Les sécheresses

Thème 4

Stratégies élaborées pour limiter les conséquences des sécheresses exceptionnelles dans l'avenir

La sécheresse : diagnostics et conséquences. Peut-on en limiter les effets ? Les travaux de l'INRA

Charles Riou

Centre INRA de Bordeaux

1. Introduction

Une sécheresse accidentelle est d'abord perçue comme une anomalie statistique de la pluviosité, savamment par les spécialistes des séries climatiques, plus ou moins nettement par chacun, suivant son âge, sa mémoire, et son sens de l'observation, et quand elle se poursuit, elle devient un sujet médiatique. C'est alors qu'on envisage les répercussions économiques et au premier plan, les conséquences sur l'agriculture ; comme celles-ci se font souvent sentir, quand le thème n'occupe plus le devant de la scène, la relation sécheresse-conséquences agricoles reste mal perçue par le public, et redevient, à l'occasion, un nouveau sujet de supputations.

La sécheresse se fait en outre sentir de façon inégale, suivant la région, l'activité agricole ou l'époque de l'année, ce qui ajoute à l'imprécision.

Cet exposé essaiera donc d'abord de préciser les effets d'une sécheresse prolongée, globalement d'abord en montrant combien ils peuvent différer suivant la phase de la vie de la plante qui est concernée ou le milieu, puis en indiquant quels sont les processus physiologiques qui sont perturbés.

Le repérage de la sécheresse a induit de nombreux travaux, et s'exerce à plusieurs échelles d'espace et plusieurs niveaux : celui du sol, de la plante, ou de l'atmosphère par l'intermédiaire du flux de vapeur d'eau émis par la végétation ; il fera l'objet d'une courte synthèse. Dans un dernier paragraphe enfin, seront évoqués les efforts actuels de la recherche pour améliorer nos connaissances sur ce thème, et mettre en œuvre quelques parades.

Drought : diagnostic and consequences. Can the effects be limited ? The work of the INRA

The author analyses the striking features and effects of the drought, how to identify it (criteria chosen in the ground, atmosphere, and plants, and strategies set up to fight against it.)

1. Stades de végétation du Colza de printemps. Effets d'une sécheresse appliquée à chaque stade.

D'après M. Mingéau « Comportement du colza de printemps à la sécheresse ».

2. Caractérisation et effets de la sécheresse

2.1. Effet global

La sécheresse agricole n'est pas l'insuffisance de la pluie, mais celle de la réserve d'eau du sol ; quand celle-ci diminue, la plante ne répond plus totalement à la demande climatique exprimée par l'évapotranspiration potentielle ETP (mm d'eau) et sa consommation d'eau, l'évapotranspiration réelle, ETR (mm d'eau), diminue. Ce phénomène est le résultat de plusieurs mécanismes, qui aboutissent à réduire les possibilités d'échange entre la plante et le milieu, ce qui touche la diffusion du gaz carbonique de l'atmosphère vers la plante et diminue la photosynthèse. La comparaison de l'ETR et de l'ETP pendant la vie de la plante, peut donc nous renseigner

sur le fonctionnement hydrique de la culture. Plus précisément, de nombreux auteurs ont établi pour les plantes annuelles des corrélations satisfaisantes entre la réduction du rendement et la réduction de la consommation d'eau, de la forme :

$$\frac{Y_m - Y}{Y_m} = a \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

où Y est le rendement et Y_m le rendement maximum (kg/ha).

Il existe d'autres modèles ayant le même objectif, mais celui-ci donne de bons résultats.

La constante a mesure en même temps la sensibilité de la plante au manque d'eau ; pour le maïs a est élevé (1,7 à 1,9), il est de 1,16 pour le blé de printemps alors que pour le sorgho, il est voisin de 1 (CABELGUENNE *et al.* 1982, ROBÉLIN *et al.* 1984). La FAO (DOORENBOS et KASSAM 1980) a beaucoup diffusé ce modèle qui peut être utilisé pour évaluer la rentabilité de l'irrigation. Nous allons voir qu'on peut aller plus loin qu'une évaluation globale de l'effet de la sécheresse sur le rendement.

2.2. Sécheresse au cours de la vie de la plante, influence de la période

En fait, le modèle précédent masque le fait que la plante au cours de sa vie n'est pas également sensible à la sécheresse ; il y a des périodes où elle supporte sans trop de dommages une sécheresse temporaire, d'autres où celle-ci peut être catastrophique.

Il est tout à fait classique maintenant de diviser la vie de la plante et d'analyser l'effet du climat pour chaque étape ; la figure 1 donne un tel exemple de découpage, appliqué au Colza de printemps, en montrant l'influence d'une réduction de 50 % de l'évapotranspiration ($ETR/ETP = 0,5$) appliquée pendant chacune des huit phases de la plante, sur la récolte finale en graines et en huile.

On y voit que la période la plus sensible est la floraison, et qu'il y a des épisodes à faible incidence de la sécheresse, en début de végétation. On remarque aussi les effets différents sur la production en graines et la teneur en huile (MINGÉAU).

D'une façon générale, la floraison, dont dépendra par la suite le nombre de fruits, est souvent une période critique, comme chez le Soja ou le Lin.

On note aussi qu'une plante peut être très sensible pendant une courte période comme le Maïs, alors que la betterave ne présente pas de période pratiquement critique (ROBELIN 1963, 1985 et MINGÉAU et ROBÉLIN 1977). Dans ce contexte, les périodes où la sécheresse majore ses effets, s'étalent de juin à août.

Ce poids différent de la sécheresse suivant les phases de la plante a amené JENSEN (1968) à perfectionner le modèle déjà cité en proposant :

$$\frac{Y}{Y_m} = \left(\frac{ETR_1}{ETP_1} \right)^{L_1} \left(\frac{ETR_2}{ETP_2} \right)^{L_2} \dots \left(\frac{ETR_n}{ETP_n} \right)^{L_n}$$

où les nombres correspondent aux phases successives de

la culture, L_1 , L_2 , L_n étant des coefficients traduisant des influences différentes de la sécheresse.

Ces influences ont également été analysées non plus en fonction des périodes, mais des composantes du rendement.

2.3. Influence de la sécheresse sur les composantes du rendement

C'est une autre manière de mettre en évidence et de quantifier l'effet différentiel de la sécheresse ; un exemple est donné par MINGEAU à propos du Soja ; où le rendement peut être mis sous la forme :

$$Y = N \cdot A \cdot B \cdot C.$$

N étant le nombre de plantes par hectare
 A le nombre moyen de gousses par plante
 B le nombre moyen de graines par gousse
 C le poids moyen d'une graine.

L'étude expérimentale montre que l'effet de la sécheresse est surtout sensible sur A , très peu sur les autres paramètres et l'on observe même un léger rattrapage sur C , la sécheresse augmentant un peu le poids des graines.

Tout ceci reste cependant descriptif. Pour aller plus loin dans la compréhension des phénomènes, il est nécessaire d'analyser à une autre échelle de temps et d'espace les effets du manque d'eau sur la plante, c'est-à-dire les mécanismes physiologiques perturbés par une teneur en eau cellulaire insuffisante, en nous contentant de quelques indications sur des processus complexes et encore insuffisamment connus.

2.4. Effets d'un stress hydrique sur les principaux mécanismes physiologiques

2.4.1. Transpiration et photosynthèse

Le transfert de CO_2 vers la plante se fait sous forme gazeuse et emprunte les mêmes voies que la vapeur d'eau quand elle diffuse vers l'atmosphère. La régulation stomatique qui accompagne le dessèchement de la feuille conduit donc à diminuer le débit d'entrée du gaz carbonique et donc la photosynthèse ; on peut la quantifier par la résistance stomatique r_s .

Par ailleurs, le transfert du CO_2 des espaces intercellulaires jusqu'à sa fixation par les chloroplastes rencontre des résistances regroupées sous le terme de résistance intracellulaire r_i , et qui rend compte à la fois de la dissolution du gaz carbonique dans la cellule, du mouvement à travers les membranes et le liquide cellulaire jusqu'aux sites de fixation, mais aussi des réactions biochimiques qui suivent.

La variation de r_s avec la sécheresse est claire et bien établie, celle de r_i est évidente pour les fortes sécheresses, mais très variable pour les stress limités. Quand on veut comparer les variations de la transpiration (sensibles à r_s) et celles de la photosynthèse ($r_s + r_i$) on trouve des situations très variables, suivant l'importance relative des résistances. Pour le Maïs, le rapport r_s/r_i serait élevé (3,3 selon CHARTIER) et transpiration et photosynthèse évoluent en même temps quel que soit r_i , alors qu'il serait de 0,48 pour le Sorgho (LUDLOW et WILSON), et la

faible augmentation de r_i avec un stress hydrique modéré signifie alors qu'un ajustement osmotique maintient une humidité suffisante des tissus et protège la machine photosynthétique (JONES and RAWSON 1979).

2.4.2. Sécheresse et alimentation minérale

L'idée simple est ici que le flux d'eau d'entrée dans la plante diminuant, le flux des éléments minéraux du sol est également réduit. Ceci n'est pas exact, et les deux phénomènes ne sont pas proportionnels, A.M. TRIBOI (1979) montre sur des plantules de blé que les rythmes d'absorption de l'eau et des nitrates sont très différents, la variation jour-nuit étant très tamponnée pour la nutrition minérale. Le même auteur montre qu'au cours de la vie d'une plante de Tournesol, l'absorption d'eau augmente régulièrement, par accroissement de la surface foliaire, alors que l'absorption des nitrates, qui accompagne d'abord celle de l'eau jusqu'à la formation des boutons floraux, chute ensuite rapidement pour s'annuler à la fin de la floraison ; ceci indique une certaine indépendance des flux d'absorption. Il y a cependant un effet général dépressif de la sécheresse sur la nutrition, mais une reprise très rapide quand les conditions hydriques redeviennent favorables.

2.5. Autres effets à court terme de la sécheresse

Il y a de multiples effets biochimiques déclenchés par un déficit hydrique : réduction de la respiration, hydrolyse des protéines et accumulation d'acides aminés comme la proline, synthèse et transport de régulateurs de croissance comme l'acide abscissique. GRIEU *et al.* (1988) montrent notamment que des différences existent entre des espèces forestières comme les douglas et le cèdre dans l'accumulation des composés organiques à la suite d'une sécheresse, mais que leurs réactions tardives conduisent à penser à une certaine tolérance.

Parmi les effets de la sécheresse, ceux qui portent sur la croissance ou d'une façon plus générale sur les variations morphologiques, ont un intérêt particulier, dans la mesure où leurs manifestations extérieures sont enregistrables et peuvent servir de repère, c'est le cas de l'élongation des organes de la plante (DURAND 1988) ou des variations de diamètre des tiges ou des fruits (HUGUET 1985), figures 2 à 4, page suivante.

La réduction de vitesse de la croissance des feuilles a pour effet de limiter l'augmentation de la surface des capteurs de l'énergie solaire, indépendamment de tout mécanisme biochimique.

La sécheresse intervient également sur la répartition des produits de la photosynthèse, entre les parties aériennes et les racines, ce qui montre l'intérêt de prendre en compte, dans les études à long terme, toute la biomasse (LEMAIRE *et al.* 1987).

Un dernier effet, à court terme, concerne les conséquences thermiques de la sécheresse et la température des surfaces d'échange (le sol, les feuilles...). L'énergie initiale est entièrement d'origine radiative (énergie solaire + rayonnement thermique de l'atmosphère avec les nuages combiné à celui des surfaces) et cette énergie se dissipe près du sol sous forme sensible, ou en chaleur latente (évaporation, condensation). La réduction d'eau

2 et 3. Vitesse d'allongement d'une tige et potentiel foliaire chez la luzerne dans le cas de deux traitements hydriques : sécheresse et irrigation.
D'après J.L. Durand, 1988 (à paraître).

4. Contractions de tiges de pommier.
D'après J.G. Huguet « Appréciation de l'état hydrique d'une plante à partir des variations micrométriques de la dimension des fruits ou des tiges au cours de la journée ». Agronomie, 1985, 5(8), 733-741.

5. Evolution de la pluie annuelle à Strasbourg.

6. Accroissement radial comparé de sapins dans deux types de parcelle.

s : parcelle saine ; d : parcelle dépérissante ; m : moyenne dans les Vosges.

D'après G. Lévy et M. Becker « Le dépérissement du sapin dans les Vosges. Rôle primordial des déficits d'alimentation en eau ». Ann. Sci. For. 1987, 44(4), 403-416.

disponible entraîne donc une augmentation de la chaleur sensible, et des températures de surface.

Ce phénomène est parfois favorable (maturation des fruits) quelquefois dangereux (échaudage), mais d'une façon générale, l'importance de la régulation thermique ne semble pas constituer une réelle contrepartie à la consommation d'eau considérable d'une culture qui ne retient finalement pour créer de la matière qu'une très faible partie de l'eau qui circule dans la plante : la forêt landaise représente un stock d'eau d'un peu plus de 10 mm ! C'est sans doute par sa propriété de vecteur que l'eau intervient le plus.

2.6. Effets à long terme de la sécheresse

Ils s'exercent sur les plantes pérennes et rendent l'analyse plus difficile.

Un exemple spectaculaire mais qui demande à être confirmé, peut être actuellement donné ; il s'agit du dépérissement du sapin dans les Vosges, attribué d'abord par les médias, à la pollution atmosphérique. LEVY et BECKER (1987) utilisent des courbes de croissance radiale de sapins obtenues par carottage du bois en choisissant différents emplacements, les uns très sains, les autres à fort dépérissement ; pour tous, une croissance faible a été constatée après les épisodes secs de 1959, 1962, 1964, puis 1974 et 1976 (fig. 5), mais pour les arbres les plus touchés actuellement, la croissance est restée faible après 1965, et s'est encore aggravée en 1974 (fig. 6). Les auteurs attribuent donc aux épisodes secs des années passées une grande part du dépérissement actuel ; la reprise actuelle avec le retour d'une pluviosité favorable semble confirmer cette hypothèse. Notons également que les différences dans le comportement à la sécheresse et dans la récupération qui suit sont attribuées à la concurrence et aux conditions topographiques et pédologiques.

2.7. Effets de la sécheresse sur la « qualité »

On entend par là, les effets qui portent sur des aspects de la production autres que le rendement.

La question est d'une grande complexité et implique qu'on définisse d'abord les composantes de la qualité ; on se contentera ici d'indiquer qu'on est très loin de connaître (et donc de maîtriser) l'effet précis d'un stress hydrique, par exemple sur les propriétés des fruits ; un cas typique est celui de la vigne, la qualité du vin étant influencée par la distribution des pluies et variant souvent en sens inverse du rendement. Il est indéniable qu'on a multiplié les observations et que nos connaissances empiriques ne sont pas négligeables mais nous sommes loin d'avoir mis en évidence avec précision les conséquences de sécheresses plus ou moins accentuées ; c'est là, un grand sujet d'avenir.

2.8. Conclusion sur les effets de la sécheresse

Une évaluation globale de l'effet d'une sécheresse sur le rendement est assez simple à réaliser pour les plantes annuelles ; il est en outre possible d'être plus précis, et de moduler cette évaluation selon la place de la période sèche dans le cycle de développement de la plante, ce qui montre la nécessité de traiter le problème de la sécheresse agricole en rassemblant les données sur la pluie et les données sur la phénologie des cultures. En revanche, les mécanismes physiologiques déclenchés par la sécheresse sont encore mal connus : l'eau est un élément omniprésent dans la plante où la plupart des composés sont en solution et sa raréfaction entraîne de très nombreuses réactions. Cet état insuffisant des connaissances a plusieurs conséquences, on peut ici en noter deux :

1. Faute de pouvoir porter un diagnostic précis sur l'élaboration de la matière vivante, on se contente dans

la pratique, d'indications sur l'état hydrique de la plante, plus accessible et dont le lien avec le processus de production, même s'il est complexe et mal élucidé, est réel, c'est ce qu'on appelle le pilotage de l'irrigation.

2. Les généticiens rencontrent de réelles difficultés pour créer des variétés tolérantes ou résistantes à la sécheresse.

3. Repérage de la sécheresse

Ce repérage n'a pas pour unique but de fournir une information pour l'irrigation mais permet aussi d'évaluer une situation de sécheresse à l'échelle régionale, ou à celle de la culture ou de la plante à des fins scientifiques ou économiques.

3.1. A l'échelle régionale

Deux grandes voies sont actuellement utilisées pour fournir une « image » de la sécheresse à l'échelle régionale.

3.1.1. L'une utilise un modèle de bilan hydrique, dans lequel, le réservoir sol est géré, à partir de ses entrées d'eau, la pluie, et de sa sortie principale, l'évapotranspiration, elle-même évaluée en fonction de l'eau disponible dans le sol ; ce modèle établi avec l'aide de l'INRA et mis en œuvre par la Météorologie Nationale fournit une évaluation décennale du déficit hydrique (CHOISNEL 1985). Ce modèle, assez élaboré (il fait, par exemple, intervenir deux réservoirs à disponibilité différente dans le sol) est un bon exemple, d'une conception climatologique de l'évaluation du déficit hydrique, où les variables sont météorologiques et le facteur sol introduit par sa capacité. Cette approche a deux limites, peu gênantes à l'échelle actuelle d'utilisation : le réservoir peut déborder avant d'être plein (ruissellement) et sa capacité peut se modifier (percolation profonde, développement des racines et contribution des couches profondes du sol en période exceptionnelle), (DAUDET et VALANCOGNE 1974). La figure 7 (page suiv.) donne une image de la France fin avril 1984, pendant une période anormalement sèche, heureusement corrigée par les pluies de mai.

3.1.2. L'autre voie est l'utilisation de la télédétection, on a vu (25) l'effet d'augmentation de la température de surface à la suite de sécheresse. SEGUIN (1982) puis LAGOUARDE (1988) ont proposé une méthode d'évaluation de l'évapotranspiration régionale en combinant des données obtenues au sol et la température de surface mesurée par satellite (NOAA, TIROS, HCMM, METEOSAT), sous la forme :

$$ETR = R_n + A - B(T_s - T_a)$$

où ETR, R_n , T_s et T_a sont respectivement les valeurs journalières de l'évapotranspiration journalière, du rayonnement net journalier, de la température de surface à midi et de la température de l'air au même moment (fig. 8, page suiv.).

7. Rapport de la réserve d'eau du sol à la réserve utile pour la 3^e décade d'avril 84.

D'après D. Payen et C. Jacquart-Romon « Suivi agrométéorologique du bilan hydrique à l'échelle régionale ». La Météorologie, VII^e série, n° 7, 1985. Mise en œuvre du modèle de Choissel (Météorologie nationale).

8. Répartition spatiale sur la CRAU des températures de surface. (Satellites NOAA 5 et TIROS-N).

S : Sec, I : Irrigation partielle (%).

D'après B. Seguin, S. Baelz *, J.M. Monget *, V. Petit *.

(* Ecole des Mines de Paris.)

« Utilisation de la thermographie infra-rouge pour l'estimation de l'évaporation régionale - II. Résultats obtenus à partir des données satellites ».

Agronomie, 1982, 2(2), 113-118.

9 et 10. Profils hydriques obtenus par humidimétrie neutronique sur une parcelle d'un hectare de blé en Tunisie. Conséquences sur la consommation d'eau.

D'après G. Vachaud, R. Laty, M. Vauclin, Z. Chaabouni, S. El Amami.

« Estimation de la consommation hydrique d'une culture de blé en sec à l'échelle de l'hectare » in La Station hydroclimatologique du Mornag n° 3, 1982.

3.2. Critères concernant le sol

D'autres approches que le bilan hydrique combinant la pluie, l'évapotranspiration et la capacité du réservoir sol ont été développées et bénéficient actuellement des progrès de la technique. L'évaluation du stock d'eau utile du sol se fait actuellement au moyen d'un humidimètre neutronique qui permet une mesure rapide de l'humidité volumique. La mise en œuvre de cette méthode fait apparaître une variabilité assez forte même parfois à l'intérieur du champ (fig. 9 et 10). La dispersion des valeurs provient de la nature du sol et du microrelief qui peuvent modifier l'infiltration et le développement des racines. La notion de réserve d'eau utile concerne la quantité d'eau disponible stockée par la tranche de sol prospectée par les racines ; les mesures sur le terrain montrent combien elle peut être variable. Si l'on tient compte de ce qui a été dit plus haut, on voit qu'une même insuffisance de pluie à l'intérieur d'une petite région a des effets en agriculture qui peuvent varier selon la plante cultivée et son stade phénologique, mais aussi dans l'espace pour une même culture.

La disponibilité de l'eau dans le sol est également évaluée par les tensiomètres, appareils qui fournissent une information limitée à un niveau de sol donné, mais d'un prix modéré, et qu'on peut multiplier.

La difficulté n'est pas, tant ici d'obtenir une information sur l'état hydrique du sol, que de l'interpréter pour une décision d'irrigation (ITIER *et al.* 1988). Des travaux maintenant anciens (HALLAIRE 1963) mettaient déjà l'accent sur la dynamique du dessèchement qui pouvait créer autour des racines des conditions variables de réalimentation en eau et nous pouvons ici introduire un nouveau concept : la réaction de l'ensemble sol-plante-atmosphère est certainement liée à la vitesse du dessèchement ; deux éléments du climat sont donc concernés dans la sécheresse : la pluie et l'évapotranspiration potentielle, et l'ensemble sol-racines y joue un rôle important. Ce sont de telles considérations qui ont été à l'origine du concept de système sol-plante-atmosphère.

3.3. Critères concernant l'atmosphère

La méthode d'évaluation de la sécheresse emprunte ici la voie détournée qu'est la mesure de l'évapotranspiration réelle qu'on peut comparer à l'ETP.

La mesure de l'ETR a beaucoup progressé en France comme à l'étranger et utilisé des voies différentes. On peut citer à ce propos :

- la mesure du bilan d'énergie R_n et de la répartition entre chaleur latente et chaleur sensible (rapport β), qui conduit à $ETR - G = R_n / (1 + \beta)$, où G est la chaleur sensible stockée dans le sol. Une instrumentation, le B.E.A.R.N. a mis en œuvre cette approche (PERRIER *et al.* 1976) ;

- la mesure directe du flux de chaleur sensible H telle qu'on ait finalement $ETR = R_n - G - H$.

Une méthode simplifiée a été développée par ITIER et RIOU (1982).

Une méthode de détection a également été testée s'appuyant sur le fait que l'évacuation d'un flux de chaleur important libéré par une culture manquant

11. Evolution des flux de chaleur sensible et de chaleur latente (évaporation) pour une culture de blé en sec et une culture de maïs irrigué.

D'après B. Itier et C. Riou « Une possibilité de suivi de l'état hydrique des cultures en zone semi-aride à partir de mesures micrométéorologiques simples ».

Les besoins en eau des cultures. 1985 - INRA Editeur.

d'eau, créait par vent faible, un gradient thermique notable (ITIER et RIOU 1985), figure 11.

Actuellement sur des couverts végétaux complexes (cultures en rangs comme la vigne ou les vergers, forêt) où les méthodes précédentes ne sont pas encore acceptables, on utilise la méthode des corrélations tourbillonnaires ; à un niveau donné, on mesure les fluctuations d'une grandeur liée à l'unité de volume d'air, g , et la vitesse verticale du vent W , le flux F est :

$$\begin{aligned} \rho W g &= \rho (W + W') (g + g') \\ &= \rho W' g' \end{aligned}$$

ρ étant la masse spécifique de l'air, $\bar{W}$ et $\bar{W}'$ étant nuls.

Les appareillages modernes (centrales d'acquisition de données, capteurs de vitesse du vent) permettent d'aborder de telles mesures autrefois hors de portée.

3.4. Critères concernant la plante

C'est avec le dernier point évoqué, le domaine où les progrès ont été tout récemment les plus importants, avec le développement des recherches et des capteurs et l'extension de la gamme de plantes étudiées. Le diagnostic sur la plante-même a l'avantage de fournir une information émanant directement du sujet et de rendre compte ainsi de la diversité des réponses à un déficit hydrique qui peut être localement variable et différemment ressenti ; il a l'inconvénient de ses qualités et pose un problème d'échantillonnage. Il n'est pas encore véritablement opérationnel.

Citons parmi les méthodes actuellement utilisées :

- la mesure de la résistance stomatique, à partir de celle de la diffusion de la vapeur d'eau d'une feuille grâce au poromètre ; un capteur d'humidité permet de mesurer l'enrichissement en vapeur d'eau pendant un temps donné et des plaques étalons de résistance connue fournissent le calibrage ;

- la mesure du potentiel foliaire par une chambre à pression, où l'on observe la sortie d'une goutte d'eau par le pétiole d'une feuille à la suite d'une augmentation continue de la pression extérieure (fig. 3) ;

- la mesure du débit de la sève brute, correspondant pratiquement au débit d'entrée et de sortie de l'eau, à partir de méthodes thermiques (dissipation de la chaleur d'une sonde ou bilan thermique d'un segment de tronc) basées sur le rôle prédominant de la convection due à la sève dans les transferts de chaleur, GRANIER (1985), VALANCOGNE (1988) ;

- les variations micromorphologiques d'une tige se dilatant ou se contractant en fonction de son contenu hydrique, HUGUET (1985) ;

- la température foliaire dont l'élévation peut correspondre à un déficit dans la dissipation de l'énergie par évaporation et qui peut être facilement mesurée par un radiomètre infrarouge.

3.5. Conclusions sur le repérage de la sécheresse

Que ce soit à l'échelle de la région ou à celle du champ, le « repérage de la sécheresse » est en fait un diagnostic sur une situation actuelle qui ne peut être caractérisée que par comparaison avec un état de référence des

conditions hydriques optimales. C'est ce qui entraîne la nécessité d'avoir des plantes ou des zones témoins irriguées ou de mettre en évidence des seuils pour les variables mesurées. Par ailleurs, les différentes méthodes ou capteurs présentent des difficultés de mise en œuvre qui les rendent plus ou moins fiables dans la pratique. Récemment une série d'expérimentations effectuée en Tunisie, puis au Portugal avec le soutien de la CEE (GOSSE, ITIER, KATERJI, RIOU) a permis de tester plusieurs approches et montré l'intérêt du potentiel de base qui est la mesure du potentiel foliaire au lever du jour, près de l'état d'équilibre hydrique du système sol-plante-atmosphère.

4. Stratégies mises en œuvre contre la sécheresse

C'est un bien grand mot pour désigner un ensemble de recherches à objectifs variables mais qui peuvent contribuer à limiter les conséquences des sécheresses futures. On distinguera d'abord les programmes de recherche actuels qui amélioreront notre perception de la sécheresse, puis l'élaboration de scénarios en cas de sécheresse et enfin les travaux portant sur l'amélioration du matériel génétique.

4.1. Recherches actuelles

4.1.1. Le repérage de la sécheresse

On a vu au passage que le repérage de la sécheresse faisait actuellement des progrès notables à la fois à l'échelle de la région et à celle du champ.

La télédétection par satellite et par avion continue à se développer, à la fois par la création de nouveaux capteurs et satellites (SPOT récemment, avec une résolution possible de 10 m) et par le perfectionnement des méthodes avec la prise en compte de certaines caractéristiques du couvert végétal comme la hauteur (rugosité) pour améliorer l'estimation de l'évapotranspiration à partir de la température de surface (LAGOUARDE, BRUNET, SEGUIN, VIDAL, RIOU, ITIER...). Des applications sont actuellement en cours sur l'Afrique sahélienne : Sénégal, Niger.

Citons également l'expérience HAPEX-MOBILHY, qui a mobilisé à côté de la Météorologie nationale (ANDRÉ *et al.*) et de l'INRA (PERRIER *et al.*) de nombreux laboratoires français, anglais et américain, où sur un carré de 10 000 km² dans le Sud-Ouest, une paramétrisation des flux hydriques a été comparée à une mesure globale de référence réalisée par un avion équipé par le NCAR, auquel s'était joint un avion de la NASA pour la télédétection.

A l'échelle du champ ou du peuplement, la recherche se poursuit dans deux directions : mise au point des méthodes et comparaison des capteurs, prise en compte de nouveaux couverts dont l'évaporation était encore peu étudiée en raison des difficultés théoriques ou pratiques — forêt, vergers, vigne. Une station de l'INRA a été créée à Bordeaux sur ce thème.

4.1.2. Stress hydrique et production

L'équipe des forestiers de Nancy (AUSSENAC, DREYER, GARNIER, GUEHL...) développe actuellement une recherche approfondie sur l'action de la sécheresse sur la forêt, domaine très insuffisamment exploré ; cette recherche se fait à l'échelle de l'arbre (interprétation des différences de comportement, mécanismes physiologiques mis en cause) ou du peuplement (effet de la concurrence). Des applications sont proposées pour les pays sahéliens (Agroforesterie).

4.1.3. Une attention particulière est actuellement portée sur la mise en place et le fonctionnement du **système racinaire** longtemps négligé au bénéfice des parties aériennes. L'endoscope (MAERTENS, 1982) a permis d'améliorer l'observation des racines dans le sol. PICARD *et al.* (1985), VARLET-GRANCHER *et al.* (1987), GIRARDIN *et al.* (1987), JORDAN *et al.* (1988) ont particulièrement étudié le rythme d'apparition des racines du Maïs et mis en évidence une variabilité importante due au milieu. TARDIEU (1988) travaillant également sur le maïs, a montré l'importance du déploiement à l'intérieur d'une tranche de sol, du système racinaire qui peut être perturbé par le compactage dû aux passages des engins ; la notion globale de réserve utile basée uniquement sur la profondeur d'enracinement rencontre ici sa limite. CABIBEL (1987) utilise la mesure du débit de sève sur les racines.

4.1.4. Mécanismes physiologiques déclenchés par la sécheresse

Même s'il existe des travaux non négligeables sur ces aspects en France ou ailleurs, il faut avouer que nos connaissances sont encore très insuffisantes et nos progrès très lents. Les équipes INRA de Nancy pour les arbres forestiers, et de Clermont-Ferrand pour les plantes annuelles s'intéressent à ces aspects fondamentaux.

4.2. Scénarios en cas de sécheresse

Nous ne développerons pas tout ce qui concerne l'irrigation qui reste évidemment la réponse agronomique la plus évidente à la sécheresse du sol. Nous mentionnerons uniquement ici ce qui s'est passé après la sécheresse de 1976, dans le domaine de l'élevage.

De tout temps, la sécheresse a été particulièrement ressentie par les éleveurs d'herbivores. Les longues périodes sèches ont d'abord un effet immédiat, puis un effet différé car les réserves fourragères pour l'hiver peuvent devenir insuffisantes.

En 1976, une équipe du Département de recherches sur l'élevage des ruminants avait présenté plusieurs propositions face à la pénurie fourragère (ANDRIEU *et al.* 1976).

L'objectif était de **maintenir** le troupeau dans un état de santé et d'alimentation suffisant pour récupérer après le retour des pluies ; le texte préconisait d'abord une limite à la diminution de production des vaches laitières pour qu'elle ne devienne pas irréversible et en revanche un tarissement des brebis en lactation ; tout le reste de l'étude portait sur les régimes alimentaires avec deux aspects :

1. Mobilisation de toutes les matières alimentaires disponibles et parfois peu ou pas utilisées en période d'abondance : pailles, feuilles de frêne et d'acacias, résidus de brasserie, marcs de raisin, etc... Les chercheurs avaient ici anticipé sur la crise, en mesurant la valeur nutritive de ces aliments d'appoint.

2. Préparation de plans d'alimentation hivernaux : malgré l'extrême diversité des situations des éleveurs, des plans différents peuvent être proposés pour les animaux à besoins élevés (vaches laitières, taurillons) et pour ceux qui ont des besoins limités (vaches nourrices, bœufs, brebis) ; ces plans de rationnement énergétique respectent certains équilibres et quelques apports doivent rester normaux (azote, éléments minéraux, vitamines).

On voit que l'accent est mis sur le moyen terme avec l'objectif de maintenir un **potentiel de récupération**. Nous retrouverons plus loin cette idée. Par ailleurs la recherche avait établi la valeur nutritive d'aliments d'appoint en cas de crise, et donc anticipé l'événement.

4.3. Amélioration du potentiel génétique

Créer des variétés résistantes à la sécheresse, c'est la solution qui vient naturellement à l'esprit ; nous allons voir que c'est très loin d'être aussi simple.

Les difficultés sont de plusieurs ordres.

4.3.1. Qu'est-ce que la résistance à la sécheresse ?

Tout le monde sait qu'il existe des plantes qui vivent dans des conditions d'extrême aridité et leurs adaptations morphologiques ont été largement étudiées. Il s'agit en fait, d'aptitude à survivre. En agriculture, l'objectif est d'obtenir des variétés qui minimiseront l'effet de la sécheresse et dont l'écart de rendement par rapport au témoin irrigué sera le plus faible possible (ROBELIN et COLLIER 1958). La classification de LEVITT (1980) reprise par ROBELIN éclaire un peu le débat en distinguant trois situations :

a) L'esquive : Le calendrier de la culture est établi pour éviter les dangers d'une période sèche, c'est le cas des cultures d'hiver.

b) Le maintien d'une humidité élevée dans les tissus végétaux, même avec un déficit hydrique du sol.

c) La tolérance à la sécheresse, qui permet le maintien de la croissance ou du moins celui de l'intégrité fonctionnelle et qui favorisera une **reprise** rapide de l'activité avec le retour de bonnes conditions hydriques. On retrouve ici cette notion de récupération déjà citée pour les animaux.

Dans notre agriculture intensive, c'est donc de tolérance à la sécheresse qu'il faut surtout parler.

4.3.2. Qu'est-ce qui rend une plante tolérante à la sécheresse ?

Nous avons déjà signalé notre ignorance des mécanismes physiologiques fins qui interviennent ici. Les sélectionneurs sont donc amenés à privilégier quelques critères supposés liés à la tolérance à la sécheresse ; parmi ceux-ci ont été utilisés :

- Les critères **morphologiques** : pilosité, couleur, forme et dimensions de la feuille, ramification...

- Les tests de **fonctionnement hydrique en conditions sèches** : transpiration, résistance stomatique, potentiel foliaire.

- La **vitesse de dessiccation foliaire**

- Les tests de **fonctionnement photosynthétique** en conditions sèches.

- Le **suivi de la croissance en conditions sèches**.

- L'**effet sur le rendement d'un stress hydrique**.

De telles recherches ont été faites sur le Maïs et le Tournesol : CRUIZIAT, MORIZET, PLANCHON, POLLACSEK, TOGOLA, TRIBOI (A.M.) (1984 à 1987).

Aucun de ces essais n'est véritablement concluant. Les meilleures pistes de recherche portent actuellement sur la capacité de reprise de la plante après un stress (MORIZET *et al.* 1987) et la modification du métabolisme azoté qui l'accompagne (TRIBOI A.M.).

4.3.3. Que peuvent donc être les stratégies de sélection ?

POLLACSEK *et al.* (1987) résument les stratégies actuelles :

a) Choix de variétés plus tolérantes parmi les variétés à haut rendement.

b) Amélioration des performances de variétés tolérantes à la sécheresse.

c) Introduction de caractère(s) de tolérance dans les programmes de sélection.

Des améliorations ont été apportées par ces différentes méthodes, mais on doit faire ici plusieurs remarques.

Les pays à agriculture intensive comme le nôtre privilégient les hauts rendements et on avance souvent qu'il y a une corrélation positive entre résistance à la sécheresse (rusticité) et faible productivité. L'amélioration des performances de variétés tolérantes convient plutôt aux pays à sécheresse saisonnière bien établie qu'à nos climats à sécheresse épisodique. En ce qui concerne le dernier point, notre ignorance rend les choses difficiles ; POLLACSEK cite le cas du blé rendu plus tolérant par l'introduction d'une forte résistance racinaire (RICHARDS et PASSIOURA 1981) ou d'un fort niveau d'acide abscissique (QUARRIE 1985). Plusieurs mécanismes complexes étant ici impliqués, un seul caractère est certainement insuffisant. Il faut aussi bien distinguer les intensités de stress et en résumé, on peut dire que presque tout reste à faire.

Conclusion

Face aux sécheresses épisodiques qui surviennent en France, on ne peut dire qu'il existe une véritable stratégie mais on peut affirmer qu'elles ont initié de nombreux travaux. La recherche agronomique pour sa part a abordé le problème sur tous les fronts, avec un succès inégal. Les effets de la sécheresse sur le rendement ont été quantifiés et précisés, avec plus de résultats sur les plantes annuelles que sur les plantes pérennes ; sur les autres éléments de la production (qualité) il reste beaucoup à faire. Le repérage de la sécheresse progresse actuellement avec le développement des capteurs, la modélisation et la télédétection et vise à fournir à la fois une information régionale qui estompe la variabilité végétale, et une information locale qui la privilégie.

Parmi les recherches qui nous aideront dans l'avenir à mieux comprendre, donc à mieux réagir, citons celles qui portent sur la mise en place et le fonctionnement du système racinaire qui conditionne beaucoup des réactions des organes aériens de la plante.

La grande lacune actuelle dans nos connaissances porte sur les mécanismes physiologiques déclenchés par la sécheresse ; aucun des tests qui devraient permettre de qualifier le comportement variétal n'est actuellement suffisant pour permettre une véritable amélioration génétique. Il est vrai que sur ce plan, le problème de la sécheresse a souvent été mal posé, qu'il faut distinguer la

simple tolérance à un stress modéré, qui se manifeste surtout par une capacité de reprise compatible sans doute avec une forte productivité, et une résistance plus profonde qui affecte le fonctionnement biochimique de la plante et sa capacité de production. Il reste aussi beaucoup de travaux à faire sur les relations entre les métabolismes des trois éléments, eau, carbone et azote. On ne peut que souhaiter que la recherche agronomique internationale se mobilise davantage sur ce dernier thème et fournisse bientôt des réponses non seulement à nos problèmes mais à ceux des pays où la sécheresse est un gros obstacle au développement.

Bibliographie

Pour montrer comment la recherche agronomique peut actuellement mieux définir une sécheresse accidentelle, évaluer ses effets et contribuer à limiter ses conséquences, l'auteur a pris la plus grande partie de ses exemples à l'INRA, mais il existe bien sûr d'autres travaux en France au CNRS, à l'Université, au CEMAGREF, au CIRAD, à l'ORSTOM et ailleurs...

Les auteurs mis à contribution sont ici :

J. ANDRIEU, G. AUSSÉNAC, G. BAUCHER, M. BECKER, C. BÉRANGER, O. BETHENOD, M. CABELGUENNE, B. CABIBEL, M. CHARTIER, P. CHARTIER, J. CHATENOD, E. CHOISNEL (Météorologie nationale), P. CRUIZIAT, F.A. DAUDET, C. DEMARQUILLY, M. DERIEUX, J.P. DULPHY, J.L. DURAND, E. DREYER, I. FERREIRA (I.S.A. Lisbonne), F. GASTAL, Y. GEAY, P. GIRARDIN, A. GRANIER, G. GOSSE, P. GRIEU, J.M. GUEHL, A. HILAIRE, A. HOTEN, J.G. HUGUET, M. IBRAHIM (Université de Tanta, Egypte), B. ITIER, R. JARRIGE, M.O. JORDAN, M. JOURNET, N. KATERJI, J.P. LAGOUARDE, F. LARHER, P. LECLERCO, G. LEGENDRE (Université de Rennes), G. LEMAIRE, G. LÉVY, G. LIÉNARD, C. MAERTENS, J.R. MARTY, A. MERRIEN (CETIOM), M. MINGEAU, J. MORIZET, P. OLEFFE, L. PAGÈS, S. PELLERIN, A. PERRIER, M. PETIT, D. PICARD, P. PICOT, C. PLANCHON (ENSA, Toulouse), M. POLLACSEK, J. PUECH, B. RÉMON, C. RIOU, M. ROBÉLIN, B. SEGUIN, H. SERYES, F. TARDIEU, M. THÉRIEZ, P. THIVEND, D. TOGOLA (Mali), R. TRENDÉL, A.M. TRIBOI-BLONDEL, G. VACHAUD, (CNRS), C. VALANCOGNE, C. VARLET-GRANCHER, M. VAUCLIN (CNRS), A. VERNÈDE, A. VIDAL (CEMAGREF).