

CR002788

La prévision agricole à l'échelle du Sahel

Abdallah Samba, Benoît Sarr,
Christian Baron, Eric Gozé, Florent Maraux,
Benoît Clerget, Michaël Dingkuhn

En zone sahéenne, l'agriculture est étroitement dépendante des aléas du climat. Depuis la fin des années 60, le Sahel enregistre des périodes de sécheresse récurrentes, marquées par des totaux pluviométriques inférieurs à ceux des années 50 et une mauvaise distribution spatiale et temporelle des pluies (MORI, 1992). De nombreux auteurs ont mis en évidence le lien entre les anomalies des températures de surface dans l'Atlantique nord et sud, le phénomène planétaire El Niño et la dynamique des précipitations en Afrique (CAMBLEUX et DIOR, 1999).

Des épisodes secs de l'ordre de dix à quinze jours consécutifs surviennent dans 80 % des cas en phase végétative et durant la phase de formation des grains, occasionnant une baisse des rendements des principales cultures alimentaires des zones sahéennes, comme le mil et le sorgho (SIVAKUMAR, 1988).

Ces anomalies pluviométriques, qui peuvent se traduire par des baisses de la production en grain de 60 % (WATSON *et al.*, 1998), entravent le développement social et économique des pays sahéens.

Prévoir le rendement des cultures vivrières dans les pays des zones sahéennes

tondées sur les enquêtes et les sondages sont jusqu'à présent largement utilisées pour atteindre cet objectif. Leur mise en œuvre reste lourde sur le terrain et les résultats définitifs ne sont souvent exploitables que trop tardivement.

En vue d'améliorer ces prévisions, il est dorénavant possible de recourir à des méthodes déterministes fondées sur la connaissance des relations entre sol, eau, plante et atmosphère et de la distribution spatio-temporelle des pluies. L'enjeu est important, car, au moyen des techniques informatiques actuelles, les premiers indicateurs de production peuvent être fournis un à deux mois avant les récoltes.

Le diagnostic hydrique

Le diagnostic hydrique des cultures, déterminé en fonction de la demande évaporative, des conditions édaphiques et du stade phénologique des cultures, renseigne sur le degré de satisfaction en eau des cultures. Des indicateurs susceptibles d'être utilisés comme estimateurs de rendement sont calculés au moyen du logiciel Dhc. Ce logiciel, développé au centre régional Agrhymet, programme régional d'agrométéorologie et d'hydrologie opérationnelle avec l'appui technique et scientifique du Cirad, a pour origine le modèle Bip4 conçu par le Cirad à Montpellier. De nombreuses modifications ont été apportées à chacun des algorithmes en prenant en compte les demandes des utilisateurs des pays du Cils (Comité permanent inter-Etats pour la lutte contre la sécheresse dans le Sahel). Une version stationnelle Dhc-4, fournit les éléments du bilan hydrique et l'estimation des rendements des cultures dans les stations d'observation. La dernière version spatiale, intitulée Dhc-sp, qui utilise des données d'entrées numérisées d'origine satellitaire, présente ces variables de sortie en format cartographique.

Le système de prévision d'Agryhmet a sensiblement évolué depuis sa conception en 1991. Les prochaines étapes vont tirer profit de la recherche en climatologie, qui a permis de sérieuses avancées au cours de la dernière décennie. On en retiendra deux aspects : la possibilité de prévoir à l'échelle de temps saisonnière, sur quelques mois, les tendances des précipitations et températures par rapport à la normale ; la possibilité de formuler des scénarios réalistes par rapport aux tendances lourdes de changement climatique — augmentation de température, changements dans la répartition spatio-temporelle des pluies, composition de l'atmosphère, etc. — à l'échelle d'une dizaine d'années.

Ces innovations nouvelles offrent donc des perspectives intéressantes pour

associant climatologues, physiiciens, hydrologues, physiologistes et agronomes pour mettre à profit les connaissances nouvellement acquises. L'objectif, en deux volets, est de mieux gérer les ressources hydriques et agricoles en s'appuyant sur la prévision saisonnière d'une part, d'explorer les effets du changement climatique sur les ressources en eau et la productivité des cultures d'autre part. Ce projet concerne l'ensemble des régions tropicales, l'Afrique sahélienne en particulier. Il prendra en compte des options culturales majeures : choix entre plusieurs cultures alimentaires — mil, sorgho, maïs, arachide — et choix d'intensité des systèmes — variétés types, densité du peuplement végétal.

Pour mener à bien sa contribution au projet, le Cirad s'est associé au centre régional Agrhymet et au Ceraas (Centre régional pour l'amélioration de l'adaptation à la sécheresse). Son implication spécifique consistera à mettre au point des outils capables de prendre en compte les avancées. Ces outils seront de nature statistique — pour la prise en compte des tendances saisonnières —, et agronomiques ou écophysiologiques — pour l'élaboration de modèles de culture susceptibles d'incorporer les effets de changements climatiques.

Les objectifs de cette analyse sont d'évaluer les points forts et les faiblesses du Dhc-cp dans sa version actuellement utilisée et de discuter des options scientifiques et techniques pour son amélioration : adaptation du modèle de culture aux itinéraires techniques plus traditionnels ou intensifiés, prise en compte du photopériodisme, de la production de grain et de biomasse.

Le logiciel Dhc

Le modèle de bilan hydrique

L'équation du bilan hydrique n'est autre que l'équation de continuité ou de conservation de la masse. Pour une tranche de sol où se situe l'extraction racinaire, le bilan des entrées et des sorties d'eau dans un intervalle de temps t sera de :

$$Plu + Irr - Ruis - Etr - Dr = \Delta S \text{ entre } t \text{ et } t + 1, \quad [1]$$

où : Plu, pluie ; Irr, irrigation ; Ruis, ruissellement ; Etr, évapotranspiration réelle ; Dr, drainage ; $\Delta S = (S_{t+1} - S_t)$, variation du stock d'eau dans la tranche de sol considérée — positive si les entrées d'eau sont supérieures aux sorties, négative dans le cas contraire. L'évapotranspiration réelle de la culture, Etr, est calculée dans le modèle suivant la formule générique d'Eagleman pour les cultures annuelles au pas de temps journalier. Elle est

où :

- E_{m_p} évapotranspiration maximale journalière de la culture ;
- $Hr_j = Stock_j / Rur_j$, teneur en eau volumique en pourcentage, avec Rur_j , réserve utile radriculaire du jour, évoluant avec la colonisation du sol par les racines, qui est le stock d'eau compris entre la capacité au champ et le point de flétrissement et avec $Stock_j$, quantité d'eau réellement disponible pour les racines du jour, calculée sur la tranche de sol colonisée (stock total - stock d'eau au point de flétrissement).

L' E_{tr} est donc comprise entre 0, condition de sécheresse extrême pour laquelle la plante atteint son point de flétrissement permanent, et l' E_{tm} , condition hydrique non limitante pour la culture (figure 1).

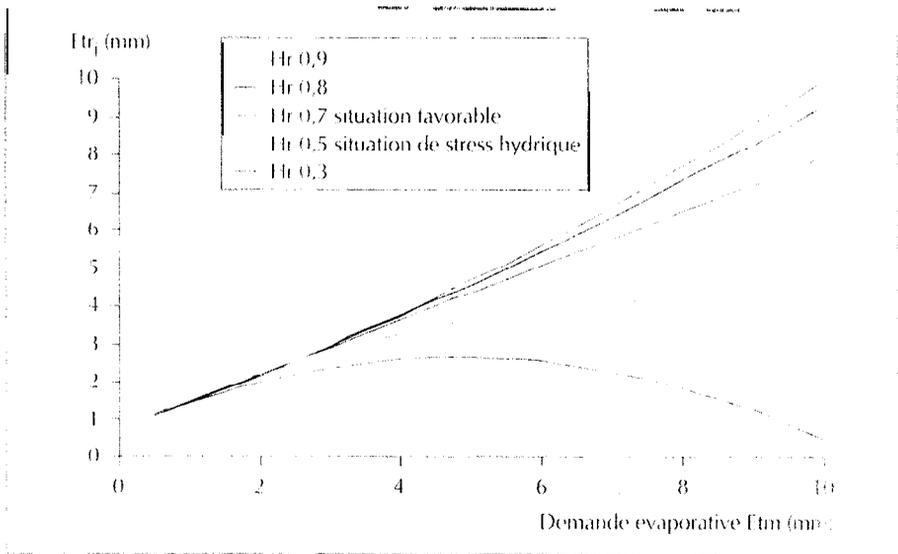


Figure 1. Relation entre l'évapotranspiration réelle journalière (E_{tr}) et la demande E_{tm} en fonction de l'humidité disponible dans le sol.

Hr : humidité relative.

L'évapotranspiration maximale de la culture, E_{tm} , est la quantité d'eau maximale que peut consommer une culture durant une période donnée, comme une décade, une durée du cycle. L' E_{tm} dépend évidemment du stade de développement de la plante - durée de cycle, appareil végétatif -, et de la demande climatique, E_{tp} :

$$E_{tm} = K_c \times E_{tp},$$

sont satisfaits à 100 %. Pour cela, le sol contenu dans les casiers est maintenu à la capacité au champ par des arrosages fréquents.

L'évolution des coefficients culturaux dans le temps peut être rapportée au développement de la culture (figure 2).

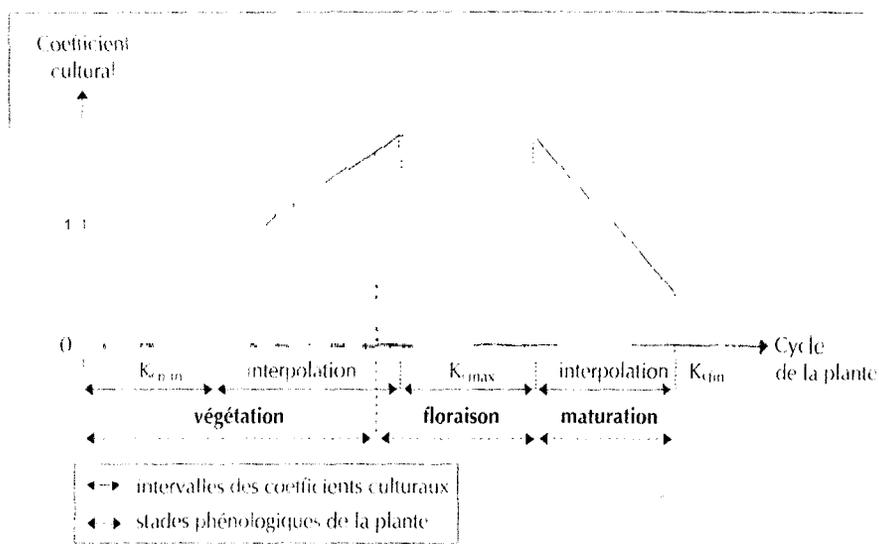


Figure 2. Schématisation des coefficients culturaux, K_c , en fonction du temps.

Le découpage en différentes phases de K_c correspond aux différents stades phénologiques des céréales — mil, sorgho, maïs, riz — ou des légumineuses, comme l'arachide et le niébé.

La réserve en eau utile du sol, R_u , est une variable qui prend en compte la texture, c'est-à-dire la granulométrie et la nature des éléments constituant le sol, comme le gravier, le sable, le limon, l'argile, ainsi que la profondeur, permettant de définir un horizon induré bloquant l'enracinement. On la définit comme la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent :

$$R_u = \sum_{i=1}^{i_{\max}} p_a \times (R_{\infty} - h) \times z / 100,$$

où :

- R_u , réserve utile exprimée en millimètres ;
- p_a , densité apparente sèche de la tranchée de sol ;

Le volume de sol exploité par les racines, Rur , dépend de la descente du front radiculaire, en centimètres par jour, estimé sur la base d'une expérimentation en station, qui peut être bloquée par le front d'humectation. La descente du front d'humectation est simulée à partir du remplissage des horizons supérieurs par les apports en eau jusqu'à la profondeur de sol correspondant à la capacité maximale de stockage du réservoir sol, Rum .

La figure 3 illustre la modélisation de la cinétique de l'eau dans le sol et de la croissance radiculaire.

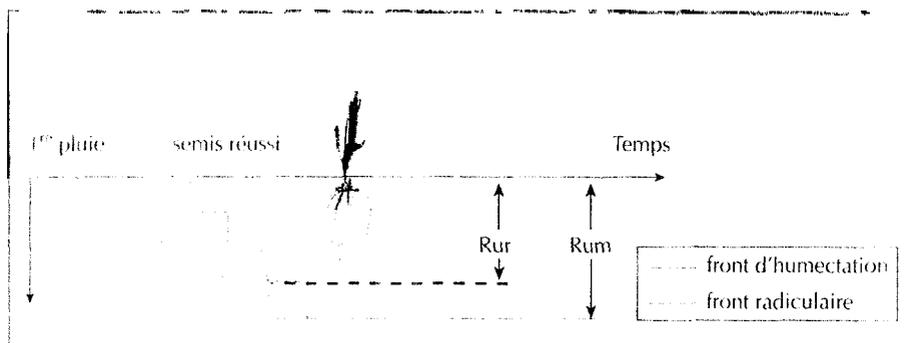


Figure 3. Modélisation de la cinétique de l'eau dans le sol et de la croissance radiculaire. Rur : réserve utile racinaire ; Rum : réserve utile maximale.

Les cartes d'Etp et le générateur de pluies

Le réseau des stations synoptiques permettant le calcul de l'Etp est beaucoup moins important que le réseau de stations pluviométriques. A partir de séries historiques communes, contrôlées et corrigées, qui couvraient la période de 1950 à 1985, une série de cartes des moyennes interannuelles des Etp décennales a été créée. Ces cartes couvrent l'ensemble des pays du Cilss en chaque point d'une grille de $0,5^\circ$ de côté (MOREL, 1992).

En cours de saison de culture, la récolte reste encore incertaine à cause de l'aléa du climat. Des différentes entrées du bilan hydrique, les pluies à venir sont la principale source de cet aléa. Les pluies futures sont imprévisibles, mais leurs propriétés statistiques ont été modélisées pour servir d'entrée au bilan hydrique en tout point des pays du Cilss. Les études statistiques sur les pluies ne fournissent que des analyses fréquentielles à diverses échelles de temps, essentiellement décennales et mensuelles. Ces analyses ne prennent pas en compte la dépendance entre les pluies d'une même saison et ne

Ce modèle consiste en une chaîne de Markov sur les pluviosités et une loi de probabilité sur les hauteurs de pluie. Les jours sont séparés en deux catégories : jour pluvieux quand la pluviométrie relevée atteint 5 millimètres, jour sec sinon. La succession des jours secs et pluvieux est décrite par une chaîne de Markov d'ordre 1. Celle-ci comporte deux paramètres : la probabilité de pluie le lendemain des jours pluvieux et la probabilité de pluie le lendemain des jours secs. Les hauteurs inférieures à 5 millimètres ne sont pas prises en compte. Les hauteurs des pluies supérieures à 5 millimètres sont indépendantes et suivent une loi exponentielle tronquée, à un seul paramètre.

Autrement dit, la dépendance entre pluies d'une même saison tient uniquement à la chaîne de Markov sur les jours secs ou pluvieux. Les saisons sont prises en compte par une variation mensuelle des probabilités et des hauteurs de pluie. Chaque station est ainsi caractérisée par trois paramètres pour chaque mois de l'année, que l'on peut estimer directement d'après les données.

Le modèle ainsi défini à l'échelle journalière permet de retrouver les distributions de pluviométrie supérieures à 5 millimètres aux échelles décadaire, mensuelle et annuelle, ainsi que les distributions des durées des épisodes secs et pluvieux. La comparaison des distributions a été réalisée par la méthode de l'échantillon-test, ce qui signifie que les données qui ont servi à estimer les paramètres n'ont pas servi à valider le modèle. La distribution de fréquence des récoltes probables est alors calculée en appliquant la méthode de Monte-Carlo. Des pluies journalières équiprobables sont simulées à l'aide d'un générateur de pluies pseudo-aléatoires. Un bilan hydrique calculé à partir de ces pluies générées fournit des sorties dont la distribution de fréquence est identique à celle que l'on obtient sur les pluies réelles supérieures à 5 millimètres.

L'intérêt du modèle stochastique, par rapport aux pluies réelles, est qu'il est disponible en tout point du Cilss par interpolation. Les paramètres mensuels ont été estimés sur l'ensemble des stations du Cilss dont les données avaient été validées par MORI (1992), sur la période de 1968 à 1983. Chacun a été interpolé par régression polynomiale afin de produire une carte. Pour obtenir des cartes de prévision de rendement, en chaque point d'une grille de $0,5^\circ$ de côté les pluies estimées par télédétection sont complétées par 1 000 séquences équiprobables de pluies générées aléatoirement. Les 1 000 bilans hydriques ainsi déterminés permettent d'estimer une distribution de rendements probables.

L'exclusion des faibles pluies, inférieures à 5 millimètres, détermine un biais

Du bilan hydrique aux rendements

L'indice de rendement espéré, I_{resp} , est un indicateur construit à partir du taux de satisfaction des besoins en eau cumulés sur le cycle ($Isbe_{c0}$), représentatif d'un volume de biomasse, et du taux de satisfaction des besoins en eau durant la phase sensible, représentatif de la production potentielle de l'épi (FOREST et CORTIER, 1991).

$$I_{resp} (\%) = Etr/Etm (\text{cycle}) \times Etr/Etm (\text{phase sensible})$$

La phase sensible correspond à la période de la phase de fructification, de l'induction florale à la maturation, durant laquelle l'indice calculé sur 20 jours, par moyenne glissante, est minimal. Pour une variété de 90 jours, en fin de campagne, on retient l'indice calculé sur la phase allant de 50 à 90 jours comme indice caractérisant la phase sensible.

En 1988, 1989 et 1990, 90 placettes de rendement par village ont été réparties sur plusieurs sites au Sénégal, au Mali et au Niger. Les observations de rendement ont été reliées aux valeurs moyennes de l' I_{resp} calculées pour les sites considérés. La relation obtenue est de type linéaire (MARAUX *et al.*, 1994) :

$$\text{rendement (kg/ha)} = 11,3 \times I_{resp} - 128,$$

avec $R^2 = 0,66$.

Cette relation, qui permet d'expliquer 70 % du rendement final espéré en grain, est utilisée pour calculer les rendements potentiels sur chacune des 180 stations du réseau de suivi des cultures du centre Agrhymet pour les variétés de 90 à 150 jours, en retenant les dates de semis les plus probables et intéressant le plus grand pourcentage de surfaces emblavées.

Simulations

L'originalité du Dhc utilisé par le centre Agrhymet tient surtout au fait qu'il s'appuie sur un réseau d'observations de parcelles paysannes suivies par les composantes nationales d'Agrhymet et les partenaires de la recherche agronomique dans les différents pays. Ces réseaux ont fourni des premiers résultats intéressants sur le plan régional quant à l'influence des conditions agrométéorologiques sur la prévision des rendements agricoles.

Depuis 1996, le suivi sur environ 180 stations fournit, tous les dix jours :

- la pluviométrie journalière, au moyen d'un réseau de mesure, ou la pluviométrie décadaire, estimée par satellite ;

- les températures journalières à partir des données décadaires (Atlas Agrhymet) ;

Ces réserves utiles régionales varient de 60 millimètres au nord de certaines zones sahéliennes à 120 millimètres dans la partie méridionale du Sahel.

L'acquisition faite à la fin de chaque décennie a permis un suivi presque en temps réel de la situation agrométéorologique qui a prévalu durant cette période. Le diagnostic hydrique se fait ensuite en trois étapes, du semis à la récolte.

Pour déterminer les vagues de semis et les premières dates de réussite des semis, le critère de réussite est une alimentation en eau correcte des cultures, utilisant un seuil empirique de E_{tr}/E_{tm} , durant les vingt premiers jours qui suivent le semis.

La figure 4 montre quelles ont été les dates de semis réussis, correspondant au début effectif de la saison agricole, pour l'année 1998. La figure 5 présente l'écart entre le début de la saison 1998 et la moyenne des années 1961 à 1990. On peut ainsi visualiser les retards de semis dans certaines zones par rapport à une année de référence, comme la précocité d'une saison.

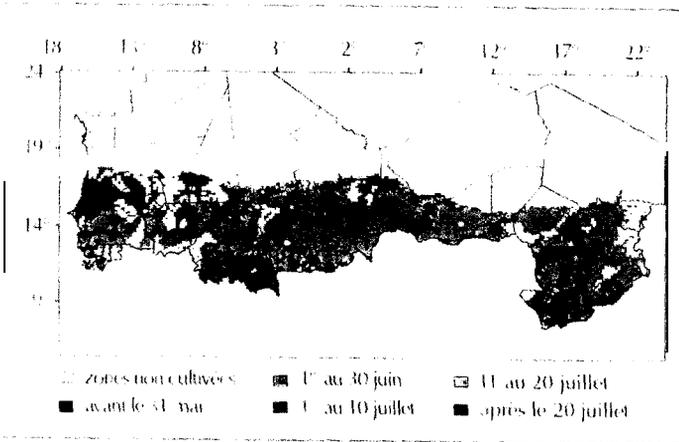


Figure 4. Carte des dates de semis réussis du mil en 1998.

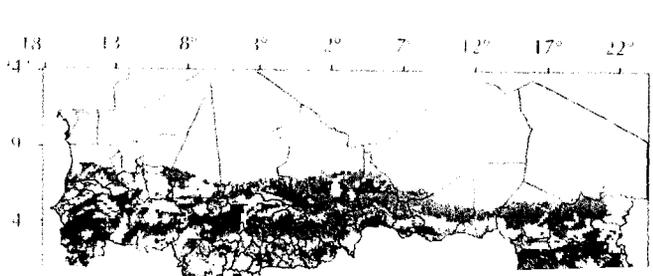


Figure 5. Carte de comparaison des dates de semis réussis du mil

Les images satellitaires sont de plus en plus utilisées pour pallier les difficultés de spatialisation des données et les déficiences du réseau d'observation au sol. Ainsi, pour disposer de données sur la pluviométrie dans l'ensemble de la sous-région, des méthodes d'estimation des pluies à partir des images Météosat ont été développées, notamment au centre Agrhymet.

Dans le cas du Dhc, les derniers développements informatiques ont abouti à un modèle où les images de pluies estimées remplacent les données de postes. Les termes du bilan hydrique sont ainsi directement spatialisés. Les dates de semis, comme les autres paramètres, notamment le rendement et la satisfaction des besoins en eau, peuvent être directement intégrés dans une carte (figures 4 à 7). Ce nouveau modèle de bilan hydrique intégrant les champs pluviométriques permet d'inclure des plans d'informations agronomiques divers tels que le taux d'occupation des sols, les cartes de faciès agricoles et les cartes pédologiques.

Le suivi décadaire de l'alimentation en eau des principales cultures et la localisation des poches de sécheresse et de forte pluviosité constituent la deuxième étape du diagnostic hydrique.

Enfin, la prévision des rendements à l'échelle régionale est réalisée un à deux mois avant les récoltes, en prenant en compte les stocks d'eau disponibles dans le sol et les probabilités des pluies à venir. La simulation du bilan hydrique au moyen du système Dhc4 pendant tout le cycle de la culture choisie s'appuie sur les données pluviométriques de l'année en cours complétées par les données de la série historique. Le bilan est effectué pour chacune des années de la série historique retenue, en remplaçant les données pluviométriques du début du bilan par les données de chacune des années de la série historique à partir de la date d'actualisation.

L'estimation s'affine à mesure que l'on avance dans le cycle. Elle devient définitive lorsque le cycle agricole est bouclé. Dans le cas du logiciel Dhc-cp, un générateur de pluies aléatoires (Gozi, 1990) a été greffé sur le modèle. Il fournit les données nécessaires pour les images des pluies prévues, les moyennes des mois d'août, de septembre et d'octobre. Les séquences de pluies aléatoires calculées par le générateur à partir d'août fournissent une information sur la fin probable de l'hivernage. Sur cette base, Dhc-cp établit des bilans hydriques prévisionnels pour la saison en cours, pour les dates postérieures au 1^{er} août.

Les résultats des simulations aboutissant au rendement espéré du mil sont ainsi cartographiés (figure 6). Les différences de rendement entre l'année en

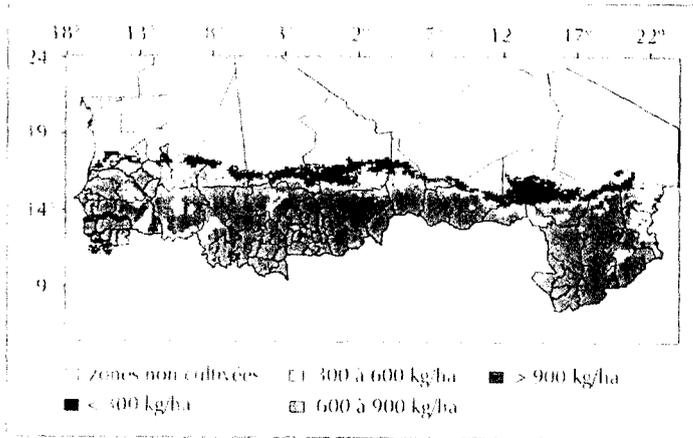


Figure 6. Carte des rendements estimés de mil, en kilos par hectare, en 1998

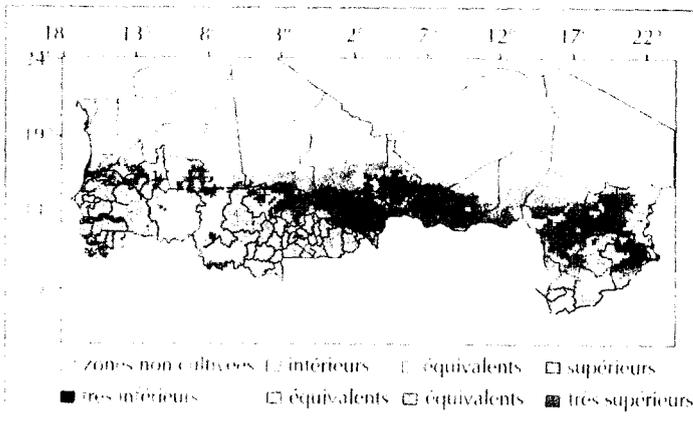


Figure 7. Carte de comparaison des rendements estimés de mil en 1998, par rapport à ceux de la moyenne pour la période de 1961 à 1990

Comparaison entre les estimations de rendement du mil au Sénégal simulées au moyen du Dhc et celles observées par le réseau Diaper, au moyen d'enquêtes en milieu réel, en kilos par hectare, pour 1993 et 1994.

Département	Simulations Dhc (kg/ha)		Estimation Diaper (kg/ha)		Ecart (%)	
	1993	1994	1993	1994	1993	1994
Saint-Louis	517	360	357	373	+ 45	+ 4
Louga	570	337	463	354	+ 23	- 5
Thiès	608	423	524	433	+ 16	- 2
Fatick	742	646	706	577	+ 5	+ 12
Kaolack	721	755	815	793	- 11	- 5
Bambev	609	517	501	477	+ 22	+ 8

Vers un modèle plus performant

Le modèle actuellement utilisé par Agrhythm est caractérisé par une grande simplicité, justifiée par le volume limité des données utilisables pour le calibrage et la validation du modèle et par l'objectif restreint, celui de prédire, dans une optique de sécurité alimentaire, l'impact de la pluviométrie sur la production. Cependant, les objectifs et les exigences des utilisateurs évoluent quant à la précocité des prédictions et quant aux spécificités des systèmes de culture ciblés.

Le projet Promise vise à répondre à ces deux enjeux, mais l'analyse ne porte ici que sur l'aspect cultural. Parmi le grand nombre de facteurs qui constituent les spécificités d'un système de culture ou de production, ceux qui sont liés à leur degré d'intensification sont le centre d'intérêt actuel : la variété type, traditionnelle et photosensible ou moderne et insensible, et la variabilité du cycle en fonction de la latitude et de la date de semis ; la densité du peuplement, généralement liée au choix d'une variété type ; les apports en engrais azotés, aussi souvent liés à la variété type.

Ces facteurs interagissent fortement avec le bilan hydrique. Même dans le cas d'un modèle très sommaire, il est nécessaire de simuler les grandes phases phénologiques, un bilan carboné et une surface foliaire. Le modèle Sarra, utilisant le même bilan hydrique que le Dhc, a servi de base pour créer une version plus détaillée, Sarra 2.

Le modèle simule les rendements potentiels, limités par l'eau, le rayonnement et un coefficient de conversion de l'énergie interceptée, ϵ_p , qui varie en fonction de l'état azoté de la plante. Ces rendements potentiels correspondent donc aux résultats que l'on peut obtenir en station. Ils seront supérieurs aux rendements paysans simulés par le Dhc.

Pour une simulation des rendements chez les paysans, réduits par un complexe de contraintes mécaniques, le modèle utilise facultativement un coefficient de milieu réel empirique, K_{mr} , modifiant ϵ_p , analogue au calage des coefficients empiriques de la relation liant l'esp et rendement.

La simulation des cultures

Variables d'entrée, prévisions climatiques et paramètres culturaux

Outre les variables d'entrée déjà utilisées par le logiciel Dhc, la pluviométrie et l'Etp, la version Sarra 2 intègre la température moyenne du jour, pour calculer le temps thermique, la phénologie et le rayonnement solaire Rs, pour déterminer l'assimilation du carbone. Si nécessaire, Rs sera calculé à partir des durées d'ensoleillement (relations fournies par la FaO).

Les partenaires du projet Promise, sous la coordination de l'université de Reading, au Royaume-Uni, fourniront des données agrométéorologiques simulées par un modèle mécaniste de circulation globale — la pluviométrie et toutes les variables constituant la formule de Penman pour le calcul de l'Etp sur une grille de 25 x 25 kilomètres pour la région du Sahel. Cette base de données simulées comprendra une partie prévisionnelle pour certaines périodes d'aujourd'hui à l'année 2050 (*time slices*) et une partie rétrospective (*hindcast*) paramétrée avec les séries historiques existantes. Ces simulations climatiques ouvrent de nombreuses perspectives pour toute une gamme d'applications de Sarra 2 et pour un nouveau prototype du logiciel Dhc. Un système prévisionnel du climat à l'échelle saisonnière pour le Sahel devra ensuite être mis en place.

Les paramètres culturaux de Sarra 2 portent sur la date de semis et de resemis, fixe ou fonction de la pluviométrie, l'espèce et la variété type, la densité du semis et une contrainte arbitraire liée à l'apport azoté.

Le photopériodisme

Au regard de plusieurs années de recherche et d'amélioration variétale, des prospections effectuées au Mali — par Clément et Leblanc, de l'International Board for Plant Genetic Resources, en 1978, et par Vaksman et Traoré, du Cirad, en 1999 — montrent la pérennité d'un choix variétal fondé sur le caractère photopériodique du sorgho en milieu paysan. Ce choix ne concorde pas avec les efforts de sélection de ces dernières décennies, qui privilégient des variétés non photopériodiques, tirant leurs meilleurs rendements potentiels d'une architecture différente et, partiellement aussi, d'un cycle constant et idéal pour réaliser cette potentialité. En revanche, une majorité des producteurs tient aux variétés traditionnelles, qui permettent des dates de semis variables.

phase photosensible, P_{sp} ; phase reproductive ; phase de maturation ou de remplissage (DINGKUIH *et al.*, 1995 ; DINGKUIH et MIÉZAN, 1995 ; DINGKUIH, 1995). La durée de ces phases est définie par des constantes génétiques photothermiques. Chaque phase est caractérisée par un certain temps thermique, en degrés par jour. Ce temps thermique est constant pour toutes les phases sauf pour la P_{sp} , dont on imposera un prolongement en fonction de la photopériode observée au cours de la P_{sp} (OUATTARA *et al.*, 1998 ; MILLER *et al.*, 1968). Cette approche permet de simuler par paramétrage simple des variétés hautement photopériodiques, aux réactions de type seuil, insensibles ou intermédiaires. Un seuil photopériodique lié à la latitude servira pour simuler l'ensemble des variétés traditionnelles adaptées au climat local (KOURESSY *et al.*, 1998).

Le bilan carboné et l'indice foliaire

Une prédiction des rendements de cultures plus ou moins intensifiées nécessite un bilan carboné fondé sur une simulation explicite de l'interception du rayonnement absorbé, ϵ_a , et du taux de conversion de l'énergie interceptée en matière sèche aérienne, ϵ_p . Un couvert plus développé, résultat d'une forte croissance de biomasse, augmente les besoins en eau, nécessitant donc un modèle découplant les constituants de l'Et (E et t) l'évapotranspiration en évaporation et transpiration. Ce découplage sera fondé sur la décomposition de Kc en deux composantes additives, $Kc = K_{couvert} + K_{sol}$, prenant en compte la traction du rayonnement intercepté par chacune de ces entités, selon la loi de Beer, et leur état hydrique, donc l'humidité de la couche supérieure du sol et l'humidité relative du sol pour la plante, égale à la F_{tsw} , *fraction of transpirable soil water* - SINGCLAIR, 1990), dans l'ensemble des réservoirs enracinés. Le passage de F_{tsw} à la transpiration relative, la fraction 0...1 de $K_{couvert}$, peut être direct, avec un fonctionnement anisohydrique, ou modulé par l' F_{tp} , selon l'équation d'Eaglenan, à fonctionnement plutôt isohydrique.

La simulation du bilan carboné utilisera un coefficient génétique de conversion maximale de l'énergie interceptée, ϵ_p , modulé par un frein azoté et hydrique, lié à la transpiration relative. Une fraction de la biomasse acquise est réservée aux racines. Une fraction variable de la biomasse restante, donc aérienne, constitue les feuilles, $Bmf/Bmaer$, dont l'indice foliaire, LAI , correspondant est calculé en fonction de la surface massique des feuilles, qui varie en fonction du stade du développement (DINGKUIH *et al.*, 1999). L'interception du rayonnement, ϵ_a , suivra une loi de Beer. Cette approche simple et classique est complétée par une approche allométrique et empirique pour calculer la répartition de la biomasse — racines et feuilles. On a pu montrer, à

biomasse foliaire et racinaire (Dingkuhn, comm. pers.). Ces règles allométriques évitent un excès de complexité du modèle et le rendent plus robuste, car les valeurs simulées restent dans une marge physiologiquement possible. La décroissance du L_{ai} après floraison sera aussi régie par des règles allométriques en prenant en compte la croissance des organes de stockage.

L'indice de récolte, H_i , est simulé sur la base d'un paramètre génétique $H_{i,max}$ et la contrainte hydrique pendant la phase sensible, la floraison, est simulée en suivant le concept du logiciel Dhc et du modèle Sarra.

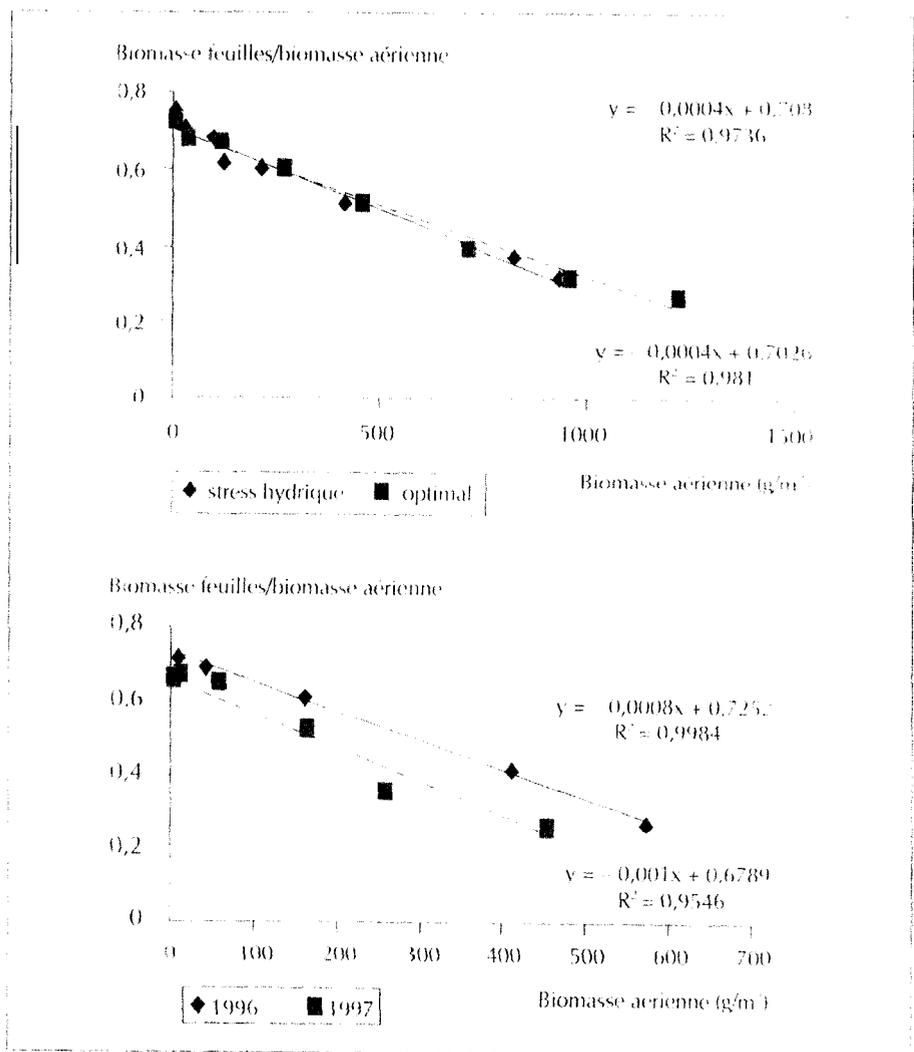


Figure 8. Relation entre le quotient de la biomasse foliaire sur la biomasse aérienne et la biomasse aérienne chez le mil, sous contrainte différentielle hydrique en saison sèche, puis en l'absence de contrainte hydrique en saison humide pour 1996 et 1997, à Bambev, au Sénégal.

La densité du peuplement

La densité du peuplement est simulée à partir de la densité de semis, ajustée par un coefficient empirique, le taux de levée. La biomasse initiale correspond aux réserves mobilisables dans les grains. Elle est généralement connue ou facile à déterminer (ASCH *et al.*, 1999). Les relations de compétition résultant d'une densité de semis sont implicitement prises en compte dans le fonctionnement du modèle. Par exemple, une faible densité initiale du peuplement provoque une croissance plus lente du Lai et réduit donc la consommation du stock d'eau. Les relations allométriques de la répartition de la biomasse, en revanche, provoquent un investissement plus important de la plante dans ses capteurs, les feuilles et les racines, quand la compétition est faible, aux stades précoces ou lorsque les densités sont faibles. La loi logarithmique de Beer et les règles allométriques d'allocation assurent finalement qu'un Lai excessif du peuplement ne soit pas encouragé. La croissance exponentielle devient une croissance linéaire ou décroissante en fonction de la biomasse et du Lai existant.

Retombées scientifiques

Un travail important de calibrage et de validation est nécessaire avant l'installation définitive d'un modèle plus détaillé dans le logiciel Dhc d'Agrhymet. Ce modèle, qui peut inclure certaines ou toutes les options présentes dans Sarra 2, servira probablement de complément à la version actuelle, sans s'y substituer. Son utilité ne se limite cependant pas à une prévision plus spécifique ou détaillée. Il convient aussi pour les études des risques et des potentialités associés aux scénarios technologiques, comme les variétés types ou les itinéraires techniques se fondant sur des situations climatiques historiques ou hypothétiques.

Le projet européen Promise, moteur et source de financement pour cette initiative de modélisation, catalysera aussi un nombre de recherche complémentaires. Par exemple, la simulation du bilan hydrique pour des hauteurs de plantes très différentes, comme le mil et l'arachide, et des peuplements à densité très variable, les cultures intensives et extensives, pose le problème de la rugosité du couvert et des effets particuliers d'une colonisation discontinue des espaces, en partie aérienne et en partie souterraine. Un sous-projet a donc été lancé pour modéliser ces phénomènes.

Une gamme d'autres applications scientifiques s'ouvre aux chercheurs, économistes et agronomes qui utiliseront le modèle Sarra, comme ceux de l'Univ System à Montpellier, du Centre d'Agronomie et d'Ecologie de Montpellier

L'impact de Promise sur la capacité d'Agryhmet à prédire le climat à court terme – par exemple, la date approximative du début de la saison pluvieuse prochaine – ne sera cependant pas immédiat. Les modèles puissants de circulation globale sont probablement capables de faire de telles prévisions, mais leur utilisation est encore trop coûteuse pour être pérennisée dans le service des utilisateurs comme Agryhmet.

Conclusion

Un système performant de prévision agricole, fondé sur un bilan hydrique simple, calibré pour le mil, a été mis en place dans les pays sahéliens. La seule variable d'entrée qui doit être fournie en temps réel est la pluviométrie journalière, ou décadaire, qui s'appuie sur la télédétection par Météosat. Les cartes d'Etq, un générateur stochastique des pluies, la typologie grossière des sols et les stades phénologiques des plantes constituent les seules données d'entrée du modèle. Le système, dans sa version actuelle, Dhc-cp, a fait preuve d'une robustesse appréciable à l'échelle des unités administratives dans les pays du Cils.

Quel avenir pour ce système de prévision et quelle évolution technique envisager ? On peut d'abord constater que pour l'objectif de prévision plus efficace, dans le sens d'une meilleure utilité pour les décideurs économiques et politiques, la contrainte principale est actuellement liée à la précocité des prévisions plus qu'à leur justesse, précision ou spécificité, en termes de systèmes. Le projet en cours Promise étudie des options mécanistes de simulation climatique à partir des modèles globaux. Cette démarche vise surtout à permettre des interventions correctives ou compensatrices par les Etats et les grands organismes internationaux dans le cas de dysfonctionnements ou de calamités. Il n'en reste pas moins qu'une mise en service pérennisée de ces modèles au sein d'Agryhmet et d'autres structures comparables est trop coûteuse dans les pays du Sud.

Un développement durable de l'agriculture sahélienne implique cependant des prévisions plus spécifiques aux types de systèmes de culture, permettant des décisions sur le choix des cultures et sur leur intensification.

Ces objectifs nécessitent des actions à deux échelles de temps : à court terme, les interventions des systèmes nationaux de vulgarisation et de conseil agricole ; à long terme, les orientations stratégiques de la recherche agricole et les investissements structurels des organismes de vulgarisation pour les technolo-

Références bibliographiques

ASCH F., SOW A., DINGREUX M., 1999. Reserve mobilization, dry matter partitioning and specific leaf area in seedlings of African rice cultivars differing in early vigor. *Field Crops Research*, 62 : 191-202.

BACCI E., RYNIERS F.N. (éd.), 1998. Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride. Actes du séminaire international, Florence, Italie, 27-30 avril, Florence, Italie, Cesia, Montpellier, Cirad, 270 p.

BARON C., PEREZ P., MARAUX F., 1996. Sarra, système d'analyses régionales des risques agroclimatiques. Trois modules, Sarramet, Sarrabil, Sarrazon. Montpellier, Cirad-cg, gestion de l'eau, 78 p.

BOUJIB D., SARR B., MAC JULY H.R., 1999. Outils et méthodologies pour le suivi des cultures et la prévision agricole au Sénégal - ouvrage de synthèse de travaux de 1995-1997. Wageningen, Pays-Bas. Cia, 36 p.

CAMBERON P., DIEP M., 1999. Inter-relationships between groundnut yield in Senegal, interannual rainfall variability and sea-surface. *Theoretical Applied Climatology*, 63 : 163-181.

DINGREUX M., 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. III. Characterizing environments by simulating the crop's photothermal responses. *Agricultural Systems*, 48 : 435-456.

DINGREUX M., MILZAN K.M., 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. II. Validation of photothermal constants and characterization of genotypes. *Agricultural Systems*, 48 : 411-434.

DINGREUX M., SOW A., SAMBA A., DIEP S., ASCH F., 1995. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. I. Photothermal and microclimatic responses of flowering. *Agricultural Systems*, 48 : 385-410.

DINGREUX M., JOHNSON D.E., SOW A., AUDIBERT A.Y., 1999. Relationship between upland rice canopy characteristics and weed competitiveness. *Field Crops Research*, 61 : 79-93.

FORD L., COURIER B., 1991. Diagnostic hydrique des cultures et la prévision du rendement régional du mil cultivé dans les pays du Cilss. In : Soil water balance in the Sudano-Sahelian zone, M.V.K. Sivakumar, J.S. Wallace, C. Renard et C. Giroux éd. Proceedings of the Niamey workshop, Niamey, Niger, février. Wallingford, Iahs Press, p. 547-557.

GOZÉ F., 1990. Modèle stochastique de la pluviométrie au Sahel. Application à l'agronomie ; générateur des pluies. Thèse de doctorat, université de Montpellier II, 228 p.

RYNIERS F.N., MOUNZOUZ C., MARSAKIAN M., RYNIERS F.N., 1998. Etude de la variabilité

- LE MARÉ F., 1998. Analyse de la mise en place de la surface foliaire du sorgho grain (*Sorghum bicolor* L. Moench) au champ. Etablissement d'un modèle de développement valable en conditions sahéliennes et nord-méditerranéennes. Thèse, université Paris XI Orsay, 122 p.
- MALAUD F., BARON C., FOREST I., IMBERNON J., OUAIDRARI H., 1994. Prévisions de rendement du mil en Afrique sahélienne : l'expérience du Cirad. In : Méthodes de prévision de rendements agricoles. Colloque de Villefranche-sur-Mer, 24-27 octobre. Montpellier, Cirad-Ca, p. 309-314.
- METZLER F.K., BARNES D.K., CRUZADO H.J., 1968. Effect of tropical photoperiods on the growth of sorghum when grown in 12 monthly plantings. *Crop Science*, 8 : 499-502.
- MOREL P., 1992. Sécheresse et rendements des cultures. In : Influence du climat sur la production des cultures tropicales. Compte rendu du séminaire régional Ifs et Cta Ouagadougou, Burkina, 23-28 octobre 1991. Wageningen, Cta, p. 209-218.
- OUATTARA M., VAKSAYNIS M., REYNIERS F.N., KOURISSY M., NIANGADO O., 1998. Variabilité phénologique des sorghos du Mali et adaptation à la diversité des agroécosystèmes. In : Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semi-aride, L. Bacci et F.N. Reyniers éd. Actes du séminaire international, Florence, Italie, 27-30 avril. Florence, Italie, Cesia, Cirad, Montpellier, p. 123-140.
- SAMBA A., 1998. Les logiciels Dhc de diagnostic hydrique des cultures. Prévision des rendements du mil en zones soudano-sahéliennes de l'Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, 9 (4) : 281-288.
- SAMBA A. *et al.*, 2000. Diagnostic hydrique des cultures appliqué aux pays du Cils-Crosa 2000. Niamey, Niger, centre régional Agrhymet, 20 p.
- SARR B., FAL M., 1999. Suivi agroclimatique de la campagne agricole pour l'estimation des rendements des cultures pluviales au Sénégal (hiver 1998). Dakar, Sénégal. (Sta. Ceraas, 20 p. (Rapport d'activité).
- SINCLAIR J.R., 1990. Theoretical consideration in description of evaporation and transpiration. In : Irrigation of agricultural crops, B.A. Stewart et D.R. Nidsen éd., p. 5-9.
- SINUKUMAK M.V.K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and soudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural Meteorology*, 42 : 295-305.
- WYSON R.L., ZINYOWIRA M.C., MOSS R.H., DOKKEN D.J., 1998. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. A special report of Ipcc working group. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press, 518 p.