

Conséquence d'une contrainte hydrique appliquée à différents stades phénologiques sur le rendement des plantes de poivron

N Katerji ¹, A Hamdy ², A Raad ², M Mastrorilli ³

¹ INRA, station de bioclimatologie, 78850 Thiverval-Grignon, France;

² IAM, via Ceglie 23, 70100 Valenzano;

³ ISA, via Celso Ulpiani 5, 70125 Bari, Italie

(Reçu le 18 janvier 1991; accepté le 11 juin 1991)

Résumé — L'action d'une contrainte hydrique intervenant à différents moments du cycle végétatif du poivron a été étudiée en serre sur des plantes cultivées dans des conditions climatiques stables. La méthode retenue pour provoquer la contrainte hydrique est celle de Robelin, elle consiste à appliquer un coefficient de sécheresse identique (rapport des transpirations des plantes en cours de dessèchement et des transpirations maximales des mêmes plantes bien irriguées) pendant un certain temps et une certaine période de végétation. Cette méthode a été appliquée sur 4 stades phénologiques : végétatif, début de floraison, début de nouaison et formation des fruits. L'analyse théorique du coefficient de sécheresse a montré que les conditions climatiques (température, vitesse du vent) et la surface foliaire sont des éléments intervenant dans l'intensité de la contrainte hydrique provoquée lors de l'application de ce coefficient pour des courtes durées (heure, jour). Dans nos conditions expérimentales (conditions climatiques stables, coefficient de sécheresse appliqué à l'échelle décadaire), nous avons noté à partir des mesures directes de l'état hydrique de la plante, que la contrainte hydrique est d'intensité assez voisine au cours des stades phénologiques ayant une surface foliaire proche (stades floraison, nouaison et formation des fruits); en revanche, l'intensité de la contrainte hydrique est nettement inférieure lorsque la surface foliaire est faible (stade végétatif). Ces observations ont été à l'origine de quelques suggestions permettant de mieux adapter la méthode de Robelin à l'objectif recherché. L'évolution de la sensibilité des stades phénologiques soumis à une contrainte hydrique identique a été obtenue en comparant 4 composantes du rendement, analysées à l'échelle de la plante (poids frais et sec, la taille, et le nombre des fruits) par rapport à un témoin bien irrigué. La sensibilité est plus accusée au stade de nouaison qu'aux stades de floraison et de formation des fruits. Ces observations peuvent avoir des incidences sur la gestion de l'irrigation du poivron.

***Capsicum annum* = poivron / potentiel de base / composante du rendement / croissance foliaire**

Summary — **Consequences of water stress applied at different growth stages in the production of pepper plants.** The effects of water stress occurring at various periods during the growth cycle of peppers was studied in greenhouse-grown plants under stable climatic conditions (table II). The method used to provoke water stress was the Robelin method, which consists of applying an identical dryness coefficient (ratio of plant transpiration during drying-out phase to maximum transpiration of the same well-irrigated plants) for a certain time period and during a certain vegetative phase. This method was applied to 4 phenological stages: vegetative growth, early flowering, early fruit setting, and fruit formation (table I, fig 1). A theoretical analysis of the dryness coefficient shows that climatic conditions (temperature, wind speed) and leaf surface are elements affecting the intensity of the water stress provoked when this coefficient is applied for short time periods (h, d). Under the present experimental conditions (stable climatic conditions, dryness coefficient applied every 10 d) and using direct measurements of plant water status, the authors note that water stress is of comparable intensity during phenological stages with high leaf surfaces (flowering, early fruit setting, and fruit formation stages) and that, on the other hand, water stress intensity is markedly reduced when leaf surface is low (fig 2). These observations are the basis for certain suggestions aiming at a better adaptation of the Robelin method to research objectives. An evaluation of the sensitivity of phenological stages submitted to identical water stress was obtained by comparing (fig 3, table IV) 4 yield components analyzed on a plant scale (bulk and dry weight, fruit size and number) to those of a well-irrigated plant (table III). The sensitivity is greater at the early fruit setting stage than at the flowering or fruit formation stages. These observations could have an effect on methods for care and irrigation of peppers.

***Capsicum annum* = pepper / predawn leaf water potential / yield components / leaf growth**

INTRODUCTION

La gestion de l'eau en agriculture a pour objectif d'adapter au mieux l'alimentation hydrique aux besoins de la plante. D'où la nécessité de parfaire les connaissances sur le comportement de la plante en condition sèche, en localisant plus précisément les périodes de végétation sensibles à ces conditions (Azzi, 1954; Fisher et Hagan, 1965; Fogel, 1971). Sur le plan pratique, ces connaissances conduisent à définir les conditions de rentabilisation maximale des apports d'eau selon la consommation et la sensibilité du stade phénologique de la plante.

L'étude de la réaction des plantes à la sécheresse selon sa localisation au cours de la croissance a fait l'objet de nombreuses études. Dès 1923, Heller et Duly (cité par Robelin, 1963) ont abordé ce sujet; leur méthode de base consistait à maintenir l'humidité du sol à un niveau très bas pendant différentes périodes de végétation. Par la suite, beaucoup d'auteurs (Robins et Domingo, 1953; Azzi, 1954; Stanhill, 1957; Slatyer, 1963, Singh et Alderfer, 1966) se sont inspirés de cette méthode avec toutefois des différences de techniques (essais en serre ou au champ) ou de définition de la sécheresse (taux ou tension d'humidité du sol).

Robelin (1963, 1967) en s'appuyant sur les travaux de Hallaire (1961) critique la méthode qui consiste à définir la sécheresse uniquement par l'état hydrique du sol; car les conditions d'alimentation en eau des plantes sont variables, à état hydrique du sol constant, selon l'intensité des besoins, c'est-à-dire de la demande climatique. Il propose donc une nouvelle méthodologie qui consiste en l'application d'une sécheresse d'intensité identique pendant un certain temps et une certaine période de végétation. Cette sécheresse est déterminée par un coefficient appelé le coefficient de sécheresse (C_s) qui est le rapport entre la transpiration des plantes traitées (TR) et la transpiration des plantes témoins (TM) normalement alimentées en eau.

Différents auteurs ont appliqué la méthode proposée par Robelin; nous citons en particulier Doorenbos et Kassam (1980) qui ont fait la synthèse des travaux concernant la sensibilité de 25 espèces végétales. Il faut reconnaître que les résultats obtenus en appliquant la méthode de Robelin sont remarquablement homogènes; tous convergent pour définir, pour la plupart des espèces étudiées, une période critique de sensibilité à la sécheresse vers les phases floraison-formation des fruits.

On peut donc penser que le problème est déjà presque résolu; il nous manque cependant un certain nombre de précisions. On note, par exemple, que la méthode de Robelin suppose qu'un même coefficient de sécheresse appliqué pour une durée égale à différentes périodes de végétation provoque l'apparition d'une contrainte hydrique d'intensité égale sur les différents traitements. Or, un même coefficient de sécheresse peut correspondre à des niveaux de TM variables, selon le climat et le développement de la surface foliaire (Tanner *et al*, 1960; Perrier, 1975), mais à notre connaissance, aucune tentative n'a été faite pour analyser le rôle de ces 2 paramètres sur l'intensité de la contrainte hydrique provoquée par l'application d'un coefficient de sécheresse. On peut se demander également si l'hypothèse selon laquelle les plantes témoins sont systématiquement en condition hydrique optimale et stable au cours de l'expérience se trouve justifiée dans la réalité.

Le but de notre étude est d'analyser, en appliquant la méthodologie proposée par Robelin, l'action de la contrainte hydrique appliquée à différents stades de croissance sur le rendement du poivron. Le choix de cette plante est dicté par l'absence d'informations précises concernant la sensibilité de cette espèce à la contrainte hydrique et par son importance économique dans les régions méditerranéennes de l'Italie.

L'application de la méthodologie adoptée sera précédée d'une analyse théorique du coefficient de sécheresse afin de dégager le rôle respectif des facteurs climatiques et de la surface d'échange sur l'intensité de la contrainte hydrique. Les conclusions de cette analyse seront prises en compte dans l'établissement du protocole expérimental à travers un contrôle strict des conditions climatiques et un suivi direct de l'état hydrique des plantes au cours des expériences. Cette démarche originale a l'avantage de confronter les résultats expérimentaux et les concepts, elle permettra également de donner des interprétations et des conclusions probablement moins discutables et plus généralisables de la méthodologie adoptée pour déterminer les stades sensibles à la sécheresse.

ANALYSE THÉORIQUE DU COEFFICIENT DE SÉCHERESSE

Le but de cette analyse est de dégager le rôle des facteurs climatiques et de la surface d'échange sur la contrainte hydrique subie par la

plante lors de l'application du coefficient de sécheresse.

Les études théoriques de Perrier (1975) permettent de hiérarchiser et d'analyser le rôle des différentes variables (climat, plante) intervenant sur l'évaporation réelle (*ETR*) d'une culture. D'après ces études, l'*ETR* d'une culture bien couvrante ($ETR \approx Tr$) s'écrit sous la forme suivante :

$$ETR = \frac{P'(Rn + G) + \Gamma(LM/RT) P'[(Ta - Tr)/ra]}{P' + \Gamma(ra + rv)} \quad (1)$$

avec :

- Rn* : le bilan radiatif ($W \cdot m^{-2}$);
- G* : densité de flux conductif à la surface du sol ($W \cdot m^{-2}$);
- P'* : dérivée de la pression de vapeur saturante pour la température de l'air *Ta* ($Pa \cdot ^\circ C^{-1}$);
- Γ : constante psychrométrique ($Pa \cdot ^\circ C^{-1}$);
- R* : constante des gaz parfaits ($8,32 \text{ j} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot K^{-1}$);
- M* : masse molaire de l'eau ($18 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$);
- T* : température de l'aire (K);
- L* : chaleur latente de vaporisation ($J \cdot \text{kg}^{-1}$);
- Ta* et *Tr* : température de l'air et du point de rosée de l'air au niveau *Zr* ($^\circ C$);
- ra* : résistance aérodynamique de l'air ($s \cdot m^{-1}$) calculée entre le sommet de végétation *Zh* et la hauteur de référence *Zr* (*Zr* = 3 m au-dessus de la végétation);
- rv* : résistance du couvert à la diffusion de vapeur d'eau ($s \cdot m^{-1}$) qui s'exprime d'après Monteith (1965) par la relation suivante :

$$rv \approx rs/2 LAI \quad (2)$$

avec :

- rs* : résistance stomatique moyenne de la plante ($s \cdot m^{-1}$);
- LAI* : indice foliaire.

On note que l'action de la contrainte hydrique sur l'*ETR* se manifeste à travers la résistance stomatique *rs*.

La formule de Penman (1948) qui suppose la saturation de l'air au niveau *Zh* et l'énergie (*Rn* + *G*) entièrement disponible à ce niveau correspond en réalité à un évaporation potentielle *Ep** qui prend l'expression suivante :

$$E_{p^*} = \frac{P'(Rn + G) + \Gamma(LM/RT) P'[(Ta - Tr)/ra]}{P' + \Gamma} \quad (3)$$

En introduisant *Ep** dans la relation (1), l'*ETR* s'exprime sous la forme suivante :

$$ETR = \frac{E_{p^*}}{1 + \frac{\Gamma}{P' + \Gamma} \frac{rv}{ra}} \quad (4)$$

En condition hydrique non limitante, l'évapotranspiration devient maximale (*ETM*). En admettant par souci de simplicité que, toutes conditions égales (climat, stade de croissance), *Ep** et *ra* restent identiques à celles figurant dans l'équation (4), on peut exprimer l'*ETM* par la relation suivante :

$$ETM = \frac{E_{p^*}}{1 + \frac{\Gamma}{P' + \Gamma} \frac{rvm}{ra}} \quad (5)$$

avec : $rvm \approx rsm/2LAI \quad (6)$

rsm : résistance stomatique minimale moyenne de la plante.

Le coefficient de sécheresse *Cs* s'écrit alors sous la forme suivante :

$$Cs = ETR/ETM = \frac{1 + \frac{\Gamma}{P' + \Gamma} \frac{rvm}{ra}}{1 + \frac{\Gamma}{P' + \Gamma} \frac{rv}{ra}} \quad (7)$$

En remplaçant *rv* et *rvm* par leurs valeurs exprimées dans les relations (2) et (6), on peut dégager une expression de la contrainte hydrique exprimée sous la forme suivante :

$$\frac{rs}{rsm} = \frac{1}{Cs} + \frac{(P' + \Gamma)(1 - Cs)ra \cdot 2LAI}{\Gamma Cs rsm} \quad (8)$$

En l'absence d'un vieillissement physiologique de la plante, la résistance *rsm* peut être considérée comme constante, il apparaît alors d'après la relation (8) que la résistance stomatique d'un

couvert sur lequel est appliqué un coefficient de sécheresse donné est :

- fonction croissante de P' , donc de la température de l'air T_a ;
- fonction croissante de ra . En condition de neutralité thermique, cette résistance est une fonction de la vitesse du vent (U) au niveau Z_r et Z_h (Perrier, 1975);
- fonction croissante de l'indice foliaire LAI .

En conditions climatiques stables (T_a et U constantes au niveau de Z_r), la résistance rs dépend du produit $ra \cdot 2LAI$; plus ce produit est élevé, plus la résistance rs sera importante. Or le produit $ra \cdot 2LAI$ évolue avec les stades de croissance puisque ra diminue avec l'augmentation de Z_h tandis que l'indice foliaire augmente avec la croissance végétative. Comme les variations de LAI sont plus importantes dans ce produit, on observe aussi bien pour des plantes à densité foliaire faible (ex : le maïs, *cf* Perrier, 1975) ou des plantes à densité foliaire forte (ex : le blé, la luzerne; *cf* Katerji, 1977, 1982) que les valeurs du produit $ra \cdot 2LAI$ augmente systématiquement, et par conséquent rs , depuis la levée et jusqu'à la croissance maximale des feuilles de la plante.

L'analyse théorique précédente est hypothétique, car elle s'appuie sur des équations physiques valables pour des pas de temps courts, de l'ordre de l'heure ou de la journée, alors que le coefficient de sécheresse est appliqué par Robelin à l'échelle de la décade. On note ensuite que le rapport rs/rsm qui a une signification essentiellement en terme de transpiration n'est pas forcément reliable à d'autres aspects de la physiologie, telles que la croissance ou la photosynthèse qui dépendent plutôt de l'état hydrique de la plante (Katerji et Hallaire, 1984). Néanmoins, cette analyse apporte des éléments d'appréciation du rôle du climat et de la croissance de la culture sur la contrainte hydrique. Ces éléments seront pris en considération dans l'établissement de notre protocole expérimental, en effectuant d'abord les expériences dans des conditions climatiques les plus stables possibles et en renforçant ensuite l'application de la méthode de Robelin par un contrôle direct de l'état hydrique de la plante à différents stades de croissance de la culture.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les expériences ont été conduites au cours de l'année 1989 à l'institut agronomique méditerranéen

de Bari (Italie) sur des plantes de poivron (*Capsicum annum*) (variété Cornetto) cultivées en pots, sous serre dotée d'un système de régulation de la température et de l'humidité de l'air. Les pots ont été placés au milieu de la serre pour éviter l'effet de bordure. L'éclairage à l'intérieur de la serre est réduit de 20% par rapport à l'extérieur.

Conditions de culture

Les graines sont semées dans des pots, puis transplantées au stade de 10 feuilles (20 j avant le début de l'expérience) dans des pots en plastique avec une densité de 4 plantes par pot. Ces pots, dont le nombre s'élève à 132, sont remplis de 21 kg de terre ayant la texture suivante : sable 76%, argile 20% et limon 4%. Nous avons vérifié que ce volume du sol peut retenir 4 kg d'eau à la capacité au champ et que la densité apparente du sol était de 1,4. Pour empêcher l'évaporation du sol, la surface des pots est couverte de polyéthylène noir. Les principaux stades phénologiques ont été notés lorsque 50% des plantes étudiées l'ont atteint. Ces stades se situent aux dates suivantes :

- semis : 18 janvier;
- levée : 3 février;
- transplantation : 18 mars;
- début de floraison : 12 avril;
- début de nouaison : 24 avril;
- récolte : 20 juin.

Dans le cadre de notre étude sur la sensibilité du poivron, nous retenons 4 stades successifs : végétatif (12 feuilles), début de floraison, début de nouaison et formation du fruit.

Conduite de l'expérience

La conduite de l'essai est celle proposée par Robelin, 1963, pour l'étude du comportement des plantes en conditions de contrainte hydrique. Le rapport entre la transpiration (TR) d'un traitement T et la transpiration des plantes témoins (TM) normalement alimentées en eau caractérise le niveau d'alimentation hydrique réalisé.

Durant la période d'application de la sécheresse, les irrigations sont conduites de telle sorte que la transpiration soit, sur l'ensemble de la période considérée, une fraction déterminée de celle du témoin dont la transpiration est contrôlée journalièrement par pesée. Dans le cas présent, nous nous étions proposés de réaliser une intensité de sécheresse de 50%, mais il n'a pas été possible d'éviter une certaine variation autour de cette valeur; l'intensité moyenne se situe à $52 \pm 5\%$. Enfin, l'analyse statistique n'a pas permis de mettre en évidence au sein de chaque traitement des intensités de sécheresse significativement différentes de l'intensité moyenne mentionnée plus haut.

Le tableau I présente un récapitulatif du calendrier des traitements : le témoin correspond aux plantes bien alimentées depuis la transplantation; les traitements T1, T2, T3 et T4 correspondent à une contrainte hydrique appliquée durant les stades successifs du développement de la plante : stade végétatif (12 feuilles), début de floraison, début de nouaison et formation de fruits. Avant et après l'application de la contrainte, l'alimentation hydrique de chaque traitement est celle du témoin. Nous avons divisé les 132 pots en 5 lots correspondant aux 5 traitements précédents de façon à ce qu'il soit possible, une fois le prélèvement des échantillons nécessaires à la détermination des paramètres biologiques réalisé, d'effectuer l'analyse du rendement et de ses composantes sur environ 10 pots, soit 40 plantes en moyenne par traitement.

Conditions climatiques

Les conditions climatiques dans la serre ont été apprécées à partir des capteurs installés sous la serre. Les paramètres climatiques enregistrés pendant l'expé-

Tableau I. Date, durée et stade phénologique relatifs aux quatre traitements de containte hydrique étudiés.

Traitement	Date du traitement	Durée (j)	Stade
Témoin	18 mars 89 = Jour J	97	Transplantation jusqu'à la récolte
T1	J + 18 à J + 35 4 avril 89 – 20 avril 89	17	12 feuilles
T2	J + 36 à J + 55 21 avril 89 – 9 mai 89	19	Début de floraison
T3	J + 56 à J + 75 10 mai 89 – 28 mai 89	19	Début de nouaison
T4	J + 76 à J + 97 2 mai 89 – 19 juin 89	21	Formation des fruits

Tableau II. Mesures climatiques moyennes sous serre au cours des quatre traitements de contrainte hydrique étudiés : températures de l'air et maximale (Tmax) minimale (Tmin), moyenne (Tmoy), et humidité de l'air maximale (Hmax) minimale et moyenne (Hmoy), (Hmin).

Trait	Date	Tmax °C	Tmin °C	Tmoy °C	Hmax %	Hmin %	Hmoy %
T1	J + 18 à J + 35	25	16	21,5	88	34	61
T2	J + 36 à J + 55	28	16	22	86,5	35,5	61
T3	J + 56 à J + 75	30	17	23,5	88,5	32,5	60,5
T4	J + 76 à J + 97	30	18	24	89,5	28	59

rience sont : les valeurs minimales et maximales de la température et de l'humidité de l'air. Le tableau II donne ces valeurs au cours des différents traitements. On note que ces valeurs sont relativement stables.

Caractérisation de l'état hydrique de la plante

Pour caractériser l'état hydrique des plantes, nous avons utilisé le potentiel de base qui est un indicateur de l'équilibre sol-plante (Meyer et Green, 1980; Katerji et Hallaire, 1984). De plus, ce paramètre, mesuré au lever du soleil, présente l'avantage d'être indépendant des conditions météorologiques observées au cours de la journée.

La détermination pratique du potentiel de base s'est faite au moyen d'une chambre à pression à une cadence hebdomadaire pour le traitement témoin et environ trois fois par semaine pour les autres traitements. Chaque valeur du potentiel de base est la moyenne des mesures de 9 feuilles choisies dans les strates supérieures du végétal.

Caractérisation de la croissance des plantes et analyse du rendement

Un suivi régulier de la surface foliaire a été réalisé sur les plantes témoins par prélèvement de 4 plantes dont la surface foliaire a été mesurée (*leaf area meter* - Licor 1300). Pour les autres traitements, un contrôle de la surface foliaire a été réalisé au moment où cet indice a atteint sa valeur maximale. Le rendement du poivron a été analysé sur environ 40 plantes par traitement. Quatre critères ont été retenus pour apprécier le rendement : le nombre et le poids frais des fruits produits par plante, leur taille, et la matière sèche des fruits. Les trois premiers critères définissent la valeur commerciale de la production, tandis que le dernier critère, quoiqu'il ne soit pas lié à la valeur commerciale de la production, permet, par comparaison avec le poids frais des fruits, d'analyser l'effet de la contrainte hydrique sur la teneur en eau des fruits. La mise en évidence des différences significatives pour les quatre critères précédents entre traitements, ou entre traitements et témoins, a été réalisée a moyen

du test «Student-Newman-Keuls» aux seuils de 5 et de 1%.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Observations sur la croissance des plantes

L'évolution de la surface du traitement témoin est présentée sur la figure 1. On note que la surface foliaire est faible durant le traitement 1; elle double pratiquement au cours du traitement 2. La surface foliaire est maximale au cours du traitement 3, et légèrement plus faible au cours du traitement 4. Les valeurs maximales de surface foliaire des plantes observées sur les 5 traitements sont de : 1 262, 1 173, 1 140, 1 221, 1 102 cm², respectivement pour les traitements témoin, T1, T2, T3 et T4. On note que les valeurs maximales de surface foliaire sur ces 5 traitements sont pratiquement du même ordre de grandeur. Pour les traitements T3 et T4, cela paraît logique puisque ces traitements ont été appliqués sur des plantes ayant atteint la croissance foliaire maximale. Pour les traitements T1 et T2, cela peut correspondre soit à un effet négligeable du traitement appliqué sur la croissance, soit à un phénomène de rattrapage au cours des stades suivants qui permet à la plante de retrouver un niveau proche de témoin, comme cela a été observé sur d'autres cultures (Mingéau, 1975).

Observations sur l'état hydrique des plantes

L'objectif ici est d'apprécier les conséquences du traitement appliqué sur l'état hydrique des

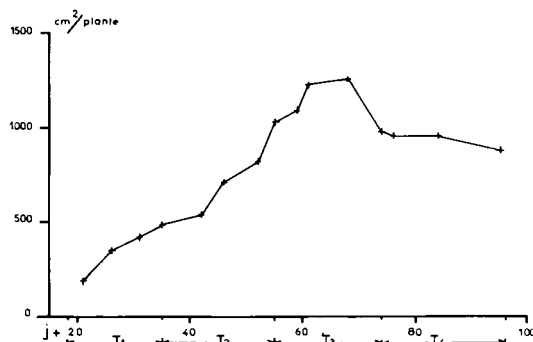


Fig 1. Croissance foliaire observée sur les plantes du traitement témoin depuis la transplantation et jusqu'à la récolte. Sont indiqués également sur la figure les périodes correspondant aux 4 traitements de contrainte hydrique.

plantes. D'une façon précise, on cherche à vérifier :

– si l'état hydrique du témoin est stable au cours de l'expérience;

– si la méthode de Robelin provoque l'apparition d'une contrainte hydrique d'intensité égale sur les différents traitements.

Les valeurs du potentiel de base observées sur les plantes témoins et les différents traitements avant et après l'application des traitements sont présentées sur la figure 2.

On note d'abord que les valeurs du potentiel de base observées sur les plantes témoins sont remarquablement stables. La valeur moyenne du potentiel de base sur toute la période considérée est de $-0,26 \pm 0,024$ MPa. L'évolution du potentiel de base sur le traitement 1 est nettement plus faible comparativement aux traitements 2, 3 et 4. En effet la valeur minimale observée sur le traitement est de $-0,7$ MPa alors que celles observées sur les 3 autres traitements sont respectivement de $-1,4$, $-1,7$ et $-1,6$ MPa. On note enfin que les valeurs minimales du potentiel de base observées au cours des traitements 2, 3 et 4 peuvent être classées en fonction de la surface foliaire (fig 1); plus celle-ci est élevée, plus les valeurs minimales du potentiel diminuent. Bien que ce classement soit en accord avec l'analyse théorique présentée dans l'*Introduction*, il sera prudent de considérer l'intensité de sécheresse au cours des traitements 2, 3 et 4 comme voisine à cause de la faible différence entre les valeurs minimales observées au cours de ces traitements, d'une part, et du fait qu'il n'était pas possible d'éviter une certaine variation autour de la valeur moyenne du coefficient de sécheresse appliqué, d'autre part.

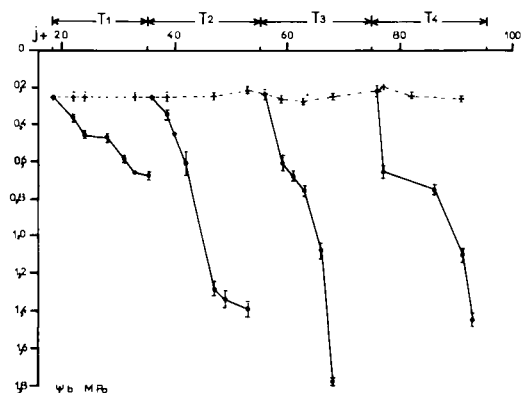


Fig 2. Évolution du potentiel de base en fonction de la date de transplantation. Moyennes et écart type sur le témoin (---) et sur les 4 traitements de contrainte hydrique.

Observations sur le rendement des plantes

On se propose ici d'analyser les conséquences du traitement appliqué sur le rendement des plantes apprécié à partir de 4 critères analysés à l'échelle de la plante : les poids frais et sec, la taille et le nombre de fruits par plante. Ceci se fera en 2 parties. Dans un premier temps, la comparaison se fera par rapport au témoin; dans un deuxième temps, nous comparerons les divers traitements entre eux.

Les données, concernant les quatre paramètres retenus, observées sur 44 plantes du traitement témoin sont présentées dans le tableau III. Pour les autres traitements, elles sont présentées (fig 3) en pourcentage par rapport au témoin.

En ce qui concerne le poids frais des fruits par plante, les traitements relatifs aux stades de floraison (T2), nouaison (T3) et formation de fruit (T4) sont significativement différents au seuil de 1% par rapport au témoin, tandis que le stade végétatif ne l'est pas (même au seuil de 5%).

Pour la taille des fruits produits par plante, le traitement T3 est significativement différent au seuil de 1% par rapport au témoin, alors que pour les 3 autres la différence n'est pas significative.

Tableau III. Rendement et composantes du rendement par plante de poivron. Moyennes et écarts types observés sur un échantillon de 44 plantes du traitement témoin.

Poids des fruits frais (g)	Taille des fruits (cm)	Nombre de fruits	Poids sec des fruits (g)
161 ± 6,7	12,8 ± 0,46	2,86 ± 0,19	17 ± 1,35

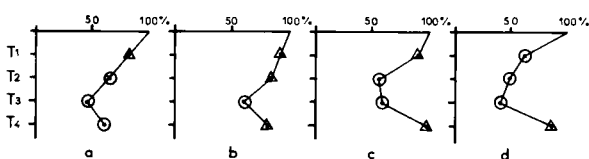


Fig 3. Variations du rendement et de ses composantes exprimées en % du témoin en fonction des 4 traitements de contrainte hydrique étudiés : a – le poids frais des fruits par plante; b – la taille des fruits par plante; c – le nombre de fruits par plante; d – le poids sec des fruits par plante. Δ : non significatif; O : significatif à $P \leq 1\%$.

Pour le nombre de fruits par plante, les traitements T2 et T3 montrent une différence significative par rapport au témoin au seuil de 1%, alors que pour les traitements T1 et T4, cette différence n'est pas significative.

Enfin, pour la matière sèche des fruits, les traitements T1, T2 et T3 sont significativement différents par rapport au témoin au seuil de 1% alors que le traitement (T4) est non significatif.

La comparaison des traitements entre eux est présentée dans le tableau IV. Ces comparaisons conduisent aux observations suivantes :

- pour le poids frais de fruits, le traitement T3 est significativement différent au seuil de 1% des traitements T1 et T2 seulement;
- pour la taille des fruits, le traitement T3 est significativement différent au seuil de 1% des 3 autres traitements, alors que ces 3 ne le sont pas entre eux.
- pour le nombre de fruits par plante, les traitements T2 et T3 sont significativement différents des traitements T1 et T4 au seuil de 1%; les traitements T2 et T3 et les traitements T1 et T4 ne sont pas différents entre eux;

Tableau IV. Seuils à 5% (*) et 1% (**) de signification de différences entre les moyennes de chaque traitement de contrainte hydrique réalisés par le test «Student-Newman-Keuls» pour les paramètres suivants : a - le poids frais des fruits par plante; b - le poids sec des fruits par plantes; c - la taille des fruits par plante; d - le nombre des fruits par plante.

	T1	T2	T3	T4
a				
T1	–	ns	**	ns
T2	ns	–	**	ns
T3	**	**	–	ns
T4	ns	ns	ns	–
b				
T1	–	ns	ns	*
T2	ns	–	ns	**
T3	ns	ns	–	**
T4	*	**	**	–
c				
T1	–	ns	**	ns
T2	ns	–	**	ns
T3	**	**	–	**
T4	ns	ns	**	–
d				
T1	–	**	**	ns
T2	**	–	ns	**
T3	**	ns	–	**
T4	ns	**	**	–

– enfin, pour la matière sèche des fruits, les traitements T2 et T3 sont significativement différents du traitement T4 au seuil de 1%, tandis que le traitement T1 est significativement différent du traitement T4 au seuil de 5% seulement.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les expériences menées dans le cadre de cette étude apportent des éléments intéressants concernant :

- la méthodologie proposée par Robelin pour définir les stades phénologiques sensibles à la sécheresse;
- l'action de la contrainte hydrique appliquée à différents stades de croissance des plantes de poivron sur le rendement.

La détermination des stades phénologiques sensibles ne peut se réaliser que si la méthode retenue provoque une contrainte hydrique d'intensité égale sur tous les stades en question. La méthode couramment utilisée dans la littérature est celle de Robelin : elle propose de provoquer cette contrainte en appliquant un coefficient de sécheresse identique sur les stades phénologiques retenus. Nous avons démontré d'abord à partir d'une analyse théorique valable pour des durées courtes (h , j), que l'application d'un même coefficient de sécheresse à différents stades phénologiques provoquait plutôt une contrainte hydrique variable selon les conditions climatiques mais surtout selon l'évolution de la surface d'échange. Nous avons ensuite vérifié à partir des mesures directes de l'état hydrique de la plante, obtenues dans le cadre d'une expérimentation réalisée sur des plantes de poivron et menée dans des conditions particulières (conditions climatiques stables, coefficient de sécheresse appliqué à l'échelle décadaire), que la méthode de Robelin conduisait à une contrainte hydrique d'intensité voisine uniquement lorsqu'elle était appliquée sur des stades phénologiques ayant une surface foliaire voisine (stades de floraison, nouaison et formation de fruit); en revanche, pour le stade végétatif qui correspond au stade du démarrage de la culture, l'intensité de la sécheresse était nettement inférieure. Nous avons également vérifié que les plantes témoins se trouvaient effectivement en condition hydrique stable au cours de l'expérience. Les mesures du potentiel de base réalisées sur ces plantes étaient identiques à celles observées sur des plantes bien alimentées en eau de plusieurs

espèces végétales telles que la luzerne (Katerji, 1982), la tomate (Katerji *et al*, 1988) et le maïs (Tardieu *et al*, 1990).

Des observations précédentes découlent quelques suggestions permettant de mieux adapter la méthode de Robelin à la détermination des stades phénologiques sensibles à la contrainte hydrique. Nous suggérons d'abord d'appliquer des coefficients de sécheresse échelonnés selon la croissance végétative des plantes – plus la surface foliaire est faible, plus le coefficient de sécheresse appliqué doit être faible –, ensuite, puisque le coefficient de sécheresse a une signification essentiellement en terme de transpiration, de vérifier à partir des indicateurs directs de l'état hydrique de la plante que les traitements appliqués conduisent à des contraintes hydriques d'intensité identique sur les stades phénologiques retenus, enfin de réaliser les expériences dans des conditions climatiques aussi stables que possible.

Compte tenu des aspects méthodologiques analysés précédemment, la sensibilité des différents stades phénologiques du poivron ne peut être analysée dans cette étude que sur les 3 stades floraison, nouaison et formation des fruits. Cette analyse conduit aux observations suivantes :

- le stade de nouaison (T3) est le stade le plus affecté par la contrainte hydrique; il est systématiquement différent du témoin pour les 4 critères retenus : poids frais et sec des fruits, taille, et nombre de fruits par plante;
- le stade de floraison (T2) arrive en second rang; en effet, il est significativement différent du témoin pour 3 des 4 critères étudiés : poids frais et sec ainsi que le nombre de fruits par plante;
- le stade de formation des fruits (T4) arrive au troisième rang puisque la contrainte hydrique affecte seulement le poids frais des fruits. Cette chute du poids frais correspond uniquement à une action de la contrainte hydrique sur la teneur en eau des fruits puisqu'il n'y a pas de différence significative de matière sèche entre le traitement T4 et le témoin.

En ce qui concerne le stade végétatif (T1), on peut se demander si les conséquences de la contrainte hydrique, qui se manifestent dans le cas présent au niveau de la matière sèche des fruits et dans un degré nettement moindre au niveau du poids frais des fruits, seraient beaucoup plus importantes si le traitement T1 avait subi une contrainte hydrique aussi sévère que les 3 autres traitements.

Le souci de préserver une population de plantes suffisamment grande au sein de chaque traitement pour analyser le rendement et ses composantes nous a empêché d'analyser finement le rôle de la contrainte hydrique sur la croissance et de mettre en évidence l'existence éventuelle d'un phénomène de rattrapage signalé par d'autres auteurs (Mingeau, 1975; Menoux-Boyer, 1980). Ces points particuliers seront abordés dans le cadre des expériences futures réalisées sur la même espèce végétale.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Cosimo Lacirignola, directeur de l'IAM (Bari) pour son appui indispensable à la réalisation de cette étude.

RÉFÉRENCES

- Azzi B (1954) *L'Écologie agricole*. Baillière, Paris
- Doorenbos J, Kassam A (1980) Réponse des rendements à l'eau. *Bulletin FAO Irrigation et Drainage* 33, 235 p
- Fisher RA, Hagan RM (1965) Plant water relations, irrigation management and crop yield. *Exp Agric* 1, 161-177
- Fogel MM (1971) Optimum control of irrigation water application. *J Hydrol* 28, 343-358
- Hallaire M (1961) Irrigation et utilisation des réserves naturelles. *Ann Agron* 12, 87-97
- Katerji N (1977) contribution à l'étude de l'évapotranspiration réelle du blé tendre d'hiver. Application à la résistance du couvert en relation avec certains facteurs du milieu. Thèse docteur-ingénieur, Univ Paris VII, 121 p
- Katerji N (1982) Étude et modélisation des transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. Thèse docteur es sciences, Univ Paris VII, 198 p
- Katerji N, Hallaire M (1984) Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie* 4, 999-1008
- Katerji N, Itier B, Ferreira I (1988) Étude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride. *Agronomie* 8, 425-433
- Menoux-Boyer Y (1980) Effets et post-effets d'une sécheresse édaphique temporaire modérée sur la croissance du lin : influence des conditions énergétiques du milieu. *Acta Oecol Oecol Plant* 1, 55-69
- Meyer WS, Green GC (1980) Water use by wheat and plant indicators of available soil water. *Agron J* 72, 253-257
- Mingeau M (1975) Étude de la sensibilité du soja à la sécheresse. *Inf Techn CETIOM* 47, 1-14
- Monteith JL (1965) Evaporation and environment. In: *The state and movement of water in living organisms*. Symp Soc Exp Biol XIX, University Press, Cambridge, 205-234
- Penman HL (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc R Soc London* 193, 120-145
- Perrier A (1975) Étude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III. Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. *Ann Agron* 26, 229-243
- Robelin M (1963) Contribution à l'étude du comportement du maïs grain vis-à-vis de la sécheresse. Journées Internationales de l'Irrigation, AGPM, Paris, 69-76
- Robelin M (1967) Action et arrière-action de la sécheresse sur la croissance et la production du tournesol. *Ann Agron* 18, 579-599
- Robins JS, Domingo CE (1953) Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. *Agron J* 45, 618-621
- Singh R, Alderfer RB (1966) Effects of soil moisture stress at different periods of growth of some vegetables. *Soil Sci* 101, 69-80
- Slatyer PJ (1963) The effect of wet or dry soil conditions at different growth stages on the components of yield of a pea crop. *J Horticult Sci* 38, 321-324
- Stanhill G (1957) The effect of differences in soil moisture status on plant growth. A review and analysis of soil moisture regime experiments. *Soil Sci* 84, 205-214
- Tanner CB, Paterson AE, Love JR (1960) Radiant energy exchange in a corn field. *Agron J* 52, 373-379
- Tardieu F, Katerji N, Bethenod O (1990) Relation entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le maïs. *Agronomie* 10, 541-549