

Amélioration et stabilisation des rendements du pois en graines et fourrage en zone semi-aride du Maroc

N. Benbrahim, F. Gaboun

Le pois fourrager présente un grand intérêt écologique et nutritionnel (apport protéique) pour les exploitations d'élevage des régions semi-arides. Cependant, son niveau de production est faible et considérablement affecté par les variations climatiques ; l'adaptation variétale offre des perspectives intéressantes.

RÉSUMÉ

Sept variétés de pois fourrager ont été étudiées dans quatre environnements contrastés. L'interaction Génotype x Environnement a été hautement significative pour le rendement en fourrage et en graines ; les paramètres de stabilité ont été étudiés pour améliorer la régularité des rendements dans ces environnements à climat contrasté. Les variétés V3, V5 et V6 sont performantes et stables pour le fourrage et V1, V4 et V5 pour les graines. Le gain génétique moyen par rapport au témoin (Naïma) est significatif. La variété V5 a une large capacité d'adaptation et peut être exploitée en fourrage ou en graines. Elle a été inscrite au catalogue officiel marocain en 2007 sous le nom de Ezzahra. Par ailleurs, le froid au cours de la floraison et de la nouaison réduit de 50% le rendement en graines, et de 75% quand il est associé au stress hydrique.

MOTS CLÉS

Culture mixte, facteur climat, facteur milieu, Maroc, *Pisum sativum*, pois, production fourragère, production végétale, sélection variétale, variabilité génétique, variations interannuelles, zone semi-aride.

KEY-WORDS

Climatic factor, cultivar breeding, dual-purpose cropping, environmental factor, field pea, forage production, genetic variation, inter-annual variations, Morocco, *Pisum sativum*, plant production, semi-arid region.

AUTEURS

Unité de Recherche de Production Animales et Fourrages, INRA, CRRA - Rabat (Maroc) ; nadiabenbrahim@gmail.com

Introduction

Les zones semi-arides, avec une pluviométrie annuelle moyenne qui varie de 200 à 400 mm, représentent 87% des terres agricoles au Maroc. Elles sont caractérisées par une variabilité interannuelle et intra-annuelle des précipitations et des températures (AGOUMI, 2002). Le système de culture est dominé par la céréaliculture (72%) avec dominance de l'orge et par l'élevage ovin semi-intensif qui représente 25% du cheptel national (BAMOUIH, 1998 ; TARHZOUTI *et al.*, 2006). L'alimentation du cheptel est basée essentiellement sur les produits céréaliers (paille, chaume) largement déficitaires en protéines, les parcours et les jachères. Cependant, la contribution des parcours aux besoins du cheptel ne cesse de diminuer à cause de leur exploitation excessive et incontrôlée, conjuguée aux aléas climatiques qui favorisent la dégradation des ressources naturelles (FAO, 1996). Quant à la part des jachères (28% de la SAU), elle varie selon la pluviométrie annuelle, et celle des cultures fourragères (9% SAU) reste médiocre devant le besoin croissant en fourrage de bonne qualité des exploitations d'élevage (EL KHYARI, 1987). L'utilisation du concentré (orge) est très limitée et l'achat de sources protéiques (tourteau et féverole) reste très faible à cause de leur prix élevé. Cette situation conduit à une faible productivité et par conséquent à une faible rentabilité de l'élevage.

Le **pois fourrager** (*Pisum sativum ssp. arvense* L.) est une légumineuse fourragère de grand **intérêt nutritionnel et environnemental**. Les agriculteurs accordent beaucoup d'intérêt à cette culture en raison de ses effets bénéfiques sur le sol et de la quantité de son fourrage, riche en protéines et bien valorisé en alimentation animale. Cultivé en pur ou en mélange avec une céréale, il peut être utilisé en foin (16% MAT), en ensilage (18% MAT) ou en graines (25% MAT) comme source de protéines dans une ration alimentaire à base de céréales. Même ses résidus de culture (fanés ou pailles) sont de bonne valeur alimentaire (OELKE *et al.*, 1991). Néanmoins, son niveau de production faible et instable reste tributaire des conditions climatiques locales car la quasi-totalité de sa superficie est ensemencée en conditions pluviales avec des populations traditionnelles non améliorées. De plus, le prix des semences de la seule variété inscrite au catalogue officiel, Naïma, est relativement élevé.

Dans le but d'**optimiser les rendements et de stabiliser la production** du pois fourrager en dépit des fluctuations imprévisibles du climat (séries de froid hivernal, de chaleur printanière et des sécheresses récurrentes), **nous avons intégré les facteurs climatiques** comme contrainte principale **pour l'amélioration génétique du pois**.

L'hypothèse sous-jacente de ce travail est que le niveau d'adaptation du pois serait lié à la **plasticité de la croissance végétative du génotype**, elle-même liée à une meilleure réponse aux pluies en termes de productivité et à une bonne tolérance aux variations de températures.

Le gain génétique du rendement à travers l'adaptation pourrait jouer un rôle déterminant dans l'amélioration de la production végétale et animale au Maroc en assurant l'autonomie alimentaire des exploitations d'élevage, tout en offrant un bon bilan économique et environnemental.

1. Matériels et méthodes

L'approche adoptée repose donc sur l'évaluation de l'effet du changement climatique sur le niveau et la stabilité de la production variétale, tout en soulignant les phases critiques de l'élaboration du rendement à travers l'analyse de l'interaction Génotype x Environnement en utilisant la régression conjointe et l'indice de supériorité (Pi).

■ Matériel végétal

Six génotypes de pois fourrager (*Pisum sativum ssp. arvense* L.) ont été choisis, après évaluation aux domaines expérimentaux de Sid El Aydi et Marchouch (Maroc), durant deux campagnes en conditions pluviales, pour leur niveau de production élevé en matière sèche et en graines, pour leur teneur en matière azotée totale (MAT) et pour leur bonne tolérance aux principales maladies (oïdium et anthracnose) et insectes (*Bruchus pisorum*) par rapport à la variété inscrite Naïma (tableau 1).

TABLEAU 1 : Caractéristiques du matériel génétique étudié.

TABLE 1 : *Characteristics of the genetic material studied.*

Génotype	Pays d'origine	Précocité	Poids de 1 000 graines (g)
V1	Ethiopie	Semi-précoce	132
V2	Ethiopie	Semi-précoce	140
V3	Ethiopie	Semi-tardif	122
V4	Ethiopie	Précoce	117
V5	Maroc	Semi-tardif	94
V6	Maroc	Tardif	146
Naïma	Maroc	Tardif	110

■ Dispositif expérimental

Les sept génotypes du pois fourrager ont été semés en blocs randomisés avec trois répétitions au domaine expérimental de Sid El Aydi (trois campagnes) et au domaine expérimental de Marchouch (une campagne). La fumure de fonds a été de 45 unités de P₂O₅. Chaque parcelle élémentaire (1,8 m x 5 m) a été semée manuellement en lignes écartées de 30 cm après les premières pluies significatives le 18 décembre 2003 à Marchouch (A), et à Sid El Aydi le 6 décembre 2001 (B), le 25 décembre 2002 (C) et le 15 novembre 2003 (D). La densité de semis a été calculée pour avoir 80 plantes viables par m². La moitié des parcelles élémentaires a été récoltée au stade 50% de gousses vertes pour évaluer le rendement en matière sèche (MS) et l'autre moitié a été récoltée à maturité des graines pour déterminer le rendement en matière sèche totale et en graines. La matière verte coupée a été pesée et un échantillon de 500 g a été séché dans une étuve ventilée à 70°C jusqu'à stabilité du poids sec (2 à 3 jours) pour déterminer le rendement en matière sèche.

■ Relevés

Les relevés ont concerné les **stades phénologiques** (début floraison : DF, fin floraison : FF, gousse verte : GV, graines vertes : GrV, et maturité totale des graines : MAT), le **rendement en fourrage** et le rendement en matière sèche totale à maturité (MST) exprimés en tonnes de matière sèche par hectare, le **rendement en graines** (Gr) exprimé en quintal par hectare et le poids de mille graines (PMG).

L'indice de récolte (IR) a été calculé sur la base de la formule suivante : $IR (\%) = \text{Rendement en graines} \times 100 / \text{Matière Sèche Totale à maturité}$.

Les relevés quotidiens pour chaque environnement, de la **pluviométrie** et des **températures minimale et maximale**, ont été analysés par décade.

■ Analyses statistiques

L'**analyse statistique descriptive** de chaque environnement avec comparaison multiple de moyenne a montré que les environnements A, B, C et D, selon le modèle adopté, sont contrastés par des variations intra et interannuelle de la température moyenne TM (CV = 13%) et surtout de la température minimale Tm au cours de la floraison (CV = 33%) et au cours du remplissage des gousses (CV = 26%), et par l'irrégularité de la pluviométrie P qui coïncide souvent avec les phases physiologiques importantes, particulièrement la floraison (CV = 58%) et lors du remplissage des gousses (CV = 80%).

Les relevés climatiques (pluviométrie, températures minimales et maximales), phénologiques (phases de croissance) et agronomiques (rendements) ont été statistiquement analysés par le logiciel SAS (version 9.1). L'**analyse globale de la variance** GLM (*General Linear Model*) a souligné des interactions Génotype x Année, Génotype x Site et Génotype x Année x Site hautement significatives pour la majorité des variables. Ensuite, l'analyse s'est effectuée en adoptant un autre modèle qui **combine les effets de l'année et les effets du site en un seul effet appelé "effet environnement"**, soit quatre environnements A, B, C et D.

Dans le but d'identifier des variétés performantes et stables, nous avons procédé d'abord par l'analyse de la variance pour chaque environnement avec comparaison multiple de moyennes avant d'analyser l'interaction Génotype x Environnement qui a été hautement significative. Ensuite, nous avons utilisé les analyses de stabilité et de performance :

- **Analyse de la régression conjointe** d'après FINLAY et WILKINSON (1963) selon l'équation linéaire :

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + e_j + \rho_g e_j \text{ qui devient alors :}$$

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + e_j + (ge)_{ij} + rk_{(j)} + \sum e_i k_{(j)}$$

selon le modèle adopté qui prend en compte l'effet génotype, l'effet environnement et l'interaction Génotype x Environnement avec :

- μ : moyenne générale,
- g_i : effet principal du génotype i ,
- e_j : effet principal de l'environnement j ,
- $(ge)_{ij}$: interaction $g_i \times e_j$,
- $rk_{(j)}$: effet de la répétition k dans l'essai j ,
- $\Sigma e_{rk(j)}$: erreur expérimentale,
- ρ_g : estimation du coefficient de régression génotypique.

Le Coefficient de détermination de régression ($b = \rho_g$) mesure la réponse du génotype i à la variation des environnements étudiés ; cette approche souligne la stabilité des performances des variétés à travers les environnements.

- **Analyse de l'indice de supériorité** (LIN et BINNS, 1988) qui réunit la performance et la stabilité en un seul indice (P_i).

■ Description des sites d'expérimentation

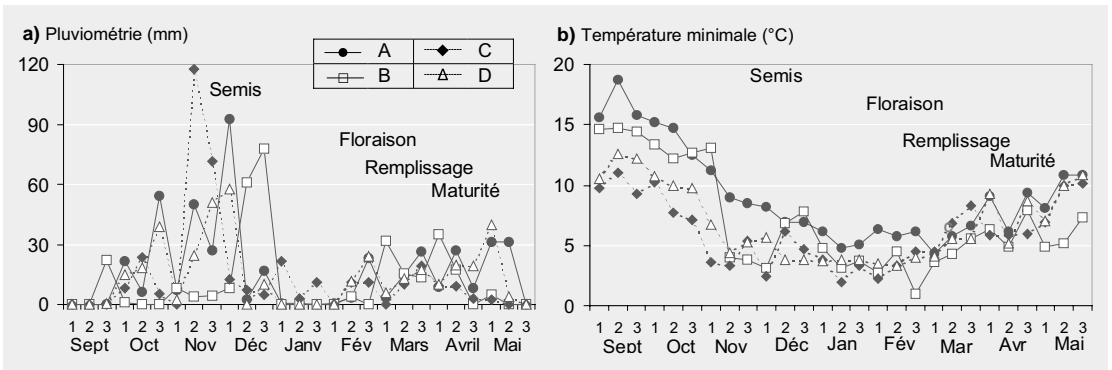
L'expérimentation s'est déroulée aux domaines expérimentaux de Marchouch (6,71°W, 33,60°N, 410 m d'altitude) en 2003/04 (A) et de Sid El Aydi (9,22°W, 33,0°N, 366 m d'altitude) durant les campagnes 2001/02 (B), 2002/03 (C) et 2003/04 (D), ce qui donne lieu à la définition des quatre environnements pédoclimatiques.

A Marchouch, sur vertisol (Tirs), le climat est semi-aride avec une pluviométrie moyenne annuelle de 407 mm, une température maximale moyenne de 23,4°C et une température minimale moyenne annuelle de 10,7°C. Les gelées sont fréquentes en décembre et en février. Quant à Sid El Aydi, le milieu est caractérisé par un vertisol alcalin et profond à texture limono-argileuse (Tirs), et un bioclimat semi-aride inférieur à hiver doux avec une pluviométrie annuelle moyenne de 305 mm, une température maximale moyenne de 36,1°C et une température minimale moyenne de 5,4°C. Le gel est fréquent en janvier.

Chacun de ces **quatre environnements** est caractérisé par une **association différente entre la pluviométrie et la température** (figures 1a et b). A l'exception de l'environnement C, les autres environnements ont connu une période sèche au milieu du cycle

FIGURE 1 : Pour les quatre environnements étudiés, variation par décade au cours du cycle végétatif a) de la pluviométrie moyenne, b) de la température minimale moyenne.

FIGURE 1 : For each of the environments studied : variation, per period of ten days, during the vegetative cycle of a) the mean rainfall, b) the mean minimum temperature.



végétatif qui s'est étendue du début janvier à mi ou fin février (figure 1a). La température moyenne (TM) par décade a peu varié au cours du cycle végétatif dans l'environnement A alors que, dans l'environnement B, ses variations ont été importantes (CV = 16%) et maximales au cours du remplissage des gousses. Quant à l'environnement C, seule sa phase végétative a été froide (9,9°C) et humide alors que, dans l'environnement D, la campagne a été globalement froide (9,3 à 11,5°C), couronnée par des gelées fréquentes, principalement au cours de la phase végétative et au cours de la floraison.

La pluviométrie moyenne cumulée dans l'environnement A au cours du cycle végétatif (147 jours) a été de 186 mm. Les jours humides représentent 21% de la phase végétative (CV = 9,5%), 29% de la phase floraison (CV = 58%), 55% de la période remplissage des gousses (CV = 30%) et 41% de la phase maturité des graines (CV = 15%). Dans l'environnement B, les jours avec précipitations représentent 14% de la phase végétative avec une pluviométrie journalière moyenne de 14,5 mm/jour (CV = 9%) alors qu'elle n'a été que de 4 mm/jour durant le reste du cycle avec un coefficient de variation maximal au cours du remplissage des gousses (CV = 91%). En revanche, l'environnement C a été caractérisé par une pluviométrie faible mais satisfaisante avec un coefficient de variation maximal au cours de la floraison (CV = 61%) et au cours du remplissage des gousses (CV = 90%). Quant à l'environnement D, la pluviométrie a couvert 17% de la phase végétative (CV = 10%), 21% de la phase floraison (CV = 76%), 43% de la phase remplissage des gousses (CV = 41%) et 19% de la phase maturité des graines (CV = 28%).

2. Résultats et discussion

La variabilité de l'environnement, induite par les variations thermiques et par l'alimentation hydrique au cours du cycle végétatif, a une influence sur le niveau et la stabilité des rendements en fourrage et en graines des sept génotypes de pois fourrager. Il convient d'analyser cette influence de façon détaillée. Les génotypes qui ont une meilleure régularité des rendements en dépit des variations climatiques seront identifiés à travers **l'analyse de l'interaction Génotype x Environnement** en utilisant la régression conjointe et le calcul des paramètres de stabilité.

■ Effets de la variation de l'environnement sur le rendement en fourrage

Le rendement de matière sèche moyen des quatre environnements a été de 5,5 t MS/ha avec un **effet Génotype** (PPDS = 1,08 t/ha) et un **effet Environnement** (PPDS = 0,52 t/ha) **hautement significatifs**. Le rendement moyen maximal a été enregistré dans l'environnement A avec 7,5 t MS/ha alors que la plus faible production moyenne a été enregistrée dans les environnements B et D avec respectivement 4,6 et 4,2 t MS/ha sans différence significative entre eux. Le coefficient de régression (b) a classé les

TABLEAU 2 : Rendement moyen du fourrage vert et des graines, rendement moyen de matière sèche totale (MST), indice de récolte moyen (IR) et taille moyenne des graines (PMG) selon l'environnement étudié.

Env.	Fourrage			Graines			MST	IR	PMG
	(t MS/ha)	PPDS	b	(q/ha)	PPDS	b	(t MS/ha)	(%)	(g)
A	7,51 ^a	1,14	1,99	18,5 ^a	4,50	6,51	7,33 ^a	25,3 ^a	134 ^a
B	4,61 ^c	1,84	- 0,91	4,27 ^d	1,42	- 7,76	5,19 ^b	8,2 ^d	116 ^c
C	5,74 ^b	1,78	0,22	16,4 ^b	3,33	4,38	7,32 ^a	22,7 ^b	119 ^c
D	4,20 ^c	0,79	- 1,31	8,91 ^c	3,69	- 3,12	6,76 ^a	13,1 ^c	121 ^b

Dans une même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (P<0,05)

TABLE 2 : Mean green fodder and seed yields, mean total dry matter yield (MST), mean harvest index (IR) and mean seed size (PMG) according to the environment.

environnements A (1,99) et C (0,22) comme environnements favorables et les environnements B (-0,91) et D (-1,31) en environnements défavorables pour la production de fourrage (tableau 2).

Au niveau variétal, on note une large variation du coefficient de régression (0,74 à 1,36) indiquant un comportement variétal spécifique face aux variations climatiques (tableau 3). LIN et BINNS (1988) ont défini le niveau d'adaptation d'une variété à un environnement donné par son rendement qui reflète son aptitude à valoriser les conditions de cet environnement. Le rendement moyen maximal a été obtenu par les variétés V5 (6,06 t MS/ha), V6 (5,97 t MS/ha) et V3 (5,83 t MS/ha). Elles ont toutes exprimé leur potentiel de production dans **l'environnement A, défini favorable et stable par le Coefficient de régression (b = 1,99)** avec un rendement moyen dépassant 7,5 t MS/ha. BEKER (1981) et BEKER et LÉON (1988) ont qualifié de stable la production d'un génotype dans un environnement donné quand le niveau de sa production n'accuse pas de déviation par rapport à la production moyenne de l'ensemble des génotypes étudiés. Parallèlement, l'indice de supériorité (Pi) a classé **V5 comme la plus performante (Pi = 0,27)** suivie de V6 (Pi = 0,53) et V3 (Pi = 0,90). Cependant, d'après le coefficient de régression, seule V6 avec une pente de régression conjointe proche de 1 (b = 1,06) aurait une stabilité moyenne, les variétés V1 et V3 sont stables mais s'adaptent mieux aux environnements favorables, et aucune variété n'est adaptée aux environnements défavorables (b > 0,7) bien que V5 ait pu maintenir sa performance dans l'environnement défavorable (tableau 3 et figure 2).

D'autre part, le début de floraison, exprimé en somme de températures au seuil de 6°C, a été de 360°C jour en moyenne avec un effet Environnement (PPDS = 6,7°C) et un effet Variété (PPDS = 8,1°C)

TABLEAU 3 : Potentiel de production variétal du fourrage vert (t MS/ha) dans chaque environnement et quelques paramètres de stabilité.

Environnement	A	B	C	D	Moyenne	b	Pi
V1	7,78 ^{ab}	4,50 ^b	6,05 ^a	3,06 ^d	5,35 ^{abc}	1,33	1,11
V2	6,56 ^c	4,75 ^{ab}	6,50 ^a	4,10 ^{bc}	5,48 ^{abc}	0,74	0,98
V3	8,52 ^a	3,86 ^b	6,39 ^a	4,54 ^{ab}	5,83 ^{ab}	1,36	0,90
V4	6,67 ^{bc}	4,31 ^b	4,80 ^a	3,48 ^{cd}	4,82 ^c	0,90	1,71
V5	8,09 ^a	6,48 ^a	5,31 ^a	4,36 ^{ab}	6,06 ^a	0,87	0,27
V6	8,19 ^a	4,48 ^b	6,09 ^a	5,11 ^a	5,97 ^a	1,06	0,53
Naïma	6,78 ^{bc}	3,89 ^b	5,03 ^a	4,77 ^{ab}	5,12 ^{bc}	0,74	1,50
Moyenne	7,51 ^a	4,61 ^c	5,74 ^b	4,20 ^c	5,52	-	-

Dans une même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes (P<0,05)

TABLE 3 : Green forage production potential (t DM/ha) of the cultivars in each environment, with some parameters of stability.

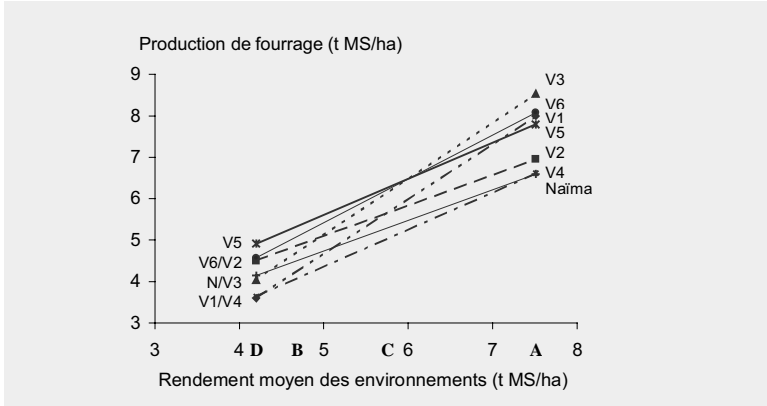


FIGURE 2 : Niveaux de production variétale du fourrage vert par environnement selon la régression conjointe.

FIGURE 2 : Level of green forage production of the cultivars in each environment according to joint regression.

significatifs au seuil $\alpha = 0,05$ soulignant l'effet du froid sur la date de floraison des variétés. Le rendement en matière sèche a été hautement corrélé aux sommes de températures cumulées aux différents stades phénologiques jusqu'au stade de coupe (gousses vertes) ($r = 0,58^{***}$). Nous en déduisons, d'une part, que la phénologie n'est qu'une réponse à la température, et donc que le froid peut affecter la quantité de chaleur dont a besoin chaque variété pour la succession de ses stades phénologiques, et, d'autre part, que le développement de la plante est lié à la somme de températures accumulées par la variété à chaque stade phénologique.

Par ailleurs, PAUGET (2005) a rapporté que la croissance végétale du pois est optimale quand son alimentation hydrique est satisfaisante (25 et 40 mm/semaine selon les réserves du sol) et que la température moyenne se situe entre 13 et 18°C. Cependant, elle s'arrête au-dessous de 4°C. Effectivement, le rendement en matière sèche est hautement corrélé avec la température moyenne des différentes phases de croissance (phase végétative ($r = 0,58^{***}$), floraison ($r = 0,50^{***}$) et

	Environnement	Phase végétative	Phase floraison	Remplissage des gousses	Maturité des graines
Température moyenne (°C)	A	11,8 ^a	12,8 ^a	14,3 ^a	13,9 ^a
	B	10,2 ^b	9,7 ^c	11,8 ^{bc}	11,9 ^d
	C	9,9 ^c	12,9 ^a	12,2 ^b	12,5 ^c
	D	9,3 ^d	11,1 ^b	11,5 ^c	13,1 ^b
	Moyenne	10,3	11,6	12,4	12,8
CV	1,85	6,14	8,80	1,84	
Température minimale (°C)	A	5,86 ^a	5,59 ^{ab}	7,51 ^a	8,35 ^a
	B	4,41 ^b	3,46 ^c	4,14 ^b	5,88 ^d
	C	3,66 ^d	5,87 ^a	7,57 ^a	6,31 ^c
	D	4,13 ^c	5,40 ^{bc}	3,95 ^b	6,88 ^b
	Moyenne	4,52	5,08	5,79	6,86
CV	18,7	33,2	26,1	14,4	
Pluviométrie (mm)	A	49,2 ^d	24,03 ^a	43,3 ^a	69,7 ^a
	B	160,2 ^a	26,1 ^a	12,1 ^c	53,6 ^b
	C	73,0 ^c	19,4 ^b	6,9 ^d	14,4 ^d
	D	153,3 ^b	20,6 ^b	23,7 ^b	48,5 ^c
	Moyenne	109,0	22,5	21,5	46,6
CV	46,2	58,0	80,4	50,2	

Dans une même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P < 0,05$)

TABLEAU 4 : Moyenne des facteurs climatiques lors des différentes phases de croissance végétatives du pois fourrager dans les quatre environnements étudiés.

TABLE 4 : Means of climatic factors during the various vegetative growth phases of field peas in the four environments studied.

remplissage des gousses ($r = 0,61^{***}$), principalement la température minimale en phase végétative ($r = 0,58^{***}$) et à la floraison ($r = 0,44^{***}$). La réduction du rendement moyen des génotypes en matière sèche de 42% dans les environnements B et D serait donc en rapport avec le froid conjugué au déficit hydrique qui a caractérisé le début et le milieu du cycle végétatif. Quant à l'environnement C, bien que la température moyenne durant la phase végétative ait été froide ($TM = 9^{\circ}C$), **le pois, à croissance indéterminée, a pu compenser** (au moins en partie) **le manque de production dès que la température moyenne a atteint le seuil optimal** à partir de la floraison ($13^{\circ}C$). Cette capacité a été également soulignée chez la fève à croissance indéterminée par MWANAMWENGE *et al.* (1999). La déviation moyenne de la production n'a été alors que de 24%. Il semblerait donc que le froid affecte le rendement en fourrage en ralentissant la vitesse de croissance végétative à travers la réduction du nombre de ramifications et du nombre de nœuds végétatifs par plante (tableau 4).

■ Effets de la variation de l'environnement sur le rendement en graines, l'indice de récolte et la taille des graines

Le rendement moyen en graines des génotypes a été de 12 q/ha avec un **effet Génotype** (PPDS = 4,38 q/ha) et un **effet Environnement** (1,44 q/ha) **hautement significatifs** (tableau 5). Le rendement moyen maximal a été obtenu dans les environnements A (18,5 q/ha) et C (16,4 q/ha) ; il a été réduit de moitié dans l'environnement D (8,8 q/ha) et de 3/4 dans l'environnement B (4,3 q/ha). Le coefficient de détermination de régression b (d'après FINLAY et WILKINSON, 1963) permet de définir comme favorables les environnements A ($b = 6,5$) et C ($b = 4,4$) et défavorables les environnements B ($b = -7,8$) et D ($b = -3,1$) (tableau 2).

TABLEAU 5 : Potentiel de production variétal des graines dans chaque environnement étudié et, pour chaque génotype, rendement moyen de matière sèche totale (MST), taille des graines (PMG), indice de récolte (IR) et paramètres de stabilité (coefficient de régression, b , et indice de supériorité, P_i).

TABLE 5 : *Seed production potential of the cultivars in each environment and, for each genotype : mean total dry matter yield (MST), seed size (PMG), harvest index (IR), and parameters of stability (regression co-efficient, b , and superiority index, P_i).*

Au niveau variétal, le **rendement moyen maximal** a été obtenu par la **variété V4** (16,2 q/ha), suivie de V1 (14,5 q/ha), V2 (13,4 q/ha) et V5 (12,1 q/ha) (tableau 5 et figure 3). L'évaluation de leurs performances par l'indice de supériorité P_i (selon LIN et BINNS, 1988) a classé la variété V4 (1,4) comme la plus performante et stable suivie de V1 (4,6), V2 (8,1) et V5 (25,1). Quant au coefficient de régression b , il a défini **V1, V4 et V5 seules stables pour la**

	Graines (q/ha)					MST (t/ha)	PMG (g)	IR (%)	b	Pi
	A	B	C	D	Moy.					
V1	22,7 ^{ab}	2,83 ^c	23,6 ^a	8,93 ^c	14,5 ^b	5,90 ^c	132 ^b	22,3 ^a	1,53	1,26
V2	20,7 ^{bc}	3,81 ^{bc}	19,8 ^b	9,30 ^b	13,4 ^{bc}	7,22 ^{ab}	140 ^{ab}	17,2 ^b	1,24	1,26
V3	12,2 ^e	4,21 ^{abc}	13,3 ^c	6,30 ^c	9,02 ^d	6,30 ^{bc}	122 ^c	13,9 ^c	0,65	12,0
V4	26,7 ^a	5,09 ^{ab}	20,3 ^{ab}	12,7 ^a	16,2 ^a	7,31 ^a	117 ^{cd}	21,5 ^a	1,40	0,95
V5	16,0 ^{de}	5,41 ^a	14,3 ^c	12,5 ^a	12,1 ^c	7,02 ^{ab}	94 ^e	17,4 ^b	0,65	12,4
V6	17,5 ^{cd}	4,57 ^{ab}	11,8 ^c	5,67 ^c	9,90 ^d	6,34 ^{abc}	146 ^a	15,2 ^c	0,86	8,13
Naima	13,9 ^{de}	3,96 ^{bc}	11,7 ^c	7,00 ^c	9,13 ^d	6,47 ^{abc}	110 ^d	13,5 ^c	0,68	10,8
Moyenne	18,5 ^a	4,27 ^d	16,4 ^b	8,91 ^c	12,0	6,65	123	17,0	-	-

Dans une même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P < 0,05$)

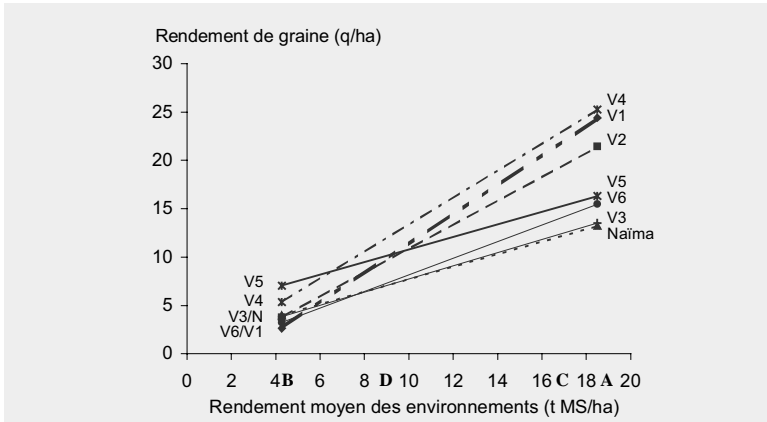


FIGURE 3: Niveaux de production variétale en graines par environnement selon la régression conjointe.

FIGURE 3 : Level of the seed yields of the cultivars in each environment according to joint regression.

production grainière. V1 (1,53) et V4 (1,40) sont les plus adaptées aux environnements favorables alors que **V5 (0,65) serait plus adaptée aux environnements défavorables** en relation avec sa capacité de produire un grand nombre de graines par plante (82 nœuds florifères avec 2 à 3 gousses par nœud, soit plus de 400 petites graines par plante en conditions contrôlées ; BENBRAHIM, résultats non publiés). De plus, le rendement en graines est hautement corrélé avec la taille des graines ($r = 0,30^{**}$). Le rendement en nombre de graines par m^2 serait donc plus important chez cette variété à petites graines (PMG = 94 g) confirmant les résultats obtenus par DORÉ *et al.* (1998).

Par ailleurs, le niveau de production est hautement corrélé avec la température moyenne, principalement au cours de la floraison ($r = 0,72^{***}$), du remplissage ($r = 0,37^{**}$) et de la maturité des graines ($r = 0,51^{***}$), et avec la température maximale moyenne au cours de la floraison ($r = 0,39^{**}$) et de la maturité des graines ($r = 0,51^{***}$). Il dépend par ailleurs étroitement de la pluviométrie (P) selon la relation de régression : Graines = $0,28 P + 67,8$; avec $R^2 = 0,80$.

En effet, la phase floraison des environnements B et D a été caractérisée par **une baisse de température** moyenne (9,7°C et 11,1 °C respectivement), due principalement à la baisse de la température minimale moyenne (3,5°C et 5,4°C respectivement), qui serait à **l'origine de la réduction du rendement en graines de trois quarts dans l'environnement B** et de moitié dans l'environnement D. Pour C, **le déficit hydrique au cours de la floraison aurait réduit le rendement en graines de 11%** (tableaux 4 et 5).

La taille moyenne des graines, d'après l'estimation de l'héritabilité ($h^2 = 92\%$) sur la base de la moyenne des entrées (FEHR, 1993), est une caractéristique variétale qui peut être affectée par les conditions climatiques au cours du remplissage et de la maturité des graines. Elle est hautement corrélée avec l'alimentation hydrique au cours du remplissage des graines ($r = 0,32^{**}$) et avec la température maximale moyenne au cours de la maturité des graines ($r = 0,36^{***}$). En effet, elle a été réduite d'environ 10% dans l'environnement D et de 12% dans B et C à cause du déficit hydrique de fin de cycle dans B, amplifié par la chaleur dans l'environnement C (tableau 5).

Le rendement en graines est hautement corrélé au rendement en matière sèche totale à maturité ($r = 0,67^{***}$). Dans les environnements classés favorables (A et C) par le coefficient de régression b , le pois a produit plus de matière sèche qui a mieux intercepté le rayonnement pour une production optimale de graines. Celle-ci s'est exprimée par un grand indice de récolte A (25%) et C (23%) (tableau 2).

Pour l'environnement D, soulignons que si on prend en considération, d'une part, l'optimisation du rendement en matière sèche totale à maturité et la taille moyenne des graines et, d'autre part, le froid qui a sévi pendant la floraison, la réduction de l'indice de récolte d'environ 50% ne serait due qu'à la réduction du nombre de graines par m^2 à cause du froid. Le froid aurait de ce fait affecté la floraison et la nouaison, conduisant ainsi à la réduction du rendement en graines à travers la réduction du nombre de graines par plante. LOSS et SIDDIQUE (1997) ont rapporté un résultat similaire chez la fève, et FRENCH (1990) a noté une forte corrélation entre le rendement en graines et le nombre de graines par mètre carré chez le pois. En revanche, le déficit hydrique observé au cours du remplissage des gousses dans l'environnement C n'a affecté ni le rendement en matière sèche totale à maturité, ni l'indice de récolte, seulement une légère réduction de la taille des graines qui serait due à la chaleur de fin du cycle.

Pour comprendre le **comportement du pois face à ce stress de fin de cycle**, nous avons procédé à l'analyse descriptive de la phénologie du pois qui révèle que la variation de la durée des différentes phases phénologiques a été maximale au cours du remplissage et de la maturité des graines. En effet, la durée des phases de remplissage et de maturité des graines dans l'environnement C a été réduite respectivement de 59% et 24%. Le pois, dans ce cas, aurait **accéléré sa vitesse de croissance pour pouvoir échapper au déficit hydrique de fin de cycle** et réduire ainsi son incidence sur la production. Cependant, le froid et le stress hydrique qui ont sévi dans l'environnement B, au cours de la floraison et du remplissage des gousses, ont conduit à la réduction de l'indice de récolte d'environ 68% qui serait en rapport à la fois avec la réduction du rendement en matière sèche totale à maturité (-29%), celle du rendement en graines (-77%) et celle de la taille des graines (-13%). Il semble donc qu'en plus de l'effet du froid sur la floraison et la nouaison, **le déficit hydrique aurait réduit le nombre de ramifications et le nombre de nœuds végétatifs par plante**. Face à ce stress de fin de cycle, le cycle végétatif du pois a été raccourci suite à la réduction de la phase de remplissage des gousses de 64%. Cette **plasticité phénotypique confère au pois une capacité d'adaptation aux contraintes du milieu**. Cependant, la culture du pois reste déconseillée dans les zones à printemps froid et sec confirmant les résultats obtenus par ABDELMONEIM *et al.* (1990b).

Conclusion

Les fluctuations des précipitations et les écarts de température ont expliqué globalement l'instabilité des rendements du pois en fourrage ou en graines. Pour mieux gérer ces contraintes, nous avons adopté, pour la sélection variétale, une approche qui intègre la variabilité climatique comme contrainte principale. Il s'agit d'optimiser et de stabiliser les rendements à travers l'adaptation au milieu puisqu'il est difficile de prédire les changements climatiques éventuels. L'analyse de l'interaction Génotype x Environnement a été hautement significative et les paramètres de stabilité ont révélé un comportement variétal spécifique selon les contraintes climatiques des environnements étudiés. La stabilité variétale est liée à la plasticité phénologique qui est à l'origine de l'efficacité de gestion des contraintes climatiques du milieu.

A travers cette étude, nous visons l'optimisation et la stabilité des rendements en fourrage et en graines sur la base de la performance génotypique. L'analyse descriptive de la phénologie a révélé que la vitesse de croissance du pois, à croissance indéterminée, s'ajuste en fonction des conditions climatiques au cours de la phase de remplissage et de maturité des graines. Ces réajustements montrent **un processus "adaptatif" face aux contraintes du milieu** confirmant les résultats obtenus par PASSIOURA (1994) et MILLER *et al.* (1998), et ceux obtenus par FRENCH (1990), ETÉVÉ et DERIEUX (1982) et MWANAMWENGE *et al.* (1999) chez la fève à croissance indéterminée, **ou la stratégie "conservatrice"** soulignée par TARDIEU (2005). Cependant, le froid affecte profondément le niveau de production en ralentissant la croissance végétative à travers la réduction du nombre de ramifications et du nombre de nœuds végétatifs et floraux par plante.

Au terme de cette étude, nous déduisons que V6 aurait une large adaptation pour la production de fourrage qui serait liée à son origine (Maroc) alors que V3 serait plus adaptée aux environnements favorables et V5 aux environnements défavorables. Le gain génétique moyen par rapport à Naïma serait de l'ordre de 14%, 18% et 17% respectivement pour V3, V5 et V6.

Quant au rendement en graines, V1, V4 et V5 ont été jugées performantes et stables. V1 et V4 s'adaptent mieux aux environnements favorables alors que V5 exploite mieux les environnements défavorables. L'augmentation du rendement à travers l'adoption de V1 et V4 dans les environnements favorables et V5 dans les environnements défavorables offrirait un gain moyen de production de 82% et 64% respectivement par rapport à Naïma.

La synthèse de ces résultats désigne **V5 comme un "idéotype" pour les régions à climat contrasté**. Cette variété a exprimé son potentiel de production en fourrage et en graines dans les environnements favorables, mais aussi dans les situations de stress ; sa capacité de produire un nombre élevé de gousses et de graines par plante serait à l'origine de la stabilité de sa production, principalement en milieux stressés (DORÉ *et al.*, 1998 ; MWANAMWENGE *et al.*, 1999). Elle a été proposée pour inscription au catalogue officiel du Maroc en 2005 et inscrite en 2007 sous le nom d'Ezzahra.

Le pois est une légumineuse de grande valeur fourragère qui permet une exploitation en foin, en ensilage ou en graines que chacun peut adapter selon les conditions climatiques. L'indice de récolte peut orienter les agriculteurs à mieux exploiter leur pois en fourrage ou en graines, ce qui était déjà suggéré par ABDELMONEIM *et al.* (1990a). L'insertion des nouvelles variétés dans la sole fourragère marocaine permettrait une optimisation et une stabilité de la production quelle que soit l'année climatique. Dès lors, elles contribueraient aussi bien à satisfaire les besoins alimentaires du cheptel des exploitations d'élevage qu'à diminuer la pression du pâturage dans les parcours. Elles offriraient donc un bon bilan économique et environnemental.

Accepté pour publication,
le 13 février 2008.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELMONEIM A.M., KHAIR M. A., COCKS P.S. (1990a) : "Growth analysis, herbage and seed yield of certain forage legume species under rainfed conditions", *J. of Agronomy & crop science*, 164, 34-41.
- ABDELMONEIM A.M., COCKS P.S., MAWLAWY B. (1990b) : "Genotype-environment interactions and stability analysis for herbage and seed yields of forage Peas under rainfed conditions", *Plant Breeding*, 104, 231-240,
- AGOUMI A. (2002) : *Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques ; Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre*, 6^e Journées du Comité consultatif technique maghrébin sur les changements climatiques, Alger, 6-7 mai, 11 p.
- BAMOUH A. (1998) : "Gestion de la contrainte pluviométrique pour l'amélioration de la production végétale et de l'efficacité d'utilisation de l'eau", *Bulletin National de Transfert de Technologie en Agriculture*, IAV - Hassan II, n°50.
- BEKER H.C. (1981) : "Correlations among some statistical measures of phenotypic stability", *Euphytica*, 30, 835-840.
- BEKER H.C., LEON J. (1988) : "Stability analysis in plant breeding", *Plant Breeding*, 101, 1-23.
- DORÉ T., MEYNARD J.M., SEBILLOTTE M. (1998) : "The role of grain number, nitrogen nutrition and stem number in limiting pea crop (*Pisum sativum*) yield under agricultural conditions", *European J. of Agronomy*, 8, 29-37.
- EL KHYARI T. (1987) : *Agriculture au Maroc*, éd. Okad, Casablanca, 500 p.
- ETÉVÉ G., DERIEUX M. (1982) : "Variabilité de la durée de la phase végétative chez le pois (*Pisum sativum* L). Application à la sélection de type résistants à l'hiver et à la détermination de la date de semis", *Agronomie*, 2, 813-817.
- FAO (1996) : *Maroc rapport du pays, chapitre I : Aperçu sur le secteur agricole marocain*, Leipzig.
- FEHR M. (1993) : *Principals and procedures of statistics*, 60 p.
- FINLAY K.W., WILKINSON G.N. (1963) : "The analysis of adaptation in plant breeding program", *Australian J. Agric. Res.*, 14, 742 -754.
- FRENCH R.J. (1990) : "The contribution of pod number to field pea (*Pisum sativum* L.) yields in short growing-season environment", *Australian J. Agric. Resources*, 41, 853-862.
- LIN C.S., BINNS M.R. (1988) : "A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data", *Canadian J. of Plant Sci.*, 68, 193-198.
- LOSS S.P., SIDDIQUE K.H.M. (1997) : "Adaptation of faba bean (*Vicia faba* L.) to dry land Mediterranean-type environments, I, Seed yield and yield components", *Field Crops Research*, 52, 17-28.

- MILLER PERRY, ULRICH D., ENTZ M., MCCONKEY B., BRANDT S., CUTFORTH H., VOLKMAN K. (1998) : *Les pois tolèrent la sécheresse !*, Centre de recherches sur l'agriculture des prairies semi-arides, 4 p.
- MWANAMWENGE J., LOSS S.P., SIDDIQUE K.H.M., COCKS P.S. (1999) : "Effect of water stress during floral initiation, flowering and podding on the growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.)", *European J. of Agron.*, 11, 1-11.
- OELKE E.A., OPLINGER E.S., HANSON C.V., DAVIS D.W., PUTNAM D.H., FULLER E.I., ROSEN C.J. (1991) : *Dry field pea, Alternative crops manual*, College of Agriculture and Life sciences cooperative extension service, University of Wisconsin-Madison, WI 53706.
- PASSIOURA J.B. (1994) : "The yield of crops in relation to drought", *Physiology and determination of crop yield*, Boote et al. ed., 343-359.
- PAUGET (2005) : "Le pois de printemps valorise bien l'irrigation", *Jura agricole et rural*, 9-15,
- TARDIEU F., CRUIZIAT P., DURAND J.L., TRIBOÏ E. (2005) : *Sécheresse et agriculture, Synthèse du rapport de l'Expertise Scientifique Collective (ESC)*, éd. INRA, Chapitre 1.1 : Perception de la sécheresse par la plante, conséquences sur la productivité et sur la qualité des produits récoltés, p 49-67.
- TARHZOUTI O., BOULANOUAR B., SIBAOUËIH M. (2006) : "L'élevage ovin en bour défavorable : caractéristiques, Atouts et contraintes", *L'élevage du mouton et ses systèmes de production au Maroc*, Boulanouar B. et Paquay R. éd., 159-175, 350 p.

SUMMARY

Improving the forage and grain yields and the yield stability of field peas in semi-arid areas in Morocco

Field peas (*Pisum arvense* L.) would be a suitable protein resource to improve livestock feeding in semi-arid areas; however, green feed and seed yields are low and unstable in these environments. The variability of the yields of seven field pea cultivars over the seasons under rain-fed conditions highlighted the effect of the climate. The aim of this study was to optimize and stabilize field pea yields in contrasting climatic environments through a strategy of cultivar adaptation.

The genotype x environment interaction was significant and the stability analysis showed which were the most performing cultivars in such climatic environments. Those with the best mean performance and stability were V3, V5 and V6 for dry matter, and V1, V4 and V5 for seed yield. The cultivar V6 had a wide adaptability in terms of dry matter, whereas V3 and V5 were particularly adapted to favourable and unfavourable environments respectively. Regarding seed yield however, V1 and V4 were more productive in favourable environments, and V5 in unfavourable ones. The genetic gain was significant : in comparison to V7, V5 had a wider adaptability for both dry matter and seed yield ; it has been registered in the Moroccan official cultivar list under the name Ezzahra. The most critical period for field pea growth occurs from the beginning of flowering to green seeds. Cold during that period reduced seed yield by half, and by 75% when associated with water stress during pod setting.