



HAL
open science

Résultats de 18 années d'observations lysimétriques sous climat limagnais. II. – Etude des relations entre l'eau et la production végétale

Jean Morizet, Marcel Robelin, Georges Baucher, Renée Degoutte, Daniel Ezard

► To cite this version:

Jean Morizet, Marcel Robelin, Georges Baucher, Renée Degoutte, Daniel Ezard. Résultats de 18 années d'observations lysimétriques sous climat limagnais. II. – Etude des relations entre l'eau et la production végétale. *Agronomie*, 1984, 4 (5), pp.407-416. <hal-00884653>

HAL Id: hal-00884653

<https://hal.science/hal-00884653v1>

Submitted on 11 May 2020

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

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



HAL Authorization

Résultats de 18 années d'observations lysimétriques sous climat limagnais. II. — Etude des relations entre l'eau et la production végétale

Jean MORIZET, Marcel ROBELIN & Georges BAUCHER

avec la collaboration technique de Renée DEGOUTTE & Daniel EZARD

I.N.R.A., Station d'Agronomie, 12 avenue de l'Agriculture, F 63039 Clermont-Ferrand

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente les relations eau-production végétale obtenues à partir des observations en cases lysimétriques installées sous climat limagnais et suivant différentes situations édaphiques, culturales et climatiques.

La succession des cultures mise en place répond à l'objectif de définir les potentialités agronomiques de différents sols, à partir des principales espèces annuelles et prairiales cultivées dans la région.

Certains résultats confirment des idées généralement admises :

— relations globalement linéaires entre la production végétale et la consommation d'eau avec cependant une grande variabilité interspécifique et, à l'intérieur d'une même espèce, de larges fluctuations interannuelles liées au facteur climatique (notamment le pouvoir évaporant de l'air) et également à l'effet phytotechnique (variétés et techniques culturales) ;

— la classification des espèces selon leur tolérance à la sécheresse recoupe d'une façon satisfaisante les résultats acquis antérieurement.

Une hypothèse est proposée concernant un mécanisme explicatif de la résistance à la sécheresse. Il met en jeu l'importance et la variation des résistances stomatiques et internes en fonction du niveau de la sécheresse.

Ces paramètres agiraient sur les variations relatives de l'assimilation nette et de la transpiration au cours d'une séquence sèche, une espèce tolérante (tournesol) maintenant plus longtemps qu'une espèce sensible (maïs) un taux de photosynthèse élevé et présentant, par suite, une efficacité de l'eau croissante jusqu'à un seuil de sécheresse plus intense.

Enfin le comportement particulier du sol basaltique à caractère andique est souligné. Il diffère des deux autres sols étudiés — terre noire de Limagne et sol granitique — par une production plus faible à égalité de consommation d'eau. Des hypothèses explicatives sont formulées : les propriétés physiques pourraient se dégrader en cours de végétation et, d'autre part, la disponibilité phosphorique serait insuffisante, surtout en condition sèche, par suite du fort pouvoir fixateur de ces sols.

Mots clés additionnels : *Consommation en eau, résistance à la sécheresse, phosphore, sols andiques.*

SUMMARY

Results of 18 years of lysimetric observations under the climatic conditions of Limagne. II. — Relationships between water consumption and yield.

This paper presents the relations between water and plant growth obtained from observations in lysimeters at Clermont-Ferrand under various edaphic, cultural and climatic conditions.

A rotation of the main annual and grassland species cultivated in the region was used to determine the agronomic potential of different soils.

Certain results confirmed generally accepted ideas : 1) a linear relation between plant production and water consumption although with great interspecific variability and for a given species, and wide fluctuations between years linked to climatic factors ; 2) classification of species according to their drought tolerance similar to that obtained from earlier results.

A hypothesis on the mechanism for drought resistance is proposed : it involves the size and variation of stomatal and internal resistances according to the degree of drought. These parameters act on the relative variation of net assimilation and transpiration during a dry period. A tolerant species (sunflower) maintained a higher photosynthetic rate and showed a greater water efficiency up to a higher level of drought than a more sensitive species (maize).

One should stress the special behaviour of basaltic soils with andic characteristics. It differed from those of the two other soils studied — black soils of Limagne, granitic soils — by poorer production for a given water consumption. A possible explanation is that these soils' physical properties may deteriorate during vegetation and that the availability of phosphorus may be insufficient, especially in dry conditions, due to a high level of fixation.

Additional key words : *Plant production, water consumption, drought resistance, phosphorus, andic soils.*

I. INTRODUCTION

Une 1^{re} partie a été consacrée à l'étude des caractéristiques hydriques des sols et de la dynamique de drainage des cases lysimétriques installées sur le domaine de Mon Désir, à Clermont-Ferrand (MORIZET & ROUSSEAU, 1984).

Dans une 2^e partie, on se propose de présenter les relations existant entre le facteur hydrique et la production végétale suivant différentes situations édaphiques, culturales et climatiques.

La succession des cultures mises en place ne suit pas un ordre pré-établi comme dans un essai rotation mais elle répond à l'objectif de définir les potentialités agronomiques de différents sols à partir des principales espèces annuelles et prairiales cultivées dans la région, la notion de potentialités agronomiques étant toute relative (en particulier, l'ordre des successions culturales n'est très certainement pas sans effet).

II. MÉTHODES D'ÉTUDE

La détermination des consommations d'eau a été effectuée selon la méthode décrite par COLLIER & ROBÉLIN (1959). Nous la rappellerons brièvement.

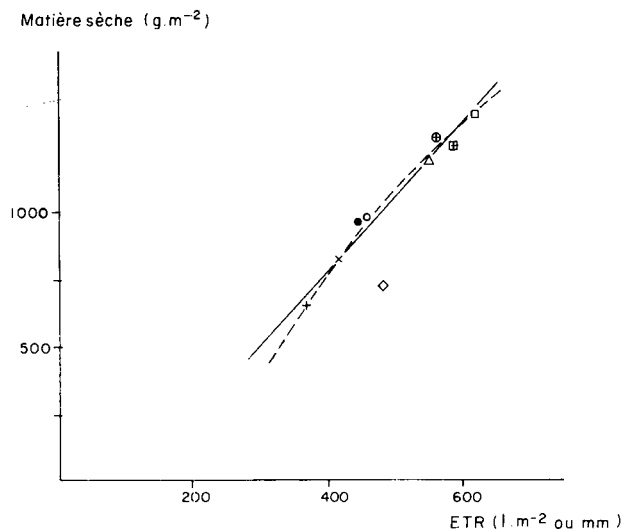


Figure 1
Relation entre la production de matière sèche (M.S.) et la consommation d'eau (ETR), toutes cultures confondues (entre 1962 et 1979).

Relationship between dry matter production (M.S.) and water consumption (ETR), all crops together (1962-1979).

— M.S. = 2,71 ETR - 313 $r = 0,991$; $P = 0,001$

- - - M.S. = 1,33 Log ETR - 722 $r = 0,995$; $P = 0,001$

◇ Terre basaltique (2-14); basaltic soil (2-14)

● Terre granitique (3-15); granitic soil (3-15)

+ Terre noire - 50 cm (4-16); black soil - 50 cm (4-16)

× Terre noire - 85 cm (5-17); black soil - 85 cm (5-17)

○ Terre noire - 145 cm (8-20); black soil - 145 cm (8-20)

△ Terre noire - 145 cm (9-21) - irriguée - 1/2 dose; irrigated - 1/2 amount

□ Terre noire - 145 cm (10-22) - irriguée - pleine dose; irrigated - whole amount;

⊕ Terre noire - 145 cm (11-23) - nappe - 120 cm; water table - 120 cm;

⊞ Terre noire - 145 cm (12-24) - nappe - 60 cm; water table - 60 cm;

(les cases 1-13, 6-18 et 7-19 ne sont pas prises en compte).

La consommation d'eau ETR pendant une période donnée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$ETR = P + I + N + \Delta S - D$$

dans laquelle :

P est la pluie,

I l'irrigation,

N la participation de la nappe pour les cases à nappe,

ΔS la variation du stock d'eau dans le sol,

D le drainage.

L'évaluation du terme ΔS correspondant à un cycle de végétation n'est possible qu'à partir de 1978 par la méthode neutronique.

Le calcul du bilan n'est, auparavant, réalisable que pour les périodes d'interdrainage, en admettant que les variations de stock d'eau dans le sol ΔS sont nulles pendant ce laps de temps ; on peut en effet supposer que le sol présente un profil hydrique caractéristique en fin de ressuyage.

La période considérée encadre plus ou moins largement le cycle de végétation ; il est donc nécessaire de déduire l'évaporation se produisant en dehors de celui-ci. A cet effet, on a pris en compte les mesures effectuées sur les cases 12-24 qui, par leur faible épaisseur au-dessus de la nappe (plan d'eau à 60 cm), sont beaucoup plus facilement saturées, ont une valeur de ΔS faible et drainent fréquemment, toutes situations permettant d'établir des bilans sur des laps de temps plus courts. Il a été vérifié au préalable par COLLIER & ROBÉLIN (1959) que la consommation d'eau en l'absence de végétation et en période froide est la même sur toutes les cases.

III. RÉSULTATS

A. Relations : Consommation d'eau — Production de matière sèche

1. Ensemble des cultures (fig. 1)

Si l'on considère l'ensemble des cultures effectuées de 1962 à 1979 et si l'on compare le cumul des matières sèches récoltées MS et le total de l'eau consommée ETR dans chaque situation de sol, on obtient une régression linéaire hautement significative :

$$MS = 2,71 ETR - 313 \quad (r = 0,99 ; P = 0,001) \quad (1)$$

Ceci confirme les observations antérieures de COLLIER & ROBÉLIN (1959) et de ROBÉLIN (1962). Un ajustement curvilinéaire est encore meilleur comme il sera montré par la suite.

La relation entre MS et ETR dépend évidemment des cultures pratiquées dont nous rappelons la liste (annexe) : blé, ail, fétuque élevée, tournesol, lentille, colza, betterave sucrière, tabac, maïs.

Cette régression réunit des conditions d'approvisionnement hydrique très diverses : variation du réservoir sol (profondeur), irrigation de surface ou interne (nappe phréatique). Les différences de situation liées à ces modalités ont donc des effets négligeables par rapport à ceux des disponibilités en eau qu'elles impliquent.

La nature même du substrat ne semble pas jouer sauf dans le cas du sol basaltique sur lequel nous reviendrons plus loin. La valorisation de l'eau pour ce type de sol apparaît plus faible que pour les deux autres.

Cette observation reste généralement valable quand des relations sont établies par espèces, la production de matière sèche en sol basaltique étant le plus souvent moindre pour une consommation d'eau équivalente.

Pour ces raisons, les résultats des cases basaltiques ne sont pas pris en compte dans le calcul de la régression générale qui vient d'être présentée ni dans celui des autres qui seront indiquées par la suite.

2. Etude par culture (fig. 2)

Le regroupement par espèces laisse encore apparaître des relations de type linéaire entre la production de matière sèche et la consommation d'eau. Cependant, elles sont en général moins étroites que la relation générale et, en outre, il existe une variabilité interannuelle.

Des comportements très différenciés se manifestent suivant les espèces, notamment quand le facteur hydrique n'est pas limitant :

— d'un côté, des espèces très productives comme le maïs, la betterave et le blé,

— d'un autre, des espèces à rendements plutôt moins élevés pour une consommation d'eau supérieure ; c'est le cas notamment du colza et du tournesol.

Cependant, si l'on adjoint au facteur quantitatif un facteur qualitatif qui tient compte de la composition des organes de la plante, ce qui permet de traduire la production en termes de besoins énergétiques ou en équivalents - glucose proportionnels à l'assimilation

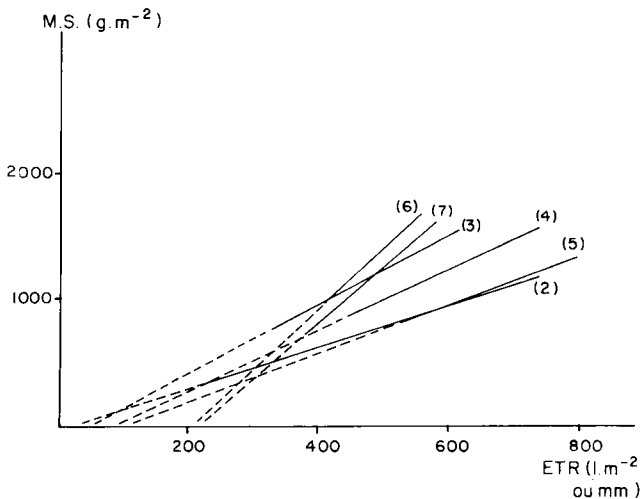


Figure 2
Régression linéaire entre la production de matière sèche (M.S.) et la consommation d'eau (ETR) selon les espèces.

Linear regression between dry matter production (M.S.) and water consumption (ETR) for different species.

(2) tournesol (3 années) ; sunflower (3 years)

(3) blé (3 années) ; wheat (3 years)

(4) fétuque élevée (2 années) ; tall fescue (2 years)

(5) colza (1 année) ; rape (1 year)

(6) betterave sucrière (2 années) ; sugar beet (2 years)

(7) maïs (1 année) ; corn (1 year).

nette (PENNING de VRIES, 1974), on obtient des droites de régression disposées un peu différemment (fig. 3). On peut remarquer notamment que les besoins énergétiques maximum varient peu d'une espèce à l'autre, de l'ordre de $2\ 150\text{ g.m}^{-2}$ d'équivalents-glucose alors que les productions de matière sèche s'étalent de $1\ 175\text{ g.m}^{-2}$ (tournesol) à $1\ 725\text{ g.m}^{-2}$ (maïs et betterave sucrière).

En l'absence de contrainte hydrique, les variétés étudiées présentent donc des potentialités comparables d'assimilation nette cumulée sur la totalité du cycle de végétation. Les besoins en eau sont par contre différents.

3. Variations spécifiques interannuelles de la production (fig. 4)

Au cours des 18 années d'observation, certaines cultures ont été répétées plusieurs fois, par exemple :

- betterave sucrière : 2 fois : 1969 et 1975
- tournesol : 3 fois : 1966, 1972 et 1974
- blé : 3 fois : 1962, 1970 et 1973
- fétuque : 2 fois : 1964-1965 et 1977-1978-1979

Les fortes variations interannuelles des relations M.S. = f (ETR) pour une espèce donnée, peuvent provenir :

- soit de comportements variétaux différents,
- soit de circonstances phytotechniques et d'accidents de végétation (ex. attaque parasitaire),
- soit de l'influence des conditions climatiques de l'année.

Pour essayer d'apprécier cette dernière, nous avons comparé les résultats de 3 années de tournesol avec l'ETP correspondant à la durée des cycles de végétation. Ne disposant pas toujours des données ETP fétuque pour les périodes considérées, nous avons utilisé les valeurs calculées à partir de la formule de ROBELIN (travaux non publiés) qui prend en compte d'abord le rayonnement global, puis la température comme facteur secondaire et qui fournit, pour la région de Clermont-Ferrand, le meilleur ajustement ETP-ETM fétuque mesurée.

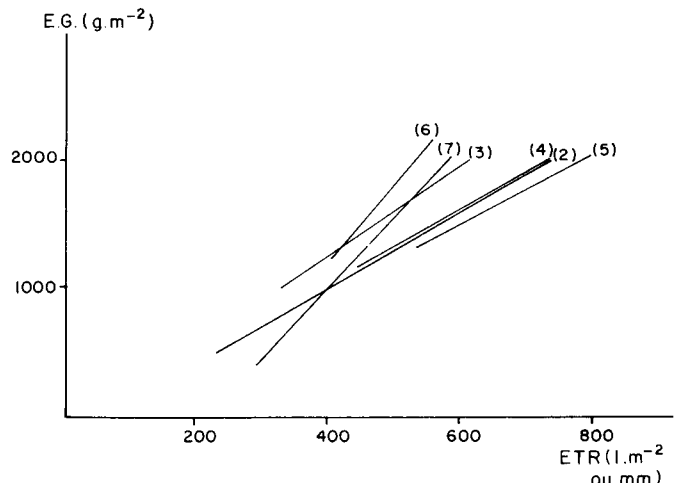


Figure 3
Régression linéaire entre équivalents-glucose (E.G.) et consommation d'eau (ETR) selon les espèces (même légende que fig. 2).

Linear regression between glucose equivalents (E.G.) and water consumption (ETR) for different species (see fig. 2).

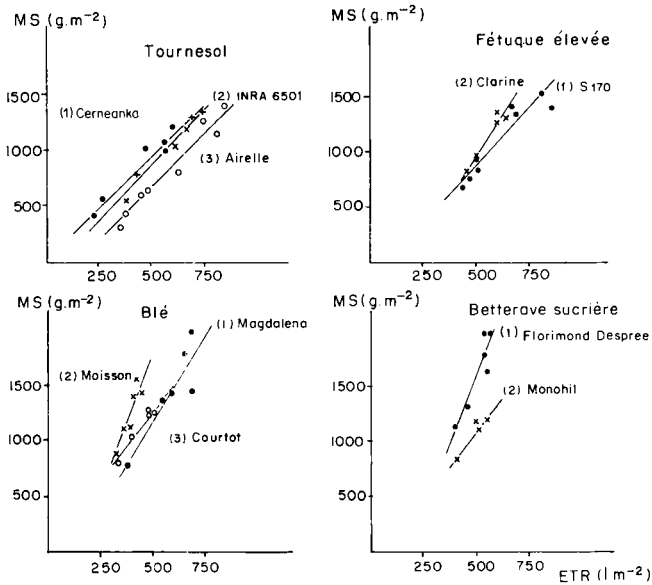


Figure 4

Relation entre production de matière sèche (M.S.) et consommation d'eau (ETR) selon les espèces et les années :

Relationships between dry matter production (M.S.) and water consumption (ETR) for different species and different years.

Tournesol (Sunflower)

1 — 1966 : M.S. = 1,90 ETR - 14 $r = 0,99$; $P = 0,001$

2 — 1972 : M.S. = 2,00 ETR - 124 $r = 0,97$; $P = 0,001$

3 — 1974 : M.S. = 1,94 ETR - 314 $r = 0,98$; $P = 0,001$

Fétuque élevée (Tall fescue)

1 — 64-65 : M.S. = 2,13 ETR - 188 $r = 0,94$; $P = 0,001$

2 — 77-78 : M.S. = 3,10 ETR - 594 $r = 0,97$; $P = 0,01$

Blé (Wheat)

1 — 1962 : M.S. = 3,11 ETR - 382 $r = 0,91$; $P = 0,05$

2 — 1970 : M.S. = 4,77 ETR - 624 $r = 0,91$; $P = 0,02$

3 — 1973 : M.S. = 2,37 ETR + 66 $r = 0,97$; $P = 0,001$

Betterave sucrière (Sugar beet)

1 — 1969 : M.S. = 5,04 ETR - 923 $r = 0,93$; $P = 0,01$

2 — 1975 : M.S. = 2,61 ETR - 203 $r = 0,93$; $P = 0,10$

Aucune tendance simple de corrélation n'apparaît entre les valeurs de l'ETP, d'une part, et les autres caractéristiques et la position des droites de régression, d'autre part (tabl. 1 et fig. 4). L'influence des conditions climatiques ne ressort pas :

— soit que l'ETP est une caractéristique trop globale et qu'il faudrait utiliser des données plus analytiques susceptibles de fournir des indications précises sur l'action du climat à une période donnée de la végétation,

— soit que l'influence climatique est occultée par l'effet variétal prédominant ou plus généralement par l'ensemble des facteurs phytotechniques.

B. Relations : Productions de matière sèche - réserves hydriques et modalités d'apport d'eau

En « culture sèche », la production moyenne de 1962 à 1979 est fonction des réserves en eau RU_4 (MORIZET & ROUSSEAU, 1984), sauf pour les cases basaltiques dont les rendements n'ont pas atteint un niveau en rapport avec des réserves très élevées (fig. 5).

Les cases 1-13 sans fond se signalent par une production supérieure à celle des cases 8-20 (profondeur de sol 145 cm). Ce phénomène, particulièrement net en année sèche (1976), s'explique par l'absence de limitation dans la profondeur d'enracinement. Des remontées capillaires peuvent également jouer un certain rôle, comme l'ont montré DAUDET & VALANCOGNE (1974), même si la profondeur de la nappe se situe habituellement à une profondeur supérieure à 170 cm.

Parmi les cases à apport d'eau (irrigation superficielle ou nappe), ce sont les cases irriguées à pleine dose (10-22), par apport toutes les semaines en surface de la quantité d'eau puisée sur la nappe à 60 cm dans les cases 12-24 (MORIZET & ROUSSEAU, 1984),

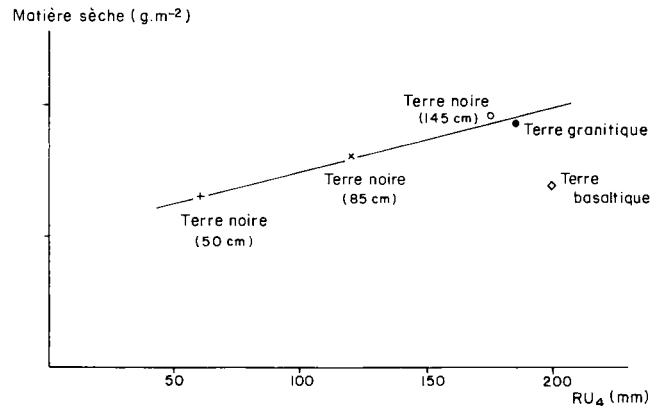


Figure 5

Relation entre production de matière sèche (M.S.) et réserve en eau (RU_4) en condition de culture sèche.

Relationships between dry matter production (M.S.) and available water reserve (RU_4) in dry conditions.

TABLEAU 1

Comparaison entre les valeurs de l'ETP (cycle de végétation) et quelques caractéristiques de production et de consommation d'eau du tournesol en conditions hydriques non limitantes.

Comparison between ETP values (growing period) and some characteristics of production and water consumption of sunflower under wet soil conditions.

Années	Variétés	ETP (mm)	Consommation d'eau des cases les plus évaporantes (mm)	Production de matière sèche totale ($g.m^{-2}$)	Efficiéce de l'eau ($g.l^{-1}$)
1966	Cerneanka	707	598 (C. 10-22)	1 198	1,99
1972	I.N.R.A. 6501	588	743 (C. 10-22)	1 341	1,80
1974	Airelle	699	855 (C. 12-24)	1 399	1,64

qui assurent, dans l'ensemble, les meilleurs rendements. Elles sont suivies par les cases à plan d'eau à 120 cm (11-23) puis par celles à plan d'eau à 60 cm (12-24), enfin par les cases irriguées à demi-dose (9-21) (annexe).

Ce classement peut s'expliquer par la bonne efficacité de l'irrigation de surface qui assure une humidité suffisante dans la totalité du profil sans encourir le risque d'excès d'eau. Par contre, une nappe à 120 cm est trop profonde pour fournir, en période sèche, une alimentation hydrique tout à fait correcte à des plantes jeunes ou à enracinement médiocre (cas des prairies en 1^{re} année, des lentilles, du tabac). A l'inverse, une profondeur de nappe à 60 cm favorise une végétation à racines superficielles mais peut pénaliser certaines espèces qui s'accommodent mal d'un engorgement hydrique permanent à faible profondeur. Par exemple, THOMAS (1962) a signalé des chutes de rendement de l'avoine fourragère et du maïs quand la profondeur de la nappe passait de 60 cm à 35 cm de profondeur. Dans notre cas, ce sont le blé et le maïs qui semblent le plus affectés par la proximité de la nappe, bien que DUTHION (1976) classe le maïs parmi les espèces relativement tolérantes à l'anoxie. Il faut pourtant ajouter que les fluctuations de rendements dues à la présence d'une nappe phréatique de profondeur comprise entre 0,50 et 1,90 m sont faibles pour la plupart des espèces annuelles et prairiales. Les conséquences ne deviennent généralement importantes que dans le cas de plan d'eau situé soit à proximité de la surface (à moins de 0,40 m environ), soit à plus de 2 m, en sol argilo-calcaire de terre noire (ROBELIN, 1961).

C. Sensibilité à la sécheresse (fig. 6)

La sensibilité à la sécheresse peut être caractérisée par la pente de la droite représentative de la régression entre consommations d'eau et productions relatives, les consommations et production maximales de l'année étant prises pour référence (ROBELIN, 1962)

$$\frac{MS_R}{MS_M} = \alpha \frac{ETR}{ETM} + 1 - \alpha \quad (2)$$

MS_R étant la production de matière sèche dans les conditions de consommation ETR,
 MS_M étant la production de matière sèche dans les conditions de consommation ETM,
 ETR étant l'évapotranspiration réelle,
 ETM étant l'évapotranspiration maximale,

$$\alpha = \frac{MS_M - MS_R}{MS_M} \cdot \frac{ETM - ETR}{ETM} \text{ est la perte relative}$$

de production par unité de déficit relatif de consommation d'eau.

Plus α est grand et plus la sensibilité à la sécheresse est forte ou, ce qui revient au même, plus la culture répond positivement à l'irrigation.

En considérant la matière sèche totale, le traitement des données suivant cette méthode permet de classer les différentes espèces dans l'ordre suivant de sensibilité croissante à la sécheresse : tournesol, blé, colza, fétuque, betterave, maïs (tabl. 2).

TABLEAU 2

Valeurs de α , des coefficients de corrélation r et des degrés de signification P des régressions, pour différentes espèces.
 Values of α , correlation coefficients (r) and (P) (probability) for different species.

Espèces	α	r	P
a) matière sèche			
Tournesol (1966-72-74)	1,11	0,97	0,001
Blé (1962-70-73)	1,16	0,92	0,001
Colza (1968)	1,22	0,95	0,001
Fétuque (1964-65 et 1977-78)	1,25	0,94	0,001
Betterave (1955-62-75)	1,49	0,95	0,001
Maïs (1957-76)	1,62	0,98	0,001
b) Grains			
Colza	1,02	0,98	0,001
Blé	1,20	0,91	0,001
Tournesol	1,24	0,97	0,001
Maïs	1,91	0,96	0,001

Toutes cultures confondues, la relation est la suivante :

$$\frac{MS_R}{MS_M} = 1,28 \frac{ETR}{ETM} - 0,28.$$

Nous avons pris en considération des résultats acquis avant la période étudiée : betterave (1955), maïs (1957) dont il a été fait état par ailleurs (COLLIER & ROBELIN, 1959).

Les coefficients de régression sont significativement différents entre les espèces occupant les bords de l'éventail :

- tournesol et maïs :
différence significative à $P = 0,01$
- tournesol et betterave :
différence significative à $P = 0,01$
- maïs et blé :
différence significative à $P = 0,05$
- maïs et fétuque :
différence significative à $P = 0,05$
- maïs et colza :
différence significative à $P = 0,05$.

A l'intérieur d'une même espèce, les différences interannuelles n'apparaissent jamais significatives.

La prise en compte des seuls rendements en grains G_R et G_M conduit à une classification un peu différente (tabl. 2).

Dans l'ensemble, ces observations sont en bon accord avec celles effectuées sous le climat du Sud-ouest de la France (PUECH *et al.*, 1976) sauf que ces auteurs trouvent, pour certaines espèces, des valeurs de α inférieures à 1.

Pour la production de grains, des écarts significatifs sont observés entre les couples suivants :

- tournesol-maïs :
différence significative à $P = 0,01$
- maïs-blé :
différence significative à $P = 0,01$
- maïs-colza :
différence significative à $P = 0,05$.

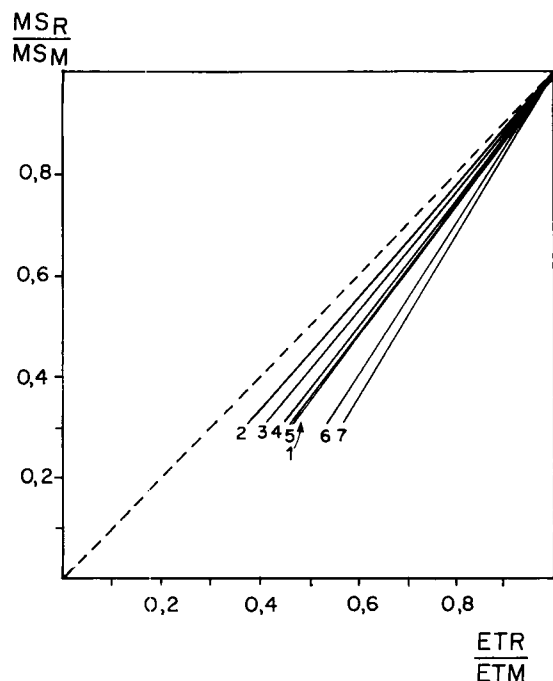


Figure 6
Régressions linéaires entre productions de matière sèche relatives

$\left(\frac{MS_R}{MS_M}\right)$ et consommation d'eau relative $\left(\frac{ETR}{ETM}\right)$.

Linear regressions between relative productions of dry matter

$\left(\frac{MS_R}{MS_M}\right)$ and relative water consumption $\left(\frac{ETR}{ETM}\right)$.

1. moyenne de l'ensemble des cultures ; mean for all crops
2. tournesol ; sunflower
3. blé ; wheat
4. féruque élevée ; tall fescue
5. colza ; rape
6. betterave sucrière ; sugar beet
7. maïs ; corn.

D. Efficacité de l'eau consommée - Incidence de la sécheresse sur l'efficacité suivant les cultures (fig. 7)

Si l'on exprime la matière sèche produite MS_R en fonction de la consommation d'eau ETR par la relation :

$$MS_R = a ETR + b \quad (3)$$

l'efficacité de l'eau e peut s'écrire :

$$e = \frac{MS_R}{ETR} = \frac{b}{ETR} + a \quad (4)$$

b étant une constante négative, l'efficacité e augmente avec la quantité d'eau consommée et atteint une valeur e_M maximum pour $ETR = ETM$.

Toutes cultures confondues, on obtient la relation suivante déduite de l'équation (1) :

$$e = -\frac{313}{ETR} + 2,71.$$

Les courbes $e = f(ETR)$ relatives à chaque espèce se déduisent des régressions linéaires $MS_R = f(ETR)$ de la fig. 2 (fig. 7).

Chaque courbe peut se caractériser par 2 critères :

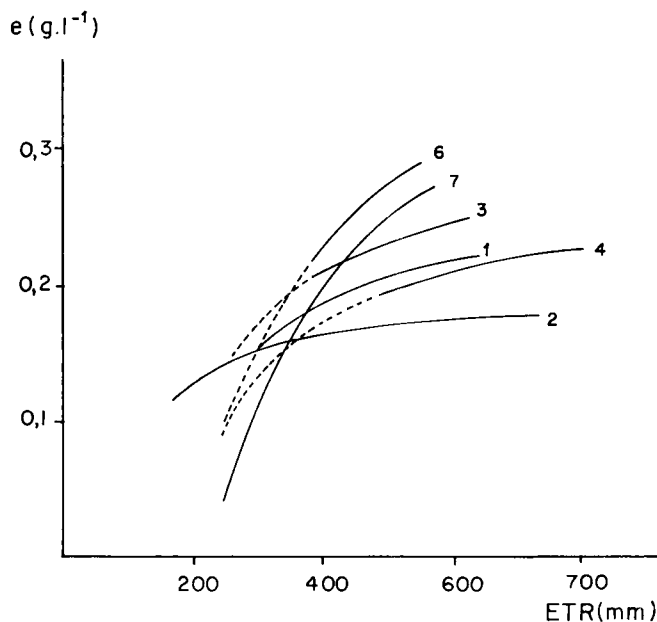


Figure 7

Evolution de l'efficacité de l'eau en fonction de la disponibilité en eau appréciée par la valeur de l'ETR (même légende que fig. 6).

Change of water efficiency with water availability estimated from water consumption (ETR) (see fig. 6).

1. l'efficacité e_M en condition ETM :

$$e_M = \frac{b}{ETM} + a \quad (5)$$

ETM correspond ici à la valeur moyenne des consommations d'eau maximales d'une espèce placée dans un contexte climatique donné.

2. l'amplitude de variation de e en fonction de la consommation d'eau ETR.

Cette amplitude est déterminée par la pente de la

droite représentative de la relation (4) : $e = f\left(\frac{1}{ETR}\right)$,

c'est-à-dire du coefficient b . Elle est liée à la sensibilité à la sécheresse, donc au coefficient α comme le montre le calcul suivant :

La relation (2) peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{MS_R}{MS_M} = a \frac{ETM}{MS_M} \frac{ETR}{ETM} + \frac{b}{MS_M} \quad (6)$$

et en identifiant à (1), on tire :

$$b = (1 - \alpha) MS_M.$$

Un coefficient α élevé (grande sensibilité à la sécheresse) implique donc que b soit faible en valeur algébrique ou grande en valeur absolue, c'est-à-dire que l'amplitude de variation de e soit élevée.

De même on voit que cette amplitude dépend de la production maximale MS_M .

La classification par espèces selon la position et la forme des courbes de l'efficacité e en fonction de la consommation d'eau ETR (fig. 7) présente des analogies avec celles relatives à la production,

$MS_R = f(ETR)$, et à la sensibilité à la sécheresse,

— d'un côté, des espèces à faible ou médiocre efficacité moyenne et à amplitude de variation limitée qui a pour corollaire un comportement satisfaisant en condition sèche, ex. tournesol, blé,

— d'un autre, des espèces à bonne efficacité moyenne mais très affectée par la sécheresse comme le maïs et les betteraves.

IV. DISCUSSION

A. Relations eau-production

Les relations eau-production qui sont présentées ici, sont établies à l'échelle de temps de la période de végétation. Deux points peuvent être soulignés :

1) le caractère satisfaisant de l'ajustement linéaire entre la production de matière sèche et la consommation d'eau. Sur une période de 18 ans (1962-79) et toutes cultures confondues, ce type de corrélation est même tout à fait remarquable ;

2) la grande diversité dans la pente et la position des droites de régression suivant les espèces cultivées.

On peut essayer d'analyser ces résultats à la lumière d'observations effectuées sur des temps plus courts (10 à 20 j), pendant le développement d'une seule période de sécheresse. Les premiers travaux ont mis en évidence une relation linéaire entre transpiration et photosynthèse (BRUX, 1962 ; ROBELIN, 1962 ; BARRS, 1968). Par la suite, des observations plus fines ont montré que cette relation est plutôt de type curvilinéaire. En effet, pour une sécheresse modérée, la photosynthèse est moins touchée que la transpiration ; il en résulte une augmentation de l'efficacité de l'eau. Si la sécheresse s'accroît, il arrive un seuil où la tendance s'inverse ; l'efficacité commence à diminuer (MINGEAU & ROBELIN, 1978 ; AHO *et al.*, 1979).

Les mécanismes de ce phénomène commencent à être connus : ils mettent en jeu l'importance relative des différentes résistances que rencontrent les flux gazeux (CO_2 et vapeur d'eau) lors des échanges foliaires et aussi de la résistance à la carboxylation (SLATYER, 1967 ; ROY, 1980).

Il n'est pas facile d'interpréter les relations linéaires obtenues sur l'ensemble de la période de végétation à partir de l'analyse du fonctionnement hydrique et photosynthétique à l'échelle d'une phase de sécheresse. En effet, dans les résultats présentés, sont regroupées un très grand nombre de situations pouvant présenter un éventail très large de réponses :

— diversité des espèces cultivées,
— diversité et complexité de l'histoire hydrique de chaque espèce en fonction des conditions climatiques et des traitements imposés.

D'une façon générale, on observe bien une diminution de l'efficacité de l'eau au fur et à mesure que les disponibilités hydriques sont plus faibles, situation que l'on pourrait rapprocher de la baisse de l'efficacité observée au cours d'une sécheresse intense. Cependant, dans les conditions du couvert, ce phénomène s'explique en partie par la fraction d'eau per-

due par évaporation directe à partir du sol. Cette fraction est parfois estimée à partir de la valeur prise par ETR quand la production de M.S. est nulle (abscisse à l'origine). Si l'on procède de cette façon, les chiffres obtenus sont très différents selon les espèces (fig. 2), par exemple :

— tournesol	: 30 mm
— blé	: 50 mm
— fétuque élevée, colza	: 90-110 mm
— betteraves sucrières, maïs	: 210-220 mm

et il est certain qu'ils ne représentent pas exactement les pertes par évaporation au sol.

L'ensemble de ces considérations nous conduit à proposer le schéma suivant :

1) une première approximation — en l'absence de perte par évaporation du sol — consiste à admettre une relation de proportionnalité entre MS et ETR (fig. 8A, 1) ;

$$MS = a ETR$$

2) la prise en compte des observations effectuées à courte échelle de temps suggère de remplacer la droite par une courbe à concavité tournée vers le bas (fig. 8A, 2). Celle-ci permet de différencier deux domaines séparés par le point de bascule ba :

— un domaine de sécheresse modérée marquée par une légère augmentation de l'efficacité de l'eau par rapport à l'efficacité en condition ETM,

— un domaine de sécheresse plus intense caractérisée à l'inverse par une baisse de l'efficacité.

La 1^{re} situation peut s'appliquer aux cases à fortes réserves en eau (3-15 ; 8-20) ou à irrigation modérée (9-21), la 2^e concernant au contraire les cases dont les sols sont moins profonds (4-16 ; 5-17).

Notons cependant que les modifications à l'échelle du cycle de végétation ont toutes chances d'être plus faibles que celles observées sur une seule phase de sécheresse puisque les épisodes de stress sont noyés au

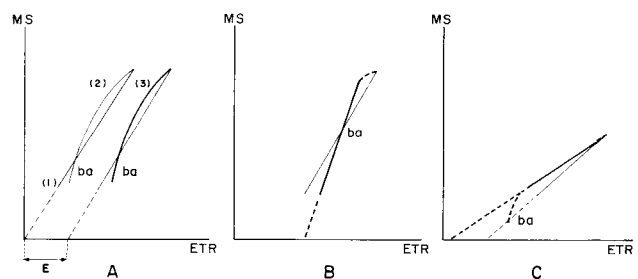


Figure 8

Schémas montrant différentes possibilités de liaison M.S. - ETR.

Schematic representation of different possible relationships between M.S. and ETR.

A — Cas général ($E =$ quantité d'eau perdue par évaporation à partir sol).

B — Cas où le « point de bascule » ba se situe à une sécheresse modérée.

C — Cas où le « point de bascule » ba se situe à une sécheresse intense.

A — General situation ($E =$ amount of water evaporated from soil).

B — Situation in which the "change-over point" ba is in a moderate drought condition.

C — Situation in which the "change-over point" ba is in a severe drought condition.

sein de phases d'alimentation hydrique non limitante dont elles diluent les effets ;

3) enfin, en condition de couvert (cases lysimétriques), il faut tenir compte de l'évaporation directe du sol qui se traduit sur le graphique par une translation de la courbe d'une valeur égale à la quantité d'eau évaporée (fig. 8A, 3).

Une tendance en faveur de ce schéma semble se dessiner si l'on examine attentivement la distribution des points expérimentaux de la figure 1 qui est effectivement un peu mieux prise en compte par un ajustement logarithmique avec une courbe à concavité tournée vers le bas.

Reste à expliquer la diversité des valeurs de l'ETR correspondant à une production nulle (extrapolation des droites de la fig. 2). Nous pouvons avancer l'hypothèse explicative suivante : le point de bascule ba se situerait à des intensités de sécheresse différentes selon les espèces :

— soit à des sécheresses faibles à modérées (fig. 8B), avec pour conséquence un relèvement de la pente de la droite et une abscisse à l'origine élevée (type maïs),

— soit à des sécheresses plus prononcées (fig. 8C), ce qui aurait pour effet un abaissement de la pente de la droite et une réduction de la valeur de l'abscisse à l'origine (type tournesol).

Il est entendu que les schémas proposés n'ont de valeur qu'à titre d'hypothèses de travail : ils doivent évidemment recevoir confirmation expérimentale.

B. Comportement particulier des cases de sol basaltique 2-14

Comme nous l'avons précédemment souligné, les cases basaltiques se différencient nettement des autres par une valorisation de l'eau particulièrement médiocre. Ceci ressort de l'efficacité moyenne calculée sur les 18 années d'observation (cf. annexe) et également des résultats année par année, sauf en 1971 pour une culture de tabac qui s'est exceptionnellement bien adaptée à ce type de sol.

La comparaison des productions de fétuque élevée au cours des années 1977-78-79 et 80 entre les cases basaltiques 2-14 et les cases 12-24 à plan d'eau à 60 cm, prises comme référence de conditions optimales, permet de formuler les hypothèses explicatives suivantes (fig. 9) :

1. Propriétés physiques

Au cours de l'année d'implantation (1977), les rendements ont été assez voisins ; puis des différences sont apparues en 1978 et se sont amplifiées en 1979. Une dégradation progressive de la végétation s'est manifestée avec disparition d'un certain nombre de pieds. A la suite de cela, la prairie a été retournée sur l'ensemble des cases et un nouveau semis a été effectué au printemps 1980.

Cette évolution peut faire penser à une détérioration des propriétés physiques du sol basaltique. En effet, si la porosité totale est élevée (de l'ordre de 70 p. 100), il s'agit plutôt d'une porosité dite « fermée » qui ne permet pas toujours une aération suffisante.

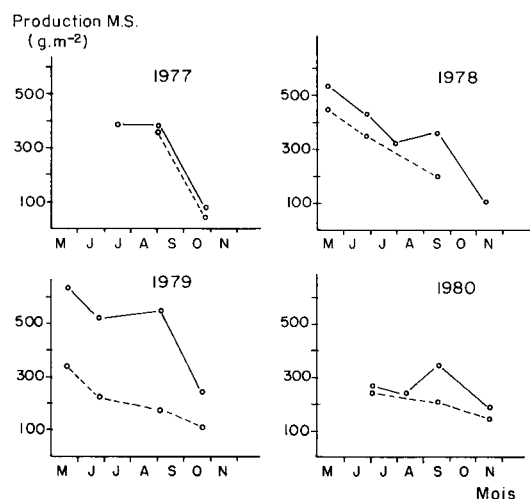


Figure 9
Production de matière sèche coupe par coupe de fétuque élevée de 1977 à 1980 dans les cases :

Dry matter production for each cut of tall fescue from 1977 to 1980 in :

----- basaltiques 2-14 ----- ; basaltic soil lysimeters 2-14
 ——— terre noire (nappe à 60 cm) 12-24 ——— ; black soil lysimeter of tall fescue 12-24 (water table at 60 cm).

Par tassement du sol, ce défaut a pu s'amplifier en limitant la croissance et l'activité racinaires.

2. Disponibilités du phosphore

On peut également observer une baisse de la production estivale plus marquée par les cases basaltiques que pour les autres cases à réserve en eau comparable.

Dès lors, on a cherché à déterminer si l'alimentation minérale pouvait constituer un facteur limitant. Des analyses de fourrage effectuées coupe par coupe en 1980, il ressort que les teneurs en N et K sont correctes (tabl. 3). Par contre, la richesse en P est insuffisante ; les valeurs sont inférieures à 0,25 p. 100 de P par rapport au poids de matière sèche, seuil au-dessous duquel on note habituellement une réponse positive de la fertilisation phosphatée (F. de MONTARD comm. pers.). En outre, la carence est plus marquée pour la coupe de septembre, c'est-à-dire pour la production qui a souffert de la sécheresse estivale.

La fertilisation phosphatée a pourtant été abondante puisque le bilan fumures-exportations pour les 18 années considérées est largement positif et égal à + 1 200 kg/ha. Dès lors, il faut admettre que la

TABLEAU 3

Analyse des fourrages des cases 2-14 pour l'année 1980
(en g d'élément pour 100 g de M.S.).

Analysis of forage (lysimeters 2-14) in 1980
(in g element/100 g dry matter).

Date des coupes	N	P	K
3-07-1980	2,94	0,20	4,45
17-09-1980	3,08	0,17	3,67
18-11-1980	3,03	0,21	3,10

mauvaise assimilation de P est imputable au fort pouvoir fixateur de ce type de sol (GACHON, 1966).

On peut ajouter que le manque de mobilité de cet élément qui en découle est encore accentué par la sécheresse (BLANCHET & BOSCH, 1974), ce qui expliquerait la dépression estivale des teneurs et des rendements.

V. CONCLUSION

Parmi les résultats recueillis, certains confortent des idées généralement admises, d'autres constituent des données plus originales qu'il serait intéressant de confirmer et d'analyser pour un travail ultérieur.

Au nombre des premiers, nous citerons :

— les relations linéaires entre la production végétale et la consommation d'eau. Mais, à cet égard, il faut noter une grande variabilité interspécifique, et même intraspécifique, celle-ci pouvant être attribuée aux fluctuations climatiques interannuelles et aux différences de comportement variétal,

— la classification des espèces selon leur tolérance à la sécheresse avec un bon recoupement avec les résultats acquis par ailleurs.

En ce qui concerne les observations pouvant être utilement prolongées par des études complémentaires, nous rappellerons le large éventail selon les espèces des régressions : production — consommation d'eau et l'hypothèse qu'il suggère : chaque espèce pourrait être caractérisée, dans une certaine mesure, par un

seuil de sécheresse au-delà duquel la décroissance relative de la photosynthèse étant plus importante que celle de la transpiration, l'efficacité de l'eau deviendrait inférieure à celle observée en condition hydrique non limitante. Ce phénomène constituerait un des éléments explicatifs de la tolérance à la sécheresse.

Enfin, nous soulignerons à nouveau le comportement particulier du sol basaltique à caractères andiques comparé à celui des deux autres sols étudiés : terre noire de Limagne et terre granitique. Malgré des réserves en eau très importantes, ce sol a une production généralement faible, quelle que soit l'espèce cultivée, même quand il s'agit de graminées fourragères dont c'est habituellement la vocation agricole. Deux hypothèses explicatives sont formulées :

— dégradation des propriétés physiques en liaison avec la porosité « fermée » de ce type pédologique,

— disponibilité phosphorique insuffisante pour satisfaire les besoins des cultures par suite du très fort pouvoir fixateur de ces sols. Toutefois, il ne faut pas oublier que les conditions climatiques dans lesquelles ces observations ont été effectuées (Limagne de Clermont-Ferrand) sont fort différentes de celles correspondant aux aires géographiques naturelles de ces types de sol (moyenne montagne du Massif Central). Il est logique de penser que les carences se manifestent davantage dans le premier site qui a un fort déficit hydrique estival.

Reçu le 9 avril 1983.

Accepté le 4 janvier 1984.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aho N., Daudet F. A., Vartanian Nicole, 1979. Evolution de la photosynthèse nette et de l'efficacité de la transpiration au cours d'un cycle de dessèchement du sol. *C. R. Acad. Sci. Paris*, série D, **288**, 501-504.
- Barrs H. D., 1968. Effect of cyclic variations in gas exchange under constant environmental conditions in the ratio of transpiration to net photosynthesis. *Physiol. Plant.*, **21**, 918-929.
- Blanchet R., Bosch M., Maertens C., Puech J., 1974. Influence de différents régimes hydriques sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les cultures. II. Influence de l'humidité du sol et des flux hydriques sur l'absorption des éléments minéraux par les racines. *Ann. Agron.*, **25** (5), 681-696.
- Brix H., 1962. The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato plants and loblolly pine seedlings. *Physiol. Plant.*, **15**, 10-20.
- Collier D., Robelin M., 1959. Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne. Résultats de quatre années d'observations lysimétriques. *Ann. Agron.*, **10** (4), 415-453.
- Daudet F. A., Valancogne Ch., 1976. Mesure des flux profonds de drainage ou de remontées capillaires ; leur importance dans le bilan hydrique. *Ann. Agron.*, **27** (2), 165-182.
- Duthion C., 1976. Variations des teneurs en acides organiques de racines de plantes soumises à un excès d'eau. *Ann. Agron.*, **27** (2), 207-220.
- Gachon L., 1966. Phosphore isotopiquement diluable et pouvoir fixateur des sols en relation avec la croissance des plantes. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **52**, 1108-1116.
- Marty J. R., Puech J., Maertens C., Blanchet R., 1975. Etude expérimentale de la réponse de quelques grandes cultures à l'irrigation. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **61**, (10), 560-567.
- Mingeau M., Robelin M., Martignac M., Aizac B., 1978. Evolution de l'assimilation nette d'une culture de dactyle sous l'action de contraintes hydriques progressivement croissantes. 13 p. Colloque terminal de l'A.T.P. « Bases physiologiques et génétiques de la production végétale. »
- Morizet J., Rousseau P., 1984. Résultats de 18 années d'observations lysimétriques sous climat limagnais. I. Caractéristiques hydriques de trois types de sols et dynamique de drainage. *Agronomie*, **4** (4), 315-326.
- Penning de Vries F.W.T., Brunsting A.H.M., Van Laar H.H., 1974. Products, requirements and efficiency of biosynthesis : a quantitative approach. *J. Theor. Biol.* **45**, 339-377.
- Puech J., Marty J. R., Maertens C., 1976. Valorisation de l'eau consommée par les cultures en présence ou non d'irrigation. *Bull. Tech. Inform. Min. Agric.*, **307**, 99-103.
- Robelin M., 1961. Influence du niveau de la nappe sur l'alimentation en eau des plantes. *Bull. Tech. Génie Rural*, n° H. S., 41-47.
- Robelin M., 1962. Rapports entre augmentation de poids sec et transpiration en condition de sécheresse. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **254**, 718-720.
- Roy J., 1980. *Comportement photosynthétique et hydrique de la feuille chez Dactylis glomerata L. Adaptation phénotypique et génotypique à la sécheresse*. Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Acad. de Montpellier, 118 p.
- Slatyer R. O., 1967. *Plant water relationships*. Academic Press, 29-34.
- Thomas F. H., 1962. The effect of depth to water table on growth and chemical composition of oat forage and field corn. *Soil Crop Sci. Soc. Fla. Proc.*, **22**, 73-78.