

Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse I. - Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional

J. Boiffin, Jacques Caneill, Jean-Marc Meynard, Michel Sebillotte

▶ **To cite this version:**

J. Boiffin, Jacques Caneill, Jean-Marc Meynard, Michel Sebillotte. 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), pp.549-558. hal-02727781

HAL Id: hal-02727781
https://hal.inrae.fr/hal-02727781

Submitted on 2 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Agronomie, 1981, **1** (7), 549-558.

Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse
I. - Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional

Jean BOIFFIN, Jacques CANEILL, Jean-Marc MEYNARD & Michel SEBILLOTTE (1)

I.N.R.A., Chaire d'Agronomie
Institut National Agronomique Paris-Grignon, 16, rue Claude-Bernard, F 75231 Paris Cedex 05.

RÉSUMÉ

On présente le protocole retenu pour étudier les causes de variation des rendements du blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) en Champagne crayeuse et les possibilités d'application de la méthode du bilan prévisionnel pour la détermination des fumures azotées.
On a retenu un dispositif pluriannuel et multilocal, associant différents types de parcelles d'enquête et d'expérimentation et ménageant des termes de passage entre toutes les situations observées (fig. 2). Les contrôles effectués (tabl. 4) sont sélectionnés en fonction d'un schéma d'élaboration du rendement du blé (fig. 3). En particulier, le nombre de grains par unité de surface est considéré comme un critère essentiel d'appréciation de l'effet des fumures azotées.
On discute en conclusion, l'intérêt de la démarche utilisée en vue d'un diagnostic régional sur une culture.

Blé d'hiver,
Fertilisation azotée,
Composantes du rendement,
Etude régionale,
Diagnostic au champ,
Enquête agronomique,
Expérimentation,
Choix des contrôles.

SUMMARY

Yield elaboration processes and nitrogen fertilization of winter wheat in Champagne crayeuse. I. - Design and methods for studying a technical problem on a regional

The object of this paper is to present the methodology chosen to study (a) the causes of variation of the yield of winter wheat in Champagne crayeuse and (b) possibilities involved in the application of the predictive balance method to determine nitrogen fertilization rates.
We retained a multiannual and multilocal design, combining different types of experimental and survey plots and ensuring possibilities of comparison between all the observed plots (fig. 2). Observed datas (tabl. 4) were selected according to a yield elaboration diagram (fig. 3). The grain number per unit area is considered as an essential criterion to evaluate nitrogen fertilization efficiency.
The conclusion discusses the advantages of this procedure for regional field diagnosis.

Winter wheat,
Nitrogen fertilization,
Yield components,
Regional investigation,
Diagnosis in field,
Field survey,
Field experiment,
Registered variables selection.

I. INTRODUCTION

A l'issue d'une succession de mauvaises récoltes de blé (1968 à 1971), les agriculteurs du Centre d'Etudes Techniques Agricoles de Romilly-sur-Seine (Champagne crayeuse (2)) se sont interrogés sur l'éventualité d'une dégradation de la fertilité de leurs sols.

Répondre à une telle question suppose un diagnostic préalable, consistant à détecter et hiérarchiser les principaux facteurs et conditions limitant les rendements dans le milieu considéré. Il est alors possible d'imputer la succession des mauvaises récoltes soit aux aléas climatiques et aux effets immédiats des techniques culturales, soit, au contraire, à une évolution défavorable du milieu sous l'action des systèmes de culture.

L'objet de cette série de mémoires est de présenter comment ont été collectées, puis interprétées en un temps relativement limité, les informations nécessaires pour élaborer ce diagnostic préalable et comment il a été possible de le traduire en recommandations pour les agriculteurs d'une petite région.

Une phase préliminaire a consisté en une enquête rétrospective (BOIFFIN & FLEURY, 1974) portant sur les rendements des principales cultures pratiquées par le C.E.T.A. On a alors constaté que, au cours des 15 dernières années, il

(1) L'ordre alphabétique correspond à une contribution sensiblement égale des différents cosignataires.

(2) « La Champagne crayeuse constitue une région naturelle définie par l'affleurement d'un substratum calcaire du Crétacé supérieur (étage Sénonien) avec le faciès particulier de la « craie », matériau tendre, très fortement carbonaté, poreux et toujours fissuré » (DUTIL & BALLIF, 1968).

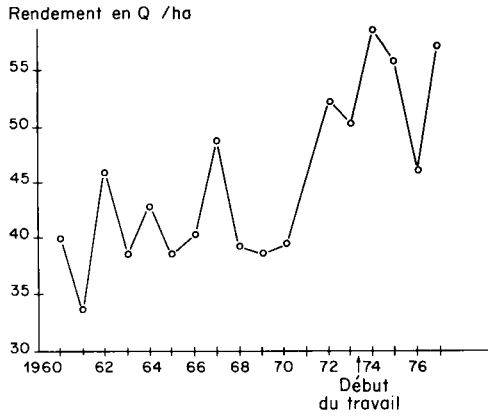


Figure 1

Évolution des rendements en blé de 1960 à 1977 (C.E.T.A. de Romilly).

Evolution of the winter wheat yield of the studied group of farms during the 1960-77 period.

n'y avait pas de baisse des rendements, mais, au contraire, une tendance à la hausse pour toutes les cultures ; cependant, pour le blé en particulier, ce gain moyen de 1 quintal par an s'accompagnait d'importantes fluctuations interannuelles (fig. 1) qui semblaient, en première approche, liées aux variations de la pluviométrie d'hiver et de printemps, les mauvaises années étant les plus pluvieuses. Ce fait correspond bien aux observations de SANSON (1948) dans une autre région du Bassin parisien.

Au vu de travaux déjà effectués dans un milieu voisin (DUTIL & BALLIF, 1971), cette liaison semblait devoir, pour partie, être imputée à l'effet des pluies sur la nutrition azotée du blé.

Par ailleurs, au sein d'une même année, certaines variations de comportement de la culture en fonction de la pluviosité locale, du type de sol et de l'histoire culturale semblaient également pouvoir s'interpréter dans le sens d'une influence prédominante des conditions de nutrition azotée.

L'étude proprement dite débute sur le terrain pendant la campagne 1974-75. On retient la culture du blé comme objet d'étude, la considérant, en raison de la variabilité de ses résultats, de son importance en surface, mais aussi des connaissances acquises sur ce peuplement végétal, comme l'un des meilleurs moyens d'analyse des problèmes agronomiques de la région.

L'hypothèse de départ consiste à poser que la régularisation des rendements à un haut niveau passe en priorité par une adaptation de la fertilisation azotée aux variations des états du milieu, dans l'espace et dans le temps.

La méthode du bilan prévisionnel, proposée par HÉBERT (1969), est, pour l'instant, la seule méthode de détermination des fumures azotées qui permette de répondre rationnellement à cette exigence.

Le travail entrepris vise donc trois objectifs :

1) Vérifier que la nutrition azotée est bien le principal facteur de variation des rendements.

2) Tester la méthode du bilan prévisionnel proposé.

3) Comprendre l'influence des états du milieu sur l'application de la méthode pour pouvoir l'extrapoler et, le cas échéant, la rectifier.

Le mémoire qui suit présente le protocole conçu à cet effet.

Quatre mémoires ultérieurs porteront sur :

— L'analyse de différents types de réponse du rendement à la fertilisation azotée et des conséquences de ces variations sur l'application de la méthode du bilan prévisionnel,

— L'adaptation de la conduite du blé aux variations spatiales du milieu,

— L'analyse des conditions de croissance des grains,

— La recherche du fractionnement optimum de la fumure azotée.

II. RAPPEL DE LA MÉTHODE DU BILAN PRÉVISIONNEL

A. Principe de détermination de la dose globale

La dose globale de fumure azotée (doxe X) est déduite d'une équation de bilan dans laquelle tous les autres postes sont estimés ou mesurés (HÉBERT, 1969, complété par HÉBERT, 1975 ; I.T.C.F., 1975 et 1978 ; RÉMY & HÉBERT, 1977).

On peut écrire :

$$X = (3\,R + N_{réc}) - (N_{hiv} + N_{rés} + N_{hum})$$

Ce calcul est subordonné :

— *au choix d'un objectif de rendement R* (60 Q/ha en 1975, 70 Q/ha en 1976 et 1977) ; les besoins du blé sont estimés à 3 kg d'azote par quintal de grain de l'objectif R (COÏC, 1956) ;

— *à la mesure, sur chaque parcelle, des reliquats d'azote minéral* en fin d'hiver (N_{hiv}) sur la profondeur de sol théoriquement exploitée par les racines du blé. D'après les références disponibles au début de l'étude, une valeur moyenne de 60 cm paraissait probable en Champagne crayeuse ;

— *à l'estimation des autres paramètres :*

• reliquat en terre à la récolte ($N_{réc}$) : on fixe une valeur arbitraire de 10 kg par couche de 30 cm de profondeur, correspondant sensiblement à une quantité d'azote difficilement utilisable par la culture ;

• azote minéralisé par les résidus organiques récents ($N_{rés}$) :

Betterave : 25 kg/ha
Luzerne : 45 kg/ha
Maïs : 0 kg/ha

Références provisoires adoptées par l'I.T.C.F. (1975 et 1978) à des fins d'expérimentation ;

• azote minéralisé par l'humus du sol (N_{hum}) :

Vieille culture : 20 kg/ha
Défriche récente : 30 kg/ha

Références de la station I.N.R.A. de Chalons-sur-Marne.

B. Fractionnement et dates d'apport

La dose X est fractionnée en deux apports : le premier (Y) est fait au stade A (apport tallage) ; le second au début du redressement (sommet de l'épi à 1 cm du plateau de tallage, voisin du stade B_{II} — pour les notations de stade utilisées, cf. MASLE-MEYNARD ; 1980 — soit juste avant la forte accélération des besoins en azote du blé début montaison.

La dose Y est calculée en écrivant un premier *bilan prévisionnel* sur la période allant de la mesure des reliquats à la date du second apport. Les besoins du blé sont estimés à

45 kg/ha ; on tient compte du reliquat d'azote minéral assimilable sur 40 cm (profondeur prévue pour les racines au stade B_{II}) et de l'azote déjà absorbé par le blé en sortie d'hiver. Le résultat du bilan est modulé en fonction de l'état du blé en sortie d'hiver, c'est-à-dire de son stade et de sa densité de peuplement (Y est d'autant plus fort que le blé est moins avancé (I.T.C.F., 1975 ; RÉMY & HÉBERT, 1977)).

Cette méthode de calcul aboutit à une diversification des modes de fumure (tabl. 1) :

— les doses globales sont adaptées au climat de l'année, au précédent, à l'histoire culturale, à la profondeur probable d'enracinement ;

— le fractionnement est raisonné en fonction des besoins probables du peuplement végétal : le premier apport est normalement faible et modulé selon l'état de la végétation en sortie d'hiver ; le second, élevé et précoce, est strictement calé sur le début de la phase d'absorption rapide.

Le traitement expérimental correspondant à l'application de cette méthode de fixation des fumures sera noté (X, Y).

TABLEAU 1

Doses (Traitements X Y) et dates des épandages d'azote (exemple des essais)
Rates (X Y Treatment) and dates of nitrogen application (experimental plots)

Campagne	Essai	Date de semis	Nombre de pieds/m²	Objectif de rendement Qx/ha	Dose globale d'azote (kg/ha)	Dose tallage (stade A) (kg/ha)	Date d'application	Dose montaison (stade « 1 cm») (kg/ha)	Date d'application
	ENE	12.11	260	60	130	20	04.03	110	22.04
1974-75	ECE	12.11	290	60	130	20	15.03	110	09.04
	ESO	07.11	325	60	125	15	05.03	110	24.04
	ENO	01.12	260	70	140	40	23.03	100	28.04
1975-76	ESU	01.12	340	70	140	40	23.03	100	26.04
	ECA-ECO	25.11	390-250	70	130	40	23.03	90	23.04
	EON	22.11	250	70	170	60	16.03	110	15.04
1976-77	EEB	15.11	270	70	170	60	14.03	110	18.04
	EER	15.11	250	70	170	60	14.03	110	18.04

II. LE DISPOSITIF

A. Le dispositif est pluriannuel et multilocal

Pour pouvoir analyser le rôle du milieu vis-à-vis de la croissance et de l'élaboration du rendement, il était nécessaire de répartir les stations d'étude dans des situations climatiques et pédologiques aussi contrastées que possible.

1. *Les variations du climat* ont été obtenues en étudiant 5 campagnes successives. Seules les 3 premières, dont les résultats constituent la base du diagnostic, sont présentées ici.

Les campagnes 1974-75 et 1976-77 (Cf. annexe) se caractérisent par :

- un automne pluvieux ayant entraîné de mauvaises conditions pour la récolte des betteraves et l'implantation des blés,
- un hiver doux, favorable au développement des maladies cryptogamiques,
- un printemps plus froid que la normale et assez humide.

Les 2 années se différencient en fin de végétation ; en 1975, juin et juillet sont secs et le déficit climatique atteint à la moisson (fin juillet) 205 mm, alors qu'en 1977, ces mois sont frais et humides et le déficit n'atteint que 65 mm à la même époque.

Au contraire, en 1975-76, les pluies cumulées de l'automne et de l'hiver sont inférieures à la normale. Les températures d'hiver et de début de printemps sont proches des normales ; mais tout au long du printemps, les pluviométries restent faibles et le déficit climatique débute fin février. Les températures et l'E.T.P. deviennent élevées en mai et juin ; le 10 juillet, à la récolte, le déficit climatique atteint 339 mm à Romilly ; on note fin juin, pendant le palier hydrique, des températures maximales supérieures à 30°, susceptibles de provoquer l'échaudage des grains (GESLIN & JONARD, 1948). Les résultats de cette campagne, dominée par les effets de la sécheresse, ont fait l'objet d'une publication antérieure (SEBILLOTTE *et al.*, 1978).

D'autre part, l'enquête préliminaire (BOIFFIN & FLEURY, 1974) et une étude fréquentielle du climat de la région (MASLE-MEYNARD & MEYNARD, 1976) ont montré que le nord de la zone étudiée est généralement plus pluvieux que le sud. Afin de tenir compte de cette hétérogénéité climatique, on a expérimenté chaque année dans les différentes parties de cette zone d'étude.

En pratique, les différences climatiques ne se sont pas manifestées au cours des 3 campagnes présentées ici. Ainsi, nous considérerons par la suite la petite région comme homogène quant au climat, sauf au printemps 1976 où la répartition des orages a créé des différenciations locales. L'utilisation des relevés pluviométriques des agriculteurs a permis d'en tenir compte.

2. *La plupart des sols* dérivent d'une formation pédologique très fréquente dans ce milieu : les rendzines développées sur paléosol cryoturbé (DUTIL & BALLIF, 1968) ; mais on rencontre aussi des rendzines ou des sols bruns calcaires développés sur des formations colluviales ou alluviales. Les agriculteurs opposent 2 principaux types de comportement des sols, désignés par les appellations vernaculaires « Terre blanche » et « Terre rouge ». Les « Terres blanches » sont légèrement moins colorées ; le démarrage des cultures de printemps y est plus lent qu'en Terre rouge, alors qu'en été, elles assurent une meilleure alimentation hydrique des cultures.

Ces appellations vernaculaires ont servi de guide au choix des stations. On montrera dans le 3e mémoire de cette série qu'elles correspondent à des différences pédologiques objectives.

B. Le dispositif associe enquête et expérimentation

Compte tenu de l'hypothèse de base, on fait varier :

— d'une part, les principaux éléments techniques susceptibles d'interférer avec la nutrition azotée de la culture (précédent cultural, type de sol, âge de la défriche). Leur effet est nécessairement étudié par *enquête,* selon une méthode mise au point pour un problème similaire par MANICHON & SEBILLOTTE (1973) : on compare, dans une même parcelle culturale, 2 stations, différant par un seul critère (type de sol ou précédent, ou âge de défriche), qui constituent un couple de *parcelles types ;*

— d'autre part, la fertilisation azotée, nécessairement par *expérimentation. Les essais* permettent ainsi de vérifier l'influence de la nutrition azotée, d'en analyser les effets et de tester la méthode du bilan prévisionnel.

1. *Les essais*

Au cours des 3 campagnes d'étude, 10 essais de fumure azotée ont été réalisés et répartis au sein de la zone d'étude de la façon suivante :

- au Nord-Est de la vallée de la Seine : essais E.N.E. en 1975, E.N.O. en 1976, E.E.B. et E.E.R. en 1977 ;
- au Sud-Ouest de la Seine : essais E.S.O. en 1975, E.S.U. en 1976, E.O.N. en 1977 ;
- dans la vallée de la Seine : essais E.C.E. en 1975, E.C.A. et E.C.O. en 1976.

Tous les essais sont implantés sur Terre blanche, précédent betterave, sauf en 1977 où l'un des essais a été répété en Terre rouge.

On a retenu les variétés les plus cultivées au sein du C.E.T.A. : « Joss » en 1975, « Talent » et « Top » en 1976, « Talent » en 1977 ; les dates et les densités de semis sont les plus voisines possibles entre essais (tabl. 1).

Les traitements consistent à combiner 3 doses globales (X, X − 40, X + 40 unités) à 3 doses tallage (Y, Y − 40, Y + 40) ; les doses montaison qui en découlent sont indiquées dans le tableau 2. Chaque essai comprend également un témoin non fertilisé, destiné à apprécier la fourniture d'azote par le milieu.

TABLEAU 2

Traitements des essais de fumure azotée : doses montaison en fonction de la dose globale et de la dose au tallage

Experimental design for nitrogen application : nitrogen application rates at the beginning of shoot elongation as resulting from total rate and first application rate

	Dose tallage		
Dose globale	Y − 40 (1)	Y	Y + 40 (1)
X − 40 (1)	X − Y	X − Y − 40	X − Y − 80
X	X − Y + 40	« Traitement de base » X − Y	X − Y − 40
X + 40 (1)	X − Y + 80	X − Y + 40	X − Y

(1) en 1975 Y − 30, Y + 30, X + 30, X + 30

Ce protocole standardisé et mis en œuvre dans toute la France vise à adapter régionalement la méthode de fumure exposée ci-avant (I.T.C.F., 1975). En 1976 et 1977, l'étude de l'interaction nutrition azotée-infestation parasitaire s'étant révélée nécessaire, un traitement expérimental supplémentaire a été introduit : présence ou absence de fongicides. Le dispositif adopté est un split plot à 4 blocs (fongicide en grandes parcelles).

2. *Les parcelles types*

La parcelle type est une parcelle conduite selon les pratiques de l'agriculteur et présentant les caractéristiques de milieu et d'histoire culturale voulues par le protocole (Cf. C). En son sein, on choisit des stations homogènes (généralement 2, constituant un couple), qui diffèrent par le type de sol (Terre blanche-Terre rouge), plus rarement par le précédent cultural (betterave sucrière et maïs ou graminées porte-graines).

On suit ainsi en 1975, 24 stations de parcelles types (10 couples « type de sol », 2 couples « précédent ») ; en 1976, 31 stations (10 couples « type de sol », 6 couples « précédent ») et en 1977, 19 stations (7 couples « type de sol »).

La taille d'une station, 100 m^2 environ, est un compromis entre la recherche de l'homogénéité du sol et celle d'une échelle de travail compatible avec les largeurs de travail des outils agricoles, en particulier pour l'épandage d'azote. Cette surface est du même ordre de grandeur que celle d'une parcelle d'essai.

C. Le dispositif est conçu comme un ensemble cohérent

Il faut que les résultats des essais et des parcelles types puissent être rapprochés les uns des autres, pour permettre une interprétation générale, base de toute extrapolation : des termes de passage logique doivent être ménagés entre chacune des situations étudiées, notamment entre les situations d'enquête (stations des parcelles types) et les situations d'essai. Pour cela :

— le traitement azoté de base (X, Y) est appliqué sur *toutes* les situations ;

— chaque situation est définie par une liste de caractères jugés essentiels (type de sol, précédent cultural, ancienneté de la défriche, variété de blé). Ceux-ci peuvent être des objets d'étude (ils sont alors étudiés en couples dans les parcelles types) mais sont plus généralement des critères de sélection, d'élimination et de regroupement des situations étudiées.

Ainsi le dispositif a une *structure* qui le rapproche le plus possible de la structure orthogonale classique d'essai factoriel.

Cette structure idéale peut être schématisée selon la fig. 2. Elle est loin d'être totalement réalisable dans un tel contexte, mais *on a pu assurer des termes de passage entre toutes les situations, de telle sorte que tout « effet » puisse être rapproché de la courbe de réponse à l'azote des essais.* Cette structure est répétée par zone microclimatique.

D. Le dispositif assure un bon échantillonnage du milieu naturel et des conditions techniques de sa mise en valeur

Il est nécessaire que le diagnostic reflète fidèlement la réalité agricole, c'est-à-dire :

— d'une part, qu'il s'applique à des parcelles conduites

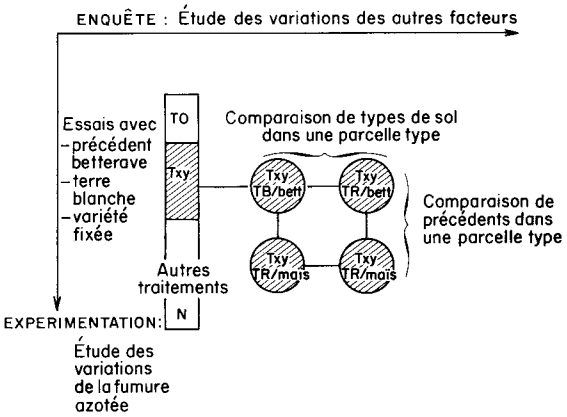


Figure 2

Schéma de construction du dispositif d'étude du blé à Romilly
Txy : traitement azoté de base
TB : terres blanches
TR : terres rouges
/bett : précédent betterave
/maïs : précédent maïs.

Connections between the different sorts of plots of the experimental design used for studying wheat in the Romilly area.

selon la pratique agricole. Sur les différentes parcelles suivies, aucune technique culturale, mis à part la fertilisation azotée, n'a été imposée aux agriculteurs. La hiérarchie des causes de variation du rendement n'aurait évidemment pas été la même si nous avions travaillé en station expérimentale (SEBILLOTTE, 1978 b) ;

— d'autre part, qu'une représentation non biaisée du milieu naturel soit assurée dans le dispositif. Or les comparaisons par couples des parcelles types imposent le choix de sols bien typés, c'est-à-dire de cas extrêmes.

En réponse à ces deux préoccupations, *on a rajouté au dispositif,* pour la 3e campagne (1976-77), *un réseau d'essais simplifiés* (nommés parcelles satellites) qui, par leur nombre (32) et leur répartition dans la région étudiée, permettent d'assurer un échantillonnage représentatif du milieu et des pratiques culturales.

Sur ces parcelles satellites, on ne cherche plus à identifier les facteurs et conditions limitant le rendement, mais à apprécier la généralité des hypothèses issues des résultats des essais et des parcelles types et concernant la nutrition azotée.

Pour cela, on compare 4 traitements azotés (doses X, X − 40, X + 40, avec des doses tallage « Y » identiques, témoin sans azote), dont les niveaux de rendement respectifs seront confrontés aux caractéristiques du milieu et du peuplement végétal mis en cause dans nos hypothèses.

IV. CHOIX DES CONTRÔLES

Les contrôles sont choisis pour permettre :

— la vérification *a posteriori* de la prévision de la fumure azotée, globalement, c'est-à-dire en comparant le rendement au rendement objectif, mais aussi, analytiquement, c'est-à-dire en évaluant les principaux postes du bilan ;

— la détection des causes de l'erreur — dans le cas où les doses d'engrais ont été mal évaluées — qui seule pourra déboucher sur la proposition d'améliorations spécifiques soit du mode de calcul des doses, soit d'autres éléments de l'itinéraire technique. La chronologie de l'élaboration du rendement est analysée dans ce but ;

— la connaissance du domaine de validité des conclusions issues des deux précédentes observations, en vue de leur extrapolation. Là encore, la compréhension des modalités d'élaboration du rendement est essentielle. En effet, la généralisation, dans l'espace et dans le temps, de conclusions issues de résultats ponctuels obtenus sous un nombre relativement restreint de circonstances climatiques, n'est possible que si l'on est capable de relier, pour chaque situation, le comportement de la végétation aux états du milieu. On peut ainsi :

- évaluer la fréquence de certains comportements au vu de celle des événements climatiques auxquels on les a imputés,
- se donner, en rattachant les conclusions agronomiques obtenues en un point à des données pédologiques susceptibles d'être cartographiées, des règles d'extrapolation dans l'espace des résultats obtenus.

A. Vérification de la prévision des doses d'engrais

— Vérification globale : contrôle du rendement ;

— Vérification analytique : outre la mesure du reliquat d'azote nitrique en sortie d'hiver, nécessaire pour le calcul des doses d'engrais, ont été contrôlés *a posteriori :*

- *le reliquat d'azote minéral en terre à la récolte* ($N_{réc}$). On le mesure 10 jours environ après celle-ci, à un moment où l'on peut espérer que les effets de la phase d'immobilisation intense qui a débuté avec la sénescence du système racinaire sont en partie dissipés (RÉMY & HÉBERT, 1977).
- *la quantité d'azote absorbé par la culture* (mesure du poids de paille, de balles, de grains, de la teneur en azote des pailles, des balles, des grains) ; forfaitairement, les quantités d'azote des parties aériennes ont été majorées de 25 p. 100 pour tenir compte de l'azote contenu dans les racines (COÏC, 1956).
- *les profondeurs d'enracinement réelles de la culture, au stade B et à la floraison* (stade d'extension maximale du système racinaire, BALDY, 1973), profondeurs sur lesquelles la plante est susceptible d'absorber l'azote minéral du sol.

B. Analyse de l'élaboration du rendement

Les contrôles sont choisis à la lumière d'un schéma d'élaboration du rendement (SEBILLOTTE, 1978 a), organigramme du système plante-milieu, qui explicite la nature et les modalités d'action des facteurs et conditions susceptibles d'intervenir dans la formation du rendement. Le schéma utilisé dans cette étude est donné à la figure 3.

Par souci de simplification, on n'a pas reporté sur ce schéma certaines variables dont la prise en compte s'est révélée inopérante (ex. : nombre d'épillets) ou sans objet dans le contexte de l'étude (ex. : adventices). En outre, ce schéma prend en charge les progrès dans les connaissances concernant l'élaboration du rendement du blé qui sont survenus depuis le début de l'étude (en particulier les travaux de J. MASLE-MEYNARD, 1980).

1. *Les composantes du rendement*

Reprenant une démarche déjà utilisée pour analyser l'influence des techniques culturales sur l'élaboration du rendement du blé et du maïs (BOIFFIN *et al.*, 1976), on divise le cycle du blé en 2 phases successives, correspondant à des processus bien différenciés et relativement indépendants :

— jusqu'à la fécondation, une phase de détermination du nombre de grains au m^2, qui correspond aussi à la mise en place de l'appareil foliaire et du système racinaire ;

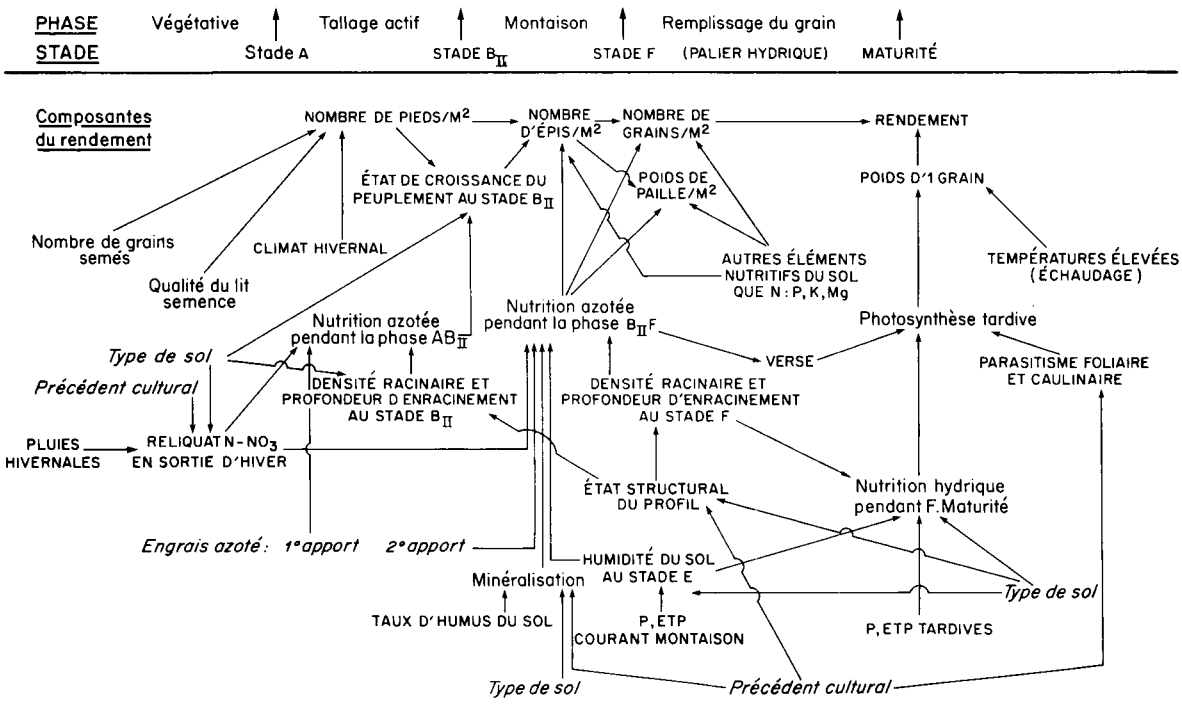


Figure 3

Schéma d'élaboration du rendement du blé (les contrôles effectués sur les essais et les parcelles types sont écrits en majuscules).
Scheme of the yield elaboration processes of winter wheat.

— une phase ultérieure plus courte de remplissage des grains formés, grâce à l'activité de l'appareil photosynthétique mis en place et sanctionnée par le poids de 1 000 grains.

Notons que cette division correspond à un *choix* qui tient compte des conditions de milieu du Bassin parisien. Dans des situations écologiques ou techniques très différentes, d'autres découpages auraient pu être plus pertinents.

Les variations des 2 composantes doivent être interprétées en relation avec les facteurs et les conditions de croissance pendant leurs phases d'élaboration respectives :

• Le poids d'un grain est surtout affecté par ce qui peut altérer le fonctionnement photosynthétique, parasitisme et défaut d'alimentation hydrique principalement ; les effets de la nutrition azotée, complexes et indirects, sont en général de faible ampleur vis-à-vis de ceux-ci.

• Le nombre de grains à l'unité de surface est étroitement corrélé au poids de paille, et ceci à toutes les échelles d'observation du peuplement végétal (surfaces de taille variable, pieds individuels, épis séparés) (BOIFFIN *et al.*, 1976 ; SEBILLOTTE *et al.*, 1978 ; MASLE-MEYNARD, 1980 ; SEBILLOTTE, 1980).

L'existence de cette relation est vérifiée pour chaque variété dans le cas étudié (fig. 4) avec une forme de liaison différente selon le cultivar. On est donc conduit à interpréter les variations du nombre de grains en relation avec celles des facteurs et conditions de la croissance, confrontés aux besoins du peuplement pendant la phase semis-floraison.

Or, jusqu'à la floraison, le blé absorbe environ 80 p. 100 de l'azote contenu dans le végétal à la récolte (données vérifiées dans le cas étudié, tabl. 3). En nette avance sur les rythmes de production de matière sèche et de minéralisation par le sol, l'absorption d'azote est très rapide à partir du stade B_{II}. Il en résulte que, sous climat tempéré à tendance océanique, la nutrition azotée est généralement, avant la lumière et l'eau, le premier facteur limitant de la croissance du blé pendant cette phase.

On est alors fondé à considérer le *nombre de grains par*

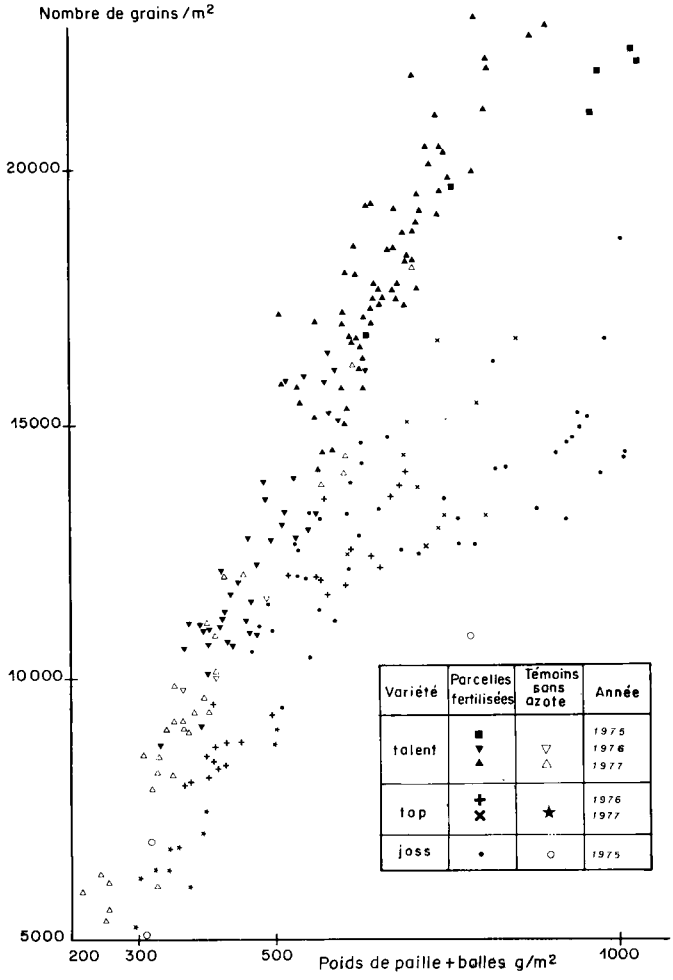


Figure 4

Variations du nombre de grains et du poids de paille à l'unité de surface (chaque point représente une situation et est la moyenne de 10 placettes).
Variations of grain number and straw weight per unit area.

TABLEAU 3

Azote contenu dans les parties aériennes à la floraison (en % de la quantité à la récolte)
Nitrogen content of aerial parts at flowering, as a per cent of nitrogen content at harvest

Traitement de base des essais		Résultats de JONARD ODENT (1967)	
Joss 1975	Talent 1977	Cappelle	Etoile de CHOISY
82,5 %	72,5 %	82,7 %	82,5 %

unité de surface comme un critère pertinent de la réponse à l'azote du blé, voire mieux approprié que le rendement, car ce dernier intègre la phase de remplissage des grains où interviennent d'autres facteurs que la nutrition azotée.

Cependant, pour juger de la nutrition azotée précoce, un critère supplémentaire est nécessaire : l'état de croissance du peuplement au stade B_{II} ; MASLE-MEYNARD (1980) a montré en effet que ce critère pouvait être considéré à la fois comme un indicateur de l'histoire passée du peuplement végétal et comme un prédicteur de son devenir pendant la montaison. L'analyse de l'élaboration du rendement va reposer sur une mise en regard du niveau des composantes et des états du milieu pendant leur phase de formation. Les contrôles du milieu et du peuplement végétal, faits à des stades charnière (sortie d'hiver, B_{II}, F, maturité), ce qui impose un suivi précis des stades, visent ainsi à identifier :

— les conditions interférant avec la nutrition azotée (cf. ci-après B2),

— les facteurs et conditions limitant le rendement indépendamment de celle-ci (cf. ci-après B3).

2. *Conditions du milieu susceptibles d'interférer avec la nutrition azotée*

Elles concernent principalement le sol :

— teneur de la couche arable en matière organique,

— humidité des différents horizons aux stades B_{II}, F et maturité sur la profondeur d'enracinement. Le contrôle de la pluviométrie et le calcul de l'E.T.P. permettent d'interpoler les conditions hydriques entre les dates d'observation,

— état structural des différents horizons, et en particulier de la couche travaillée,

— densité d'enracinement par zone homogène du profil cultural.

Les profils culturaux sur lesquels sont effectuées ces 2 dernières observations sont réalisés au début de la montaison, à la floraison et au début du palier hydrique du blé pour les essais et parcelles types et seulement à cette dernière époque pour les parcelles satellites. Ils sont décrits sur 1 m de large et 60 cm de profondeur pour les 2 premières dates, environ 2 m de large et au moins 1 m de profondeur pour la dernière. La fosse est orientée perpendiculairement aux lignes de semis qui, la plupart du temps, sont parallèles au passage des outils de travail du sol. Elle est située en bordure de la station observée, systématiquement à cheval sur un passage de roues du tracteur entraînant le semoir. De ce fait, on majore l'importance des zones compactes dans le profil, mais la position de ce dernier est alors relativement bien définie, ce qui permet les comparaisons entre parcelles.

Après ouverture de la fosse, une face verticale est rafraîchie de façon à faire apparaître, sur une section plane, de courts tronçons de racines sectionnées. Le profil est alors quadrillé (10 cm × 10 cm), puis l'observateur donne et enregistre une note de densité d'enracinement (de 0 à 5) pour chaque carré ainsi délimité, ou pour des fractions plus réduites (1/2 ou 1/4), le cas échéant. Ensuite, il dégage et observe à nouveau le profil dans le but d'apprécier les caractères de constitution des matériaux et l'état structural. Pour ce dernier, la notation consiste à tracer les contours de zones homogènes (selon les principes proposés par MANICHON, 1978) auxquelles correspondent des notations de cohésion (0 à 3), de porosité (0 à 3) et de forme des éléments structuraux. Il est important de remarquer que l'observation de l'enracinement et des états structuraux est réalisée en deux temps disjoints, sur deux documents différents et de façon analytique, afin de respecter une indépendance entre ces deux démarches.

L'exploitation des documents d'enregistrement des observations de terrain consiste, entre autres, à formuler un jugement global sur la qualité de l'état structural de la *couche arable* vis-à-vis de l'enracinement. Pour ce faire, on attribue à la couche arable une note moyenne d'enracinement et d'état structural (moyennes, pondérées par les surfaces, des notes attribuées aux zones élémentaires). Une corrélation positive (r = 0,74) est observée entre ces 2 notes moyennes d'enracinement et d'état structural. L'existence de cette relation, mais aussi son caractère relativement lâche, en partie dû aux différences entre observateurs, conduisent à ne pas tenir compte exclusivement de l'un ou de l'autre critère pour porter une appréciation globale. On a préféré, pour ce faire, tenir compte des 2 critères, selon la procédure schématisée sur la fig. 5.

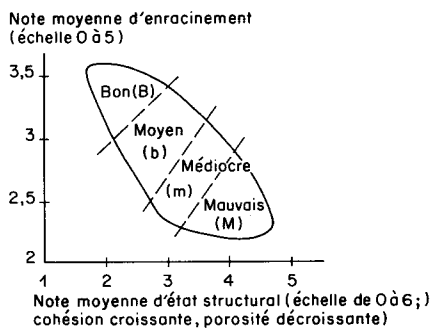


Figure 5

Jugement global du profil cultural en fonction de l'enracinement et de l'état structural.

Judgment of soil profile as resulting of root density and soil structure examination.

3. *Facteurs et conditions susceptibles de limiter le rendement indépendamment de la nutrition azotée*

Sont contrôlés :

— la richesse de la couche arable en éléments minéraux autres que l'azote (P, K, Mg) ;

— les dégâts parasitaires sur tige, feuille et épi, à la floraison et au stade laiteux-pâteux (on note la proportion de surface verte détruite par le parasitisme et la proportion de tiges présentant une tache ocellée à la base (MEYNARD, 1979) ;

— l'infestation par les adventices ;

— la verse (proportion et angle des tiges versées) ;

— ainsi que le niveau d'épuisement de la réserve hydrique, déjà signalé dans le paragraphe précédent.

4. *Mode d'échantillonnage du peuplement végétal sur les différents types de parcelles*

Les composantes du rendement, le poids de matière sèche de paille, les notes d'attaque parasitaire et de verse sont déterminés sur 10 « placettes », *par traitement d'essai ou station de parcelle type,* qui seront prélevées à la récolte. Une placette est une surface élémentaire de prélèvement, correspondant à 2 ou 3 lignes de semis. Suivant les stations, son aire varie entre 0,16 et 0,20 m^2.

Le nombre de 10 placettes est calculé de manière à pouvoir assurer les comparaisons élémentaires (différences entre membres d'un couple ou entre traitements d'essais) avec une puissance statistique suffisante. La composante du rendement la plus variable est le nombre d'épis/m^2 (coefficient de variation d'environ 10-15 p. 100) : dans le cas des essais, pour pouvoir mettre en évidence sur cette composante des différences de l'ordre de l'écart type (pour les effets principaux) avec un risque de première espèce de 0,05, une dizaine de répétitions par traitement assure une puissance de l'ordre de 0,9.

La comparaison des classements entre le rendement calculé à partir des échantillons et le rendement mesuré par prélèvement à la moissonneuse-batteuse s'est révélée satisfaisante (coefficients de corrélation linéaire entre ces 2 estimations : 0,86 en 1975, 0,67 en 1976, 0,84 en 1977). On note un avantage moyen de l'ordre de 3 q/ha, en faveur des prélèvements faits sur placettes, s'expliquant vraisemblablement par la stratification de celles-ci en fonction des lignes du semoir, qui exclut les zones de passage des roues au semis.

Pour les parcelles satellites, seuls les contrôles indispensables à la vérification des conclusions dont on teste l'extrapolation spatiale ont été retenus. Ainsi, le sol n'est connu que par une analyse chimique et un profil cultural profond. Les rendements sont évalués par des prélèvements à la moissonneuse-batteuse (10 à 20 ares : 2 répétitions par traitement) et les poids de 1 000 grains déterminés sur un échantillon. Les nombres de grains ne sont connus que par division, c'est-à-dire avec moins de précision (les petits grains en particulier ne sont pas comptés). De la même façon, les notations de parasitisme et de verse sont faites globalement sur l'ensemble de la parcelle.

L'ensemble des contrôles effectués sur les différentes parcelles est reporté sur le tableau 4.

TABLEAU 4

Chronologie des contrôles effectués
Chronological list of registered variables

	1975	1976	1977	
			Essais et Parcelles types (P. T.)	Parcelles satellites
1. SORTIE D'HIVER				
— Reliquats d'azote nitrique (0-60 cm)	×	×	×	
— Analyse chimique de la couche arable (P_2O_5 Joret-Hébert, K, Mg assimilables, $CaCO_3$ total, C Anne, N Kjeldahl)	×	×	×	×
— Comptage de pieds		×	×	×
2. DÉBUT MONTAISON				
— Observation date stade B_{II}		×	×	
— Matière sèche aérienne/m^2 au stade B_{II}		×	×	
— Analyse de l'azote total des parties aériennes		×	×	
— Profils culturaux (état structural et enracinement)		×	×	
— Profils hydriques (0-60 cm)		×	×	
3. FLORAISON				
— Observation date	×	×	×	
— Matière sèche aérienne/m^2 au stade F	×		(essais seulement)	
— Analyse de l'azote total des parties aériennes	×		–	
— Profils culturaux (état structural et enracinement)	×	×	×	×
— Profils hydriques (0-90 cm)	×	×	×	
4. STADE LAITEUX-PÂTEUX				
— Suivi du palier hydrique		(1 couple de P.T.)	(1 essai seulement)	
— Notation du parasitisme foliaire	×	×	×	×
5. MATURITÉ				
— Rendement moissonneuse-batteuse	×	×	×	×
— Composantes du rendement sur placettes (nombre d'épis, de grains/m^2, poids d'un grain, rendement)	×	×	×	
— Poids de 1 000 grains sur échantillon				×
— Poids de paille/m^2	×	×	×	
— Analyse de l'azote total dans les parties aériennes	×	×	×	
— Notation du parasitisme caulinaire	×	×	×	×
— Angle de verse, proportion de tiges versées	×	×	×	×
— Présence d'adventices	×	×	×	×
— Profils hydriques (0-60 cm)	×	×	×	
— Profils culturaux	×			
— Reliquats nitriques après récolte	×	×	×	

V. CONCLUSION

Le diagnostic régional en vue du conseil technique est une opération de plus en plus difficile au fur et à mesure que s'améliore la technicité des agriculteurs. A un certain stade de développement du progrès technique, la connaissance empirique des terroirs ne suffit plus pour résoudre les problèmes en suspens. Il est alors nécessaire de recourir à une démarche méthodique, indépendante des opinions de ceux qui, agriculteurs ou techniciens, ressentent directement ces problèmes. Cette démarche dépasse le simple avis d'expert et s'apparente à la recherche appliquée : dans cette étude du blé en Champagne crayeuse, on s'est efforcé de suivre un cheminement logique permettant, en un délai raisonnable, d'aboutir à des conseils concrets et extrapolables.

Quelques principes semblent pouvoir faire l'objet d'applications fructueuses dans d'autres situations, moyennant les adaptations nécessaires :

— *La pré-enquête,* phase d'approche et de formulation du problème, est essentielle. Elle doit permettre d'établir une première série d'hypothèses, de choisir l'échelle de travail adéquate (station, parcelle, exploitation, région...) et de stratifier de façon pertinente le dispositif de recueil des observations.

— *L'association enquête-expérimentation* est un outil de grande portée s'il est utilisé judicieusement. En effet, il permet de confronter l'analyse de variantes techniques globales (effet précédent, effet « type de sol »...) à celle des facteurs ou de conditions mieux définies et plus facilement sujettes au contrôle expérimental (par exemple, la nutrition azotée, à travers la fertilisation). Cette confrontation fournit des moyens d'interprétation et d'explication des effets du système de culture et du milieu.

De façon générale, la recherche des références techniques régionales par les instances départementales gagnerait beaucoup en efficacité si elle était organisée en réseaux structurés, c'est-à-dire tels que des termes de passage logiques soient ménagés entre toutes les situations fournissant l'information (SEBILLOTTE, 1978 b).

— *Le passage de la conclusion scientifique au conseil technique* comporte un problème d'extrapolation, qui est probablement le problème crucial de toute démarche de recherche à des fins de développement.

La stratification des observations selon les variations du sol et du climat (études pluriannuelles) est une précaution de base qu'on peut considérer de prime abord comme évidente, mais qui est souvent insuffisante pour résoudre totalement le problème, ne serait-ce que parce que le climat n'est pas contrôlable et qu'il faudrait de trop longues années d'expérience pour échantillonner toutes les circonstances climatiques.

Dans un contexte de moyens nécessairement limités, c'est surtout en rattachant les conclusions obtenues à une compréhension générale des mécanismes agronomiques que l'on peut en établir le champ d'extrapolation. Ainsi l'efficacité pratique d'une démarche de recherche-développement est conditionnée par la rigueur du protocole et la pertinence des contrôles mis en œuvre : il faut comprendre pour extrapoler.

Reçu le 30 octobre 1980.
Accepté le 16 avril 1981.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les adhérents du Centre d'Études Techniques Agricoles de Romilly-sur-Seine, ainsi que G. FERRATON, Ingénieur du C.E.T.A., qui, par leur concours actif, ont permis la réalisation de cette étude.

Nous remercions également l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages de son appui financier.

ANNEXE

Données climatiques (station de la météorologie nationale de Romilly-sur-Seine) - Alt. 77 m Climatic datas

Pluviométrie
(Pluviometry)

	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.	JANV.	FÉV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.
Normales 1946-1975	58	39	57	49	52	42	40	37	61	58	50
1974-75	97	104	54	58	72	9	65	40	67	36	39
1975-76	54	28	60	15	13	24	19	29	9	1	35
1976-77	69	79	53	53	56	100	55	33	69	83	65

Déficit climatique mensuel (P-ETP formule de TURC)
(Monthly water deficit : P-E_t)

	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.		MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUIL.
Normales (1950-75)	5	− 28	− 31	− 49	− 62	Cumulé	0	− 28	− 59	− 108	− 170
1974-75	42	− 17	− 17	− 72	− 99	Cumulé	0	− 17	− 34	− 106	− 205
1975-76	− 11	− 37	− 96	− 140	− 99	Cumulé	− 17	− 54	− 150	− 290	− 389
1976-77	16	− 21	− 14	− 01	− 29	Cumulé	0	− 21	− 35	− 36	− 65

Températures moyennes mensuelles
(Monthly mean of temperatures)

	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.	JANV.	FÉV.	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.
Normales 1946-75	15.3	10.6	6.1	3.4	2.5	3.5	6.5	9.8	13.1	16.1	18.1
1974-75	14.4	7.8	7.5	6.8	6.1	4.5	5.1	8.9	11.8	15.4	18.9
1975-76	16.0	9.2	5.8	3.7	1.5	3.0	5.5	8.6	13.4	18.3	21.0
1976-77	14.6	12.3	6.3	1.7	3.6	6.6	8.1	8.1	12.8	15.5	17.4

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Baldy C., 1973. Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du blé. *Ann. agron.,* **24** (2), 241-276.

Boiffin J., Fleury A., 1974. Rapport d'enquête sur la culture du blé d'hiver au C.E.T.A. de Romilly-sur-Seine. *C.R. du C.E.T.A.,* n° 193, 29 p.

Boiffin J., Sebillotte M., Couvreur F., 1976. Incidence de la simplification du travail du sol sur l'élaboration des rendements du blé et du maïs. *C.R. du Colloque : « Simplification du travail du sol en production céréalière ».* I.T.C.F., Paris, 7-8 décembre 1976, 239-280.

Coïc Y., 1956. La nutrition et la fertilisation du blé d'hiver. Les besoins en azote du blé d'hiver. Conséquences agronomiques. *Ann. agron.,* **7** (1), 115-131.

Dutil P., Ballif J. L., 1968. Sur la présence fréquente en Champagne crayeuse de rendzines développées sur paléosols cryoturbés. *Sci. Sol,* 2, 79-80.

Dutil P., Ballif J. L., 1971. Prévision de la fumure azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. *C.R. Acad. Agric. Fr.* **57** (1), 88-95.

Geslin H., Jonard P., 1948. Maturation du blé et climat. *C.R. des Journées Scientifiques du Pain. Ann. Nutr. Aliment.* 2, 361-371.

Hébert J., 1969. La fumure azotée du blé d'hiver. *Bull. techn. Inform.,* **244,** 755-766.

Hébert J., 1975. Données récentes sur la fertilisation du blé. *C.R. Journée nationale d'information sur les « Techniques nouvelles de production du blé ».* I.T.C.F., Paris, 141-166.

I.T.C.F., 1975. *Adaptation régionale d'une méthode de prévision de la fumure azotée du blé d'hiver* (essais 17 NP). Doc. Ronéo., 22 p.

I.T.C.F., 1978. Brochure « *La Fertilisation azotée du blé* », 30 p.

Jonard P., Odent M., 1967. Etude sur l'évolution de l'azote au cours de la croissance de la tige principale du blé tendre. *Ann. Amélior. Plant.,* **17** (1), 23-31.

Manichon H., 1978. Fiches d'observation de l'état du sol au champ et mode d'emploi des fiches. INA-PG, Chaire d'Agronomie, Doc. Ronéo., 4 p. + 16 p.

Manichon H., Sebillotte M., 1973. *Etude de la monoculture du maïs. Résultats d'une enquête agronomique dans les régions de Garlin et Navarrenx (P. A.).* INA-PG, Chaire d'Agriculture, Doc. Ronéo., 108 pp + Annexes.

Masle-Meynard J., 1980. *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, Paris, 201 p. + Annexes.

Masle-Meynard J., Meynard J. M., 1976. Analyse fréquentielle du climat de la région de Romilly-sur-Seine. *C.R. du C.E.T.A. de Romilly, n° 213.,* 14-34.

Meynard J. M., 1979. *Les notations de parasitisme sur céréales.* INA-PG, Chaire d'Agronomie. Doc. Ronéo., 10 p.

Remy J. C., Hébert J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C.R. Acad. Agric. Fr.,* 11, 700-714.

Sanson J., 1949. *Climatologie appliquée.* Météorologie Nationale, Paris, 209 p. + planches.

Sebillotte M., 1978 a. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C.R. Acad. Agric. Fr.,* **64,** 906-914.

Sebillotte M., 1978 b. La collecte des références et les progrès de la connaissance agronomique. *In : « Exigences nouvelles pour l'agriculture : Les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ? ».* INA-PG, A.D.E.P.R.I.N.A.-Chaire d'Agronomie, Paris, 466-496.

Sebillotte M., 1980. Analyse de l'élaboration du rendement du blé. Un moyen de résoudre les problèmes de cette culture. In : « *Wheat Technical Monography* ». CIBA-GEIGY, Bâle, Suisse, 25-32.

Sebillotte M., Boiffin J., Caneill J., Meynard J. M., 1978. Sécheresse et fertilisation azotée du blé d'hiver. Essai d'analyse de situations au champ par l'étude des composantes du rendement. *Bull. Assoc. fr. Étud. Sol,* 3, 197-214.