

La sécheresse : caractérisation et occurrence, en lien avec le climat et l'hydrologie

B. Itier¹, B. Seguin²

Depuis 1976, des sécheresses régionales sont fréquemment observées. Il est essentiel de bien en différencier les principaux types et d'en caractériser les effets sur les peuplements végétaux et les systèmes agricoles. De plus, dans un contexte de changement climatique, il est nécessaire de faire le point sur les projections réalisées par les climatologues.

RÉSUMÉ

L'analyse du cycle de l'eau permet d'identifier la sécheresse hydrologique, concernant l'alimentation des nappes souterraines par la pluviométrie d'automne et d'hiver (qui conditionne les capacités d'irrigation), et la sécheresse agronomique qui concerne le bilan hydrique du sol et dépend plutôt des précipitations au cours de la saison de végétation. Celle-ci est fréquemment accompagnée d'une hausse des températures, qui intervient sur la physiologie des plantes et les flux du bilan hydrique via l'évapotranspiration. Dans les deux cas, elle est à considérer dans son rapport à une norme. Après une revue des analyses des sécheresses passées, les prévisions des climatologues dans un avenir proche sont présentées, laissant augurer l'accroissement de la sécheresse estivale, en particulier pour la partie sud de l'hexagone, et un raccourcissement de la durée des cycles des cultures.

MOTS CLÉS

Agriculture, changement climatique, eau, France, histoire, irrigation, production fourragère, sécheresse.

KEY-WORDS

Agriculture, climatic change, drought, forage production, France, History, irrigation, water.

AUTEURS

1 : INRA, Centre de Montpellier, 2, place Viala, F-34060 Montpellier ; itier@supagro.inra.fr

2 : INRA, Centre d'Avignon, site Agroparc, Domaine Saint-Paul, F-84914 Avignon cedex 9 ; seguin@avignon.inra.fr

La sécheresse de 1976 avait notablement frappé les esprits, par sa durée et son extension spatiale, mais aussi parce qu'elle survenait dans un contexte d'une agriculture en pleine expansion technologique. A l'époque, on avait pu la considérer comme "un événement qui ne se reproduira sans doute pas, du moins avec la même gravité, avant 100 ou 200 ans" (HALLAIRE, 1977) et, du coup, l'irrigation devait être considérée "comme un atout supplémentaire, réservé, à la limite, au passage de quelques caps difficiles". La première affirmation a été grandement démentie par un nombre conséquent d'épisodes après 1976, certes plus limités dans le temps et l'espace ; mais cela a justifié en grande partie une extension notable des surfaces irriguées (passage de 91 milliers d'hectares en 1988 à 104 en 2000 et 138 en 2003, d'après Agreste, 2005)... jusqu'à l'épisode de l'été 2003, où la canicule s'est conjuguée avec la sécheresse sur une grande partie du territoire. Si l'année 2004 a permis un léger répit (à l'exception du Sud-Est), le caractère persistant de conditions de pluviométrie très inférieure à la normale sur une bonne partie de la France en 2005 et 2006 remet la question de l'eau au premier plan de l'actualité agricole mais aussi générale, du fait des tensions qui existent maintenant sur les usages de l'eau. Le tout dans le contexte des préoccupations sur le changement climatique, qui devrait les amplifier à l'avenir.

La production fourragère est au premier rang des productions agricoles touchées par la sécheresse, avec des baisses de production qui peuvent atteindre et dépasser les 50% dans certains cas. Malgré l'extension des surfaces équipées notée plus haut, **l'irrigation reste une parade limitée car elle représente à peine 1%** des 14,8 Millions d'hectares de cultures fourragères. Le climat et, en particulier l'événement extrême de la sécheresse, demeure donc plus que jamais un élément d'entrée déterminant dont nous allons rappeler les bases, puis analyser les tendances passées et futures.

1. Rappels sur le cycle de l'eau

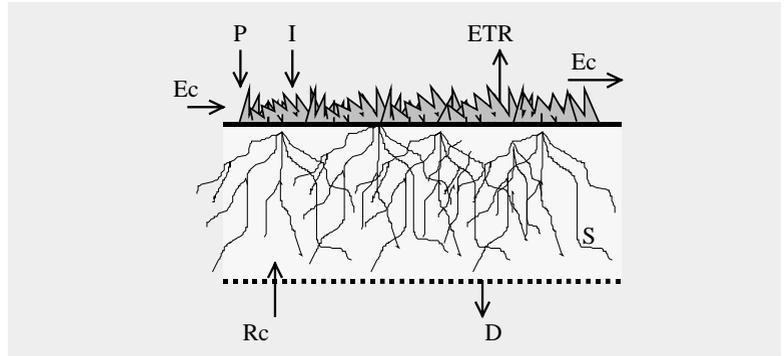
Dans le cadre de ce cycle de l'eau, la production agricole est d'abord déterminée par l'eau avec laquelle les cultures sont susceptibles de s'alimenter par l'absorption racinaire (dans le réservoir superficiel constitué par le sol) pour élaborer de la biomasse végétale par le processus de la photosynthèse. La production agricole va ensuite conditionner la suite du circuit de l'eau tombée sous forme de pluie soit par le drainage en profondeur dans le sol, soit par le ruissellement, dont une partie va alimenter les ressources en eau sur lesquelles pourra éventuellement être prélevée l'eau d'irrigation lorsque le réservoir du sol est insuffisamment alimenté. Nous allons aborder successivement ces deux phases du cycle de l'eau, que l'on peut quantifier schématiquement par deux types de bilan de l'eau : le bilan hydrique d'une part, le bilan hydrologique d'autre part.

■ Le bilan hydrique

Le bilan hydrique est une simple application du principe de conservation de la masse qui peut être formulé ici de la façon suivante : la somme des apports d'eau moins la somme des pertes en

FIGURE 1 : **Présentation schématique des flux affectant le réservoir du bilan hydrique sur une tranche de sol** (signification des symboles : cf. texte).

FIGURE 1 : **Schematic representation of the flows affecting the reserves in the water balance of a soil layer** (cf. text for the significance of the symbols).



eau d'un volume de sol pendant une période donnée est égale à la **variation de la quantité d'eau stockée dans ce même volume durant cette même période** (figure 1).

Au niveau de la partie supérieure du système, les apports sont essentiellement la pluie (P) et l'irrigation (I) diminués (ou augmentés suivant les cas) du ruissellement E_c , tandis que les pertes se réduisent à l'évapotranspiration réelle (ETR, somme de la transpiration des plantes et de l'évaporation du sol). A la limite inférieure, les apports éventuels peuvent être ceux dus à des remontées capillaires (Rc), en particulier s'il existe une nappe peu profonde, tandis que les pertes se font par drainage profond (D). Dans ce bilan, on a négligé les termes de transferts latéraux dans le sol (dans une pente par exemple) pour ne considérer que des transferts verticaux. Le volume de sol sur lequel est fait le bilan est défini par la profondeur du système racinaire. L'équation de bilan s'écrit :

$$\Delta S = P + I - ETR - D + Rc \pm E_c,$$

où ΔS est la variation du stock d'eau dans le volume de sol pendant la période considérée.

En pratique, on utilise généralement une équation simplifiée dans laquelle les termes d'écoulement latéral et de remontées capillaires ont été négligés :

$$\Delta S = P + I - ETR - D$$

Le ruissellement latéral, lorsqu'il existe, constitue évidemment un terme significatif. pour le bilan hydrologique, mais nous considérerons qu'il ne fait pas partie du contexte de notre exposé. S'il est possible de négliger les **remontées capillaires** dans le cas général, c'est moins vraisemblablement le cas en situation de forte sécheresse : DAUDET *et al.* (1978) et KATERJI *et al.* (1984) ont ainsi pu évaluer leur contribution (couches profondes en dessous de 170 cm) à environ 100 mm soit 30% des 340 mm prélevés par ETR pendant le cycle du blé d'hiver sur le site de la Minière (département des Yvelines). Une même valeur de 100 mm a été mesurée sur le même site en 1979 pour la luzerne, pour une ETR de 435 mm.

■ Le bilan hydrologique

Si nous focalisons maintenant notre attention sur la phase ultérieure du cycle de l'eau comme indiqué figure 2, nous retrouvons des grandeurs qui intéressent l'hydrologie, et en particulier **la quantité d'eau qui s'infiltre vers les nappes par drainage et ruisselle vers les cours d'eau par l'écoulement superficiel**. Il est intéressant de noter que cette vision conduit à la notion de "pluie efficace" pour les hydrologues (pluie moins évapotranspiration), qui est radicalement différente de celle de "pluie efficace" pour un agronome considérant le bilan hydrique (pluie parvenant au sol pour alimenter le réservoir, donc pluie moins interception par le feuillage et moins ruissellement). L'eau ainsi écoulee alimente les ressources en eau, dites renouvelables. Elle se répartit, en fonction de la perméabilité du sol, en trois flux secondaires : le ruissellement, qui alimente les rivières et les fleuves, le drainage par infiltration superficielle qui recharge les nappes aquifères, et le drainage souterrain profond qui fournit les nappes les plus profondes.

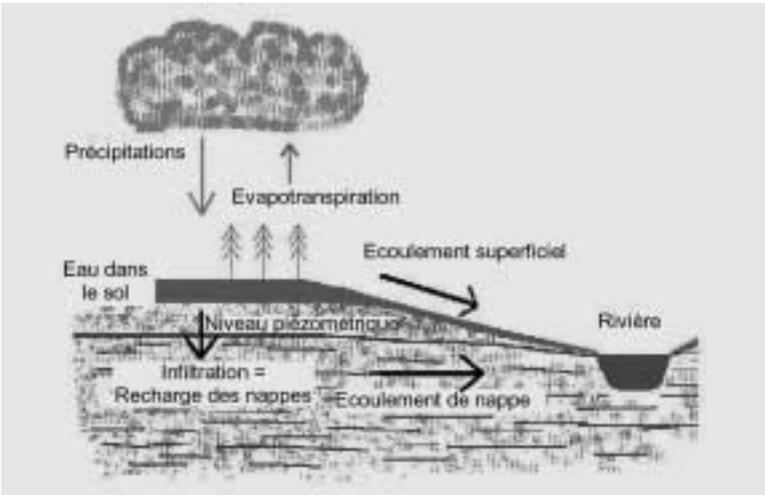


FIGURE 2 : **Schématisation du cycle de l'eau** (Bulletin hydrologique du RNDE, disponible sur le site du MEDD www.ecologie.gouv.fr, d'après www.oieau.fr et www.inra.fr/Intranet/Projets/emergence/eau/fiche-eau.htm).

FIGURE 2 : **Schematic representation of the water cycle** (Hydrological Bulletin of the RNDE, accessible on the site of the French Ministry of Environment : www.ecologie.gouv.fr, after www.oieau.fr and www.inra.fr/Intranet/Projets/emergence/eau/fiche-eau.htm).

Ces rappels mettent en évidence que **l'eau disponible pour l'agriculture provient à la fois du remplissage du réservoir superficiel du sol explorable par les racines et de la ressource complémentaire éventuellement disponible pour l'irrigation** (à titre d'exemple, le volume d'eau stocké dans les sols d'un bassin versant en Tunisie a pu être estimé à un million de m³, environ 7 fois la capacité de stockage du lac collinaire construit pour permettre l'irrigation des cultures (MEKKI, 2003)).

2. La ressource en eau et l'agriculture : quelles définitions de la sécheresse ?

■ Sécheresse agricole et sécheresse hydrologique

La sécheresse est définie avant tout comme **un déficit hydrique marqué**, dont l'origine se trouve essentiellement dans la faiblesse des précipitations sur une période prolongée par rapport à la moyenne des apports observés sur cette période. Ce manque de pluie a une incidence directe sur la végétation cultivée : on parle alors de sécheresse agricole ou édaphique (liée à la réserve en eau du sol). Il réduit l'alimentation des différents compartiments du bassin versant (surface, sol, sous-sol...) : on parle de sécheresse hydrologique pour un déficit d'écoulement dans les cours d'eau et de sécheresse phréatique pour un déficit dans les nappes. La gravité de ce manque de pluie est fonction à la fois de l'ampleur du déficit et de la longueur de la période de déficit. Les indicateurs peuvent être multiples, avec en premier lieu des déficits pluviométriques, mais également des débits faibles dans les cours d'eau, des niveaux bas des nappes phréatiques, des situations prolongées de stress hydrique de la végétation, ces différents indicateurs étant généralement liés.

Le déficit hydrique peut résulter en premier lieu de conditions physiques que l'on ne peut corriger : défaut structurel de stockage en eau du sol (profondeur, structure, texture, pierrosité...), défaut de pluviométrie en interculture ou en période de végétation associée à une forte demande évaporative (rayonnement et températures élevés). **La contrainte hydrique est souvent associée à des contraintes thermiques** (hautes températures).

L'incapacité de relayer suffisamment le défaut de ressource édaphique et pluviométrique par une irrigation, tant pour des raisons de disponibilité totale que de période d'apport, introduit la notion d'irrigation déficitaire (*deficit irrigation*) ; on parle plutôt d'**irrigation d'appoint** (*supplementary irrigation*) pour caractériser un programme d'irrigation mettant en jeu un nombre limité d'applications en vue de compléter les ressources sol + pluie (DEBAEKE, 2003). L'irrigation est qualifiée d'appoint si elle permet de stabiliser la quantité et la qualité produite, alors même qu'une production non irriguée resterait faisable et rentable (céréales à paille, sorgho...). On ne peut employer tout à fait ce terme pour l'irrigation du maïs grain dans la plupart des contextes pédoclimatiques où cette culture est irriguée ni pour certains systèmes à base de cultures fruitières et légumières, qui ne pourraient exister durablement sans irrigation.

Un deuxième trait concerne **le caractère aléatoire ou prévisible de la sécheresse**. Dans de nombreuses régions sèches, la période d'arrêt ou de reprise des pluies est cyclique (c'est le cas en région méditerranéenne), avec une certaine régularité en dépit d'une variation sur les quantités de pluie annuelles (la sécheresse est plus ou moins

marquée). Dans les régions de l'Ouest atlantique, la variabilité est à l'évidence plus forte et les possibilités d'anticipation plus réduites : on distingue *a posteriori* des années sèches ou pas, avec des fréquences de 1 à 2 années sèches sur 5. Dans certaines régions du globe (par ex. en Australie), il existe une prévision saisonnière du climat (consécutive à la manifestation d'un effet El Niño, dans ce cas) offrant des marges de manœuvre supplémentaires aux agriculteurs pour s'adapter au risque de sécheresse (MEINKE et STONE, 2005).

La variabilité interannuelle (quantité, distribution) qui caractérise souvent les situations soumises à la sécheresse conduit à une gamme de scénarios possibles bien que la sécheresse de fin de cycle survienne pratiquement partout où l'eau est limitée de façon chronique (surtout pour les cultures à cycle long). Elle peut également se manifester lors d'interdictions estivales d'irrigation. On doit donc **distinguer des sécheresses "structurelles"**, prévisibles (liées au sol, au climat, à l'accès à la ressource pour l'irrigation, aux systèmes de culture pratiqués), qui affectent une partie du territoire et plutôt les cultures de printemps et d'été, **et des sécheresses "exceptionnelles"** qui concernent toutes les cultures et la majorité du territoire national.

■ Brève analyse historique

La sécheresse peut donc concerner l'agriculture directement **par un déficit pluviométrique en cours de saison de végétation** (on parle de sécheresse agricole ou édaphique) **ou par une reconstitution déficiente des réserves hydrographiques** suite à un déficit pluviométrique d'automne ou d'hiver (**sécheresse hydrologique**). Le cumul ou plutôt l'enchaînement des deux types est d'ailleurs possible, comme en 1976 ou en 2005 pour ne citer que les années où la sécheresse a concerné une grande partie du territoire.

Il est possible d'avoir un premier aperçu de la fréquence de ces deux types depuis 1976 à partir du tableau 1, s'appuyant sur le descriptif des années 1976 à 1989 présenté par DORIZE (1990) et celui de BESLEAGA (1992) pour les années 1976 à 1992, ainsi que les tableaux synoptiques de TERRIBLE et SCHÉRER (1993) et l'analyse de SCHÉRER (1993) pour la même période. Nous avons complété ces sources pour les années ultérieures : les sécheresses de type agricole sont les plus fréquentes, et les sécheresses hydrologiques se poursuivent le plus souvent (sauf en 1992) au cours de la saison de végétation. On peut d'ailleurs rapprocher cette observation, tout en signalant son caractère anecdotique, de la remarque tout aussi anecdotique de CARLIER (1976) : il semble, notamment, qu'une légère corrélation existe entre, d'une part, un hiver et un printemps secs, et d'autre part, l'été suivant également sec.

TABLEAU 1 : Type et localisation des principales sécheresses depuis 1976 en France.

TABLE 1 : Type and location of the main drought periods observed in France since 1976.

Type de sécheresse	1976	1979	1985	1986	1989	1990	1991	1992	1996	2003	2004	2005
- hydrologique								X				
- agricole		Zone médit.	Centre et Sud	Centre et Sud		Ouest et Sud	Nord			2/3 du territoire		
- combinée	Nord				Ouest				Nord et Ouest		Sud	2/3 du territoire

Cette distinction entre sécheresse agronomique et hydrologique porte essentiellement sur la répartition temporelle du déficit pluviométrique au cours de l'année. C'est sans doute celle qui est la plus signifiante pour le domaine, mais il peut être utile de rappeler brièvement que le terme de sécheresse peut avoir différentes significations.

■ Différentes définitions de la sécheresse

Nous écarterons celle qui caractérise dans le langage commun **un climat** dans son cadre géographique (climat sec/climat humide), en considérant d'abord la moyenne ou la normale pluviométrique, puis en la relativisant par rapport à d'autres facteurs du climat. Il s'agit alors plutôt d'aridité, même si certains indices permettant des zonages géographiques (du type de DE MARTONNE, 1926, ou du coefficient pluviothermique d'EMBERGER, 1930) conduisent à estimer l'état de sécheresse d'un lieu.

La sécheresse est donc plutôt considérée ici comme **un événement**, forcément en premier lieu à base climatique et donc à situer dans le cadre de la variabilité climatique, mais **dont les impacts diffèrent suivant le secteur considéré**. La sécheresse climatique s'évalue directement à partir des données pluviométriques, par comparaison avec les normales ou les moyennes (en général trentenaires) sur la période de déficit considéré. A la limite, dans les pays arides, si la norme est celle d'une faible pluviométrie, la sécheresse n'est pas identifiée comme telle, car revenant tous les ans ou presque. C'est donc l'écart à la normale qui sert généralement à détecter les épisodes et à les suivre au cours de la saison, éventuellement à les comparer (comme entre 2005 et 1976, voir les cartes sur le site du MEDD : www.ecologie.gouv.fr/Situation-Hydrologique.html).

Comme nous l'avons vu, il est souhaitable de séparer ensuite sécheresse hydrologique et sécheresse agricole, en considérant la répartition temporelle automne-hiver/printemps-été. Pour cette deuxième période, en en restant aux seuls facteurs climatiques, **la sécheresse agricole peut être mieux caractérisée par le déficit P - ETP**, ETP étant l'évapotranspiration potentielle exprimant la demande climatique en eau. Une fois cette première caractérisation faite, il est nécessaire de prendre en compte la répartition temporelle (et éventuellement l'intensité pour les épisodes orageux) qui conditionne le stockage dans le réservoir sol. Il faut alors considérer les éléments de sortie du **calcul du bilan hydrique du type ETR/ETP** à l'échelle du territoire, ou les **indices de stress hydrique** lorsqu'on peut mettre en œuvre les modèles de culture. On peut alors parler de **sécheresse édaphique** dans le premier cas et de sécheresse écophysiological dans le deuxième cas. Celle-ci peut alors incorporer un dernier niveau, qui intègre les différents facteurs limitants qui peuvent être associés à une sécheresse, par exemple un stress azoté ou un accident physiologique : mais il s'agit là plus d'une évaluation des impacts que d'une définition.

■ La sécheresse est-elle plus fréquente maintenant ?

La question se pose évidemment à l'heure actuelle de savoir si la multiplication apparente des épisodes de sécheresse depuis 1976 peut être considérée comme significative dans l'optique du réchauffement avéré au niveau du territoire. Nous avons vu dans l'introduction que les tendances de la pluviométrie annuelle donnaient une indication encore peu marquée dans ce sens. Mais il s'agit là d'une appréciation de nature différente portant sur la caractérisation des événements extrêmes et non plus des seules valeurs annuelles. Si les travaux préliminaires effectués par Météo France dans le cadre du projet IMFREX (accessibles sur le site : <http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex>) montrent une tendance à une légère augmentation de la durée des épisodes sans pluie, c'est encore une indication insuffisante pour porter un jugement avéré. Compte tenu des différentes définitions que nous avons présentées plus haut, il serait nécessaire de disposer d'études rétrospectives sur de longues séries homogénéisées portant sur les différentes composantes du bilan hydrique. Des informations sont disponibles pour l'ouest de la France dans la synthèse de DUBREUIL (1997) qui met en évidence, pour les années postérieures à 1945, les épisodes de sécheresse de 1959, 1976, 1989 et 1990, ainsi que 1947 et 1949 à un degré moindre, mais qui ont concerné une grande partie de la région, alors que les épisodes de 1955, 1961, 1969 et 1985 étaient plus localisés spatialement. En l'absence d'un tel travail équivalent sur l'ensemble du territoire, il est seulement possible de noter, à partir des sources d'informations disponibles dans la bibliographie, que **des sécheresses ont été observées** avant 1976, et en se limitant au XX^e siècle, en 1906, 1911, 1921 (sécheresse très marquée et déjà qualifiée de "sécheresse du siècle" : 278 mm seulement sur l'année à Paris), puis de 1932 à 1934 (GESLIN et SERVY, 1935), 1938 (DEMOLON et GESLIN, 1938), de 1942 à 1948 (SANSON et PARDÉ, 1950), 1949 (GESLIN et HALLAIRE, 1949), 1953, 1957, 1962 et 1964 (AVILA, 2005, pour la région de l'Adour).

Si l'on s'en réfère au seul critère du nombre d'articles publiés, il est clair que l'année 1976 a été particulièrement marquante, tant sur le plan de l'analyse climatologique (BROCHET, 1977a et b ; NAMIAS, 1978) ou hydrologique (LECARPENTIER, 1977) que de ses conséquences sur la production agricole (INRA, 1977 ; BACULAT *et al.*, 1976 ; HALLAIRE, 1977 ; HENRION et PECQUET, 1977 ; DAUDET *et al.*, 1978, sur le bilan hydrique d'une culture de blé d'hiver à La Minière dans les Yvelines ; ROBIC *et al.*, 1982, pour les éleveurs d'un canton de la Nièvre ; BYÉ et PERNET, 1976, pour une réflexion sur la place de l'agriculture dans l'économie) et forestière (AUSSENAC, 1978 ; HARRANGER, 1978). Il est certain que les aspects climatiques (avec une sécheresse considérée comme de valeur centennale à l'époque et concernant une grande partie du territoire, en particulier le nord) et agronomiques (avec une persistance sur l'ensemble de la saison de croissance végétale) ont joué un rôle majeur pour conférer un caractère exceptionnel à cet épisode. Mais on peut penser qu'il a été amplifié par un aspect plus socio-économique, avec la redécouverte de l'impact possible des aléas climatiques sur une agriculture en pleine croissance et bénéficiant du développement technologique qui permettait de la croire à l'abri de telles surprises. En ce sens, on peut

noter que les sécheresses de l'automne 1978 (BELLOCQ, 1979) et de septembre 1985 (LARIVIÈRE, 1985) ont eu un écho beaucoup plus faible, lié à un impact beaucoup plus limité dans le temps et l'espace.

En revanche, les quatre années de 1988 à 1992 ont provoqué un net regain d'inquiétude sur ces impacts : voir LEROUX *et al.* (1992) sur les causes météorologiques, CHOISNEL et BARBINI (1992) pour le bilan hydrique, DORIZE (1990) pour l'analyse globale des impacts, TERRIBLE (1992 et 1993) pour les impacts sur l'agriculture et les consommations d'eau pour l'ensemble du territoire, CAVALIÉ et LONGUEVAL (1993), RENOUX (1993) et FORT (1993) sur le même sujet mais dans les cas particuliers respectifs de Midi-Pyrénées, de l'Auvergne et de Poitou-Charentes.

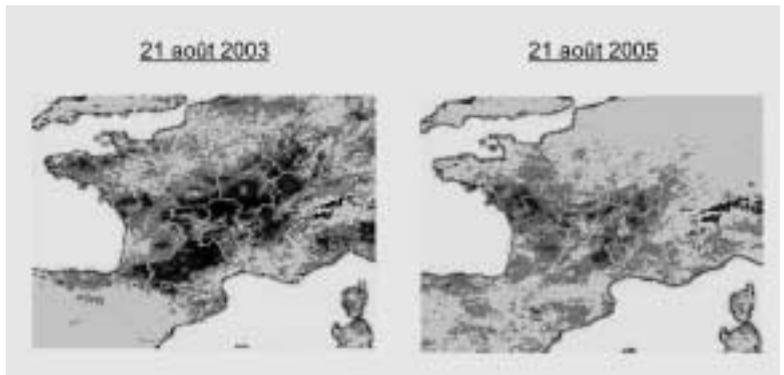
Par ailleurs, il peut être intéressant de constater que, dans le cadre d'une étude à l'échelle globale sur les risques de désastres naturels, effectuée par l'université de Columbia pour la Banque mondiale, **la France du sud apparaît nettement au niveau des risques de sécheresse** (définis par la fréquence d'au moins 3 mois consécutifs avec une pluviométrie inférieure à 50% de la valeur normale sur la période de 21 ans 1980-2000).

Pour compléter ce survol historique, il faut bien sûr évoquer les épisodes récents de 2003, 2004, 2005 et 2006, encore très présents dans nos mémoires. L'analyse a beaucoup évolué par rapport aux épisodes précédents : un meilleur suivi, en temps quasiment réel sur des sites web et grâce aux données satellitaires du capteur Végétation (figure 3), et les prévisions sur le rendement des cultures et prairies sur les sites du SCEES (<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/>) pour la France ou du CCR Ispra au niveau européen (<http://mars.jrc.it/stats/bulletin>).

Ces suivis sont complétés par **des analyses agroclimatiques en fin de cycle** pour certaines régions (BERTHOUMIEU, 2003 et 2005, pour des départements du Sud-Ouest ; RAMEL, 2003, pour PACA), et de nature plus agronomique avec les simulations à partir du modèle STICS d'un échantillon de cultures et sites sur l'ensemble du territoire (www.avignon.inra.fr/veille_agroclimatique). Les analyses climatologiques existent pour décrire la situation en termes de météorologie (BROCHET, 1977B ; NAMIAS, 1978, pour la sécheresse de

FIGURE 3 : Anomalies de l'indice de végétation pour les années 2003 et 2005 par rapport à la moyenne de 2002 et 2004 à partir du capteur VEGETATION (traitement O. Hagolle, CESBIO Toulouse et CNES/CTIS ; du gris clair au noir : niveaux croissants d'anomalie, et donc décroissants de l'indice de végétation).

FIGURE 3 : Deviations of the vegetation indices in the years 2003 and 2005 from the averages in 2002 and 2004, as calculated from the VEGETATION captor (treatment by O. Hagolle, CESBIO Toulouse and CNES/CTIS ; shades from light grey to black indicate increased deviations, and thus decreased levels of the vegetation index).



1976 ; BELLOCQ, 1979, pour celle de l'automne 1978 ; LEROUX *et al.*, 1992, pour les hivers secs de 1989 à 1992 ; TARDY et PROBST, 1992, pour une analyse à l'échelle globale sur 100 ans) et en rechercher les causes au niveau d'anomalies de l'état hydrique (PLANTON et SPAGNOLI, 2003), mais elles se sont surtout concentrées sur l'analyse du caractère exceptionnel de la canicule de 2003 (LUTERBACHER *et al.*, 2004 ; SCHÄR *et al.*, 2004 ; BENISTON, 2004 ; STOTT *et al.*, 2004 ; CHUINE *et al.*, 2004) ou l'évaluation des conséquences sur le bilan de CO₂ au niveau du continent européen (CIAIS *et al.*, 2005 ; BALDOCCHI, 2005). Au niveau de la synthèse ultérieure, c'est surtout un volumineux rapport du Sénat qui fait autorité (2004), complété par quelques articles sur le bilan agroclimatique (SEGUIN *et al.*, 2004) ou les conséquences économiques (ANNEQUIN, 2004). Par ailleurs, le débat semble s'être aussi déplacé vers les médias, avec l'orientation progressive de la discussion sur la place de l'irrigation (en particulier du maïs) au cours de l'été 2005.

Il n'est pas possible, à l'heure actuelle, de porter un jugement qualifié scientifiquement sur une aggravation de la fréquence d'occurrence "sécheresse" dans le passé récent (les 50 dernières années), pas plus que sur le lien entre les épisodes marqués récents (en particulier 2003 et 2005) avec le réchauffement climatique observé par ailleurs. Ceci étant dit, il faut noter objectivement une fréquence élevée d'épisodes de sécheresse significatifs depuis 1976, avec des caractéristiques temporelles et spatiales variées.

3. Le changement climatique et les ressources en eau

■ Les projections à partir des scénarios climatiques

Aussi bien la revue des scénarios prévus par les modélisateurs du climat que celle des observations récentes sur son évolution, attestée par ses impacts, conduisent à retenir avec un degré de confiance élevé la probabilité, **pour la fin du siècle** et pour la France, d'un réchauffement moyen se situant entre 2 et 3°, plus marqué en été, accompagné d'une augmentation de la pluviométrie en hiver et d'une réduction de la pluviométrie pouvant atteindre 30% en période estivale (IPCC, 2001 ; PERARNAUD *et al.* ; 2005 ; PLANTON ; 2005 ; SEGUIN et SOUSSANA, 2006). L'augmentation de la pluviométrie en hiver devrait plutôt tendre à une diminution de la sécheresse hydrologique et sa réduction en été, à une accentuation de la sécheresse agricole.

Cette tendance générale pour la fin du siècle ne peut donner qu'une indication partielle, dans la mesure où ne sont pas encore disponibles des données plus complètes sur la variabilité et les événements extrêmes. Les travaux récents sur ce point effectués dans le cadre du projet IMFREX soutenu par le programme GICC coordonné par le MEDD (site <http://medias.dsi.cnrs.fr/imfrex>) permettent bien d'avoir une information quantitative détaillée pour la

variable "température" et sur les épisodes de pluie intense, mais l'information relative à la sécheresse est limitée à l'indicateur "nombre de jours consécutifs sans pluie supérieure à 0,1 mm", qui est d'une portée applicative très limitée.

Lorsque l'horizon est centré **sur les 10 à 20 prochaines années**, il est important de noter que Météo France se refuse, à l'heure actuelle, à proposer des scénarios climatiques dits "de transition" (avant 2070) car les années entre 2000 et 2050 sont dominées par la variabilité interannuelle d'une seule simulation. **Il n'est donc pas possible de recourir à l'utilisation des scénarios climatiques**, ce qui conduit à considérer les épisodes récents (en particulier 2003, très proche en été des conditions prévues par les scénarios "fin de siècle", mais aussi 2005 avec une sécheresse hydrologique marquée) comme représentatifs des tendances globales liées au réchauffement. Sur un plan scientifique, cette démarche se justifie par son appartenance à la catégorie dite des "**scénarios analogues**" (CARTER, 2006). L'analogie temporelle, sur laquelle elle s'appuie, utilise l'information climatique passée comme analogue du futur climatique possible. Beaucoup utilisée en paléoclimatologie à partir de l'information obtenue sur des enregistrements géologiques, elle a été reprise récemment avec les enregistrements climatiques, généralement du siècle passé, par exemple pour situer les épisodes marqués de sécheresse en Amérique du Nord (SAUCHYN *et al.*, 2003). La principale limitation de cette démarche pour se projeter dans le futur (CARTER, 2006) est que les épisodes passés se situent dans un contexte qui n'était pas encore marqué par le renforcement anthropique de l'effet de serre. Mais elle ne paraît pas constituer un obstacle majeur, dans la mesure où l'horizon des vingt prochaines années ne sera marqué ni par un effet majeur de l'augmentation du CO₂ sur la production photo-synthétique, ni par l'augmentation moyenne de la température (de l'ordre de 1°, identique à celle constatée pendant les vingt dernières années), au moins pour le cadre de notre analyse.

■ Conséquences pour la sécheresse

Il paraît donc souhaitable, à l'heure actuelle, de **considérer l'hypothèse de sécheresses plus fréquentes et plus marquées à l'avenir, en particulier dans la partie sud de la France**. S'il est possible, à partir des scénarios climatiques disponibles d'identifier les grandes lignes des impacts du réchauffement climatique sur l'agriculture et la forêt en France (SEGUIN *et al.*, 2005), ceux-ci prennent surtout en compte une évolution moyenne du climat et ne peuvent pas encore intégrer correctement l'évolution des risques liés aux événements extrêmes tels que les sécheresses.

A l'échelon international, des études existent : celle récemment effectuée aux USA par THOMSON *et al.* (2005) montre des risques de réduction de la pluviométrie supérieurs à 50%, dans les régions semi-arides du Midwest et du sud-ouest, avec de plus un accroissement de la variabilité interannuelle ; l'étude effectuée par ROSENZWEIG *et al.* (2004) pour un grand nombre de régions agricoles mondiales en Argentine, Brésil, Chine, Hongrie, Roumanie et USA

conclut à un effet peu significatif pour le maintien de l'irrigation dans les superficies actuelles, mais en revanche à une impossibilité d'augmenter les superficies irriguées, sauf pour le cas du Brésil.

En revanche, **au niveau national**, si des travaux ont permis d'évaluer les conséquences du réchauffement climatique sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants du Rhône et de la Seine dans le cadre du programme GICC, il n'apparaît **pas encore d'évaluation précise sur les ressources en eau disponibles pour l'agriculture**. L'étude préliminaire de BOURAOUÏ *et al.* sur le site de La Côte-Saint-André dans l'Isère avait bien conclu en 1997 à une augmentation très forte de l'ETP, qui passerait en valeur annuelle de 850 à 1 260 mm alors que la pluviométrie augmenterait seulement de 1 050 à 1 100 mm dans un scénario de doublement du taux de CO₂, conduisant à un accroissement très important du déficit pluviométrique P-ETP, en particulier en période estivale. Mais, si la tendance apparaît bien conforme à ce qui est attendu, les valeurs obtenues pour l'ETP (évapotranspiration maximum définie par la demande climatique) apparaissent surestimées par la méthode de calcul employée et ces chiffres demanderaient à être revus à la baisse. De plus, au niveau des couverts végétaux, des travaux plus récents (SEGUIN *et al.*, 2005) ont établi que l'augmentation de la résistance stomatique résultant de l'accroissement du CO₂ atmosphérique (et conduisant à une amélioration de l'efficacité de l'eau) devrait avoir pour effet de contrebalancer l'augmentation de la composante purement climatique de l'ETP. Par ailleurs, la tendance à un raccourcissement généralisé du cycle (en l'absence de mesures d'adaptation) aurait également pour effet de diminuer la durée de la période de transpiration du couvert. C'est d'ailleurs ce qui a été constaté, en particulier en 2003 sous l'effet des fortes températures : l'ETM des cultures d'été (évapotranspiration maximum permise par les cultures) s'est située proche des valeurs normales, en grande partie à cause d'une augmentation notable (15%) du rayonnement solaire.

Au niveau de la **demande en eau pour l'irrigation**, si l'augmentation de température et surtout celle du rayonnement solaire liée à une couverture nuageuse plus faible conduisent à une demande climatique accentuée, le raccourcissement du cycle du végétal (et à plus long terme l'accroissement de la résistance stomatique avec l'élévation du CO₂ atmosphérique) introduisent des effets de compensation. C'est donc finalement plutôt la baisse prévue de la pluviométrie qui représenterait la composante majeure d'une tendance à l'accroissement de la sécheresse au niveau purement climatique.

Conclusion

Tout porte à croire maintenant que l'accentuation du déficit pluviométrique constaté ces dernières années sur une grande partie du territoire (en particulier dans l'ouest, mais aussi jusqu'au Bassin parisien) ne sera pas qu'un événement conjoncturel. L'accentuation de la sécheresse estivale, en particulier pour la partie sud de l'hexagone, s'accompagnera probablement d'une avance généralisée du calendrier agricole et d'un raccourcissement de la durée des cycles des cultures. La prise en compte du risque de sécheresse s'impose donc maintenant pour raisonner sur l'agriculture du futur, en particulier pour la production fourragère.

Intervention présentée au Journées de l'A.F.P.F.,
"Productions fourragères et adaptations à la sécheresse",
les 27-28 mars 2007.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agreste (2005) : *Graphagri, l'agriculture, la forêt et les industries agroalimentaires*, SCEES, 168 p.
- ANNEQUIN J.M. (2004) : "L'agriculture en 2003 en Europe et en France : les grands pays agricoles affectés par la sécheresse", *INSEE première*, 974, 1-4.
- AUSSENAC G. (1978) : "La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers", *Revue forestière française*, 2, 103-114.
- AVILA F. (2005) : "Mémoires du temps en Vic-Bilh (sud-ouest de la France) : paysans et aléas climatiques 1960-2005", *Actes du Congrès de l'AIC*, Gênes (Italie), 7-11 septembre 2005, 181-184.
- BACULAT B., PINGUET A., SAMIE C. (1976) : "Note préliminaire sur la sécheresse et ses conséquences agronomiques au cours de la campagne agricole 1975-1976", *CR de l'Académie d'agriculture*, Paris, 48, 879-884.
- BALDOCCHI D. (2005) : "The carbon cycle under stress", *Nature*, 437, 483-484.
- BELLOCQ A. (1979) : "La sécheresse de l'automne 1978 en France. Aspect pluviométrique", *La météorologie*, 16, 229-256.
- BENISTON M. (2004) : "The 2003 heat wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations", *Geophysical Research Letters*, 31, doi: 10.1029/2003GL018857.
- BERTHOUMIEU J.F. (2003) : "Canicule et sécheresse sévères 2003. Eléments climatologiques en Lot-et-Garonne (1) et en Tarn-et-Garonne (2)", *Notes de l'ACMG Agen*, septembre 2003, 10 p.
- BERTHOUMIEU J.F. (2005) : "Sécheresse sévère 2005. Eléments climatologiques en Lot-et-Garonne", *Notes de l'ACMG Agen*, août 2005, 8 p.
- BESLEAGA N. (1992) : *Les sécheresses en France*, document interne n°4, Météo France, 29 p.
- BOURAQUI F., VACHAUD G., CHEN T., LI L.X., LE TREUT H. (1997) : "Changements climatiques et évolution des ressources en eau souterraines : aspects spatio-temporels", *Actes du Colloque 'Les temps de l'environnement', Journées du PEVS*, Toulouse 5-7 novembre 1997, CNRS éd., 45-51.
- BROCHET P. (1977a) : "Aspects climatologiques de la sécheresse de 1976", *Bulletin technique d'Information*, 324-325, 599-614.
- BROCHET P. (1977b) : "Aspects climatologiques de la sécheresse de 1976", *La météorologie*, 7, 81-103.
- BYÉ P., PERNET F. (1976) : *La sécheresse de 1976. Réflexions sur la position de l'agriculture dans l'économie*, note interne, INRA-IREP, Grenoble, 129 p.

- CARLIER M. (1976) : "Commentaires sur la présentation de MM. Baculat, Pinguet et Samie", *CR de l'Académie d'agriculture, Paris*, 48, 884-885.
- CARTER T. (2006) : *General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*, rapport pour le groupe de travail TGICA de l'IPCC, juin 2006, 70 p.
- CAVALIÉ J., LONGUEVAL C. (1993) : "La sécheresse dans la région Midi-Pyrénées", *Chambres d'agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 28-31.
- CHOISNEL E., BARBINI F. (1992) : "Suivi de la sécheresse en France : le cas des années 1989-1990", *Communication à la 16^e Conf. régionale européenne de la CIID*, 21-27 juin 1992, Budapest (Hongrie), 9 p.
- CHUINE I., YIOU P., VIOUVY N., SEGUIN B., DAUX V., LE ROY LADURIE E. (2004) : "Back to the Middle Ages ? Grape harvest dates and temperature variations in France since 1370", *Nature*, 432, 289-290.
- CIAS P. *et al.* (33 auteurs) (2005) : "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003", *Nature*, 437, 529-533.
- DAUDET F.A., VALANCOGNE C., IAHO N., KATERJI N. (1978) : "Bilan hydrique d'une culture de blé d'hiver pendant la sécheresse exceptionnelle de 1976. Importance des remontées capillaires", *Bulletin du G.F.H.N.*, 2, 75-79.
- DEBAEKE P. (2003) : "Irrigation, supplemental", *Encyclopedia of water science*, B.A. Stewart et T. Howell eds., Marcel Dekker inc., New-York, 537-539.
- de MARTONNE E. (1926) : "Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité", *La météorologie*, oct. 1926, 449-459.
- DEMOLON A., GESLIN H. (1938) : "Le printemps de 1938 et l'approvisionnement en eau des récoltes", *CR de l'Académie d'agriculture, Paris*, 21, 702-709.
- DORIZE L. (1990) : "Economie et climat en France, de 1976 à 1989", *Sécheresse*, 1, 17-29.
- DUBREUIL V. (1997) : "La sécheresse dans la France de l'ouest : une contrainte climatique trop souvent oubliée", *Sécheresse*, 8, 47-55.
- EMBERGER L. (1930) : "La végétation de la région méditerranéenne ; essai d'une classification des groupements végétaux", *Revue générale de botanique*, 42, 705-721.
- FORT J.L. (1993) : "Evolution des exploitations agricoles et irrigation en Poitou-Charentes", *Chambres d'agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 34-36.
- GESLIN H., SERVY J. (1935) : "Note sur un indice caractérisant la sécheresse du point de vue agronomique", *CR de l'Académie des sciences, Paris*, 200, 416-418.
- GESLIN H., HALLAIRE M. (1949) : "Quelques observations sur la sécheresse en 1949", *CR de l'Académie d'agriculture, Paris*, 17, 684-689.
- HALLAIRE M. (1977) : "La sécheresse de 1976 et la production végétale", *Bulletin technique d'Information*, 324-325, 651-657.
- HARRANGER J. (1978) : "Les conséquences de la sécheresse de 1976 sur la végétation de nombreux arbres en 1977", *Phytoma*, avril 1978, 25-26.
- HENRION C., PECQUET B. (1977) : "Sécheresse du printemps et de l'été 1976 (Film des événements)", *Bulletin technique d'Information*, 324-325, 595-597.
- INRA (1977) : *La sécheresse de 1976*, note interne, 15 p.
- IPCC (2001) : *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge.
- KATERJI N., DAUDET F., VALANCOGNE C. (1984) : "Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. Détermination et importance", *Agronomie*, 4(8), 779-787.
- LARIVIÈRE G. (1985) : "La sécheresse en France en septembre 1985", *La météorologie*, 10, 54.
- LECARPENTIER C. (1977) : "Essai provisoire de caractérisation de la sécheresse de 1976 par l'établissement de bilans hydriques et leur confrontation avec les résultats d'études fréquentielles antérieures", *Bulletin technique d'Information*, 324-325, 615-626.

- LEROUX M., AUBERT S., COMBY J., MOLICA V., PASSERAT DE LA CHAPELLE P., REYNAUD J. (1992) : "Déficit pluviométrique hivernal sur la France : autopsie des agglutinations anticycloniques des hivers de 1988 à 1992", *Sécheresse*, 3, 103-113.
- LUTERBACHER J., DIETRICH D., XOPLAKI E., GROSJEAN M., WANNER H. (2004) : "European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500", *Science*, 303, 1499-1503.
- MEINKE H., STONE R. (2005) : "Seasonal and inter-annual climate forecasting. The new tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations", *Climatic change*, 70, 221-253.
- MEKKI I. (2003) : *Analyse et modélisation de la variabilité des flux hydriques à l'échelle d'un bassin versant cultivé alimentant un lac collinaire du domaine semi-aride méditerranéen (Oued Kamech, Cap-Bon, Tunisie)*, thèse de doctorat, Sciences de l'eau, Université Montpellier II, 177 p.
- NAMIAS J. (1978) : "Recent drought in California and Western Europe", *Reviews of geophysics and space physics*, 16(3), 435-458.
- PERARNAUD V., SEGUIN B., MALEZIEUX., DÉQUÉ M., LOUSTAU D. (2005) : "Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry adapt to 21st century climate change", *Climatic change*, 70, 319-340.
- PLANTON S. (2005) : "Changements climatiques futurs en France", *Impacts climatiques en France*, Greenpeace éd., 48-54 (rapport disponible sur le site www.impactsclimatiquesenfrance.fr).
- PLANTON S., SPAGNOLI B. (2003) : "Quand la simulation numérique reproduit et explique le réchauffement des nuits d'été", *La météorologie*, 42,4-5.
- RAMEL J.P. (2003) : *Canicule et sécheresse 2003 dans le département des Bouches-du-Rhône (1) et du Vaucluse (2)*, notes internes, CIRAME Carpentras, septembre 2003, 11 p.
- RENOUX J.L. (1993) : "Trois années de sécheresse consécutives en Auvergne", *Chambres d'agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 32-33.
- ROBIC M.C., PLET F., REY V., MATHIEU M. (1982) : "Accident climatique et fonctionnement de la société agricole. La sécheresse de 1976 chez les éleveurs de la Nièvre", *L'Espace géographique*, 2, 111-123.
- ROSENZWEIG C., STRZEPEK.K.M., MAJO D.C., IGLESIAS A., YATES D.N., MC CLUSKEY A., HILLEL D. (2004) : "Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies", *Global environmental change, part A*, 14, 345-360.
- SANSON J., PARDÉ M. (1950) : "La sécheresse des années 1942-1949 en France", *Revue de géographie alpine*, 369-403.
- SAUCHYN D.J., STROICH J., BERIAULT A. (2003) : "A paleoclimatic context for the drought of 1999-2001 in the northern Great Plains of North America", *The Geographical Journal*, 169, 158-167.
- SCHÄR C., VIDALE P.L., LÜTHL D., FREI C., HÄBERLI C., LINIGER M.A., APPENZELLER C. (2004) : "The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves", *Nature*, 427, 332-336.
- SCHERER J.C. (1993) : "Caractérisation des sécheresses depuis 1976", *Chambres d'agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 16.
- Sénat (2004) : *Annexe au procès-verbal de la séance du 3 février 2004*, no195, 399 p, disponible sur le site <http://www.senat.fr/rap/r03-195/r03-195.html>
- SEGUIN B., SOUSSANA J.F. (2006) : "Le réchauffement climatique (prédictions futures et observations récentes) en lien avec les émissions de GES", *Fourrages*, 186, 139-154.
- SEGUIN B., BACULAT B., BARET F., BRISSEON N., HUARD F., RUGET F. (2004) : "An overview of the consequences of the 2003 summer for agriculture in France", *8th Europ. Soc. of Agronomy congress*, Copenhagen (Danemark), 11-15 July 2004, Proc. édités par ESA, 335-336.
- SEGUIN B., BRISSEON N., LOUSTAU D., DUPOUEY J.L. (2005) : "Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt", *L'homme face au climat*, *Actes symp. du Collège de France* (Paris, 12-13 oct 2004), Odile Jacob, Paris, 177-203.

- STOTT P.A., STONE D.A., ALLEN M.R. (2004) : "Human contribution to the European heatwave of 2003", *Nature*, 432, 610-613.
- TARDY Y., PROBST J.L. (1992) : "Sécheresses, crises climatiques et oscillations télé-connectées du climat depuis cent ans", *Sécheresse*, 3, 25-36.
- TERRIBLE J.N. (1992) : "Quatre années de sécheresse", *Chambres d'agriculture*, 799, 1-4.
- TERRIBLE J.N. (1993) : "Approche de la sécheresse", *Chambres d'agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 3-6.
- TERRIBLE J.N., SCHERER J.C. (1993) : "Tableau synoptique des sécheresses", *Chambres d'agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 13-15.
- THOMSON A.M., BROWN R.A., ROSENBERG N.J., SRINIVASAR R., CESAR IZAURRALDE R. (2005) : "Climate change impact for the conterminous USA: an integrated assessment, part 4 water resources", *Climatic change*, 69, 67-88.

SUMMARY

Drought : characterization and occurrence, in relation to climate and hydrology

From 1976 onwards, regional droughts were observed frequently. It is essential that their main types should be differentiated and their effects on the plant populations and the farming systems be ascertained. Moreover, in a context of climatic change, the prospects made by the climatologists have to be known with precision. Thanks to the analysis of the water cycle it is possible to differentiate between the hydrological drought, which regards the feeding of underground waters by autumn and winter rainfall (conditioning the possibilities of irrigation), and the agronomical drought, which regards the water balance of the soil and depends rather on the rainfall during the growing season. The latter type of drought is often accompanied by higher temperatures, which affect the physiology of the plants and the changes in the water balance via the evapo-transpiration. Both types have to be considered in their relation to a norm. The analyses of previous drought periods is reviewed and the forecasts by the climatologists for the near future are presented ; they indicate that there will be more intense droughts, particularly in the southern half of France, and shorter durations of the crop cycles.