

La gestion de l'eau

À partir des contributions de F. Affholder (CIRAD),
F. Forest (CIRAD), B. Lidon (CIRAD) et M.J. Valony (CNEARC)

Lorsqu'une faible humidité du sol limite la transpiration d'une culture, sa productivité diminue (cf. chapitres 412 et 414). L'objectif prédominant de la gestion de l'eau, à l'échelle de la parcelle, est alors d'accroître cette transpiration en minimisant les pertes par évaporation, drainage ou ruissellement, et en augmentant les apports, par irrigation ou par augmentation de la zone de sol exploitée par les racines.

À l'inverse, lorsque de l'eau en excès gêne l'activité biologique dans le sol et réduit la disponibilité en éléments nutritifs, il faut s'efforcer de minimiser les périodes où le sol est saturé. La transpiration est dans ce cas peu variable dans le temps. L'objectif à atteindre en termes de gestion de l'eau est alors l'augmentation du drainage.

Le bilan hydrique est un outil de raisonnement des situations de déficit et d'excès en eau. Après l'avoir présenté, nous décrirons les principales techniques permettant d'ajuster l'offre et la demande en eau à la parcelle et nous les illustrerons par quelques exemples.

LE BILAN HYDRIQUE

● *Equation du bilan hydrique*

Le bilan hydrique exprime la conservation, entre deux dates quelconques, de la masse d'eau présente dans le système sol/plante/atmosphère. Cette eau est répartie entre l'eau stockée dans le sol et la plante d'une part, et les flux entrant et sortant de cette réserve d'autre part (cf. figure 1).

Variation du stock d'eau du sol

La variation de stock entre deux dates est égale au bilan de ces flux, selon l'équation :

$\Delta S = P + I - E - T - D - R$, où :

P = précipitations reçues entre les deux dates ;

I = irrigations ;

E = évaporation du sol ;

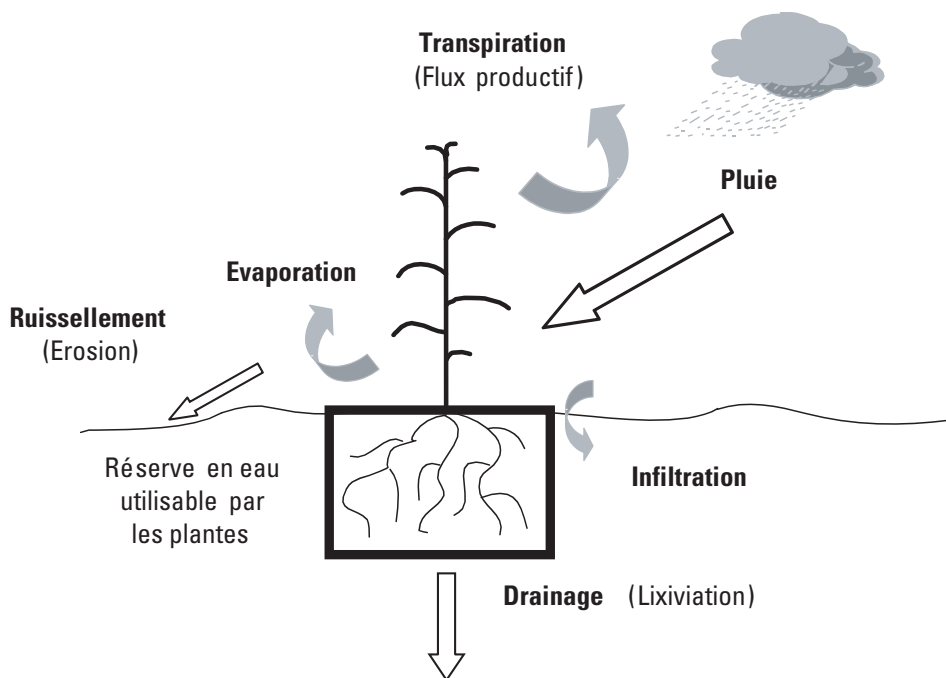
T = transpiration des plantes ;

D = drainage sous la zone de sol exploitée par la culture ;

R = pertes en eau par ruissellement de surface ;

ΔS : variation du stock d'eau du sol (aux échelles pertinentes pour l'analyse des systèmes de culture, les variations de stock dans les plantes sont négligeables).

Certains des termes de cette équation sont peu accessibles à la mesure, mais peuvent être déduits de cette équation si tous ses autres termes sont connus. Par ailleurs, selon l'échelle spatio-temporelle d'analyse, certains termes du bilan hydrique peuvent être négligés ou non.



► Figure 1. Bilan hydrique en culture pluviale

S'il s'agit d'évaluer grossièrement pour une culture donnée la contrainte hydrique dans une région, le *bilan hydrique climatique* dans lequel sont négligés tous les flux sauf les pluies et l'évapotranspiration, prise alors à son niveau potentiel, permet une première approximation parfois suffisante. Le pas de temps de l'analyse est alors au moins mensuel. Un pas de temps plus court est requis dès lors que l'on s'intéresse aux effets de la gestion technique de la culture sur le bilan hydrique, du fait des interactions importantes entre cette gestion technique et chacun des termes du bilan hydrique. Lorsque l'on reste dans l'optique de comparaisons régionales, les pas de temps de cinq et de dix jours sont parfois pratiques pour le calcul de l'évapotranspiration, mais compte tenu de la grande sensibilité du système sol/plante/atmosphère à la distribution quotidienne des pluies, un pas de temps journalier est à conseiller autant que possible dès que l'on se place dans l'optique du diagnostic à l'échelle de la parcelle.

L'influence du bilan hydrique sur la productivité dépend d'interactions complexes entre les facteurs de l'offre et de la demande hydrique du système sol/plante/atmosphère. L'analyse du bilan hydrique doit être faite en tenant compte notamment du fait que la sensibilité des cultures au stress hydrique et à l'excès d'eau est variable selon les espèces et en fonction de leur stade de développement (cf. chapitre 414).

Les possibilités d'actions pour l'améliorer ne peuvent être identifiées que par un diagnostic du poids relatif de ces facteurs dans le bilan hydrique et de l'influence de ce dernier sur le rendement. Cette hiérarchie est en effet très variable selon les environnements.

Par exemple, dans un environnement où la pluviométrie limite fortement l'offre en eau du sol tout au long de la saison¹, les seules voies d'amélioration du bilan hydrique seront le calage du cycle cultural dans la saison, la réduction de la demande par limitation de l'évaporation ou par extensification de la culture² et l'irrigation.

Dans une situation où l'offre est en excès par rapport à la demande à certaines périodes du cycle, augmenter la réserve utile racinaire sera efficace pour réduire l'impact d'autres périodes où l'offre est au contraire déficitaire.

Si l'offre pluviométrique est réduite par un ruissellement important, on privilégiera la lutte contre le ruissellement dans le cas où l'offre du sol est effectivement limitante ; mais si malgré le ruissellement la réserve utile racinaire est fréquemment remplie, réduire le ruissellement risque de provoquer surtout une augmentation du drainage et des pertes minérales qui y sont associées, avec peu d'effets bénéfiques sur la transpiration.

Réaliser un tel diagnostic suppose d'évaluer le bilan hydrique et sa variabilité en fonction de la variabilité des facteurs :

- > climatiques, sur lesquels l'agriculteur n'a pas de possibilités d'action ;
- > du système de culture, qui peuvent être modifiés par l'agriculteur.

● **L'évaluation du bilan hydrique**

Tous les termes du bilan hydrique s'expriment en hauteurs d'eau (mm), correspondant à un volume d'eau par unité de surface ($1 \text{ mm} = 1 \text{ litre/m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$). Ils sont accessibles à la mesure, avec des précisions variables selon le terme considéré et la méthode employée, et les plus coûteux à mesurer peuvent être évalués par des modèles de simulation.

● **Précipitations**

Les méthodes de mesure de la pluviométrie sont évoquées au chapitre 412. Rappelons cependant que la pluviométrie est une donnée extrêmement variable dans le temps et l'espace, et que s'il s'agit du terme du bilan hydrique dont la mesure est la plus facile, la nécessité de la réaliser avec une fréquence élevée et avec un maillage dense constitue néanmoins une contrainte.

● **Irrigation**

La dose apportée peut être calculée en fonction des débits du système d'irrigation, en tenant compte des pertes diverses en amont des parcelles. Dans le cas, fréquent en irrigation, d'une forte hétérogénéité spatiale de la distribution d'eau et lorsqu'une précision élevée est requise, il peut être nécessaire de mesurer le plus directement

1 Ruissellement faible, capacité de stockage élevée du sol, culture à enracinement profond.

2 Espèce moins exigeante ou fertilisation et densités de semis plus faibles.

possible la dose apportée à chaque parcelle : pluviomètres en irrigation par aspersion, ou calcul du débit à la raie en irrigation gravitaire.

● Evaporation et transpiration

Ces deux flux sont particulièrement difficiles à mesurer directement. Transpiration et évaporation sont donc obtenus généralement par bilan, ne donnant cependant accès qu'à la somme des deux flux, l'évapotranspiration.

Dans le cas où l'eau du sol n'est pas limitante, l'évapotranspiration est au niveau maximal qu'elle peut atteindre pour la culture considérée (ETP_c : évapotranspiration potentielle de la culture), compte tenu de la valeur de la demande atmosphérique en eau évaluée par le biais d'une évapotranspiration potentielle de référence, ET_0 . La mesure et l'évaluation de l' ET_0 sont décrites au chapitre 414. Grossièrement, ET_0 varie dans les régions tropicales entre 2 mm/jour et 7 mm/jour en saison des pluies.

Le rapport entre ETP_c et ET_0 varie au cours du cycle de la culture, principalement en fonction de l'indice de surface foliaire, LAI (rapport de la surface de feuilles à la surface occupée au sol par la culture, cf. chapitre 414). Comme cet indice dépend de la fertilité du sol, de l'espèce et du cultivar utilisé, et d'une manière générale de toutes les pratiques culturales, la demande en eau de la culture dépend également de tous ces facteurs.

Dans le cas où aucun de ces facteurs n'est limitant pour la croissance, l'indice de surface foliaire suit une courbe temporelle qui ne dépend que du rayonnement et de la température, et l'évapotranspiration potentielle de la culture est maximale : c'est l' ETM .

Evapotranspiration et coefficient cultural

Le rapport entre évapotranspiration potentielle maximale de la culture et l'évapotranspiration potentielle de référence est également maximal et reçoit le nom de coefficient cultural, k_c . Ce dernier varie le plus souvent entre 0,4 et 1,4 en fonction de l'espèce cultivée, du stade de développement et du niveau de croissance (cf. figure 2).

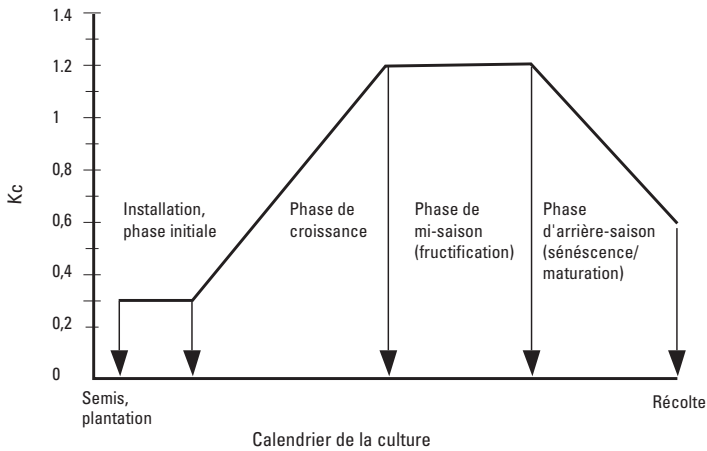
$$K_c = ETM/ET_0 = \max (ETP_c)/ET_0$$

La relation entre le coefficient cultural et le LAI n'est pas linéaire : le K_c augmente d'abord rapidement avec l'indice foliaire, puis devient progressivement moins variable et se stabilise à des valeurs comprises entre 1,1 et 1,4 pour des LAI élevés (au-dessus de 4). Cette relation dépend de la géométrie du couvert (recouvrement des feuilles et rugosité).

Lorsque la teneur en eau du sol est limitante, l'évapotranspiration de la culture est inférieure à ETM et à ETP_c , et l'on parle d'évapotranspiration réelle, ETR :

$$ETR \leq ETP_c \leq ETM = k_c \times ET_0$$

Pour un état hydrique donné du sol et une demande évaporative donnée de l'atmosphère, les parts relatives de l'évaporation et de la transpiration dans l' ETR dépendent principalement de la proportion de l'énergie radiative interceptée par le feuillage par rapport à celle qui parvient au sol, et donc de l'indice de surface foliaire.



► Figure 2. Coefficient culturel (K_c) en fonction du développement de la culture

● Ruissellement

Il peut être mesuré grâce à un dispositif recueillant les eaux de surface d'une certaine superficie, isolée du reste de la parcelle par des diguettes en tôle ou en matière plastique. Des mesures en continu sont possibles par pesée du récipient recevant l'eau ruisselée (cf. figure 3). Le ruissellement peut atteindre la moitié des précipitations. Il dépend non seulement de la pente de la parcelle mais aussi des propriétés physiques du sol (texture, rugosité de surface) et de l'intensité des pluies. Des ruissellemements élevés sont en particulier possibles, même avec une pente très faible, sur sols battants avec des pluies intenses.



► Figure 3. Dispositif de mesure du ruissellement (d'après Scopel/Findeling)

● Drainage

Il peut être mesuré en lysimètres ou par la méthode tensio-neutronique. Ces deux méthodes sont décrites dans le paragraphe concernant le stock hydrique du sol, dont elles permettent une évaluation simultanée à celle du drainage.

Le drainage peut représenter une proportion élevée des précipitations, lorsque celles-ci sont abondantes par rapport aux besoins de la culture et à la capacité de stockage du sol. Il peut être très faible, voire nul, dans les situations arides. Il peut enfin être négatif, mais on parle alors de remontées capillaires, lorsqu'il existe une nappe d'eau à faible profondeur et que l'humidité du sol est faible en surface.

● Stock en eau du sol

Le stock en eau S du sol entre la surface et une cote/profondeur z est donné par :

$$S \text{ (mm)} = \sum_{i=0,z} (W_i \times e_i \times da_i) / 10 = \sum_{i=0,z} (H_i \times e_i) / 10, \text{ avec :}$$

W_i = teneur en eau pondérale (%) de la tranche de sol i
 H_i = teneur en eau volumique (%) de la tranche de sol i
 e_i = épaisseur de la tranche de sol i (cm)
 da_i = densité apparente de la tranche de sol i

Les plantes n'exploitent l'eau du sol qu'entre deux valeurs de S , qui définissent la réserve utile :

- > celle où le sol est à la teneur en eau en dessous de laquelle la culture ne parvient plus à transpirer et dite teneur en eau au point de flétrissement permanent, Spf , évaluée classiquement par la teneur en eau à $pF = 4,2$;
- > celle où le sol est à sa teneur en eau maximale au-delà de laquelle l'eau s'écoule par gravité, dite capacité au champ, Scs .

$$RU = Scs - Spf$$

La réserve utile des sols est très variable. Les ordres de grandeur les plus courants vont de 50 mm à 130 mm par mètre de sol. La texture a une grande influence sur la RU, à laquelle il est souvent possible de la relier par des relations empiriques de bonne qualité, quoique de portée spatiale limitée. La profondeur de sol colonisable par les racines est un facteur pouvant limiter la réserve utile, et dépend à la fois de l'espèce cultivée³, des techniques culturales, et des obstacles physiques et chimiques que le sol peut opposer à la croissance racinaire, tels qu'un horizon compacté, voire induré, ou un horizon présentant une toxicité aluminique. La réserve utile racinaire RUr est la valeur de la RU obtenue lorsque Scs et Spf sont évalués entre la surface et la cote maximale atteinte par les racines pour la culture considérée.

³ Les profondeurs maximales atteintes peuvent varier chez les cultures annuelles entre 50 et 200 cm.

Le stock utile⁴ (Su)

C'est la quantité d'eau utilisable par la culture à un moment donné :

$$Su = S - Spf \text{ si } S < Scc,$$

$$Su = RU \text{ si } S \geq Scc$$

● Calcul du bilan hydrique

● Evaluation *in situ*

La méthode lysimétrique et la méthode tensio-neutronique, permettent de mesurer simultanément le drainage et la variation de stock du sol. Les apports d'eau des précipitations et irrigations étant connus et sous hypothèse de ruissellement nul, l'équation du bilan hydrique permet alors de calculer l'évapotranspiration.

● Les lysimètres⁵

Les lysimètres sont des volumes de sol isolés du reste d'une parcelle dans une cuve métallique ou en matière plastique, et traités de façon aussi proche que possible du sol environnant. Ils sont dotés d'un exutoire à leur base, par lequel sont recueillies les eaux de drainage. Lorsqu'ils sont munis d'un système de pesée, les variations du stock en conditions de teneur en eau limitante sont mesurées, et l'on dispose d'une évaluation de l'ETR. Il n'est en revanche pas indispensable de disposer d'un tel système de pesée pour évaluer l'ETPc ou l'ETM : il suffit d'apporter quotidiennement de l'eau en excès, en s'assurant de provoquer un drainage à chaque apport, ce qui garantit le retour du stock à Scc après ressuyage. La variation de stock d'un apport à l'autre est ainsi nulle.

● La méthode tensio-neutronique

La méthode tensio-neutronique faisait appel à la sonde à neutrons pour la mesure de l'humidité volumique du sol à des profondeurs régulièrement espacées, c'est-à-dire pour l'obtention de profils d'humidité du sol, dont l'intégration fournit le stock hydrique du sol à la date de la mesure. L'évaluation du flux de drainage⁶ fait appel pour sa part aux tensiomètres. Il s'agit de tubes plastiques équipés de céramique poreuse à une extrémité, placée dans le sol, et d'un système manométrique à l'extrémité restant en surface, qui mesure la pression matricielle de l'eau du sol. Plusieurs de ces appareils installés à différentes profondeurs fournissent ainsi le moyen de calculer les gradients de charge hydraulique entre ces différentes cotes.

Dans certains contextes où l'on peut faire l'hypothèse d'un drainage nul à une cote située sous la zone exploitée par les racines⁷, elle peut être en outre considérablement simplifiée car limitée à la mesure des profils hydriques à la sonde à neutrons. Enfin la sonde à neutrons pourra progressivement être remplacée par la technologie TDR

4 Auquel peut correspondre un stock utile racinaire de la même façon que pour RUr.

5 Cf. chapitre 412.

6 Négatif dans le cas de remontées capillaires.

7 C'est souvent le cas dans les régions tropicales semi-arides.

(*Time-Domain Reflectometry*), il y a encore peu limitée à des mesures de l'humidité à un nombre réduit de profondeurs, mais qui pourrait donner accès à des profils d'humidité équivalents à ceux fournis par les sondes à neutrons, en un temps plus court et sans l'inconvénient de la radioactivité.

● Les modèles de simulation

Les modèles de simulation permettent :

- > de compléter des mesures, les simulations étant ajustées aux données observées. Les données simulées d'une variable servent ainsi à compléter des mesures de cette variable. L'ajustement du modèle aux données mesurées doit être de bonne qualité, garantissant que le modèle s'applique bien à la situation analysée ;
- > de remplacer des mesures. Il est alors indispensable de s'assurer au préalable de la validité du modèle employé pour le domaine où l'on souhaite l'appliquer.

Il existe une grande variété de modèles de simulation du bilan hydrique, plus ou moins complexes, plus ou moins précis et plus ou moins exigeants en paramètres d'entrée. Les modèles les plus pratiques pour des applications agronomiques à l'échelle régionale comme à l'échelle de la parcelle sont basés sur l'analogie entre le sol et un réservoir. Cette analogie leur confère, par rapport aux autres approches, une certaine robustesse et une moindre gourmandise en données d'entrées à mesurer. Les modèles de cette famille se distinguent principalement par le pas de temps de calcul, le nombre de couches de sol simulées, et la séparation ou non de l'ETR en évaporation et transpiration.

Les logiciels Sarra et Cropwat

L'un de ceux-ci, le modèle Sarra (système d'analyse régionale des risques agroclimatiques) a été mis au point par le CIRAD spécifiquement pour les cultures pluviales⁸ en régions tropicales. Il fonctionne au pas de temps journalier, ne sépare pas l'évaporation du sol de la transpiration de la culture, propose plusieurs options de simulation du ruissellement et considère un réservoir de taille variable en fonction de la progression des racines en profondeur.

Les données d'entrée sont la pluviométrie journalière ou décadaire, ET₀, les coefficients culturaux, la réserve utile du sol, les paramètres de la fonction de ruissellement et la vitesse de descente du front racinaire. Le calcul de l'ETR de la culture repose sur une relation empirique robuste entre le taux de remplissage de la réserve utile racinaire et le rapport ETR/ETM. Le ruissellement est soit un pourcentage fixe des précipitations au delà d'un seuil, soit une fonction plus sophistiquée mise au point spécifiquement pour les sols ferrugineux d'Afrique de l'Ouest. Le drainage se produit lorsque les apports d'eau⁹ excèdent la capacité de stockage du sol. Une fois qu'ont été ainsi calculés ETR, D, R, le stock final de chaque jour est actualisé en appliquant l'équation du bilan hydrique.

La FAO propose également un logiciel de simulation du bilan hydrique, plus spécifiquement orienté vers les systèmes irrigués, Cropwat.

⁸ Éventuellement avec irrigation de complément.

⁹ Pluie + irrigation – ruissellement.

● Les analyses fréquentielles

La forte variabilité inter-annuelle des précipitations en milieu tropical a pour conséquence une forte variabilité inter-annuelle des termes du bilan hydrique. L'information fournie par la mesure ou la simulation du bilan hydrique pour une année n'est pas suffisante pour évaluer les potentialités d'une localité ou pour raisonner la gestion technique d'une culture en fonction de la contrainte hydrique.

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique simple de caractérisation de distributions de variables. Elle s'applique particulièrement bien au cas de la distribution inter-annuelle des termes du bilan hydrique. Elle consiste à repérer les événements rares, moyennement fréquents et fréquents. Dans le cas d'une analyse portant sur la pluviométrie mensuelle, par exemple, on retiendra classiquement les valeurs rencontrées ou dépassées huit années sur dix, autrement dit le niveau de pluviométrie minimum qu'on peut attendre avec une probabilité de 0,8, les valeurs atteintes ou dépassées cinq années sur dix, et enfin deux années sur dix.

Par rapport à la caractérisation de la distribution par la moyenne et l'écart type, cette approche présente l'avantage de mieux décrire la forme de la distribution pour les valeurs extrêmes. Son emploi pour l'analyse des risques en agriculture est en outre associé à l'idée que les agriculteurs sont plus sensibles aux situations extrêmes, pouvant remettre définitivement en cause leur activité, qu'à la moyenne des situations.

Par exemple, si une année sur deux la sécheresse est très contraignante pour la production et qu'une année sur deux les conditions sont au contraire très favorables, la moyenne des conditions peut paraître acceptable, alors qu'elle ne l'est en réalité qu'à condition de disposer de mécanismes d'épargne permettant de faire face à une séquence de plusieurs années défavorables, ce qui est rarement le cas en agriculture.

Il est donc important de connaître avant tout le niveau de contrainte des situations les plus fréquentes. En ce sens, on applique généralement ces analyses fréquentielles, non pas seulement aux précipitations, bien que cela constitue déjà une première approximation des contraintes climatiques locales, mais surtout au taux de satisfaction des besoins en eau des cultures, le rapport ETR/ETM. Celui-ci est en effet une mesure classique du stress hydrique subi par les cultures. Ce rapport doit être calculé en individualisant les différentes phases de sensibilité au stress hydrique de l'espèce à laquelle on s'intéresse.

Sarrabil, Sarrazon et Sarramet

Sarrabil et Sarrazon réalisent typiquement ce type de calcul à partir de simulations répétées pour une série de plusieurs années de données climatiques d'une ou de plusieurs localités. Sarramet permet quant à lui des analyses fréquentielles des données climatiques telles que la pluie ou l'évapotranspiration potentielles, ces calculs pouvant également être réalisés très simplement à l'aide d'un tableur informatique, la plupart les intégrant parmi les fonctions statistiques standard¹⁰.

10 Calculs de rang et de percentiles d'une distribution.

LES MODES D'AMÉLIORATION DU BILAN HYDRIQUE

● *Le diagnostic et la réduction de la contrainte hydrique*

À l'échelle de la parcelle cultivée, les stratégies d'amélioration du bilan hydrique doivent rechercher un compromis entre les objectifs suivants :

- > maximiser le rapport entre transpiration réelle et transpiration potentielle des plantes pour les phases du cycle où la culture est le plus sensible au stress hydrique. Faute de pouvoir aisément séparer évaporation et transpiration, dans la plupart des cas, l'indicateur utilisé est ETR/ETM pour les différentes phases du cycle.
- > minimiser la durée des périodes où le sol est saturé pour les phases du cycle où la culture est le plus sensible à l'anoxie¹¹ dans la zone racinaire. Un indicateur souvent utilisé est le rapport D/RUR, qui rend compte cependant davantage de l'intensité du lessivage que de la durée des phases d'anoxie.

L'indicateur IRESP

Dans le cas des céréales tropicales (maïs, sorgho, mil, riz), on dispose d'un indicateur synthétique bien relié à la productivité lorsque le déficit hydrique est la contrainte prédominante, l'indicateur IRESP :

$IRESP = SATc \times SATps$, où $SATc$ = ETR/ETM du cycle; $SATps$ = ETR/ETM de la phase sexuée, généralement obtenu en prenant la valeur la plus faible de ETR/ETM entre les phases initiation florale-floraison et floraison-début de remplissage des grains.

Cette optimisation du bilan hydrique doit elle-même se combiner avec :

- > l'optimisation à l'échelle de la parcelle des autres facteurs agissant sur le rendement, nombre d'entre eux étant en interaction plus ou moins forte avec la contrainte hydrique : densité de peuplement, fertilité, mauvaises herbes... ;
- > l'optimisation à l'échelle de l'exploitation des ressources en fonction de l'objectif et des contraintes de l'exploitant.

Ainsi, un objectif de gestion de la fertilité de la parcelle peut conduire à ajouter aux deux premiers critères ci-dessus, un critère de minimisation du drainage pour réduire les pertes en éléments minéraux. Une contrainte à l'échelle de l'exploitation, telle qu'une contrainte de trésorerie ou de main-d'œuvre, peut quant à elle imposer des bornes à la date de semis de la culture, à l'intérieur desquelles raisonner l'optimisation des deux premiers critères ci-dessus. Différents leviers permettent d'agir sur ces critères.

¹¹ Anoxie : absence d'oxygène.

● Choix de l'espèce et du cultivar

Ce choix influence les besoins en eau de la culture¹², sa sensibilité à la non satisfaction de ses besoins¹³ ainsi qu'à l'excès d'eau¹⁴ et interagit avec l'offre en eau du sol à travers la colonisation de ce dernier par les racines¹⁵ et le régime d'extraction de l'eau au cours de la saison de culture.

● Choix de la date de semis

Celui-ci conditionne l'interaction entre la répartition des pluies dans la saison et la demande en eau de la plante. L'évolution de la demande en eau des plantes au cours du temps à partir de la date de semis, décrite par les courbes de coefficient cultural, dépend du cultivar et du niveau des contraintes non hydriques, et peut aussi dépendre très fortement de la date de semis dans le cas de cultivars photopériodiques. Dans les régions à forte variabilité de la température¹⁶, cette dernière est un facteur supplémentaire de l'interaction entre date de semis et coefficients culturaux.

● Augmentation de la réserve utile racinaire (RUR)

Plus cette dernière est élevée, plus faibles seront les pertes en eau par drainage sous la zone de sol exploitée par la culture et plus longues seront les périodes que la culture pourra subir sans dommage entre deux pluies ou irrigations remplissant cette réserve. Le travail du sol, l'activité biologique et la fumure organique augmentent la capacité de stockage des sols dans des proportions variables selon le type de sol et le climat, mais toujours relativement peu par rapport à l'influence de la profondeur d'enracinement. Cette dernière est elle-même influencée par le choix de l'espèce, la fumure organique et le travail du sol, et plus généralement toutes les techniques amélioratrices du profil cultural.

Le climat interagit avec la profondeur d'enracinement dans les situations où le profil de sol est au point de flétrissement permanent en début de saison de culture. En effet, la descente en profondeur des racines est alors limitée par celle du front d'humectation du sol. En irrigation de complément, il peut ainsi être avantageux de pratiquer des irrigations à forte dose en début de cycle, de manière à favoriser une descente importante des racines et à disposer d'une capacité élevée de stockage pour des pluies survenant plus tard dans la saison. Il faut noter que la RUR, même faible, peut très bien ne pas être un facteur limitant si le régime des précipitations est tel qu'elle n'est jamais remplie.

Dans des situations où l'on n'observe jamais de drainage sous la zone racinaire, courantes en région semi-aride, des techniques ne visant qu'à augmenter la profondeur racinaire ou les propriétés de rétention d'eau du sol, sans agir sur l'infiltration ou l'évaporation, n'auront ainsi aucun effet sur le taux de satisfaction des besoins en eau de la culture. En revanche, les régions sub-humides sont le domaine par excellence où cette voie d'amélioration du bilan hydrique doit être explorée, de manière à limiter au maximum les pertes d'éléments minéraux par lessivage et à réduire les effets de

12 Coefficient cultural.

13 Relation entre ETR/ETM aux différentes phases et rendement.

14 Influence de D/RUR sur le rendement.

15 Modification de RUR.

16 Zones de montagne, marges de la région tropicale.

périodes sans précipitations de l'ordre de la semaine à dix jours qui peuvent, sous ces climats, s'intercaler entre des périodes de précipitations excédentaires.

● Réduction du ruissellement

Il s'agit certainement d'une des voies d'amélioration du bilan hydrique les plus significatives pour les régions tropicales semi-arides, où les pertes par ruissellement sont souvent importantes et peuvent atteindre 30 voire 50 % du total des précipitations de l'année.

Un moyen séduisant d'y parvenir est le semis direct sur mulch pailleux. De faibles quantités de résidus de culture, de l'ordre de 1 à 1,5 t/ha suffisent à réduire très significativement le ruissellement. Les résidus agissent principalement de deux manières : ils freinent l'écoulement superficiel, laissant plus de temps à l'eau pour s'infiltrer d'une part, et leur présence permet d'obtenir et de maintenir une conductivité hydraulique élevée à la surface du sol, grâce à l'activité de la macrofaune qu'ils favorisent d'autre part (cf. figure 4). Lorsque les résidus de culture sont employés pour l'élevage ou que le recours au semis direct impose l'emploi des herbicides, la technique peut toutefois se révéler délicate à intégrer aux systèmes de production existants.

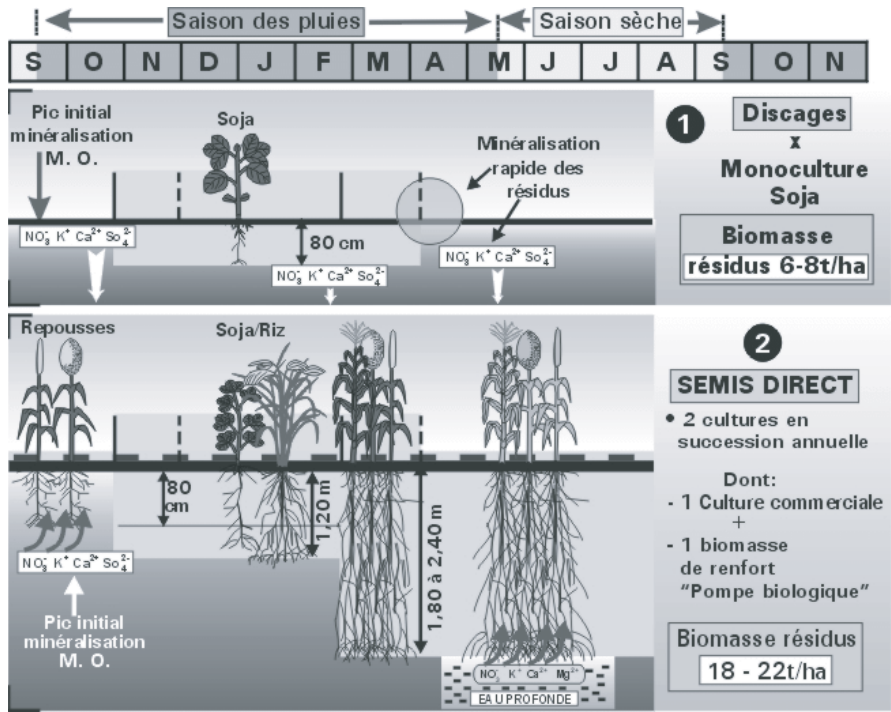


► Figure 4. Semis direct de niébé sur mulch pailleux (d'après M. Raunet)

Les techniques anti-ruissellement telles que la culture sur billons, éventuellement cloisonnés, les diguettes en courbe de niveau, ou les aménagements plus lourds visant une réduction du ruissellement à l'échelle d'un bassin versant sont également recommandées.

Toutes ces techniques de réduction du ruissellement peuvent se justifier également dans les régions plus humides, pour un autre objectif que celui de l'amélioration de l'alimentation hydrique des cultures, celui de la lutte contre l'érosion (cf. chapitre 233). Signalons cependant que dans ces situations, la diminution du ruissellement a

en général pour conséquence une augmentation du drainage, qui présente l'inconvénient d'augmenter les pertes en éléments nutritifs. L'introduction de plantes de couverture avant ou après la culture principale est alors envisageable, afin d'augmenter la part de l'eau évapotranspirée par rapport à l'eau drainée et de recycler les éléments minéraux entraînés vers les couches profondes du sol (cf. figure 5).



► Figure 5. Effet comparé du travail du sol et du semis direct sur couvertures végétales sur le bilan hydrique et minéral (d'après L. Séguéy)

● Réduction de l'évaporation

Les mulch de divers types, en établissant une discontinuité entre les premières couches humides du sol et l'atmosphère, permettent de réduire l'évaporation. Dans le cas des mulch pailleux ou résultant d'un grattage superficiel du sol, l'effet sur l'évaporation est toutefois très inférieur à l'effet obtenu sur le ruissellement.

Tableau 1. Pertes par ruissellement et évaporation, avec et sans mulch pailleux (La Tijana, Mexique, 1995, pluviométrie totale : 355 mm, culture du maïs)

Type d'implantation	Ruissellement (mm)	Evaporation pailleux (mm)	Evaporation sol (mm)	Total pertes (mm)
Semis direct sans mulch pailleux	125	0	89	214
Semis direct sur pailleux avec 1,5 t/ha de pailleux au semis	52	10	56	108
Semis direct sur pailleux avec 4,5 t/ha de pailleux au semis	41	29	35	105
Préparation traditionnelle du sol aux disques	94	0	103	197

Les brise-vents réduisent l'évaporation dans les régions où le facteur advectif a un poids important dans les valeurs de ET_0 , mais leur mise en œuvre est très délicate car la moindre brèche dans le dispositif peut provoquer des turbulences aux effets désastreux.

● Réduction de la transpiration

Compte tenu d'une très forte corrélation entre l'activité photosynthétique et la transpiration, réduire la transpiration de la plante cultivée se traduit par une réduction pratiquement proportionnelle de sa productivité. Cependant, il peut être tactiquement fondé de réduire en cours de cycle les besoins en eau de la culture et ainsi sa transpiration, par démariage ou suppression de plantes, voire taille du feuillage, en fonction des conditions hydriques rencontrées. Enfin, il est trivial que la transpiration provenant des adventices est nuisible et que la population adventice doit être la plus faible possible.

● L'irrigation et le drainage¹⁷

L'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique constitue un élément important pour le dimensionnement de systèmes d'irrigation et de drainage. Le suivi hydrique du sol, par mesure ou par simulation, constitue quant à lui un outil efficace de pilotage en temps réel des irrigations.

Ce suivi est particulièrement intéressant dans le contexte de l'irrigation de complément par aspersion, où le producteur dispose d'une marge de manœuvre importante pour les doses et les dates d'irrigation, et où une économie d'eau substantielle peut être réalisée en valorisant au mieux les précipitations naturelles. Il s'agit alors de maintenir, grâce aux irrigations, le stock en eau du sol entre une borne inférieure en dessous de laquelle le stress hydrique deviendrait très contraignants (50 % de la réserve utile totale est un ordre de grandeur raisonnable), et une borne supérieure au dessus de laquelle l'augmentation de la teneur en eau n'aurait qu'une faible influence sur la productivité (de l'ordre de 80 % de la réserve utile totale).

De cette manière, le sol est à tout moment capable de stocker au moins une partie des précipitations qui pourraient se produire, et l'on réduit ainsi les pertes par drainage. Il est également possible de faire varier les seuils de décision d'irrigation en fonction de probabilités d'événements pluvieux fournies soit par les services de prévision météorologique, soit par les analyses fréquentielles des pluies.

¹⁷ Ils sont traités en détail au chapitre 235.

DES EXEMPLES AU MALI ET AU SÉNÉGAL

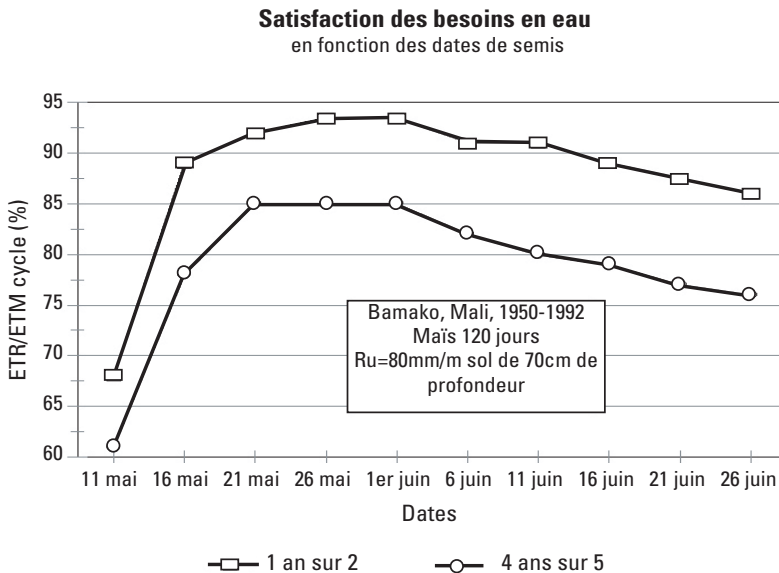
Choix de la date de semis optimale pour un cultivar de maïs de 120 jours dans la région de Bamako (Mali)

On a utilisé ici comme critère de contrainte hydrique le simple rapport ETR/ETM pour l'ensemble du cycle d'un maïs de cent vingt jours, simulé par le modèle Sarrabil. Dix dates de semis ont été testées, de cinq en cinq jours, entre le 11 mai et le 26 juin. On a pris l'hypothèse d'un sol ayant une réserve utile de 80 mm par mètre de sol, d'une profondeur maximale d'enracinement de 70 cm, et d'un ruissellement nul. Les coefficients culturaux étaient ceux fournis par la FAO. Les évapotranspirations potentielles décennales moyennes de la station de Bamako étaient utilisées, ainsi qu'une série de 43 années de données pluviométriques journalières de la même station, de 1950 à 1992. Chaque date de semis a été simulée pour chacune de ces années, soit $43 \times 10 = 430$ simulations, puis une analyse fréquentielle a été conduite sur le terme ETR/ETM cycle.

Les résultats sont donnés à la figure 6. Ils montrent que la variable ETR/ETM passe par un maximum entre le 21 mai et le 1^{er} juin. On en déduit que c'est la date de semis la plus favorable pour la variété choisie, pour la région de Bamako, sous l'angle strict de l'alimentation hydrique. En dehors de ces périodes, on prend un risque plus élevé de rencontrer :

- des problèmes de manque d'eau pendant la phase d'établissement de la culture en cas de semis trop précoce ;
- des problèmes de manque d'eau pendant les phases de remplissage du grain (voire pendant la phase de floraison) en cas de semis trop tardif.

Cependant, la méthode ne tient pas compte de l'ensemble des facteurs biophysiques qui conditionnent en réalité la réussite d'une culture (mauvaises herbes, fertilité, ravageurs...), ni les contraintes économiques telles que la disponibilité en trésorerie et en main d'œuvre qui s'exercent sur les chantiers de mise en culture. Elle fournit simplement une information détaillée sur l'interaction entre la date de semis et la contrainte hydrique, supposée être une contrainte particulièrement déterminante dans la région considérée, information à croiser avec des informations portant sur les autres contraintes afin de fournir un conseil pertinent aux agriculteurs.



► Figure 6. Détermination de la date de semis optimale du maïs (d'après M. Vasksmann et al.)

Choix du cultivar de mil au Mali : intérêt comparé de cultivars photosensibles et non photosensibles

Trois types de comportement phénologiques de variétés de mil ont été comparés du point de vue de la contrainte hydrique et des ses conséquences sur le rendement, pour une localité située en zone sahélienne (Bankass, Mali, 14° 04' N ; 3° 31' W). Il s'agissait de variétés dont la durée des stades phénologiques, en fonction de leur date de semis, avait été déterminée grâce à des essais et pouvait être décrite de manière simplifiée comme suit :

- les durées des phases post-épiaison sont approximativement constantes pour toutes les variétés ;
- pour une variété dite non photosensible, Souna, la durée du cycle et de la phase semis-épiaison sont à peu près constantes quelle que soit la date de semis (respectivement 90 jours et 45 jours environ) ;
- pour la variété Sanio, photosensible et tardive, la durée semis-épiaison devient plus courte quand la date de semis devient plus tardive, jusqu'à une date de semis limite au-delà de laquelle cette durée devient peu variable, de l'ordre de 60 jours ;
- pour une variété locale, NKK, photosensible et plus précoce, l'effet de la photopériode est comparable à la précédente mais la durée semis-épiaison « minimum » est de l'ordre de 45 jours, la date de semis à partir de laquelle cette durée « minimum » est atteinte étant plus précoce que pour la variété Sanio.

Des simulations du bilan hydrique de ces variétés ont été conduites pour 39 années de données pluviométriques, de 1950 à 1988, pour un sol ayant 90 mm de réserve utile (sol sableux profond), et en négligeant le ruissellement. La date de semis a été déterminée pour chaque année en simulant la pratique traditionnelle des agriculteurs de la région, qui est de semer sur la première pluie de la saison. En cas de période sèche suivant les premières pluies, il était considéré un nouveau semis à la pluie suivante. Le rendement était ensuite estimé en appliquant une relation empirique entre l'indicateur IRESP, défini plus haut, et le rendement, relation établie à l'aide d'une importante base de données sur les productivités du mil en parcelles de producteurs dans l'ensemble de la région sahélienne¹⁸.

Tableau 2. Rendements simulés des différentes variétés, en moyenne des 39 années, ainsi que leur écart-type interannuel

Variété	Souna	NKK	Sanio
Rendement moyen (kg/ha)	902	955	661
Ecart type (kg/ha)	169	102	153

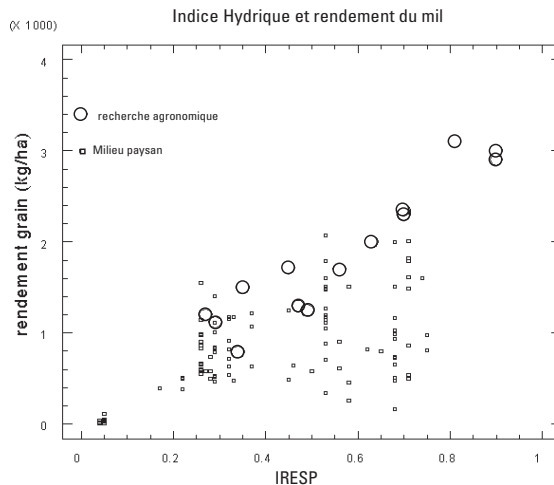
Il ressort que la variété la mieux adaptée à la région est la variété locale NKK : elle se distingue de la Sanio par un rendement moyen supérieur, et de la Souna, dont le rendement moyen est équivalent, par une moindre variabilité inter-annuelle de la productivité.

¹⁸ Projet Espace.

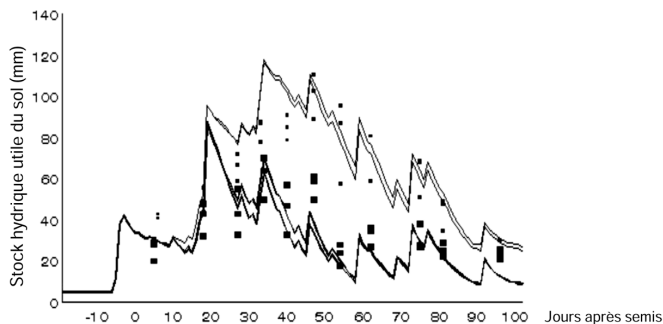
Diagnostic des contraintes hydriques et intensification de la culture du mil dans le bassin arachidier du Sénégal

Une étude des rendements du mil dans le bassin arachidier du Sénégal a montré que le facteur hydrique, bien qu'expliquant une part significative de la variabilité des rendements, n'est pas le seul facteur en cause. La gestion de la culture peut être considérée comme extensive dans de nombreux cas, au sens où elle ne valorise qu'incomplètement la ressource la plus rare (cf. figure 7).

Mais l'intensification de la culture présente un risque important dans certaines régions. Par exemple, une culture fertilisée, qu'il s'agisse de fumure organique ou d'apports minéraux, consomme davantage d'eau qu'une culture non fertilisée, de telle sorte qu'elle peut être amenée certaines années à subir un stress hydrique plus important et que son rendement final ne soit pas augmenté (cf. figure 8). À l'aide d'un modèle simple de simulation de l'interaction entre bilan hydrique et niveau d'intensification de la culture, il a été montré que la probabilité qu'une telle situation se produise est très variable suivant la région et selon qu'on maîtrise ou non le ruissellement. Les possibilités d'intensification sont donc très variables dans l'espace, et les techniques intensives agissant sur la demande en eau de la culture, telle que la fertilisation, doivent être raisonnées en tenant compte de ce risque et associées à des techniques susceptibles d'augmenter l'offre en eau du sol, telles que la lutte contre les adventices et contre le ruissellement.



► Figure 7. Rendements de mil observés en milieu paysan en fonction de l'indicateur de contrainte hydrique, IRESP (d'après F. Affholder et al.)



► Figure 8. Evolution comparée des stocks hydriques sous culture de mil au centre du Sénégal avec (figurés épais) et sans (figurés fins) fumure (d'après F. Affholder)

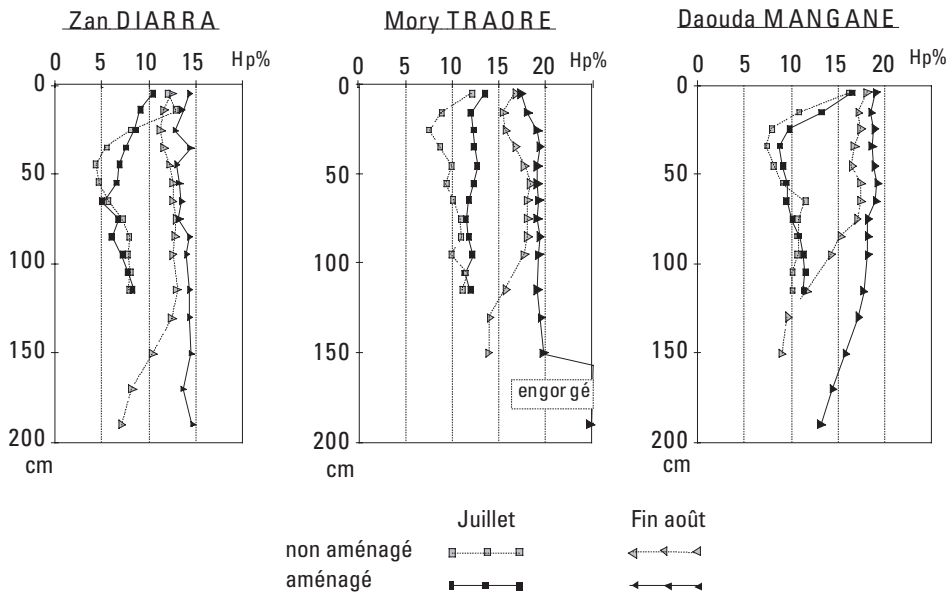
Maîtrise du ruissellement et intensification au sud Mali

La technique de culture sur billons de niveau a été proposée avec succès chez les agriculteurs du sud Mali. Elle permet à la fois de favoriser l'infiltration des pluies dans les sillons inter-billons et d'évacuer lentement les excès d'eau aux extrémités des billons, sur les bords de champ plus ou moins enherbés. Il s'agit d'un aménagement qui s'applique à l'échelle d'un champ cultivé individuel (cf. figure 9). En l'absence d'aménagement, les pertes d'eau par ruissellement peuvent atteindre et même dépasser 30 % des précipitations. Ces pertes n'atteignent plus que 5 à 10 % des pluies lorsque cette technique est employée. Les années où les précipitations sont contraignantes, et si les autres facteurs limitants sont maîtrisés, cet aménagement léger conduit à des gains de rendements de l'ordre de 30 %, pouvant atteindre jusqu'à 60 %.



► Figure 9. Confection d'un ados de niveau à la charrue à bœufs et finition à la daba (d'après J. Gigou)

Ainsi, en réduisant sensiblement la contrainte hydrique, la technique permet une réduction de la variabilité inter-annuelle des productivités et rend possible l'intensification par le recours aux fertilisants. La méthode permet également des semis plus précoces et des levées plus homogènes, grâce à une plus grande humidité du sol en début de cycle. L'augmentation de la quantité d'eau infiltrée à l'échelle de la saison de culture favorise enfin l'alimentation hydrique de saison sèche d'espèces ligneuses associées aux cultures (cf. figure 10).



► Figure 10. Augmentation de l'humidité du sol par l'aménagement en courbes de niveau (moyenne de trois profils). Mesures en juillet et août 1999. L'aménagement favorise le stockage de l'eau en profondeur. Cette réserve servira pendant la saison sèche aux arbres associés aux cultures (d'après J. Gigou)

Les billons doivent suivre les courbes de niveau, faute de quoi l'eau s'accumule dans les points bas et des départs d'érosion en rigole ou ravine sont à craindre. La méthode est facilement praticable en culture attelée, soit que l'on sème à la main sur des billons, soit que l'on sème au semoir sur un labour à plat, en suivant bien les courbes de niveau, puis que l'on butte les cultures après quelques semaines. L'aménagement consiste à réaliser un gros ados par 2 à 5 passages aller-retour à la charrue à bœufs, que l'on laisse s'enherber ou que l'on recouvre de plantes pérennes. Cette méthode est beaucoup moins coûteuse que le transport de cailloux exigés par la technique des cordons pierreux. Il faut une intervention extérieure pour piqueter les courbes de niveau.

Ceci peut être réalisé avec des moyens de topographie simple, comme le niveau à eau formé d'un tuyau de plastique transparent de 10 m de longueur, rempli d'eau et fixé à des règles graduées aux deux extrémités. Il est cependant souvent plus simple et plus rapide d'utiliser des moyens plus classiques, tel qu'un niveau de chantier à lunette : un modèle bas de gamme suffit. Au Mali, des ONG proposent ce service pour un prix modeste, 5 000 FCFA/ha, qui suffit pour couvrir le prix de revient. La prise en charge de cette dépense par les agriculteurs, dans la région où cette technique a été proposée, témoigne de l'avantage économique qu'elle procure.

Bibliographie

- AFFHOLDER F., REYNIERS F.N., SCOPEL E. (1994). *L'eau et l'activité agricole : diagnostic et modélisation du fonctionnement de quelques hydrosystèmes agricoles tropicaux*. Actes du Symposium international recherches-système en agriculture pour le développement – CIRAD, Montpellier, p. 411 - 419
- BARON C., REYNIERS F.N., CLOPES A., FOREST F. (1999). *Applications du logiciel Sarra à l'étude des risques climatiques* - AGRIDEV, p. 89 - 97
- DANCETTE C., (1983). *Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne*. Agro Trop. 38, p. 281 - 92
- SCOPEL E. (1999). *Le semis direct avec paillis de résidus dans l'ouest mexicain : une histoire d'eau ?* Agriculture et développement 21, p. 71 - 86.
- TOUMA J., PEREZ P. & TODOROFF P. (1999). *Caractérisation hydrodynamique d'un sol encroûté en zone sahélienne*. Modélisation du processus d'infiltration. Agronomie 19, p. 341 - 348.