

Modélisation du tallage du blé semé à faible densité en climat semi-aride

N. Anadif, M. El Hisse, A. Lahrouni

Chez le blé, comme chez toute graminée, le rendement est lié à l'importance du tallage. Le rythme, le taux et la durée de production des talles, ainsi que le nombre de celles qui aboutissent à un épi fertile sont fonction de plusieurs facteurs : température [1], rayonnement solaire [2], densité et date de semis [1, 3], stress hydrique [2] et nutrition azotée [4]. La dynamique de population des talles en interaction avec les facteurs climatiques et culturaux a été intégrée dans les modèles de simulation de la croissance du blé [5, 6] en y ajoutant l'effet des contraintes hydriques et azotées. Ces modèles diffèrent notablement par la description des processus de la croissance, mais aussi par les validations entreprises à ce jour [7]. Les modèles SIMTAG (développé en conditions méditerranéennes en Syrie [2]), CERES-Wheat [8], EPIC (conçu et mis au point dans le Sud-Ouest de la France [9]) et AFRCWHEAT2 (initialement élaboré dans les conditions de l'Angleterre [6, 10]) suscitent de nombreuses contro-

verses au niveau de leur fiabilité et de leur utilisation.

Ce travail a étudié l'évolution du tallage, en faible densité de semis, d'une variété de blé tendre locale (Merchouch) dans les conditions agro-climatiques de la région de Marrakech (Maroc). Une analyse comparative des modules de tallage de SIMTAG, de AFRCWHEAT2 et du modèle de Masle-Meynard et Sebillotte [13] (exprimé par une loi analytique qui lie le développement des talles à la somme de températures) a fourni des prédictions par simulation qui ont été comparées aux observations en champ.

Matériel et méthodes

Système de désignation des talles et feuilles du blé

Une bonne quantification du développement du blé est obtenue [11, 12] en numérotant les feuilles du brin-maître de la manière suivante : la pré-feuille (L_0), la première feuille (L_1), la deuxième (L_2), etc. Les talles associées aux feuilles du brin-maître (talles primaires), T_1 , T_2 , T_3 , sont associées à la première, deuxième et troisième feuilles.

Chaque talle primaire peut produire des talles secondaires et, dans ce cas, les feuilles et les talles associées seront désignées par deux chiffres (le premier indiquant le rang de la talle mère et le

deuxième la feuille associée). Par exemple, la première feuille de T_1 est L_{11} , et la talle qui se dégage à partir de L_{11} est T_{11} , la deuxième feuille de T_1 est L_{12} , la talle associée est T_{12} . Dans le cas des pré-talles, le deuxième chiffre est zéro (T_{10} , T_{20} , T_{30} ...). Parfois les talles secondaires peuvent produire des talles tertiaires dont la désignation nécessite 3 chiffres (par exemple T_{110} , T_{101} sont respectivement la pré-talle de la talle secondaire T_{11} et la talle associée à la première feuille de la pré-talle T_{10}).

Modèles utilisés

Dans cette étude nous nous sommes intéressés aux modules de tallage liés aux modèles complets AFRCWHEAT2 [6], SIMTAG [2] ainsi que le modèle de Masle-Meynard et Sebillotte [13].

• Le tallage dans le modèle AFRCWHEAT2

Calcul de la production des talles

Le modèle AFRCWHEAT2 ne simule pas le tallage en tant que phénomène lié au développement de la plante, mais considère que la population des tiges évolue depuis le stade 3 feuilles sur le brin-maître jusqu'au stade double ride. Cette évolution se calcule chaque semaine à l'aide du nombre de tiges à la levée (RINPOP) et du phyllochrone (EINT) (somme de températures qui sépare l'apparition de deux feuilles successives), calculé en se fondant sur l'équation de Baker *et al.* [14] :

$$EINT = \frac{1}{0,0106 + (0,04 \times DPHIDT)} (1)$$

N. Anadif, M. El Hisse, A. Lahrouni :
Département de physique, Faculté des sciences Semlalia, Université Cadi-Ayyad, Marrakech, Maroc.
<anadifn@hotmail.com><Elhisse@ucam.ac.ma>

Tirés à part : N. Anadif

où DPHIDT (en heure) est la variation de la longueur du jour à la levée.

La production de talles est calculée par semaine i avec les équations suivantes :

$$N_i = TTTWK \times F \quad (2)$$

où N_i est le nombre de talles produites/m² et TTTWK la somme de températures calculée pendant la semaine $i-1$, et :

$$F = \frac{RINPOP}{EINT} \times DENF3 \quad (3)$$

où DENF3 (facteur déficit d'azote) est un coefficient compris entre 0,8 et 1 représentant l'effet de l'azote sur la production des talles. De cette manière, dans AFRCWHEAT2, les talles sont groupées suivant leur âge et non pas suivant l'ordre morphologique sur la tige mère : toutes les talles fournies pendant les 7 jours d'une semaine i constituent un groupe (i).

Calcul de la sénescence des talles

La sénescence des talles dans AFRCWHEAT2 apparaît après le stade « double ride » et prend fin à la floraison. Le calcul de la sénescence se fait par semaine, sur chaque groupe de talles n , en fonction de la taille de la population des tiges NN présentes juste avant l'apparition de ce groupe n et de la somme de températures cumulée depuis le stade double ride [15]. Le modèle calcule tout d'abord la proportion P_n de talles survivantes dans chaque groupe à la fin de chaque semaine en utilisant une relation empirique [16] :

$$P_n = \frac{1}{1 + \left(\frac{T_t / 400}{A / NN} \right)^\alpha}^\beta \quad (4)$$

Dans cette relation, T_t est la somme de températures base 1 °C cumulée depuis le stade double ride jusqu'à la fin de la semaine considérée, et NN est le nombre total de tiges produites juste avant l'apparition du groupe de talles n :

$$NN = \sum_{i=1}^{i=n-1} N_i \quad (5)$$

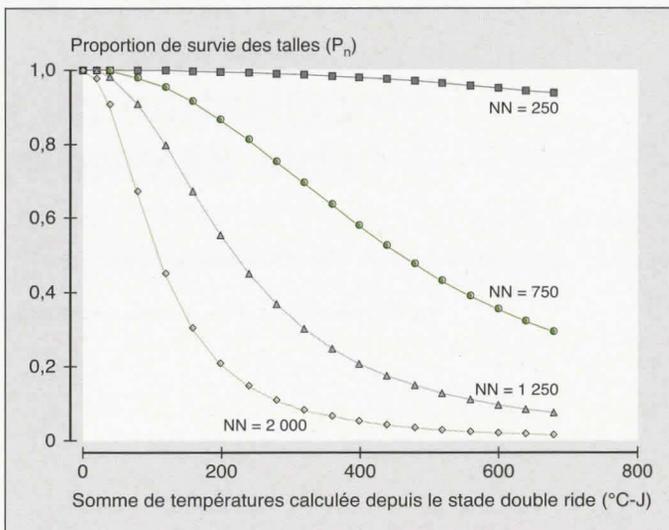


Figure 1. Évolution de la proportion P_n des talles survivantes en fonction de la somme de températures (°C-J) depuis le stade double ride pour différents groupes de talles.

Figure 1. Evolution of the proportion, of surviving tillers P_n as a function of the sum of temperatures (degree days) after the double ridge stage, for different tillers cohorts.

N_i étant le nombre de talles produites initialement dans le groupe i . Les coefficients A , α et β sont des constantes empiriques. De cette manière chaque groupe i , comprenant un nombre N_i de talles, est réduit hebdomadairement en le multipliant par le facteur P_i .

L'évolution du facteur P_n en fonction de la somme de températures est illustrée par la figure 1 dans le cas d'une densité de semis égale à 250 pl/m². Les groupes de talles (NN) choisis sont ceux tirés du modèle de Masle-Meynard et Sebillotte [13] (figure 3) et les constantes utilisées sont celles publiées par Porter [15] : $\alpha = 1,46$, $\beta = 2,24$ et $A = 825$. D'après cette figure, le premier groupe (NN = 250 tiges/m²) de talles n'est pratique-

ment pas touché par la sénescence. Au bout d'une semaine à une température moyenne de 25 °C après le stade double ride, la sénescence touche 80 % des talles du 4^e groupe (NN = 2 250 tiges/m²), 50 % des talles du 3^e groupe (NN = 1 500 tiges/m²) et 15 % des talles du 2^e groupe (NN = 750 tiges/m²). Au bout de la 2^e semaine où les jours ont une température moyenne de 25 °C après le stade double ride, la sénescence touche la quasi-totalité des talles du 4^e groupe, 90 % des talles du 3^e groupe et 50 % des talles du 2^e groupe.

La méthode utilisée pour décrire le tallage du blé par le modèle AFRCWHEAT2 est très simplifiée et ne vise pas une description du fonctionnement de la plante.

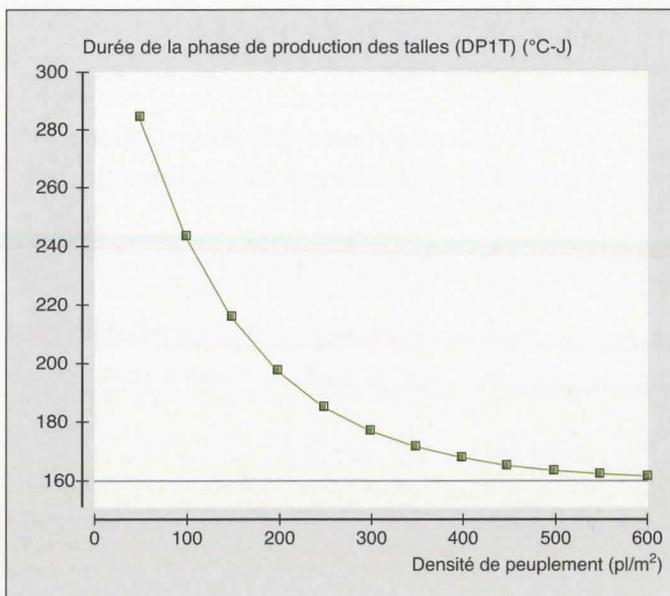


Figure 2. Durée de production des talles en fonction de la densité de peuplement selon le modèle SIMTAG. La durée en somme de température de la phase qui va de la levée au stade initiation florale (DP1A) est supposée égale à 160 °C-J (d'après [2]).

Figure 2. Duration of tiller production as a function of the seedling density in SIMTAG. The temperature sum from emergence to floral initiation (DP1A) is assumed to be equal to 160 °C-J.

Tableau 1

Évolution spatio-temporelle du phyllochrone (EINT) selon l'équation de Baker (équation originale et corrigée)

		Phyllochrone, EINT (°C-J)			
Lieu		15 octobre	15 novembre	15 décembre	15 janvier
Marrakech (Maroc)	(1)	106,4	102,8	96,1	88,8
Lat = 31,37 °N	(2)	103,9	101,7	97,3	92,6
Tel Hadya (Syrie)	(1)	109,0	104,7	96,5	87,8
Lat = 35,9 °N	(2)	105,6	102,9	97,6	91,9
Rothamsted (Angleterre)	(1)	123,9	115,2	98,5	82,9
Lat = 51,8 °N	(2)	114,2	109,3	98,9	88,6

Lat : latitude du lieu.
 (1) : équation originale de Baker *et al.* (1980) [14].
 (2) : équation corrigée de Baker (1990) [18].

Predicted evolution according to the Baker equation (original or corrected) for different dates and locations

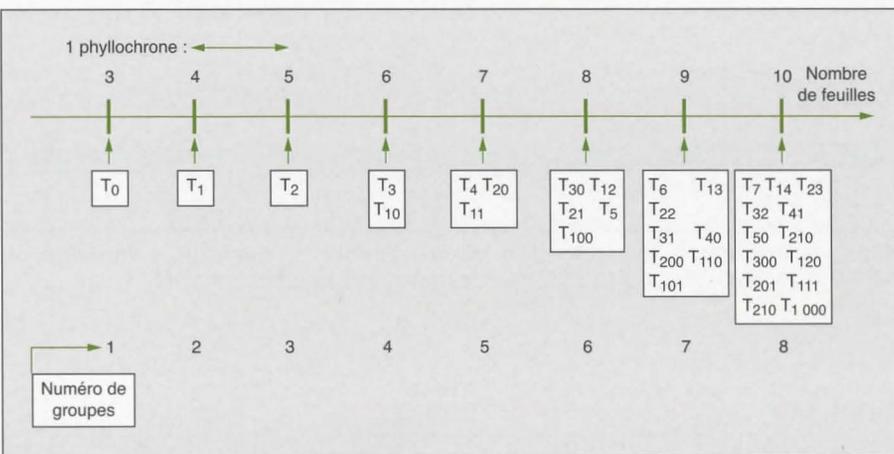


Figure 3. Modèle de tallage Masle-Meynard et Sebillotte (d'après [13]).

Figure 3. Tillering in the Masle-Meynard and Sebillotte model.

Elle permet cependant une bonne estimation du rendement en épis pour des densités moyennes ou relativement élevées. L'utilisation du phyllochrone comme base dans les calculs est intéressante, vu la bonne synchronisation entre le rythme de sortie des feuilles sur le brin-maître et le rythme de sortie des talles [13, 17]. L'amélioration de ce module passe donc par une bonne estimation du phyllochrone, qui est sous-estimé par l'équation (1) utilisée ici. Dans nos conditions climatiques, cette relation donne un phyllochrone égal à 91,7 °C-J au lieu de 115 °C-J observé expérimentalement pendant la saison 1994/1995. Sur base de 9 équations calculant le phyllochrone chez le blé et publiées dans la littérature, l'équation

corrigée de Baker paraît la plus réaliste [18] :

$$EINT = \frac{1}{0,0104 + (0,026 \times DPHIDT)} \quad (6)$$

Le *tableau 1* montre que la variation spatio-temporelle de EINT calculé à l'aide des équations (1) et (6) indique dans tous les cas un rythme plus rapide de sortie des feuilles pour les semis retardés [19, 20].

Le début et la fin de la période de production des talles sont un autre aspect de AFRCWHEAT2 qui nécessite une correction adéquate. En effet, d'une part, le tallage commence dès l'apparition (et

non le déploiement) de la 3^e feuille sur le brin-maître [2, 13, 17] et peut continuer jusqu'à la floraison et, d'autre part, la sénescence des talles peut avoir lieu à n'importe quel moment du cycle de la plante (dans le modèle, la sénescence n'apparaît qu'après le stade double ride). Une autre simplification du modèle concerne la réduction de la population des talles par un stress azoté. Tandis que le modèle utilise un facteur de déficit en azote noté DENF3 et compris entre 0,8 et 1, nous avons obtenu au champ une réduction allant jusqu'à 65 % (7 talles en moyenne chez le témoin et 20 talles chez les plantes alimentées en azote pour les semis à faible densité : 13 pl/m²). De plus, le modèle ne tient pas compte du déficit hydrique sur l'évolution du tallage [21].

• Le tallage dans le modèle SIMTAG

Le scénario pour simuler le tallage est proche de celui de AFRCWHEAT2 : la vitesse de sortie des talles est fortement liée à celle des feuilles du brin-maître. Le phyllochrone dans SIMTAG est calculé à l'aide de la relation :

$$EINT = (98 - 3,33 \times DAYLNC) \times PHF \times DAYLFC \quad (7)$$

où DAYLNC est la longueur du jour à la levée, PHF un facteur génétique intrant du modèle et DAYLFC un coefficient qui dépend linéairement de la température moyenne journalière de la phase germination-levée. Si la variation de la longueur du jour à la levée est supérieure à 0,013 h/j, le modèle pose DAYLFC = 1. Le calcul du tallage dans

SIMTAG se fait avec un pas de temps journalier en utilisant le phyllochrone alors que, dans AFRCWHEAT2, le pas de temps est hebdomadaire et utilise le coefficient taux de production des talles. La période de production des talles dans SIMTAG commence depuis le stade 2,5 feuilles sur le brin-maître et dépasse largement le stade initiation florale. La durée de cette période (DP1T en °C-J) est calculée en fonction de la durée de la phase d'initiation des feuilles (DP1A) et de la densité de semis (PLANTS), sous la forme d'un paramètre pouvant réduire de façon exponentielle la valeur de DP1T (figure 2). Un minimum de tiges par m² (SHOOTM) est assuré en fonction de la densité de semis :

$$\text{SHOOTM} = 0,43 \times \text{PLANTS} + 257$$

si PLANTS ≤ 240 pl/m² (8)

$$\text{SHOOTM} = 1,5 \times \text{PLANTS}$$

si PLANTS > 240 pl/m² (9)

• Le modèle de Masle-Meynard et Sebillotte

C'est un modèle théorique élaboré en 1981 et fondé sur les observations au champ et en pots au laboratoire. Il s'intéresse au fonctionnement de la plante et à la caractérisation correcte de la mise en place des talles sur un pied, et décrit la chronologie d'apparition des talles durant le cycle de vie d'une plante de blé (figure 3). Le tallage débute à l'apparition de la 3^e feuille avec la mise en place de la pré-talle T₀. La succession des talles se fait au même rythme que les feuilles du brin-maître. Les talles secondaires commencent avec la sortie de la 6^e feuille et les talles tertiaires à la sortie de la 8^e feuille. Ainsi, à la sortie de la 3^e feuille après chaque phyllochrone, on voit apparaître un groupe de talles (on peut en avoir jusqu'à 8).

Les équations du tableau 2 que nous avons établies décrivent la mise en place des talles en fonction de la somme de températures (°C-J), cumulée depuis la levée, sur un pied de blé.

Conditions expérimentales

Marrakech est située dans le périmètre du Haouz central. Son climat de type semi-aride limite la production sans irrigation. La pluviométrie enregistrée est faible et irrégulière (240 mm en moyenne par an). Les températures estivales sont très élevées (T_{moy} (max) = 37,7 °C) et celles de

Tableau 2

Équations décrivant l'évolution du nombre de talles en fonction de la somme de températures selon le modèle de Masle-Meynard et Sebillotte (d'après [13])

Type de talles	Relation	Condition
Talles primaires	$\text{NTPF} = \left[\frac{1}{\text{EINT}} \times \left(\sum_j T \right) - 1 \right]$	$\sum_j T \geq 2 \times \text{EINT}$
Talles secondaires	$\text{NTS} = \left[\frac{1}{\text{EINT}} \times \left(\sum_j T \right) - 4 \right]$ $\text{NTS} = \text{NTS} + \text{NTSF}$	$\sum_j T \geq 5 \times \text{EINT}$
Talles tertiaires	NTT = 1 NTT = 4 NTT = 10	$7 \times \text{EINT} < \sum_j T < 8 \times \text{EINT}$ $8 \times \text{EINT} \leq \sum_j T < 9 \times \text{EINT}$ $\sum_j T \geq 9 \times \text{EINT}$
Talles quaternaires	NTQ = 1	$\sum_j T \geq 9 \times \text{EINT}$

NTP : Nombre de talles primaires.
NTSF : Nombre de talles secondaires qui sont apparues au bout de chaque phyllochrone.
NTS : Nombre de talles secondaires.
NTT : Nombre de talles tertiaires.
NTQ : Nombre de talles quaternaires.
EINT : Phyllochrone feuille (en somme de températures, °C-J).
 $\sum_j T$: Somme de température (°C-J).
 \sum_j : La partie entière.

Equations describing the evolution in the number of tillers as a function of degree days according to the Masle-Meynard and Sebillotte model

Tableau 3

Données climatiques moyennes de la région de Marrakech (Maroc)

Mois	TEMP (°C)	ETP (mm)	H (%)	INSO (h)	P (mm)
Janvier	14,9	105	67,3	184	26,0
Février	17,5	111	64,2	174	33,0
Mars	20,2	164	61,4	206	34,0
Avril	22,8	176	59,1	211	31,0
Mai	27,4	229	54,2	238	18,0
Juin	31,9	270	52,2	265	5,7
Juillet	38,4	355	44,0	286	1,8
Août	38,4	356	45,0	270	3,1
Septembre	34,4	277	50,6	228	7,8
Octobre	28,4	217	54,9	206	20,0
Novembre	21,7	143	52,9	178	32,0
Décembre	15,7	116	70,1	181	23,0

TEMP : température moyenne (°C), observée durant la période allant de 1930 à 1991.
ETP : évaluation potentielle (mm), enregistrée durant la période de 1959 à 1991.
H : humidité (%), enregistrée durant la période allant de 1949 à 1991.
INSO : durée d'ensoleillement (heure), enregistrée durant la période 1955-1985.
P : précipitation (mm) enregistrée durant la période 1960-1991.

Mean weather data in Marrakech (Morocco)

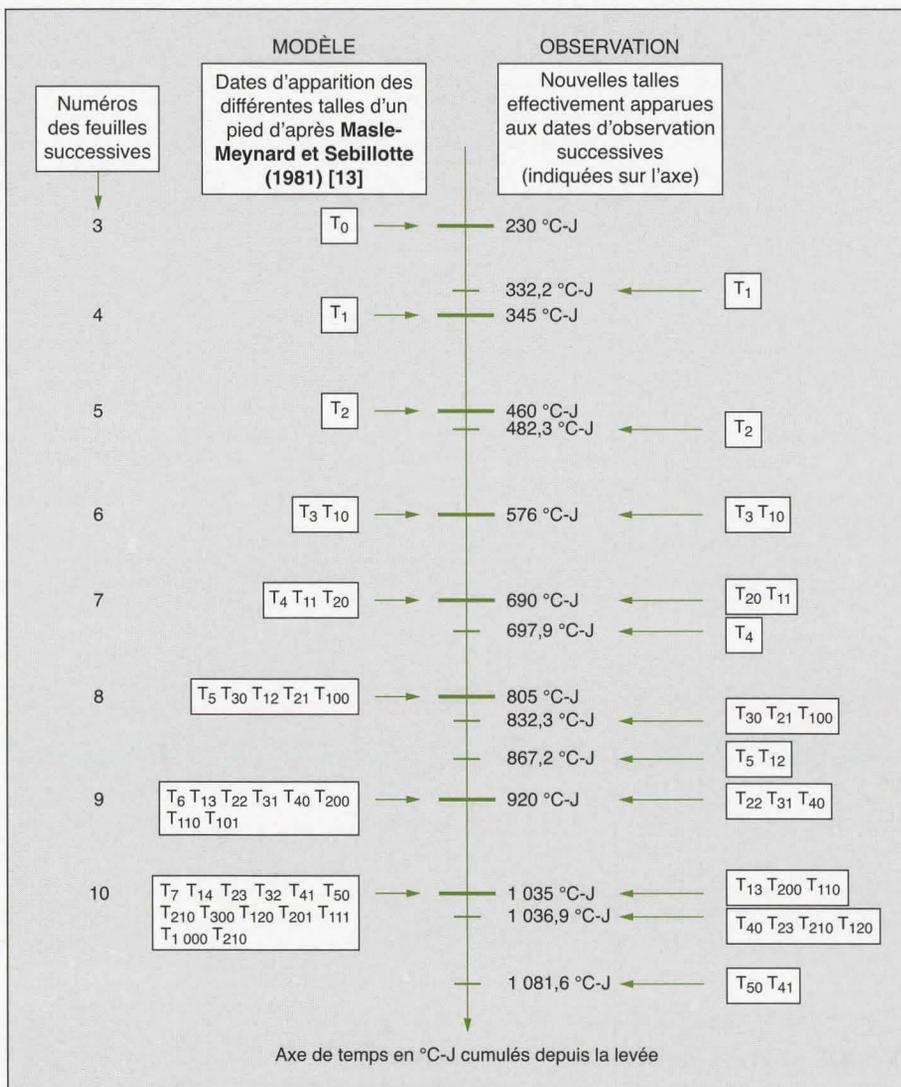


Figure 4. Comparaison entre la chronologie d'apparition des talles selon les valeurs observées (1994/1995) et celles du modèle de Masle-Meynard et Sebillotte (d'après [13]).

Figure 4. Comparison of observed tiller appearance (1994/1995) theoretical tiller appearance according to the Masle-Meynard and Sebillotte model.

l'hiver sont basses ($T_{\text{moy}}(\text{min}) = 4,9 \text{ } ^\circ\text{C}$). Le tableau 3 présente les valeurs moyennes des données climatiques calculées sur plus de trente années.

Les essais ont été conduits au jardin botanique de la Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech où le sol est de type sableux (léger), la capacité maximale à saturation est de 30 % d'eau et la réserve utile en eau est de 0,12 cm d'eau/cm de sol. Les semis ont eu lieu le 15 décembre 1994, le 20 décembre 1996 et le 16 novembre 1997 à la densité de semis 13 pl/m² (20 cm entre grains et 40 cm entre lignes). La variété de blé tendre utilisée, Merchouch de cycle végétatif moyen (110 jours), accepte des dates de

semis étalées, atteint une hauteur d'environ 1 m et résiste à la verse [22]. Pendant toutes les saisons d'étude les essais ont été conduits dans les conditions optimales : absence de limitation au niveau des fournitures azotées et hydriques.

Dans l'ensemble de la parcelle nous avons piqué 30 plantes à la levée. Le suivi journalier visuel a été effectué en notant la date d'apparition de chaque talles ainsi que son ordre de ramification sur la tige mère. Le taux de sénescence des talles par plante a été aussi suivi. Durant l'expérience, on accroche aux talles des étiquettes portant leur numéro suivant le système de nomenclature indiqué précédemment.

Résultats et discussion

Rythme d'apparition des talles

Les résultats observés en champ pour la saison 1994/1995 sont présentés à la figure 4. Il s'agit des résultats d'une plante moyenne. Nous avons obtenu un phyllochrone moyen de 115 °C-J base 1 °C avec un écart type de 18 °C-J. La durée moyenne en somme de températures observée entre l'apparition d'une feuille sur le brin-maître et la talle se développant à son aisselle vaut 346 °C-J, avec un écart type de 22 °C-J (soit d'environ 3 phyllochrones-feuille).

Ces résultats répondent bien au modèle de Masle-Meynard et Sebillotte : à chaque phyllochrone, la plante développe un groupe de talles. Par exemple pendant le 8^e phyllochrone, le groupe de talles T₅ T₁₂ T₃₀ T₂₁ T₁₀₀ est apparu sur la plante, ce qui était prévu par le modèle (figure 4). Les figures 5a et b montrent l'évolution du nombre de talles produites par plante en fonction de la somme de températures calculée depuis la levée pendant les saisons expérimentales 1994/1995 (figure 5a) et 1996/1997 (figure 5b) sur la variété Merchouch dans des conditions supposées sans stress et ceux simulés par les trois modèles : de Masle-Meynard et Sebillotte, SIMTAG et AFRCWHEAT2. L'analyse des figures 5a et b montre que le modèle de Masle-Meynard et Sebillotte rencontre les données expérimentales, tant pour ce qui est du rythme de sortie des talles que de la durée de leur production. Le modèle prédit le nombre potentiel de talles produites par plante et produit une courbe (rythme d'évolution) qui est l'enveloppe supérieure de toutes les courbes que l'on pourrait obtenir expérimentalement. Les figures 5a et b montrent l'inadaptation de SIMTAG et de AFRCWHEAT2 à simuler le tallage aux faibles densités, tant pour le taux de production des talles (surestimé chez SIMTAG suite à l'utilisation d'un phyllochrone égal à 61,3 °C-J) que pour la durée de production des talles. Ces deux anomalies indiquent aussi que les deux modèles sous-estiment le nombre total de talles produites par plante. Le modèle AFRCWHEAT2 arrête sans conditions la production des talles dès l'apparition du stade double ride. Le modèle SIMTAG calcule la fin de la production des talles en

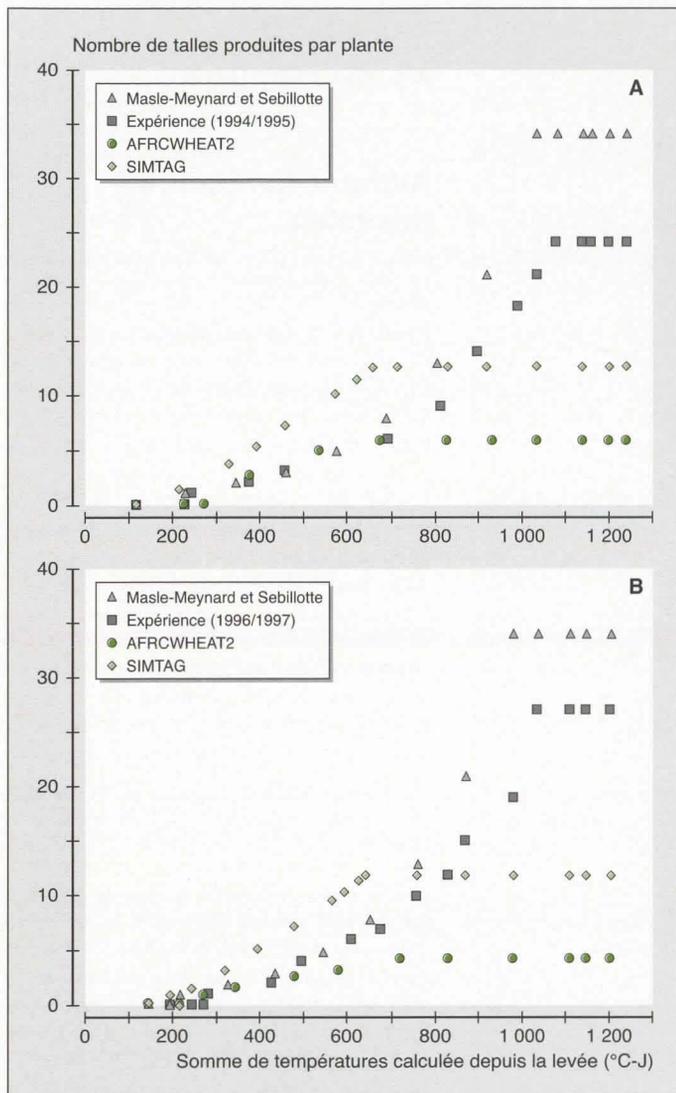


Figure 5. Évolution du nombre de tiges produites par plante en fonction de la somme de températures depuis la levée : valeurs observées ou simulées (AFRCWHEAT2, SIMTAG et modèles de Masle-Meynard et Sebillotte [13]). **A.** 1994/1995 ; **B.** 1996/1997.

Figure 5. Number of tillers per plant as a function of degree days after emergence: observed or simulated (AFRCWHEAT2, SIMTAG and Masle-Meynard and Sebillotte model [13]). **A.** 1994/1995 ; **B.** 1996/1997.

fonction de la densité de peuplement [2, 3], mais les coefficients utilisés dans la fonction exponentielle pour fixer la durée de cette phase devront être réévalués.

Adaptation du sous-modèle tallage de SIMTAG

L'adaptation de l'équation du phyllochrone sur base de l'équation de Baker

corrigée (équation 6) améliore la simulation du rythme de production des tiges par ce sous-modèle (figures 6a et b), qui cependant arrête la production des tiges d'une manière précoce et sous-estime de ce fait le nombre réel de tiges produites par plante. Par ailleurs, compte tenu de l'écart entre la durée (en somme de températures) de la période de production des tiges observée et celle calculée par SIMTAG, nous avons modifié l'équation

DP1T en fonction de la durée de la phase d'initiation des feuilles (DP1A) et de la densité de semis (PLANTS) :

Dans cette équation, le coefficient 1,16 a été remplacé par 6,34 et le coefficient - 0,008 par - 0,0008. De plus, on a considéré que le coefficient ORDER (qui assure la production des tiges

$$DP1T = DP1A + 1,16 \times DP1A \times \exp(-0,008 \times PLANTS) \quad (10)$$

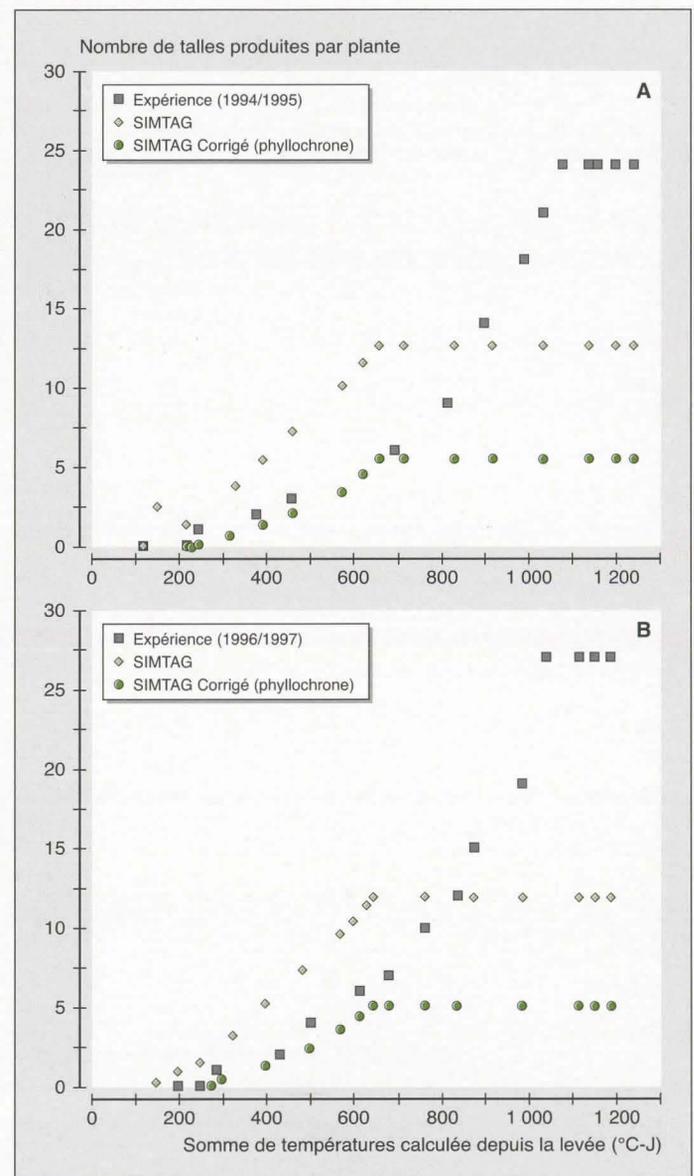


Figure 6. Évolution du nombre de tiges produites par plante en fonction de la somme de températures depuis la levée : observé ou simulé (SIMTAG et SIMTAG corrigé par rapport au phyllochrone). **A.** 1994/1995 ; **B.** 1996/1997.

Figure 6. Number of tillers per plant as a function of degree days after emergence: observed or simulated (SIMTAG and SIMTAG corrected at phyllochrone level). **A.** 1994/1995 ; **B.** 1996/1997.

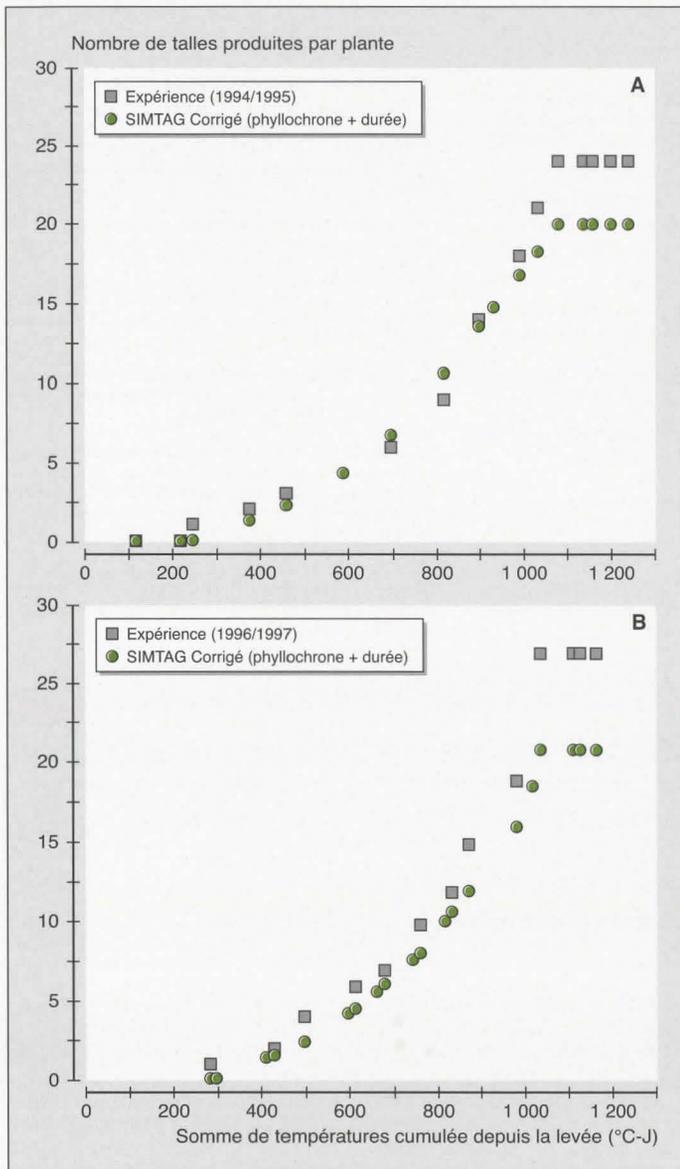


Figure 7. Évolution du nombre de talles produites par plante en fonction de la somme de températures depuis la levée : observé ou simulé (SIMTAG corrigé par rapport au phyllochrone et à la durée de production des talles). **A.** 1994/1995 ; **B.** 1996/1997.

Figure 7. Number of tillers per plant as a function of degree days after emergence : observed or simulated (SIMTAG corrected for phyllochron and tillers production duration). **A.** 1994/1995 ; **B.** 1996/1997.

secondaires et tertiaires) peut prendre les valeurs 1, 2 et 3 selon la phase de développement :

ORDER = 1 de la levée jusqu'à 3 tiges (brin-mâitre inclus) par pied ; ORDER = 2 de 3 talles par pied jusqu'à 7 talles par pied et ORDER = 3 si le nombre de talles par plante dépasse 7.

Les figures 7a et b comparent les données expérimentales (saisons 1994/1995 et 1996/1997) à celles obtenues par simulation à l'aide du sous-modèle corrigé, dont les résultats théoriques sont dès lors plus proches de la réalité observée.

Conclusion

L'analyse des modules de tallage SIMTAG et AFRCWHEAT2 montre qu'ils utilisent le même principe de base, essentiellement l'évolution de la population des tiges par unité de surface. Seul le modèle de Masle-Meynard et Sebillotte prédit les potentialités observées et rend compte de nos résultats expérimentaux en faible densité de semis.

L'inadaptation des deux autres modèles (SIMTAG et AFRCWHEAT2) à la simulation du tallage se manifeste tant pour le rythme d'apparition des talles que pour la durée de leur production.

L'ajustement correctif du sous-modèle SIMTAG a montré que la densité de semis à un effet aussi important que le phyllochrone et la durée de production des talles.

Lexique

AFRCWHEAT2 : modèle mathématique de simulation de la croissance et du développement du blé élaboré en Angleterre par Porter *et al.* [6, 15].

DAYLNC : longueur du jour à la levée selon le modèle SIMTAG.

DENF3 : facteur déficit d'azote (dans AFRCWHEAT2) qui réduit la proportion de talles produites : il se calcule en fonction de la concentration de l'azote dans la plante [6].

DPHIDT : variation de la longueur du jour à la levée dans AFRCWHEAT2.

EINT : phyllochrone (somme de températures qui sépare l'apparition de deux feuilles successives).

N_i : nombre de talles produites/m² pendant la semaine i selon AFRCWHEAT2.

P_n : proportion de talles survivantes dans chaque groupe à la fin de chaque semaine selon AFRCWHEAT2.

PLANTS : densité de semis selon SIMTAG.

RINPOP : nombre de plantes à la levée dans le modèle AFRCWHEAT2.

SHOOTM : nombre de tiges par m² calculé par SIMTAG.

SIMTAG : modèle mathématique de simulation de la croissance et du développement du blé élaboré dans les conditions de la Syrie par Stapper [2].

Références

1. Gate P. *Écophysiologie du blé*. Paris, France : Technique et documentation-Lavoisier, 1995 ; 429 p.
2. Stapper M. *SIMTAG : a simulation model of wheat genotypes*. Aleppo, Syria : Model Documentation, ICARDA, 1984.
3. Darwinkel A. Patterns of tillering and grain production of winter wheat at a wide range of plant densities. *Netherlands J Agri Sci* 1978 ; 26 : 383-98.

Références (suite)

4. Masle-Meynard J. Élaboration du nombre d'épis d'un peuplement de blé d'hiver en situation de compétition pour l'azote. I. Mise en évidence d'un stade critique pour la montée d'une talle. *Agronomie* 1981 ; 8 : 623-32.
5. Stapper M, Harris HC. Assessing the productivity of wheat genotypes in a Mediterranean climate, using a crop-simulation model. *Field Crops Res* 1989 ; 20 : 129-52.
6. Porter JR. AFRCWHEAT2 : a model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur J Agron* 1993 ; 2 : 69-82.
7. Debaeke P, Cabelguenne M, Casals ML, Puech J. Élaboration du rendement du blé d'hiver en conditions de déficit hydrique. II. Mise au point et test d'un modèle de simulation de la culture de blé d'hiver en conditions d'alimentation hydrique et azotée variées : Epicphase-blé. *Agronomie* 1996 ; 16 : 25-46.
8. Ritchie JT, Godwin DC. CERES-Wheat : a general, user oriented wheat yield model. *Agronomy Abstracts of the 75th Annual Meeting, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1983.*
9. Williams JR, Jones CA, Spanel DA. The EPIC crop growth model. *Trans ASAE* 1989 ; 32 : 497-511.
10. Wier AH, Bragg PL, Porter JR, Rayner JH. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J Agri Com* 1984 ; 102 : 371-82.
11. Klepper BR, Rickman W, Peterson CM. Quantitative characterization of vegetative development in small cereal grains. *Agron J* 1982 ; 74 : 789-92.
12. Haun JR. Visual quantification of wheat development. *Agron J* 1973 ; 65 : 116-9.
13. Masle-Meynard J, Sebillotte M. Étude de l'hétérogénéité d'un peuplement de blé d'hiver. II. Origine des différentes catégories d'individus du peuplement, éléments de description de sa structure. *Agronomie* 1981 ; 1 : 217-24.
14. Baker CK, Gallagher JN, Monteith JL. Daylength and leaf appearance in winter wheat. *Plant Cell Environ* 1980 ; 3 : 285-7.
15. Porter JR. A model of canopy development in winter wheat. *J Agri Sci Camb* 1984 ; 102 : 383-92.
16. Landsberg JJ. Some useful equations for biological studies. *Experimental Agriculture* 1977 ; 13 : 273-86.
17. Anadif N. Étude du tallage d'une variété de blé tendre dans les modèles de grandes cultures et effet d'une apport excessif d'eau sur le rendement et le lessivage des nitrates. Thèse de 3^e cycle, Faculté Semailia, Marrakech Maroc, 1999.
18. McMaster GS, Wilhelm WW. Accuracy of equations predicting the phyllochrone of wheat. *Crop Sci* 1995 ; 35 : 30-6.
19. Jones JL, Allen EJ. Development in barley (*Hordeum Sativum*). *J Agric Sci (Cambridge)* 1986 ; 107 : 187-213.
20. Kirby EJM, Perry MW. Leaf emergence rates of wheat in a Mediterranean environment. *Aust J Agri Res* 1987 ; 38 : 455-64.
21. Casals ML. *Introduction des mécanismes de résistance à la sécheresse dans un modèle dynamique de croissance et de développement du blé dur*. Doctorat de l'Institut national agronomique Paris-Grignon, France, 1996.
22. Ouattar S, Ameziane TE. *Les céréales au Maroc : la recherche à l'amélioration des techniques de production*. Rabat Maroc : Édition Toubkal, 1989 ; 254 p.

Summary

Modeling the tillering of wheat sown at low density under dry conditions

N. Anadif, M. El Hisse, A. Lahrouni

Tillers are an essential component influencing wheat yield. Rhythm, rate and duration of tiller production, as well as their number per plant surviving to maturity, depend on several factors (climatic, genetic and soil characteristics). Comparative analysis of SIMTAG [2], AFRCWHEAT2 [6], and Masle-Meynard and Sebillotte [13] wheat tiller models was carried out in Marrakech (Morocco). SIMTAG and AFRCWHEAT2, both based on the phyllochron-leaf concept, give similar simulations of tiller development. Calculation of tiller populations was carried out on a daily or weekly basis in SIMTAG and AFRCWHEAT2, respectively. Evolution in the number of tillers in AFRCWHEAT2 starts at the four-leaf stage on the main stem and ends at the double ridge stage. In SIMTAG, the period of tillering starts when about 2.5 leaves have appeared on the main shoot and can continue beyond the stage of floral initiation as a function of seedling density (Figure 2).

SIMTAG and AFRCWHEAT2 are simplified models and do not aim at generating a description of plant functioning. The period considered from the beginning to the end of tiller production represents a major weakness in both models. Another simplification in AFRCWHEAT2 is the reduction in shoot population due to nitrogen stress, as the model uses a nitrogen deficit factor between 0.8 and 1. This factor is inappropriate to our climatic conditions, as we have obtained reductions that can exceed 65%.

The Masle-Meynard and Sebillotte model (Figure 3) is expressed through an analytic law relating the development of tillers to the degree-days (°C-day) (Table 2).

In Figure 4, in parallel with our experimental results, we present the theoretical development of a plant according to the Masle-Meynard and Sebillotte model. The two presentations are similar, each phyllochron correspondign to a group of tillers. Comparison of the predictions of the three models, along with our experimental data (Figures 5a and b), show that only the Masle-Meynard and Sebillotte model agrees with factual results, in terms of both rate and duration of tiller production. SIMTAG and AFRCWHEAT2 are not suitable for describing tiller populations. The level of the production rate (accelerated with SIMTAG using the low phyllochron of 61.3° C-day compared to a 115° C-day obtained experimentally), and the duration of tiller production thus lead to an underestimate in the total number of tillers produced.

Using the Baker equation [14] to correct the phyllochron, SIMTAG model predictions are improved for the rhythm of tiller production (Figures 6a and b). Another correction can be made in terms of the duration of the tiller production period. Results obtained after correction (Figures 7a and b) show a definite improvement in predictions of the number of tillers as a function of degree-days.

Cahiers Agricultures 2000 ; 9 : 475-83.

Résumé

Cet article présente une analyse comparative des « modules de tallage » liés aux modèles SIMTAG, AFRCWHEAT2 et le modèle de Masle-Meynard et Sebillotte, ce dernier s'exprimant par une loi analytique qui lie le développement des talles à la somme de températures. Les prédictions obtenues par simulation avec les trois modules ont été comparées à nos observations au champ sur une variété de blé tendre conduites à Marrakech (Maroc) sous un climat de type semi-aride. Seul le modèle Masle-Meynard et Sebillotte rend compte des données expérimentales. Les modèles AFRCWHEAT2 et SIMTAG présentent des inadaptations pour la description du tallage, tant au niveau du rythme qu'à celui de la durée de production des talles. La correction du module de tallage SIMTAG, en tenant compte du rythme et de la durée de production des talles, améliore nettement les résultats fournis.
