus court ou surface foliaire plus faible).

- Pour 1976, le point est à l'écart de la relation de référence : on n'est plus dans le domaine de validité du modèle, ce qui traduit l'intervention d'une condition ou d'un facteur limitant, parasitaire ou nutritionnel.

La nature du facteur limitant (ici la sécheresse) peut être déterminée en utilisant un autre modèle, celui du bilan hydrique.



▲ **Figure 2.** Croissance de la Fétuque (*Festuca* sp.) en fonction de la somme de degrés.jour (d'après Lemaire [4]).

▲ **Figure 2.** Growth of fescue (*Festuca* sp.) according to cumulative degree-days (from Lemaire [4]).

▲ **Figure 1.** Relation entre croissance et rayonnement intercepté (betterave sucrière et pomme de terre) (d'après Scott et Allen [3]).

▲ **Figure 1.** Relation between growth and intercepted radiation (sugar beet and potato) (from Scott and Allen [3]).

Première étape du diagnostic : à quel moment les différences de rendement se sont-elles créées ?

Suivi de la croissance

Dans la mesure où la production végétale résulte d'un processus d'accumulation de matière sèche, le suivi de la croissance est un moyen privilégié de diagnostic. Un exemple est donné sur la figure 2. Sur graminée fourragère Lemaire [4] a modélisé, pour la région du Poitou (France), la croissance potentielle en fonction de la somme de degrés.jour ; le modèle est représenté sous forme d'une droite continue. Sur

une parcelle où l'on a réalisé un suivi de croissance, on observe les résultats figurés par les points noirs : la vitesse de croissance est inférieure sur cette parcelle ; le moment où les vitesses de croissance se différencient, constitue le moment d'intervention du facteur limitant.

Cette méthode du suivi de croissance est la seule praticable pour les cultures dont on récolte des organes végétatifs, mais elle est très lourde, très coûteuse en temps. Pour les plantes dont on récolte les grains, on dispose d'un autre moyen de détermination des périodes d'intervention des facteurs limitants : les composantes du rendement, d'emploi beaucoup plus aisé.

Les composantes du rendement

Pour une céréale ou une légumineuse à graine, par exemple, on peut écrire :

$$\text{Rendement} = \text{Nombre de grains/m}^2 \times \text{Poids moyen d'un grain}$$

Ces deux composantes se forment pendant des phases du cycle bien délimitées, partiellement ou totalement disjointes selon les cultures ; chacune est influencée par les facteurs et conditions du milieu pendant sa phase de formation. Il en résulte qu'on peut utiliser la valeur d'une composante du rendement comme indicateur du caractère plus ou moins favorable du milieu pendant sa phase de formation [5]. Par exemple pour le blé, le nombre de grains/m² est déterminé, à quelques jours près, à l'anthèse. Le poids moyen d'un grain se détermine entre l'anthèse

et la maturité. Le nombre de grains/m² dépend de tout ce qui se passe avant l'anthèse, le poids d'un grain de tout ce qui se passe après. En examinant les variations de ces deux composantes, on peut donc déterminer si, sur une parcelle, le rendement a été limité par un milieu défavorable avant ou après l'anthèse.

La différence de rendement entre les parcelles A et B du Tableau 2 s'est créée avant l'anthèse ; entre les parcelles A et C, elle s'est créée après ce stade.

On peut, selon le même principe,

Tableau 2

Exemple de composantes du rendement du blé

	Rendement (q/ha)	Nombre de grains /m ²	Poids moyen d'un grain
Parcelle A	80	20000	40 mg
Parcelle B	70	17 500	40 mg
Parcelle C (même variété)	70	20 000	35 mg

Références

1. Meynard JM, Sebillotte M. Diagnostic sur les causes de variation du rendement du blé dans une petite région. La Fatigue des Sols. Les Colloques de l'INRA, Paris, 1982, 157-68.
2. Delas J. La matière organique dans les sols du Médoc. *Cah Ing Agronomes* 1983 ; 371 : 69-71.
3. Scott RK, Allen FJ. Crop physiological aspects of importance to maximum yields. Potatoes and Sugar beet. Symposium ADAS-ARC. Maximising yields of crops. Harrogate, 17-19 January 1978, England.
4. Lemaire G. Cinétique de croissance d'un peuplement de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* S.) pendant l'hiver et le printemps. Effet des facteurs climatiques. Thèse Doct ès Sciences Naturelles, Université de Caen, 1985, 96 p.
5. Sebillotte M. An analysis of yield elaboration in wheat. In : *Wheat technical monograph*. Bâle : Doc CIBA-GEIGY, 1980 : 25-32.
6. Meynard JM. L'analyse de l'élaboration du rendement des céréales sur les essais de fertilisation azotée. *Perspectives Agricoles* 1987 ; 115 : 76-83.
7. Masle J, Doussinault G, Huet Ph et al. Groupe Blé-INRA 1985. Méthodologie de l'analyse du rendement du blé d'hiver. Collection « Les Colloques de l'INRA », 42 p. (à paraître).
8. Fleury A, Limaux F. Comment la comparaison globale de nombreux essais a pu conduire à des références régionales pour le blé en Lorraine ? *Bull Tech Inf* 1987 ; 417 : 95-110.
9. Pigeaire A. Propositions pour le diagnostic cultural chez le soja de type indéterminé. Analyse de l'efficacité de la croissance vis-à-vis de la formation du nombre de graines. *Informations techniques CETIOM* 1986 ; 94 : 3-13.
10. Leterme Ph. Modélisation de la croissance et de la production des siliques chez le colza d'hiver (*Brassica napus* L.) ; application à l'interprétation de résultats de rendements. Thèse Doct Ing, INA-PG, Paris, 1985, 208 p.
11. Boiffin J, Caneill J, Meynard JM, Sebillotte M. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne Crayeuse. I — Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie* 1981 ; 1(7) : 549-58.
12. Pigeaire A. Élaboration des composantes du rendement chez le soja de type indéterminé. Thèse Doct Ing, INP, Toulouse, 1984, 110 p.
13. Durr C. Systèmes de culture et élaboration du rendement du riz (*Oryza sativa* L.) en Camargue. Thèse Doct Ing, INA-PG, Paris, 1984, 226 p.
14. Masle J. L'élaboration du nombre d'épis chez le blé d'hiver. Influence de différentes caractéristiques de la structure du peuplement sur l'utilisation de l'azote et de la lumière. Thèse Doct Ing, INA-PG, Paris, 1980, 274 p.
15. Masle J. Compétition among tillers in winter wheat ; consequences for growth and development of the crop. In : Day, Atkin eds. *Wheat growth and modelling*. NATO ASI Série A, 1985, 86 : 33-54.
16. Meynard JM, Sebillotte M. L'élaboration du rendement du blé, base pour l'étude des autres céréales à talles. In : *Le point sur l'élaboration du rendement*. Paris INRA, 1992.
17. Jeuffroy MH. Pois : les profils de graines ; interprétation et modélisation. *Persp agric* 1991 ; 164 : 62-72.
18. Sébillotte M. Rôles de l'azote dans le comportement d'un peuplement de céréales. Réflexions sur les approches de l'agronome. *CR Acad Agric Fr* 1985 ; 71(3) : 292-301.
19. Lemaire G, Salette J. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I — Étude de l'effet du milieu ; II — Étude de la variabilité entre génotypes. *Agronomie* 1984 ; 4(5) : 423-36.

effectuer des décompositions plus fines du rendement (nombre d'épis/m², ou par plante, nombre d'épillets par épi...) qui permettent potentiellement une datation plus précise des facteurs et conditions limitants [6, 7]. Cependant, l'utilisation de ces composantes analytiques bute sur une connaissance souvent insuffisante de leur déterminisme et de leurs relations avec les composantes antérieures. Une approche théorique des relations entre composantes du rendement successives* est détaillée par Fleury et Limoux [8].

Sur la *figure 3* sont indiquées les périodes de formation des composantes du rendement du blé et du soja. Sur cette dernière culture, la même démarche est possible, bien qu'un peu plus complexe du fait de la non-dissociation totale des périodes de formation des nombres de grains et poids d'un grain [9]. Une remarque analogue peut être faite pour le colza [10]. En fait, l'analyse des composantes du rendement et l'analyse de la croissance permettent globalement de mettre en évidence les mêmes processus, dans la

mesure où le niveau des composantes dépend largement, pour de nombreuses espèces, de la croissance pendant leur phase de formation. Plusieurs exemples de relations entre croissance et composantes, montrant la généralité de cette dépendance, sont donnés sur la *figure 4* (nombre de ramifications du 2^e ordre de la panicule de riz, nombre de grains du soja ou du blé) [11-13].

Analyse de la ramification

Pour les céréales à paille tout particulièrement, une datation encore plus précise d'intervention du premier facteur limitant est possible grâce à l'examen des séquences de ramification [14, 15]. On connaît en effet la loi d'apparition des feuilles et talles d'un pied en absence de compétition ; cette loi, gouvernée par la température, est décrite *figure 5* (différents auteurs, cités dans [15, 16]). A intervalles de temps constants en degrés.jour (le phyllochrone), apparaissent une nouvelle feuille sur les talles existantes et, à partir du stade 4^e feuille du brin-maître, un nouveau groupe de talles. Quand l'alimentation du pied en azote, phosphore ou carbone devient insuffisante pour couvrir les besoins de croissance, on observe une interruption de l'apparition des talles alors que celle des feuilles continue au même rythme. Il s'ensuit que, pour un pied tel que le pied n° 2 décrit *Tableau 3*, on peut diagnostiquer l'existence d'un facteur limitant sa croissance, apparu au cours du phyllochrone suivant l'émission de la talle de 3^e feuille et de la 6^e feuille du brin-maître. Au contraire, pour les plantes n° 1 et 3, la concordance de

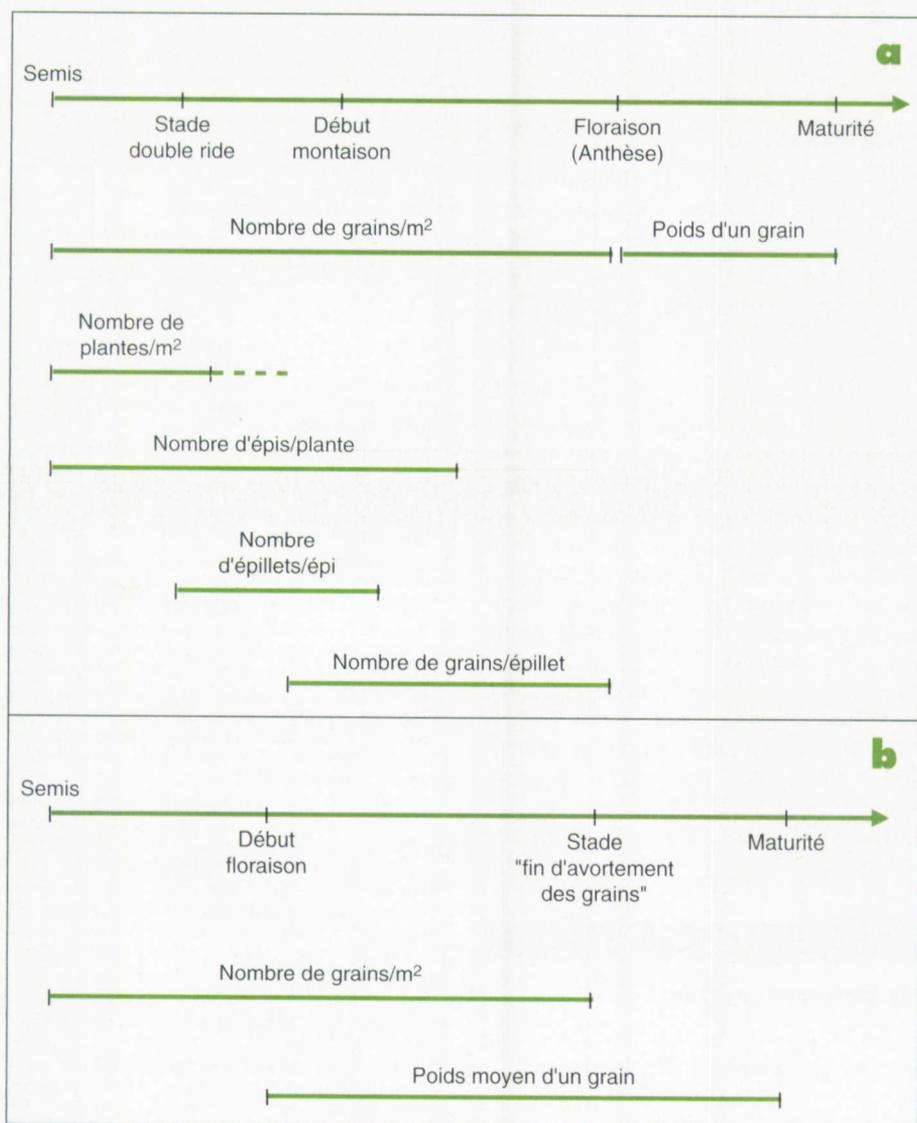
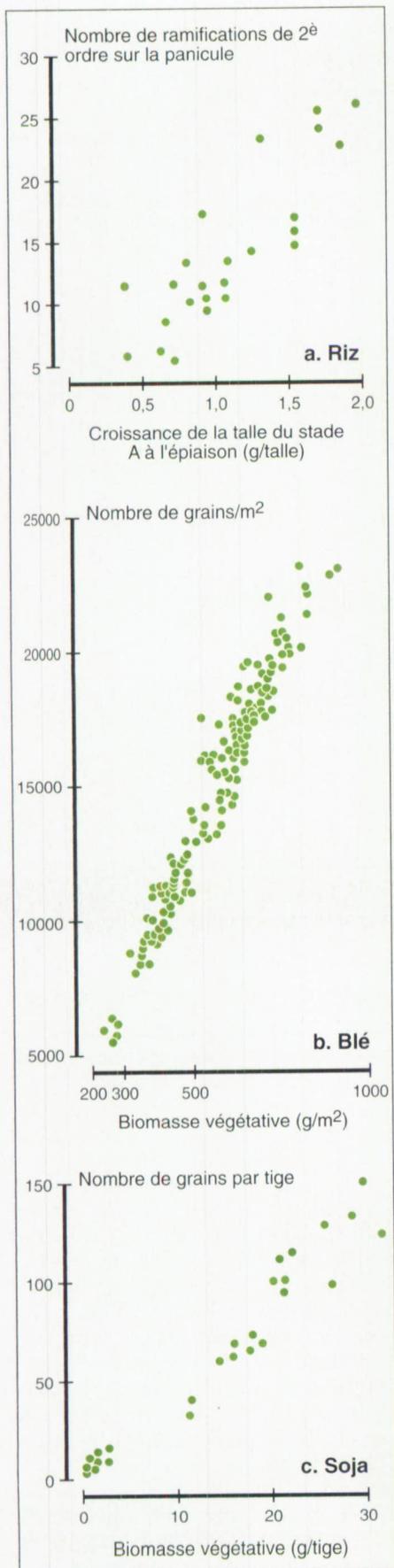


Figure 3. a. Périodes de formation des composantes du rendement du blé d'hiver. b. Périodes de formation des composantes du rendement du soja.

Figure 3. a. Periods of formation of yield components in winter wheat. b. Periods of formation of yield components in soybean.

* Pour les faibles valeurs d'une composante du rendement C_i (par exemple nombre d'épis/m²), la composante du rendement suivante (C_{i+1}/C_i) , par exemple le nombre de grains par épi) atteint une valeur maximale indépendante de celui-ci : C_{i+1} (le nombre de grains/m²) croît alors proportionnellement à C_i . Pour les fortes valeurs de C_i , la compétition entre individus ou organes entraîne une baisse de $[C_{i+1}/C_i]$ (appelée compensation) qui tangente une hyperbole équilatère d'équation $[C_{i+1}/C_i] = \text{Constante}/C_i$, la valeur de la constante correspondant à la valeur maximale de C_{i+1} permise par les facteurs et conditions du milieu.



◀ **Figure 4.** Relations entre la croissance et les composantes du rendement. a. Riz (d'après Durr [13]); b. Blé (d'après Boiffin *et al.* [11]); c. Soja (d'après Pigeaire [12]).

Figure 4. Relation between growth and yield components. a. Rice (from Durr [13]); b. Wheat (from Boiffin *et al.* [11]); c. Soybean (from Pigeaire [12]).

la séquence de talles avec le schéma théorique de la *figure 5* permet de diagnostiquer une alimentation non limitante jusqu'au moment de l'observation.

Pigeaire [9] pour le soja et Jeuffroy [17] pour le pois montrent que l'on peut utiliser dans le même esprit les différences de nombres de grains entre étapes florifères pour dater les accidents de végétation ayant affecté la fertilité des tiges.

Tableau 3

L'observation du tallage herbacé comme outil de diagnostic des conditions de nutrition

Échantillons de plantes	Plante n° 1	Plante n° 2	Plante n° 3
	Nombre de feuilles observées		
Brin Maître	7	7	5
T ₁	4	4	2
T ₂	3	3	1
T ₃ -T _{1p}	2	2	n'existe pas
T ₄ -T ₁₁ -T _{2p}	1	n'existe pas	n'existe pas

(d'après Masle [14, 15])

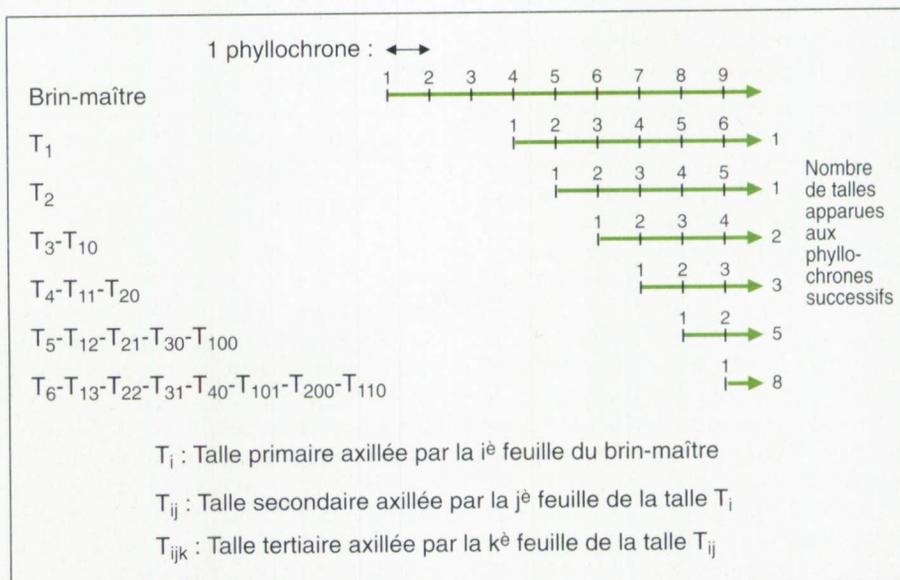


Figure 5. Loi d'apparition des talles et feuilles sur une plante de céréale à paille (blé, riz, orge...) en conditions d'alimentation non-limitantes (d'après [15, 16]).

Figure 5. Order of appearance of tillers and leaves on a straw-type cereal (wheat, rice, barley, etc.) under non-restrictive conditions of nutrition (from [15, 16]).

Deuxième étape du diagnostic : quelle est l'origine de la limitation de la production ?

Les indicateurs susceptibles de révéler un dysfonctionnement de la culture sont nombreux et nous n'en établissons pas une liste exhaustive.

Il nous semble surtout important de montrer comme s'organise la complémentarité entre les informations concernant la plante, données par des indicateurs de son état nutritionnel, et les informations relatives au milieu. Nous illustrerons cette complémentarité sur le cas de l'azote :

- comment mettre en évidence que la nutrition azotée est à l'origine d'une baisse de production ?

- comment identifier la caractéristique du système de culture ou du milieu qui est à l'origine du manque d'azote ?

La caractérisation du statut azoté des cultures a fait l'objet de nombreux travaux, dont on trouvera une synthèse dans la référence [18] ; selon les auteurs, différents critères ont été privilégiés : quantité totale d'azote absorbé, teneur en azote total ou teneur en nitrate de différents organes ou de la plante entière...

La mise en évidence, par Lemaire et Salette [19] du modèle de « dilution » de l'azote (décroissance de la teneur en azote en relation avec l'augmentation de biomasse, ajustée à une fonction « puissance ») a permis une avancée intéressante dans le diagnostic de nutrition azotée pour de nombreuses espèces [20, 21]. Sur la *figure 6*, on a représenté, à deux dates séparées d'un mois, la correspondance entre la biomasse aérienne de peuplements prairiaux (fétuque élevée) en parcelles d'agriculteurs, et leur teneur en azote (d'après [22]). Les courbes indiquent, pour chacune des dates, la teneur en azote de peuplements non carencés, d'après le modèle de Lemaire et Salette [19]. A la première date d'observation, 7 parcelles sur 15 ont déjà des teneurs très inférieures à la référence, ce qui témoigne d'une

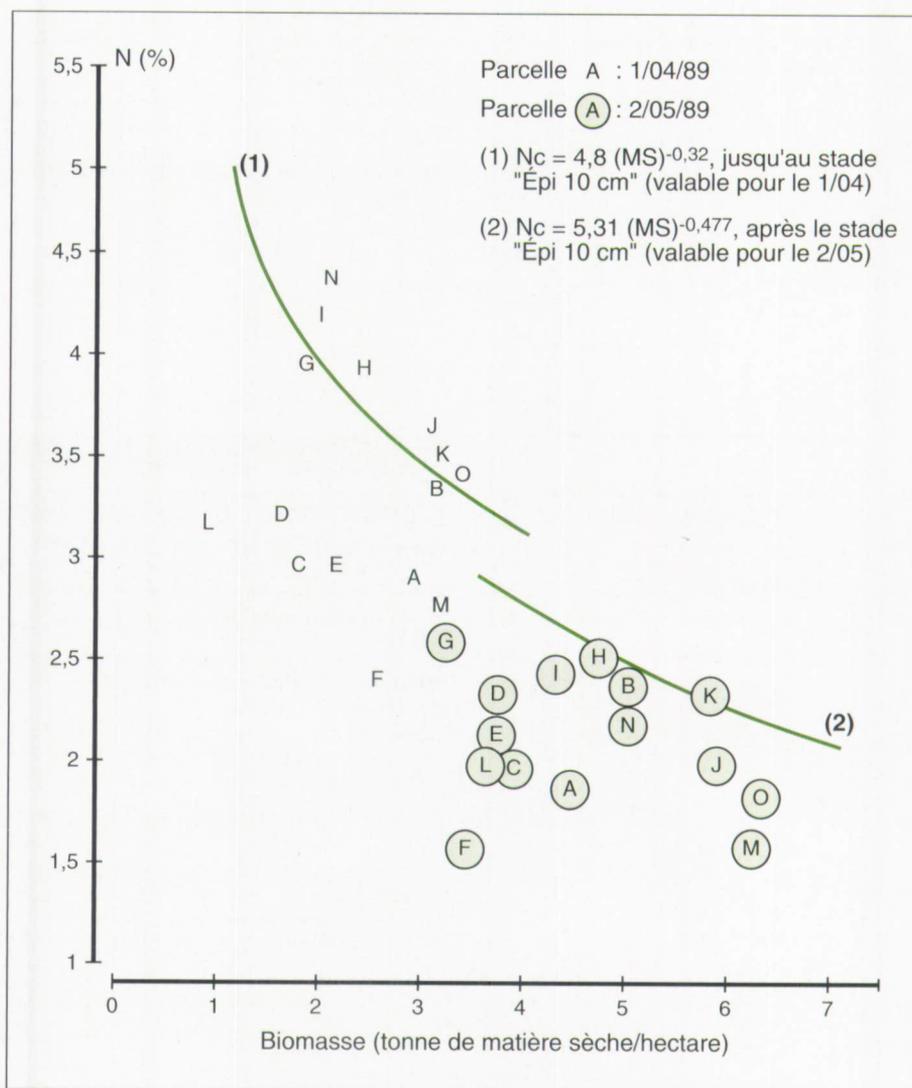


Figure 6. Teneurs en azote de différentes parcelles, comparées à la courbe de référence « azote non limitant » (courbe NC) (d'après Lemaire et Salette [19]).

Figure 6. Nitrogen content of different plots, compared to a « non-nitrogen-limited » reference curve (NC curve) (from [18]).

carence en azote ; à la deuxième date, le déficit nutritionnel tend à s'accroître : seules 4 parcelles restent à moins de 10 % de la référence.

Sur les mêmes peuplements de fétuque, la nutrition phosphorique a été appréciée grâce à la confrontation du rapport P/N à la référence établie par de Montard (carence probable si $P/N < 0,12$; [23]). Les diagnostics de nutrition ainsi réalisés sont cohérents avec les vitesses de croissance (*Tableau 4*) : sur toutes les parcelles, à l'exception d'une, l'azote ou le phosphore sont limitants, et la vitesse de crois-

sance est inférieure à la vitesse potentielle établie par Lemaire [4] dans un milieu voisin (12 à 14 kg de matière sèche par hectare et par degré.jour) ; les vitesses de croissance les plus faibles sont observées lorsque azote et phosphore sont tous deux limitants. Gonzalez-Montaner *et al.* [24] montrent sur le blé, que la teneur en nitrate de la plante entière ou d'un organe précis est un indicateur plus sensible de l'installation d'une carence azotée que la teneur en azote total. Cependant, ainsi que le montre Justes (travaux en cours), ce critère ne per-

Tableau 4

Nutrition phosphorique, nutrition azotée et croissance de la fétuque élevée sur un réseau de parcelles d'agriculteurs

Diagnostic de nutrition phosphorique	Diagnostic de nutrition azotée	Vitesse de croissance		
		8 à 10 kg de MS/ha/d.j	6 à 8 kg de MS/ha/d.j	< 6 kg de MS/ha/d.j
$P/N \geq 0,12$	$N \geq 0,9.N_c$	(K)		
	$N < 0,9.N_c$	(O) (N) (M) (J) (L)	(C)	(A)
$P/N < 0,12$	$N \geq 0,9.N_c$		(B) (I) (H)	
	$N < 0,9.N_c$		(D)	(E) (F) (G)

(d'après David et Meynard [22])

* N_c : teneur en azote de référence, estimée par le modèle de Lemaire et Salette [19].

met plus de caractériser l'intensité d'une carence une fois celle-ci installée. Dès lors qu'on a identifié le facteur de croissance qui est à l'origine de la limitation de la production, il est plus aisé de déterminer les caractéristiques du milieu ou du système de culture en cause. Pour rester sur l'exemple de l'azote, on essaiera d'appréhender :

- les quantités d'azote présentes dans le sol sur l'ensemble du cycle et, si possible, aux différentes étapes de celui-ci ;

- les conditions d'absorption de cet élément : densité, aération, état sanitaire des racines, humidité du sol...

Dans le cas présenté sur la *figure 6* et le *Tableau 4*, les carences en azote les plus précoces ont été attribuées à un excès d'eau observé au mois de mars sur les parcelles les moins bien assainies, et quasi généralisé en avril suite à une séquence pluvieuse prolongée ; l'hypoxie racinaire induite par l'excès d'eau a pu être aggravée par l'existence de tassements du sol, puisque l'on note que les 4 parcelles où la teneur en azote reste proche de la référence sont peu tassées, au contraire de la plupart des autres [22].

Appliquée à un réseau expérimental, la même démarche permet de mettre en évidence les caractéristiques du milieu interférant avec la technique

étudiée. Ainsi, sur un réseau d'essais de fertilisation azotée du blé où l'on testait le modèle français de raisonnement des doses d'engrais (bilan prévisionnel [25]), on a mis en évidence l'existence de plusieurs types de courbes de réponse du nombre de grains/m² à la fertilisation, et relié chaque type à des états du milieu particuliers (*figure 7*, d'après [26]) :

- courbe de réponse présentant un plateau à un niveau bas en cas de déficit hydrique prolongé, d'attaque précoce de piétin verse (*Cercospora herpotrichoides*), et sur les sols pauvres en potassium (courbes β) ;

- courbe de réponse continûment ascendante, mais avec une pente inférieure à la prévision en cas de structure compacte de la couche arable (courbes γ).

Les progrès de la connaissance des fonctions physiologiques et du comportement des sols permettent une amélioration constante des indicateurs disponibles. Deux difficultés doivent cependant être soulignées :

- Le pas de temps auquel les indicateurs réagissent peut être inadéquat par rapport à l'étude de l'ensemble d'un cycle cultural ; le cas des indicateurs de l'état hydrique des plantes en est un bon exemple : celui-ci peut être caractérisé, soit directement par le poten-

tiel ou la teneur en eau des feuilles, soit indirectement par la conductance stomatique, la température de surface du couvert ou les variations morphologiques de certains organes [27-29]. Toutes ces variables ont cependant deux inconvénients : leur variabilité au cours de la journée, qui oblige à réaliser les mesures dans des conditions standard (heure, ensoleillement...) pour pouvoir effectuer des comparaisons ; leur très grande sensibilité au stress hydrique instantané qui les fait réagir dans des situations où la croissance ou l'élaboration du rendement ne seront pas forcément affectées : il faudrait pouvoir intégrer ces indicateurs de stress sur plusieurs jours, mais se posent alors des problèmes météorologiques importants, dès lors que l'on travaille sur un réseau de parcelles.

- L'existence d'une grande hétérogénéité microlocale du milieu, inhérente au champ cultivé : tassements par des roues d'engins mécaniques, modelés de terrain (buttes, billons), andains de matière organique, brûlis hétérogènes... La mise au point de méthodes de caractérisation de cette hétérogénéité est souvent un préalable à l'étude des effets des systèmes de culture sur la production [30]. La méthode du profil cultural, imaginée par Hénin *et al.* [31] et perfectionnée par Manichon [32, 33] a constitué un progrès important pour la prise en compte de l'hétérogénéité latérale et verticale de structure du sol et de répartition des matières organiques. Un exemple de l'utilisation de la partition latérale du profil à des fins diagnostiques est donné par Roger-Estrade [34].

Exemple de diagnostic régional

La démarche qui vient d'être détaillée, est appliquée ici à l'identification et à la hiérarchisation des facteurs limitants du rendement du blé d'hiver dans une région.

Ce diagnostic régional est fondé sur le suivi d'une trentaine de parcelles de blé chaque année, plusieurs années de suite. Pour qu'il ait une valeur régionale, les parcelles ont été choisies en fonction :

- du sol : on échantillonne tous les types de sol de la région ;

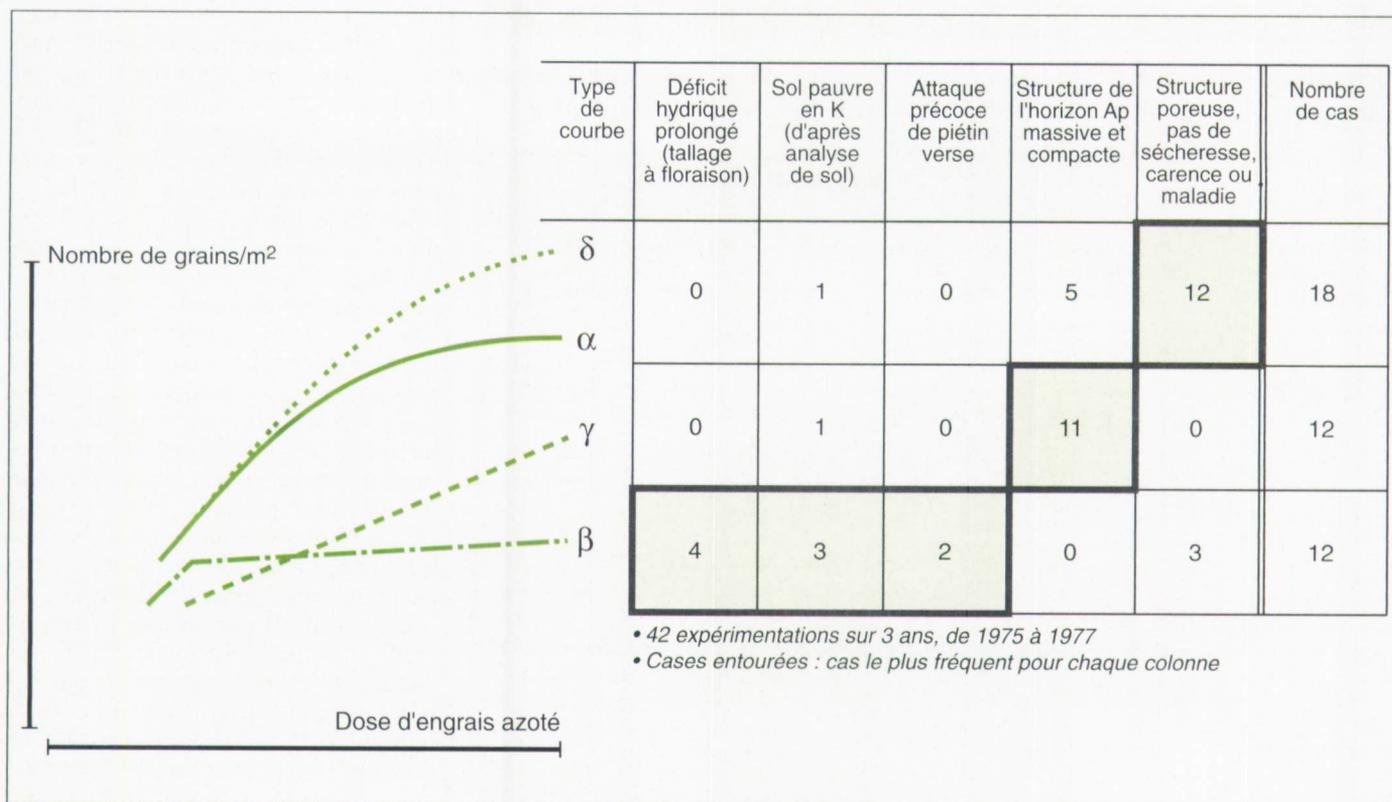


Figure 7. États du milieu et types de réponse à l'engrais azoté (d'après Meynard *et al.* [26]).

Figure 7. Environmental conditions and types of response to nitrogenous fertilizer (from Meynard *et al.* [26]).

Tableau 5

Les contrôles effectués

Toute l'année : relevés climatiques et techniques culturales

– Choix des stations : au semis ou courant hiver : prélèvements de terre pour analyses granulométriques ou chimiques (P, K, Mg, C, N)

Sortie d'hiver : (20/02 au 1/03)

– Nombre de plantes/m² ; nombre de feuilles des brins-maîtres
 – N.NO₃ et N.NH₄ sur 120 cm

Début de montaison (stade « Epi 1 cm »)

– Nombre de plantes/m² ; biomasse aérienne/m² ; teneur en azote
 – Séquence de tallage
 – Maladies des gaines et des racines
 – Profil cultural (structure, enracinement, matière organique)

Fin juin ou début juillet (stade laiteux ou laiteux-pâteux)

– Appréciation du stade du grain ; nombre de feuilles chlorophylliennes
 – Proportion nécrosée de la surface des différentes feuilles ; proportion d'épillets blancs ; diagnostic des maladies
 – Verse (angle, proportion de la surface touchée) ; adventices (nombre, nature)
 – Profil cultural

Maturité

– Composantes du rendement (nombre d'épis/m², nombre de grains/m², poids moyen d'un grain)
 – Verse, adventices ; maladies caulinaires
 – Poids de paille ; teneur en azote de la paille et des grains (facultatif selon déficit climatique : suivi de l'humidité du sol)

- du système de culture et des caractéristiques des exploitations agricoles [1, 35].

Sur cet échantillon représentatif, on a réalisé les différentes observations nécessaires au diagnostic (*Tableau 5*) :

- composantes du rendement,
 - états du peuplement et du milieu susceptibles d'expliquer les différences de production (les contrôles sont choisis à partir d'hypothèses issues de la connaissance de la culture).

Les résultats essentiels sont présentés *Tableau 6* et *figures 8 et 9* :

- L'examen des corrélations entre le rendement et ses composantes montre que les variations de production sont en majeure partie créées avant la floraison (rendement plus corrélé au nombre de grains/m² qu'au poids d'un grain). Le poids d'un grain a cependant eu un rôle plus déterminant en 1981 qu'en 1982 (*Tableau 6*).

- Les variations du poids d'un grain sont expliquées par les maladies de la base de la tige et par la verse (*figure 8*). L'évaluation des quantités d'eau disponibles montre que la nutri-

Tableau 6

Coefficients de corrélation entre le rendement et ses composantes

	Variété Fidel			Variété Lutin		
	Rendement NG/m ² **	P1G**	Effectif	Rendement NG/m ²	P1G	Effectif
Enquêtes						
1981	0,82	(0,58)	7	0,91	0,83	12
1982	0,93	(-0,18)	10	(0,63)	(-0,23)	8
1981-1982	0,82	(0,35)	17	0,96	0,79	20
Essais						
1981	0,90	0,51	19	0,84	0,63	12
1982	0,87	(-0,17)	8	0,89	(0,36)	6
1981-1982	0,83	0,68	27	0,72	0,67	18

(d'après Meynard [35])

* NG/m² = Nombre de grains/m²; ** P1G = Poids d'un grain

Les coefficients entre parenthèses ne sont pas significatifs au seuil de probabilité 5%

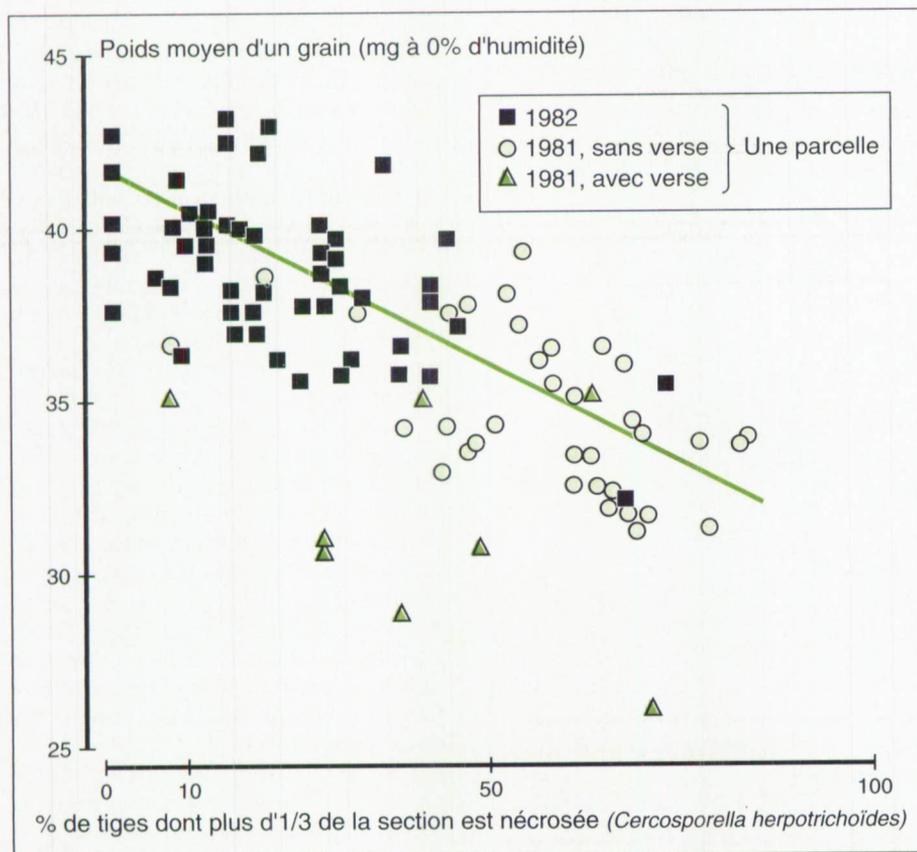


Figure 8. Maladies de la base de la tige, verse et poids moyen d'un grain sur un réseau de parcelles d'agriculteurs (d'après Meynard [35]).

Figure 8. Stem base diseases, lodging, and mean seed weight in a network of farmer's plots (from Meynard [35]).

Références

- Lemaire G. Diagnostic de la nutrition azotée d'une prairie de graminées. *Perspectives Agricoles*, 1987; 115: 145-7.
- Greenwood DJ, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson JJ. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *An Bot* 1990; 66: 425-36.
- David G, Meynard JM. Diagnostic sur les effets des systèmes de culture et des modes de contrôle de l'eau sur prairie de fétuque élevée dans les Marais de l'Ouest. *CR Acad Agric Fr* 1990; 7/6(8): 105-14.
- de Montard FX. Pratiques de la fumure de fond, phosphatée et potassique, sur prairie. *Persp agric* 1988; 127: 104-13.
- Gonzalez-Montaner JH, Meynard JM, Mary B. 1987. Contrôle de la nutrition azotée du blé par l'analyse des nitrates dans la plante. *CR Acad Agric Fr*, Spécial Azote (sous presse).
- Remy JC, Hebert J. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C R Acad Agric Fr* 1977, 63(11): 700-10.
- Meynard JM, Boiffin J, Caneill J, Sébillotte M. Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne Crayeuse. II - Types de réponse à la fumure azotée et application du bilan prévisionnel. *Agronomie* 1981; 1(9): 795-806.
- Katerji N, Itier B, Ferreria I. Étude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride. *Agronomie* 1988; 8: 425-33.
- Shonfeld MA, Johnson RC, Carver BF, Mornhinweg DW. Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. *Crop Sci* 1988; 28: 526-31.
- Tardieu F, Katerji N, Bethenod O. Relations entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le maïs. *Agronomie* 1990; 10: 617-26.
- Milleville P. Approche agronomique de la notion de parcelle en milieu traditionnel africain: la parcelle d'arachide en Moyenne Caramance. *Cah ORSTOM, Sér Biol* 1972; 17: 23-37.
- Hénin S, Gras R, Monnier G. *Le profil cultural: l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques*. Paris: Masson, 1969; 332 p. (1^{ère} édition: 1960).
- Manichon H. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Doct Ing INA-PG, Paris, 1982; 214 p + annexes.
- Gautronneau Y, Manichon H. *Guide méthodique du profil cultural*. Lyon, Paris: CEREF/GEARA édés, 1987; 71 p.
- Roger-Estrade J. Effet du travail du sol sur la localisation et l'accessibilité des éléments minéraux; conséquences sur l'élaboration du rendement du maïs (*Zea mays* L.). *Sci Sol* 1991; 29(2): 159-73.
- Meynard JM. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse Doct Ing, INA-PG, Paris, 1985, 258 p.
- Jouve P. Le diagnostic agronomique, préalable aux opérations de recherche-développement. *Cah Rech Dév* 1984; 3/4: 67-75.
- Sébillotte M. Les démarches de l'agronome en situations paysannes; éléments de réflexion. *4th Thailand National Farming Systems Seminar Prince of Songkla University*. Haad Yai Thailand 1987.
- Byerlee D, Thriomphe B, Sébillotte M. Integrating agronomic and economic perspectives into the diagnostic stage of on-farm research. *Expl Agric* 1991; 27: 95-114.
- Zandstrat HG, Price EC, Litsinger JA, Morris RA. A methodology for on-farm cropping systems research. IIRI, Los Banos 1981; 149 p.
- Perrin RK, Winkelman DL, Moscardi ER, Anderson JR. From agronomic data to farmer recommendation. An economic training manual. CIMMYT, *Inf Bull* 1979; 27: 51.

Summary

Diagnosis of crop yield elaboration

J.-M. Meynard, G. David

The aim of an agronomical diagnosis is to identify a posteriori the environmental conditions and the characteristics of the cropping systems which have influenced the production of a crop. When carried out on a representative sample of farmers fields, the agronomical diagnosis allows to organize into a hierarchy the limiting factors of the crop production (figures 8 et 9), therefore defining in a region the priorities concerning technical advice or experimental programs. When applied on an experimental network, agronomi-

cal diagnosis allows to identify the environmental conditions which interfere with the studied techniques, and then to adapt the advice to these conditions (figure 7). The agronomical diagnosis is thus an important tool for research on cropping systems improvement, involving the variability of local conditions (pedological, climatic, economical or social).

In such a research, it is dangerous to establish direct relationships between the techniques or the environmental variables, and crop production, because of the risks of confusing effects (figure 1). It is shown that the diagnosis should be realized in two steps :

- identification of the period(s) in the cycle, when the observed differences of production occur,
- identification of the origin of these

differences (limiting factors or conditions).

For each of these, a few efficient indicators are set out : for the dating, growth (figure 2), yield components (Tableau 2, figures 3 et 4) and branching or tillering structure (figure 5, Tableau 3) can be used in a complementary way. To identify limiting factors and conditions, it is necessary to characterize the nutritional status of the crop (figure 6, Tableau 4) and the environment (chemical, physical and biological characteristics, figures 7, 8 et 9).

At last, on different examples, it is shown that for diagnosis, it is interesting to compare the real data to models of crop production (figures 1, 2, 6, 9...).

Cahiers Agricultures 1992 ; 1 : 9-19.

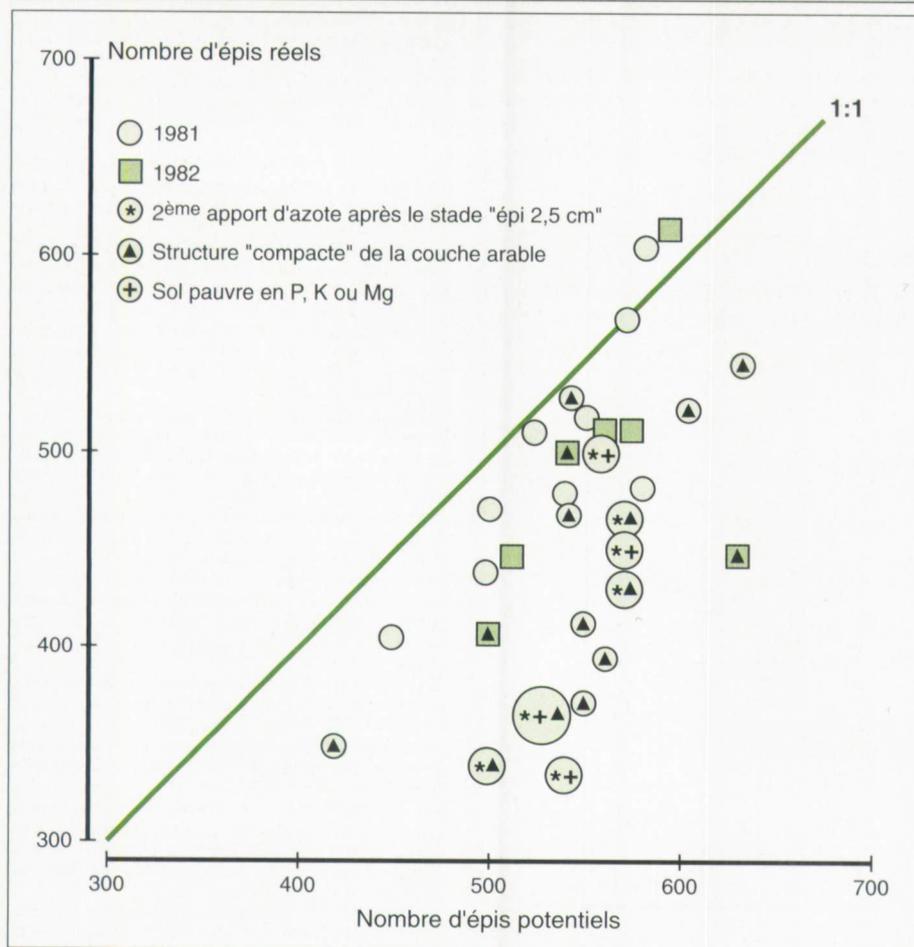


Figure 9. Confrontation, sur un réseau de parcelles d'agriculteurs, du nombre d'épis réel au nombre d'épis potentiel, estimés par le modèle de Masle [14]. Influence de l'état structural du sol, de la fertilisation azotée et de la richesse du sol en éléments minéraux (d'après Meynard [35]).

Figure 9. Comparison of the actual and potential numbers of ears in a network of farmers' plots as estimated according to the Masle model [14]. Influence of soil structure, degree of nitrogenous fertilisation, and richness in mineral elements (from Meynard [35]).

tion hydrique n'a probablement pas été limitante.

- Les variations du nombre de grains/m² sont très liées à celles du nombre d'épis. On dispose d'un modèle de détermination du nombre d'épis potentiel, en fonction de la biomasse du peuplement au début de la montaison [14], qui permet de mettre en évidence l'influence de différents facteurs limitants : en confrontant le résultat des parcelles étudiées au modèle, on montre que les faibles nombres d'épis et de grains sont liés (figure 9) :

- à une structure compacte de la couche arable,
- à un apport d'engrais azoté réalisé trop tardivement : dans ce cas la baisse du nombre d'épis s'accompagne d'une carence en azote temporaire au début de la montaison, qui peut être mise en évidence par les mesures de teneur en nitrates [24],
- et, peut-être, à une trop faible richesse du sol en P, K ou Mg ; ce dernier effet cependant, ne peut être mis en évidence indépendamment des deux précédents.

La hiérarchie des facteurs limitants, établie à la suite de ce diagnostic, a conduit à mettre l'accent, dans les programmes d'expérimentation et de développement, sur les conditions de travail du sol, les dates d'apport d'engrais azoté et l'efficacité du traitement fongicide anti-piétin.

Conclusion

Le souci d'identifier les facteurs limitants réels de la production paysanne, en préalable à toute tentative de mise au point ou d'introduction d'innovation technique est aujourd'hui largement présent dans de nombreux travaux de recherche-développement (synthèses méthodologiques [36-40]). Nous avons tenté de montrer que les progrès du diagnostic agronomique permettent aujourd'hui d'envisager de donner à ce préalable des bases objectives : le diagnostic établi sur un échantillon représentatif de parcelles agricoles est beaucoup plus complet, circonstancié et fiable que l'avis d'un expert extérieur, si bon soit-il, ou la synthèse des opinions des paysans ou des experts locaux, qui ne disposent pas d'un recul suffisant. Les innovations mises en expérimentation dans un deuxième temps ont ainsi beaucoup plus de chances de répondre aux problèmes locaux ; nous avons vu qu'il est également possible d'appliquer la même démarche de diagnostic à des réseaux d'essais, ce qui permet d'affi-

ner l'adaptation des innovations à la diversité des situations agricoles. Le diagnostic agronomique apparaît ainsi comme un outil essentiel de l'amélioration des systèmes de culture.

Il repose sur la synthèse d'informations issues de tous les domaines en cause dans l'étude des relations entre sol, climat, peuplement végétal et techniques agricoles : agronomie, bioclimatologie, écophysiologie, malherbologie, phytopathologie, science du sol..., mais toutes ces informations passent au crible d'une grille d'interprétation cohérente : l'application, par différents spécialistes, de leur grille propre ne permet pas d'effectuer l'identification et la hiérarchisation des facteurs limitants recherchés ; ni l'analyse de sol, ni l'analyse de plantes (« diagnostic foliaire »), ni les composantes du rendement ne sont suffisantes pour effectuer un diagnostic, mais elles y contribuent ensemble.

La conception et l'amélioration d'une démarche de diagnostic, utilisable par des agronomes généralistes (comme il y a des médecins généralistes) constitue, nous semble-t-il, un thème de recherche prioritaire ■

Résumé

Le diagnostic agronomique vise à identifier *a posteriori* les caractéristiques du milieu et du système de culture ayant influé sur la production d'un peuplement végétal cultivé. Appliqué dans une région sur un échantillon représentatif de parcelles d'agriculteurs, il permet de hiérarchiser les facteurs et conditions limitants de la production dans les conditions locales, et donc de définir les actions prioritaires à entreprendre, en matière de conseil technique ou de programmes expérimentaux. Appliqué à un réseau d'expérimentations sur des techniques culturales, il permet d'identifier les facteurs et con-

ditions qui interfèrent avec les techniques étudiées et ainsi de définir le domaine de recommandation de celles-ci. C'est donc un outil de base pour une démarche d'amélioration des systèmes de culture intégrant la variabilité des conditions locales (pédoclimatiques, économiques ou sociales).

On montre que le diagnostic doit être réalisé en deux étapes :

- identification de la période du cycle cultural pendant laquelle se créent les différences de production constatées,
- identification de l'origine de ces différences (facteurs et conditions limitants).

On présente, pour chacune de ces étapes, différents indicateurs de diagnostic performants, issus de travaux de recherche récents.



Les chercheurs, les enseignants, les étudiants trouveront dans cet ouvrage le point actuel et les possibilités offertes par la maîtrise des cultures *in vitro* et des transferts de l'information génétique.

- Les biotechnologies du clonage des génotypes
- Les *in vitro*-variations ou variations somaclonales
- L'haploïdisation
- L'hybridation somatique
- Les technologies des transformations moléculaires
- Les nouveaux paramètres pour la création dans le domaine végétal

Co-édition UREF/AUPELF - John Libbey Eurotext

162 pages - 15,5 × 24 cm

ISBN 0 86196 221 4

60 FF (Prix préférentiel : Afrique, Asie, Amérique du Sud, Haïti), 120 FF (Autres pays)

BON DE COMMANDE

Veuillez m'adresser () exemplaire(s) de

Veuillez trouver ci-joint mon règlement à l'ordre de John Libbey Eurotext

Nom Prénom

Adresse

Ville Pays

À retourner à : John Libbey Eurotext
6, rue Blanche - 92120 Montrouge
Tél : 47.35.85.52 - Fax : 46.57.10.09