

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE
(SCIENCES)

en vue de l'obtention du
DIPLOME DE DOCTEUR-INGENIEUR

Spécialité : Astronomie et Techniques Spatiales

par

Martine HUET

Ingénieur ENITA

Evolution des paramètres de structure
et de biomasse d'un couvert de blé.
Utilisation des techniques de télédétection micro-ondes

Soutenue le 27 octobre 1983 devant la Commission d'Examen :

JURY

Président M.
Examineurs MM.

F. CAMBOU
T. LE TOAN
P. MALET
C. PLANCHON
G. SAINT
G. VEDRENNE

Professeur à l'Université Paul-Sabatier (Sciences)
Ingénieur Centre National de la Recherche Scientifique, Toulouse
Ingénieur Institut National de la Recherche Agronomique, Avignon
Professeur à l'Institut National Polytechnique (E.N.S.A.T.)
Ingénieur Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse
Professeur à l'Université Paul Sabatier (Sciences)

univ. paul sabatier
dét. micro-ondes

H1

INTRODUCTION GENERALE

La connaissance précise, détaillée et périodique de l'utilisation et de la production des surfaces agricoles est une préoccupation ancienne initialement liée à un souci fiscal.

Aujourd'hui, cette connaissance s'avère encore plus indispensable en raison de l'aggravation du problème alimentaire et énergétique mondial et des contraintes économiques de gestion et de spéculation.

Le besoin porte autant :

- sur une bonne détermination de la production agricole réalisée, c'est-à-dire sur une mesure la plus détaillée et précise possible de la quantité de produit récoltée,
- que sur une prévision de la production à venir, c'est-à-dire sur une estimation la plus précoce et fiable possible du rendement probable d'une superficie donnée.

La surveillance des plantes cultivées en vue de la prévision de leur rendement nécessite la reconnaissance de leurs principaux stades de développement et la détermination de leurs états de croissance.

A l'échelle régionale ou nationale où il est souhaitable de voir fonctionner les modèles de prévision de récoltes, la télédétection apparaît comme la technique la plus intéressante pour acquérir les informations sur la variabilité spatiale des états de croissance et les dates significatives du cycle de végétation. Les observations et mesures acquises par la télédétection sont en effet synthétiques, détaillées, périodiques, rapidement accessibles. Le cas particulier de la télédétection active hyperfréquences (ou micro-ondes) apparaît prometteur, en raison de son insensibilité à la couverture nuageuse.

Mais, la télédétection ne fournit pas directement les stades de développement et les états de croissance des plantes -ni leur rendement- : elle fournit la valeur du rayonnement émis ou réfléchi par le couvert végétal, au cours du cycle de végétation.

Parmi les nombreux facteurs influençant la réponse d'un capteur de télédétection, les paramètres de structure et de biomasse du couvert végétal jouent un rôle prépondérant.

La structure du couvert (géométrie des plantes, indice foliaire, écartement et orientation des rangs, etc...) intervient sur la réponse des capteurs dans le visible et le proche infra-rouge ainsi que dans le thermique (travaux de l'équipe INRA - Avignon, du "Laboratory for Agricultural Remote Sensing" aux Etats-Unis, etc...). Dans le domaine plus récemment exploré des micro-ondes, c'est la biomasse (principalement la masse d'eau) du couvert associée à sa structure qui intervient (travaux de l'Université du Kansas).

Il y a donc en bilan 2 types de relations à étudier :

- relation entre la réponse acquise par le capteur de télédétection et les paramètres de structure et de biomasse du couvert végétal,
- relation entre ces paramètres et les stades de développement, les états de croissance, le rendement des plantes.

Le premier type de relation appartient surtout au domaine d'étude des physiciens : à partir des mesures de structure et de biomasse effectuées sur le couvert, il s'agit d'élaborer et d'évaluer les modèles d'interaction qui expliqueraient l'évolution de la réponse acquise par le capteur au cours du cycle de végétation.

L'analyse de la deuxième relation est plutôt du ressort des biologistes ; les questions posées sont nombreuses, par exemple : parmi les paramètres de structure et de biomasse du couvert, lesquels sont les meilleurs indicateurs du stade de développement, de l'état de croissance, ou du rendement potentiel ? Quelle est la stabilité des relations trouvées, dans des conditions variétales et agro-climatiques différentes ? Enfin, quels sont les paramètres susceptibles d'être à la fois utilisés dans la modélisation de la réponse du capteur et porteurs de l'information biologique utile ?

Ainsi, l'établissement de ces 2 relations nécessite une équipe pluridisciplinaire effectuant de façon associée des mesures physiques et des mesures biologiques. Avant de passer à l'échelle aérospatiale, il est encore indispensable de travailler au niveau fondamental de l'expérience in situ : "vérité-terrain" et capteur "maîtrisable" sur une parcelle bien contrôlée.

Ceci a été tenté par le groupe de télédétection du Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, au cours des 3 dernières années.

La plante choisie a été le blé -plante d'importance économique majeure-, en raison des facilités offertes par le Lycée Agricole d'Auzeville et de la collaboration avec la station de Bioclimatologie de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Avignon, qui a débuté un programme d'étude de télédétection sur cette plante.

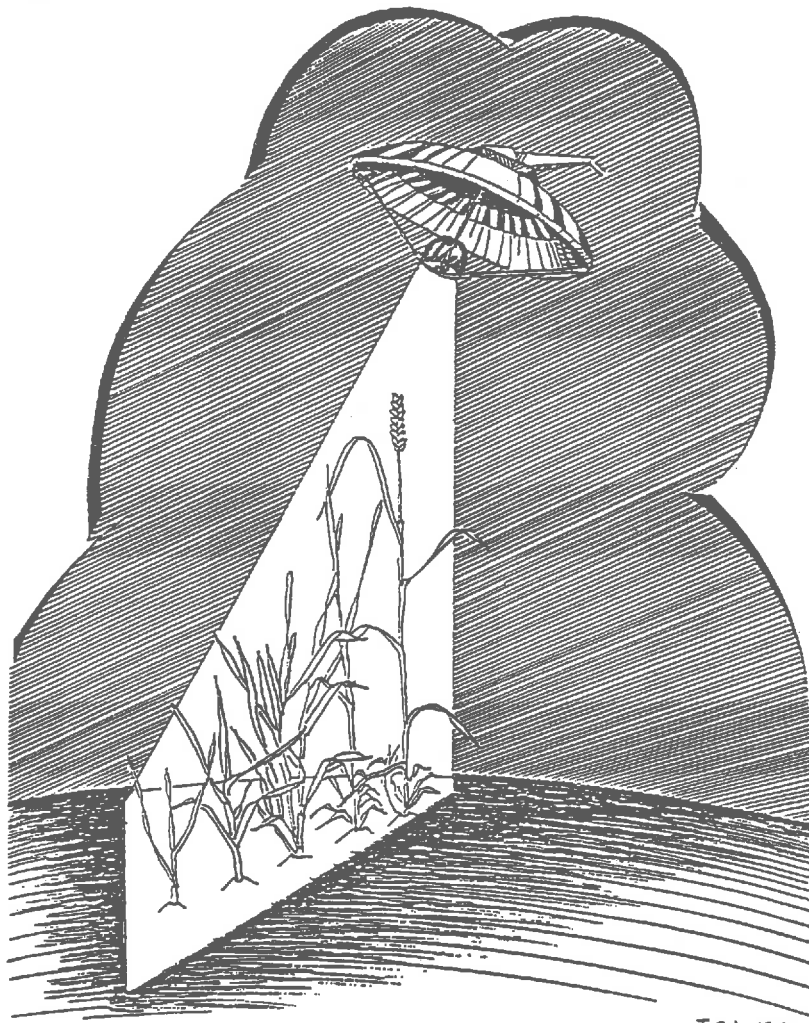
Le capteur de télédétection est le radar-scattéromètre RAMSES, prototype du Centre National d'Etudes Spatiales.

La première partie de ce mémoire situe d'abord l'étude dans le contexte général de la production agricole et de la prévision de rendement ; la contribution possible des techniques de télédétection y est envisagée. Puis, les objectifs et les moyens de l'expérimentation sont détaillés.

La seconde partie traite du problème de la précision et de la représentativité des mesures biologiques effectuées.

Dans une troisième partie, les résultats des mesures des paramètres de structure et de biomasse sont analysés et discutés sous l'angle de leurs relations avec les stades de développement, l'état de croissance et le rendement du blé.

Enfin, la quatrième partie présente les résultats des mesures physiques associées.



SOMMAIRE

CHAPITRE I - FONDEMENTS ET MOYENS DE L'ÉTUDE	
I - <u>GENERALITES SUR LA PRODUCTION AGRICOLE ET LES MODELES DE PREVISION DE RENDEMENT</u>	1.1
I.1 - <u>Les méthodes actuelles de détermination de la production agricole</u>	1.1
I.2 - <u>Les modèles de prévision de rendement</u>	1.2
II - <u>LES POSSIBILITES DES TECHNIQUES DE TELEDETECTION</u>	1.5
III - <u>HYPOTHESES DE L'ETUDE</u>	1.7
IV - <u>L'EXPERIMENTATION "RAMSES"</u>	1.9
IV.1 - <u>Conditions d'expérimentation</u>	1.9
IV.2 - <u>Mesures biologiques</u>	1.15
IV.3 - <u>Mesures physiques et autres mesures de terrain</u>	1.25
CHAPITRE II - VARIABILITÉ ET NORMES D'ECHANTILLONNAGE	
I - <u>METHODE STATISTIQUE UTILISEE</u>	2.1
I.1 - <u>Notations</u>	2.1
I.2 - <u>Hypothèse de normalité de la population</u>	2.2
I.3 - <u>Intervalle de confiance de la moyenne et de la variance</u>	2.3
I.4 - <u>Calcul de la taille d'échantillon n à prélever</u>	2.4
I.5 - <u>Commentaires sur la relation $n = f(C.V)$</u>	2.6
I.6 - <u>Méthode complémentaire d'analyse</u>	2.6
II - <u>ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS</u>	2.8
II.1 - <u>Présentation des résultats</u>	2.8
II.2 - <u>Analyse de la taille d'échantillon à prélever</u>	2.8
II.3 - <u>Interprétation des résultats</u>	2.16

III - <u>CONSEQUENCES DES RESULTATS</u>	2.18
III.1 - <u>Normes d'échantillonnage</u>	2.18
III.2 - <u>Précision des mesures</u>	2.20
IV - <u>CONCLUSIONS</u>	2.20
IV.1 - <u>Notion de représentativité chronologique</u>	2.20
IV.2 - <u>Application aux données de télédétection</u>	2.22

CHAPITRE III - ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS BIOLOGIQUES

I - <u>ANALYSE DES RESULTATS BIOLOGIQUES</u>	3.2
I.1 - <u>Suivi général de la culture</u>	3.2
I.2 - <u>Evolution des paramètres de structure et de biomasse</u>	3.6
II - <u>RELATION ENTRE LES PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE ET LES STADES DE DEVELOPPEMENT</u>	3.26
II.1 - <u>Synthèse des résultats obtenus</u>	3.26
II.2 - <u>Comparaison avec d'autres résultats</u>	3.27
II.3 - <u>Précision sur la détermination de la date du stade</u>	3.29
III - <u>RELATION ENTRE LES PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE ET LE RENDEMENT</u>	3.30
III.1 - <u>Approche descriptive</u>	3.30
III.2 - <u>Approche quantitative</u>	3.33

CHAPITRE IV - ANALYSE DES MESURES RADAR ASSOCIEES

I - <u>GENERALITES SUR LA RETRODIFFUSION RADAR DES SURFACES AGRICOLES</u>	4.1
I.1 - <u>Réponse du sol</u>	4.3
I.2 - <u>Réponse du couvert végétal</u>	4.5

II - <u>EVOLUTION TEMPORELLE DE σ° à 9 GHz, VV, 40°</u>	4.6
II.1 - <u>Analyse des résultats sur CASTAN 80</u>	4.6
II.2 - <u>Comparaison avec les résultats sur TOP 82 <u>et CASTAN 82</u></u>	4.9
III - <u>CONCLUSIONS</u>	4.11

CHAPITRE I

FONDEMENTS ET MOYENS DE L'ETUDE

FONDEMENTS ET MOYENS DE L'ETUDE

PLAN

	<i>Page</i>
I - <u>GENERALITES SUR LA PRODUCTION AGRICOLE ET LES MODELES DE PREVISION DE RENDEMENT</u>	1.1
I.1 - <u>Les méthodes actuelles de détermination de la production agricole</u>	1.1
I.2 - <u>Les modèles de prévision de rendement</u>	1.2
II - <u>LES POSSIBILITES DES TECHNIQUES DE TELEDETECTION</u>	1.5
III - <u>HYPOTHESES DE L'ETUDE</u>	1.7
IV - <u>L'EXPERIMENTATION "RAMSES"</u>	1.9
IV.1 - <u>Conditions d'expérimentation</u>	1.9
IV.2 - <u>Mesures biologiques</u>	1.15
IV.2.1 - <u>Le blé</u>	1.15
a) Développement et croissance	1.15
b) L'élaboration du rendement du blé	1.19
IV.2.2 - <u>Protocole de mesures biologiques</u>	1.21
a) Notation des stades de développement	1.22
b) Densité du couvert et composantes du rendement	1.23
c) Mesures des paramètres de structure et de biomasse de la plante	1.23
IV.3 - <u>Mesures physiques et autres mesures de terrain</u>	1.25
IV.3.1 - <u>Le radar</u>	1.25
a) Intérêt des systèmes radar	1.25
b) Principe de la mesure	1.26
IV.3.2 - <u>Les autres mesures de terrain</u>	1.28

I - GENERALITES SUR LA PRODUCTION AGRICOLE ET LES MODELES DE PREVISION DE RENDEMENT

I.1 - Les méthodes actuelles de détermination de la production agricole

Ces méthodes sont très dépendantes de l'infrastructure administrative et du type d'agriculture du pays.

Pour la France, la plupart des renseignements statistiques agricoles sont acquis au niveau de chaque département (Direction Départementale de l'Agriculture), puis collationnés par le Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques du Ministère de l'Agriculture. Une autre source de renseignements est fournie par les organisations professionnelles des producteurs des principales cultures (blé, maïs, betteraves).

Pour connaître la production d'une culture donnée, il faut déterminer chacun des 2 termes du produit : $surface \times rendement = production$.

La détermination de la surface se fait :

- de façon exhaustive : les Recensements Généraux de l'Agriculture (RGA), réalisés en moyenne une fois tous les 10 ans fournissent entre autres la répartition en surface de chaque culture et ceci pour chaque exploitation recensée (1 600 000 en 70).
- par sondage :
 - . à partir des RGA qui ont fourni la base de sondage (liste des exploitations, critères de stratification), est réalisée annuellement une enquête sur un EPEXA = échantillon permanent d'exploitations agricoles, qu'on garde 3 ou 4 ans. L'enquête EPEXA concerne 1/10 des exploitations.
 - . l'enquête annuelle "TER-UTI" (utilisation du territoire) a pour base un quadrillage photographique du territoire. Un ou des enquêteurs se rendent pendant les mois de Juillet et Août sur les points d'intersection (environ 36 points par département) et notent ce qui s'y trouve.

Les différentes méthodes décrites sont utilisées de façon combinée entre elles, et souvent conjointes à d'autres sources (par exemple, la quantité

totale de semences vendues peut donner, connaissant la densité de semis moyenne de la région, une estimation des surfaces ensemencées).

La détermination du rendement est faite, à la récolte ou à une date proche :

- par estimation "visuelle" d'experts issus des services officiels ou des organisations professionnelles,
- par prélèvements directs sur quelques parcelles (pour les céréales exclusivement).

Dans le meilleur des cas -mais c'est rare-, pour ces 2 méthodes, une procédure d'échantillonnage a au préalable sélectionné des champs "tests" représentatifs de la région agricole.

- par informations collatérales, par exemple : quantités reçues par les coopératives, après la récolte.

Les avantages de ces méthodes de détermination de la production agricole sont : une bonne dispersion géographique sur le territoire, d'où une bonne précision à cette échelle et une relative objectivité (représentants des services officiels, des producteurs, enquêteurs "désintéressés").

Leurs inconvénients sont la lourdeur, le coût, le délai nécessaire avant l'obtention des résultats et surtout leur fourchette d'erreur importante à l'échelle régionale : la précision nationale seule est visée et il n'y a pas (ou pas assez) d'échantillonnage sur des zones agro-climatiques homogènes.

C'est la précision et la fiabilité de ces méthodes qui servent de référence pour les services statistiques officiels lorsqu'il s'agit de juger d'une autre méthode... ou des modèles de prévision de rendement.

I.2 - Les modèles de prévision de rendement

Le rendement d'une plante cultivée annuelle est la résultante de la combinaison et de l'interaction de nombreux facteurs ayant agi plus ou moins au cours de son cycle de végétation : sous un climat donné mais fluctuant, sur un sol donné mais modifiable, les techniques culturales auront visé à fournir à cette plante les meilleures conditions pour exprimer son potentiel génétique. Les facteurs influençant le rendement agricole peuvent donc être

regroupés en 4 catégories :

- la plante : variété, état sanitaire (maladies, carences), état de croissance (hauteur, poids de matière sèche... etc) aux différents stades de son développement, accord de l'apparition de ces stades avec le calendrier habituel.
- le climat : insolation, température, humidité, précipitations, vents...; accidents en excès divers tels que grêle, gel, sécheresse, inondation...
- le sol : caractéristiques hydriques et hydrodynamiques (évaporation, capacité de rétention, réserve utile), caractéristiques thermiques (conductivité, chaleur massique), composition minérale et organique...
- les techniques culturales : précédent, préparation du sol ; date et densité de semis, dates et modalités d'interventions telles que traitements phytosanitaires, desherbages, apports d'engrais...; irrigations ; techniques de récolte.

De manière idéale, un modèle de prévision de rendement devrait donc, sachant "a priori" l'incidence individuelle et interactive de tous ces facteurs sur le rendement, être capable de fournir, avec une précision connue, autant d'estimations du rendement futur qu'on lui suggère d'hypothèses de scénarios climatiques et techniques, et ce, à chacune des étapes du développement de la plante.

Une telle modélisation, dite agrométéorologique, n'est pour l'instant qu'au stade de recherche.

On peut distinguer (MALET, 1979), 3 voies dans cette recherche et ainsi classer les modèles existants en 3 types selon un critère d'objectifs, de logique, et de procédure d'élaboration :

- les modèles analytiques :

Leur objectif est de relier entre eux divers processus physiologiques de la plante et de relier ceux-ci aux différents facteurs du milieu ; ils fournissent un outil d'analyse (encore partiel) du fonctionnement des plantes et de l'influence sur le rendement, de certains facteurs à certaines époques. Ils concernent surtout les

plantes en ambiance contrôlée ou en parcelles expérimentales. Leur logique est déterministe, représentée par une fonction mathématique. Ce ne sont pas des modèles prédictifs au sens strict mais plutôt des sous-modèles variés s'articulant dans un modèle de prévision.

- les modèles prédictifs statiques :

Ils visent à fournir une évaluation du rendement d'un territoire donné, à une date unique, souvent très proche de la récolte. Leur logique est statistique et utilise une régression linéaire multiple de certains facteurs climatiques mesurés pendant la campagne ; ces facteurs, sont utilisés soit comme variables d'entrées brutes soit recombinaison pour traduire leur interaction ou la réaction de la plante (variables élaborées) ; ils sont établis sur l'ensemble de la période de végétation, sans distinction des étapes de développement.

- les modèles prédictifs dynamiques :

Fondés aussi sur une logique statistique et utilisant aussi la régression linéaire, ils tentent de fournir des évaluations de rendement tout au long de la période de végétation : à chaque stade de développement, ils cherchent à définir un état de croissance et à calculer son devenir sous l'hypothèse du climat le plus probable à venir. Ces modèles, très rares, sont de par leur fonctionnement, les plus ouverts aux connaissances analytiques nouvelles et sont donc très perfectibles.

Ces modèles prédictifs ont besoin d'une définition de zones agro-climatiques homogènes, pour délimiter leur aire d'application.

De plus, ces modèles ont besoin de variables :

- soit analogues à celles acquises traditionnellement mais enregistrées suivant la même norme et avec un nombre de répétitions suffisant
- soit nouvelles (par exemple, évapotranspiration potentielle, température de surface).

Enfin ces modèles (essentiellement en fait ceux prédictifs dynamiques) devant être calés sur le calendrier des stades de développement des plantes, ont besoin :

- d'un relevé systématique et continu de ces stades
- à chacun de ces stades, d'une évaluation de l'état de croissance de la culture.

Les méthodes traditionnelles ne fournissent pas, ou de façon insatisfaisante, ces informations, nous nous tournons vers les techniques de télédétection.

II - LES POSSIBILITES DES TECHNIQUES DE TELEDETECTION

Les techniques de télédétection présentent "a priori" une bonne adéquation aux besoins des méthodes de détermination et de prévision de la production agricole : les observations et mesures acquises par la télédétection sont synthétiques, détaillées, périodiques, rapidement accessibles.

Ces techniques sont encore pour la plupart au stade de recherche ou au stade probatoire.

La détermination du premier terme de la production agricole, la surface occupée par une plante donnée, est possible lorsque l'on sait identifier et reconnaître cette plante ; le plus souvent une culture n'a pas une signature spectrale unique mais par contre l'évolution temporelle de cette signature est elle, bien caractéristique de la culture. Cet inventaire des cultures et la mesure de leurs superficies est à l'heure actuelle le secteur le plus avancé de la télédétection (programme LACIE : "Large Area Crop Inventory", par exemple), dans le domaine visible et proche infra-rouge. On notera que l'inventaire renouvelé chaque année fournit l'assolement.

Parmi l'ensemble des facteurs du rendement (§ I.2), ceux susceptibles d'être appréhendés par télédétection sont cités ci-dessous :

- La mesure du rayonnement net et des températures de surface est possible grâce à la thermographie infrarouge (satellites météorologiques). Ces paramètres permettent de déterminer l'évaporation réelle du sol ou l'évapotranspiration réelle (ETR) du couvert végétal : il existe en effet une relation quasi-linéaire entre la température de surface, le rayonnement net, et le taux d'évaporation. La connaissance de l'évaporation est indispensable à la définition de zones climatiques homogènes (Idso, 1975 ; Seguin, 1979).

- L'humidité superficielle est aussi détectable par les systèmes radar (à 4,5 GHz) : il existe une relation linéaire entre l'humidité de surface du sol et le coefficient de rétrodiffusion (Ulaby, 1978 ; Le Toan, 1979).
- Les excès et les insuffisances du climat (gel, grêle, sécheresse, inondations) et donc l'appréciation de l'étendue de leurs effets sont repérables.
- Certaines techniques culturales sont observables (outre l'assolement déjà noté) : date de semis, travaux d'irrigation ou de drainage (visible + infra-rouge thermique ou micro-ondes).
- Les maladies ou carences induisent une baisse de réflectance du couvert végétal dans le visible et dans le proche infra-rouge, mais ceci alors que le couvert est déjà bien atteint. Une détection plus précoce ("pré-visuelle") serait possible par thermographie, les végétaux malades apparaissant plus chauds que les végétaux sains (De Carolis, 1975).
- Enfin, des recherches récentes indiquent que la télédétection pourrait mesurer certains paramètres de structure et de biomasse des couverts végétaux. (Les paramètres de structure décrivent la géométrie de la plante ou du couvert végétal : hauteurs, orientations des différents organes, indice foliaire...; les paramètres de biomasse concernent les poids frais et sec, les teneurs en eau). Ce point particulier constitue l'objet de notre étude et sera détaillé ultérieurement.

Pour chacun de ces facteurs, la télédétection présente l'avantage considérable sur les autres méthodes de pouvoir fournir rapidement les valeurs moyennes de ces facteurs à l'échelle désirée, ainsi que leur variabilité spatiale et temporelle.

Mais la télédétection n'est bien sûr pas capable de fournir une interprétation de ces facteurs ; il est clair que ce sont des modèles qui prévoiront les rendements, avec, parmi leurs variables d'entrées, des mesures acquises par télédétection.

III - HYPOTHESES DE L'ETUDE

Le cadre de cette étude est le suivant :

Etudier les possibilités de la télédétection (en particulier des systèmes radar) pour repérer les stades de développement des cultures et définir leurs états de croissance.

La relation entre le stade de développement, l'état de croissance d'une culture et sa réponse dans un domaine spectral donné n'est ni directe ni unique ; en fait, cette relation est la composée de 2 relations :

- l'une (R1), entre le stade, l'état de la culture et les paramètres de biomasse et de structure,
- l'autre (R2), entre ces paramètres et la réponse du capteur dans le domaine spectral étudié.

D'où les 2 hypothèses de l'étude :

1ère hypothèse :

L'évolution et les valeurs des paramètres de structure et de biomasse des plantes peuvent être indicateurs des stades de développement et des états de croissance de ces plantes.

2ème hypothèse :

Les techniques de télédétection (en particulier micro-ondes) permettent de mesurer les paramètres de structure et de biomasse des couverts végétaux.

Pour passer à la notion de rendement, il est nécessaire de s'appuyer sur une troisième hypothèse :

3ème hypothèse :

Il existe des relations (R3) entre les paramètres de structure et de biomasse et le rendement.

Ces 3 hypothèses d'existence de relations R1, R2, R3 sont fondées sur des travaux préalables :

- relation R1

Les stades de développement lorsqu'ils sont définis comme étant les instants dans le cycle où des modifications morphologiques de la plante deviennent visibles, induisent de façon évidente un changement de structure : par exemple pour le blé, l'épiaison modifie la hauteur, la maturité fait se courber l'épi...; la structure et la biomasse du couvert sont affectées par les mauvaises conditions de croissance : perte d'eau, flétrissement du végétal en période de sécheresse, réduction de surface des feuilles malades ou carencées... etc.

Mais toutes ces observations sont encore pour la plupart d'ordre qualitatif.

- relation R2

De nombreuses expérimentations et des modèles étudient ou tentent d'explicitier cette relation, surtout dans le domaine du visible et du proche infra-rouge ; les paramètres les plus fréquemment corrélés à la réflectance sont l'indice foliaire et l'angle d'insertion des feuilles (Bauer, 1980 ; Bunnik, 1978 ; Suits, 1972).

Ces expérimentations nécessitent une bonne coordination entre les mesures physiques et les mesures des paramètres biologiques : ceux-ci, en grand nombre, ne sont souvent pas suivis de façon exhaustive. Le domaine des micro-ondes est encore peu exploré. Des études ont cependant mis en évidence l'influence d'un paramètre de biomasse (poids d'eau) sur la réponse radar (Ulaby, 1978).

- relation R3

L'étude de la relation entre les paramètres morphologiques et le rendement concerne essentiellement l'amélioration des plantes : on y recherche les caractères ayant à la fois une forte liaison avec le rendement et une grande héritabilité, par comparaison des lignées obtenues, entre elles et avec leurs parents.

Il n'y a pas ou peu d'auteurs examinant l'influence de ces paramètres et de leur évolution sur le rendement, pour une variété donnée, au cours d'un cycle de végétation (Ledent, 1977 ; Delecalle, 1980).

Le but de l'expérimentation est de vérifier plus largement et si possible de quantifier ces 3 relations, la relation R2 étant étudiée seulement dans le domaine des micro-ondes.

IV - L'EXPERIMENTATION "RAMSES"

Le radar-scatteromètre RAMSES (Radar Multifréquence Sol pour l'Etude des Signatures Spectrales) du CNES, monté sur une grue à 15 m du sol, a donné son nom à un programme qui a consisté à suivre l'évolution d'une culture de blé ; ce programme a été mené 3 années de suite (campagnes 80, 81, 82).

IV.1 - Conditions d'expérimentation

- Situation :

L'expérience a été menée sur une parcelle appartenant au terrain du Lycée Agricole de Toulouse-Auzeville, à 14 km au Sud-Est de Toulouse et à 8 km du C.E.S.R.

La figure I.1 montre le plan et l'agencement de la parcelle au cours des 3 campagnes de mesures.

- Le sol :

Le sol de la parcelle provient d'alluvions de l'Hers ; il s'agit d'un limon sablo-argileux. A 90 cm de profondeur se trouve une molasse argilo-calcaire. La nappe phréatique est à environ 1 m.

- Le climat :

La région toulousaine est soumise à la double influence atlantique et méditerranéenne : le climat est tiède (moyenne annuelle 12,9°C) et assez humide (moyenne annuelle 650 mm) avec une répartition inégale des pluies (printemps humide, été sec).

Les vents les plus fréquents viennent de l'axe Ouest - Nord-Ouest ; le vent d'Autan (Sud-Est), sec et chaud, crée une intense évapotranspiration en été.

Pour les 3 années d'expérimentation, l'évolution des moyennes décennales (température moyenne et pluviométrie) sur la période de végétation et la pluviométrie journalière sur la période de mesures a été tracée (figures I.2 et I.3).

Par rapport à la normale (moyenne sur 10 ans) chacune des 3 années d'expérimentation peut être caractérisée ainsi :

- année 80 : Mars-Avril doux et secs, Mai froid, Juin très pluvieux et froid.

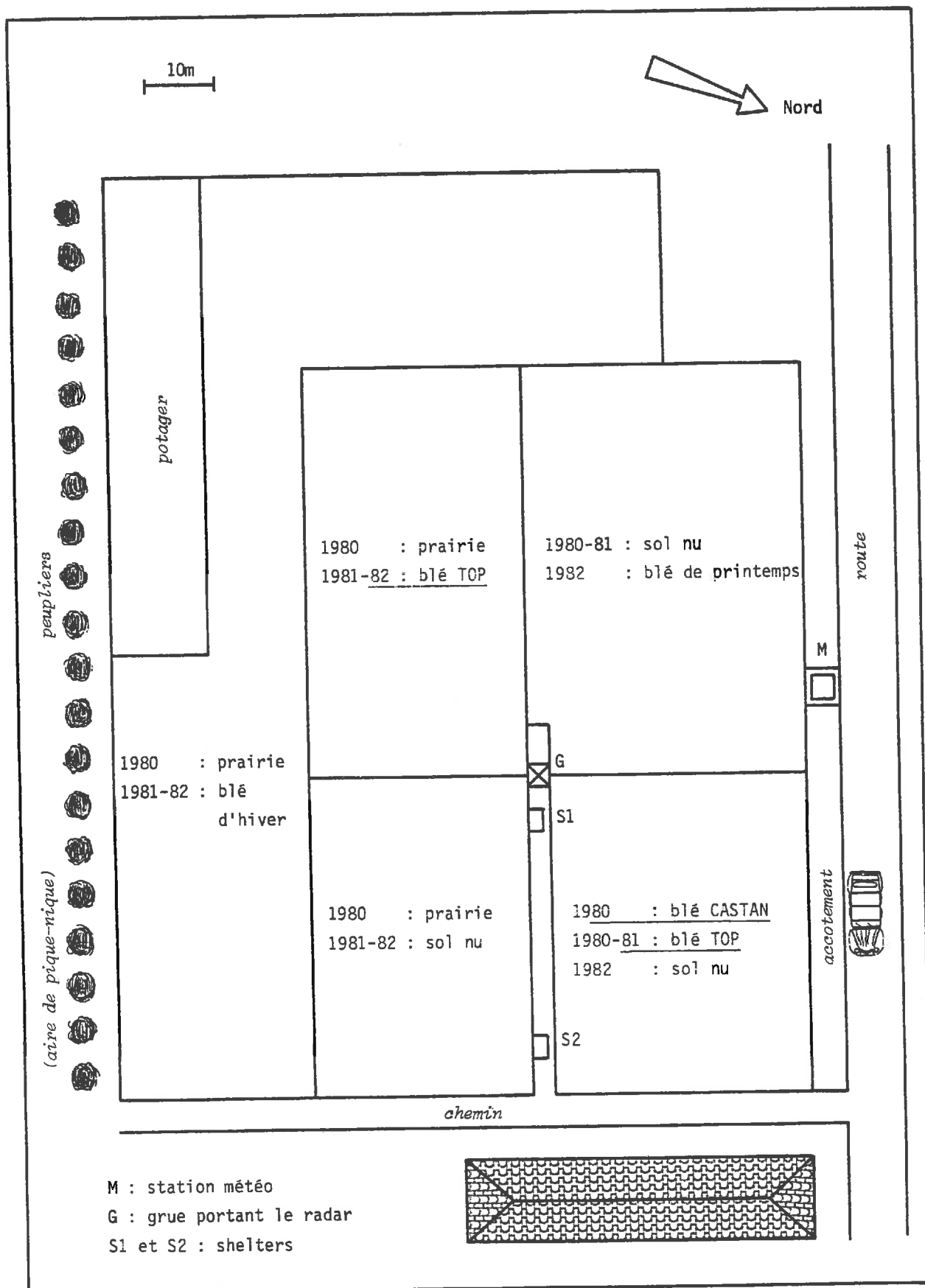


Figure I.1 : Schéma d'agencement de la parcelle

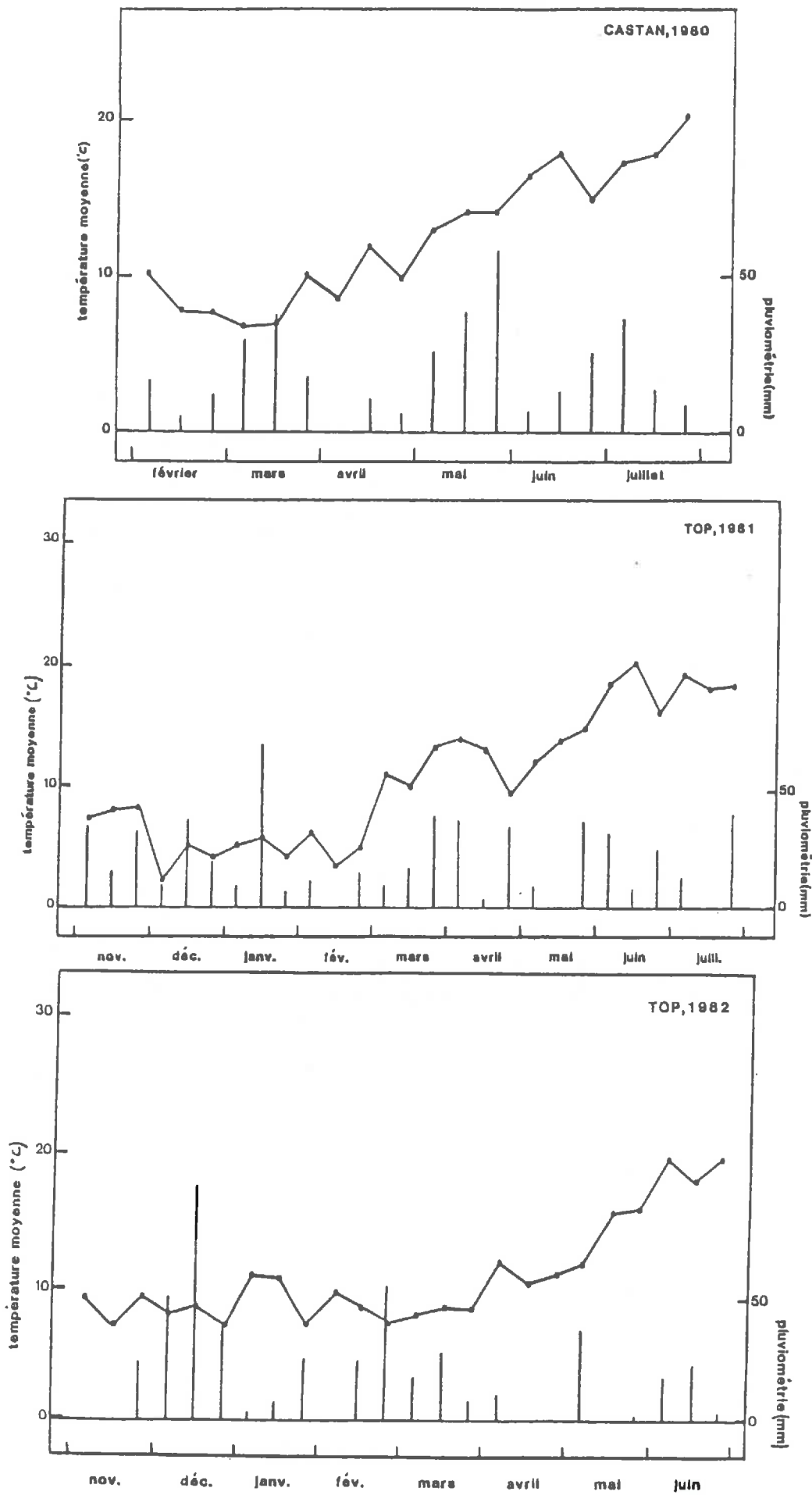


Figure I.2 : Evolution des moyennes décadales (température moyenne et pluviométrie) sur la période de végétation

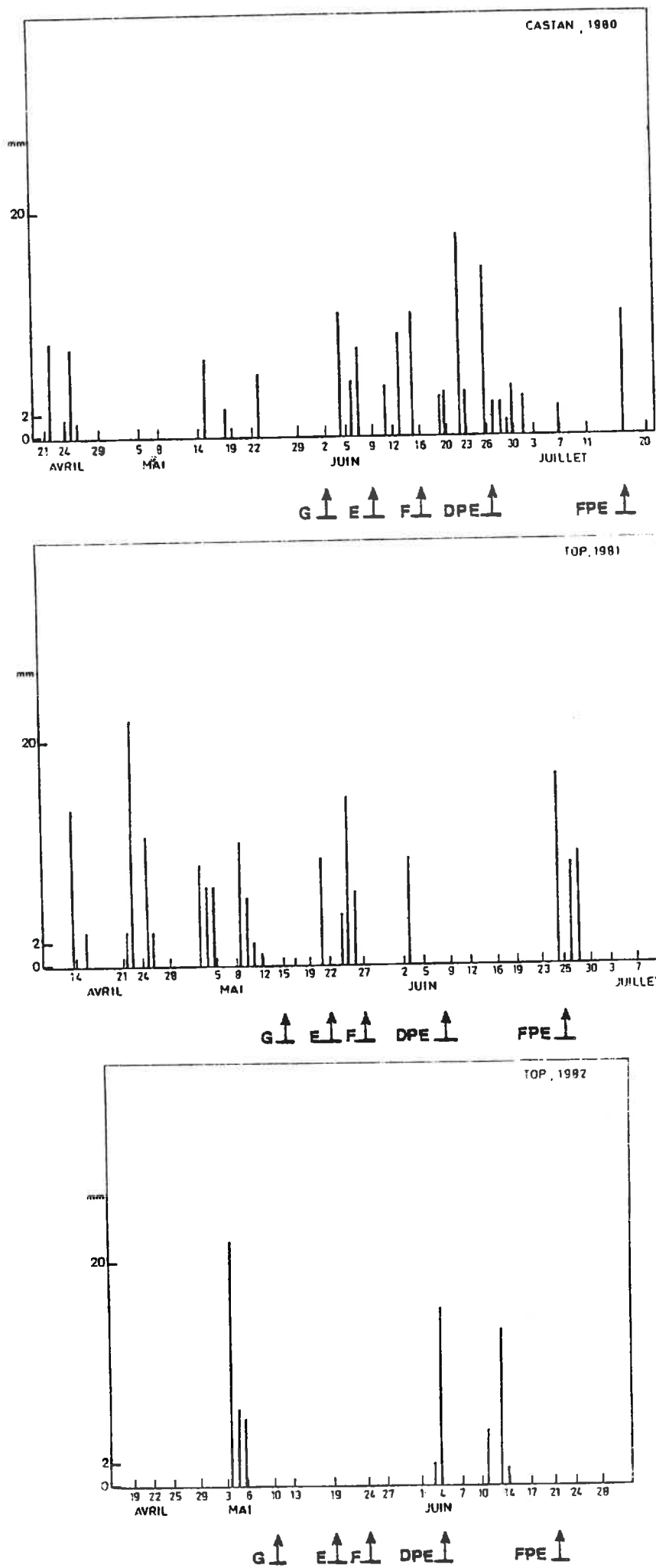


Figure I.3 : Pluviométrie durant la période de mesures

- année 81 : hiver pluvieux, printemps froid, Juillet chaud.
- année 82 : hiver doux, printemps très sec et chaud.

- La plante :

L'étude a porté sur 2 variétés de blé cultivées communément dans la région :

- un blé tendre alternatif, variété CASTAN, semé en blé de printemps en 80
- un blé tendre d'hiver, variété TOP, en 81 et 82.

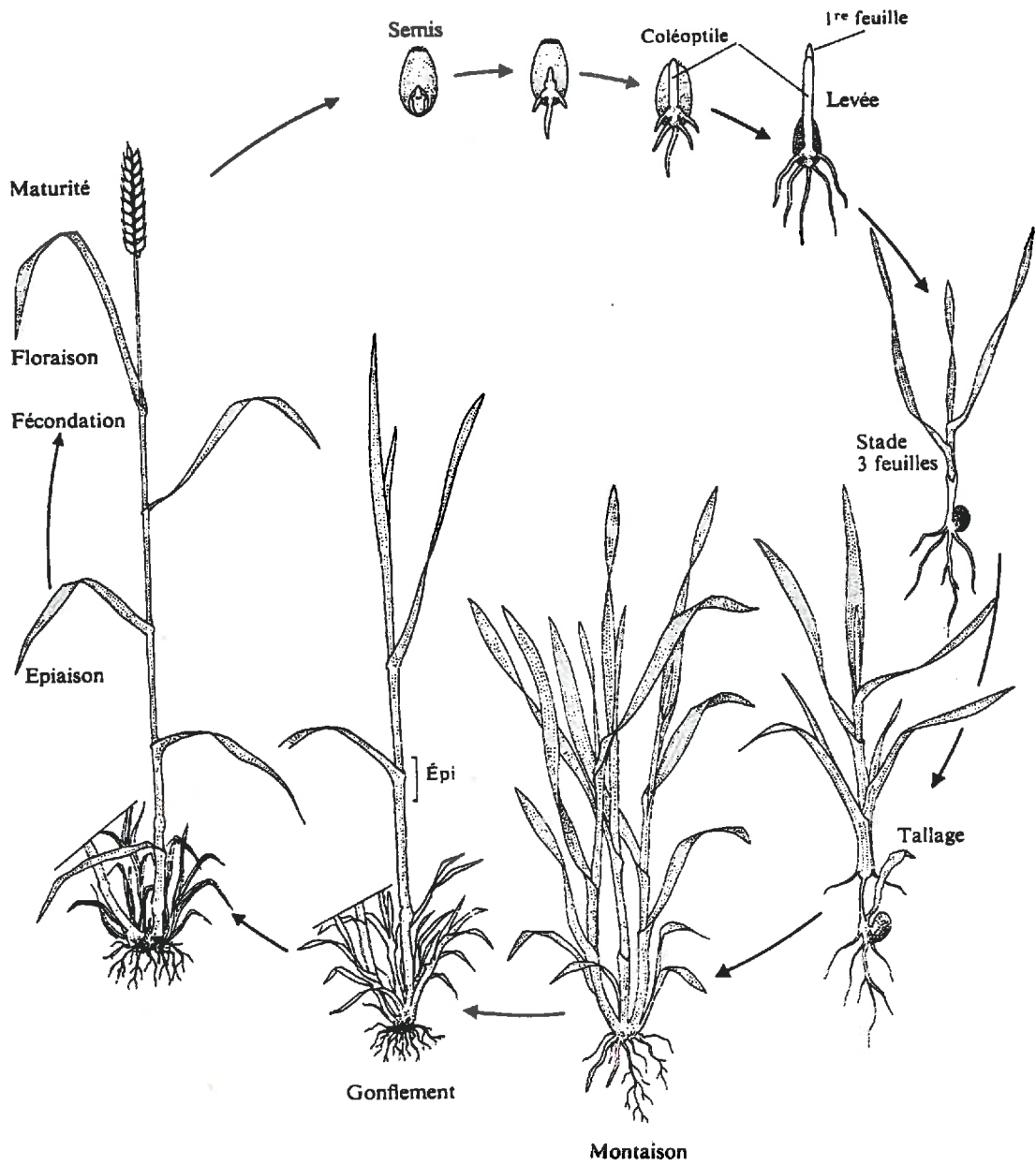
Les conditions de culture pour les 3 années sont données dans le tableau 1.

PRATIQUES CULTURALES \ BLE	CASTAN 80	TOP 81	TOP 82
PRECEDENT	prairie	blé	prairie
SEMIS	6 mars 1980 400 grains/m ² 40g/1000 grains	21 novembre 1980 350 grains/m ² 36g/1000 grains	12 novembre 1981 350 grains/m ² non mesuré
FERTILISATION	mi-avril azote:120kg/ha	mi-janvier azote:60kg/ha début mars azote:120kg/ha phosphore:120kg/ha	début janvier azote:50kg/ha phosphore:100kg/ha mi-mars azote:120kg/ha
HERBICIDE	—	début avril 2,4 D : 1 l/ha	début janvier Dicuram : 4 l/ha
FONGICIDE	—	—	fin avril Bayleton T : 1kg/ha
RECOLTE	28 juillet 1980	20 juillet 1981	8 juillet 1982

Tableau I.1 : Calendrier cultural

Le comportement général des 3 blés a été le suivant :

- en 80, le blé CASTAN a subi plusieurs attaques parasitaires graves : oïdium à la base des tiges et sur les feuilles du bas vers la mi-Mai, rouille brune sur les dernières feuilles vers le 25 juin ; à cette date aussi apparaît de la septoriose à la base de quelques épis.



*Figure I.4 : Cycle de développement du blé
(extrait de Boyeldieu, 1980)*

- en 82, dès Avril, on note de la septoriose sur les feuilles ; cette attaque ne fera que s'amplifier et à la période d'épiaison-floraison l'épi est lui aussi atteint. En Mai-Juin, TOP souffre de la sécheresse. La maladie et de fortes températures pendant la période de maturation provoquent l'échaudage des grains.
- en 81, tout s'est déroulé normalement...

IV.2 - Mesures biologiques

IV.2.1 - Le blé

IV.2.1.a - Développement et croissance

Bonner et Galston (1952) proposent comme définition du développement et de la croissance :

Le *développement* d'une plante concerne toute modification qualitative dans sa forme. Les modifications observées sont jalonnées par des repères phénologiques ou stades de développement. Elles peuvent faire l'objet d'une notation mais non de mesures. Ces modifications sont par exemple : la germination, la feuillaison, la floraison, etc...

Lorsqu'on s'intéresse à l'aspect quantitatif, c'est-à-dire lorsque l'on mesure des phénomènes qui évoluent de manière continue tels que longueur, surface, poids,... on parle de *croissance*.

Bien qu'opposés dans leurs définitions, croissance et développement sont étroitement liés dans la vie d'un végétal, et il est souvent difficile de les étudier séparément : toute apparition d'organe (développement) se traduit presque simultanément par un allongement cellulaire (croissance). Pour faciliter la compréhension des phénomènes qualitatifs, on est amené à diviser la vie d'une plante en périodes, phases et stades.

Le cycle de développement d'une graminée telle que le blé (figure I.4) comprend 3 grandes périodes :

- la période végétative
- la période reproductrice
- la période de maturation.

- la période végétative ou "période des feuilles" : au cours de cette période, la plante forme les organes ayant pour rôle d'assurer sa nutrition (racines) et le maintien de ses fonctions vitales de respiration et d'assimilation (feuilles). Cette période se divise en 3 phases :

- la phase semis-levée : après la germination, la première feuille apparaît hors du sol, d'abord enroulée sur elle-même puis étalant son limbe

- la phase levée-début tallage : les feuilles ultérieures apparaissent à l'intérieur de la première feuille, chacune se dégageant de la gaine de la précédente à mesure qu'elle s'allonge.

Une feuille comporte 2 parties : la gaine attachée sur une tige au niveau d'un noeud et le limbe qui joue le principal rôle assimilateur.

La tige issue de la germination du grain de blé est appelée maître-brin.

- la phase début tallage - début montaison : quand le maître-brin porte 3 feuilles, le tallage commence : les bourgeons situés à l'aisselle des 3 premières feuilles du maître-brin entrent en croissance et donnent chacun un autre brin appelé talle primaire ; la première talle qui apparaît à l'aisselle de la première feuille est la talle primaire n° 1 ; les talles primaires donnent ensuite parfois naissance à d'autres talles (talles secondaires) qui parviennent rarement au stade d'initiation florale ou qui ne donnent qu'un épi mal formé et stérile (épiochon).

La structure d'une graminée au stade tallage est complexe, du fait que tous les noeuds sont empilés, sans aucune élongation des entre-noeuds. Le port de la plante au cours du tallage est plus ou moins étalé.

- la période reproductrice ou "période des tiges" : c'est la période de formation et de croissance de l'épi, s'accompagnant d'une montée de celui-ci à l'intérieur des gaines foliaires (montaison). Le changement de phase correspond à une modification fondamentale du comportement de la plante : le tallage diminue et l'élongation des entre-noeuds commence. Le premier indice visible à l'extérieur

est un redressement des tiges, qui vont prendre peu à peu un port vertical.

La dissection de l'apex (bourgeon central à la base de la tige, à l'intérieur) permet de suivre le développement de l'ébauche d'épi :

- . stade A : stade d'initiation florale - le futur épi mesure environ 0,5 mm.
 - . stade B : ébauche de glumes (enveloppes des épillets) la phase A-B est d'une grande importance pour l'avenir de la culture : à son terme, le tallage cesse presque totalement, le nombre d'épis et d'épillets est pratiquement déterminé pour la plante.
 - . stade C : correspond à la différenciation des pièces florales, étamines puis ovaires - l'épi mesure environ 2,5 mm.
 - . stade D : l'ébauche d'épi est déjà très grosse (4 à 5 cm de longueur) et déjà haute dans les gaines foliaires, à cause de l'élongation accélérée des entre-noeuds.
 - . le gonflement est quasiment simultané au stade D : l'épi est au niveau de la gaine de la dernière feuille et le distend.
 - . 10 à 12 jours après en moyenne l'épi sort complètement au-dessus de la gaine : c'est l'épiaison.
 - . lorsque, quelques jours plus tard, les étamines apparaissent à l'extérieur des enveloppes florales, le stade est noté conventionnellement floraison mais la fécondation a déjà eu lieu.
- la période de maturation ou "période des grains" : pendant cette période le grain grossit et draine à lui tous les produits et toutes les réserves du végétal ; la plante se dessèche et jaunit.

L'évolution du grain comporte 3 phases :

- . une phase de multiplication cellulaire intense. Le grain accroît rapidement son volume et son poids en eau et en matière sèche. A la fin de cette phase, il a atteint sa forme définitive ; si on l'ouvre il libère un liquide blanc : c'est le stade du grain laiteux.

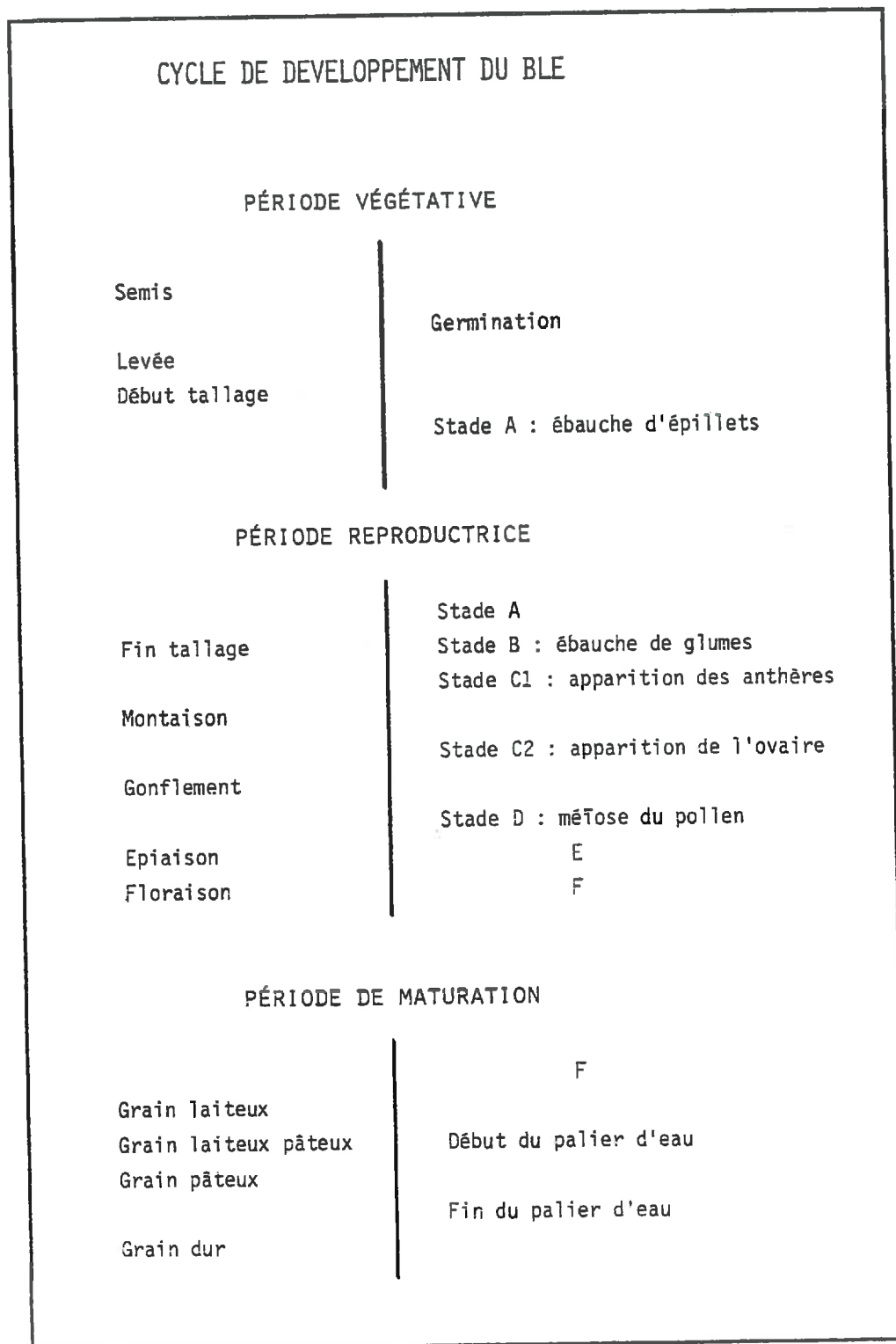


Figure I.5 : Stades de développement du blé

. une phase d'enrichissement : les tissus étant en place, le grain accumule ses réserves amylacées et protidiques tandis que son poids en eau demeure constant : c'est le palier d'eau. A la fin de cette phase, la migration des réserves est terminée, c'est le stade grain pâteux.

Le palier d'eau est une phase très critique dans l'évolution du grain : une forte demande hydrique alliée à une température élevée pendant cette période peut provoquer un blocage de la migration des substances vers le grain et donc une diminution sensible de sa croissance et de son poids final (échaudage).

Les étapes de développement du blé telles qu'elles ont été présentées ci-dessus sont résumées dans la partie gauche de la figure I.5. L'échelle de droite (Jonard, Vincent et Koller, 1952) est basée sur les transformations du bourgeon terminal -futur épi- et pour la maturation sur la mesure du poids d'eau contenue dans les grains. D'autres échelles existent, qui ne prennent en compte que les caractères externes du blé (Feekes, 1954 ; Keller et Baggiolini, 1954) : apparition de feuilles, de talles, de noeuds, caractères de l'épi ou du grain.

IV.2.1.b - L'élaboration du rendement du blé

Le rendement (poids de grains par unité de surface) est le résultat du produit de différentes composantes :

$$\begin{aligned} \text{rendement} &= \text{nombre de plantes/unité de surface} \\ &\quad \times \text{nombre d'épis/plante} \\ &\quad \times \text{nombre de grains/épi} \\ &\quad \times \text{poids du grain.} \end{aligned}$$

Les composantes de rendement se forment successivement au cours de la vie de la plante mais il existe des interactions entre elles, par l'intermédiaire d'un système de compensations : les composantes qui se déterminent le plus tard peuvent rattraper les insuffisances de celles survenues plus tôt ; inversement, si une composante est trop abondante, les suivantes se trouveront réduites. Bien entendu, ces compensations ne sont pas totales et sont variables selon la variété.

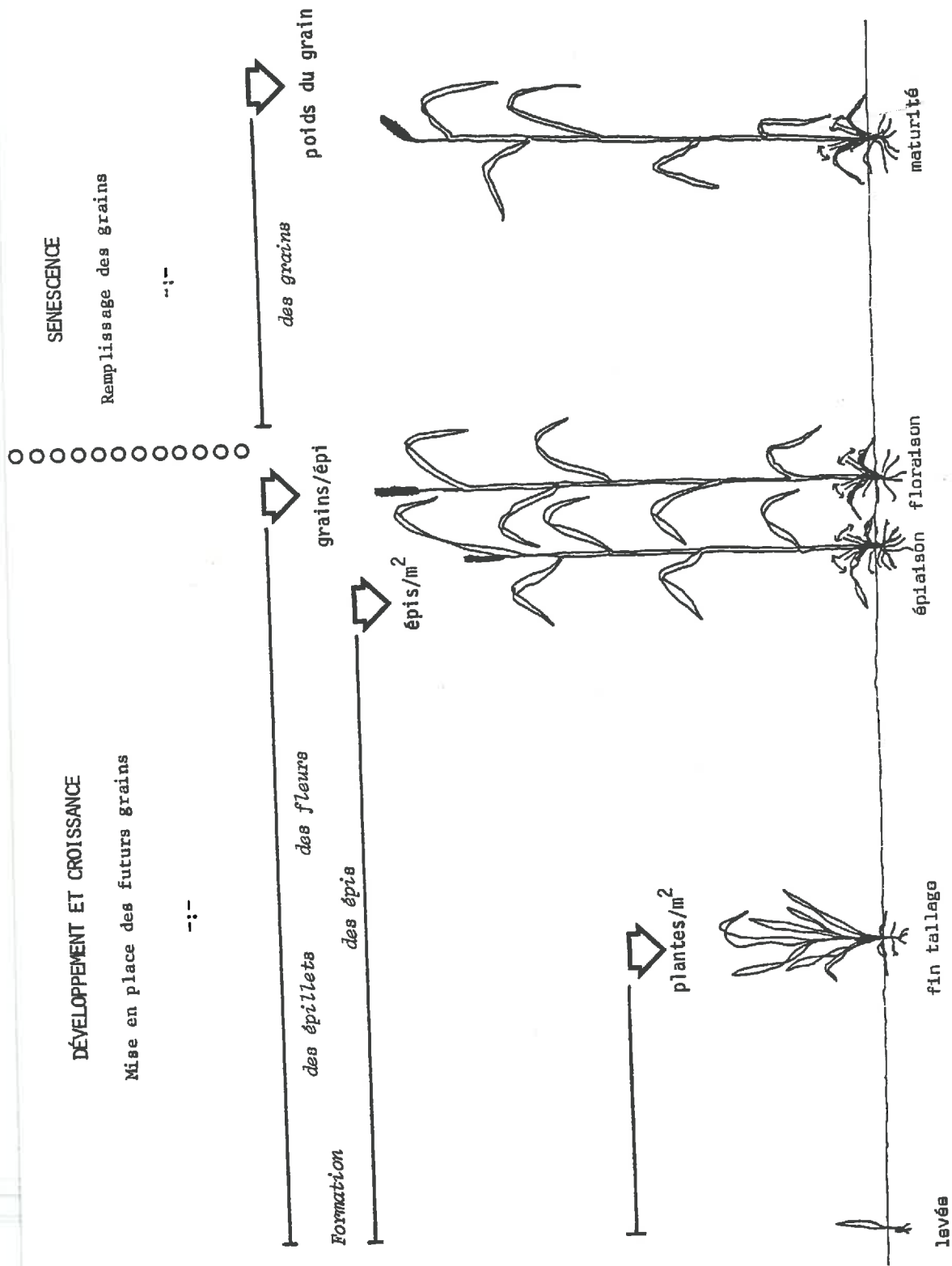


Figure I.6 : Mise en place des composantes du rendement sur le blé

La figure I.6 montre la mise en place des composantes du rendement au cours du cycle de développement du blé. Au bout de chacune de ces périodes, une composante du rendement est fixée :

- à l'émergence puis de façon définitive au terme de la période de tallage, est fixé le nombre de plantes au m².
- à l'épiaison est connu le nombre d'épis par plante : en fait, cet épi existe depuis le stade B de l'apex ; à la date de l'épiaison, il devient visible et dénombrable.
- à la floraison peut être connu le nombre de grains par épi qui dépend du nombre d'épillets de l'épi et du nombre de fleurs qui ont été fécondées, le nombre d'épillets et de fleurs est lui aussi pratiquement fixé au début du cycle (stades B et C respectivement); par contre le taux de fécondation des fleurs se détermine juste avant la floraison.
- après la floraison, pendant la période de maturation, se met en place la composante finale du rendement : le poids du grain.

En résumé, le rendement du blé s'élabore en 2 temps :

- la mise en place des futurs grains
- le remplissage des grains.

Ces 2 temps correspondent à 2 grandes divisions du cycle de végétation :

- la période de croissance et de développement de la plante, où chacun des stades modifie la structure du couvert ;
- la période de sénescence pendant laquelle la plante se dessèche, jaunit et perd ses dernières feuilles.

IV.2.2 - Protocole de mesures biologiques

Le but général du protocole est d'acquérir le maximum d'informations sur le développement et la croissance d'un couvert de blé, par l'intermédiaire de la mesure des paramètres de structure et de biomasse des plantes qui le composent.

Ce protocole de mesures a été mis au point par P. MALET (INRA - Bioclimatologie) dans le but d'interpréter les données de réflectance acquises par un radiomètre situé au-dessus du couvert et fonctionnant dans les mêmes bandes spectrales (visible - proche infrarouge) que les satellites LANDSAT.

Puisqu'il apparaissait d'après la bibliographie que, comme la réflectance, la réponse radar dépendait à la fois des propriétés géométriques et des propriétés liées à la masse d'eau des plantes, ce protocole a été utilisé sans grandes modifications.

IV.2.2.a - Notation des stades de développement

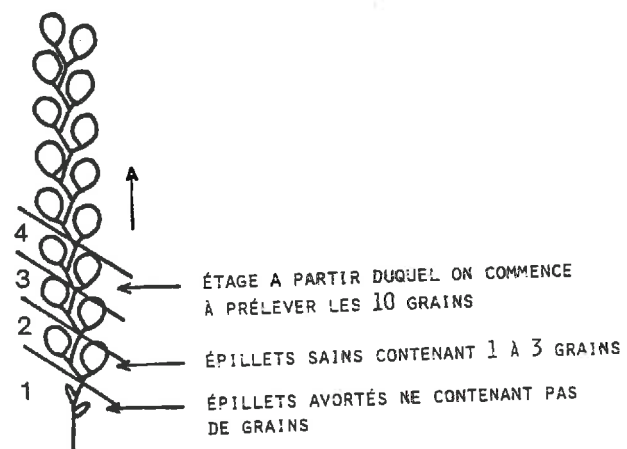
Les stades de développement sont observés sur 10 à 15 maîtres-brins, 2 fois par semaine en moyenne ; un stade est atteint lorsque 50 % des maîtres-brins observés l'ont atteint. Pour les 3 années, les notations ont commencé vers l'apparition de la dernière feuille. Les stades ultérieurs ont été codifiés comme suit :

- gonflement (G) : l'épi est arrivé au niveau de la gaine de la dernière feuille et la distend
- épiaison (E) : l'épi est complètement sorti de la gaine de la dernière feuille
- floraison (F) : les étamines sont visibles à l'extérieur de l'épi.

La phase de maturation des grains (détection des dates du début du palier d'eau -DPE- et de la fin du palier d'eau -FPE-) a été suivie selon la méthode préconisée par GURNADE et MALET (1980) : les évolutions du poids de matière sèche et du poids d'eau dans les grains sont mesurées sur des épis appartenant à des brins d'origine morphologique connue et identique (maîtres-brins), d'une taille supérieure au reste de la population, et pour chaque épi sur un lot de 10 grains prélevés à partir du 4^e étage d'épillets -zone embryologiquement homogène- (figure I.7).

Figure I.7 : Schéma de prélèvement des grains sur l'épi

(d'après GURNADE et MALET, 1980)



10 lots de 10 grains ainsi ôtés tous les 2 jours parmi des maîtres-brins marqués début montaison sont pesés frais puis sec après un étuvage de 12 h à 105° C.

L'avantage de la méthode est de ne pas exiger un échantillonnage important (10 épis tous les 2 jours suffisent) et de permettre une détection précoce des accidents de parcours tels qu'un échaudage. Par contre elle n'est pas représentative quantitativement de l'ensemble du champ en ce sens qu'on ne saura pas l'influence pondérale de ces accidents sur le rendement final.

IV.2.2.b - Densité du couvert et composantes du rendement

. 3 ou 4 fois au cours du cycle de végétation le nombre de plantes est compté sur 2 lignes adjacentes de semis, de longueur 0,50 m ; ce comptage, répété en 6 endroits quelconques du champ, fournit la moyenne du nombre de plantes au mètre linéaire ; l'espacement des rangs étant de 18 cm, la densité de plantes au m² est obtenue en multipliant cette moyenne par 5,5.

. Le rendement est le résultat du produit :
nombre d'épis au m² x nombre de grains par épi x poids d'un grain.

A la récolte sont mesurés :

- le nombre d'épis au m², par la même méthode utilisée pour connaître la densité de plantes au m² (ci-dessus). Les épis normaux sont distingués des épiochons, plus petits et plus maigres.

- le nombre de grains par épi et par épiochon : une moyenne est obtenue à partir de 30 épis et 30 épiochons.

- le poids d'un grain, par le rapport poids total des grains / nombre des grains issus des 30 épis et des 30 épiochons.

IV.2.2.c - Mesures des paramètres de structure et de biomasse de la plante

La liste des mesures qui suit est celle réalisée "au maximum" ; selon les années, en fonction des disponibilités de temps et de main-d'oeuvre, en fonction des objectifs, cette liste a été plus ou moins allégée.

2 fois par semaine, une quinzaine de plants de Blé sont prélevés au hasard dans la parcelle.

Chaque brin est individualisé et son origine morphologique repérée (maître-brin, taille) avant d'effectuer les mesures suivantes :

- la hauteur totale : depuis le plateau de tallage jusqu'au niveau d'insertion du limbe de la dernière feuille apparue (F1), et, à partir de l'épiaison, les hauteurs à la base et au sommet de l'épi,
- la hauteur d'insertion des feuilles sur la tige, au niveau du limbe,
- la hauteur du dernier noeud apparue (N1),
- l'angle de l'épi avec la verticale : cet angle, mesuré au rapporteur est pris égal à 180° lorsque l'épi est vertical.
- le poids frais puis sec (passage à l'étuve 20 h à 105° C).
 - . de l'épi
 - . du dernier tronçon de tige (du dernier noeud à la base de l'épi = col de l'épi)
 - . de la gaine de la dernière feuille (G1)
 - . du reste de la tige.

Pour chacune des 3 ou 4 dernières feuilles :

- l'angle d'insertion de la feuille (limbe) avec la tige - 180° correspond à une feuille dressée verticalement
- la surface du limbe, avec un planimètre photoélectrique
- l'état de verdure du limbe : une échelle basée sur l'estimation visuelle de la surface encore verte est utilisée - une feuille verte est notée 100, une feuille jaune 001, la gamme intermédiaire allant de 10 en 10. (Ce critère d'état de verdure n'est pas un paramètre de structure ni de biomasse ; il s'agit d'un critère de couleur - critère "radiométrique" -, mais il trouve sa place ici au titre d'indicateur de l'état du couvert de blé. Signalons aussi que le radar ne sera pas sensible à ce paramètre).
- le poids frais puis sec du limbe.

Les résultats des mesures sont notés sur bordereaux puis enregistrés sur cartes perforées, date par date.

Le tableau I.2 récapitule les mesures effectivement réalisées au cours des 3 années d'expérimentation, en précisant notamment à partir de quelles dates et sur quels brins de la plante ces données sont disponibles.

PARAMETRES \ BLE	CASTAN 80	TOP 81	TOP 82
Hauteur d'insertion des feuilles	. à partir du 21.04 . sur F1,F2,F3	. à partir du 14.04 . sur F1,F2,F3,F4	. à partir du 19.04 . sur F1,F2,F3,F4
Hauteur d'insertion du dernier noeud	non	. à partir du 12.05	non
Angle d'insertion des feuilles	. à partir du 05.06 . sur F1,F2,F3	. à partir du 14.04 . sur F1,F2,F3,F4	. à partir du 19.04 . sur F1,F2,F3,F4
Oblicité de l'épi	non	. à partir du 27.05	. à partir du 24.05
Etat de verdure des feuilles	non	. à partir du 14.04 . sur F1,F2,F3,F4	. à partir du 19.04 . sur F1,F2,F3,F4
Surface des feuilles	. à partir du 09.06 . sur F1,F2,F3	. à partir du 14.04 . sur F1,F2,F3,F4	. à partir du 19.04 . sur F1,F2,F3,F4
Poids frais et sec de l'épi	. à partir du 05.06	. à partir du 19.05	. à partir du 13.05
Poids frais et sec du col de l'épi	non	. du 02.06 au 09.06 (avec la gaine) . à partir du 12.06 (sans la gaine)	non
Poids frais et sec du reste de la tige	non	. à partir du 02.06	non
Poids frais et sec de la tige entière	. à partir du 05.06 (avec la gaine)	. du 14.04 au 27.05 (avec la gaine)	. du 19.04 au 19.05 (avec la gaine) . à partir du 24.05 (sans la gaine)
Poids frais et sec de la gaine	non	. à partir du 12.06	. à partir du 24.05
Poids frais et sec des feuilles	. à partir du 05.06 . sur F1,F2,F3	. à partir du 14.04 . sur F1,F2,F3,F4	. à partir du 19.04 . sur F1,F2,F3,F4
Poids sec de l'ensemble des talles	non	. à partir du 14.04	. à partir du 19.04
MESURES EFFECTUEES SUR	. maître-brin . chacune des talles 10 à 15 plantes	. maître-brin 15 plantes	. maître-brin 15 plantes

Tableau I.2 : Liste des mesures de structure et de biomasse disponibles

IV.3 - Mesures physiques et autres mesures de terrain

IV.3.1 - Le radar

IV.3.1.a - Intérêt des systèmes radar

L'intérêt des systèmes radar pour le suivi des couverts végétaux repose sur des connaissances théoriques liées à la bande de fréquence où ils travaillent (hyperfréquences : 1-100 GHz ; longueur d'onde : 30 cm-0,3 cm) :

- dans cette bande, l'atténuation produite par l'atmosphère, la pluie et les nuages est négligeable pour les fréquences de 1 à 15 GHz (habituellement utilisées en télédétection) et croît lentement

ensuite ; le système est donc apte à fournir des informations indépendantes des conditions atmosphériques.

- le radar est un système actif, c'est-à-dire possédant sa propre source d'illumination, ce qui lui permet de fonctionner de jour comme de nuit et d'obtenir des observations répétitives ; cette source, cohérente, permet une bonne résolution indépendante de l'altitude (meilleure résolution actuelle 10 x 20 m), bien adaptée aux parcelles agricoles.
- le rayonnement hyperfréquences est affecté par 2 caractéristiques de la cible visée : sa géométrie et ses propriétés diélectriques liées à sa teneur en eau.

Le radar semble donc tout indiqué pour la mesure des paramètres de structure des plantes (les tailles des feuilles, épis sont de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde) et pour la mesure de la teneur en eau du végétal.

IV.3.1.b - Principe de la mesure

Le radar émet un rayonnement propre vers la zone à observer (cible) et enregistre le rayonnement que lui réfléchit cette zone.

La mesure de la puissance rétrodiffusée P_r permet de déduire les propriétés réflectrices de la cible à l'aide de l'équation radar :

$$P_r = \frac{P_e G_e G_r \lambda^2}{L} \cdot \frac{1}{(4\pi)^3} \cdot \frac{S}{R^4} \cdot \sigma^0$$

P_r : puissance reçue

G_e, G_r : gains à l'émission, à la réception

λ : longueur d'onde

L : pertes électroniques

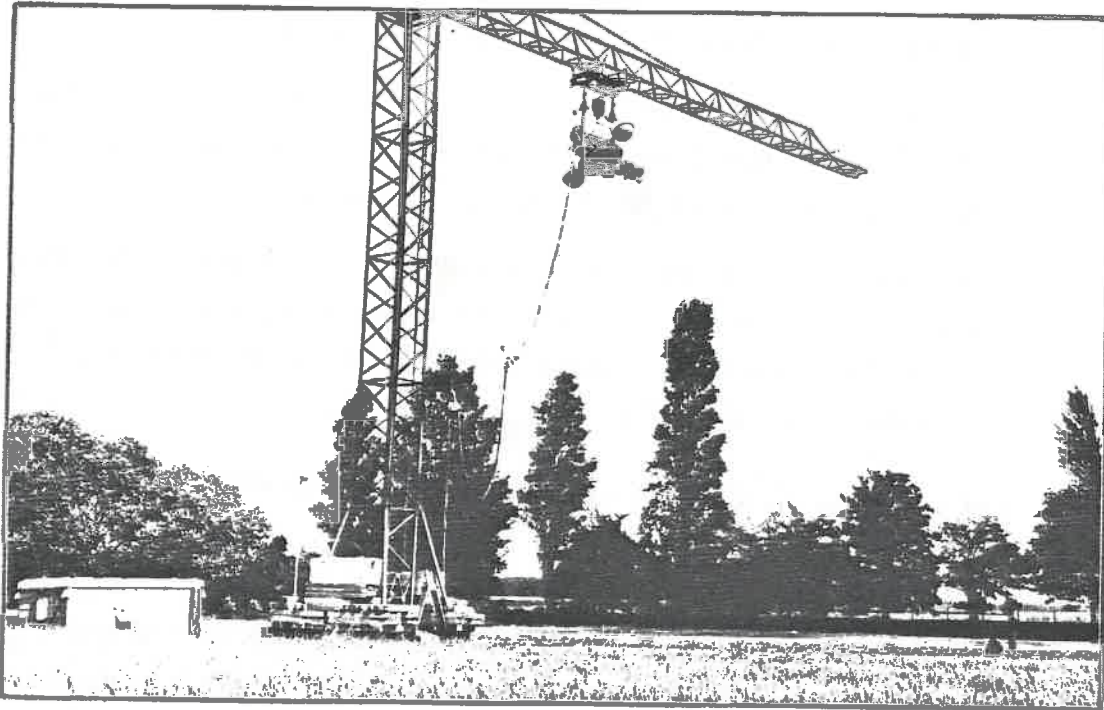
S : surface illuminée par le faisceau

R : distance radar-cible

σ^0 : coefficient de rétrodiffusion radar, caractéristique de la cible.

Les paramètres de cette équation radar se regroupent en plusieurs types :

- les paramètres du système : $P_e, G_e, G_r, \lambda, L$; il est possible de s'affranchir de ces paramètres par un étalonnage sur une cible de



Type	FM/CW
Modulation	Triangulaire
Fréquence de modulation	66 ou 200 Hz
Fréquences centrales	1,5 - 3 - 4,5 - 9 GHz
	20 - 10 - 6,6 - 3,3 cm
Excursion en fréquence	$\frac{\Delta F}{F_0} = 1,33$ ou $2,67 \%$
Puissance transmise	1 W (0,2 W à 9 GHz)
Antennes d'émission	Un cornet pour la polarisation H " " " V
Antennes de réception	<ul style="list-style-type: none"> . Une antenne de 1,10 m de diamètre polarisée en H ou en V pour 1,5 GHz . Deux antennes polarisées en H et V de 0,47 m de diamètre pour 3 - 4,5 - 9 GHz
Dynamique	60 dB
Distance de travail	12 à 700 m
Ouverture d'antenne	12° - 15° - 10° - 5° suivant la fréquence
Surface interceptée	de 1 à 100 m ²

Figure I.8 : Principales caractéristiques du radar RAMSES

surface équivalente radar connue (lentille de Lüneberg)

- un paramètre géométrique : la distance cible-radar R
- un paramètre dépendant à la fois du système et de la géométrie, S ; en effet, S dépend de la taille de l'antenne, de la fréquence, de la distance R et de l'angle d'incidence
- un paramètre caractérisant la cible : σ° (nombre sans dimension). C'est le paramètre utile à extraire de la mesure radar ; la dynamique de ce paramètre étant très grande (supérieure à 10^5), on exprime σ° en décibels : $\sigma^{\circ}_{dB} = 10 \log \sigma^{\circ}$.

Les principales caractéristiques du radar RAMSES sont décrites dans le tableau de la figure I.8.

L'appareil est monté sur la flèche d'une grue ; il peut être soumis à un déplacement sur cette flèche, à une orientation en site et en gisement, par un mécanisme de contrôle à distance. Une mesure consiste à enregistrer le signal reçu en continu durant un aller ou un retour de l'appareil sur la flèche (longueur de la flèche : 15 m ; durée d'intégration 25 secondes).

La mesure est répétée pour chaque fréquence, aux 4 ou 6 angles d'incidence (de 0° à 40° ou 60°), avec 3 polarisations (HH, VV, HV ou VH). Une série de mesures complète sur une cible, avec étalonnage préalable sur la lentille de Lüneberg dure environ 3 heures.

La précision de la mesure obtenue a fait l'objet d'une étude détaillée (Lopes, 1983) : elle peut être estimée à $\pm 1,5$ dB en moyenne (à un risque de 10 %).

IV.3.2 - Les autres mesures de terrain

Sur le sol, les deux paramètres influençant la réponse radar sont la rugosité et l'humidité.

La rugosité est évaluée en relevant le profil de surface à l'aide d'un appareil (profilomètre), muni de baguettes coulissant verticalement. Le profilomètre est posé sur le sol et les baguettes donnent par leurs extrémités supérieures une image discrétisée du profil du terrain ; la longueur du système est de 3 m, avec un pas de 1,5 cm.

La photographie de l'appareil une fois en place constitue l'enregistrement d'un profil de 3 m ; les relevés sont effectués parallèlement et perpendiculairement au sens du travail par les machines agricoles. Le profil est

numérisé à l'aide d'une table traçante reliée à une console TECTRANIX et analysé : sortie des histogrammes des pentes et des hauteurs, calcul de la hauteur quadratique moyenne, classement en micro -et macro- rugosité par rapport à la longueur d'onde, etc...

La rugosité a été déterminée 3 ou 4 fois au cours du cycle de végétation.

La mesure de l'humidité du sol a été faite selon la méthode de Henin : prélèvement d'un échantillon, pesage, passage à l'étuve 24 h à 105° C, pesage. L'humidité pondérale est obtenue :

$$H_p = \frac{\text{masse eau}}{\text{masse sol sec}} ;$$

connaissant la densité du sol à l'état sec, on en déduit l'humidité volumique $H_v = d \times H_p$. La densité moyenne du sol d'Auzeville est de 1,2.

L'humidité est relevée à différentes profondeurs (surface, -3, -5, -10, -15 cm).

Le profil d'humidité a été relevé à chaque date de mesures radar en 80 ; en 81 et 82, seule l'humidité de surface a été suivie, toujours couplée aux mesures radar.

CHAPITRE II

VARIABILITE ET NORMES D'ECHANTILLONNAGE
DES MESURES BIOLOGIQUES

VARIABILITE ET NORMES D'ECHANTILLONNAGE DES MESURES BIOLOGIQUES

PLAN

	<i>Page</i>
<u>I - METHODE STATISTIQUE UTILISEE</u>	2.1
I.1 - <u>Notations</u>	2.1
I.2 - <u>Hypothèse de normalité de la population</u>	2.2
I.3 - <u>Intervalle de confiance de la moyenne et de la variance</u>	2.3
I.4 - <u>Calcul de la taille d'échantillon N à prélever</u>	2.4
I.5 - <u>Commentaires sur la relation $N = f(C.V)$</u>	2.6
I.6 - <u>Méthode complémentaire d'analyse</u>	2.6
<u>II - ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS</u>	2.8
II.1 - <u>Présentation des résultats</u>	2.8
II.2 - <u>Analyse de la taille d'échantillon à prélever</u>	2.8
II.3 - <u>Interprétation des résultats</u>	2.16
<u>III - CONSEQUENCES DES RESULTATS</u>	2.18
III.1 - <u>Normes d'échantillonnage</u>	2.18
III.2 - <u>Précision des mesures</u>	2.20
<u>IV - CONCLUSIONS</u>	2.20
IV.1 - <u>Notion de représentativité chronologique</u>	2.20
IV.2 - <u>Application aux données de télédétection</u>	2.22

Les mesures biologiques nécessaires pour suivre l'évolution de la structure et de la biomasse d'un couvert végétal sont nombreuses et relativement fastidieuses.

Comme pour tout phénomène vivant, ces mesures sont caractérisées par une forte variabilité, bien supérieure à l'erreur commise sur la mesure, et non compressible. Cette variabilité est liée à l'inhomogénéité des plantes composant le couvert ; en effet, malgré la pureté génétique des semences, des micro-variations pédologiques et climatiques induisent des différences individuelles dans le développement et la croissance des plantes : à une même date, toutes les plantes ne sont pas au même stade de développement ; pour un même stade, elles n'ont pas toutes le même nombre de feuilles, la même hauteur ou le même poids d'eau...

Le principal problème qui se pose donc dans ce type d'étude est l'échantillonnage : combien de plantes faut-il prélever au cours du cycle de végétation pour avoir une "bonne" représentativité quantitative de l'ensemble du champ ? Ce nombre doit être minimal, étant donné le coût des prélèvements en temps et/ou en main d'oeuvre.

Ce problème d'échantillonnage est parfois abordé dans les études d'écophysiologie (Delecolle, Dosso, Simon ; 1976) mais jamais encore - à notre connaissance - par les équipes chargées de la vérité - terrain en télédétection ; pourtant, les expérimentations in situ encore indispensables nécessitent de connaître à chaque date la taille du prélèvement à effectuer, ou du moins d'évaluer la précision des mesures réalisées sur un échantillon donné - qu'il s'agisse d'une méthode d'analyse du couvert destructive ou non destructive (photos hémisphériques, points-quadrats)-.

I - METHODE STATISTIQUE UTILISEE

I.1 - Notations

On notera P l'ensemble des plants de blé constituant le champ : population de taille T.

La mesure d'un paramètre de structure ou de biomasse est une variable aléatoire continue prenant les valeurs $x_1, \dots, x_i, \dots, x_T$,

de moyenne $\mu = \frac{1}{T} \sum x_i$,

de variance $\sigma^2 = \frac{1}{T} \sum (x_i - \mu)^2$ (écart type : σ)

Le but est d'estimer μ et σ^2 de P, qui sont inconnues, à partir des caractéristiques d'un échantillon prélevé.

A chaque date sont prélevées 15 plantes ; les mesures des paramètres de structure et de biomasse sont effectuées sur le maître-brin (pour TOP 81 et TOP 82). L'échantillon est donc l'ensemble des maîtres-brins, d'effectif ou taille $n = 15$.

Sur cet échantillon de taille n sont calculés :

. la moyenne $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$

. la variance $S^2 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2$ (écart type : S)

. l'estimation de la variance $S_E^2 = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2$

(estimation de l'écart-type : S_E)

. le coefficient de variation C.V = $\frac{S}{\bar{x}} \times 100$

. le coefficient de symétrie $B_1 = \frac{1}{n} \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{S^3}$

. le coefficient d'aplatissement $B_2 = \frac{1}{n} \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{S^4}$

I.2 - Hypothèse de normalité de la population

Les calculs statistiques suivants -détermination de l'intervalle de confiance de la moyenne, calcul de la taille d'échantillon à prélever-, nécessitent une hypothèse sur la loi de distribution de la population, pour le paramètre étudié : celle de sa normalité.

Cette normalité doit être vérifiée si l'effectif de l'échantillon est inférieur à 30 ; elle est admise en pratique si n est supérieur à 30.

Dans le cas étudié où $n = 15$, la normalité de la population a été testée sur les principaux paramètres pour TOP 81 et TOP 82. Le test utilisé est celui de Pearson (1966) : les valeurs calculées à partir de l'échantillon des coefficients B_1 et B_2 sont comparées à leurs valeurs théoriques ($B_1 = 0$ et $B_2 = 3$) pour une loi normale.

L'hypothèse de normalité est rejetée au risque 5 % pour $n = 15$

ou

Le tableau II.1 indique les proportions de non-normalité sur l'ensemble du cycle de mesures, pour chacun des paramètres testés.

BLE			BLE		
PARAMETRE	TOP 81	TOP 82	PARAMETRE	TOP 81	TOP 82
Poids sec du maître-brin	9/22	7/20	Surface de la dernière feuille	9/22	10/20
Poids d'eau du maître-brin	4/22	4/20	Poids d'eau de la dernière feuille	5/22	9/20
Poids sec de la plante entière	7/22	9/20	Poids sec de la dernière feuille	3/22	4/20
Hauteur de la dernière feuille	5/22	4/20	Poids d'eau de l'épi	2/14	4/13
Angle d'insertion de la dernière feuille	21/22	16/20	Poids sec de l'épi	3/14	5/13

Tableau II.1 : Proportion des cas de non-normalité sur différents paramètres (test de Pearson)

La condition est une condition nécessaire mais non suffisante pour affirmer la normalité : cette condition indique que la distribution observée appartient à la famille de courbes ayant les caractéristiques " $B_1 = 0$ et $B_2 = 3$ ", famille comprenant d'autres courbes que la loi normale.

Parmi les cas testés où l'hypothèse de normalité selon le test de Pearson ne pouvait être rejetée, un test supplémentaire (droite de Henry) a alors été effectué, sur une vingtaine de cas : ces tests ont tous été positifs, indiquant donc la normalité de ces distributions.

En résumé, la proportion des cas de non-normalité est de 33,3 % pour TOP 81 et de 38,7 % pour TOP 82 : vis-à-vis de l'emploi des calculs statistiques qui requièrent la normalité, ces proportions ne sont pas négligeables ; dans la pratique néanmoins, on agira comme si la population était normale, mais en conservant - en la signalant - l'information de non-normalité pour certains paramètres à certaines dates.

I.3 - Intervalle de confiance de la moyenne et de la variance

Pour un échantillon de taille $n < 30$, l'intervalle d'estimation (ou intervalle de confiance) de la moyenne μ vraie de la population est :

$$\bar{x} - \frac{t\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + \frac{t\sigma}{\sqrt{n}}$$

or σ , écart type vrai de la population est inconnu et remplacé par son estimation $S_E = \frac{s}{\sqrt{n-1}}$ d'où :

$$\bar{x} - \frac{tS}{\sqrt{n-1}} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{tS}{\sqrt{n-1}}$$

où $t = t_{n-1 ; \alpha/2}$ est la valeur de Student, à $n-1$ degrés de liberté, au risque α choisi.

Pour cette étude a été pris $\alpha = 10\%$; pour $n = 15$, $t_{14 ; 0,05} = 1,76$; on peut affirmer avec 10 chances sur 100 de se tromper que μ est comprise entre $\bar{x} - 0,47$ s et $\bar{x} + 0,47$ s.

L'intervalle d'estimation de la variance σ^2 de la population est donné par la formule :

$$\frac{nS^2}{\chi_{n-1 ; \alpha/2}} \leq \sigma^2 \leq \frac{nS^2}{\chi_{n-1 ; 1-\alpha/2}}$$

où χ est la valeur "khi-deux" de Pearson à $n-1$ degrés de liberté, au risque α choisi.

$$\begin{array}{l} \text{pour } \alpha = 10\% \\ n = 15 \end{array} \quad \begin{array}{l} \chi_{14 ; 0,05} = 23,68 \\ \text{et} \\ \chi_{14 ; 0,95} = 6,57. \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{d'où } 0,63 S^2 \leq \sigma^2 \leq 2,28 S^2 \\ 0,79 S \leq \sigma \leq 1,5 S \end{array}$$

I.4 - Calcul de la taille d'échantillon N à prélever

Il s'agit de déterminer la taille N de l'échantillon à prélever pour connaître la moyenne μ de la population avec une précision k fixée, à un risque α fixé ; on utilise les caractéristiques de l'échantillon précédemment prélevé :

$$\text{on veut } \bar{x} - k\bar{x} \leq \mu \leq \bar{x} + k\bar{x}$$

$$\text{soit } \frac{t\sigma}{\sqrt{N}} = k\bar{x} \quad (\S 3)$$

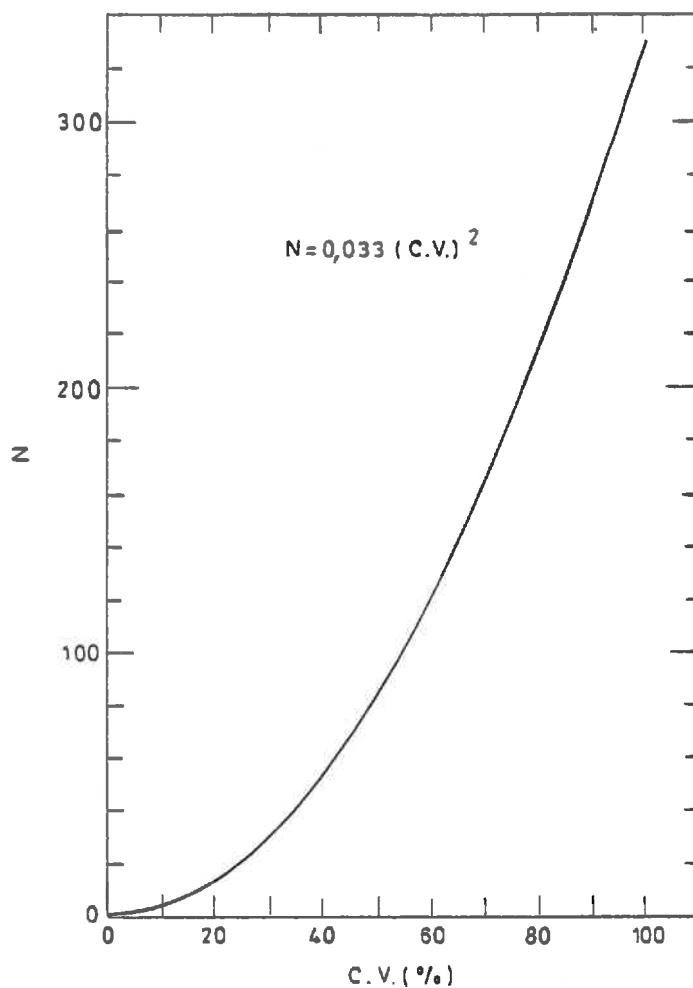


Figure II.1 : Evolution du nombre N d'individus à prélever en fonction du coefficient de variation (pour une précision $k = 10\%$, au risque $\alpha = 10\%$, avec $n = 15$)

C.V (en %)	N	C.V (en %)	N
0	1	de 46,1 à 49,2	80
de 0,1 à 12,3	5	de 49,3 à 52,2	90
de 12,4 à 17,4	10	de 52,3 à 55,0	100
de 17,5 à 21,3	15	de 55,1 à 60,3	120
de 21,4 à 24,6	20	de 60,4 à 65,1	140
de 24,7 à 27,5	25	de 65,2 à 69,6	160
de 27,6 à 30,1	30	de 69,7 à 73,8	180
de 30,2 à 32,5	35	de 73,9 à 77,8	200
de 32,6 à 34,8	40	de 77,9 à 81,6	220
de 34,9 à 36,9	45	de 81,7 à 85,2	240
de 37,0 à 38,9	50	de 85,3 à 88,7	260
de 39,0 à 42,6	60	de 88,8 à 92,1	280
de 42,7 à 46,0	70	de 92,2 à 95,4	300
		de 95,5 à 100	330

Tableau II.2 : Taille N de l'échantillon à prélever selon le coefficient de variation

$$\text{d'où } N = \frac{t^2 \sigma^2}{k^2 \bar{x}^2} \quad (1) \quad \text{où } t = t_{n-1} ; \alpha/2$$

en fait, étant donné l'intervalle de confiance de la variance σ^2 (§3) on a :

$$\frac{t^2 n S^2}{k^2 \bar{x}^2 \chi^2_{n-1 ; \alpha/2}} < N < \frac{t^2 n S^2}{k^2 \bar{x}^2 \chi^2_{n-1 ; 1 - \alpha/2}} \quad (2)$$

pour alléger les calculs, σ^2 sera simplement remplacée par son estimation S_E^2 dans l'expression (1) d'où :

$$N = \frac{t^2 n S^2}{(n-1) k^2 \bar{x}^2} \quad (3)$$

or $\frac{S^2}{\bar{x}^2} = \left(\frac{C.V.}{100}\right)^2 = \text{carré du coefficient de variation} / 100$

$$\text{d'où finalement : } N = \frac{t^2 n}{(n-1) k^2} \left(\frac{C.V.}{100}\right)^2 \quad (4)$$

I.5 - Commentaires sur la relation $N = f(C.V)$

La relation (4) indique que le nombre d'individus N à prélever est proportionnel au carré du coefficient de variation du paramètre mesuré. La courbe $N = f(C.V)$ a été tracée pour les valeurs de cette étude (figure II.1) : $n = 15$; $k = 10\%$; $\alpha = 10\%$.

Sur cette courbe, on voit d'ores et déjà que le nombre d'individus prélevés (15) ne sera suffisant pour assurer la représentativité quantitative (à la précision et au risque choisis) que si le coefficient de variation du paramètre mesuré est inférieur à 20 % environ.

En inversant cette courbe, a été construit le tableau II.2, afin de déterminer rapidement la taille de l'échantillon à prélever en fonction du coefficient de variation du paramètre.

I.6 - Méthode complémentaire d'analyse

Cette méthode est basée sur le modèle de la croissance élaboré par Malet (1979).

Les mesures effectuées concernent la croissance en taille, poids, surface d'un

échantillon d'organes (tiges, feuilles, épis) appartenant à des maîtres-brins. Au champ, des micro-variations pédo-climatiques décalent légèrement les dates de développement de ces maîtres-brins et de leurs organes, et donc leurs courbes de croissance. Si l'on admet que ces décalages ne modifient pas la loi de vitesse de croissance d'un individu (brin ou organe) à un autre, ce qui peut être le cas pour une phase de développement rapide entre 2 stades, les courbes de croissance des individus restent parallèles et sont comprises entre 2 courbes extrêmes.

Si de plus, la croissance concerne un organe qui soit une "entité élémentaire d'organogénèse" (par exemple une feuille, un entrenoeud de la tige, un secteur de l'épi), le modèle simplifié d'analyse de la croissance (Mallet, 1979) s'applique.

Selon ce modèle, la loi de croissance $y_i(t)$ d'un individu s'écrit :

$$y_i(t) = F(t - t_i) + e_i(t)$$

- . où t_i est le décalage de temps avec lequel cet individu débute sa croissance, par rapport à une origine commune des temps (par exemple, la moyenne de tous les débuts de croissance)
- . $e_i(t)$ est une fonction aléatoire (erreur résiduelle) suivant à chaque instant t une loi de Gauss de moyenne nulle et d'écart type σ .

Grâce à certaines hypothèses supplémentaires -non détaillées ici-, il est possible de montrer que la variance des mesures de croissance évolue de la façon suivante :

$$M_2(t) = m_2 F'^2 + \frac{(m_4 - m_2^2)}{4} F''^2 + \sigma^2$$

- . où m_2 et m_4 représentent respectivement la variance et le moment centré d'ordre 4 de la distribution des t_i (âges physiologiques des individus)
- . F' est la dérivée par rapport au temps de F , c'est-à-dire la vitesse d'évolution de la grandeur considérée.
- . F'' sa dérivée seconde (accélération de la croissance F)
- . σ^2 la variance de l'erreur résiduelle = variance résiduelle.

De cette expression, il ressort que si la vitesse d'évolution après être restée sensiblement constante ($F' = C^{te}$, $F'' = 0$), présente une variation brusque ($|F'| > 0$) il en résulte une augmentation brusque de la variance M_2 observée sur l'échantillon. Ce changement d'évolution brusque peut être dû à une cause interne à la plante (franchissement de stade, ...) ou externe (facteur limitant la croissance, ...).

Cette évolution découlant des lois de vitesse et d'accélération instantanées de la croissance, des mesures effectuées sur des échantillons différents d'une date à une autre vont suivre ces lois si les hypothèses sont vérifiées.

L'utilisation de ce modèle nécessite certaines contraintes d'échantillonnage ; en particulier, pour qu'une évolution de la variance entre 2 dates soit significative, il faut que la différence soit supérieure à l'intervalle de confiance de la variance résiduelle σ^2 , obtenue lorsque $F' = F'' = 0$.

II - ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

II.1 - Présentation des résultats

Les intervalles de confiance de la moyenne, à la précision et au risque choisis, la variance et le coefficient de variation sont figurés pour une dizaine des principaux paramètres sur TOP 81 et TOP 82 (figures II.2 à II.6).

Les résultats du calcul de la taille d'échantillon N à prélever pour ces paramètres sont présentés figure II.7.

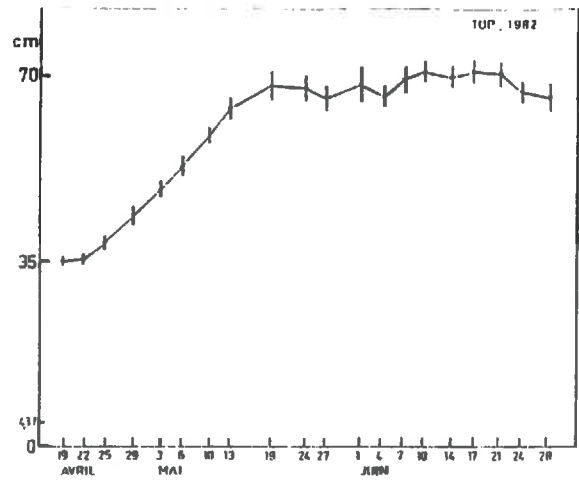
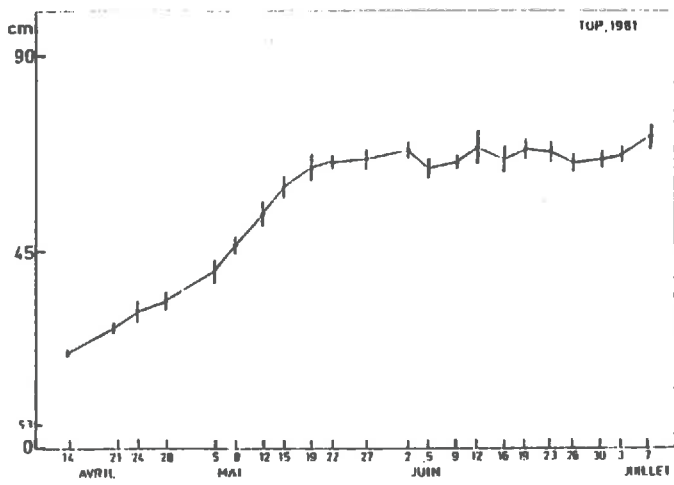
II.2 - Analyse de la taille d'échantillon à prélever

Ces résultats (figure II.7) indiquent que :

- la taille d'échantillon à prélever est très variable selon les paramètres mesurés

En moyenne sur le cycle de mesures, c'est le poids d'eau puis la surface de la dernière feuille qui nécessitent le plus grand échantillonnage (plus de 50 individus) : ceci est valable pour les 2 années.

Pour les 2 années, les paramètres nécessitant le plus petit échantillonnage sont, dans l'ordre décroissant, le poids d'eau total



2.9

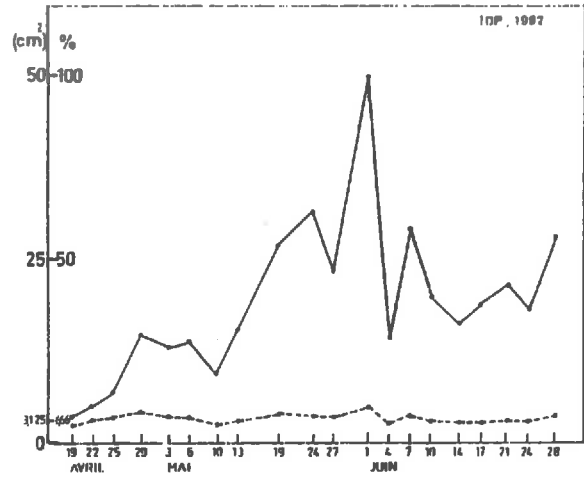
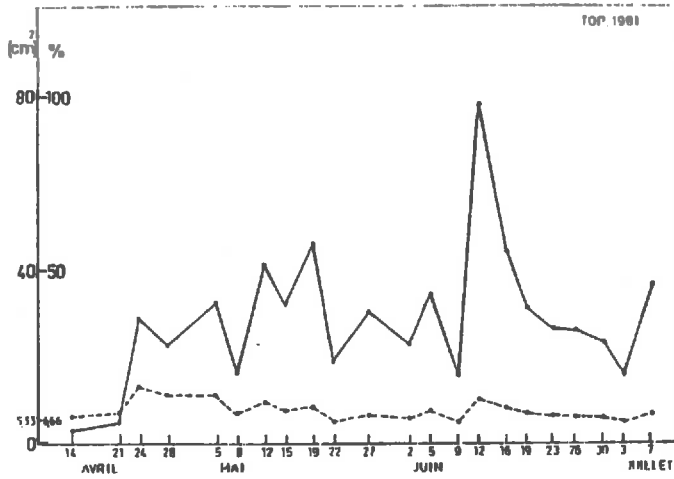
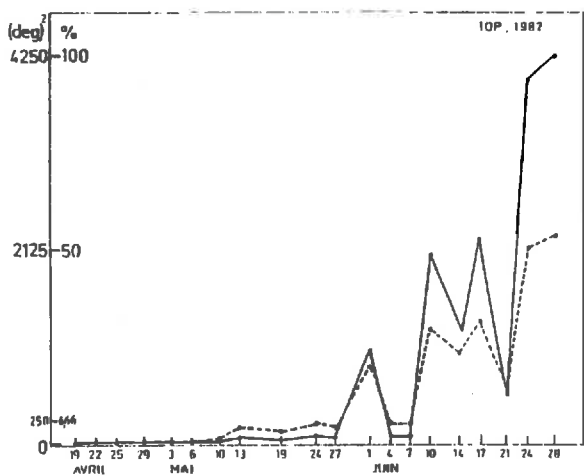
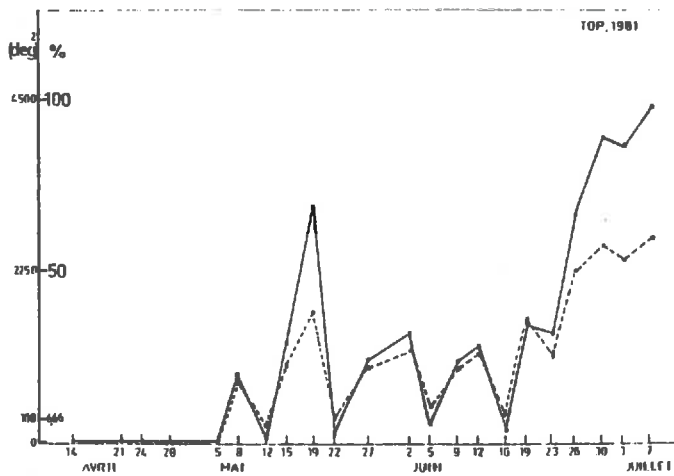
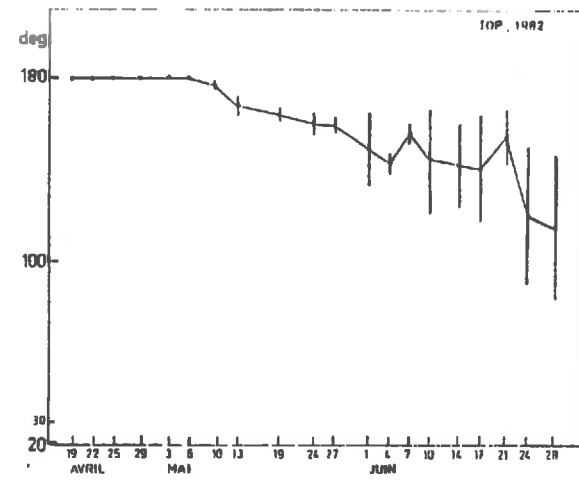
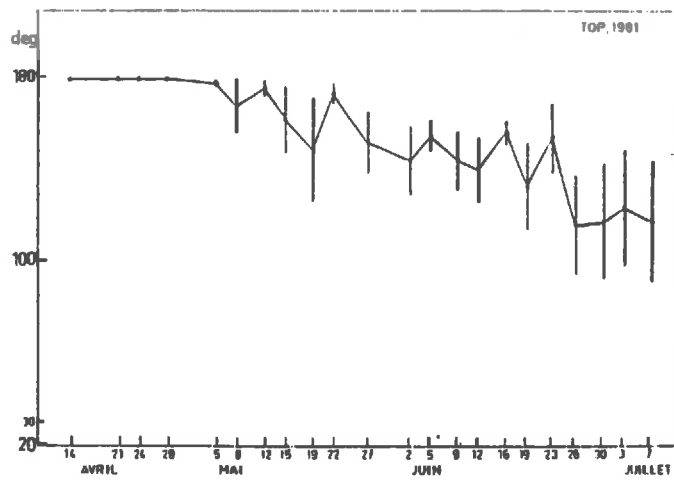


Figure II.2 : Evolution de l'intervalle de confiance de la moyenne, de la variance (—) et du coefficient de variation (---) sur :
 - la hauteur d'insertion de la dernière feuille (en haut)
 - l'angle d'insertion de la dernière feuille (en bas)



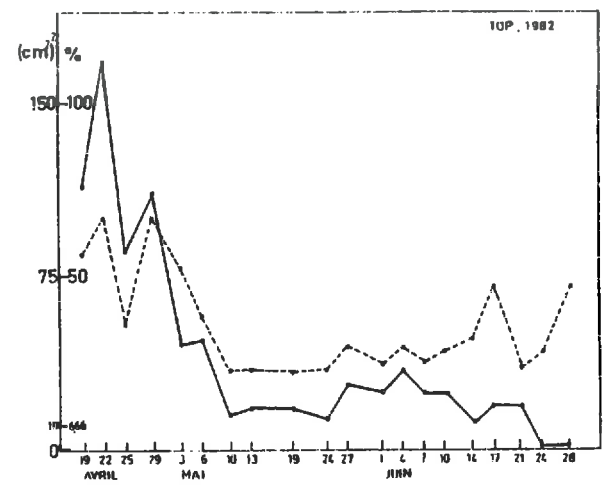
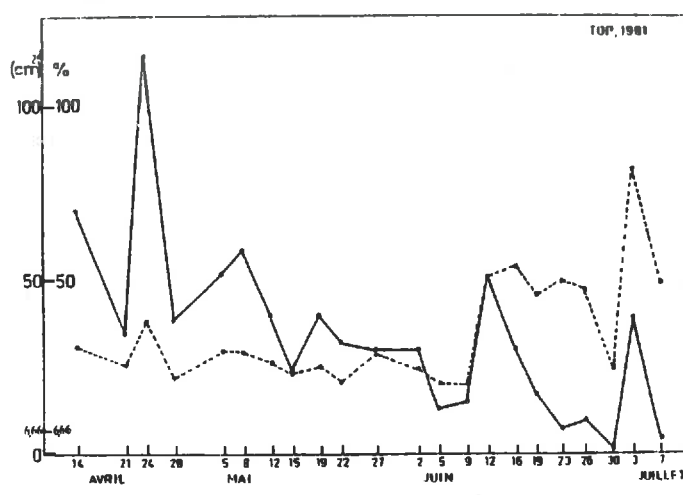
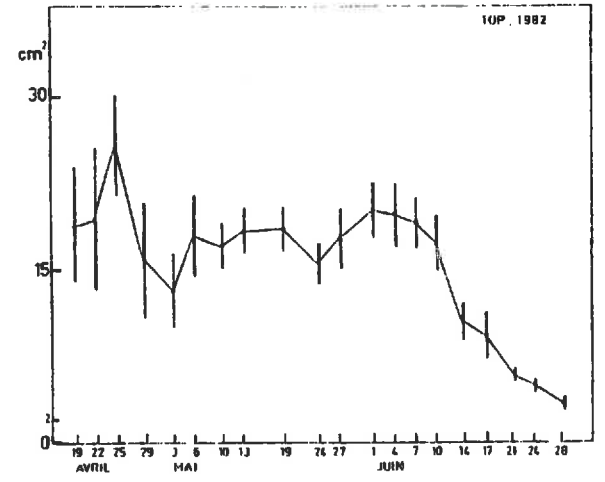
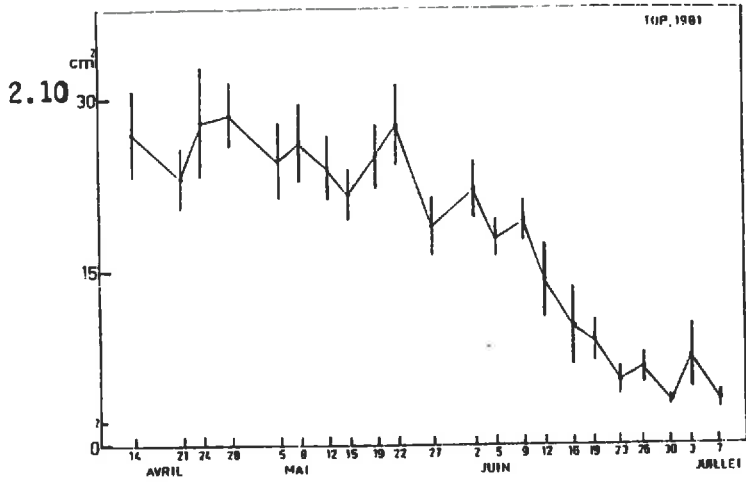
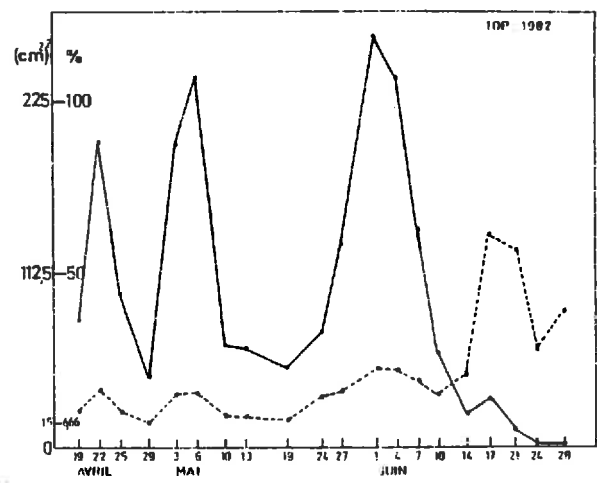
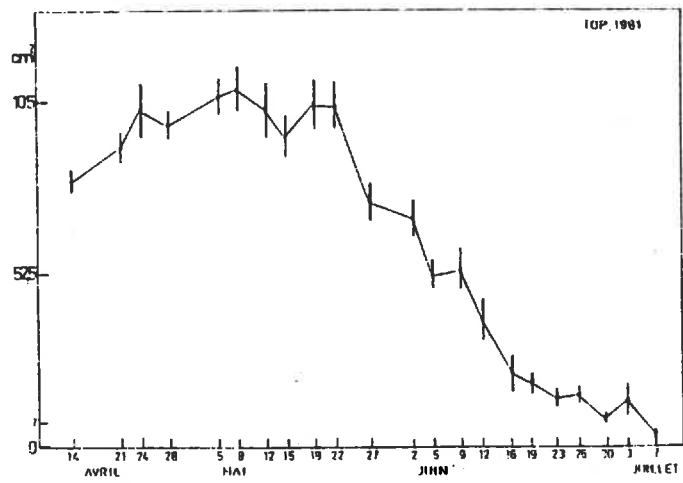
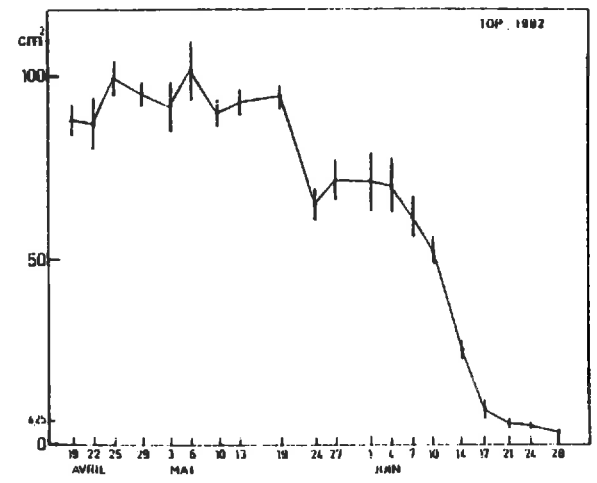
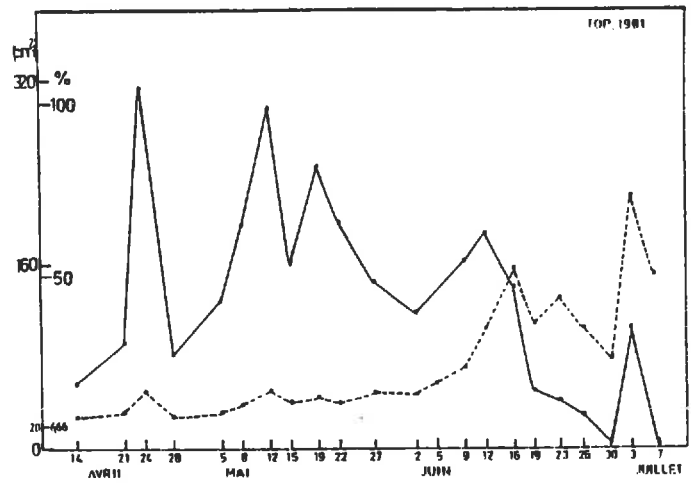


Figure II.3 : Evolution de l'intervalle de confiance de la moyenne (—) et du coefficient de variation (---) sur :
 - la surface de la dernière feuille (en haut)
 - la surface foliaire totale du maître-brin (en bas)



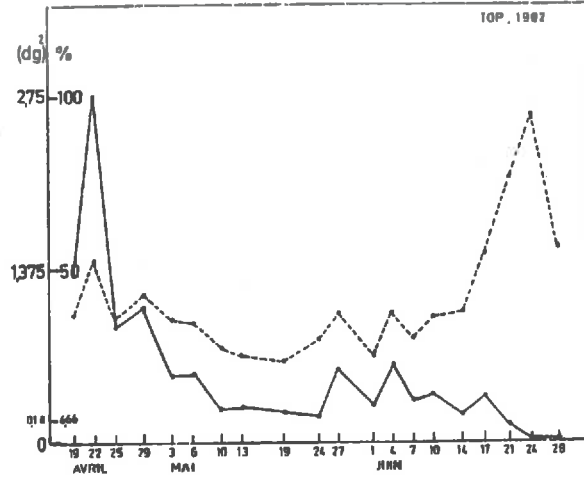
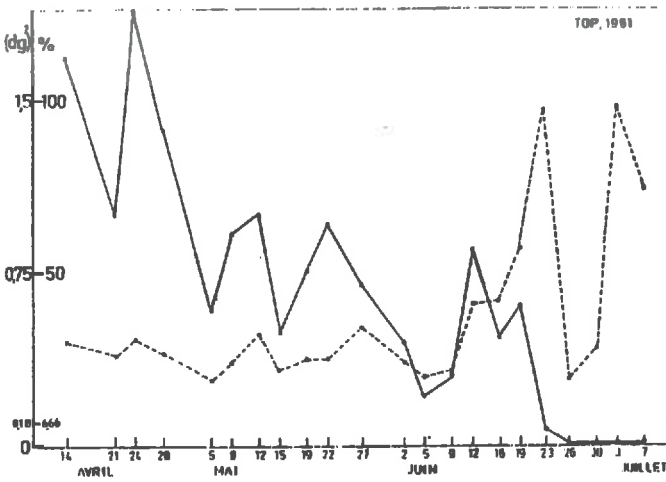
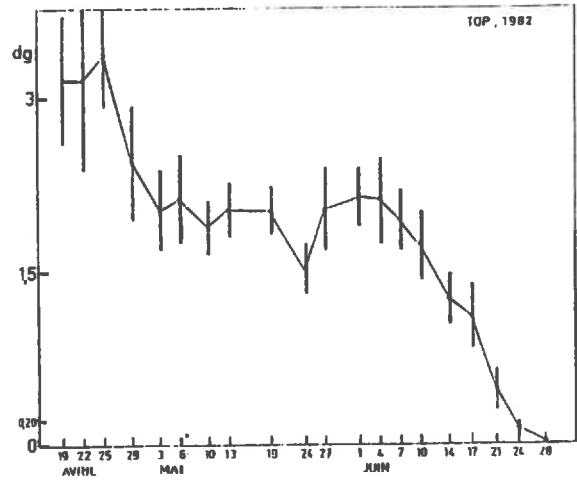
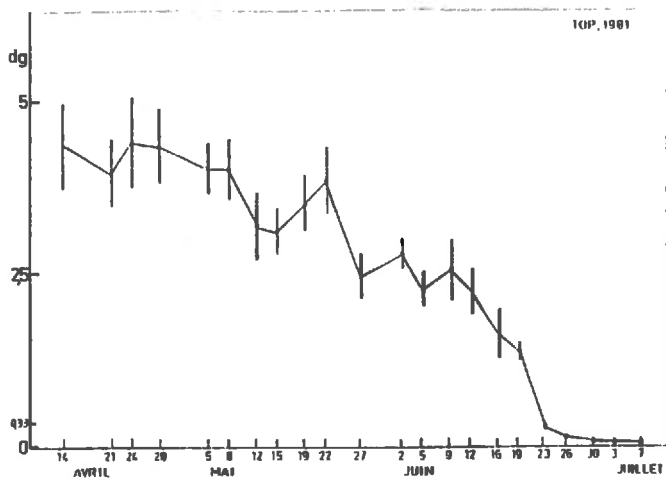
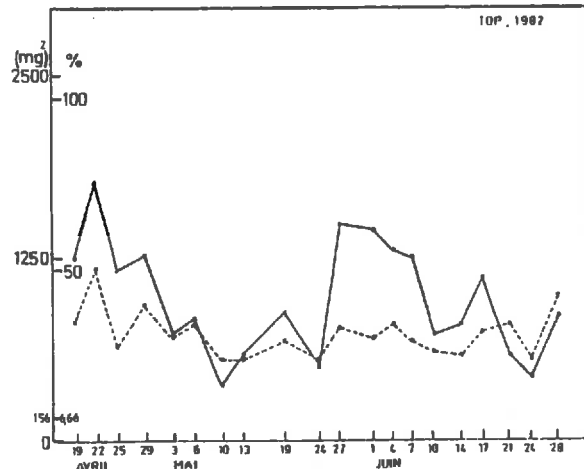
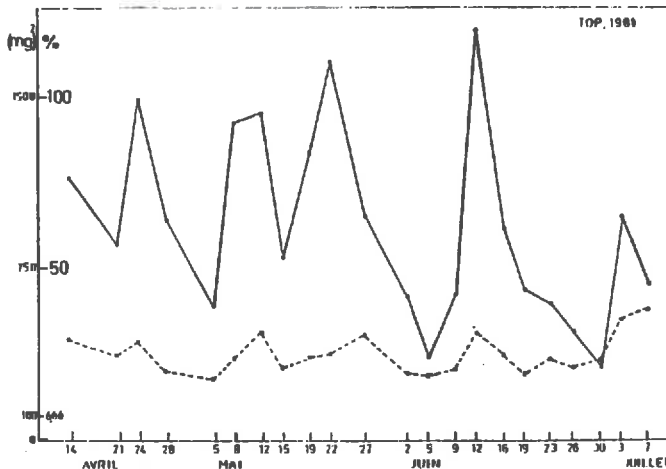
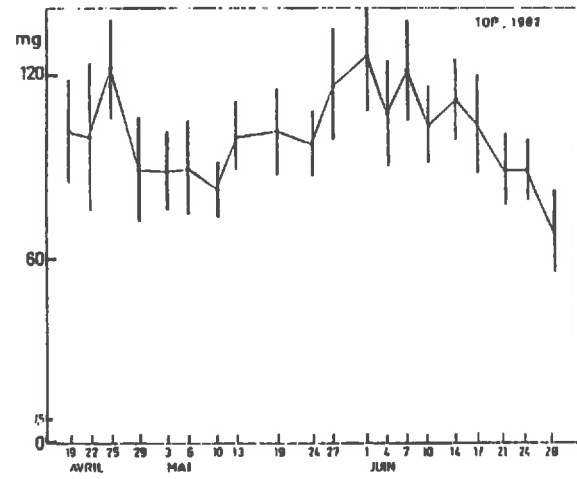
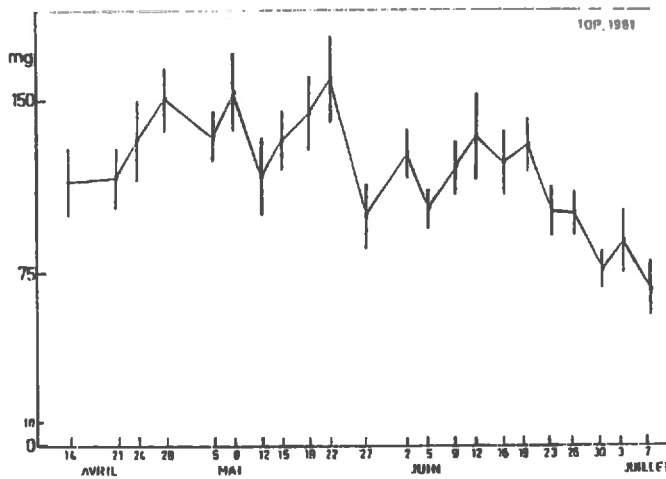


Figure II.4 : Evolution de l'intervalle de confiance de la moyenne, de la variance (—) et du coefficient de variation (---) sur :
 - le poids d'eau de la dernière feuille (en haut)
 - le poids sec de la dernière feuille (en bas)



2.12

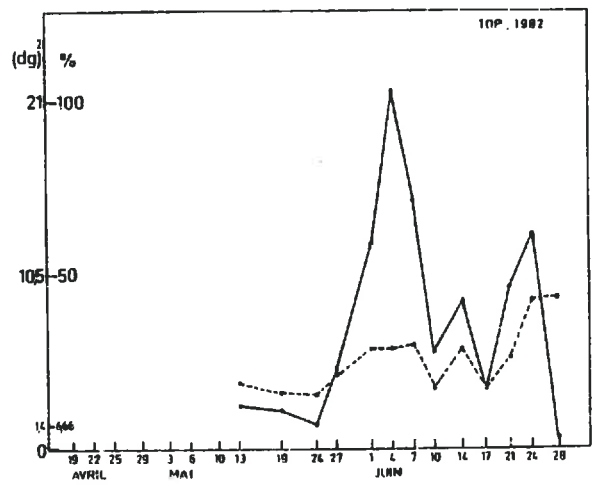
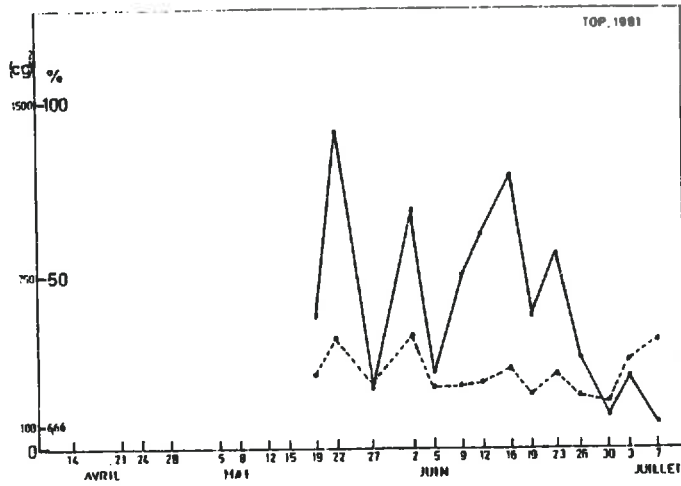
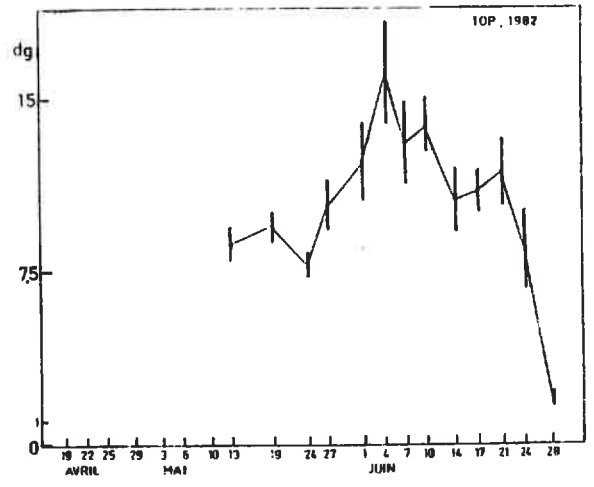
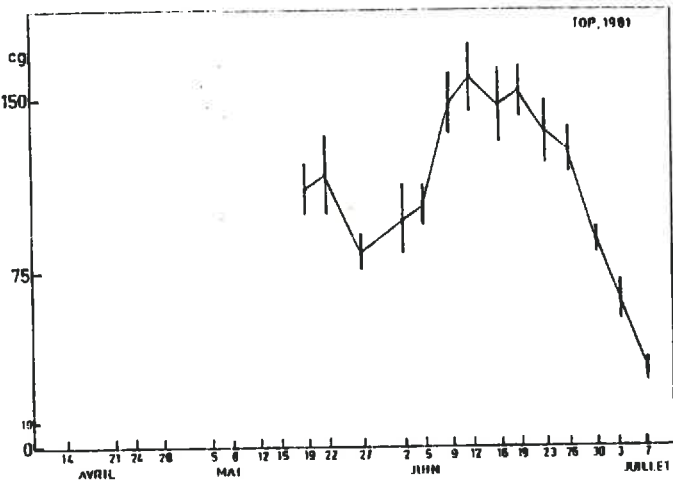
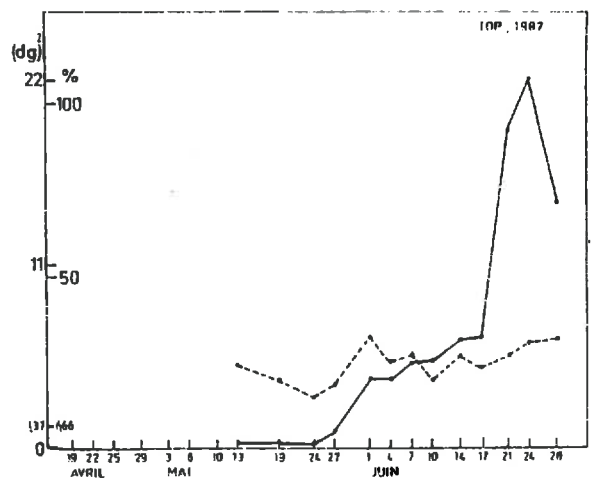
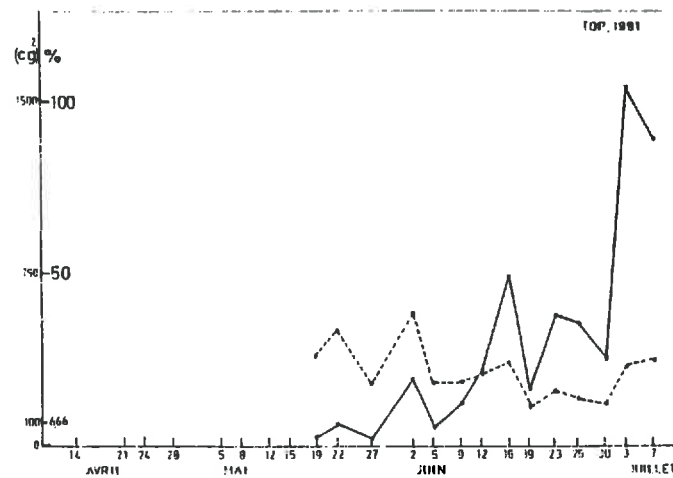
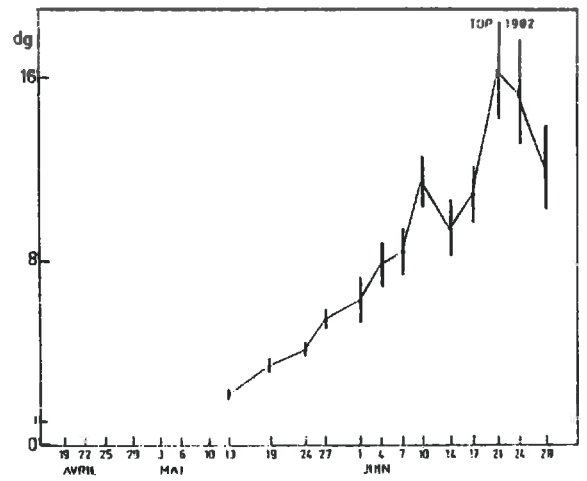
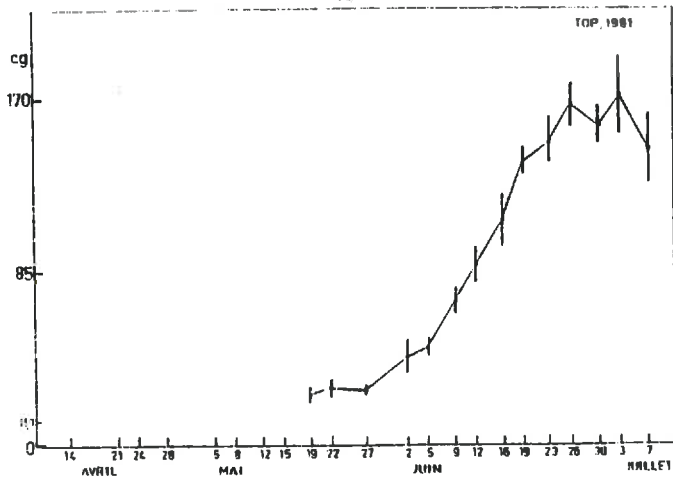


Figure II.5 : Evolution de l'intervalle de confiance de la moyenne, de la variance (—) et du coefficient de variation (---) sur :
 - le poids d'eau de l'épi (en haut)
 - le poids sec de l'épi (en bas)



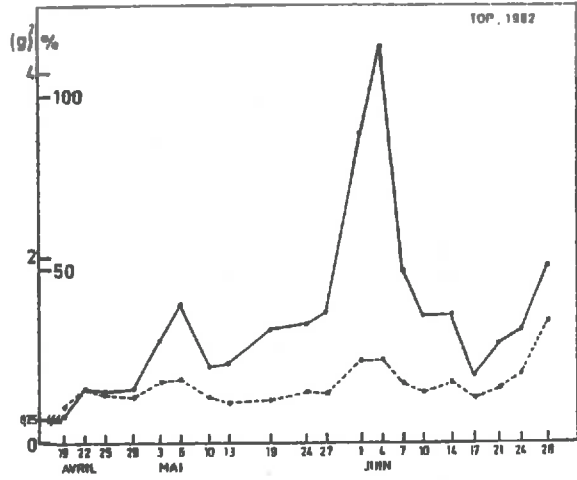
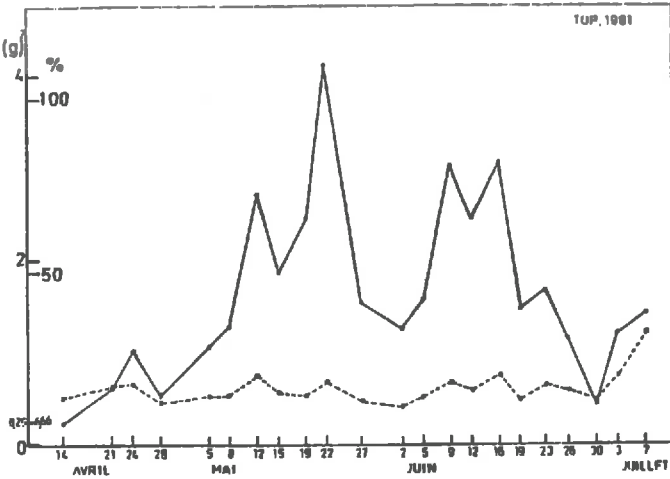
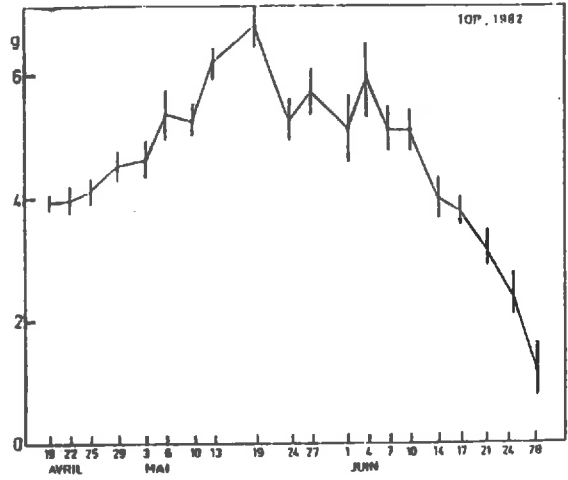
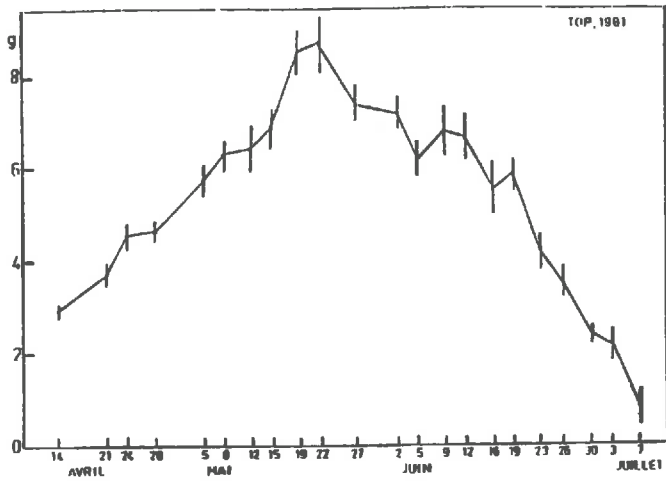
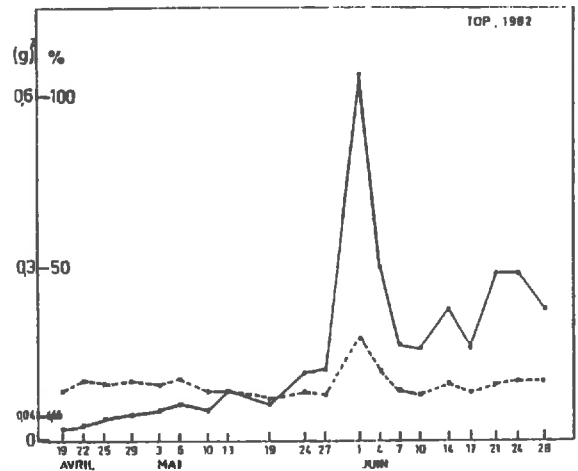
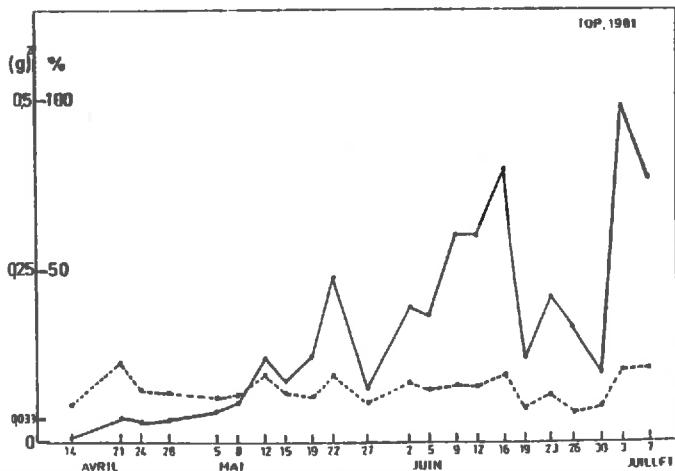
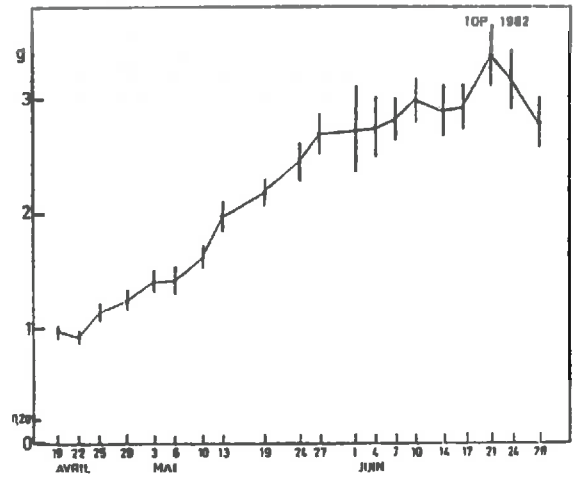
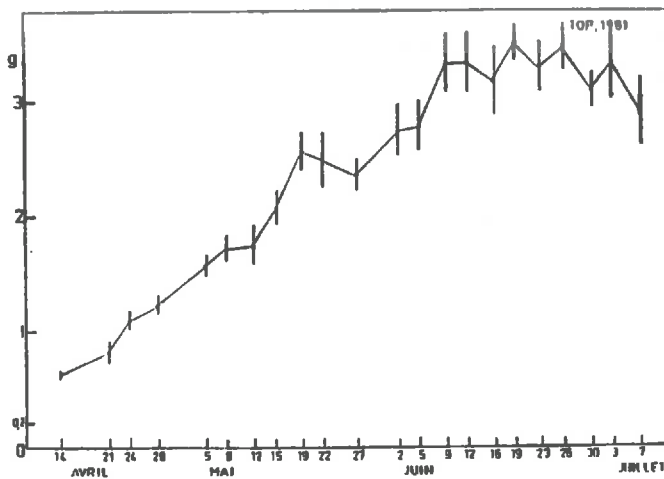


Figure II.6 : Evolution de l'intervalle de confiance de la moyenne, de la variance (—) et du coefficient de variation (---) sur :
 - le poids d'eau total du maître-brin (en haut)
 - le poids sec total du maître-brin (en bas)



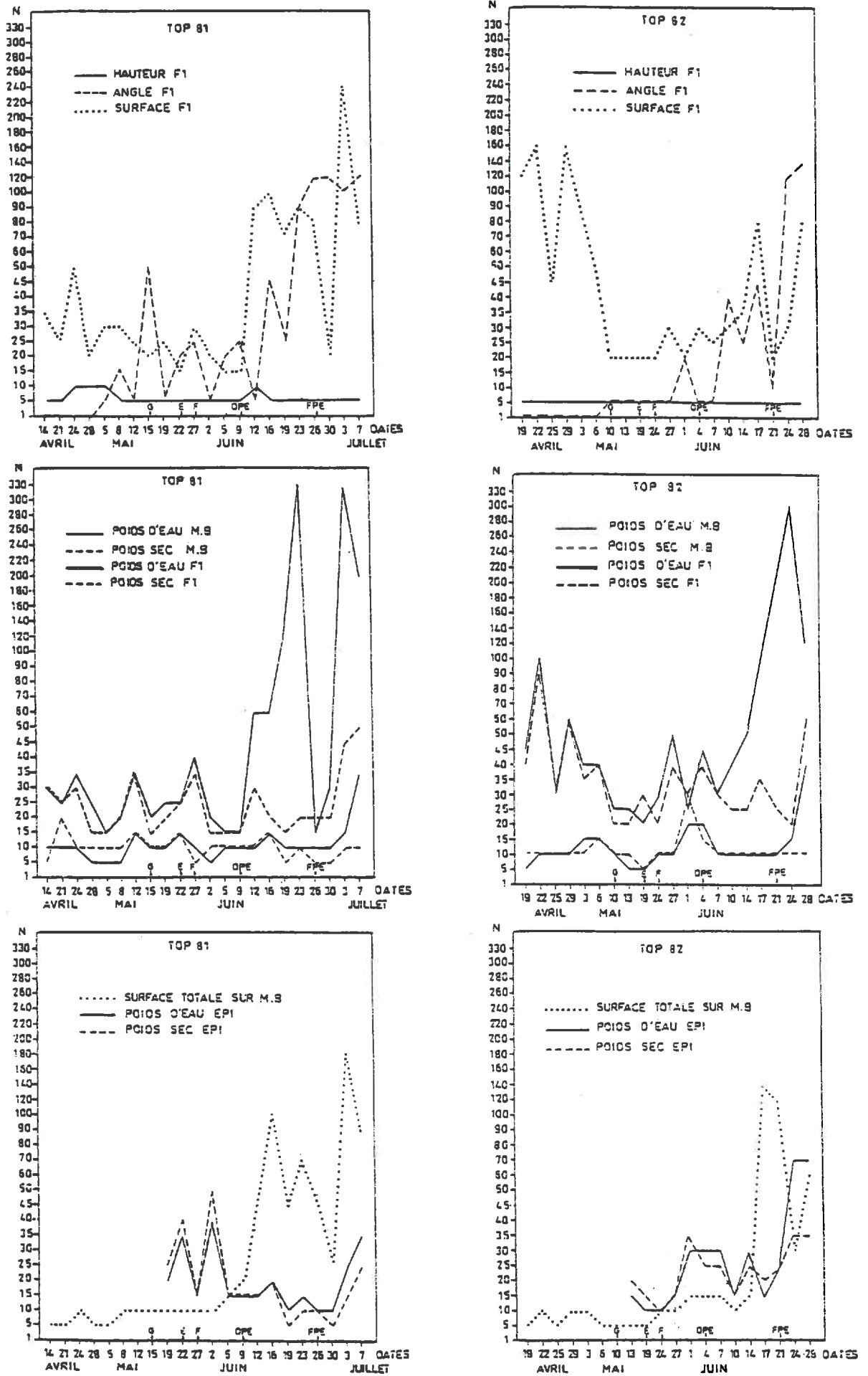


Figure II.7 : Evolution de la taille N d'échantillon à prélever pour différents paramètres

du maître-brin et son poids sec (une dizaine d'individus en moyenne), puis la hauteur d'insertion de la dernière feuille (5 individus en moyenne sont suffisants).

Les autres paramètres occupent des positions intermédiaires, variables selon les années.

- la taille d'échantillon à prélever est variable au cours du cycle de végétation

Les paramètres qui nécessitent en moyenne sur le cycle la plus grande taille d'échantillonnage sont aussi ceux dont le nombre souhaité de répétitions est le plus instable au cours du cycle. Pour les paramètres de poids d'eau, surface et angle d'insertion de la dernière feuille ainsi que pour la surface foliaire totale du maître-brin, on observe une augmentation brutale de la taille d'échantillon à prélever à partir du début du palier d'eau, et ce pour les 2 années d'expérimentation. La taille à prélever pour le poids sec, jusque là similaire à celle pour le poids d'eau, ne l'est plus.

Avant ce stade, il y a des différences entre les années : taille d'échantillon nécessaire plus grande en 82 avant le gonflement pour la surface et les poids de la dernière feuille, taille plus instable pour l'angle d'insertion en 81. Les biomasses du brin entier nécessitent une taille d'échantillon relativement stable au cours du cycle sauf peu après la fin du palier d'eau où cette taille augmente pour le poids d'eau.

Le nombre d'individus à prélever pour la hauteur de la dernière feuille est quasiment constant sur toute la période de mesures.

En résumé, au vu des deux années, il y a 2 stades à partir desquels se produit un changement notable de la taille d'échantillon à prélever : le début du palier d'eau, pour les paramètres concernant la dernière feuille (sauf son poids sec) et pour la surface foliaire totale du maître-brin, et la fin du palier d'eau pour le poids sec de F1, les paramètres de biomasse du maître-brin entier et de l'épi.

Hormis ces 2 dates remarquables de la période de maturation du blé, on n'observe pas des périodes d'échantillonnage bien délimitées et concordant avec des périodes du développement de la plante.

- la taille d'échantillon à prélever est supérieure à celle effectivement prélevée pour cette étude

Mis à part les paramètres de hauteur d'insertion de F1 et de poids sec du maître-brin, pour lesquels les 15 individus prélevés sont suffisants, on constate qu'une taille d'échantillon souvent bien supérieure est nécessaire : de 20 à 330 maîtres-brins selon les paramètres et selon les dates.

L'échantillon prélevé pour cette étude n'est donc pas représentatif quantitativement.

II.3 - Interprétation des résultats

Les différences de taille d'échantillon à prélever selon les paramètres peuvent s'interpréter en rappelant que la taille d'échantillon provient par calcul du coefficient de variation et que cette taille indique donc le degré d'homogénéité entre individus -ici, les maîtres-brins- pour le paramètre considéré.

Le faible coefficient de variation observé pour les biomasses totales du maître-brin, la hauteur d'insertion de la dernière feuille ainsi que les hauteurs totales et hauteurs d'insertion des autres feuilles (non figurées), traduit, pour cet ensemble de maîtres-brins, son homogénéité génétique et sa réponse globalement homogène aux conditions agro-pédo-climatiques.

Il est si vital pour la plante d'assurer sa croissance en taille et en biomasse que les fluctuations éventuellement dues à des micro-variations pédoclimatiques sont très réduites ; d'ailleurs, à l'époque de croissance-début de végétation-, les sources de ces variations sont elles-mêmes moindres : réserves du sol encore grandes, luminosité mieux répartie du fait de la petite taille des plantes, etc...).

Si les maîtres-brins constituent une communauté homogène pour les paramètres de hauteurs et de biomasse, il n'en est pas de même pour le reste du peuplement, les talles : ceux-ci, probablement à cause de leurs origines embryologiques variées, de leurs décalages chronologiques avec les maîtres-brins et entre eux, présentent en effet une grande variabilité (coefficient de variation de 40 % en moyenne observé sur les poids secs).

Au niveau des organes constitutifs de la plante, les variations sont importantes ; parmi ces organes observés sur le maître-brin, c'est la dernière feuille qui présente le plus grand coefficient de variation pour les paramètres

de surface, d'angle, de poids : de part sa position sommitale -liée à son apparition plus tardive- elle serait plus sensible aux facteurs du milieu (répartition de la lumière, influence du vent, absorption minérale) que les autres feuilles, d'où une réponse moins homogène et une variabilité plus grande.

Cette feuille constituant une entité élémentaire d'organogénèse, il est possible de lui appliquer le modèle d'analyse de la croissance présenté au §I.5, pour les paramètres de poids d'eau, de poids sec et de surface.

Les évolutions de la moyenne et de la variance sur les poids et la surface de la dernière feuille sont concomitantes : la variance diminue quand la moyenne diminue.

Sur TOP 81, un premier minimum de la variance -indiquant d'après le modèle une vitesse minimale d'évolution- est observé quelques jours avant le début du palier d'eau ; à la fin du palier d'eau ou peu après, la variance et la vitesse d'évolution deviennent nulles. Ces 2 dates correspondent aussi au minimum de la taille d'échantillon nécessaire.

Le palier d'eau correspond à une période de chute rapide du poids d'eau et de la surface de la dernière feuille : la variance y est élevée, ainsi que le coefficient de variation (et la taille d'échantillon).

Sur TOP 82, le niveau moyen de la variance est inférieur à celui de TOP 81 et ses fluctuations moins grandes : ceci indiquerait une vitesse en moyenne sur le cycle inférieure à celle de TOP 81. Cependant, le coefficient de variation est plus élevé en moyenne.

Un minimum de variance est néanmoins observé à la floraison, indiquant que la chute du poids d'eau et de la surface de la feuille s'effectue plus précocement que sur TOP 81, signe d'un plus mauvais état de santé de TOP 82.

Un minimum de variance est observé après la fin du palier d'eau, concordant cette fois avec un maximum du coefficient de variation pour le poids d'eau.

Pour les deux années, sur les poids secs, les creux de variance avant le début du palier d'eau et après sa fin sont aussi observés mais il ne leur correspond pas des minimas du coefficient de variation comme pour le poids d'eau ou la surface, probablement à cause de la décroissance moins rapide de ce paramètre. Sur les 2 années, un minimum relatif est observé pour les poids et la surface de F1 au gonflement concordant avec un minimum relatif de la taille d'échantillon.

En résumé, pour les paramètres concernant le poids d'eau et la surface de la dernière feuille, qui présentent les variations de taille d'échantillon à prélever les plus importantes au cours du temps, on montre, grâce au modèle

d'analyse de la croissance, que cette taille est liée à la vitesse d'évolution des paramètres : pendant une période de vitesse nulle ou constante ou lente, la taille d'échantillon nécessaire est minimale ; elle est maximale lors des changements brusques de vitesse, ou lors des périodes à vitesse de croissance (ou de décroissance) rapide. Ces points particuliers de l'évolution de la taille d'échantillon coïncident avec des stades de développement, parfois différents selon les années.

Cette constatation semble aussi valable pour certains paramètres ne concernant pas une entité élémentaire d'organogénèse : on note une augmentation de la taille d'échantillon à prélever sur le poids d'eau du maître-brin entier et les poids d'eau et sec de l'épi, à la fin du palier d'eau (sur les 2 années), une période de grande taille d'échantillon pendant le palier d'eau pour la surface foliaire totale du maître-brin (sur TOP 81) ; un paramètre qui n'est pas un paramètre de croissance, l'angle d'insertion de la dernière feuille, nécessite aussi une taille d'échantillon plus élevée à partir du début du palier d'eau, correspondant à un accroissement de la vitesse d'abaissement de cette feuille.

III - CONSEQUENCES DES RESULTATS

III.1 - Normes d'échantillonnage

Le tableau II.3 propose les normes d'échantillonnage -ordre de grandeur des prélèvements à effectuer, en fonction du temps, selon les paramètres-assurant la représentativité quantitative, à la précision k et au risque α choisis ($k = 10 \%$, $\alpha = 10 \%$), des maîtres-brins prélevés par rapport à l'ensemble des maîtres-brins du champ.

Pour chaque période, c'est le niveau moyen de N qui a été pris.

Ces normes concernent évidemment uniquement la variété TOP cultivée les années 81 et 82 à Toulouse ; il est intéressant de constater qu'une même variété soumise à des conditions climatiques et donc de croissance très différentes les 2 années a nécessité des normes d'échantillonnage peu dissemblables.

En bilan, les normes proposées sont très lourdes : la représentativité quantitative risque d'être un objectif coûteux en temps et/ou en main d'oeuvre, surtout s'il est nécessaire d'étudier l'ensemble des paramètres.

PARAMETRES	STADES	F1 sortie	G	E-F	DPE	FPE	récolte
Hauteurs		← 10 →					→
Angle F1		← 15 →			← 60 →	→	
Angle autres feuilles		← 10 →					→
Surface F1		← 40 →	← 20 →	← 70 →			→
Surface autres feuilles		← 20 →					→
Poids d'eau F1		← 35 →	← 25 →	← 100 →			→
Poids sec F1		← 35 →	← 25 →			← 40 →	→
Poids d'eau et poids sec autres feuilles		← 25 →					→
Poids d'eau et poids sec épi		← 20 →				← 40 →	→
Surface foliaire totale maître-brin		← 10 →			← 50 →	→	
Poids d'eau maître-brin		← 10 →				← 25 →	→
Poids sec maître-brin		← 10 →					→

Tableau II.3 : Normes d'échantillonnage proposées

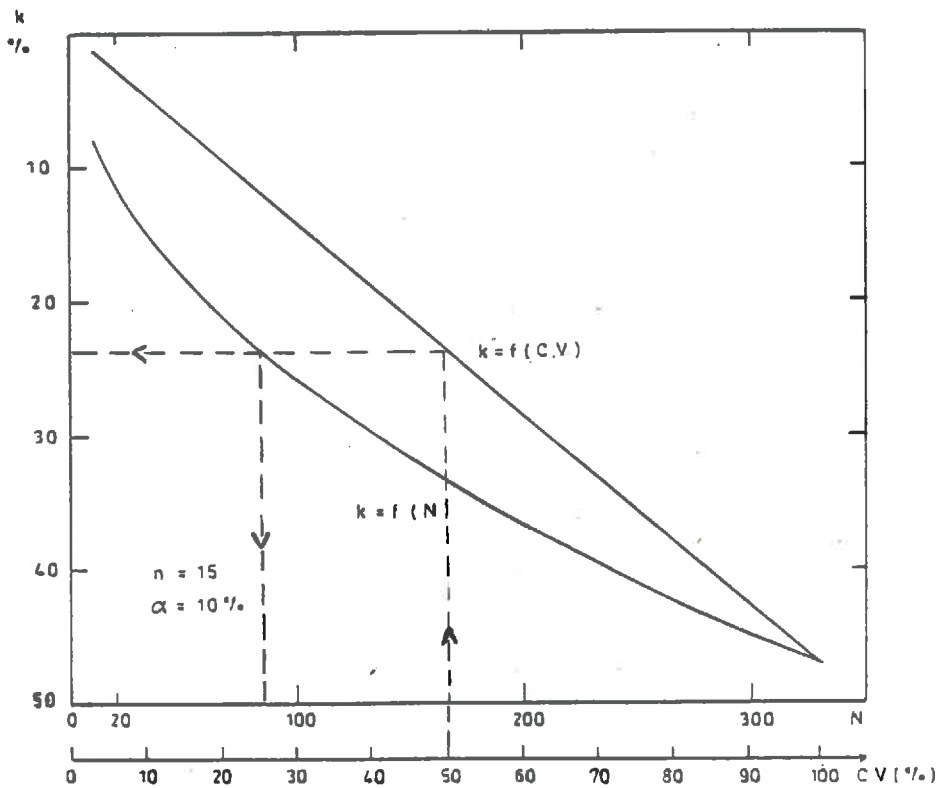


Figure II.8 : Précision des mesures

III.2 - Précision des mesures

L'échantillonnage effectué pour cette étude (15 maîtres-brins prélevés) n'assurant pas une représentativité quantitative à la précision et au risque choisis, il est utile de pouvoir chiffrer la précision des mesures obtenues.

La précision k de la mesure est égale à $\frac{t}{\sqrt{n-1}}$ C.V (§I.3) ; la droite $k = f(\text{C.V})$ et la courbe $k = f(N)$ déduite de la relation $N = f(\text{C.V})$ (§I.4), ont été tracées figure II.8 pour les valeurs de cette étude ($n = 15$; $k = 10\%$; $\alpha = 10\%$).

Par exemple, pour un paramètre ayant un coefficient de variation de 50 %, il faudrait prélever 80 individus pour avoir une précision autour de la moyenne de 10 %, au risque 10 % ; comme seulement 15 individus ont été prélevés pour l'étude, la précision autour de la moyenne n'est plus que de 23 %.

IV - CONCLUSIONS

IV.1 - Notion de représentativité chronologique

L'échantillon prélevé pour cette étude n'assure pas la représentativité quantitative, qui risque d'être un objectif coûteux.

Par contre, l'étude de la variance sur cet échantillon permet, grâce à un modèle d'analyse de la croissance (Malet, 1979) de repérer des dates où se produisent des changements brusques de la vitesse d'évolution de la croissance, ces changements étant dus à une cause interne ou externe : une variation brusque (accélération ou ralentissement) de la vitesse d'évolution induit un "pic" de variance sur les mesures de croissance, un "creux" de variance indiquant une vitesse d'évolution nulle.

Une telle capacité de l'échantillon à détecter ces changements assure une représentativité "chronologique" (Malet, 1979).

La représentativité chronologique exige donc des prélèvements moins volumineux, mais plus fréquents peut-être que la représentativité quantitative ; les échantillons prélevés pour assurer celle-ci risquent d'être trop hétérogènes pour assurer aussi la représentativité chronologique, du moins pendant les phases d'évolution rapide ou aux dates de changements brusques ; aux périodes ou dates où la vitesse d'évolution est nulle, nos résultats semblent montrer que l'échantillon prélevé est suffisant ou presque pour assurer en outre la représentativité quantitative (la variance de l'échantillon est alors sensiblement égale à la variance résiduelle σ^2 du modèle).

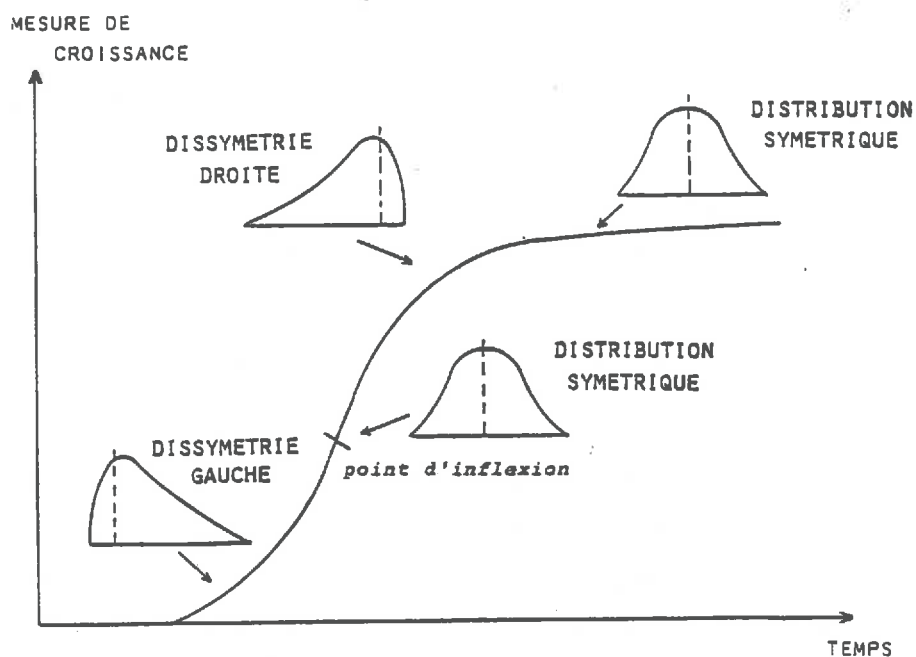


Figure II.9 : Evolution théorique de la distribution des mesures de croissance dans une population de plantes

(d'après Malet, 1979)

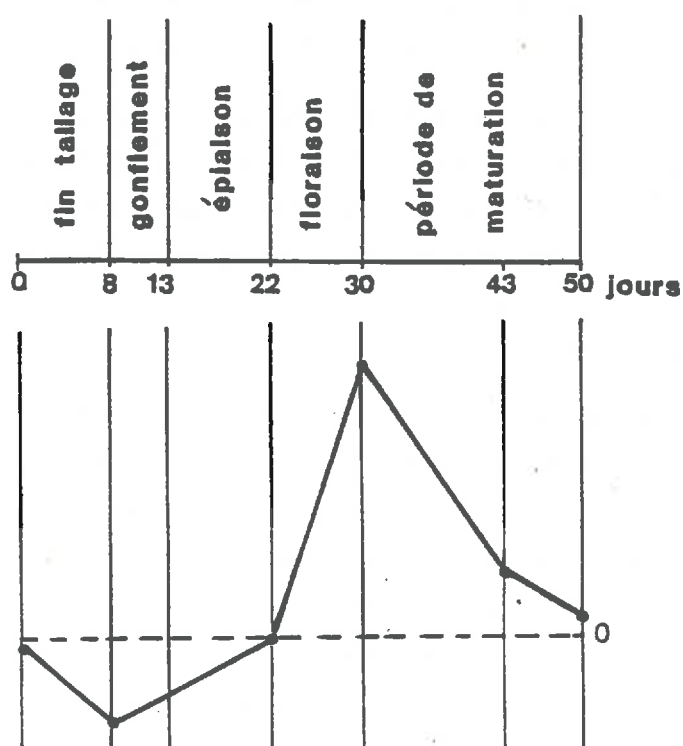


Figure II.10 : Evolution du coefficient de symétrie B_1 sur des mesures de réflectance (canal 7 de Landsat) en fonction des stades de développement du riz

(d'après Berg et al., 1978)

Un autre critère que la variance, le coefficient de symétrie B_1 de Pearson peut être utilisé pour détecter les changements d'évolution ; en effet, une autre conséquence du modèle élaboré par Malet est la modification au cours du temps de la distribution des mesures de croissance (figure II.9).

IV.2 - Application aux données de télédétection

Cette notion de représentativité chronologique peut s'appliquer de façon fructueuse à la télédétection.

En effet, la variabilité des paramètres de structure et de biomasse observée dans cette étude à l'échelle des organes et des brins, risque d'être observée à l'échelle de plusieurs champs, d'une région... échelle où fonctionnera la télédétection.

Or, selon l'hypothèse n° 2 de ce travail (chapitre I) déjà vérifiée par certains travaux, les mesures acquises par la télédétection sont reliées à ces paramètres de structure et de biomasse.

On peut donc s'attendre à observer une variabilité analogue sur les mesures physiques.

De même que pour les données biologiques, la représentativité quantitative des valeurs obtenues par la télédétection risque d'être difficile à atteindre.

Par contre, la représentativité chronologique ouvre des perspectives très intéressantes : un changement dans l'évolution de la structure et de la biomasse d'un champ, d'un ensemble de champs se traduirait par un pic de variance sur les mesures physiques et/ou une modification de la distribution de ces mesures (ou de tout autre indice issu par calcul de ces mesures - index de végétation par exemple-).

Des travaux récents dans le visible confirment cette hypothèse : Berg (1978) en expérimentation in situ sur des parcelles de riz (figure II.10), Guyot et al (1983) au niveau aéroporté sur différentes céréales, observent une évolution de la forme de la distribution des valeurs de réflectance en fonction de la phénologie des cultures.

Dans le cas de l'expérimentation RAMSES, il ne sera malheureusement pas possible d'obtenir la variance et la distribution des mesures du coefficient de rétrodiffusion σ^0 , car un point de mesure est obtenu par un enregistrement continu lors d'un aller ou d'un retour du radar le long de la flèche de la grue, et la parcelle est trop petite pour multiplier les points de mesures dans des conditions d'acquisition homogènes (incidence, angle de visée par rapport aux rangs, etc...).

CHAPITRE III

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS BIOLOGIQUES

ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS BIOLOGIQUES

PLAN

	<i>Page</i>
<u>I - ANALYSE DES RESULTATS BIOLOGIQUES</u>	3.2
I.1 - <u>Suivi général de la culture</u>	3.2
I.1.1 - <u>Stades de développement</u>	3.2
I.1.2 - <u>Densité du couvert et composantes du rendement</u>	3.2
I.2 - <u>Evolution des paramètres de structure et de biomasse</u>	3.6
I.2.1 - <u>Remarques préalables</u>	3.6
I.2.2 - <u>Présentation des résultats</u>	3.6
I.2.2.a - Hauteurs d'insertion des feuilles - taille du brin	3.7
I.2.2.b - Angles d'insertion des feuilles - courbure des épis	3.10
I.2.2.c - Surfaces des feuilles - indice foliaire	3.13
I.2.2.d - Poids secs	3.13
I.2.2.e - Poids d'eau	3.18
I.2.2.f - Teneur en eau	3.18
I.2.2.g - Etat de verdure des feuilles	3.25
<u>II - RELATION ENTRE LES PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE ET LES STADES DE DEVELOPPEMENT</u>	3.26
II.1 - <u>Synthèse des résultats obtenus</u>	3.26
II.2 - <u>Comparaison avec d'autres résultats</u>	3.27
II.3 - <u>Précision sur la détermination de la date du stade</u>	3.29

III - <u>RELATION ENTRE LES PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE ET LE</u>	
<u>RENDEMENT</u>	3.30
III.1 - <u>Approche descriptive</u>	3.30
III.2 - <u>Approche quantitative</u>	3.33
III.2.1 - <u>Analyse des résultats</u>	3.35
III.2.2 - <u>Comparaison avec d'autres résultats</u>	3.36

L'analyse de l'évolution de la structure et de la biomasse d'un couvert n'est pas chose simple : il y a de multiples interactions entre les paramètres étudiés, et entre eux et les facteurs climatiques.

L'adjonction d'une nouvelle année d'expérimentation ne facilite pas l'étude, au contraire : aucune des trois années de mesures n'est strictement comparable à une autre (variétés, conditions culturales ou pédo-climatiques différentes). De plus, seul un Blé sur les 3 (variété TOP, cultivée en 81) a bénéficié de conditions "normales" de croissance ; les autres ont été fortement atteints dans leur potentiel par la sécheresse ou la maladie.

Mais cette gamme de conditions et de comportements variés est finalement plus un avantage qu'un handicap si l'on considère dans un premier temps que les points communs trouvés entre des années différentes risquent d'être stables car intrinsèques à la plante ; dans un deuxième temps, l'étalement par rapport à une année "normale" fournit une mesure de la réaction de la plante aux conditions des années moins favorables.

Les résultats des mesures des paramètres de structure et de biomasse des 3 couverts de blé seront discutés d'un double point de vue :

- relation entre ces paramètres et les stades de développement de la plante

La précision des mesures étant insuffisante pour viser une quantification de cette relation (cf chapitre précédent), le but sera une description la plus précise et exhaustive possible de tous les changements affectant le couvert. La démarche consiste en l'examen des courbes (moyenne et variance) obtenues au cours de la dernière partie du cycle de végétation du blé (apparition de la dernière feuille-maturité).

- relation entre ces paramètres et le rendement

Une première approche, descriptive, tentera d'expliquer la différence de rendement observée entre TOP 81 et TOP 82, blés de même variété, aux conditions initiales identiques.

Une deuxième approche, quantitative, examinera, à chaque date à partir de l'épiaison, la force de la liaison entre les principaux paramètres du couvert et le poids sec de l'épi, pris comme représentant du rendement. Le critère statistique utilisé sera le coefficient de corrélation linéaire, quantifiant l'intensité de la liaison ; les termes de la régression (pente et ordonnée à l'origine de la droite) ne seront pas étudiés, en raison de l'imprécision des mesures.

I - ANALYSE DES RESULTATS BIOLOGIQUES

I.1 - Suivi général de la culture

I.1.1 - Stades de développement

Le tableau ci-dessous récapitule les dates des stades de développement du couvert de blé, pour les 3 années d'expérimentation :

STADES DE DEVELOPPEMENT \ BLE	CASTAN 80	TOP 81	TOP 82
3 feuilles	12 Avril	13 Février	18 Janvier
4 feuilles (début tallage)	21 Avril	5 Mars	12 Février
Dernière feuille sortie	14 Mai	3 Avril	19 Avril
Gonflement	2 Juin	15 Mai	10 Mai
Epiaison	9 Juin	22 Mai	19 Mai
Floraison	16 Juin	27 Mai	24 Mai
Début du palier d'eau	27 Juin	8 Juin (estimé)	4 Juin
Fin du palier d'eau	16 Juillet	26 Juin	21 Juin

Tableau III.1 : Calendrier des stades de développement

La figure III.1 permet la détermination des dates du début et de la fin du palier d'eau ; sur TOP 81, les mesures commencées trop tard, ont manqué le début du palier d'eau ; en prenant comme critère de comparaison avec les autres années l'intervalle de temps floraison - début du palier d'eau, la date en est estimée au 8 Juin.

I.1.2. - Densité du couvert et composantes du rendement

Le nombre de talles par plante (figure III.2) a été compté lors des prélèvements bi-hebdomadaires en vue de la mesure des paramètres de structure et de biomasse.

Les fluctuations observées autour du niveau moyen du nombre de talles sont liées à l'échantillonnage. De plus, à la fin de la période de végétation de TOP 82, le sol était très sec, ce qui a rendu difficile le prélèvement des

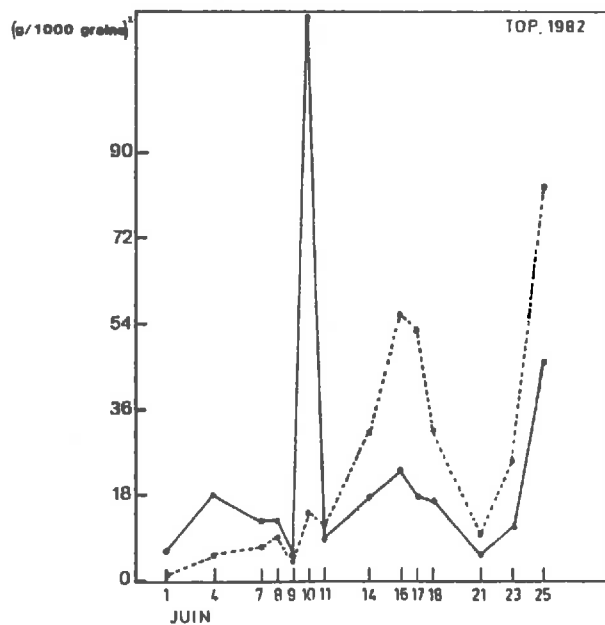
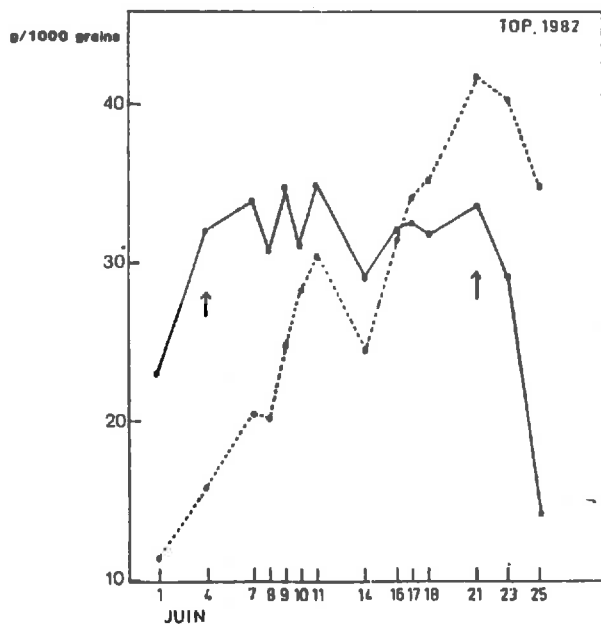
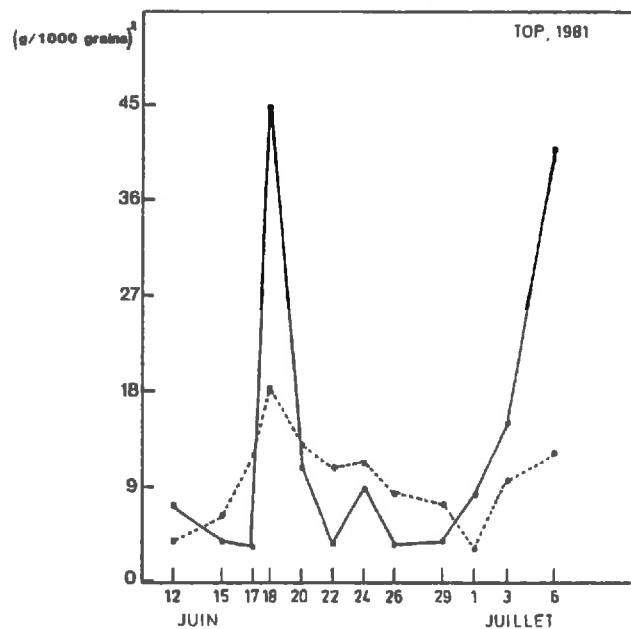
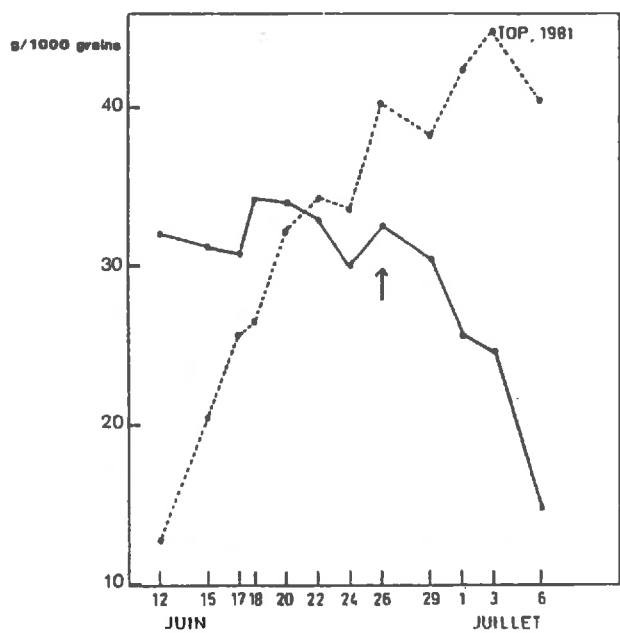
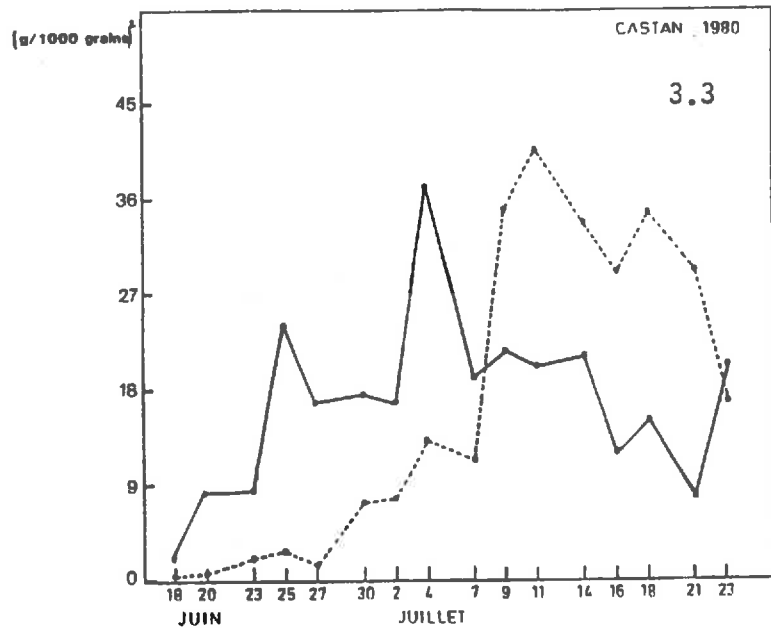
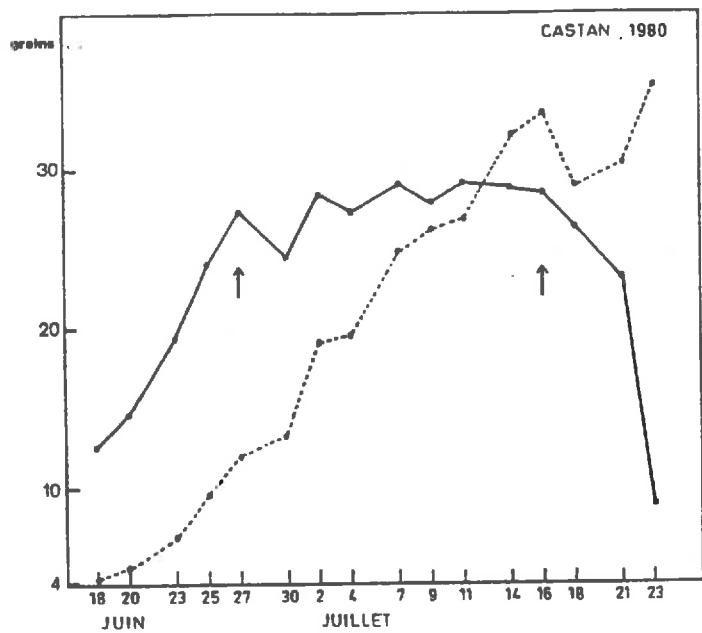


Figure III.1 : Evolution de la moyenne et de la variance du poids d'eau (—) et de la matière sèche (---) dans les grains des épis des maîtres-brins dominants

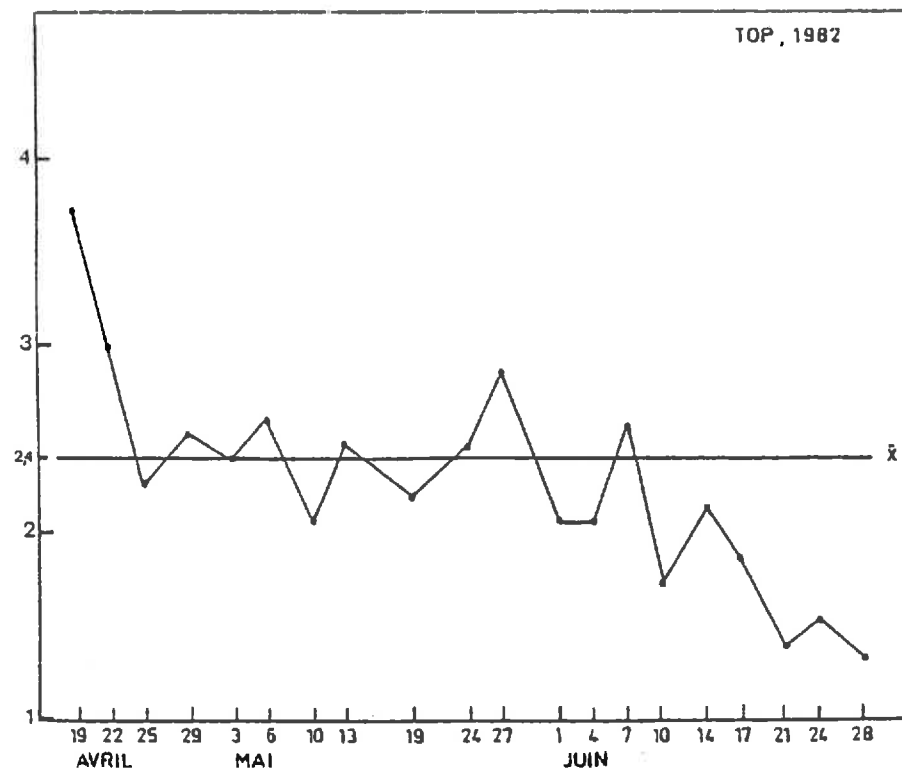
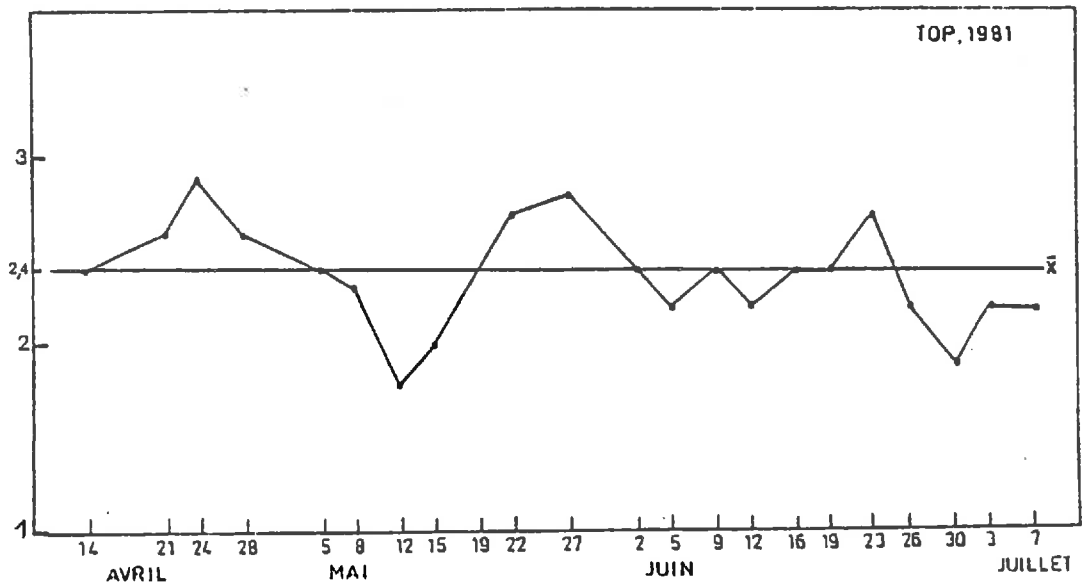
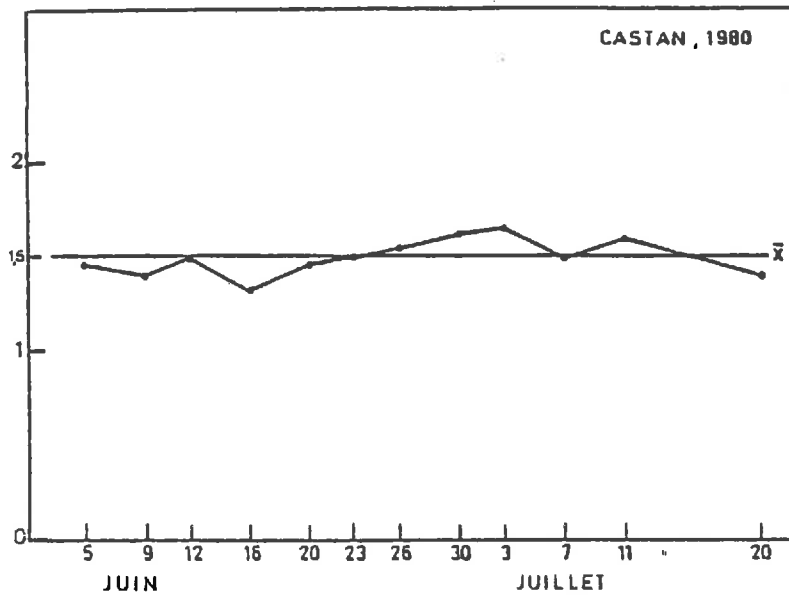


Figure III.2 : Evolution du nombre de talles par plante

plantes dans leur intégralité (les différents brins se séparant les uns des autres).

Les mesures au champ ont fourni le nombre de brins (talles + maîtres-brins confondus) au m^2 , d'où la densité de plantes du couvert (tableau III.2).

MESURES \ BLE	CASTAN 80	TOP 81	TOP 82
Nombre de brins/ m^2	445 ± 66	990 ± 200	968 ± 110
Nombre de brins/plante	2,5	3,4	3,4
Nombre de plantes/ m^2	180 ± 26	290 ± 58	284 ± 32

Tableau III.2 : Densité du couvert

Les composantes du rendement, mesurées à la récolte, sont détaillées dans le tableau III.3 :

COMPOSANTES \ BLE	CASTAN 80	TOP 81	TOP 82
Nombre d'épis/ m^2	288 épis 72 épiochons	512 épis 65 épiochons	370 épis 130 épiochons
Nombre de grains/épi	épi : 32,4 épiochon : 15,6	épi : 30,4 épiochon : 8,6	épi : 27,7 épiochon : 11,4
Poids moyen d'un grain	épi : 0,032g épiochon : 0,029g	épi : 0,032g épiochon : 0,029g	épi : 0,031g épiochon : 0,023g
Rendement calculé	33,1 qtx/ha	51,4 qtx/ha	35,1 qtx/ha

Tableau III.3 : Composantes du rendement

I.2 - Evolution des paramètres de structure et de biomasse

I.2.1 - Remarques préalables

Les paramètres de structure et de biomasse présentés sont ceux mesurés sur le maître-brin ; pour chaque date, c'est la moyenne obtenue sur 10 à 15 maîtres-brins qui est notée. La variance et le coefficient de variation sur certains paramètres ont été figurés dans le chapitre précédent.

Les paramètres tels que la biomasse fraîche et sèche du couvert par m^2 , le poids d'eau par m^2 , l'indice foliaire (somme des surfaces de toutes les feuilles sur $1 m^2$) sont calculés à partir des mesures effectuées sur la plante entière et de la densité de plantes au m^2 , par simple multiplication, pour CASTAN 80.

Pour TOP 81 et TOP 82 où seules les mesures sur le maître-brin et sur le poids sec de l'ensemble des talles sont disponibles, il a été fait comme suit :

- . établissement du coefficient de corrélation et de la droite de régression entre le poids sec du maître-brin et le poids sec des talles. Le poids sec de la plante entière PSp est alors relié à celui du maître-brin PSm.b par l'équation :

$$PSp = (1 + 1,87) PSm.b - 0,61 \quad \text{pour TOP 81 (r = 0,94)}$$

$$PSp = (1 + 1,01) PSm.b + 0,56 \quad \text{pour TOP 82 (r = 0,84)}$$

- . l'hypothèse est faite que les autres paramètres de la plante entière (poids frais, poids d'eau, surface totale des feuilles) sont reliables par la même équation aux paramètres mesurés sur le maître-brin,
- . d'où les résultats calculés sur le couvert après multiplication par la densité de plantes au m^2 .

I.2.2 - Présentation des résultats

Les commentaires qui suivent dégagent les principales remarques sur l'évolution de la moyenne et de la variance des paramètres de structure et de biomasse mesurés ou calculés.

I.2.2.a - Hauteurs d'insertion des feuilles - taille du brin

Les hauteurs d'insertion définitives des plus basses feuilles (F2, F3, F4) sont atteintes au stade gonflement, la hauteur définitive de F1 à la floraison. (figure III.3).

A partir de cette date, les hauteurs d'insertion des feuilles successives s'ajustent à une loi logarithmique (Malvoisin, 1981) - figure III.4.

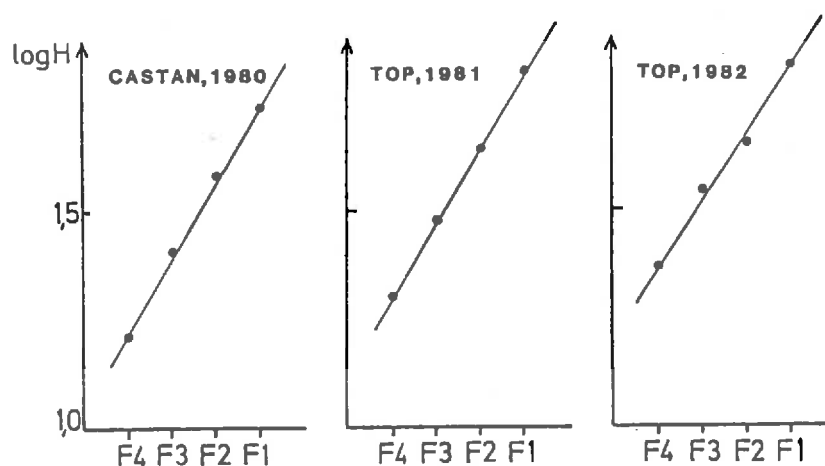


Figure III.4 : Relation entre le numéro d'ordre des feuilles et le logarithme de leur hauteur d'insertion H à la floraison.

La croissance en hauteur du blé de printemps CASTAN 80 est plus accélérée que celle des 2 blés d'hiver ; sa hauteur finale reste moindre : il s'agit probablement d'un effet variétal car TOP 82, pourtant soumis aussi à des conditions défavorables, atteint la même hauteur que TOP 81. La taille maximale du maître-brin (sommet de l'épi) est atteinte à la floraison pour CASTAN 80 et TOP 82, quelques jours plus tard pour TOP 81, par un accroissement plus tardif du col de l'épi.

L'examen de la variance sur la hauteur d'insertion de la dernière feuille pour TOP 81 et 82 (page 2.9) et pour CASTAN (non figurée) montre un "pic" de variance aux alentours du palier d'eau ; ce pic, qui traduit selon le modèle d'analyse de la croissance présenté au chapitre précédent, un changement brusque de la vitesse d'évolution, précède une légère baisse de la hauteur d'insertion de F1, perceptible sur la moyenne ; ce phénomène, perçu également

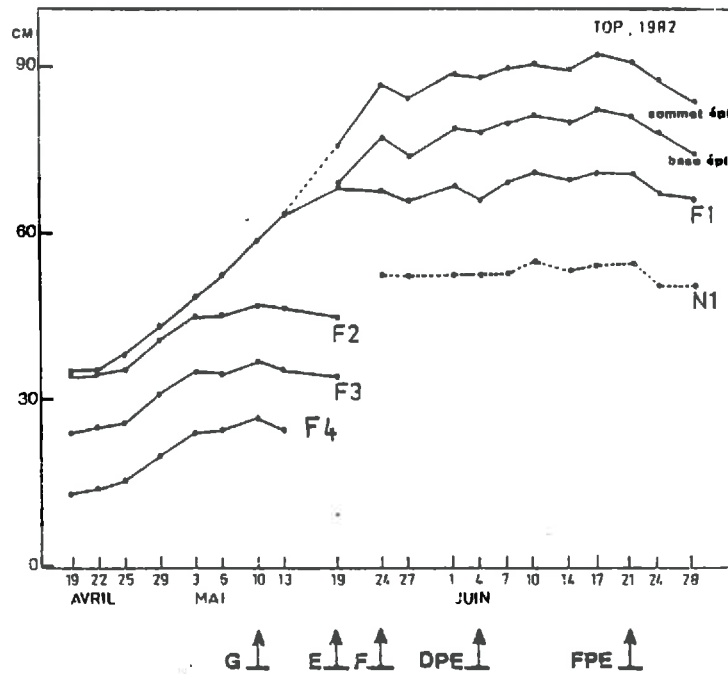
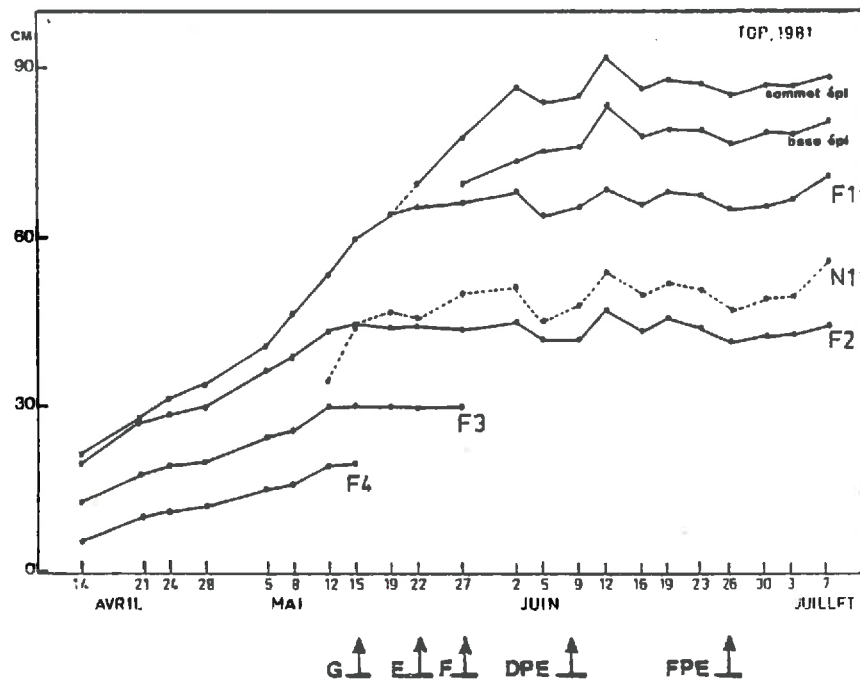
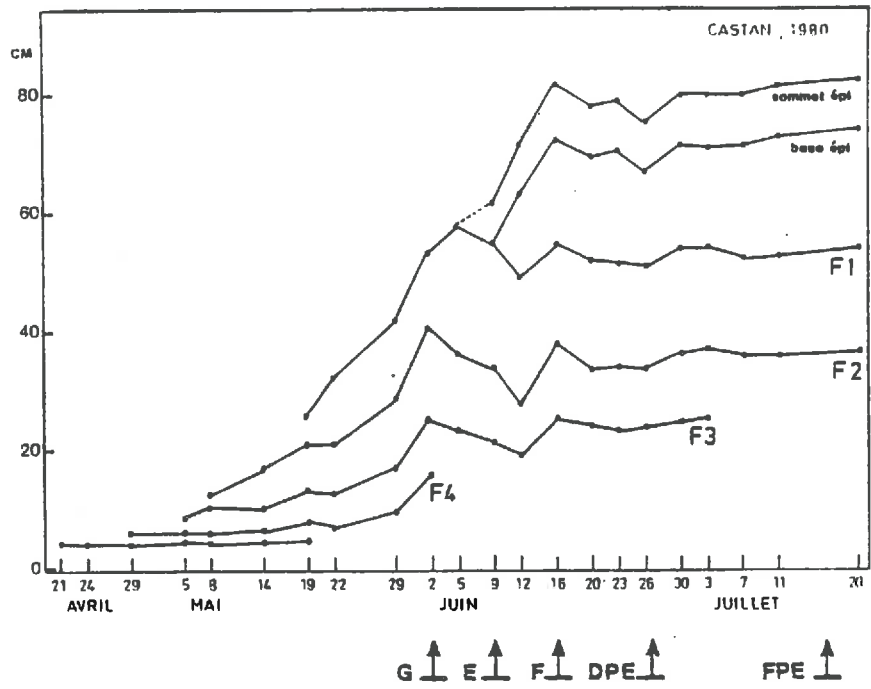


Figure III.3 : Evolutions des hauteurs

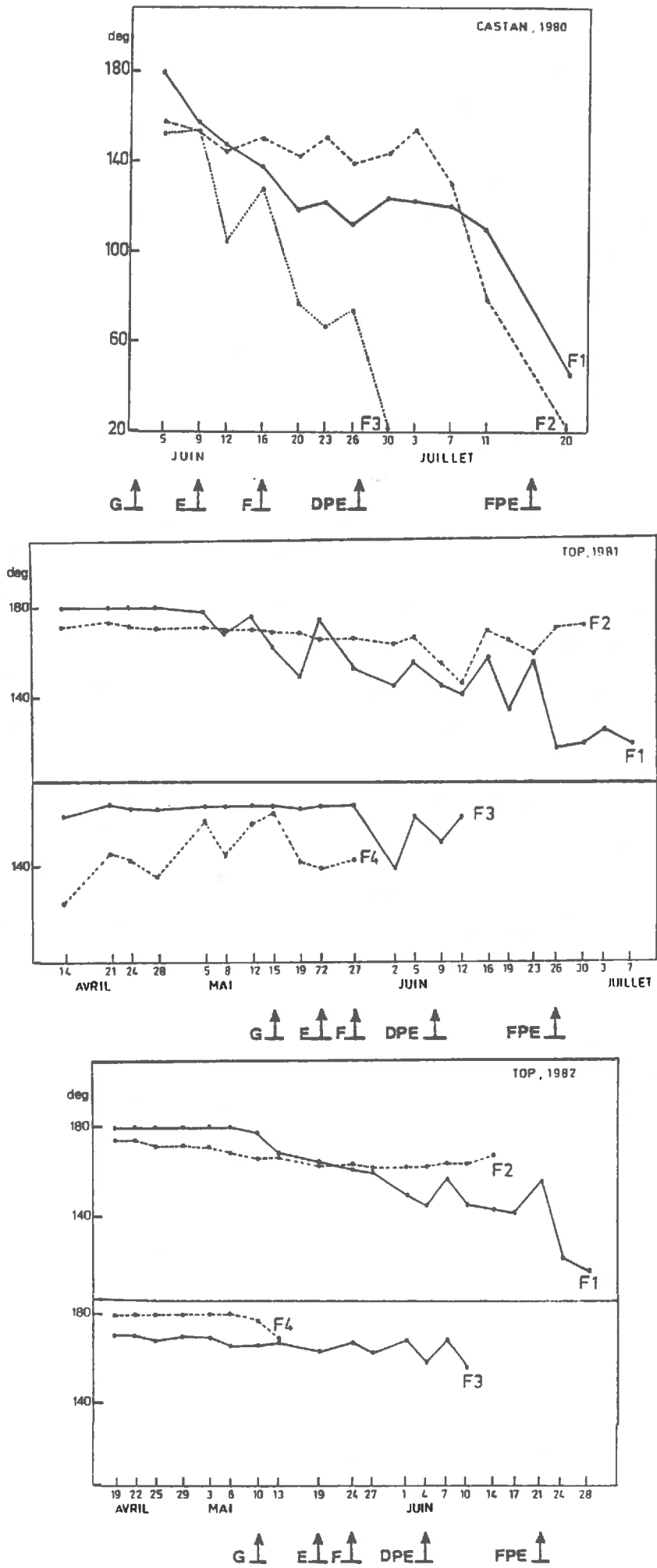


Figure III.5 : Evolution de l'angle d'insertion des feuilles

sur la hauteur d'insertion des autres feuilles ne peut être dû qu'à un léger raccourcissement des entrenœuds de la tige et des gaines des feuilles, lié à la chute de la teneur en eau de ces organes. La figure III. 19 p.3.24 permet de vérifier que la date et l'intensité de ce pic (et de cette baisse) sont liées à la date et à l'intensité de la chute de la teneur en eau de l'ensemble tige = entrenœuds + gaines.

I.2.2.b - Angles d'insertion des feuilles - courbure des épis

Les angles ont été mesurés jusqu'à ce que la feuille soit jaune et sèche (Figure III.5).

On note immédiatement le comportement très différent des 2 variétés étudiées : sur CASTAN, l'abaissement des feuilles vers la tige a une bien plus grande amplitude que sur TOP, variété à port érigé ; cet abaissement concerne toutes les feuilles sur CASTAN, essentiellement la dernière feuille sur TOP.

La chute, inéluctable mais en dents de scie, des feuilles commence au gonflement pour CASTAN 80 et TOP 82, une dizaine de jours avant pour TOP 81. Les variations successives observées sur la dernière feuille sont difficilement interprétables : elles ne semblent pas reliées à des épisodes pluvieux ou de sécheresse, pas plus qu'aux franchissements de stades de développement.

Cependant pour les 3 années, un redressement temporaire de F1, visible sur la moyenne (et significatif pour les TOP), précédé par un pic de variance, se produit aux alentours du palier d'eau.

Les épis (figure III.6) sont pratiquement verticaux pour TOP 81 jusqu'à la fin du palier d'eau. Les épis de TOP 82 ont toujours été légèrement obliques avec une petite accentuation de cette obliquité à la fin du palier d'eau.

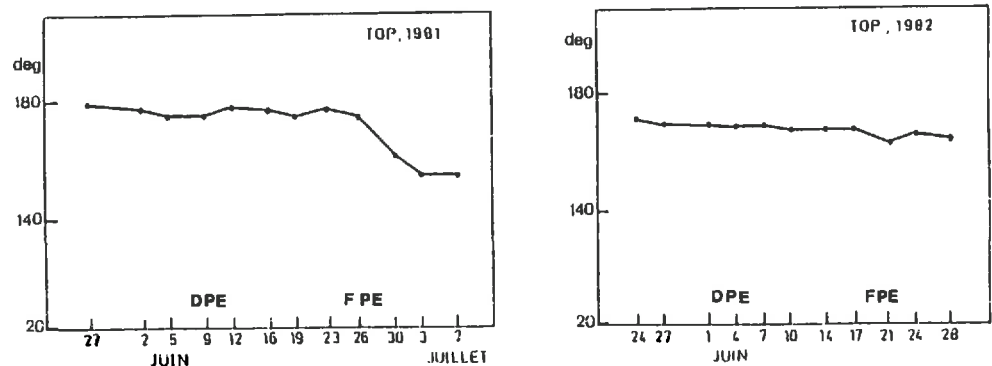


Figure III.6 : Obliquité de l'épi

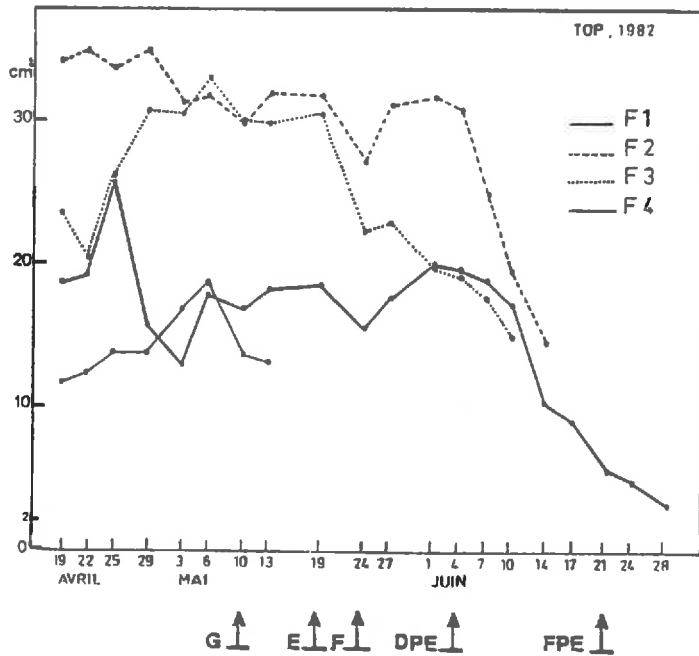
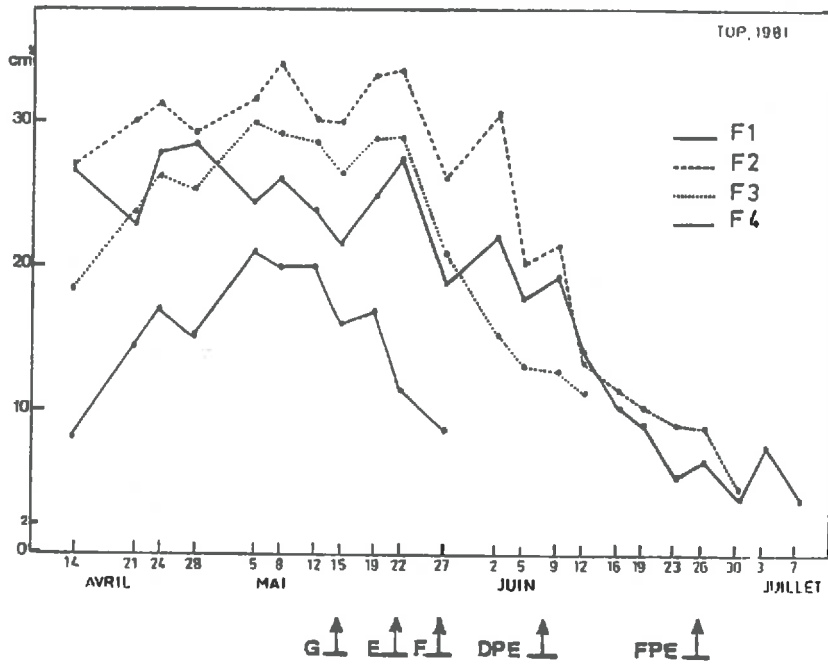
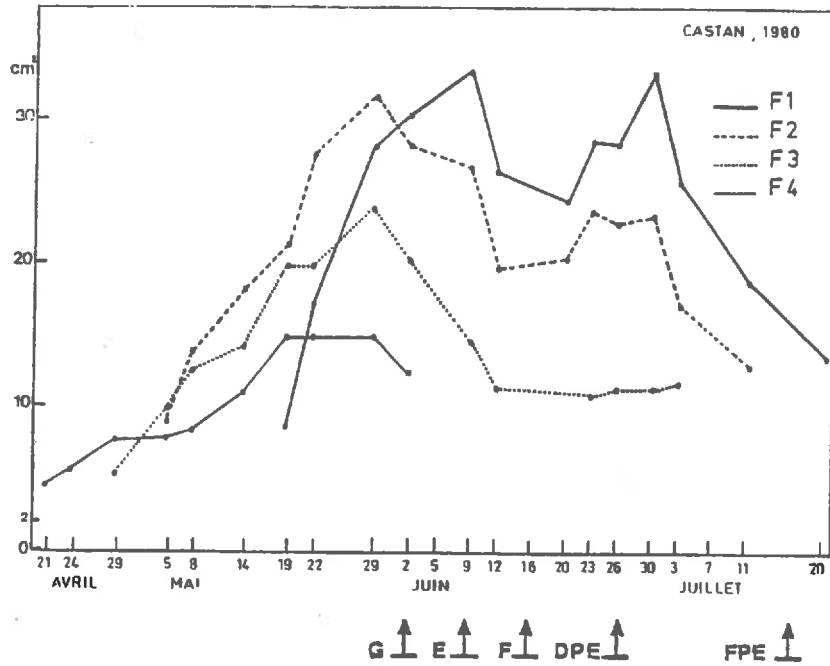


Figure III.7 : Evolution de la surface des feuilles

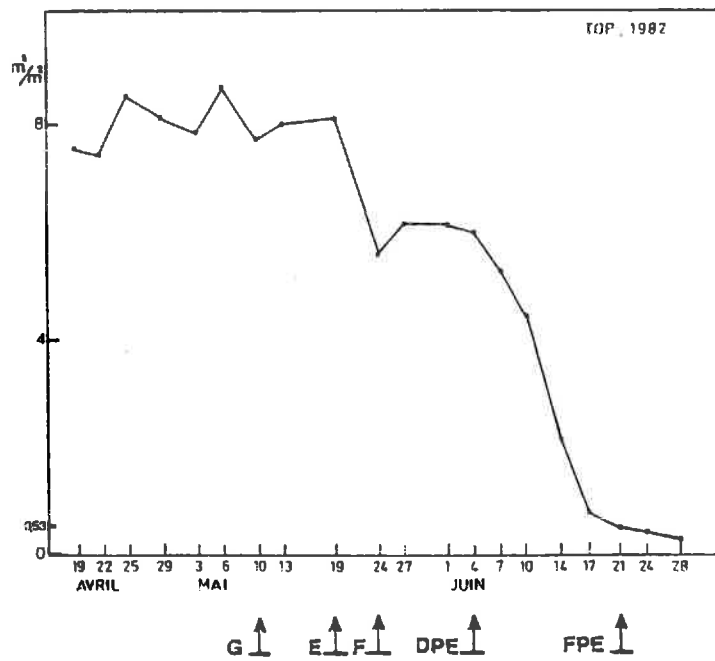
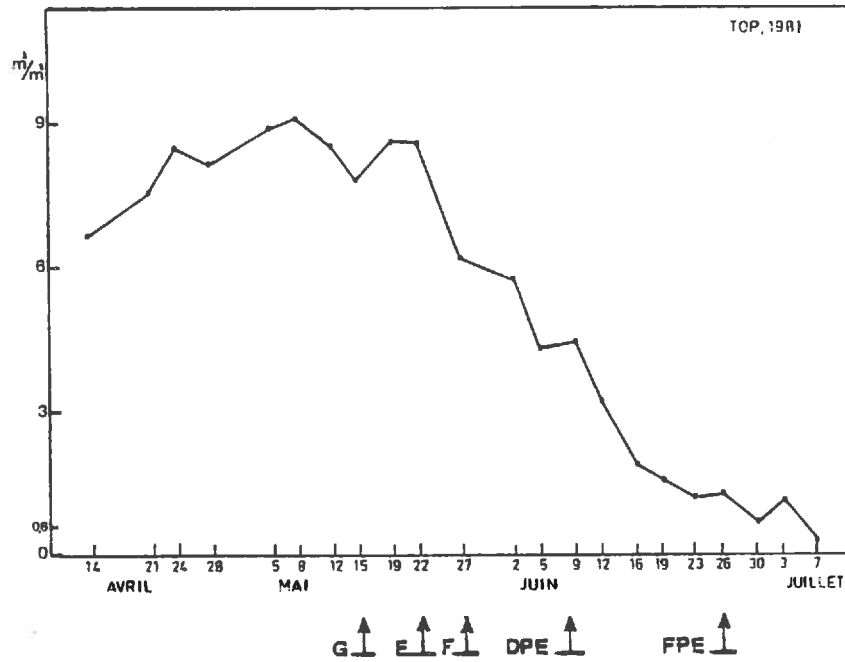
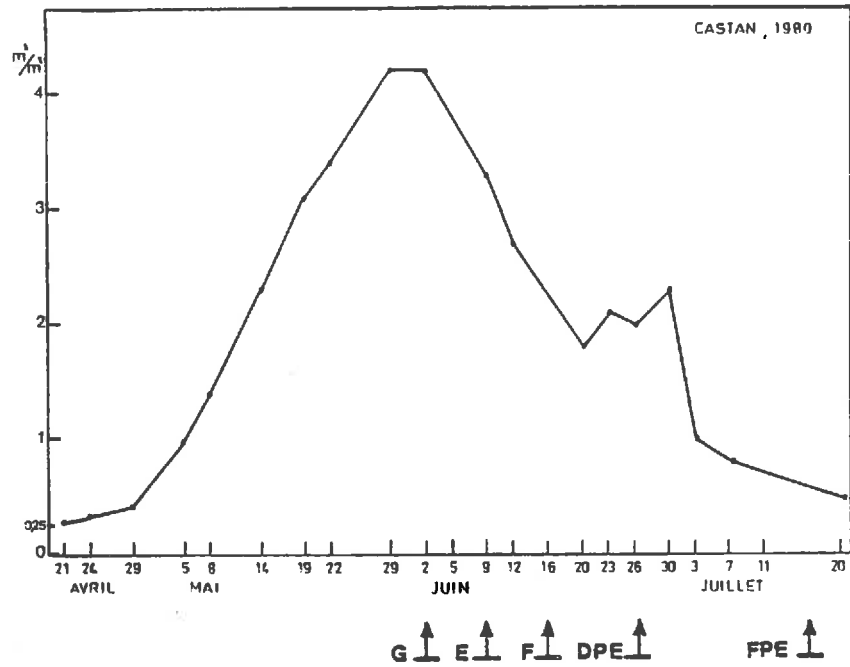


Figure III.8 : Evolution de l'indice foliaire

I.2.2.c - Surfaces des feuilles - indice foliaire (Figures III.7 , III.8)

Le début des mesures a mis en évidence la période de croissance en surface des feuilles sur CASTAN 80, plus en retard mais plus accélérée que sur les blés d'hiver TOP.

Sur CASTAN 80 uniquement, la dernière feuille, sa croissance achevée, a une surface plus grande que F2 et F3. La mauvaise santé de TOP 82 se traduit par une surface de F1 bien inférieure à celle de F2 et F3 et à celle de F1 sur TOP 81 ; on remarquera que les surfaces de F2 et F3 ont en moyenne les mêmes valeurs en 81 et 82.

La surface des 3 dernières feuilles diminue de façon brutale à partir de l'épiaison pour TOP 81 (maximum de vitesse et pic de variance le 12 juin), et seulement à partir du début du palier d'eau pour CASTAN 80 et TOP 82.

La réaction de la feuille aux épisodes pluvieux n'est pas systématique ; elle semble dépendre de l'âge de la feuille : ainsi, un déroulement des feuilles est observé sur CASTAN vers le 26 juin (début du palier d'eau), correspondant avec une période de pluie ; la pluie vers le 26 juillet sur TOP 81, survenant à la fin du palier d'eau, ne provoque pas de déroulement.

L'indice foliaire est le produit de la somme calculée des surfaces foliaires par plante par la densité de plantes au m². Le maximum de cet indice est atteint au gonflement pour CASTAN, quelques jours avant (4 à 7) pour les TOP. L'examen de la variance sur la surface totale des feuilles du maître-brin montre un pic de variance à ces dates. L'indice foliaire chute brutalement au début du palier d'eau (pics de variance sur les maîtres-brins des TOP).

La valeur de l'indice à son maximum, très faible pour CASTAN 80 est due à la faible densité de plantes au m² plutôt qu'à une surface inférieure des feuilles. Les valeurs pour TOP 81 et 82 sont équivalentes, malgré la différence de conditions climatiques.

I.2.2.d - Poids secs (Figures III.10 , 11, 12, 13)

Les poids secs des feuilles présentent une hiérarchie différente selon les années : feuille F1 plus lourde que les autres pour CASTAN 80, moins lourde que F2 et F3 pour TOP 82, entre F2 et F3 pour TOP 81.

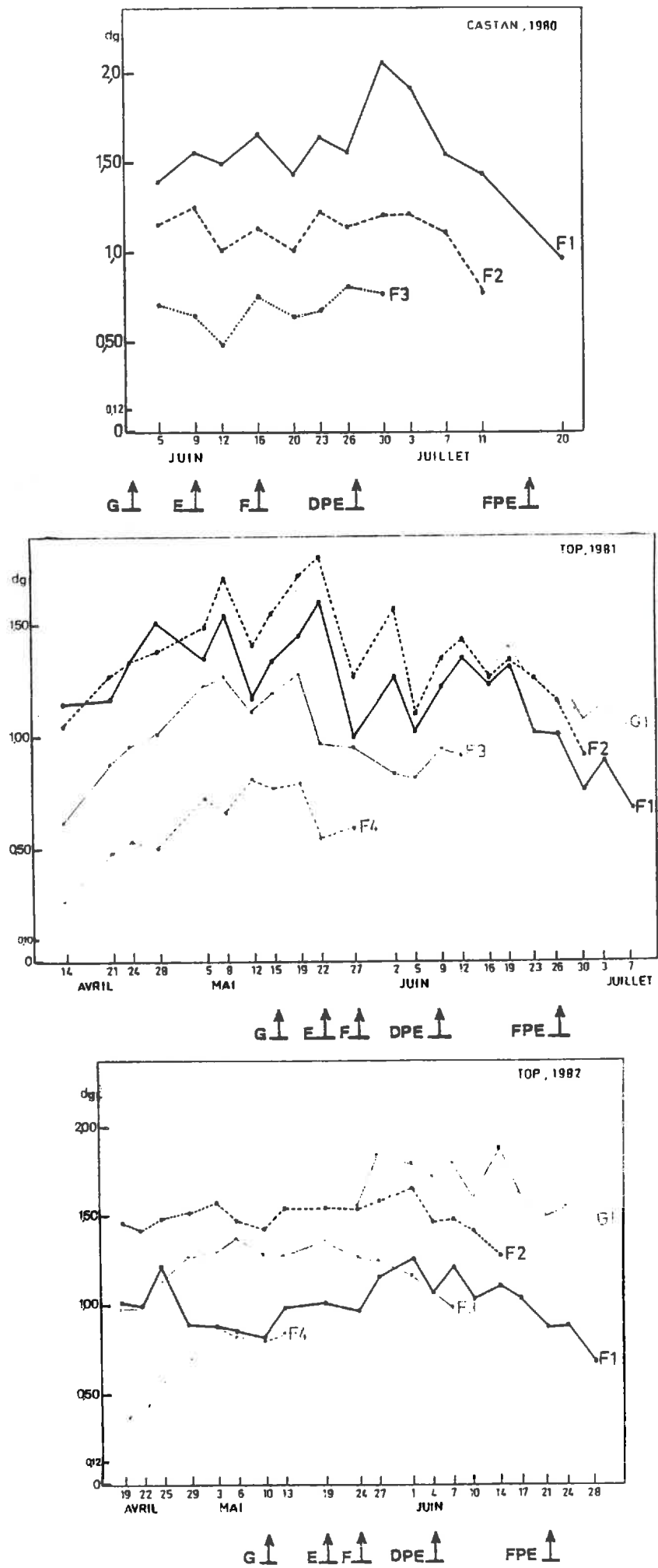


Figure III.10 : Evolution du poids sec des feuilles

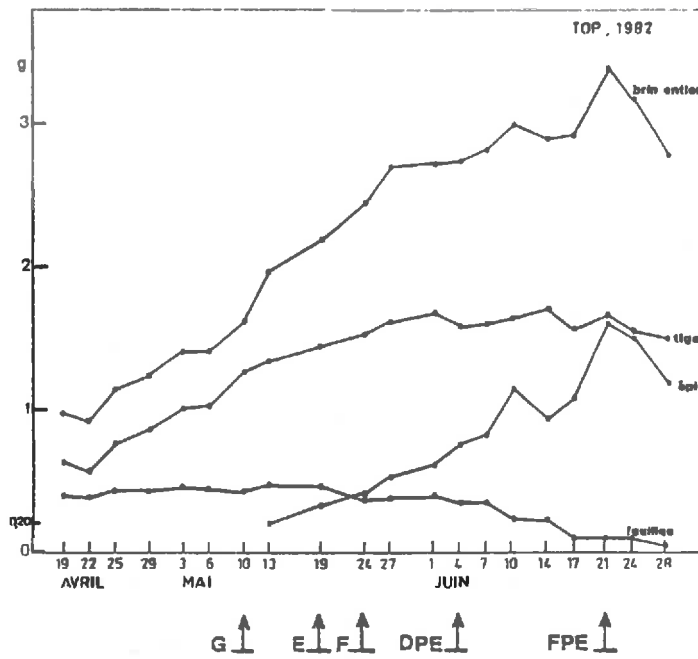
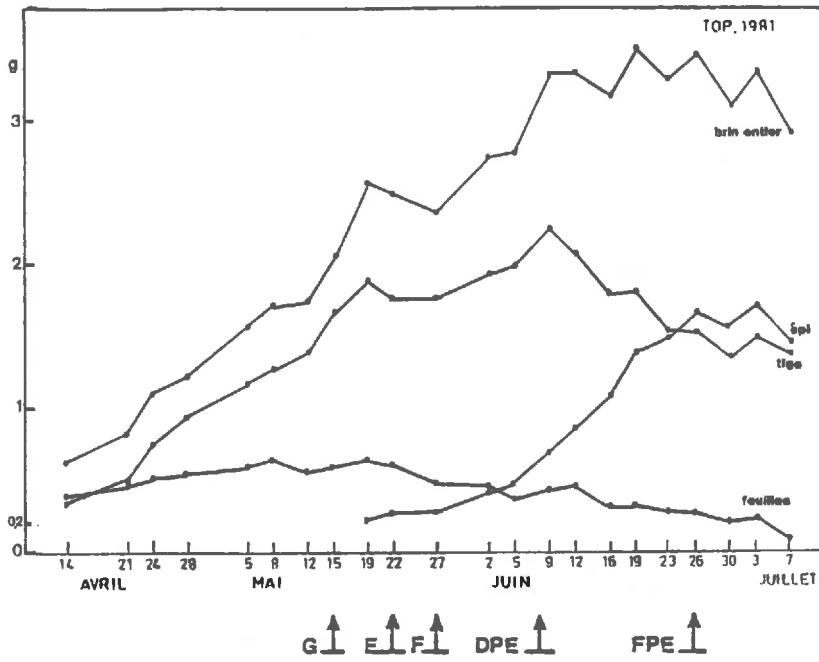
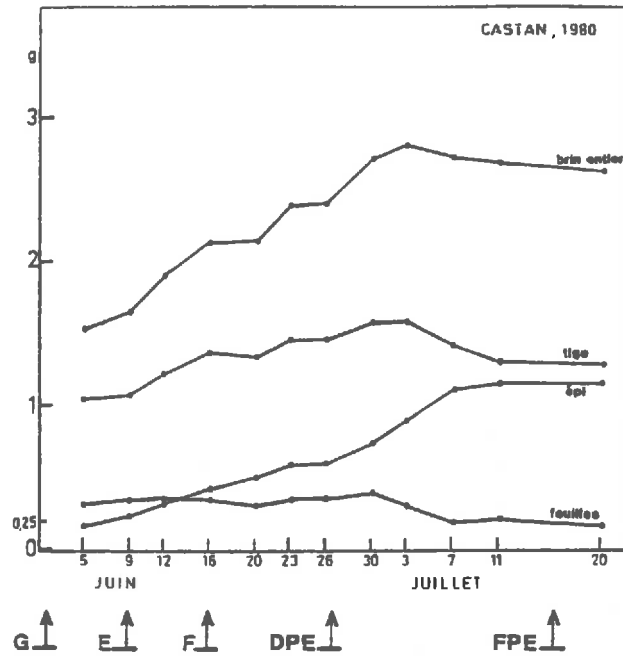


Figure III.11 : Evolution du poids sec du maître-brin

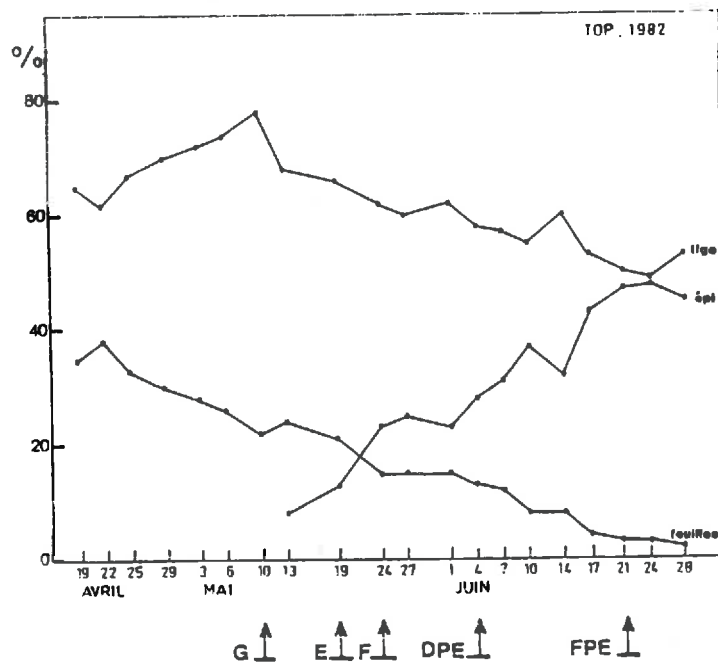
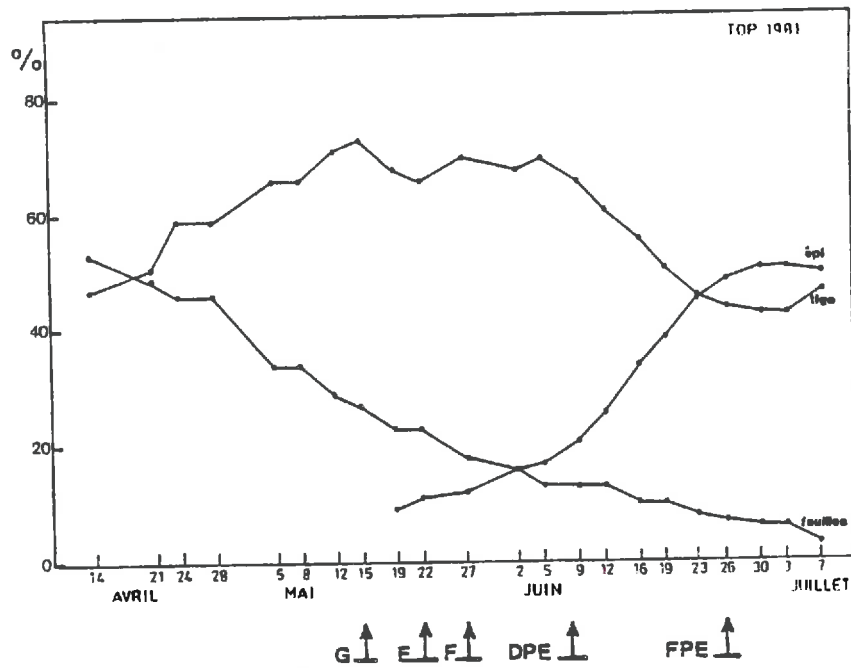
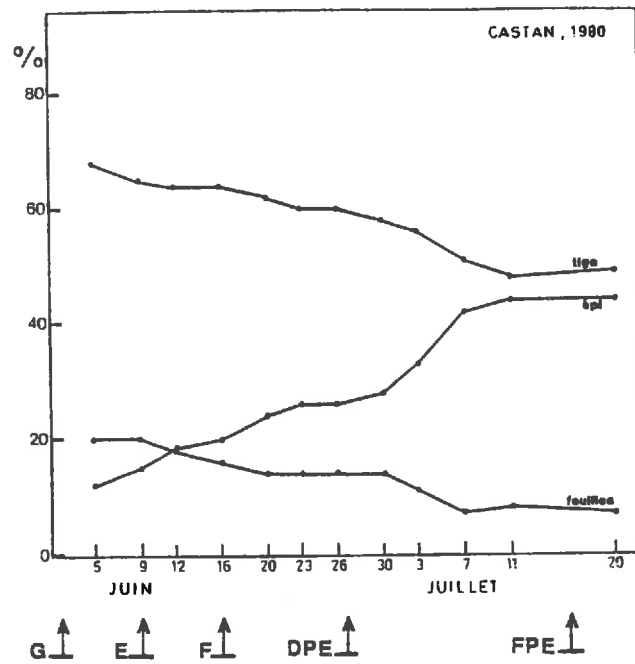


Figure III.12 : Evolution de la contribution des organes au poids sec du maître-brin

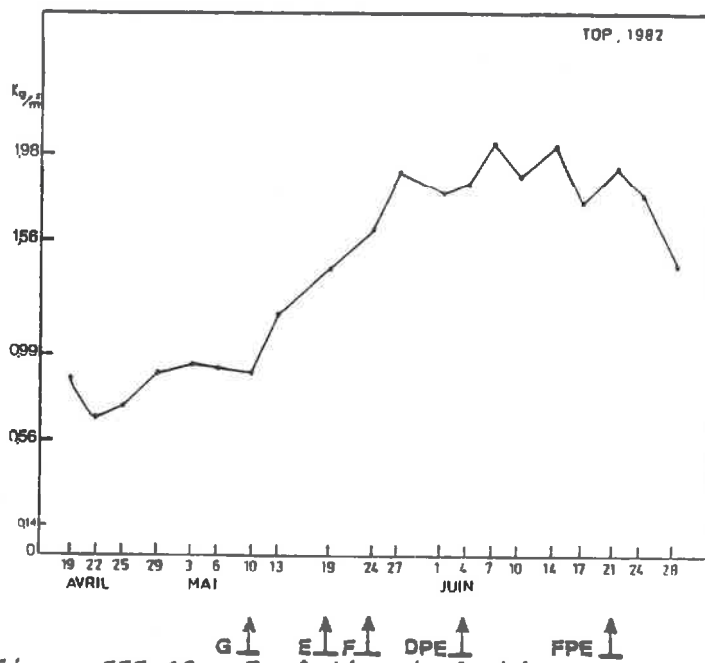
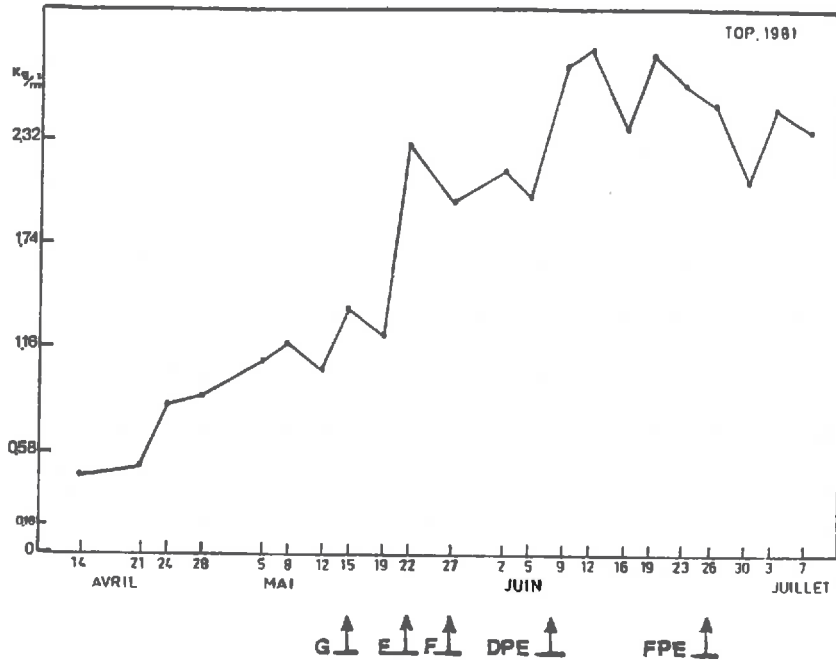
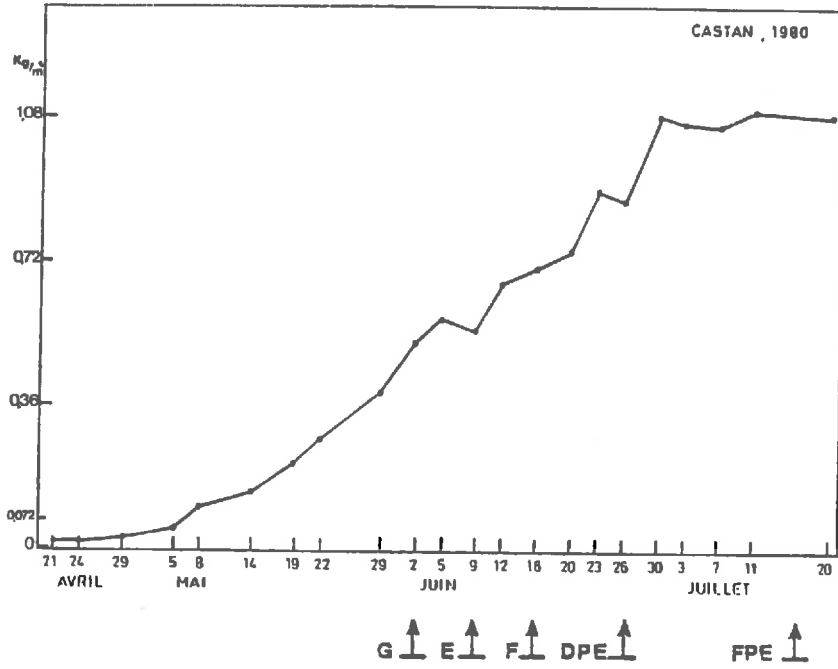


Figure III.13 : Evolution de la biomasse sèche/m²

Les courbes Figure III.12 montrent la migration des réserves des feuilles et de la tige vers l'épi ; à partir du début du palier d'eau, la tige participe plus à la croissance en matière sèche de l'épi pour TOP 81 que pour CASTAN 80 et TOP 82 ; le poids de l'épi représente la part la plus importante du poids sec total à la fin de la maturation, pour TOP 81 uniquement.

Le poids sec du brin entier croît jusqu'à un maximum puis décroît légèrement. Sur CASTAN 80 et TOP 81, à l'épiaison-floraison est observé un pic de variance, semblant correspondre à un ralentissement de la croissance en matière sèche.

Un second ralentissement, accompagné par un pic de variance, se produit vers le début du palier d'eau pour les 3 années.

I.2.2.e - Poids d'eau

(Figures III. 14, 15, 16, 17)

La hiérarchie observée entre les feuilles est la même que pour les poids secs.

La chute du poids d'eau des 2 dernières feuilles intervient dès le gonflement et s'accroît au début du palier d'eau.

Le maximum de poids d'eau dans le brin est atteint à l'épiaison pour TOP 81 et 82, confirmé par un pic de variance en 81, non en 82 (intervalle de mesure trop grand ?). Pour CASTAN, le maximum en eau est probablement atteint au gonflement ou peu avant ; pour cette année, l'amplitude de la perte en eau est bien moins grande que pour les TOP : ceci est sans aucun doute dû au mois de juin très pluvieux.

Sur l'épi, on retrouve, mais de façon moins nette, les dates de début et de fin du palier d'eau déduites des mesures sur les grains.

I.2.2.f - Teneur en eau

(Figures III. 18, 19)

La chute brutale et définitive de la teneur en eau de la feuille peut être prise comme un des signes de sa perte d'activité.

Cette senescence progresse du bas vers le haut de la tige : pour chacune des feuilles, les dates auxquelles elle débute sont notées dans le tableau ci-après.

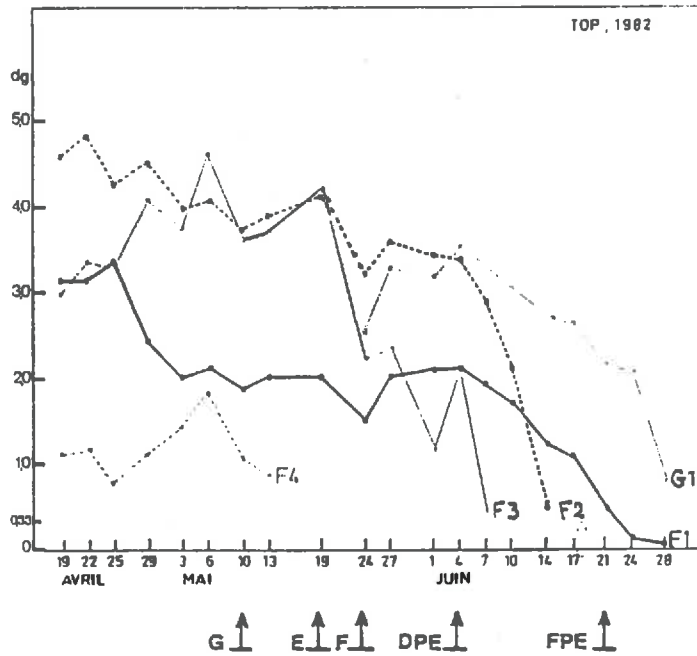
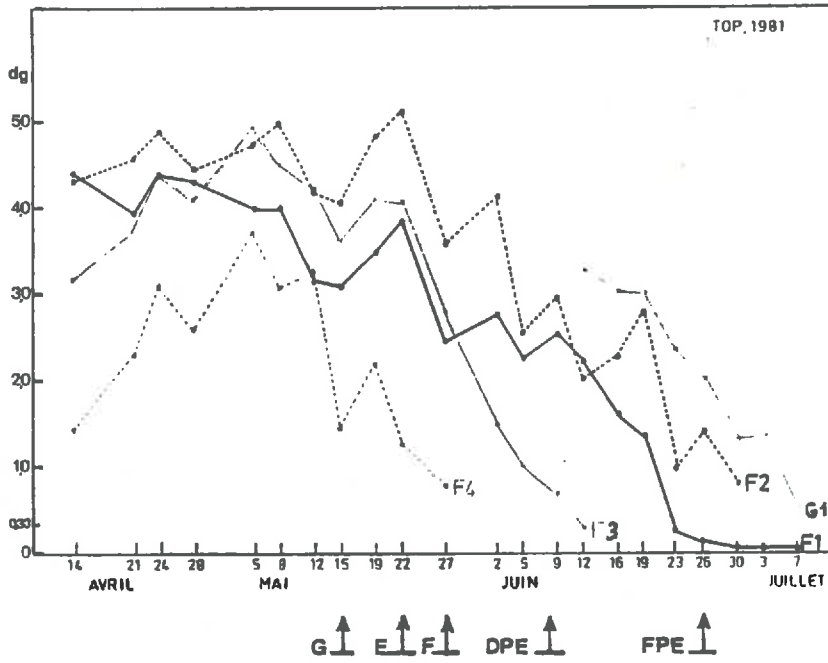
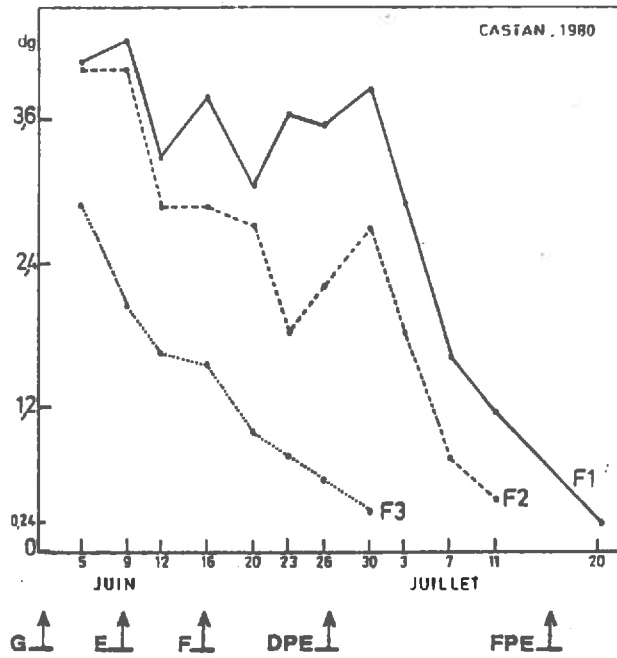


Figure III.14 : Evolution du poids d'eau des feuilles

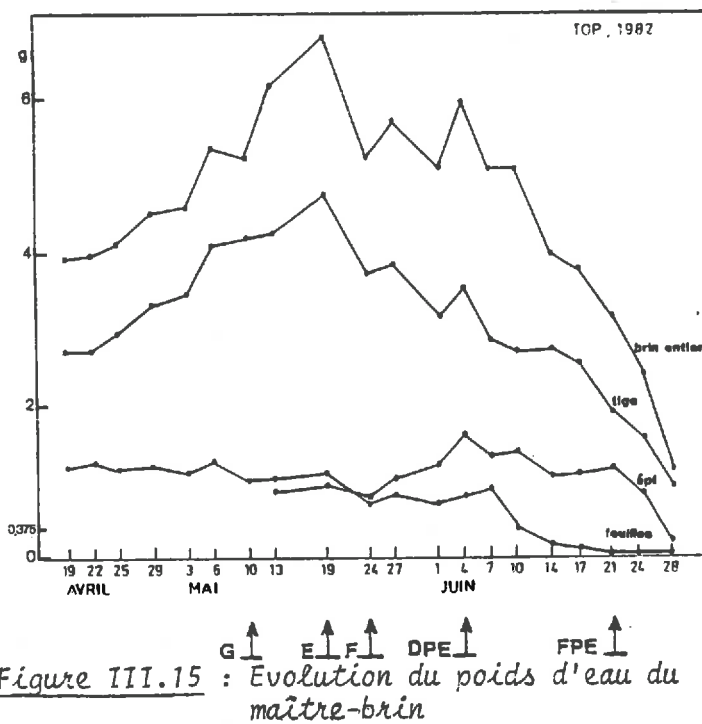
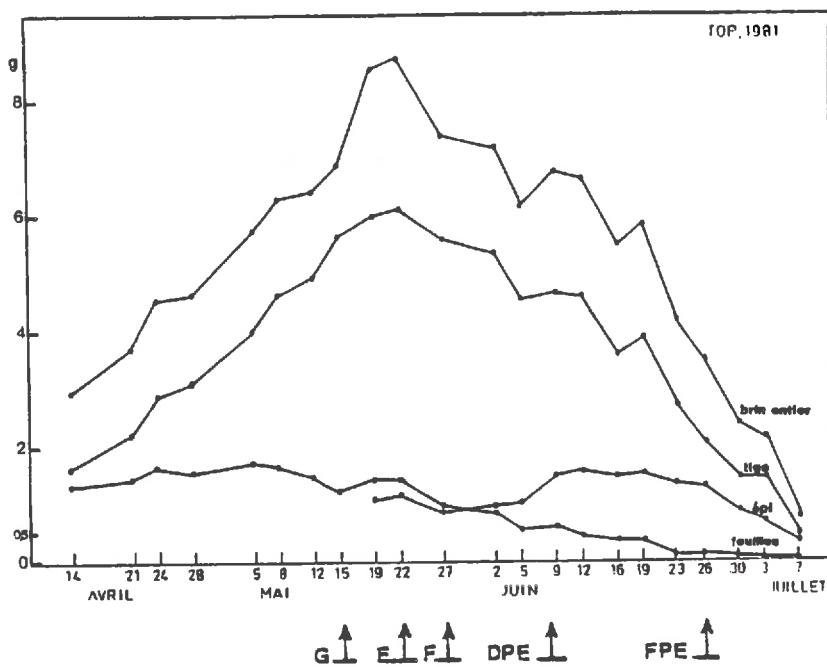
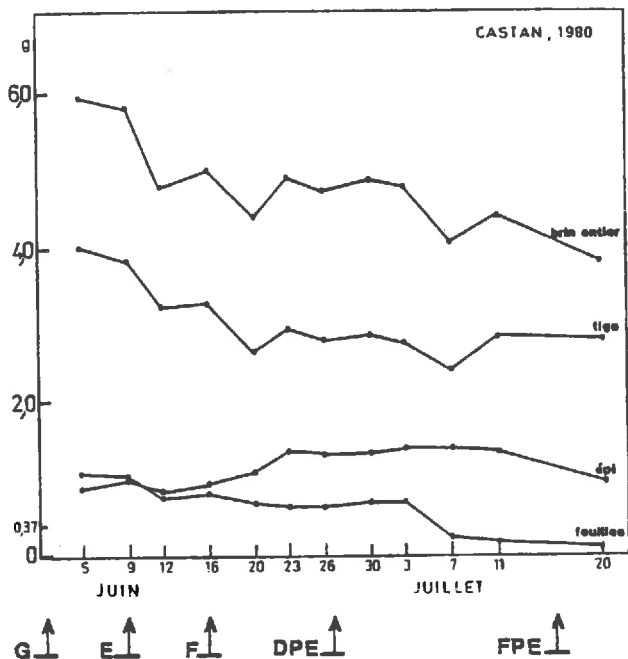


Figure III.15 : Evolution du poids d'eau du maître-brin

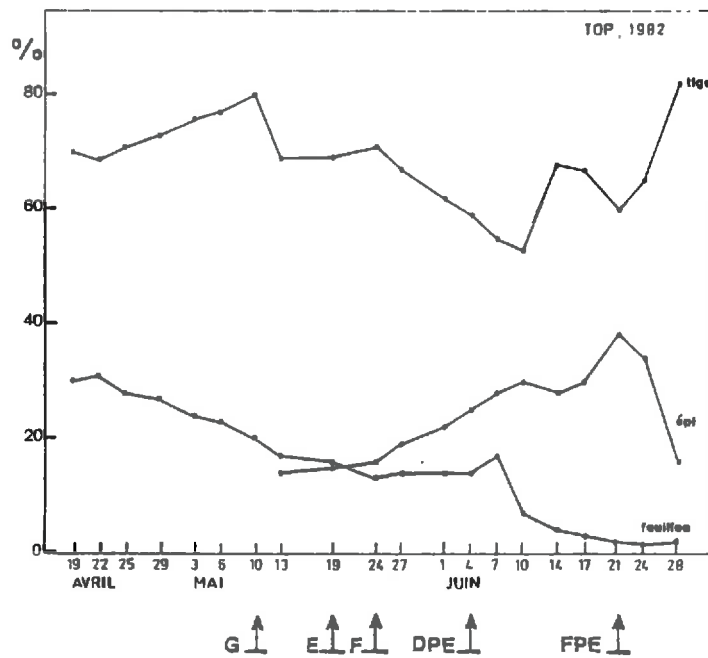
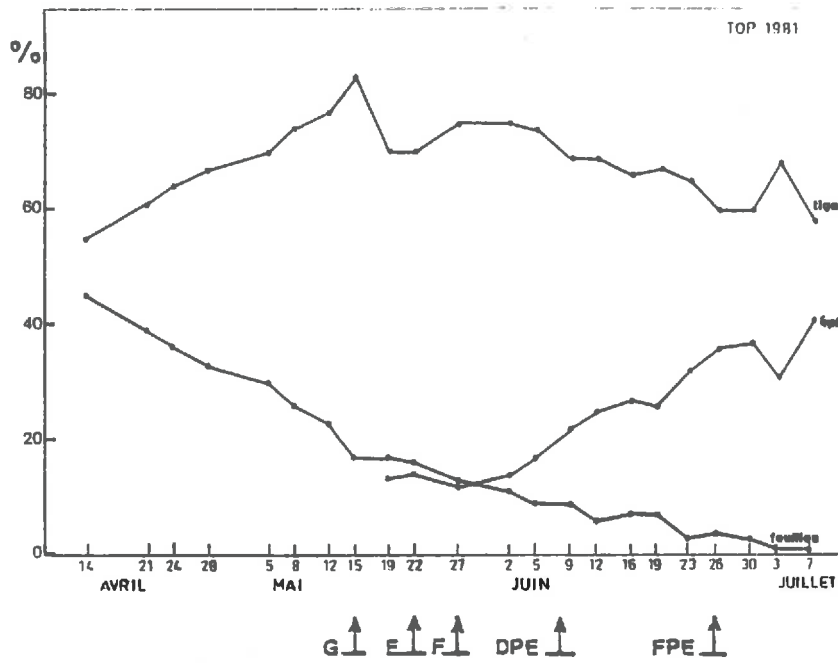
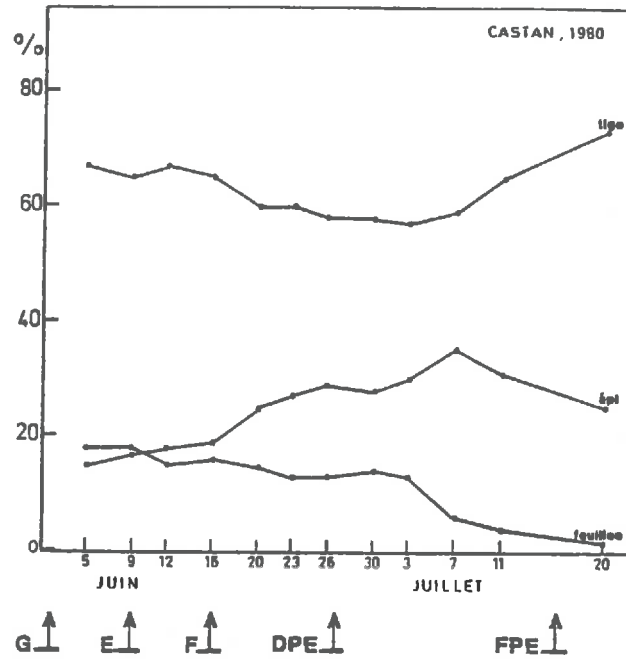
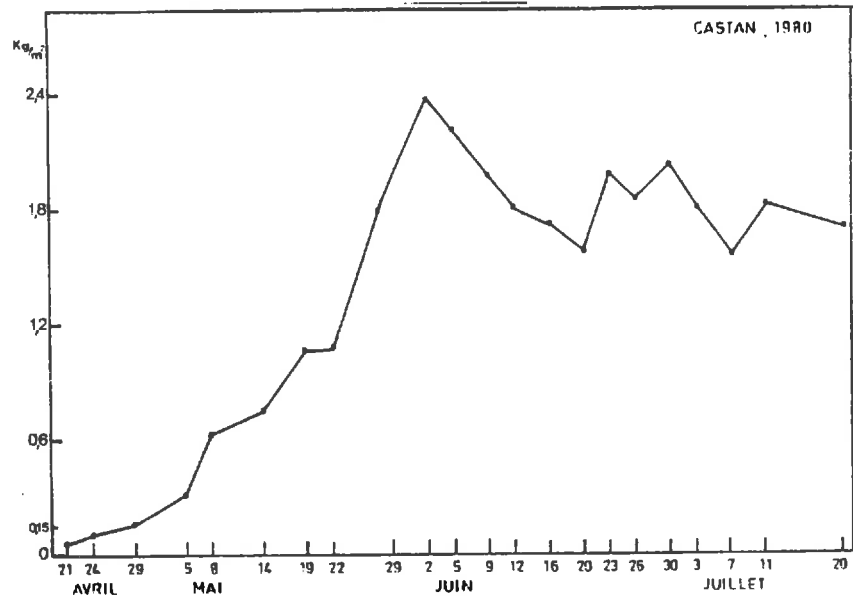
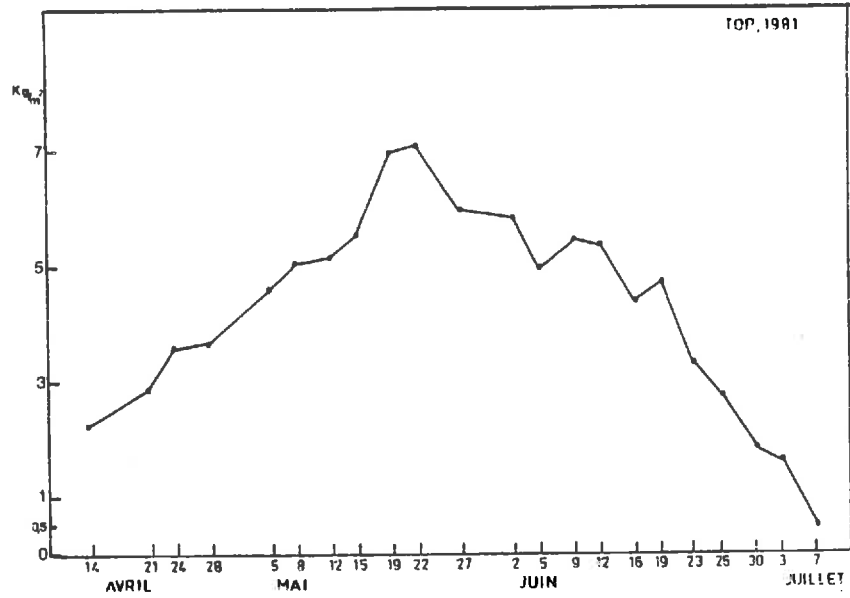


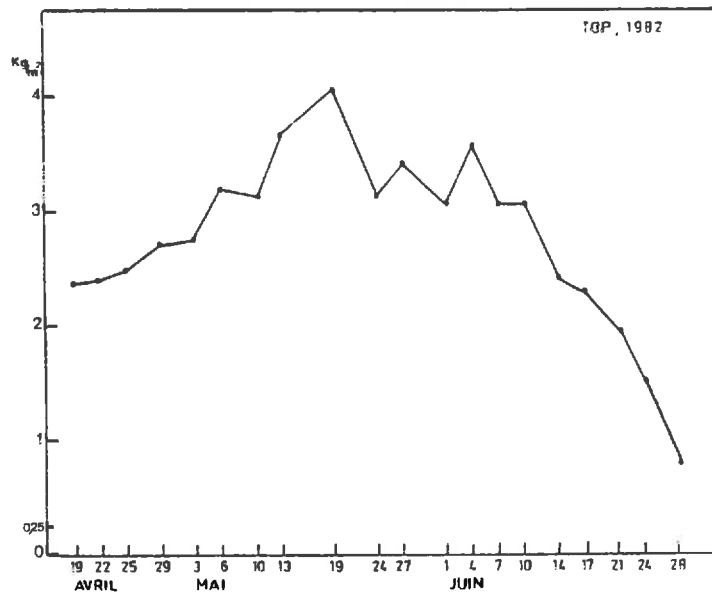
Figure III.16 : Evolution de la contribution des organes au poids d'eau du maître-brin



G ↑ E ↑ F ↑ DPE ↑ FPE ↑



G ↑ E ↑ F ↑ DPE ↑ FPE ↑



G ↑ E ↑ F ↑ DPE ↑ FPE ↑

Figure III.17 : Evolution du poids d'eau/m²

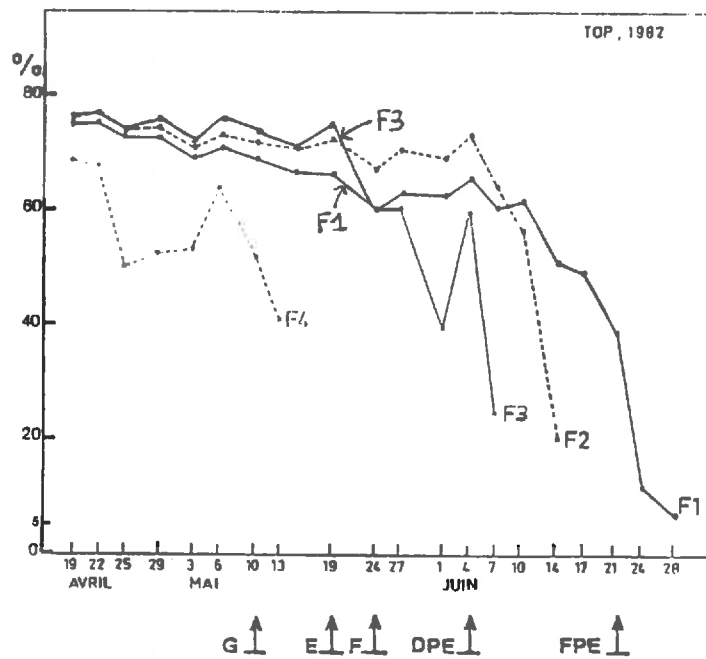
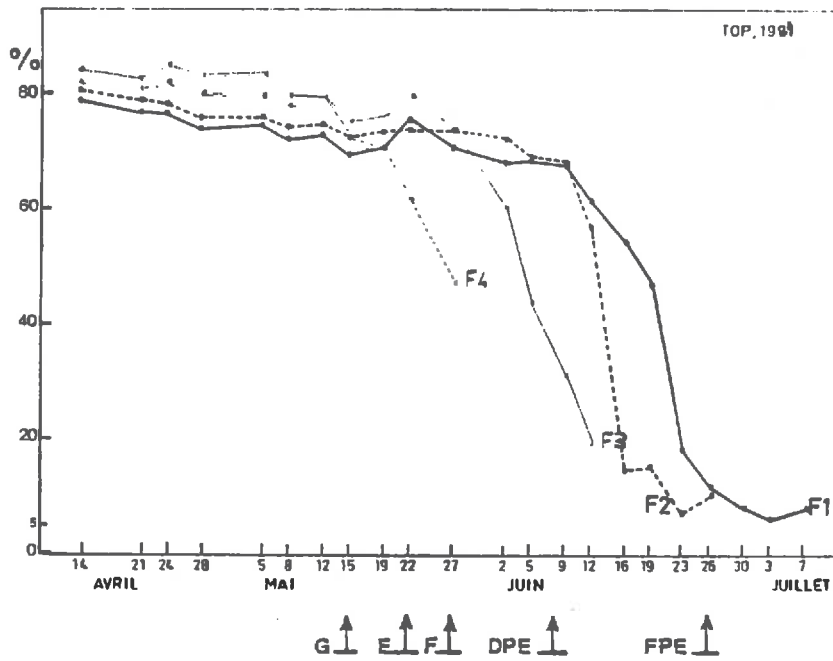
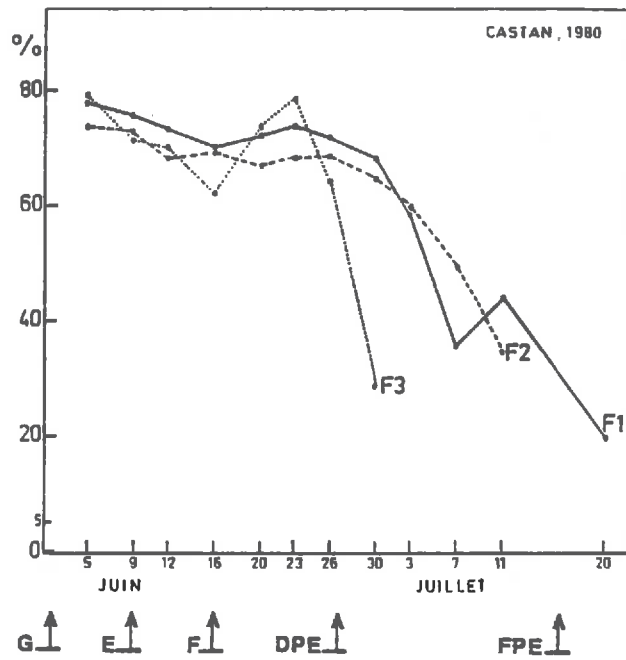


Figure III.18 : Evolution de la teneur en eau des feuilles

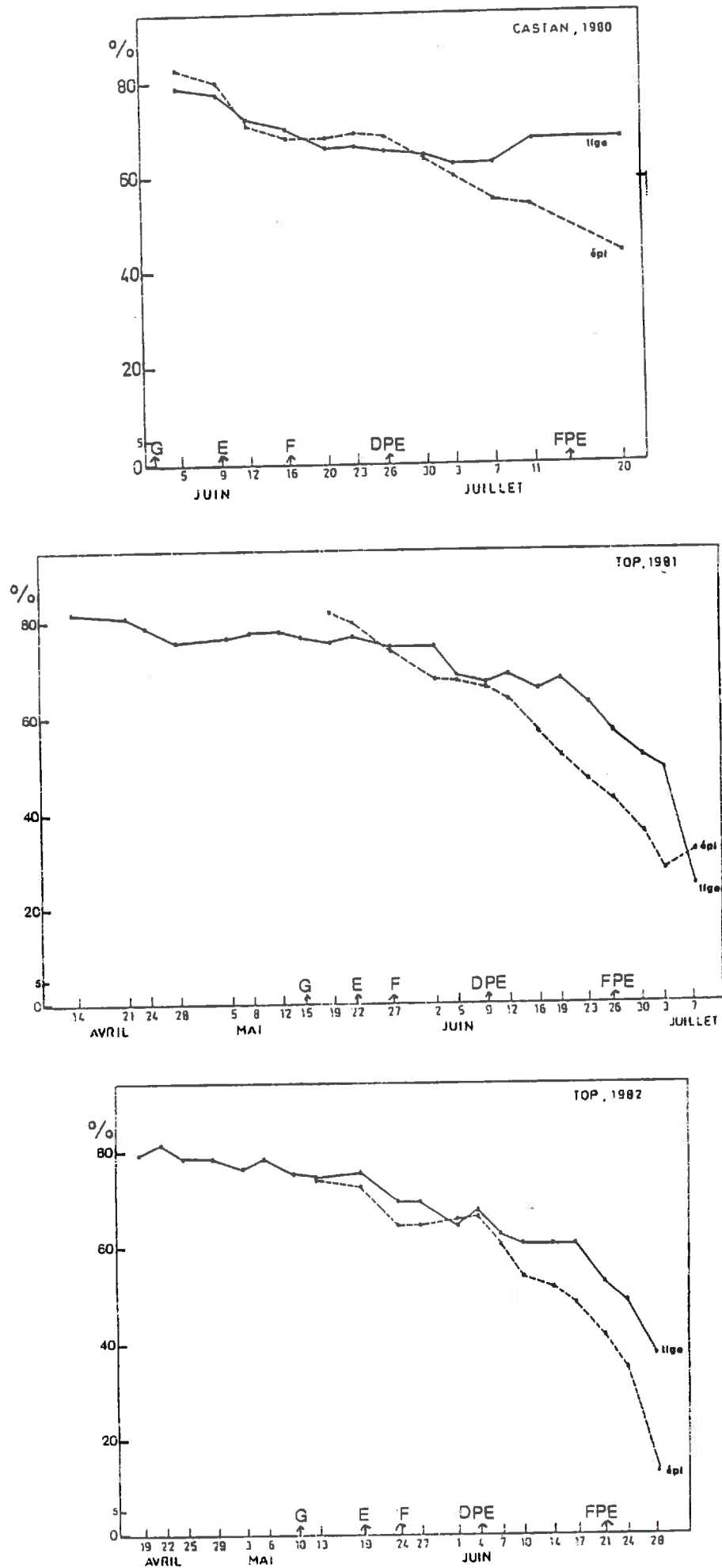


Figure III.19 : Evolution de la teneur en eau de la tige et de l'épi

Feuilles années	F4	F3	F2	F1
CASTAN 80	x	DPE	milieu du PE	
TOP 81	G	E	DPE	
TOP 82	F1 sortie	E		

La chute de la teneur en eau intervient aux mêmes dates pour F1 et F2 mais elle est plus brutale pour F2.

Les feuilles de CASTAN se sont maintenues plus longtemps en activité, du fait des pluies abondantes.

La remontée de la teneur en eau de la F3 sur TOP 82 le 4 juin s'explique par la pluie : la feuille alors moyennement desséchée réagit comme une éponge ; les autres feuilles plus riches en eau "tamponnent" mieux ; quand la feuille est très sèche (F1 sur TOP 81 à la fin du palier d'eau) elle ne réagit plus.

Pour les 3 années, la teneur en eau du brin entier décroît à partir de l'épiaison.

I.2.2.g - Etat de verdure des feuilles (Figure III.20)

La notation est basée sur l'estimation visuelle de la proportion de surface encore verte de la feuille.

On constate que le jaunissement des feuilles s'effectue du bas vers le haut de la tige, progressivement. Pour les 2 années, un jaunissement très brutal intervient au début du palier d'eau, pour l'ensemble des feuilles. Le jaunissement avait commencé dès le gonflement pour TOP 82 ; à cette date, pour cette année, la feuille F4 notamment a déjà perdu presque toute son activité chlorophyllienne.

Le jaunissement des feuilles est antérieur de 2 à 3 jours à la chute de leur teneur en eau.

Un reverdissement passager est observé sur la F1 des 2 années, peu après le début du palier d'eau coïncidant avec le redressement temporaire de la feuille signalé au §b. En 82, il y a pluie à cette époque, mais non en 81 ;

ces reverdissement et redressement semblent donc bien caractéristiques de la période du début du palier d'eau.

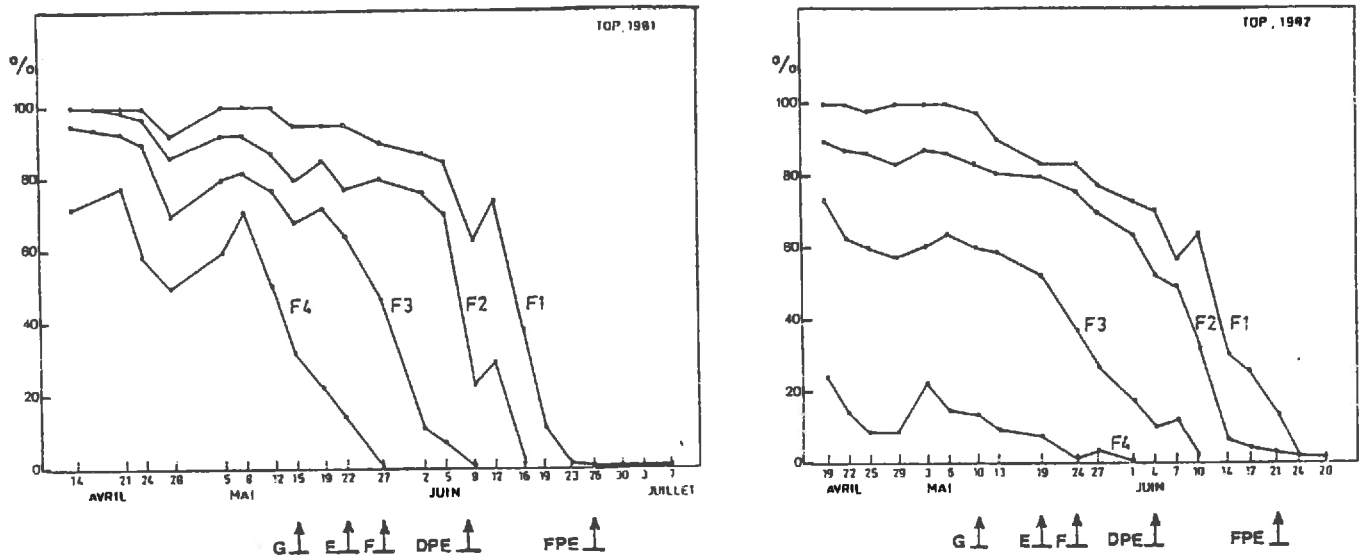


Figure III.20 : Evolution de l'état de verdure des feuilles

II - RELATION ENTRE LES PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE ET LES STADES DE DEVELOPPEMENT

II.1 - Synthèse des résultats obtenus

La synthèse concerne les points communs trouvés dans l'évolution des paramètres de structure et de biomasse en fonction des stades de développement, soit sur les 3 années, soit sur la variété de blé d'hiver TOP des années 81 et 82 :

A l'époque du gonflement :

- les hauteurs définitives des feuilles F4, F3, F2 sont atteintes
- le jaunissement des 2 dernières feuilles F2 et F1 débute
- le maximum d'indice foliaire est atteint (pic de variance sur les mesures au niveau de la surface foliaire totale du maître-brin)

A l'époque de l'épiaison :

- l'indice foliaire et le poids d'eau total des feuilles diminuent
- le maximum du poids d'eau total dans le maître-brin est atteint
- la teneur en eau du maître-brin diminue

A l'époque de la floraison :

- la dernière feuille F1 atteint sa hauteur définitive

A l'époque du début du palier d'eau :

- la dernière feuille se redresse brusquement et temporairement (pic de variance)
- la surface, le poids d'eau, la teneur en eau des 2 dernières feuilles chutent brutalement
- le jaunissement des 2 dernières feuilles est brutal
- la vitesse de croissance en matière sèche du brin et de la plante entière diminue (pic de variance)

A l'époque de la fin du palier d'eau :

- chute brutale de l'angle d'insertion de F1
- courbure nette des épis
- le maximum du poids sec du brin est atteint (pic de variance)

II.2 - Comparaison avec d'autres résultats

Les concordances observées dans cette étude entre l'évolution des paramètres de structure et de biomasse et les stades de développement ne sont pas strictes au sens où les points particuliers de cette évolution ne coïncident pas au jour près avec la date de réalisation du stade.

(En outre, on remarquera que la date exacte de la réalisation des stades n'est elle-même pas déterminée avec précision, l'observation des stades gonflement, épiaison-floraison n'étant effectuée que lors des prélèvements au rythme de 2 fois par semaine, et les dates de début et de fin du palier d'eau, déterminées selon la méthode exposée au chapitre I (§IV.2.2) ne coïncidant probablement pas avec celles de l'ensemble du champ).

De ce point de vue, les résultats obtenus dans des études analogues à celle-ci montrent finalement la grande diversité des comportements.

La figure III.21 présente par exemple les évolutions d'indice foliaire pour différentes variétés, années ou conditions de culture. On constate que l'indice foliaire atteint son maximum au plus tôt au gonflement et au plus tard à l'épiaison, ce que confirment Baldy (1973) et Thill (1978) ; or la durée de

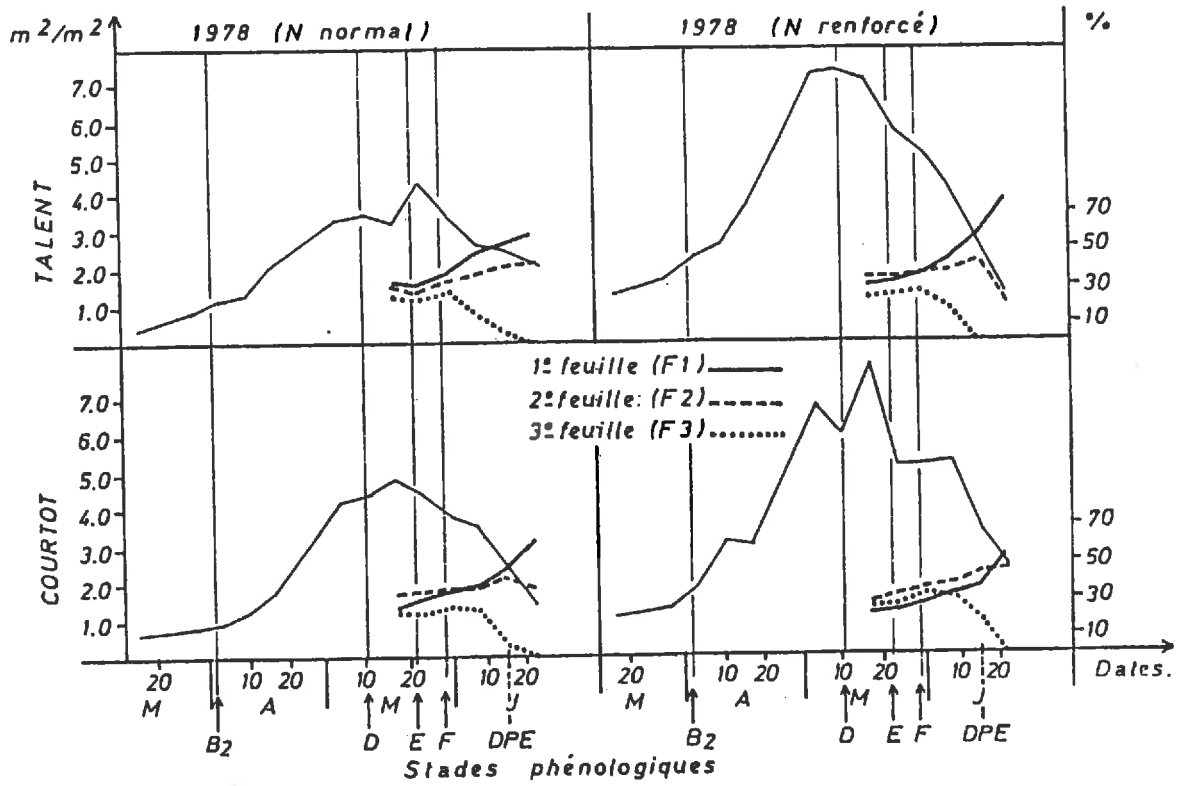


Figure III.21 : Evolutions de l'indice foliaire pour différentes variétés, années, ou conditions de culture -apport d'azote normal ou renforcé-

(d'après Gurnade, 1981)

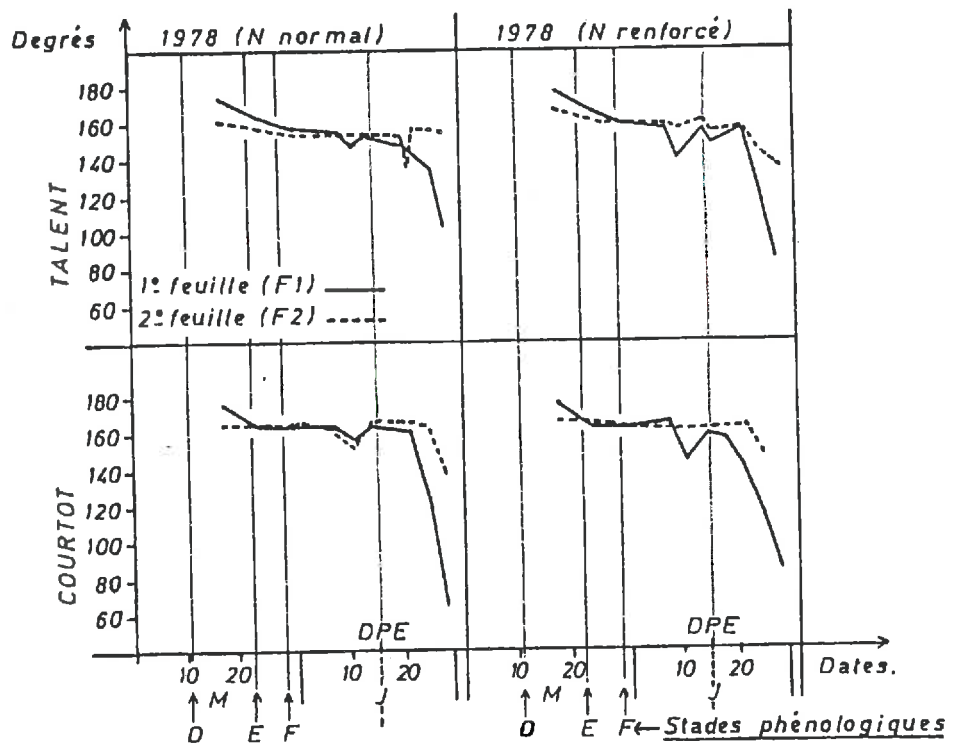


Figure III.22 : Evolutions de l'angle d'insertion des feuilles supérieures

(d'après Gurnade, 1981)

PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE		Précision sur la date (Jours)
GONFLEMENT	. hauteur définitive des feuilles F4, F3, F2	0
	. maximum d'indice foliaire	+12
	. pic de variance sur la surface foliaire totale du maître-brin	- 4
	. début de jaunissement des 2 dernières feuilles	- 4
	. début d'abaissement de la dernière feuille	-10
EPIAISON	. diminution de l'indice foliaire	-12
	. diminution du poids d'eau total du maître-brin	0
	. hauteur définitive de la dernière feuille	+ 5
FLORAISON	. hauteur définitive du maître-brin	+ 6
DEBUT DU PALIER D'EAU	. redressement brusque et temporaire de la feuille F1	-4 ; +4
	. pic de variance sur l'angle d'insertion de la dernière feuille	-3 ; +3
	. chute brutale de la surface et du poids d'eau des 2 dernières feuilles	+ 4
	. jaunissement brutal des 2 dernières feuilles	-4 ; +3
	. ralentissement de la croissance en matière sèche totale	-9 ; +4
	. pic de variance sur le poids sec du maître-brin	-3 ; +7
	. chute brutale du poids d'eau total	+ 6
	. pic de variance sur le poids d'eau du maître-brin	0
	. chute brutale d'indice foliaire	+ 4
. pic de variance sur la surface foliaire totale du maître-brin	-3 ; +3	
FIN DU PALIER D'EAU	. chute brutale de l'angle d'insertion de la dernière feuille	- 3
	. courbure brutale de l'épi	0
	. maximum de matière sèche totale	- 7
	. pic de variance sur la matière sèche du maître-brin	- 3

Tableau III.4 : Intervalle de temps avec lequel l'évolution des paramètres de structure et de biomasse donne la date du stade.

l'intervalle gonflement-épiaison semble varier de 7 à 12 jours.

En admettant donc que l'on puisse détecter le maximum d'indice foliaire et que l'on prenne comme référence "le maximum d'indice foliaire est atteint au gonflement" l'erreur sur la date réelle du gonflement pourra atteindre + 12 jours.

La figure III.22 montre les évolutions de l'angle d'insertion des 2 dernières feuilles ou de la dernière feuille seule ; celle-ci se redresse brusquement et temporairement pendant une période encadrant le début du palier d'eau : 4 jours avant et 4 jours après au maximum (en considérant l'ensemble des résultats).

II.3 - Précision sur la détermination de la date du stade

A travers ces exemples, on définit la capacité d'un paramètre de structure ou de biomasse à être un bon indicateur du stade de développement :

- bonne stabilité de sa relation avec le stade à travers les conditions variétales et agro-climatiques
- bonne précision sur la détermination de la date du stade.

Le tableau III.4 reprend les paramètres de structure et de biomasse offrant une bonne stabilité avec les stades de développement (d'après cette étude et des résultats acquis par ailleurs : Baret et Huet, 1979 ; Vuathier, 1979 ; Gurnade, 1981 ; N'Guessan, 1982).

A chaque stade, pour chaque paramètre est noté l'intervalle de temps avec lequel le point particulier de l'évolution (moyenne ou variance) de ce paramètre fournit la date de réalisation du stade.

On constate que la date d'un stade n'est pas connue avec la même précision selon le paramètre et qu'un même paramètre ne fournit pas la même précision selon le stade ; le pic de variance des mesures fournit en général une meilleure précision que la moyenne.

III - RELATION ENTRE LES PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE ET LE RENDEMENT

III.1 - Approche descriptive

La comparaison de TOP 81 et TOP 82 est intéressante car ces 2 blés, de même variété, aux conditions initiales -date et densité de semis, nombre de plantes au m², nombre de brins par plante- identiques, ont finalement fourni un rendement très différent (tableaux III.1, 2 et 3).

L'explication essentielle de la différence de rendement entre TOP 81 et TOP 82 réside dans les talles de TOP 81 : elles sont en nombre par plante égal à TOP 82, mais leur vigueur est bien supérieure, comme l'ont montré les mesures de leur biomasse sèche (cf. la régression établie entre celle-ci et celle du maître-brin, §I.2.1).

Sur TOP 82, à l'épiaison, beaucoup de ces talles n'ont pas donné d'épi ou des épis maigrichons, mal formés (épiochons) ; le nombre d'épis au m^2 est inférieur à celui sur TOP 81, et surtout la proportion d'épiochons y est bien plus grande.

Les grains des épiochons de TOP 82 -en nombre un peu supérieurs dans l'épi à TOP 81- se remplissent mal, sont victimes plus gravement de l'échaudage de cette année. On notera que l'échaudage semble aussi avoir affecté plus sérieusement les grains des épis des maîtres-brins dominants ayant servi à la détermination des dates du palier d'eau (figure III.1) alors que les grains des brins non tous dominants se sont remplis à une valeur équivalente en 81 et 82 (tableau III.3) ; les poids secs atteints par les épis entiers sont eux-mêmes analogues. On peut supposer qu'il y a eu sur ces grains d'épis non tous dominants un phénomène de compensation : moins nombreux sur l'épi qu'en TOP 81, ils auraient été plus lourds.

Le mauvais rendement de TOP 82 s'explique donc principalement par le manque de vigueur de ses talles, ayant joué sur la composante "nombre d'épis normaux/ m^2 ". L'échaudage, jouant sur la composante "poids du grain", a eu une influence moindre.

Au niveau du couvert, tout le long de la période étudiée, la biomasse fraîche, le poids d'eau et la biomasse sèche au m^2 , sont bien supérieurs pour TOP 81. Par contre, les indices foliaires sont équivalents, ce qui indique qu'il y a en proportion légèrement plus d'eau dans la tige des brins en 81 qu'en 82.

La moindre vigueur de TOP 82 se manifeste aussi sur les poids frais, secs et en eau du maître-brin. Au niveau de ce brin (représentant 30 % des brins du couvert), sur lequel ont été effectuées les mesures détaillées de structure et de biomasse, les principales différences entre TOP 81 et 82 sont les suivantes, en fonction des stades :

- gonflement

- la feuille F1 est encore verticale sur TOP 82 ; elle a commencé à s'abaisser sur TOP 81

- . la feuille F4 est jaune et déssechée sur TOP 82, encore active sur TOP 81
 - . la teneur en eau des autres feuilles est légèrement inférieure sur TOP 82 et leur jaunissement plus marqué
 - . la proportion de la tige dans le poids sec du brin est plus importante pour TOP 82, celle des feuilles plus importante en 81
 - . la contribution de la F1 à la surface foliaire, au poids d'eau et sec du brin est bien inférieure à celle de F2 et F3, sur TOP 82 ; cette différence subsiste tout au long du cycle et n'est donc plus mentionnée ci-dessous.
- épiaison
- . grande variabilité des mesures sur l'angle d'insertion de F1 sur TOP 81, non observée en 82
 - . la chute en surface et en poids d'eau des feuilles est plus brutale pour TOP 81 (pic de variance sur le poids d'eau de F1)
 - . pic de variance sur le poids sec du maître-brin en 81
- floraison
- . la taille définitive du brin est atteinte sur TOP 82, pas encore sur TOP 81
 - . l'épi est bien vertical pour TOP 81, déjà un peu courbé pour TOP 82
- début du palier d'eau
- . le jaunissement des 2 dernières feuilles est plus brutal et plus marqué sur TOP 81
 - . le poids d'eau et sec de la dernière feuille chute plus brutalement sur TOP 81 (pics de variance)
 - . la matière sèche de la tige baisse brutalement sur TOP 81
- fin du palier d'eau
- . l'épi se courbe sur TOP 81
 - . l'épi contribue pour la plus grande part au poids sec du brin sur TOP 81.

Les différences d'intensité de chute du poids d'eau et du poids sec de la dernière feuille entre TOP 81 et TOP 82 sont à mettre en relation avec les vitesses de croissance de l'épi (figures 2.4 et 2.5 pages 2.12 et 2.13).

Sur TOP 81 en effet, la chute brutale du poids sec et en eau de la F1, observée 3 jours après le début du palier d'eau (et accompagnée d'un pic de variance) précède de quelques jours (4) une accélération nette de la croissance en matière sèche de l'épi, signalée par un pic de variance.

Par contre, sur TOP 82, la chute moins brutale du poids d'eau et sec de la dernière feuille (confirmée par des pics plus légers) ne provoque pas d'accélération de la croissance en matière sèche de l'épi.

Les épis atteignent finalement un poids sec analogue les 2 années, ce qui confirme le phénomène de compensation signalé plus haut : TOP 82, victime d'un léger échaudage, recevant de la dernière feuille (et probablement de la tige) un moindre flux d'assimilats parvient au même niveau de matière sèche dans l'épi que TOP 81, peut-être par une participation finale accrue des pièces florales de l'épi (Carr et Wardlaw, 1965 ; Baldy, 1973).

Ces observations confirment celles effectuées au niveau des grains par Gurnade (1981) : en suivant la sénescence par l'intermédiaire des teneurs en eau des 2 dernières feuilles, du col de l'épi, de l'avant-dernier entrenoeud et les rapports de rétrécissement du diamètre des 2 derniers noeuds, il montre, grâce à l'analyse des pics de variance, que la vitesse d'accumulation de la matière sèche dans les grains est liée à la progression de la sénescence.

III.2 - Approche quantitative

Le schéma d'élaboration du rendement du blé (chapitre I, page 1.10) montre que parmi les 3 composantes du rendement : nombre d'épis au m², nombre de grains par épi, poids d'un grain, les 2 premières se mettent en place avant la floraison, c'est-à-dire pendant le développement et la croissance de la plante ; la troisième se détermine après la floraison, c'est-à-dire pendant la sénescence de la plante.

Cette étude se propose d'examiner la force de la liaison existant entre les paramètres de biomasse et de structure et le remplissage du grain pendant la période de sénescence.

Pour des raisons pratiques, seuls les poids frais et secs de l'épi entier ont été mesurés lors des expérimentations ; on admettra qu'il y a une forte relation entre le poids sec de l'épi entier et le poids sec total des grains de l'épi au cours de cette période.

Dates	Paramètres																
	PSF3	PSF2	PSF1	PSG1	PST	PSB	HI3	HI2	HI1	HSE	AI3	AI2	AI1	SF3	SF2	SF1	STB
27-05 F	0,72	0,75	0,78		0,87	0,93	-0,17	-0,05	-0,05	0,20	0,20	0,51	-0,70	0,54	0,63	0,75	0,84
2-06	0,47	-0,08	-0,27		0,88	0,91	-0,34	-0,28	-0,01	0,02	-0,28	-0,08	0,05	0,11	-0,33	-0,41	-0,36
5-06	0,74	0,68	0,23		0,78	0,94	0,26	0,19	0,29	0,25	0,14	-0,16	0,06	0,21	0,25	-0,01	0,64
9-06 DPE	0,78	0,89	0,76		0,71	0,95	0,27	0,32	0,59	0,39	-0,13	-0,32	-0,45	0,34	0,60	0,52	0,89
12-06		0,71	0,56	0,93	0,70	0,96		0,17	0,46	0,14	-0,21	0,05	-0,53	0,45	0,62	0,49	0,65
16-06		0,77	0,67	0,96	0,63	0,97		-0,29	-0,15	0		-0,58	-0,22		0,60	0,24	0,82
19-06		0,27	0,53	0,92	0,64	0,96		-0,19	-0,13	-0,24		-0,22	0,13		0,04	0,24	0,46
23-06		0,60	0,51	0,63	0,59	0,92		-0,19	-0,11	-0,22		-0,07	-0,38		0,18	0,35	0,56
26-06 FPE		0,69	0,60	0,83	0,71	0,97		0	0,20	0,25		-0,24	0,06		0,15	0,26	0,69
30-06		0,62	0,15	0,71	0,61	0,97		0,06	0,16	0,09		0,14	-0,58		0,09	0,07	0,38
3-07			0,85	0,95	0,67	0,98		0,12	0,28				-0,01			0,29	0,55
7-07			0,60	0,89	0,67	0,96		-0,17	-0,39				-0,18			0,20	0,60

TOP 81

Dates	Paramètres														
	PSF3	PSF2	PSF1	PSG1	PST	PSB	HI1	HSE	AI3	AI2	AI1	SF3	SF2	SF1	STB
24-05 F	0,45	0,44	0,07	0,48	0,73	0,84	0,39	0,39	-0,28	-0,15	-0,02	0,31	0,22	0,20	0,49
27-05	-0,05	0,42	0,71	0,71	0,36	0,66	-0,28	0,28	-0,07	-0,47	0,15	-0,07	0,52	0,72	0,35
1-06	0,65	0,59	0,06	0,45	0,90	0,91	0,77	0,74	-0,58	-0,49	-0,62	0,49	0,33	0	0,34
4-06 DPE	0,72	0,77	0,61	0,56	0,90	0,95	0,38	0,58	0	-0,17	0,02	0,61	0,77	0,58	0,81
7-06	0,51	-0,04	-0,50	-0,37	0,67	0,85	0,50	0,63	-0,17	-0,41	-0,07	-0,23	0,16	-0,39	-0,14
10-06		0,18	0	0,24	0,31	0,77	0,05	0,17		-0,15	0		0,43	0,30	0,40
14-06		0,44	0,30	-0,12	0,75	0,90	0,63	0,74		-0,12	-0,06		0,16	0,07	0,14
17-06		0,08	0,08	-0,12	0,31	0,75	0,38	0,64		-0,37	-0,37		0	0	-0,36
21-06 FPE		0,05	0,05	0,28	0,47	0,95	-0,01	0,13		-0,46	-0,46		0,37	0,37	-0,28
24-06		0	0	-0,31	0,21	0,92	0,45	0,72		-0,36	-0,36		-0,14	-0,14	-0,14
28-06		0,29	0,29	-0,12	0,38	0,93	0,25	0,30		0,17	0,17		0,26	0,26	0,26

TOP 82

PSF1 = Poids sec de la feuille Fi
 PSG1 = Poids sec de la gaine de la feuille F1
 PST = Poids sec de la tige
 PSB = Poids sec du maître-brin entier
 HI1 = Hauteur d'insertion de la feuille Fi
 HSE = Hauteur du maître-brin au sommet de l'épi
 AI1 = Angle d'insertion de la feuille Fi
 SFI = Surface de la feuille Fi
 STB = Surface foliaire totale du maître-brin

Figure III.23 : Coefficients de corrélation linéaire entre le poids sec de l'épi et différents paramètres de structure et de biomasse

III.2.1 - Analyse des résultats

La méthode d'étude consiste en l'examen des corrélations linéaires entre les paramètres de structure et de biomasse mesurés sur le maître-brin et le poids sec de l'épi de ce brin, date par date, à partir de la floraison.

L'analyse a porté sur TOP 81 et 82 ; le coefficient de corrélation r est établi sur 15 individus (maîtres-brins) : à un risque pris égal à 5 %, la relation linéaire est significative si $|r| \geq 0,50$.

Les résultats sont présentés dans les tableaux de la figure III.23.

La première constatation est celle-ci : moins de la moitié (environ 45 % pour TOP 81 et 35 % pour TOP 82) des corrélations effectuées sont significatives. La relation traduite par un coefficient de corrélation linéaire -entre les paramètres de structure ou de biomasse et la dernière composante du rendement- représentée par le poids sec de l'épi- est moins nette que l'on aurait pu l'espérer...

La deuxième constatation est la suivante : globalement, pour la plupart des paramètres, les corrélations sont assez instables d'une date à l'autre. La nature destructive de la méthode de prélèvement amplifie très probablement le fait que les liens paramètres de structure ou de biomasse/poids sec de l'épi soient peu serrés : la liaison n'étant pas étroite, elle est instable.

L'analyse de tels tableaux de corrélation s'avère donc délicate ; les éléments suivants se dégagent :

- la meilleure corrélation observée, tant du point de vue de son intensité que de sa stabilité dans le temps, est celle obtenue avec le poids sec du brin entier (total : tige + feuilles + épi), et ce pour les 2 années ; si l'on ôte l'épi, la corrélation reste bonne, sauf pour TOP 82 à la fin de la période de maturation. Cette corrélation est positive : à des brins lourds (partie végétative) correspondent des épis lourds (partie reproductrice). Elle est meilleure avec la tige qu'avec le total des feuilles.

- sur TOP 81, année aux conditions les plus favorables, on observe relativement plus de corrélations significatives que sur TOP 82 ; ces corrélations supplémentaires portent surtout sur les poids secs de chacune des feuilles et de la gaine de la dernière feuille. Par contre, en 82, des corrélations avec les hauteurs (hauteurs des feuilles et hauteur totale) sont trouvées, inexistantes en 81.

- pour les 2 années, on note que les corrélations poids sec épi/ paramètres sont plus abondantes avec les paramètres de biomasse qu'avec les paramètres de structure.

III.2.2 - Comparaison avec d'autres résultats

Les études de la relation entre les caractères morphologiques (ou paramètres de structure et de biomasse) et le rendement sont du domaine de l'amélioration des plantes : on y recherche des caractères ayant à la fois une forte relation avec le rendement et une grande héritabilité ; il s'agit exclusivement d'une étude de comparaison entre les lignées issues d'un croisement et entre ces lignées et les parents. Il n'y a pas d'analyse des relations entre morphologie et rendement à l'intérieur d'une même variété ni d'analyse de l'influence sur le rendement final des modifications de structure observées.

Les seules études comparables à celle-ci sont celles de Ledent, de l'Université de Louvain (1977, 1978) et celles de la station INRA d'Avignon (Delecolle et Gurnade, 1980) ; les différents caractères morphologiques sont mesurés sur des brins choisis au hasard (donc non exclusivement des maîtres-brins) à la floraison et à la récolte, et reliés aux composantes du rendement-épi = nombre d'épillets x nombre de grains par épillet x poids d'un grain.

Les méthodes d'analyse employées (corrélation simple, régression multiple, analyse factorielle) conduisent aux résultats suivants, sur de nombreuses variétés et années d'expérimentation :

- le rendement-épi dépend surtout du nombre de grains par épillets, beaucoup moins du poids moyen du grain
- les caractères morphologiques sont liés au nombre de grains et non pas au poids du grain
- l'influence de la morphologie du brin sur le nombre de grains se manifeste surtout par sa vigueur (poids sec total), par le développement des gaines des 2 dernières feuilles et par le diamètre du dernier noeud.

Les corrélations établies dans cette étude entre les caractères morphologiques et la mesure globale du poids sec de l'épi sont significatives pour le poids sec du maître-brin entier (les 2 années) et pour le poids sec de la dernière gaine (sur TOP 81). Les résultats des auteurs cités plus haut apprennent que ces corrélations sont dues au nombre de grains par épi et non au remplissage du grain : à un brin plus lourd correspond un nombre de grains plus élevé mais non des grains plus lourds.

Les relations observées sont le résultat de liens établis pendant une longue période antérieure à la floraison : le nombre d'épillets est pratiquement déterminé au stade 3 (fin tallage) et le nombre de grains par épillets à la fécondation, ce qui explique la stabilité des corrélations significatives trouvées pendant la période de remplissage des grains ; les fluctuations observées sont liées aux variations du nombre de grains et des valeurs des paramètres de structure ou de biomasse.

L'étude réalisée montre qu'il n'y a pas de liaison linéaire entre les paramètres de structure et de biomasse et le poids du grain, dernière composante du rendement.

L'unique corrélation significative obtenue les 2 années entre le poids sec de l'épi et le poids sec du brin entier permet de déduire l'un de l'autre à chaque date par les termes de la régression. (On notera que les moyennes obtenues sur le poids sec total du maître-brin à partir des maîtres-brins prélevés sont représentatives quantitativement - chapitre II, figure II.7). Une relation -qui n'a pas été déterminée dans cette étude-, probablement non linéaire, devrait être établie entre le poids sec final de l'épi et le poids sec total du brin à chaque date, ce dans l'optique de la prédiction du rendement-épi.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES MESURES RADAR ASSOCIEES

ANALYSE DES MESURES RADAR ASSOCIEES

PLAN

	<i>Page</i>
I - <u>GENERALITES SUR LA RETRODIFFUSION RADAR DES SURFACES AGRICOLES</u>	4.1
I.1 - <u>Réponse du sol</u>	4.3
I.1.1 - <u>Influence de la rugosité</u>	4.3
I.1.2 - <u>Influence de l'humidité</u>	4.5
I.2 - <u>Réponse du couvert végétal</u>	4.5
II - <u>EVOLUTION TEMPORELLE DE σ° à 9 GHz, VV, 40°</u>	4.6
II.1 - <u>Analyse des résultats sur CASTAN 80</u>	4.6
II.2 - <u>Comparaison avec les résultats sur TOP 82 et CASTAN 82</u>	4.9
II.1.1 - <u>TOP 82</u>	4.9
II.1.2 - <u>CASTAN 82</u>	4.9
III - <u>CONCLUSIONS</u>	4.11

Les principaux changements affectant la structure et la biomasse d'un couvert de blé décrits dans le chapitre précédent, sont comparés aux résultats obtenus par le radar RAMSES.

A cause d'impératifs techniques et météorologiques, le nombre de dates où mesures physiques et mesures biologiques ont pu être couplées est très inégal selon les années : en 80, sur le blé CASTAN, 14 dates de mesures sont bien réparties entre l'apparition de la dernière feuille et la récolte ; les 3 points obtenus sur une semaine en 81 sont inexploitable ; en 82, on dispose de 5 points bien répartis, mais inexistant entre le gonflement et la floraison ; 6 dates de mesures ont été obtenues sur un blé de printemps CASTAN, dont le suivi biologique a été réalisé de manière plus allégée (N'Guessan, 1982).

I - GENERALITES SUR LA RETRODIFFUSION RADAR DES SURFACES AGRICOLES

Le principe général des systèmes radar consiste à émettre une onde électromagnétique vers la surface cible et à enregistrer la puissance de l'onde rétrodiffusée. De la mesure de puissance est déduit le coefficient de rétrodiffusion radar σ^0 , caractéristique de la cible.

Quand l'onde électromagnétique parvient à la surface de séparation de deux milieux homogènes infinis, une partie de l'onde incidente est réfléchie ou diffusée, une autre partie est transmise dans le milieu inférieur. Le coefficient de rétrodiffusion mesuré dépend alors uniquement de la réflexion de l'onde à l'interface des deux milieux (réflexion de surface) ; cette réflexion est conditionnée par la forme de la surface de séparation d'une part, et par les permittivités diélectriques des deux milieux d'autre part.

Si le milieu inférieur est inhomogène, il y a diffusion de volume et une partie de l'onde transmise est renvoyée dans la direction de l'interface et contribue, en plus de la réflexion de surface, au coefficient de rétrodiffusion. Cette diffusion de volume est conditionnée par les propriétés diélectriques du milieu.

Le volume du milieu contribuant à la rétrodiffusion est estimé par la profondeur de pénétration, définie comme la profondeur à laquelle l'amplitude du champ transmis est réduite dans le rapport $\frac{1}{e}$.

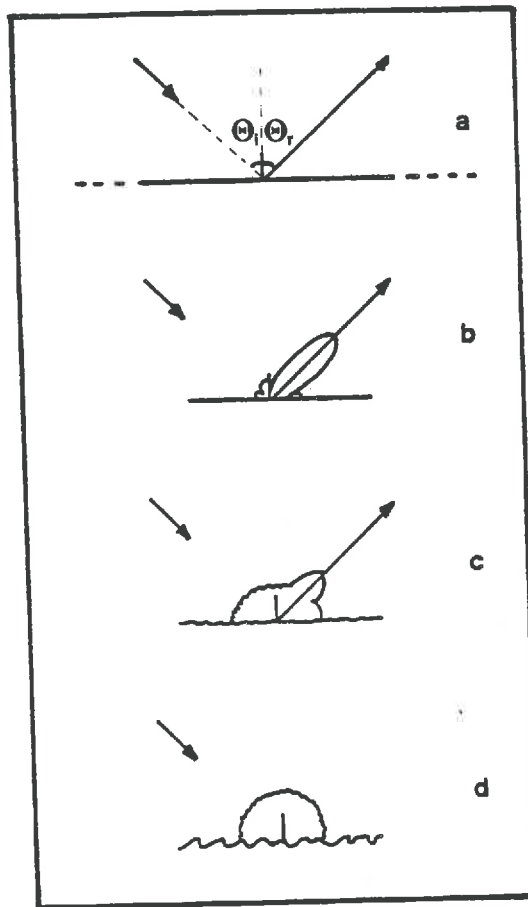


Figure IV.1 : Diagramme de rayonnement en fonction de la rugosité

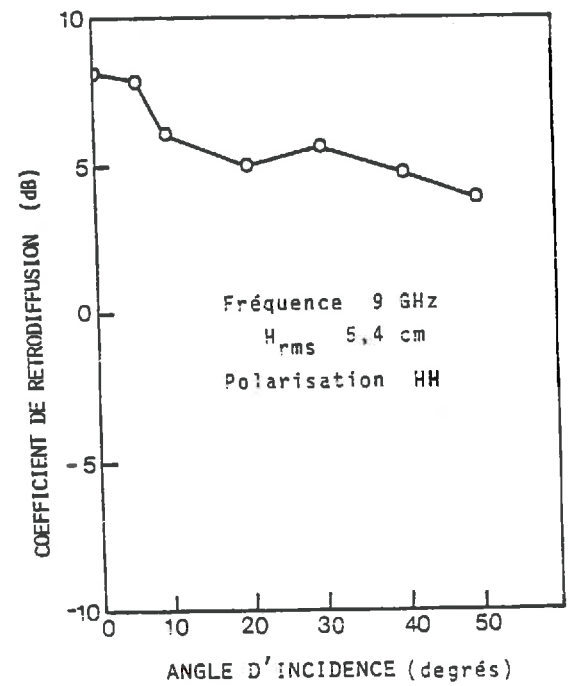
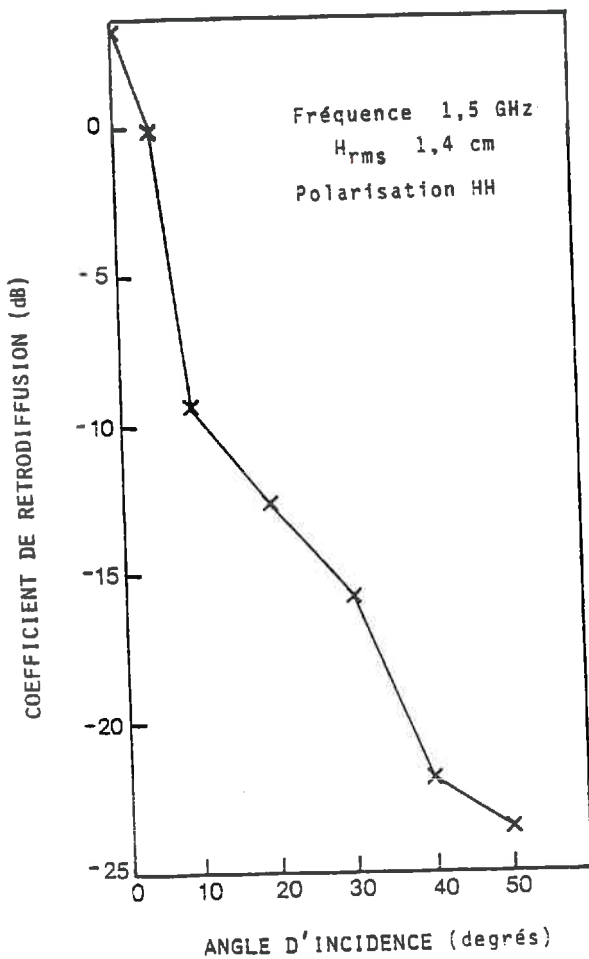


Figure IV.2 : Variation angulaire de σ^0
 - à 1,5 GHz, surface lisse (à droite)
 - à 9 GHz, surface rugueuse. (à gauche)

(d'après Pausader, 1982)

La réponse radar d'un couvert végétal est complexe : elle résulte des contributions du sol, du sol atténué par la végétation, de la végétation elle-même et des interactions sol-végétation.

I.1 - Réponse du sol

Le sol est un milieu inhomogène absorbant. La profondeur de pénétration augmente avec la longueur d'onde et diminue avec l'humidité du sol. Le calcul de la profondeur de pénétration, à partir des mesures d'humidité du sol, montre que pour des fréquences allant de 3 GHz à 9 GHz et pour la gamme d'humidité la plus fréquemment rencontrée sur les sols agricoles (0-0,30 g/g), la pénétration de l'onde dans le sol n'excède pas la couche de surface 0-3 cm (1 cm à 9 GHz).

Dans ce cas, la réflexion de volume est négligeable ; seule, la réflexion de surface, dépendante de la rugosité du sol et de l'humidité des 3 premiers centimètres, contribue au coefficient de rétrodiffusion radar.

I.1.1 - Influence de la rugosité

Les diagrammes de rayonnement ci-contre montrent l'influence de la rugosité sur la réflexion (figure IV.1).

Sur une surface plane infinie (a), la réflexion de l'onde incidente se fait selon la direction spéculaire ($\theta_r = \theta_i$).

Sur une surface finie et rugueuse comme l'est la surface du sol éclairée par le lobe de l'antenne radar, une structure de lobe de réflexion apparaît. Quand la surface est très lisse, un maximum important demeure dans la direction spéculaire (b). Plus la surface devient rugueuse, plus ce maximum tend à disparaître : la réflexion est diffuse (c et d).

La rugosité du sol, estimée par la hauteur quadratique moyenne hrms des aspérités, est une notion qui dépend de la longueur d'onde λ et de l'angle d'incidence θ ; un critère utilisé (Rayleigh) considère la surface comme lisse si $hrms \leq \lambda/8\cos \theta$.

L'influence de la rugosité se traduit par la modification de la variation angulaire du coefficient de rétrodiffusion σ° ; la figure IV.2 montre les 2 comportements extrêmes : comportement spéculaire (forte variation de σ° avec l'incidence) pour une surface hersée observée à 1,5 GHz, comportement diffus (faible variation de σ° avec l'incidence) pour une surface labourée à 9 GHz. L'exemple est donné pour des humidités de surface équivalentes ; pour une surface de rugosité donnée observée à une fréquence donnée, une augmentation

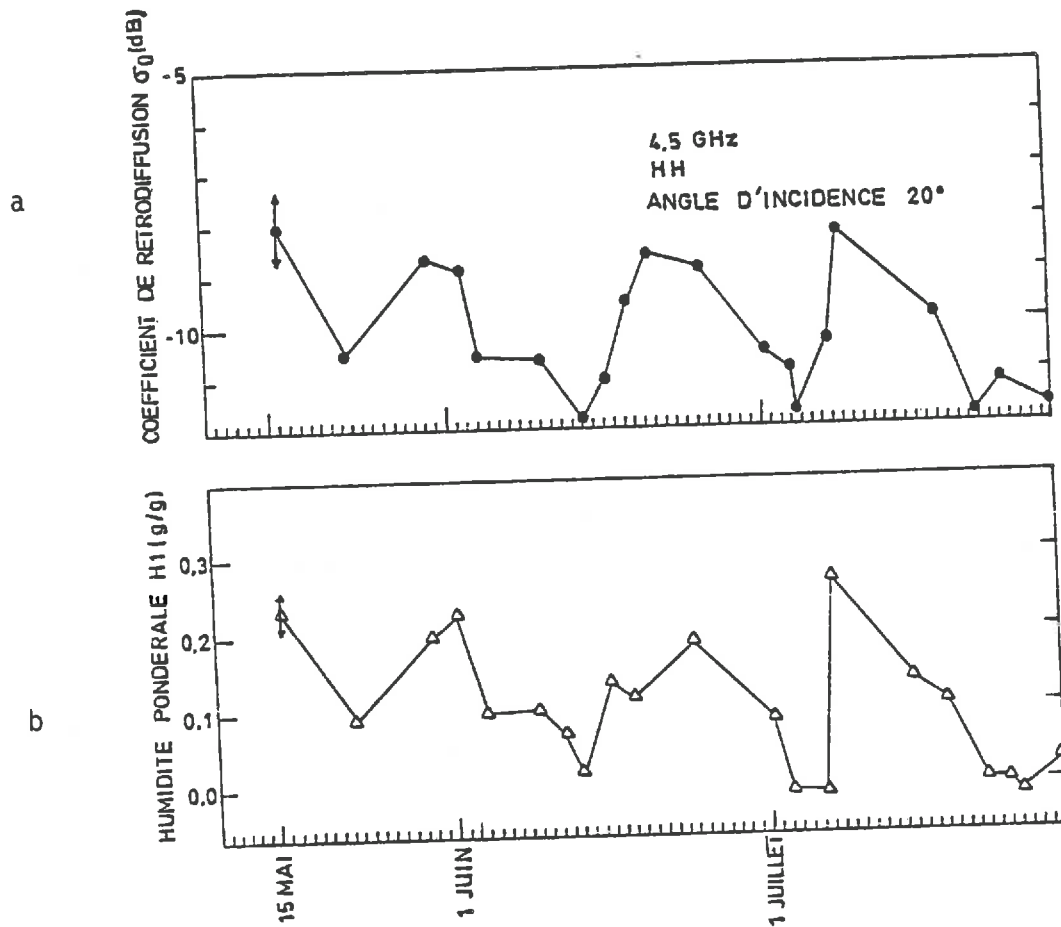


Figure IV.3 : a : Evolution temporelle de σ^0 à 4,5 GHz
 b : Evolution temporelle de l'humidité pondérale
 de surface (0-1 cm) du sol nu

- Campagne de 1980 -

(d'après Pausader, 1982)

de l'humidité se traduit par une translation des courbes vers le haut (rétro-diffusion plus forte).

I.1.2 - Influence de l'humidité

Pour la gamme d'humidité pondérale, habituellement rencontrée sur les sols agricoles (0-0,30 g/g), la relation entre σ° et l'humidité de surface peut être approximée par une droite.

Le maximum de corrélation linéaire est obtenu pour la configuration 4,5 GHz, HH, 10° à 20° (Ulaby, 1978 ; Pausader, 1982) - figure IV.3 -. A cette configuration, la sensibilité de la réponse radar à l'humidité du sol nu est maximale, et elle est peu amoindrie par la présence de végétation.

Le minimum de corrélation avec l'humidité du sol sous le couvert est obtenu pour la configuration 9 GHz, VV, 40° qui sera donc utilisée pour étudier la végétation seule (Lopes, Huet, Le Toan, 1981).

I.2 - Réponse du couvert végétal

La contribution au coefficient de rétrodiffusion radar de la couche de végétation provient de la diffusion de volume et de la réflexion directe sur les éléments du couvert ; cette diffusion et cette réflexion sont liées à la taille, à l'orientation et à la teneur en eau des éléments du couvert.

Les interactions sol-végétation et les réflexions multiples à l'intérieur de la couche végétale sont, en première approximation, négligées.

Afin d'étudier l'influence sur σ° des paramètres relevés sur le couvert, il est nécessaire de déterminer la configuration de mesure pour laquelle la contribution du sol est minimisée ; en raison de sa plus faible sensibilité aux variations d'humidité du sol sous-jacent, la configuration 9 GHz, VV, 40° a été choisie (cf ci-dessus). Cette configuration optimale pour RAMSES est à rapprocher de celle préconisée par Ulaby (1978) : fréquence ≥ 8 GHz, incidence $\geq 40^\circ$, polarisation VV. A la fréquence de 9 GHz, à 40° , le sol hersé sous le couvert présente un comportement diffus ($hrms = 1,5 \text{ cm} > \frac{3,3}{8 \times 0,76} = 0,54 \text{ cm}$) ; on peut de plus supposer la rugosité quasiment constante au cours du cycle de végétation.

II - EVOLUTION TEMPORELLE DE σ° A 9 GHz, VV, 40°

II.1 - Analyse des résultats sur CASTAN 80

Les paramètres du couvert dont l'évolution est la plus concordante avec celle de σ° sont :

- l'indice foliaire I.F, somme des surfaces foliaires sur 1 m^2
- un paramètre calculé : la masse volumique en eau du couvert M_V , rapport du poids d'eau total dans les plantes au m^2 sur la hauteur du couvert ; cette hauteur est prise au début des mesures à la hauteur d'insertion de la dernière feuille F1, puis au sommet de l'épi dès le début de l'épiaison.

L'évolution de σ° est présentée avec celles de I.F et de M_V (figure IV.4)

• du début des mesures radar (16 Mai) au gonflement (2 juin), l'évolution de σ° suit celle de l'indice foliaire. L'augmentation de la rétrodiffusion radar pourrait être due à une réflexion directe croissante sur les feuilles : à cette époque, la surface des feuilles augmente, elles sont nombreuses, riches en eau, à port demi-étalé (caractéristique variétale), et constituent donc de bons réflecteurs.

La diffusion de volume, liée à la masse volumique en eau du couvert, est, elle aussi croissante à partir du 22 Mai. Les deux effets s'ajoutent, pour culminer au moment du gonflement.

Pendant cette première période d'observation, la contribution du sol est négligeable.

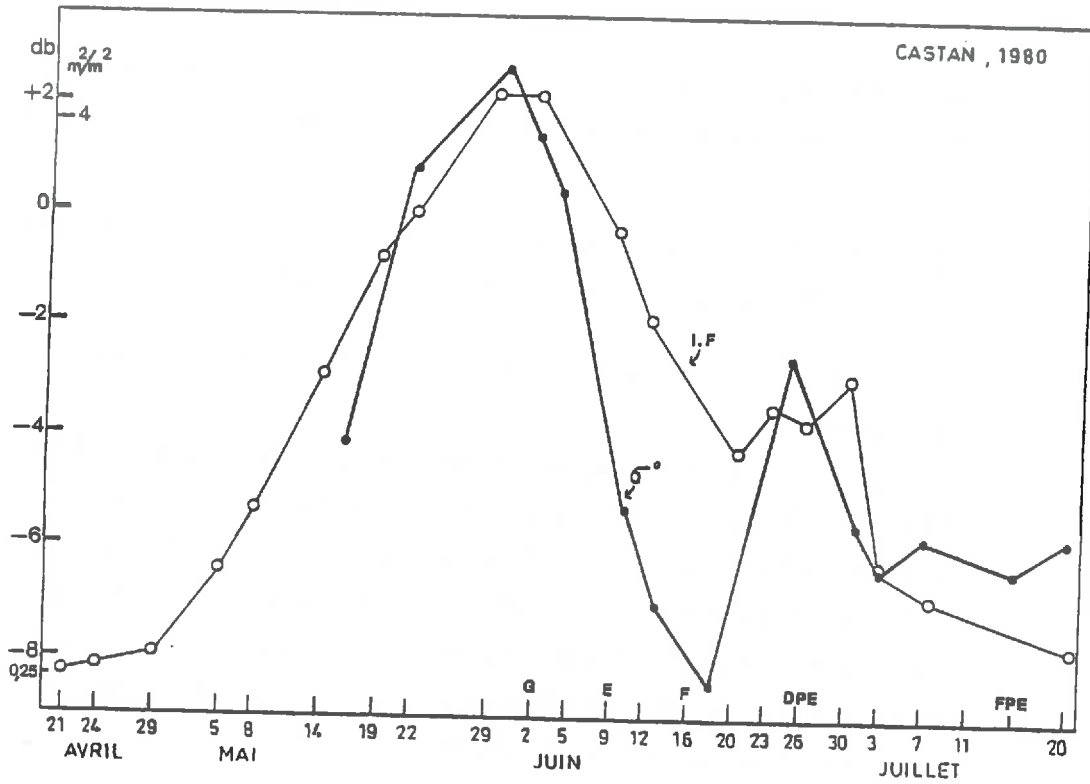
• du gonflement à la floraison, il y a décroissance du coefficient de rétrodiffusion.

L'indice foliaire décroît, surtout par perte des feuilles de la base, et l'angle d'insertion des feuilles diminue (ou plus exactement leur courbure) : la réflexion directe diminue.

La masse volumique en eau du couvert diminue - par chute du poids d'eau total et croissance en hauteur - : la diffusion de volume décroît.

On notera les chutes quasiment parallèles de I.F, M_V , σ° jusqu'à l'épiaison ; à cette date, la pente de σ° devient plus forte que celles de I.F et M_V : une atténuation due à la couche d'épis

a



b

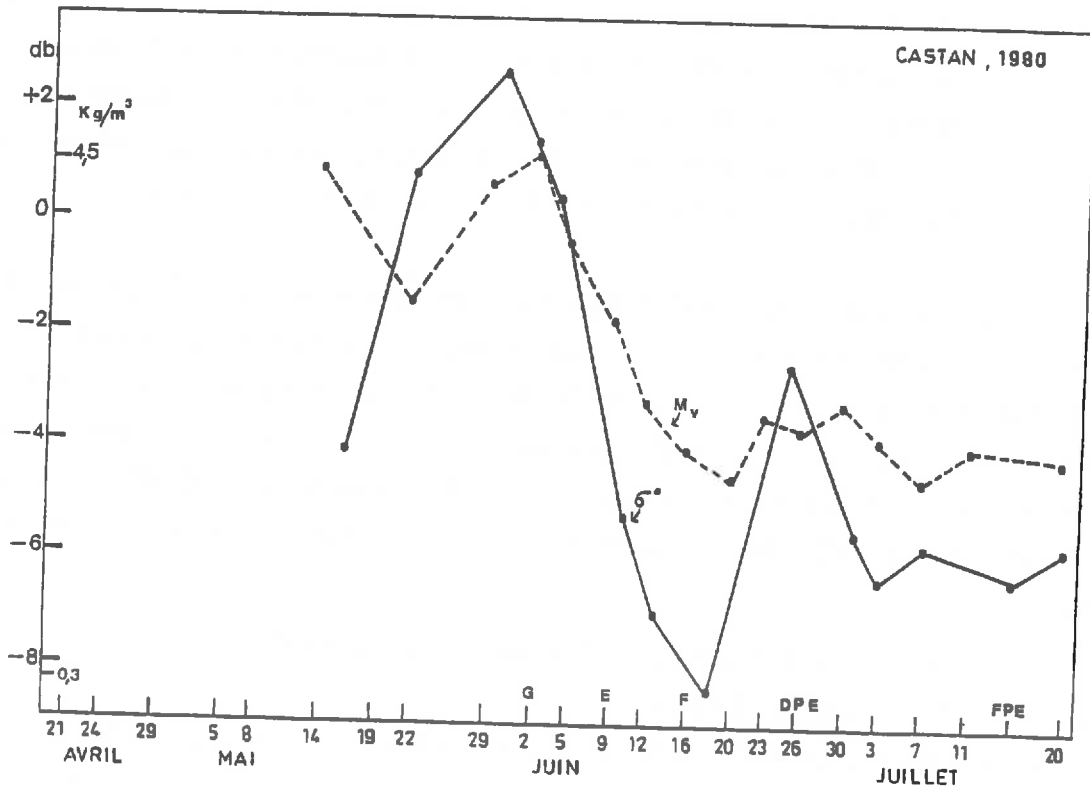


Figure IV.4 : Evolution temporelle de σ^0 (9 GHz, VV, 40°), de l'indice foliaire (a) et de la masse volumique en eau du couvert (b) sur CASTAN 80

apparue s'ajouterait. L'épi en s'élevant au-dessus des dernières feuilles pourrait masquer la réflexion directe provenant de celles-ci.

La rétrodiffusion est minimale vers la floraison, coïncidant avec la hauteur maximale et définitive du couvert.

• après la floraison, M_v est minimale, ainsi donc que la diffusion de volume.

L'indice foliaire ne cesse de décroître, l'angle d'insertion des feuilles F1 et F3 puis celui de F2 diminue de plus en plus, la plante sèche : la contribution du sol à la rétrodiffusion se manifeste et se traduit par une remontée du niveau moyen de σ° ; mais ce niveau est encore inférieur à la gamme -1 ; 5 dB d'un sol nu observé à la même configuration : l'atténuation par le couvert de la réponse du sol reste forte.

La remontée brusque du 25 Juin s'explique par les pluies abondantes les jours précédents : les 2 dernières feuilles - les seules restantes - se déroulent d'où une augmentation de la réflexion directe ; la masse volumique en eau s'accroît d'où augmentation de la diffusion de volume ; enfin le sol, devenu plus présent, est humide, d'où augmentation de la rétrodiffusion du sol.

En résumé, pour CASTAN 80, dans une première période allant de l'apparition de la dernière feuille au gonflement, l'augmentation du coefficient de rétrodiffusion σ° est liée à celle de l'indice foliaire (coefficient de corrélation linéaire $r = +0,95$). Pendant l'ensemble de la période de mesure, σ° est reliée à la masse volumique en eau du couvert ($r = +0,90$). Ces observations sont en accord avec certains résultats trouvés par Ulaby (1978) et Moore (1981).

Pendant la dernière période du cycle de végétation, σ° est plus sensible à la contribution du sol.

3 stades de développement coïncident avec les points particuliers de l'évolution de σ° :

- gonflement : maximum de σ°
- épiaison : accélération de la chute de σ°
- floraison : minimum de σ°

II.2 - Comparaison avec les résultats sur TOP 82 et CASTAN 82

II.2.1 - TOP 82

En 82, comme en 80, on observe une bonne corrélation positive entre σ° et l'indice foliaire et entre σ° et la masse volumique en eau du couvert (figure IV.5).

A la période gonflement-épiaison, l'indice foliaire et la masse volumique en eau sont à leur maximum et ces maxima sont très supérieurs à ceux de CASTAN en 80. Le niveau atteint par σ° à ces dates est lui, inférieur à celui de σ° en 80. Cette rétrodiffusion moindre en 82 pourrait être due à l'angle d'insertion des feuilles : plus dressées en 82, elles fourniraient une rétrodiffusion directe moindre que les feuilles demi-étalées de CASTAN 80. La hauteur plus grande (20 cm de plus) du couvert en 82 à la même période pourrait aussi intervenir. La couche d'épis contribuant à l'atténuation est également plus dense en 82 qu'en 80 (360 épis/m² en 80, 580 en 82) ; l'apparition de cette couche ne produit pas comme en 80 une chute brutale de σ° : la rétrodiffusion directe par les feuilles, déjà faible, ne peut être masquée par l'épi.

Tout se passe comme si, sur TOP 82, il y avait essentiellement diffusion de volume par le couvert ; σ° suit plus l'évolution de la masse volumique en eau que de l'indice foliaire.

II.2.2 - CASTAN 82

En 82, le blé CASTAN a eu de très mauvaises conditions de croissance, qui se traduisent par un indice foliaire et une masse volumique en eau très faibles, inférieures même à celles de CASTAN 80 (figure IV.6).

La faible dynamique et le niveau moyen très élevé de σ° expriment ce fait : la contribution du sol est prépondérante, tout au long de la période de mesures. De plus, la visée radar a été cette année effectuée dans la direction parallèle aux rangs de blé, ce qui accroît encore la part du sol.

L'effet des paramètres du couvert est inverse de celui observé les autres années : σ° varie en sens contraire de l'indice foliaire et de M_v .

Tout se passe comme si σ° provenait principalement de la contribution du sol atténué par le couvert. Les variations d'humidité du sol très sec cette année sont faibles ; les variations de σ° sont donc dues surtout à des variations de l'atténuation, qui est une fonction croissante de la masse volumique en eau M_v .

Cette remarque, corrobore certains résultats obtenus par Ulaby (1976) : il observe une remontée du signal au fur et à mesure de la décroissance de la teneur en eau des plantes.

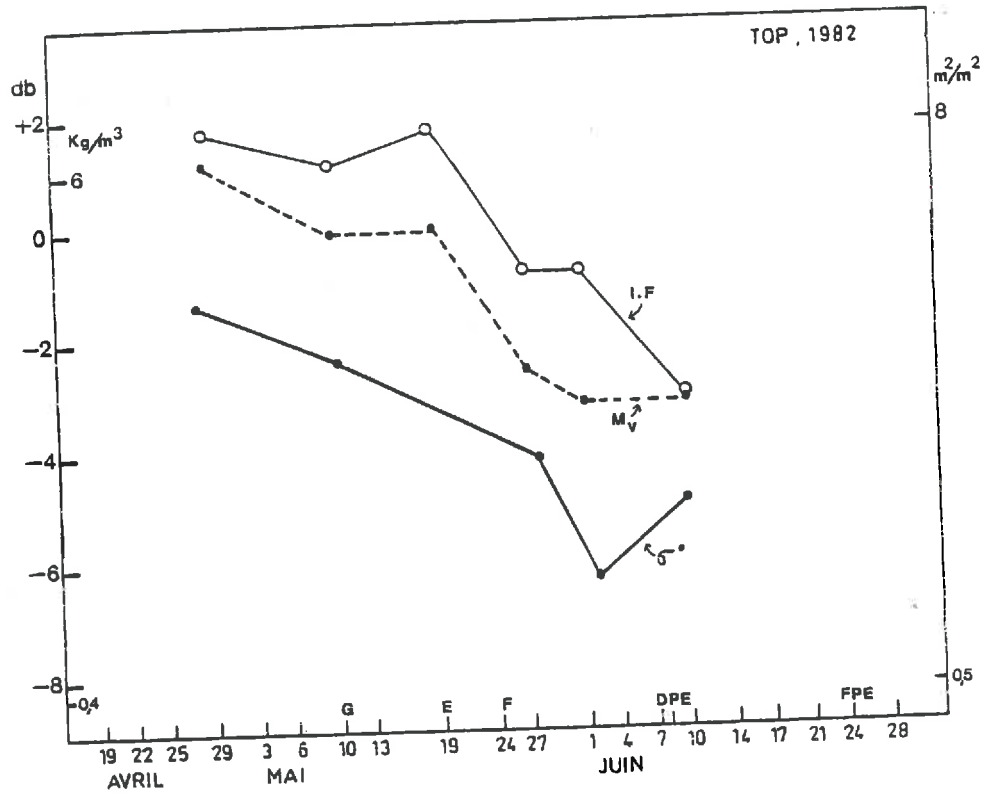


Figure IV.5 : Evolution temporelle de 6°, de l'indice foliaire et de la masse volumique en eau, sur TOP 82

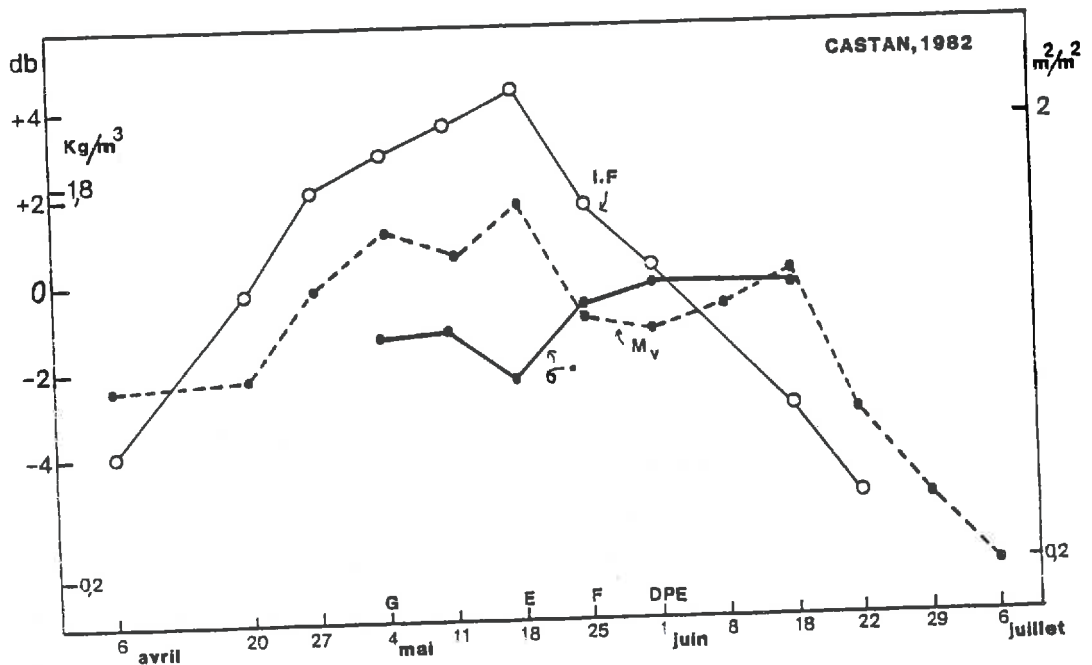


Figure IV.6 : Evolution temporelle de 6°, de l'indice foliaire et de la masse volumique en eau, sur CASTAN 82 (d'après N'Guessan, 1982)

La concordance entre σ° et les stades de développement notés en 82 n'est pas la même qu'en 80 :

- d'abord, parce que l'évolution des paramètres d'indice foliaire et de masse volumique en eau ne concorde pas de la même façon avec les stades qu'en 80
- ensuite, parce que l'évolution de l'indice foliaire, de la masse volumique en eau est corrélée négativement avec σ° .

Ainsi, sur CASTAN 82, l'indice foliaire et la masse volumique en eau atteignant leur maximum à l'épiaison, coïncidant avec le minimum de σ° ; la chute maximale de l'indice foliaire et de M_V , à la floraison, coïncide avec une accélération de l'augmentation de σ° ; un minimum (relatif) de M_V au début du palier d'eau coïncide avec le maximum de σ° .

III - CONCLUSIONS

Ces premiers résultats dégagés sont à la base des études menées actuellement au C.E.S.R. pour expliquer par des modèles théoriques les relations mises en évidence. L'un de ces modèles (Attema et Ulaby, 1978) assimile la végétation à un nuage composé de gouttelettes d'eau ; en introduisant, grâce à des mesures en laboratoire, des valeurs d'atténuation des plantes, ce modèle a permis d'établir la part relative du signal réfléchi par le sol et du signal provenant de la diffusion de volume dans le couvert (Lopes, 1983).

D'ores et déjà, cette analyse succincte et qualitative des relations entre les paramètres d'un couvert de blé et le coefficient de rétrodiffusion a permis de déterminer les deux paramètres principaux intervenant dans la réponse radar : l'indice foliaire et la masse volumique en eau du couvert.

Ces deux paramètres sont liés entre eux pendant la plus grande partie du cycle de végétation, comme le montre la figure IV.7.

Dans les conditions expérimentales décrites et pour la période de végétation antérieure à la maturation, le coefficient de rétrodiffusion est fonction de l'indice foliaire et de la masse volumique en eau. Mais chacune des expérimentations a fourni un comportement différent de σ° , découvrant ainsi la complexité de l'analyse :

- dans le cas d'un couvert à faibles indices foliaires et masse volumique en eau, σ° serait corrélé positivement à ces 2 paramètres, sur l'ensemble de la période considérée.

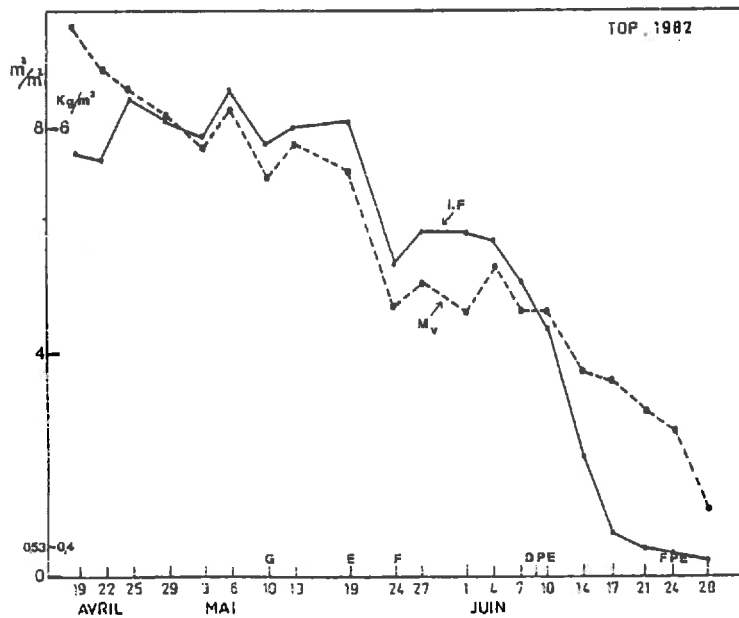
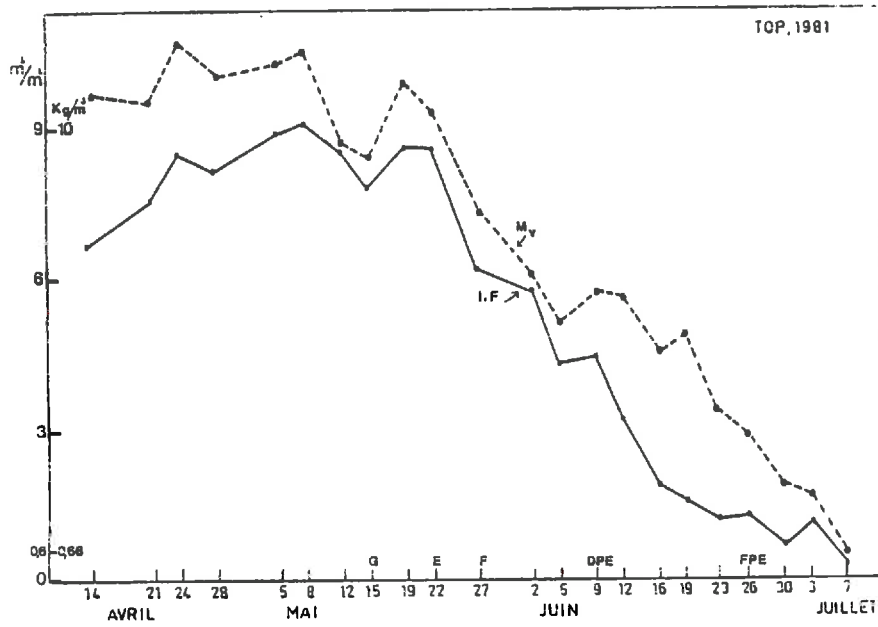
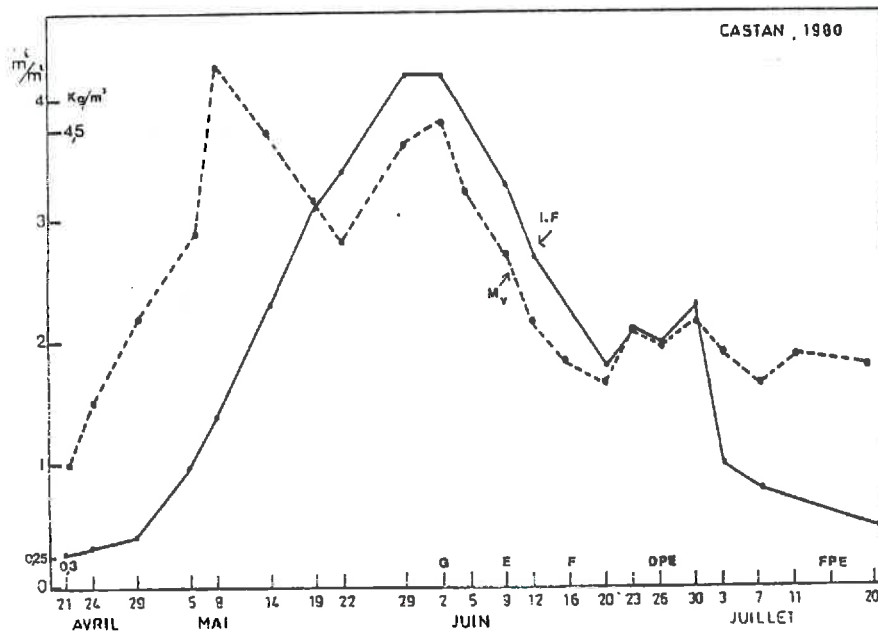


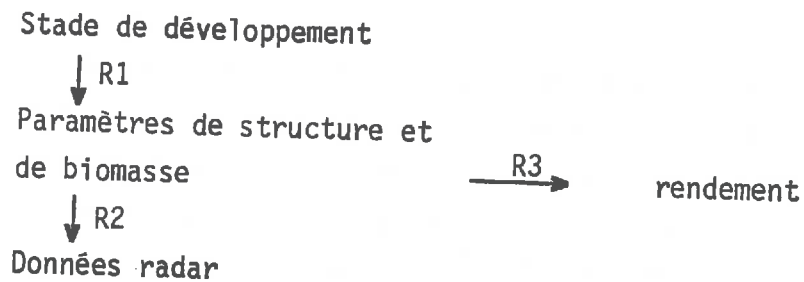
Figure IV.7 : Evolution temporelle de l'indice foliaire et de la masse volumique en eau du couvert

Pendant la période précédant le gonflement, σ^o serait plus lié à l'indice foliaire, surtout si le port des feuilles est demi-étalé (CASTAN 80).

- dans le cas d'un couvert à forts indice foliaire et masse volumique en eau, σ^o serait plus corrélé à cette dernière qu'à l'indice foliaire, cette corrélation étant positive. Les valeurs atteintes par σ^o et sa dynamique seraient d'autant plus faibles que le port des feuilles est dressé et la couche d'épis dense (TOP 82).
- dans le cas d'un couvert à très faibles indice foliaire et masse volumique en eau, σ^o serait corrélé négativement à la masse volumique en eau (CASTAN 82).

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de l'étude était d'explicitier, en expérimentation in situ associant des mesures physiques par radar à un suivi des paramètres de structure et de biomasse d'un couvert de blé, les 3 relations :



Un des problèmes principaux qui se posait était celui de la représentativité quantitative des maîtres-brins prélevés sur lesquels étaient mesurés les paramètres de structure et de biomasse, par rapport à l'ensemble des maîtres-brins du champ. Une étude détaillée de la précision des mesures obtenues a été effectuée ; le nombre d'échantillons à prélever pour assurer la représentativité quantitative à la précision et au risque choisis est :

- très variable selon le paramètre mesuré et selon la période considérée
- souvent supérieur à celui utilisé au cours des expérimentations.

Le calcul de la taille d'échantillon a conduit à proposer des normes d'échantillonnage ; après vérification plus large de leur validité, ces normes pourraient être utilisées de façon standard pour la "vérité-terrain" des expériences de télédétection.

La représentativité quantitative n'est pas assurée dans cette étude, mis à part pour quelques paramètres tels que la hauteur et le poids sec du brin entier ; elle risque d'être un objectif coûteux en temps et/ou en main d'oeuvre.

La notion de représentativité chronologique a alors été introduite : l'étude des "pics" et des "creux" de la variance des mesures sur l'échantillon prélevé permet, conformément à un modèle statistique d'analyse de la croissance (Malet, 1979), de repérer -et de dater- les changements brusques de la vitesse d'évolution du paramètre de structure ou de biomasse. Ce modèle qui semble vérifié aussi bien au niveau des organes isolés que du brin entier a une application très intéressante en télédétection : il établit une relation entre la variation temporelle des mesures de croissance et la variation spatiale de ces

mesures à une date donnée ; or la télédétection peut ou pourrait fournir, à une date donnée, la variabilité spatiale des mesures de croissance.

De l'examen des points communs trouvés entre les 3 années, ont été établies des concordances entre le franchissement des stades de développement du blé (à partir du gonflement) et certains extremas ou changements d'évolution observés sur les paramètres de structure et de biomasse (relation R1) ; ces extremas ou changements sont accompagnés d'une plus grande variabilité spatiale des mesures.

Les concordances observées ne sont pas strictes au sens où les points particuliers de l'évolution des paramètres ne coïncident pas au jour près avec la date de réalisation du stade ; à chaque stade, pour chacun des paramètres, a été donné l'intervalle de temps avec lequel l'évolution de la moyenne ou de la variance fournit la date de réalisation du stade. Il faut alors savoir si la précision ainsi obtenue sur la date est compatible avec les besoins des modèles de prévision de récolte, nécessitant un calage sur les stades de développement...

L'étude de la relation R3 entre les paramètres de structure et de biomasse et le rendement a été menée selon 2 approches :

- la première approche a examiné les différences sur les paramètres entre 2 années où une même variété, soumise à des conditions initiales identiques a fourni des rendements très inégaux ; à chaque stade, les signes indicateurs d'un "bon" ou d'un "mauvais" état de croissance ont été inventoriés.

On peut se demander si ces signes ou effets visibles sur la structure et la biomasse de bonnes ou de mauvaises conditions de croissance varient ou non selon la cause de ces conditions (climat, apports nutritifs, état sanitaire).

- la deuxième approche a consisté en l'examen des coefficients de corrélation linéaires entre les paramètres de structure et de biomasse et le poids sec de l'épi, pendant la période de remplissage des grains (maturation) ; les résultats montrent qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les paramètres de structure et de biomasse et le poids du grain, dernière composante du rendement. Une corrélation linéaire significative et positive existe entre le poids sec du brin entier et le poids sec de l'épi (par l'intermédiaire du nombre de grains), à chaque date .

La période de montaison au cours de laquelle se forment les composantes ayant la plus forte influence sur le rendement par épi final (nombre d'épillets, nombre de grains) est sans doute la plus importante à étudier du point de vue de la relation des paramètres de structure et de biomasse avec ces composantes...

PARAMETRES DE STRUCTURE ET DE BIOMASSE		Précision sur la date (jours)	FAVORABLE à un bon rendement	DEFAVORABLE
GONFLEMENT • hauteur définitive des feuilles F4, F3, F2 • maximum d'indice foliaire • pic de variance sur la surface foliaire totale du maître-brin • début de jaunissement des 2 dernières feuilles • début d'abaissement de la dernière feuille		+12 0 -4 -4 -10	• F1 commence à s'abaisser • contribution relative des feuilles dans le poids sec et en eau plus importante	• F4 jaune et sèche • F1 plus petite que F2 ou F3
EPIAISON • diminution de l'indice foliaire • diminution du poids d'eau total du maître-brin • hauteur définitive de la dernière feuille		-12 0 +5	• chute brutale du poids d'eau et de la surface des feuilles • grande variabilité de l'angle d'insertion	
FLORAISON • hauteur définitive du maître-brin		+6	• taille définitive non encore atteinte	épis courbés
DEBUT DU PALIER D'EAU • jaunissement brutal des 2 dernières feuilles • ralentissement de la croissance en matière sèche totale • pic de variance sur le poids sec du maître-brin • chute brutale du poids d'eau total • pic de variance sur le poids d'eau du maître-brin • chute brutale d'indice foliaire • pic de variance sur la surface foliaire totale du maître-brin		+4 +3 -3 ; +3 +4 -4 ; +3 -9 ; +4 -3 ; +7 +6 0 +4 -3 ; +3	• chute brutale de la matière sèche de la tige • jaunissement brutal des feuilles	
FIN DU PALIER D'EAU • chute brutale de l'angle d'insertion de la dernière feuille • courbure brutale de l'épi • maximum de matière sèche totale • pic de variance sur la matière sèche du maître-brin		-3 0 -7 -3	• épis courbés • proportion de l'épi dans le poids sec la plus importante	

La synthèse des observations réalisées est exposée dans le tableau page 3 . L'exploitation de ce tableau est double et complémentaire :

- il fournit une base pour l'interprétation des données acquises par un capteur de télédétection sur un couvert végétal, et ce, dans l'ensemble des domaines spectraux utilisés.
- si la télédétection se montre capable de détecter les paramètres de structure et de biomasse et leur évolution, le repérage des principaux stades de développement du blé, utile pour caler les modèles de prévision de rendement, sera possible. Une indication sur les états de croissance pourra être aussi fournie.

L'étude de la relation R2 a été faite dans le domaine spécifique des micro-ondes ou hyperfréquences.

Les résultats montrent que le coefficient de rétrodiffusion radar est une fonction croissante de l'indice foliaire et de la masse volumique en eau (poids d'eau/hauteur) du couvert, pendant la plus grande partie de la période de végétation étudiée ; à la fin du cycle, la réponse du sol devient prépondérante. D'autres paramètres tels que la courbure des feuilles et la densité d'épis au m² semblent intervenir.

Ces premiers résultats sont encourageants : par l'intermédiaire des paramètres de structure et de biomasse -soulignés en pointillé sur le tableau- les évolutions et le niveau du coefficient de rétrodiffusion sont reliables aux principaux stades de développement et à quelques indicateurs de l'état de croissance.

BIBLIOGRAPHIE

- AGENCE SPATIALE EUROPEENNE (Cours de Formation), 1979. Télédétection par satellite : applications en agroclimatologie et agrométéorologie. *ESA, SP-1022*
- AGRICULTURE (Ministère de l') - SCEES - Cahiers de statistique agricole. *Périodique.*
- ATTEMA E.P.W., ULABY F.T., 1978. Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science, 13 (2), 357-364.*
- BARET F., HUET M., 1979. Contribution à l'utilisation agronomique de la télédétection. Analyse des relations entre la structure d'un couvert végétal, son état physiologique, et les données radiométriques. *Rapport INRA-Avignon, Bioclimatologie.*
- BOYELDIEU J., 1980. Les cultures céréalières. *HACHETTE.*
- BUNNICK, 1978. The multispectral reflectance of short wave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. -Thèse de Doctorat- *Meded Landbouwhogeschool, Wageningen.*
- BUSH T.F., ULABY F.T., 1975a. Remotely sensing wheat maturation with radar. *RSL Technical Report 177-55, University of Kansas Center for Research.*
- DELECOLLE R., GURNADE J.C., 1980. Liaisons entre la morphologie du brin, le rendement de l'épi et les composantes du rendement chez le blé tendre. I. Effet variétal. *Ann.agron., 31 (1), 85-105.*
- GURNADE J.C., MALET P., 1981. Macrophysiologie de la maturation du blé d'hiver en conditions naturelles. II. Liaisons entre la sénescence du maître-brin et la maturation des grains chez la variété Talent. Intérêt pour la télédétection. *Agronomie, 1 (4), 255-260.*
- HUET M., 1980. Contribution à l'étude de la télédétection hyperfréquences d'un couvert de blé : relation entre le stade de développement, l'état de croissance des plantes et leurs paramètres de structure et de biomasse. Mémoire DEA, ENSAT. *Rapport CESR n° 81-997.*
- HUET M., 1982. Résultats des mesures biologiques. Expérimentations RAMSES 1980-1981-1982. *Rapport technique CESR n° 82-1066.*
- HUET M., LE TOAN T., 1983. Evolution des paramètres de structure et de biomasse d'un couvert de blé. Relation avec les données de Télédétection. *Colloque sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Bordeaux, Septembre 1983.*

- ITCF, 1979. Du nouveau sur la croissance du blé. *Perspectives agricoles*, 32, 11-18.
- LEDENT J.F., 1977. Relations entre rendement par épi et caractères morphologiques à maturité chez diverses variétés de blé d'hiver. *Ann.agron.*, 28 (4), 391-407.
- LEDENT J.F., 1978. Etude intravariétale des relations entre le rendement par épi et les caractères morphologiques chez le blé d'hiver : relations morphologiques à la floraison. *Ann.agron.*, 29 (6), 625-640.
- LE TOAN T., PAUSADER M., 1981. Active microwaves signatures of soil and vegetation covered surfaces. Results of measurements programs. *Colloque sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Avignon, Septembre 81*, 303-313.
- LOPES A., HUET M., LE TOAN T., 1981. Expériences micro-ondes sur un couvert de blé : premiers résultats. *Colloque sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Avignon, Septembre 81*, 425-433.
- LOPES A., 1983. Etude expérimentale et théorique de l'atténuation et de la rétrodiffusion des micro-ondes par un couvert de blé : application à la télédétection. - Thèse Docteur-Ingénieur- *Université Paul Sabatier / CESR, Toulouse*.
- MALET P., 1979. Liaison statistique entre le développement et la croissance chez les plantes : application d'un modèle simplifié à l'analyse de la croissance. *Ann.agron.*, 30 (5), 415-430.
- MALET P., 1979. Perspectives et intérêt de développement pour la Communauté Européenne des modèles agrométéorologiques de prévision de récoltes, susceptibles d'intégrer les diverses données acquises par télédétection. *Rapport INRA - Avignon, Bioclimatologie*.
- MALET P., GURNADE J.C., 1981. Macrophysiologie de la maturation du blé d'hiver en conditions naturelles. I. Notion de représentativité chronologique et problèmes d'échantillonnage. *Agronomie*, 1 (3).
- N' GUESSAN A., 1982. Contribution de la télédétection hyperfréquences à l'étude du suivi de deux couverts de blé et de l'humidité du sol. Mémoire DAA, ENSAR. *Rapport CESR n° 82-1040*.

- PAUSADER M., 1982. Contribution à la télédétection hyperfréquence : étude des relations entre la réflectivité radar et l'humidité du sol. -Thèse Docteur-Ingénieur- *Université Paul Sabatier/CESR, Toulouse.*
- SAINT G. et al., 1981. Simulations radiométriques de SPOT ; résultats d'expériences sur la végétation et les sols. *Colloque sur les signatures spectrales d'objets en télédétection, Avignon, Septembre 81, 73-83.*
- SUITS, 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Rem. Sens. Env., 2, 117-125.*
- ULABY F.T., 1979. Microwave Backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture : part II. Vegetation - covered soil. *IEEE Transactions on geoscience electronics, GE-17, 2, 33-40.*
- ULABY F.T., 1975. Radar response to vegetation. *IEEE Trans. Antennas Propagation, AP-23, 36-45.*
- YOUNG S.KIM and al., 1981. Surface-based Radar Scatterometer study of Kansas rangeland. *Rem. Sens. Env., 11, 253-265.*

Autorisation de Soutenance accordée

TOULOUSE, le ~~10 OCT, 1983~~

Le Président

de l'Université PAUL-SABATIER



Bancbl
D. BANCBL

