

1. Sécheresse et agriculture : état des lieux et enjeux

1.1. Sécheresses, sensibilité des productions agricoles au manque d'eau et impacts de l'agriculture sur les ressources en eau

1.1.1. Sécheresse, climat et hydrologie

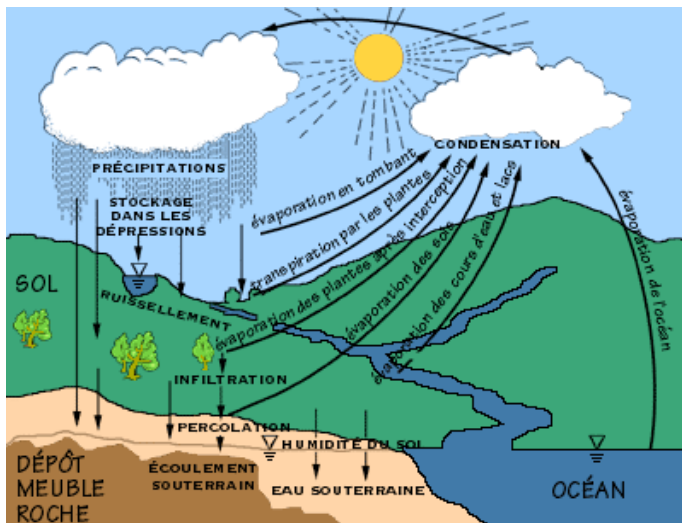
Bernard Seguin (INRA Avignon)

Historiquement, l'eau a toujours été un facteur essentiel pour le développement de l'agriculture, et elle est devenue un enjeu géopolitique majeur dans le contexte du XXI^e siècle. Cette question fait l'objet d'une documentation abondante, que nous laisserons de côté pour nous concentrer sur le territoire métropolitain. Même dans ce cadre géographique restreint, la compétition entre les différents usages de l'eau s'est faite progressivement plus sévère, et la légitimité de la demande de l'agriculture est plus souvent questionnée que par le passé. Il faut dire que les surfaces irriguées (qui représentent actuellement les $\frac{3}{4}$ des surfaces équipées pour l'irrigation) ont notablement progressé : 1,8 millions d'ha en 2003 (Agreste 2005) contre 1,6 en 2000 (Gleyses et Rieu, 2004), 1,1 en 1988 et 0,5 en 1970 (Terrible, 1993).

La répétition des épisodes de sécheresse, en particulier après 1976, est elle-même en grande partie à l'origine de l'extension des surfaces irriguées, l'irrigation apparaissant comme la seule parade pour régulariser et stabiliser la production. Il est symptomatique de noter maintenant que la sécheresse de 1976 avait, à l'époque, été identifiée comme "un événement qui ne se reproduira sans doute pas, du moins avec la même gravité, avant 100 ou 200 ans" (Hallaire, 1977), et que, du coup, l'irrigation devait être considérée "comme un atout supplémentaire, réservé à la limite, au passage de quelques caps difficiles". Si la première affirmation a été grandement démentie, la deuxième reprend son sens dans un contexte différent où la sécheresse ne peut plus être considérée comme un accident climatique exceptionnel (cet aspect sera discuté dans la partie du chapitre 1.3. portant sur le changement climatique).

1.1.1.1. Le cycle de l'eau

Avant d'aborder l'analyse des données d'entrée qui permettent de caractériser la sécheresse au niveau de la France métropolitaine, il apparaît nécessaire de rappeler les bases sur lesquelles s'appuie son évaluation.



L'eau de notre planète (environ 1 385 millions de km³) est répartie dans cinq réservoirs interconnectés : les océans, les glaces permanentes, les eaux douces terrestres et la vapeur d'eau atmosphérique.

Quant à l'eau contenue dans les cellules vivantes, elle correspond à moins de 0,0001% de l'ensemble.

Figure 1. Le cycle de l'eau (d'après le site www.oieau.fr)

Ces cinq réservoirs d'eau de la planète subissent des transferts incessants selon un cycle bien connu dont la phase initiale est l'évaporation des eaux de surface des océans et des continents. Chaque jour, plus de 1 000 milliards de tonnes d'eau passent dans l'atmosphère, qu'elles quitteront un peu plus tard

sous forme de précipitations. Une partie de l'eau retombée subit à nouveau les phénomènes d'évapotranspiration (évaporation à la surface des sols et des organes végétaux, et transpiration des plantes). Le reste est drainé vers les nappes ou ruisselle vers les cours d'eau, et finalement les océans.

Dans le cadre de ce cycle de l'eau, la production agricole est d'abord déterminée par l'eau sur laquelle les cultures sont susceptibles de s'alimenter (dans le réservoir superficiel constitué par le sol) par l'absorption racinaire pour élaborer de la biomasse végétale par le processus de la photosynthèse (comme cela sera détaillé dans la section 1.1.2). Elle va elle-même 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 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.

1.1.1.2. Le bilan hydrique et le bilan d'énergie de surface

1.1.1.2.1. Le bilan hydrique (d'après Itier et al., 1996)

Dans son principe, 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 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. L'ensemble des termes composant le bilan sont présentés figure 2.

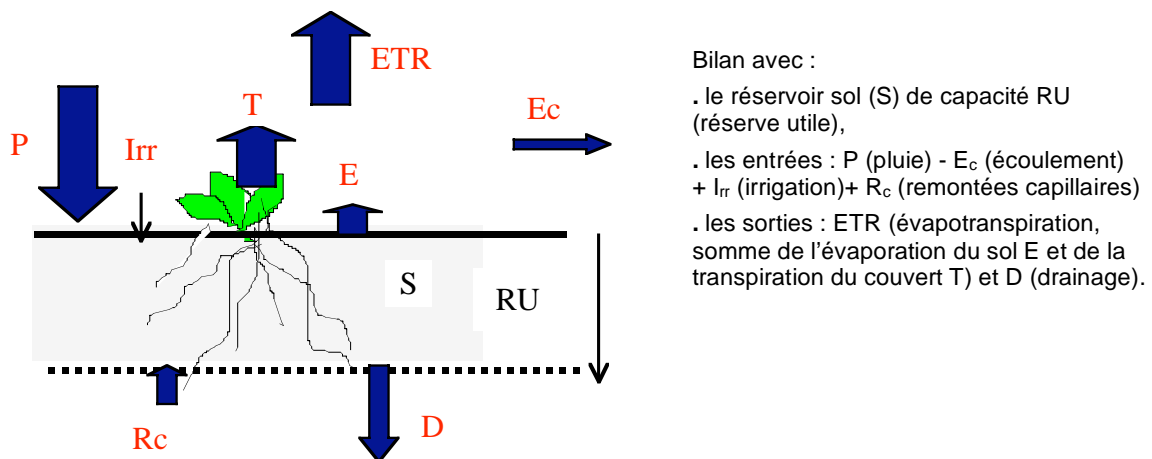


Figure 2. Schéma du bilan hydrique à l'échelle d'un couvert végétal

Au niveau de la partie supérieure du système, les apports sont essentiellement la pluie (P) et l'irrigation (I) diminuées (ou augmentées suivant les cas) du ruissellement Ec, 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 :

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

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 :

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

Pour l'écoulement latéral, il s'agit évidemment d'une approximation qui n'est justifiée qu'en terrain plat. Dans le cas contraire, le ruissellement constitue un terme significatif pour le bilan hydrologique, mais nous considérerons qu'il ne fait pas partie du contexte de notre travail. Pour les remontées capillaires, s'il est possible de les négliger dans le cas général, c'est moins vraisemblablement le cas en situation de forte sécheresse : en 1976, Daudet et al. (1978) ont ainsi pu évaluer leur contribution (couches profondes en dessous de 170 cm) à la moitié des 300 mm prélevés par le blé d'hiver sur le site de la Minière, dans les Yvelines.

L'ensemble des processus qui déterminent, pour un apport d'eau $P+I$ donné, les termes ΔS , ETR et D , est détaillé en Annexe 1.

1.1.1.2.2. Le bilan d'énergie, déterminant de l'évapotranspiration dans le bilan hydrique

Dans l'équation du bilan hydrique, le terme ETR est régulé par l'eau disponible dans le sol (qui représente en quelque sorte l'offre du système sol- plante-atmosphère). Mais, lorsque celle-ci n'est pas limitante, il est plafonné par un autre facteur climatique (qui conduit à une notion de valeur potentielle), à savoir l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau, puisque celle-ci correspond à un changement d'état mettant en jeu la chaleur latente de vaporisation L (de l'ordre de 600 calories pour un gramme d'eau). Cette limite maximale 'potentielle', qui représente la demande exercée par le climat, est fixée à chaque instant par un autre bilan : le bilan d'énergie de surface (voir figure 3).

Ce bilan d'énergie fait intervenir, en premier lieu, l'énergie radiative disponible pour une surface au sol, qui correspond au rayonnement net $R_n = (1 - \alpha) R_g - (R_a - R_s)$, tenant compte non seulement du rayonnement solaire absorbé $(1 - \alpha) R_g$ par une surface d'albedo recevant un rayonnement solaire global R_g , mais aussi des rayonnements de grande longueur d'onde reçus par la surface en provenance de l'atmosphère R_a et émis par la surface R_s . A chaque instant, cette énergie est convertie en flux de chaleur échangés par la surface avec l'atmosphère sous forme latente ($L \times ETR$) ou sensible par convection (H), ainsi qu'avec le sol sous-jacent par conduction (G).

Le bilan d'énergie instantané s'écrit donc (avec des flux en W/m^2) : $R_n = L \times ETR + H + G$.

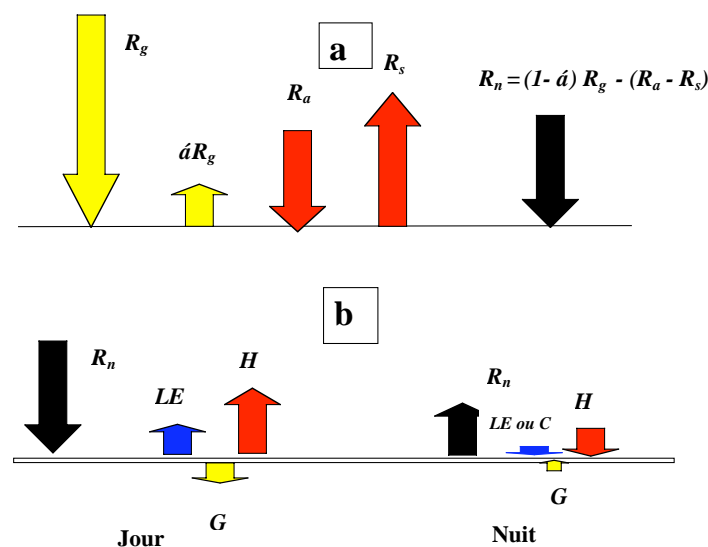


Figure 3. Représentation schématique des termes du bilan d'énergie de surface (a/ en haut : le bilan radiatif ; b/ en bas : le bilan d'énergie en conditions de jour à gauche et de nuit à droite)

1.1.1.3. Le bilan hydrologique

Si nous focalisons maintenant notre attention sur la phase ultérieure du cycle de l'eau comme indiqué (figure 4), cette vision privilégie le déterminisme, au final, des grandeurs qui intéressent l'hydrologie, à savoir la quantité d'eau qui s'infiltré vers les nappes par drainage et ruisselle vers les cours d'eau par l'écoulement superficiel.

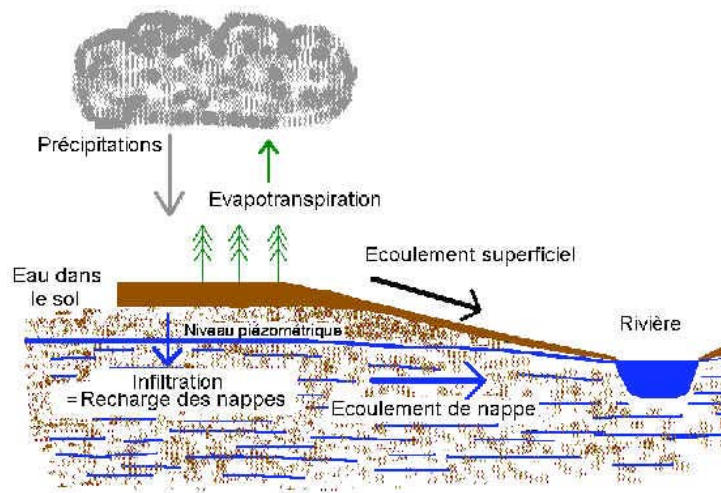


Figure 4. Schématisation du cycle de l'eau dans le bulletin hydrologique du RNDE, disponible sur le site du MEDD www.ecologie.gouv.fr (d'après www.oieau.fr et www.inra.fr/Intranet/Projets/emergence/eau/fiche-eau.htm)

Il est intéressant de noter que cette vision conduit à la notion de pluie efficace pour les hydrologues (pluie moins évapotranspiration, voir le glossaire), 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.

Le constant retour du cycle de l'eau laisse à penser que l'eau est une ressource renouvelable par excellence. Cependant à l'échelle humaine, cette notion peut être illusoire lorsque l'on sait que certains stocks sont constitués d'une eau qui se déplace lentement et sur de grandes distances. Si pour l'essentiel, les ressources sont renouvelables, dans certains cas, elles constituent des réservoirs non renouvelables à l'échelle humaine.

Parmi les réservoirs d'eau douce, il faut citer : les grands lacs et les glaciers très localisés et les nappes d'eau souterraine ou aquifères. A ce sujet, il faut distinguer deux sortes d'aquifères :

- les nappes libres : elles sont surmontées de terrains perméables dont l'air occupe les pores ou les fissures. Les niveaux d'eau souterraine qu'elles contiennent peuvent varier librement en fonction de leur débit. Elles sont à régénération naturelle et sont sous forme de flux. Ce sont les ressources renouvelables ;
- les nappes captives : elles sont recouvertes de terrains imperméables et l'eau s'y trouve captive "sous pression", ce sont des stocks qui ne se reconstituent pas à l'échelle du pas de temps humain, et c'est par rapport à leur lenteur de renouvellement que ces ressources sont dites non renouvelables.

	Équivalent en profondeur (m*)	Temps de séjour
Océans et mer	2500	environ 4000 ans
Lacs et réservoirs	0,25	environ 10 ans
Marais	0,007	1 à 10 ans
Canaux fluviaux	0,003	environ 2 semaines
Humidité du sol	0,13	2 semaines - 1 an
Eau souterraine	120	2 semaines - 10 000 ans
Calottes glaciaires et glaciers	60	10 à 1000 ans
Eau atmosphérique	0,025	environ 10 jours
Eau biosphérique	0,0101	environ 1 semaine

* Calculé comme si l'emmagasinement était uniformément réparti sur toute la surface de la terre.

Tableau 1. Estimation de la profondeur et du temps de séjour des réserves en eau de la planète

Qu'est ce qu'une nappe ? Les roches qui constituent le sous-sol présentent un ensemble de "vides" où l'eau s'accumule. Ces "vides" sont tout petits, de la taille du millimètre. Ce sont les espaces entre les grains de sable ou de gravier pour les roches faites de sédiments, ou les trous minuscules qui existent dans les roches de craie. Ce sont aussi des fissures très fines dans les roches granitiques provoquées par les mouvements de la croûte terrestre.

Source : "L'eau", Ghislain de Marsily. 1997, Dominos Flammarion

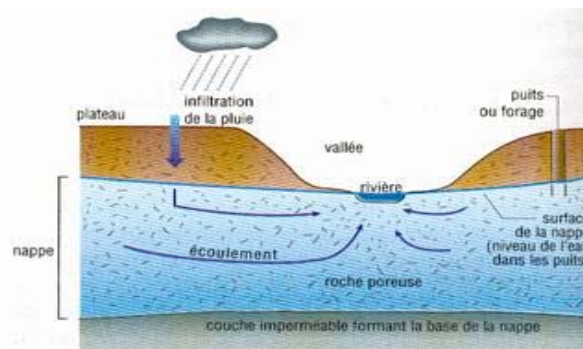


Figure 5.

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 (A 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).

1.1.1.4. La ressource en eau et l'agriculture : définitions de la sécheresse

1.1.1.4.1. 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 et 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 d'1 à 2 années sur 5. Dans certaines régions du globe (Australie, par exemple), une prévision saisonnière du climat (consécutive à la manifestation d'un effet El Niño) est possible, offrant des marges de manoeuvre supplémentaires aux agriculteurs pour s'adapter au risque sécheresse (Meinke et Stone, 2005).

La variabilité inter-annuelle (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 d'irrigation estivales. 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.

La sécheresse peut donc concerner l'agriculture directement par un déficit pluviométrique en cours de saison de végétation (en gros, printemps et été) ou par une reconstitution déficiente des réserves hydrographiques suite à un déficit pluviométrique d'automne ou d'hiver. On peut qualifier la première situation de sécheresse agricole ou édaphique et la deuxième de sécheresse hydrologique (le cumul ou plutôt l'enchaînement des deux est d'ailleurs possible, comme en 1976 ou en 2005 pour ne citer que les années qui ont concerné une grande partie du territoire).

1.1.1.4.2. Brève analyse historique

Il est possible d'avoir un premier aperçu de la fréquence de ces deux types depuis 1976 à partir du tableau 2, s'appuyant sur le descriptif des années 1976 à 1989 présenté par Dorize (1990) et celui de Beleaga (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.

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

Tableau 2. Catégories des principales sécheresses depuis 1976

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 de l'expertise, mais il peut être utile de rappeler brièvement que le terme de sécheresse peut avoir différentes significations.

1.1.1.4.3. 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 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 considérée. 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 carte sur le site du MEDD).

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 restant aux seuls facteurs climatiques, la sécheresse agricole peut être mieux caractérisée par le déficit P-ETP. 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 les effets du 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 second. 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.

1.1.1.4.4. 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 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 de ce type 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 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 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 : en se limitant au XXe siècle, en 1906, 1911, 1921 très marquée et déjà

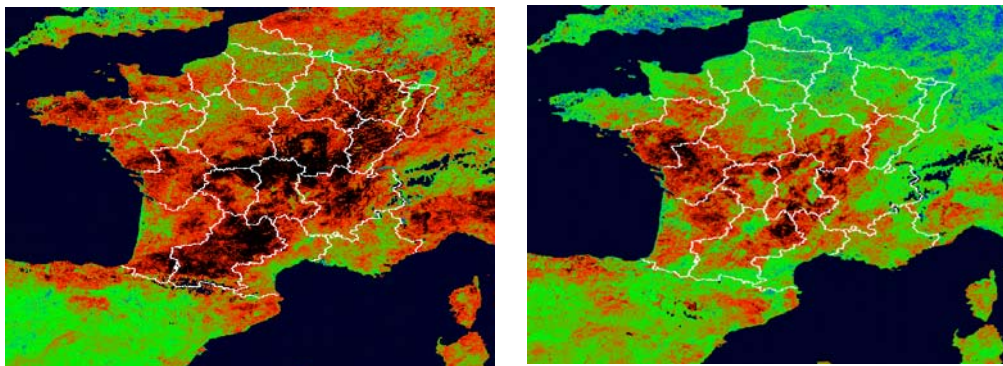
qualifiée de sécheresse du siècle (278 mm seulement sur l'année à Paris), puis de 1932 à 1934 (Geslin et Servy, 1935), 1938 (Demolon et Geslin, 1938), de 1942 à 1948 (Sanson et Pardé, 1950), 1949 (Geslin et Hallaire, 1949), 1953, 1957, 1962 et 1964 (Avila, 2005 pour la région de l'Adour).

Si l'on s'en réfère au seul critère du nombre d'articles publiés, il est clair que 1976 a été particulièrement marquant, tant sur le plan de l'analyse climatologique (Brochet, 1976 ; Broche, 1977 ; 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 ; Katerji et al, 1984 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 difficile, dans cette dominante nette d'analyses, de faire la part de ce qui revient au seul aspect climatique d'un côté (même si la sécheresse était considérée comme de valeur centennale à l'époque, et concernait une grande partie du territoire, en particulier le nord) ou agronomique (avec une persistance sur l'ensemble de la saison de croissance végétale), et à un aspect plus socio-économique (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.

Par contre, les 4 années de 1988 à 1992 ont provoqué un net regain d'inquiétude sur ces impacts (voir Leroux et al., 1992 sur la causes météorologiques ; Choissnel et Barbini, 1992 pour le bilan hydrique ; Dorize, 1990 pour l'analyse globale des impacts ; Terrible, 1992 et Terrible, 1993, ainsi qu'un article Anonyme, 1990 sur 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).

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 (voir la carte en Annexe 2.), 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 et 2005, encore très présents dans nos mémoires. L'analyse a beaucoup évolué par rapport aux épisodes précédents : plus de suivis en temps quasi-réel sur des sites web, 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>), données satellitaires du capteur Végétation (figure 6).



21 août

Figure 6. Anomalies de l'indice de végétation (à la date du 21 août) pour les années 2003 (à gauche) et 2005 (à droite) par rapport à la moyenne de 2002 et 2004, à partir du capteur VEGETATION (traitement O.Hagolle, CESBIO Toulouse et CNES/CTIS)

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 la région PACA), et de nature plus agronomique avec les simulations à partir du modèle STICS (www.avignon.inra.fr/veille_agroclimatique). Les analyses climatologiques existent pour décrire la situation en termes de météorologie (Brochet, 1977 ; Namias, 1978 pour la sécheresse de 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 cent 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 (2004) qui fait autorité, 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 du risque 'sécheresse' dans le passé récent (les dernières 50 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, avec des caractéristiques temporelles et spatiales variées, depuis 1976. On peut noter que cette tendance n'est pas, au minimum, en opposition avec les prédictions issues des modèles climatiques pour le siècle à venir (voir le chapitre 1.3). Il paraît donc souhaitable d'intégrer une probabilité élevée de retour de tels épisodes dans le futur proche, plutôt que de penser que ces épisodes sont de nature exceptionnelle et ne se reproduiront pas.

1.1.1.5. Effet de l'agriculture sur la ressource en eau et le climat en France

Les rappels précédents indiquent que l'agriculture influe sur le cycle de l'eau, en influençant les pertes par évaporation (quand le sol est nu) ou par évapotranspiration en présence de culture. Il en résulte un double effet, en lien direct avec les notions de base du bilan hydrique et du bilan d'énergie qui ont été présentées plus haut.

Le premier porte sur l'eau disponible pour la recharge des nappes par infiltration (que l'on peut dénommer drainage).

Nota : l'agriculture joue également, par le taux de couverture végétale et les états de surface, sur le ruissellement, mais cette composante a été écartée du champ de l'étude en se limitant aux conditions de bilan hydrique pendant la période de végétation active sur sol plat, qui représente l'essentiel de la situation sur le territoire.

Le second porte sur le climat, par le biais de l'influence sur l'évapotranspiration en tant que flux de chaleur latente dans le bilan d'énergie de surface

1.1.1.5.1. Effet sur la ressource en eau

Dans ce contexte, des évaluations quantitatives des données d'entrée sont fournies par Météo-France (www.meteo.fr) ou reprises sous une forme plus élaborée par le RNDE (bulletin hydrologique sur le site du MEDD, déjà indiqué plus haut). Elles concernent non seulement la pluviométrie, mais également l'état d'humidité des sols et les pluies efficaces suivant leur définition hydrologique, à partir du calcul couplé d'un bilan d'énergie et d'un bilan hydrique au niveau des mailles considérées. Plusieurs versions de ce modèle couplé ont été utilisées par Météo-France, depuis le modèle simple à un réservoir (Choisnel, 1977), étendu à la version avec deux réservoirs (Choisnel, 1985), jusqu'à la version plus complexe actuelle qui conjugue les modèles ISBA pour les échanges d'énergie de surface, MODCOU pour l'hydrologie et SAFRAN pour la spatialisation des données climatiques. Ces

modèles utilisent une valeur-standard de RU (ou éventuellement une cartographie des grandes classes de RU) et supposent l'occupation du sol par un couvert de gazon de référence. Ces données sont évidemment de grande utilité pour un dimensionnement général de la ressource en eau, mais insuffisantes pour évaluer l'influence effective de l'agriculture. D'abord parce que les grandeurs intermédiaires significatives telles que l'évapotranspiration et la lame d'eau drainée ne sont pas disponibles en routine. Ensuite parce que le modèle utilisé ne prend pas en compte explicitement la variation spatiale des caractéristiques de RU des sols, et par ailleurs l'occupation du sol par les cultures.

Des informations quantitatives sont cependant disponibles à partir d'une étude effectuée récemment pour le MAP par Météo-France et l'INRA (Ruguet et al., 2005). Le cadre général de cette étude est donné en Annexe 3., ainsi que les résultats portant sur les composantes du bilan hydrique (Ruguet et al., 2006). Nous ne présentons ci-dessous que les principales conclusions à en retenir, en précisant qu'il s'agit là de données calculées pour une couverture supposée de l'ensemble du territoire par une végétation de prairie naturelle. Par ailleurs, les simulations réalisées par Brisson et al. (2006) permettent d'évaluer les modulations de ces composantes par différents systèmes de culture pour des hypothèses variées d'occupation du sol, sur un échantillon de sites géographiques et de RU du sol, par différents systèmes de culture (mais sans la spatialisation complète faisant l'objet de l'étude pour le MAP).

Les moyennes inter-annuelles pour l'ensemble de la France sont présentées dans les cartes ci-dessous. **Pour les variables climatiques d'entrée, la valeur moyenne des précipitations est de l'ordre de 1000 mm/an (932 mm)**, avec une très forte variabilité entre mailles (de 248 à 3388 mm annuels), alors que la valeur moyenne de l'ETM est de 773 mm, avec des variations allant de 449 à 1419mm (les valeurs vont croissant du nord-ouest au sud-est, de la Manche à la Méditerranée. **Pour les valeurs calculées, il en résulte une valeur moyenne de l'ETR de 567 mm/an**, qui varie en total annuel par maille de 176 à 1038 mm. Les valeurs élevées sont observées dans le Sud-Ouest et, dans une moindre mesure, sur les massifs montagneux arrosés (Ouest du Massif Central, Sud du Jura, Nord des Alpes). Les valeurs faibles se trouvent dans le Sud-est, l'Est du Massif Central surtout et dans une grande zone s'étendant de l'embouchure de la Loire à la montagne de Reims.

Au niveau du drainage, la valeur moyenne est de 374 mm/an, avec des valeurs extrêmes annuelles qui s'étalent de 0 à 2836 mm. Les valeurs élevées sont observées dans les régions suivantes : Vosges, Jura, Nord des Alpes et Cévennes, puis dans une moindre mesure ouest du Massif Central et des Pyrénées. Pour les valeurs faibles, on trouve : bassin parisien, bassin de la Garonne, Alsace, vallées de la Loire et de l'Allier, basse vallée du Rhône.

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
pluie	1015.92	1078.02	901.34	853.72	883.8	878.43	1001.12	1132.49	926.17	1017.85	782.89	714.5
	286.33	278.73	282.46	317.76	251.34	238.02	262.63	274.55	268.1	267	204.4	191.24
ETP	701.73	745.86	764.54	727.81	797.32	768.94	763	773.59	771.68	780.07	897.08	787.15
	129.18	139.98	138.51	125.21	127.77	148.95	128.45	142.19	145.5	137.91	125.48	124.32
ETR	567.87	575.23	545.63	519.06	591.09	542.16	589.78	621.91	593.75	593.16	512.24	555.23
	77.26	69	74.14	84.51	79.59	66.43	65.59	76.42	68.92	70.54	60.13	62.28
drainage	461.03	507.37	370.09	341.39	299.87	340.98	421.3	510.6	355.63	417.38	283.23	180.59
	280.3	283.36	272.51	285.73	231.87	218.84	255.54	276.64	235.31	255.24	185.08	166.23

Tableau 2. Moyennes et écarts-types annuels des composantes du bilan hydrique sur la période 1993-2004

Les années sèches (essentiellement 1996, 2003 et 2004) s'identifient bien par les valeurs les plus faibles de pluviométrie annuelle (respectivement 853, 782 et 714 mm). Si les valeurs d'ETR (519, 512 et 555 mm) sont également les plus faibles, elles s'écartent assez peu de la valeur moyenne, et représentent un pourcentage par rapport à la pluie plus élevé que les années moyennes, suivant la répartition temporelle des épisodes pluvieux (61, 65 et 78%). Quant au drainage, il s'affaiblit en conséquence considérablement (341, 283 et 180 mm), mais les valeurs les plus basses sont observées plutôt l'année suivante (ainsi 300 mm en 1997 et 180mm en 2004, cette année cumulant la sécheresse intrinsèque et l'arrière-effet de 2003 pour aboutir à une valeur représentant seulement 25% de la pluie reçue).

Dans l'hypothèse d'une culture uniforme de prairie sur l'ensemble du territoire, il apparaît donc globalement, pour un apport pluviométrique d'environ 930 mm, une perte par évapotranspiration en moyenne de l'ordre de 560 mm (510 à 520 en année sèche) et une restitution aux nappes de l'ordre de 370 m (180 à 300 en année sèche). Ces valeurs représentent en moyenne respectivement 60% et 40% de la pluie reçue, ces pourcentages pouvant s'élever à presque 80% les années sèches dans le cas de l'évapotranspiration et, du coup, tomber à 30% pour le drainage (ou même 25% en 2004).

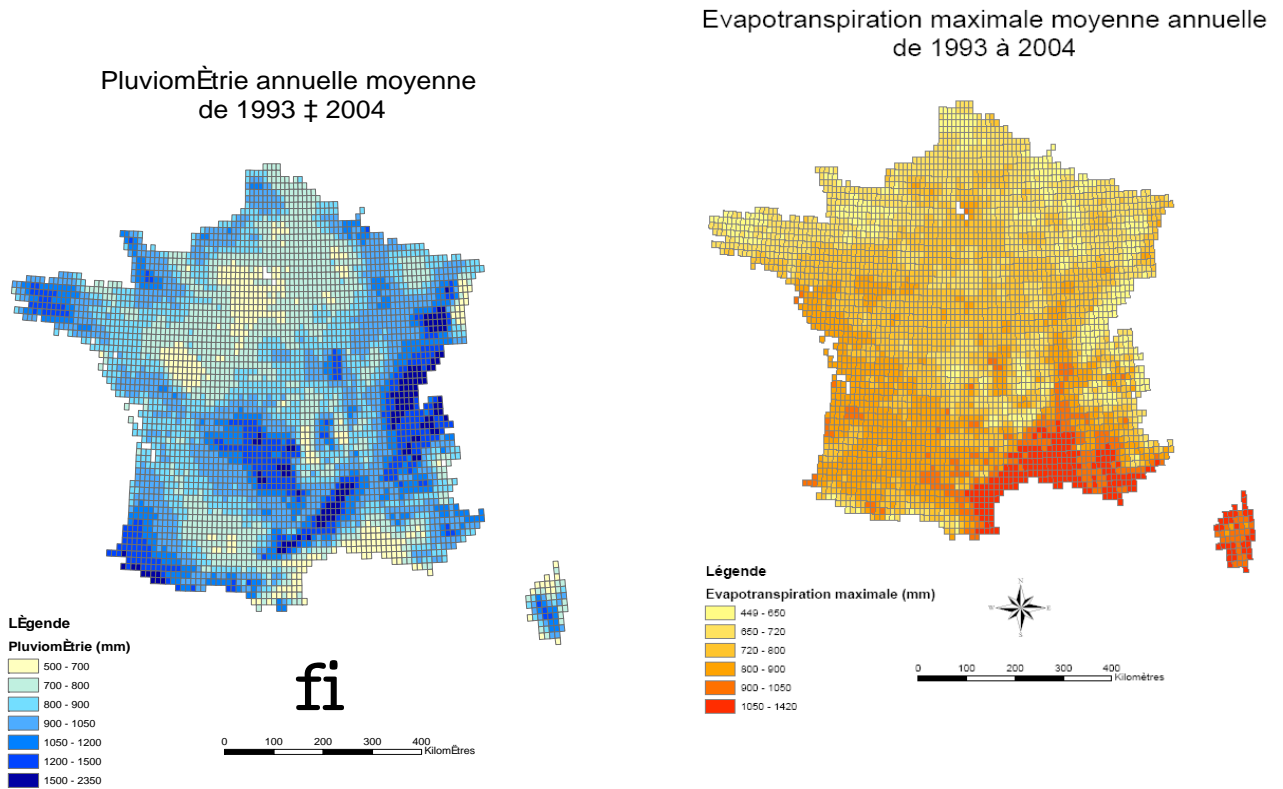
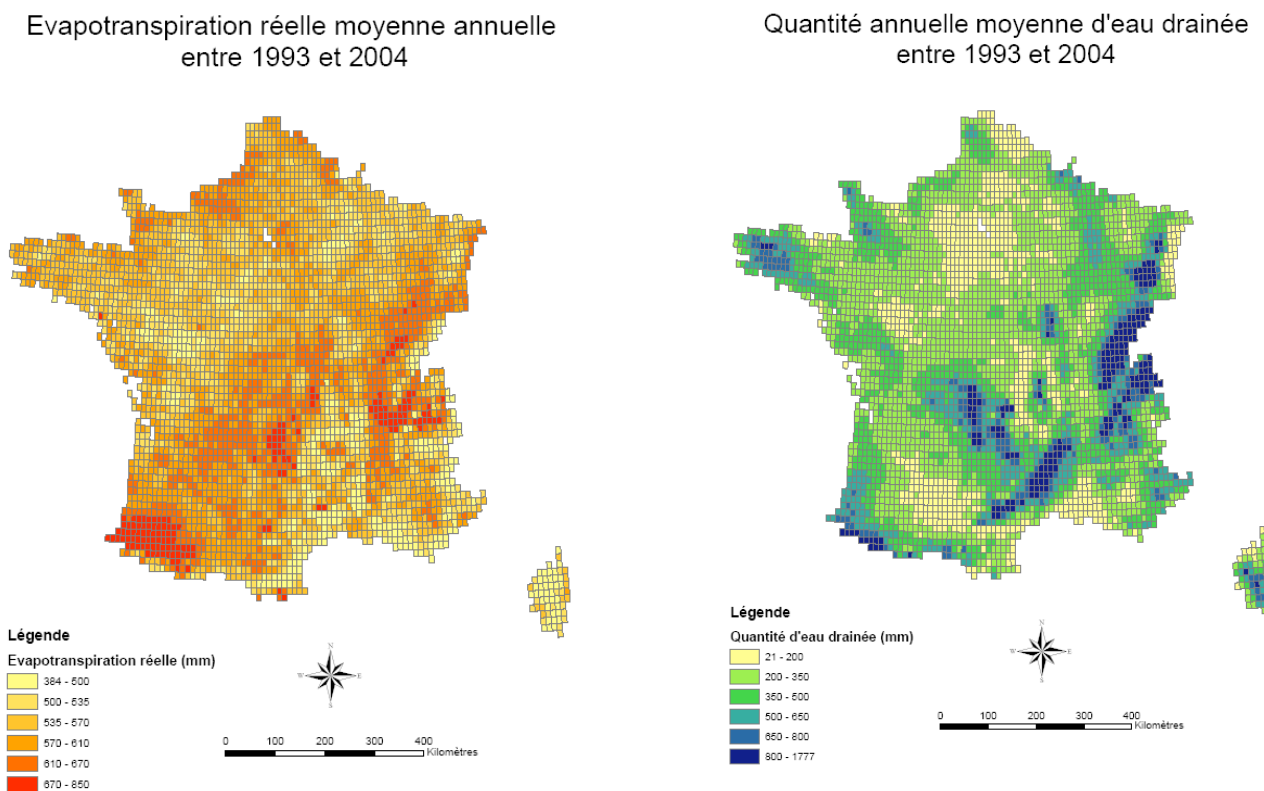


Figure 7.



1.1.1.5.2. Effet de l'alimentation en eau des couverts cultivés sur le climat

C'est ici qu'intervient le couplage entre le bilan hydrique et le bilan d'énergie, dont nous rappelons l'équation générale explicitée en 1.1.1.2 : $R_n = L \times ETR + H + G$.

Le flux par conduction G est généralement faible, sauf dans le cas de conditions très sèches et sur sol nu, et le bilan d'énergie conduit, en première approximation, à une répartition de l'énergie radiative R_n entre les échanges sous forme latente $L \times ETR$ et sensible H . Celle-ci dépend de la disponibilité de l'eau dans le sol, et c'est là qu'intervient le couplage avec le bilan hydrique (Choisnel, 1977). Lorsqu'elle n'est pas limitante, l'essentiel de l'énergie est convertie sous forme latente, l'ETR se situant au niveau de l'ETP (ou de l'ETM pour une culture donnée). Lorsqu'apparaît une restriction, l'ETR est plus réduite, et le terme H augmente en proportion.

Dans le premier cas (dans des conditions humides ou après irrigation), il y a peu ou pas d'énergie disponible pour échauffer la surface : la température de celle-ci est voisine de la température de la masse d'air. Dans le deuxième (conditions sèches), la surface n'est plus refroidie par l'évaporation : elle peut alors s'échauffer notablement par rapport à la température de l'air, de l'ordre de quelques °C pour un couvert végétal et jusqu'à 20-25°C pour un sol nu très sec (ce qui conduit à ce que ce soit la température de couvert, celle effectivement ressentie par les organes végétaux, qui soit à prendre en considération dans les modèles de culture, voir à ce sujet l'Annexe 1.).

A l'échelle d'une parcelle agricole, cet effet se traduit par un abaissement de la température de l'air à 2 m au-dessus de cette parcelle de l'ordre de 2 à 3°C, comme cela a pu être mesuré pour une culture de blé dans la Crau (Steinmetz et al., 1989).

Au niveau des interactions agriculture-climat, la surface interagit de même avec l'atmosphère en modulant les formes d'échange de chaleur, et par suite en influençant les conditions de température et d'humidité dans la couche-limite au voisinage de la surface. Il en résulte le lien étroit bien établi entre sécheresse et températures élevées, la sécheresse conduisant à une augmentation de température par suite de la diminution du flux de chaleur latente correspondant à l'évaporation (voir à ce sujet l'analyse des conséquences des sécheresses de 1986 à 1990 à partir des données satellitaires permettant la mesure de la température de surface tels que Meteosat (Seguin et al., 1991) ou NOAA (Courault et al., 1994). Ce lien entre sécheresse persistante et températures élevées a d'ailleurs été bien observé dans les épisodes de 1976 et 2003, en particulier, et il a été démontré par les modèles de climat pour ce dernier épisode (Planton et Spagnoli, 2003).

Les effets résultant de l'irrigation sur le climat ont fait l'objet d'études climatologiques qui cherchent à les évaluer sur les mesures météorologiques de réseau, dans des situations où l'irrigation est pratiquée à une échelle suffisamment large pour qu'on puisse penser qu'elles ont modifié le climat de la région. C'est le cas aux USA, avec la situation des Grandes plaines : Barnston et Schikedanz (1984) avaient conclu à une augmentation des pluies d'été, mais Moore et Rojstaczer (2001) n'ont pas détecté une telle tendance sur la période 1950-1997, à l'exception du Texas entre 1950 et 1982, ce qui les amène à envisager l'existence d'un seuil dans le développement de l'irrigation atteint avant 1950. Il ne paraît pas vraisemblable qu'un tel effet, encore discuté, soit significatif au niveau de la France. C'est donc essentiellement sur l'effet d'abaissement de la température que l'influence de l'irrigation peut jouer dans notre analyse. Dans ce contexte, les études de Barnston et Schikedanz (1984) ont conclu à un abaissement de la température maximale de l'ordre de 2°C pour les jours chauds et secs et de 1°C pour les jours couverts et humides au Texas, et celle de Changnon et al. (2003) à un abaissement de la température du point de rosée de l'ordre de 3°C dans le deuxième cas sur les données de Chicago. Des travaux utilisant des modèles climatiques à grande échelle (Boucher et al., 2004) évaluent l'abaissement de température de l'air à 0,8°C sur les grandes zones irriguées du globe.

Dans le contexte français, où le paysage est plutôt constitué de mosaïques de parcelles portant des cultures variées et dont seulement certaines sont irriguées, l'évaluation est plus délicate. L'apport des données satellitaires, en lien avec des modèles basés sur le bilan d'énergie en surface, a permis une première estimation dans le cas particulier de la Crau (Seguin et al., 1982) où une large surface de prairies bien irriguées (Crau humide, avec un pourcentage moyen de l'ordre de 50% sur 240 km²) présente un contraste très marqué en été avec une surface sèche également de larges dimensions (Crau

sèche, environ 180 km²). Ce cas d'école a permis d'établir que la différence de température de l'air de jour en été est de 1 à 4°C, avec une valeur moyenne de 2,5°C, résultant d'une différence de température de surface pouvant atteindre 20 à 25°C dans les cas extrêmes en situation estivale sèche et sans vent. Bien que cette situation soit particulière (grandes surfaces quasiment homogènes avec contraste maximal dans les conditions méditerranéennes d'été), cet ordre de grandeur, proche de ce qui est prédit pour la fin du siècle par suite du réchauffement climatique, traduit bien le rôle de régulateur thermique que joue un couvert transpirant en été. Plus largement, le contraste Crau sèche/Crau irriguée amène également à apprécier schématiquement l'effet global de l'irrigation sur le paysage en conditions sèches estivales.

Quel qu'en soit l'intérêt, cette situation reste cependant relativement exceptionnelle dans le paysage français, où la mosaïque de parcelles est la règle. Elle ne peut donner qu'un ordre de grandeur (3 à 4°C, rappelons-le) de la valeur maximale du refroidissement de l'air à l'échelle du paysage régional causé par la transpiration du couvert végétal. Des satellites tels qu'ASTER (données avec une résolution de 90 m, voir figure 8 pour un site dans le Sud-ouest proche de Toulouse), rendent maintenant accessibles les informations spatialisées nécessaires à cette échelle du paysage.

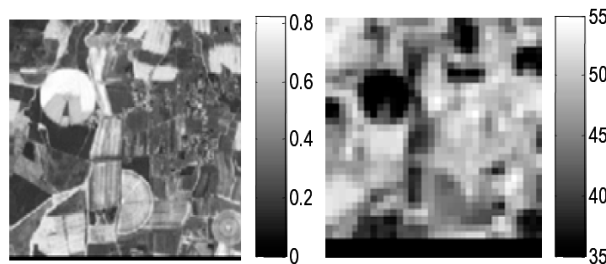


Figure 8. Cartographie en NDVI (à gauche) et Ts (à droite) sur le domaine de Lamothe (3 km x 3 km) avec les données du satellite ASTER le 10/08/2003 (d'après Courault et al., 2006)

L'évaluation des flux à partir de ces données (figure 9) permet de voir (partie droite de la figure), que pour une journée d'été (10/08/2003), la température de l'air au-dessus du maïs irrigué passe de 33°C pour une irrigation de l'ordre de 200 mm à 37°C pour une irrigation de 100 mm, alors qu'en comparaison, le soja se situe dans la gamme 35-36°C et le tournesol 36-38°C.

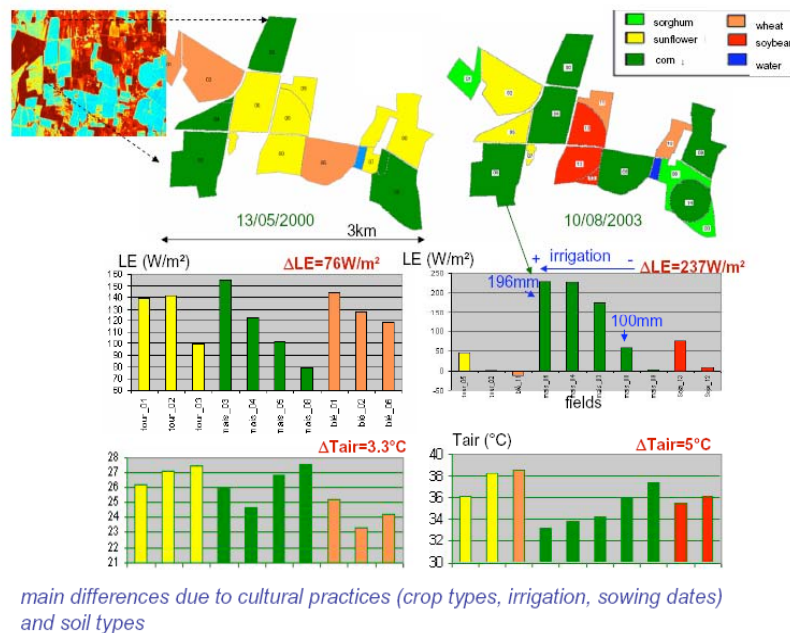


Figure 9. Evaluation, pour deux journées, des variations spatiales du flux de chaleur latente LE et de la température de l'air au-dessus de différentes cultures du domaine de Lamothe (d'après Courault et al., 2006)

La combinaison de ces données avec des modèles numériques de climat à méso-échelle tels que Meso-NH permet d'évaluer, sur le site des Alpilles (Figure 10), que l'irrigation du blé (qui ne représente que 18% de la surface) serait susceptible d'abaisser la température de l'air au-dessus de cette culture de 1,2°C, mais aussi au-dessus des autres cultures de 0,5°C, le tout se traduisant, au niveau de la petite région (30 km x 30 km) par un refroidissement moyen de 0,7°C (Courault et al., 2005).

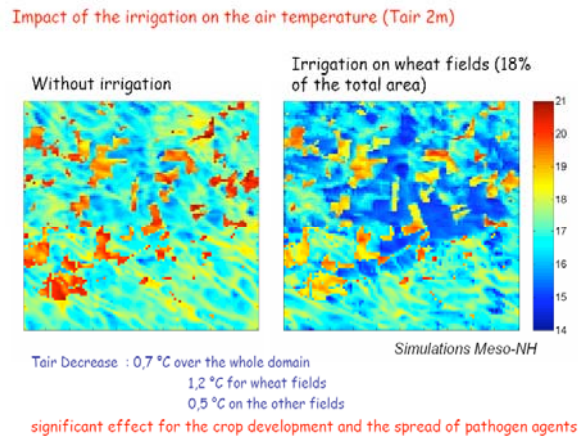


Figure 10. Evaluation de l'effet spatialisé sur la température de l'air (journée du 18 avril 1997) d'un scénario d'irrigation des parcelles de blé sur le site Alpilles, à partir de simulations utilisant le modèle Meso-NH (d'après Courault et al., 2005)

L'ensemble de ces travaux converge vers la mise en évidence d'un effet significatif de l'irrigation à l'échelle du couvert, de la parcelle, mais aussi de la petite région, susceptible de jouer sur une gamme de 1 à 3°C. Il est bien évident qu'il n'est pas question de prendre en considération ce seul argument de refroidissement pour opter pour l'irrigation, mais il apparaît nécessaire de le mentionner pour que l'éventail des effets induits soit complet.

1.1.1.6. La ressource en eau en France

L'eau est devenue une denrée rare et une ressource stratégique en de nombreux endroits du globe (Ramonet, 2002). La France est considérée comme un pays à la ressource en eau confortable (Encart 1) : le volume des ressources en eau souterraines potentiellement disponibles (abstraction faite des eaux trop profondes ou trop chargées en sels minéraux) est estimé par le BRGM (Pointet, 2000) à environ 2000 milliards de m³. Ce stock se renouvelle à raison de 100 milliards de m³ par an qui rejoignent les nappes, alors que 70 s'écoulent vers les rivières par suite du ruissellement superficiel. A noter que l'ensemble de ces deux termes (soit 170) correspond au drainage tel que nous l'avons évalué plus haut à partir du seul bilan hydrique sur terrain plat. Le reste (270) correspond au retour vers l'atmosphère par l'évapotranspiration.

L'ensemble des prélèvements est évalué à 42,5 km³ par Rieu (1999) pour les ressources renouvelables, dont 7 km³ dans les nappes, alors que De Villèle (1999) fait état respectivement de 23 et 7 km³. Pointet (2000) évalue, quant à lui, les prélèvements sur les nappes actuellement à 8 km³.

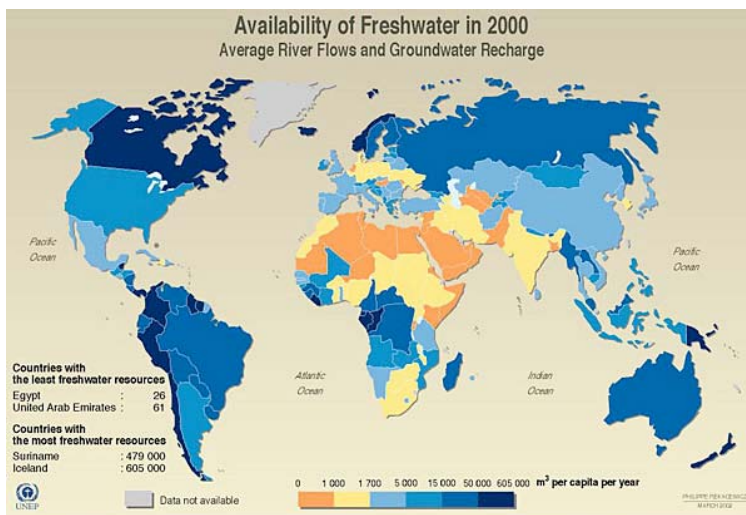
Bien que la France puisse donc être considérée comme un pays à la ressource en eau confortable, celle-ci est inégalement répartie sur le territoire. Comme l'ont montré les épisodes de sécheresse récents, elle n'est pas à l'abri de problèmes de gestion car les usages de l'eau sont de plus en plus nombreux, et souvent concurrents. On peut retenir les catégories suivantes d'après Coulomb (2003) :

- l'eau pour l'homme : besoins domestiques (alimentation en eau potable), des industries et des services ;
- l'eau pour l'alimentation : besoins agricoles (principalement, irrigation) ;
- l'eau pour la nature : besoin des écosystèmes (soutien d'étiage, salubrité des cours d'eau).

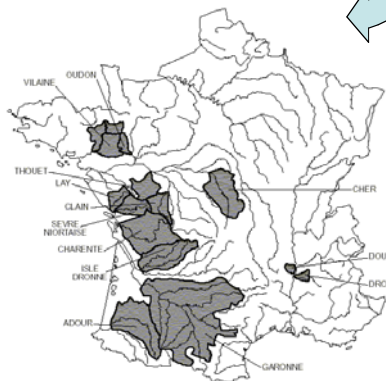
Encart 1: Les ressources en eau

La France est un pays à la ressource en eau confortable

mais diversement répartie en quantité



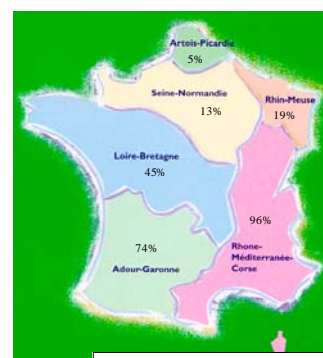
CARTE INDICATIVE DES ZONES DE REPARTITION DES EAUX



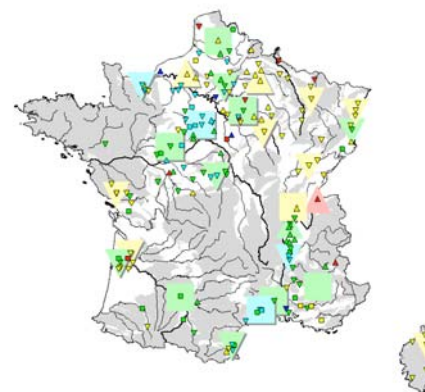
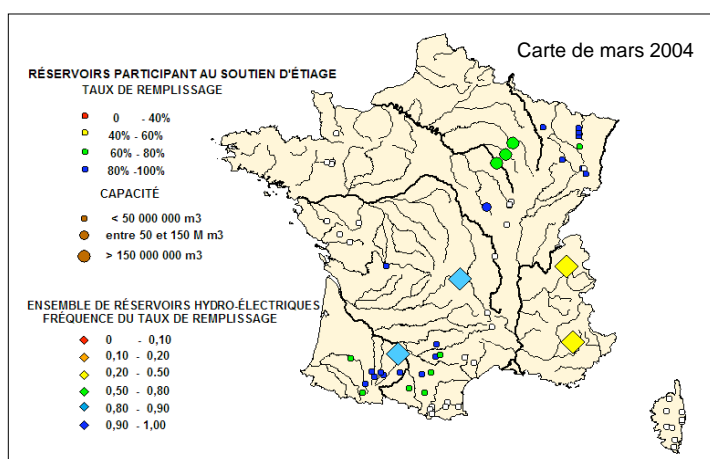
Carte des principales zones présentant de fréquentes situations de déséquilibre entre la demande et la ressource en eau.

et selon les types de ressource

Eaux souterraines (nappes) et superficielles (rivières, lacs) se répartissent de manière hétérogène sur le territoire français



Pourcentage de prélèvements agricoles d'origine superficielle par bassin hydrographique



Localisation des principales nappes (grands carrés et triangles). Les couleurs et les formes correspondent respectivement à l'état de remplissage en mars 2004 en rapport à la normale (bleu = très supérieur, rouge = très inférieur) et à l'évolution récente (en baisse, stable ou en hausse).

Le prélèvement pour l'agriculture est globalement de l'ordre de 4,9 km³ (toujours d'après Rieu, 1999), soit seulement 11,5%, valeur notablement plus faible qu'en Italie, Espagne, Portugal, etc. (Katerji et al., 2002). Cependant, si l'on considère la consommation nette, comme elle ne restitue au milieu

qu'une partie de l'eau prélevée, sa part de consommation (2,4 km³) s'élève à 30% (Terrible, 1993 ; Rieu, 1999). De plus, celle-ci atteint son maximum en été, et peut représenter 80 à 90% dans le sud de la France, qui plus est en période d'étiage (Hurand et Tardieu, 1998). Si les besoins en eau pour l'eau potable, la salubrité et le soutien d'étiage des rivières sont plus faibles, ils n'en sont pas moins prioritaires, et les années où la ressource en eau vient à manquer le gestionnaire doit arbitrer entre les différents usages. En cas de pénurie avérée, le décideur politique doit répartir les aides à sa disposition entre les différents usagers, en fonction des dommages subis. Il en résulte des conflits d'usage qui seront examinés de manière détaillée dans le chapitre 1.2.

La ressource en eau apparaît encore comme largement suffisante en valeur annuelle sur l'ensemble du territoire, mais elle est inégalement répartie sur l'ensemble du territoire. Globalement, l'agriculture n'en prélève qu'un faible pourcentage (de l'ordre de 12%). Par contre, du fait qu'elle restitue moins que les autres activités, cette valeur s'élève à 30% en consommation nette. De plus, sa demande se concentre en période estivale, et elle peut monter à 80-90% en période d'étiage, ce qui explique qu'elle soit de plus en plus l'objet de conflits d'usage avec les autres activités.

Rappel des points essentiels

L'analyse du cycle de l'eau sur les surfaces continentales peut conduire à deux visions du devenir de l'eau de pluie :

- celle de l'agronomie, régulée par le bilan hydrique du sol : l'eau arrive à la surface du sol sous le couvert, après l'interception éventuelle d'une faible partie en chemin le long de la plante. Elle alimente ainsi le réservoir superficiel exploré par le système racinaire des plantes. Celles-ci répondent à la demande en eau imposée par le climat (évapotranspiration potentielle ou de référence) en fonction de l'offre qu'elles peuvent puiser dans ce réservoir. Si celle-ci est suffisante, la transpiration s'effectue avec une régulation minimale par les stomates, ce qui correspond à l'évapotranspiration maximale, et la photosynthèse (et donc la production de biomasse) est également à son niveau maximal. Mais si, par contre, l'alimentation hydrique est défaillante, les stomates se ferment pour abaisser le niveau de l'évapotranspiration réelle, ce qui du même coup entraîne une réduction de la production photosynthétique ;

- celle de l'hydrologie, qui est au contraire centrée sur l'eau qui alimente les réservoirs où il est possible d'effectuer les prélèvements pour les divers usages. Cette eau provient du drainage en profondeur (ou percolation) de l'eau du réservoir superficiel vers les nappes sous-jacentes et du ruissellement de l'eau qui ne peut pas s'infiltrer.

La sécheresse, causée au départ par un manque d'eau résultant bien sûr d'une pluviométrie insuffisante, se traduit en agriculture par un réservoir superficiel insuffisamment rempli qui ne permet pas une alimentation hydrique optimale. Le niveau du stress qui en résulte est généralement raisonné par l'agriculteur, soit au niveau du choix des productions, soit des itinéraires techniques, pour être tolérable en situation normale. Dans le cas contraire, l'irrigation peut permettre d'apporter le complément d'eau nécessaire, à condition que l'équipement et les ressources le permettent.

La sécheresse est donc à considérer, non pas dans l'absolu de la valeur de la pluviométrie (qui conduit plutôt à la notion d'aridité), mais dans le rapport à ce qui est la norme de celle-ci. La caractérisation de ses effets sur les cultures (sécheresse de type agricole) doit donc faire intervenir la variabilité des facteurs climatiques en entrée du bilan hydrique (pluie, mais également ETP) sur une durée suffisamment longue pour tenir compte du stockage dans le réservoir-sol, dont les caractéristiques jouent également pour moduler l'intensité des effets. Si l'on doit avoir recours à l'irrigation, c'est le niveau des ressources en eau qui va conditionner les possibilités de pallier la sécheresse agricole. C'est alors essentiellement la pluviométrie des périodes d'automne au printemps qui doit être évaluée par rapport à la normale, car elle doit permettre la recharge des nappes et l'écoulement vers les réserves d'eau. Il s'agit alors de la sécheresse hydrologique.

La sensibilité à la sécheresse dépend fortement du degré d'adaptation, qui est généralement lié à la fréquence de l'événement (par définition, les événements extrêmes sont redoutables, car se produisant peu fréquemment). Historiquement, on peut noter une fréquence non nulle, mais finalement sans mesure particulière d'adaptation (sauf dans certaines régions régulièrement exposées, et de plus disposant de ressources en eau suffisantes comme la Provence) jusqu'à l'année 1976, qui a eu un impact considérable par son ampleur spatiale et sa durée, mais aussi parce qu'elle frappait sur une agriculture en pleine expansion technologique. Le développement de l'irrigation est apparu, d'abord dans le Sud-ouest, puis en remontant progressivement vers le Nord, comme le remède efficace pour protéger une agriculture hautement productive. La multiplication ultérieure des épisodes de sécheresse après 1976 (10 sur les 20 dernières années) justifie a posteriori ce développement de l'irrigation sur le seul critère de la production. Mais, à l'inverse, le volume de la ressource fortement affecté par ces épisodes à répétition, ainsi que la montée en puissance des autres usages de l'eau, remettent en cause le bien-fondé de l'irrigation, plus spécialement en période d'étiage estival.

Quelles que soient les mesures à préconiser pour atténuer la tension sur cet usage de l'eau pour l'irrigation, il est important de souligner que, si l'agriculture dépend de l'eau, à l'inverse, la ressource en eau dépend de l'agriculture. Environ 40% de la pluie reçue est restituée à la nappe sous un couvert de prairie qui couvrirait la France entière. Par ailleurs, une plante qui transpire refroidit sensiblement (2 à 3°C) l'air ambiant au dessus d'elle, et un couvert végétal bien alimenté en eau a le même effet au niveau d'un paysage ou d'une petite région. S'il est important de réviser les bases conduisant à adopter les pratiques d'irrigation, il faut se rappeler en même temps qu'un territoire sans eau, particulièrement en été, est à la fois physiquement plus difficile à supporter et esthétiquement moins apprécié qu'un paysage agricole vert et frais. Cet aspect est difficile à quantifier, et il ne sera pas repris plus loin. Il a donc paru nécessaire de le souligner ici, compte tenu du poids croissant du tourisme en milieu rural et de la valeur esthétique du paysage en général.

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
- Anonyme (1990). Les leçons de la sécheresse 89, *Sécheresse*, 1, 70-71
- 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, congrès de l'AIC, Gênes (Italie), 7-11/09/2005, 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, *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris*, 48, 879-884
- Baldocchi D. (2005). The carbon cycle under stress, *Nature*, 437, 483-484
- Barnston A.G., Schikedanz P.T. (1984). The effect of irrigation on warm season precipitation in the southern great plains, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 865-888
- 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, note de l'ACMG Agen, août 2005, 8 p
- Besleaga N. (1990). La sécheresse en France : 1976-1990, note Météo-France, 49 p
- Besleaga N. (1992). Les sécheresses en France, document interne no 4, Météo-France, 29 p
- Belloq 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

- Boucher O., Myhre G., Myhre A. (2004). Direct human influence of irrigation on atmospheric water vapour and climate, *Climate Dynamic*, 22, 597-603
- Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C., Debaeke P., Lemaire G., Itier B. (2006). "Evaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique", rapport d'étude pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 31 p.
- Brochet P. (1977). Aspects climatologiques de la sécheresse de 1976. *Bulletin technique d'Information*, 324-325, 599-614
- Brochet P. (1977). Aspects climatiques 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, *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris*, 48, 884-885
- Cavalié J., Longueval C. (1993). La sécheresse dans la région Midi-Pyrénées, *Chambres d'Agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 28-31
- Changnon D., Sandstrom M., Schaffer C.(2003). Relating changes in agricultural practices to increasing dew points in extreme Chicago heat waves, *Climate Research*, 24, 243-254
- Choisnel E. (1977). Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol, *La Météorologie*, 11, 103-159
- Choisnel E. (1985). Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. In : *Les besoins en eau des cultures*, INRA Paris, 115-132
- Choisnel E., Barbini F. (1992). Suivi de la sécheresse en France : le cas des années 1989-1990. 16^{ème} Conférence régionale européenne de la CIID, 21-27/06/1992, Budapest (Hongrie), 9p
- Chuine I., Yiou P., Viovy 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.
- Ciais P. et al. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003, *Nature*, 437,529-533
- Coulomb R. (2003). Introduction. In: *Le partage des usages de l'eau. Actes de la Conférence – Débat du 13 juin 2003 à l'Agence de l'Eau Adour-Garonne*. 88 p.
- Courault D., Clastre P., Guinot J.P., Seguin B. (1994). Analyse des sécheresses 1988 à 1990 en France à partir de l'analyse combinée de données satellitaires et d'un modèle agrométéorologique. *Agronomie*, 14, 41-56
- Courault D., Seguin B., Olioso A. (2006). Review about estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modelling approach. *Irrigation and Drainage Systems*, 19 (sous presse)
- Courault D., Jacob F., Benoit V., Weiss M., Marloie O., Hanocq J.F., Fillol E., Olioso A., Dedieu G., Gouaux P., Gay M., French A. (2006). Influence of agricultural practices on micrometeorological spatial variability at local and regional scales, *International Journal of Remote Sensing*, soumis
- 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. In : *Encyclopedia of water science*, B.A.Stewart & T.Howell (eds), Marcel Dekker inc., New-York, 537-539
- Demolon A., Geslin H. (1938). Le printemps de 1938 et l'approvisionnement en eau des récoltes. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris*, 21,702-709
- De Martonne E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité, *La Météorologie*, 10/1926, 449-459
- De Villèle O. (1999). L'irrigation. In : *Un point sur l'eau . I : milieu naturel et maîtrise*, INRA éditions, Paris, 159-169
- 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. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 200,416-418
- Geslin H., Hallaire M. (1949). Quelques observations sur la sécheresse en 1949. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture, Paris*,17,684-689
- Gleyses G., Rieu T. (2004). *L'irrigation en France. Etat des lieux 2000 et évolution*. CEMAGREF éditions, 60 p
- 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*, 04/1978, 25-26
- Henrion C., Pecquet B. (1977). Sécheresse du printemps et de l'été 1976 (Film des événements), *Bulletin Technique d'Information*, n° 324-325, 595-597
- Hurand P., Tardieu H. (1998). Gestion de la demande en eau dans un contexte de ressource limitée. In : *Traité d'irrigation*, 882-900
- Itier B., Brisson N., Doussan C., Tournebize R. (1996). Bilan hydrique en agrométéorologie. In : *Actes de l'Ecole-Chercheur INRA en Bioclimatologie - Tome II*. INRA, Paris, 383-397
- INRA (1977). La sécheresse de 1976, note interne, 15 p.
- 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
- Katerji N., Bruckler L., Debaeke P. (2002). L'eau, l'agriculture et l'environnement. Analyse introductive à une réflexion sur la contribution de la recherche agronomique, *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 46, 39-50
- 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., Mollica 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.
- Moore N., Rojstaczer S. (2001). Irrigation-induced rainfall and the great plains, *Journal of Applied Meteorology*, 40, 1297-1309
- Namias J. (1978). Recent drought in California and Western Europe, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 16(3), 435-458
- Planton S., Spagnoli B. (2003). Quand la simulation numérique reproduit et explique le réchauffement des nuits d'été, *La Météorologie*, 42,4-5
- Pointet T. (2000). Qu'est-ce qu'une nappe aquifère? *Science et Vie, hors série 'Menaces sur l'eau'*, no 211,20-25
- 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, 11p
- Ramonet I., 2002. Une ressource stratégique. In : *La ruée vers l'eau. Le Monde diplomatique, Manière de voir*, 65, 6-7.
- Renoux J.L. (1993). Trois années de sécheresse consécutives en Auvergne, *Chambres d'Agriculture*, supplément 807, janvier 1993, 32-33
- Rieu M. (1999). L'eau agricole en France : état des lieux et perspectives, *Bulletin du CGGREF*, 53, 63-84
- 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
- Ruget F., Le Bas C., Souverain F., Cloppet E., Morvan X., Arrouays D., Guérif M. (2005). Indice de productivité :IPP. Produit-pilote. Note interne, INRA CSE Avignon, 20p.
- Ruget F., Cloppet E., Guérif M., Le Bas C., Morvan X., Souverain F. (2006). Les composantes du bilan hydrique sur la France, en sortie des simulations effectuées pour l'étude sur les indices de productivité de prairie (IPP) réalisée conjointement par l'INRA et Météo-France pour le compte du MAP. Note interne, INRA CSE Avignon, 9 p.
- Sanson J., Pardé M. (1950). La sécheresse des années 1942-1949 en France. *Revue de Géographie Alpine*, 369-403
- Schär C., Vidale P.L., Lüthli 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). n°195, annexe au procès-verbal de la séance du 3 février 2004, 399p, disponible sur le site <http://www.senat.fr/rap/r03-195/r03-195.html>

- Seguin B., Baelz S., Monget J.M., Petit V. (1982). Utilisation de la thermographie IR pour l'estimation de l'évaporation régionale. 1. Mise au point méthodologique sur le site de la Crau, *Agronomie*, 2, 7-16
- Seguin B., Lagouarde J.P., Savane M. (1991). The assessment of regional crop water conditions from meteorological satellite thermal infrared data, *Remote Sensing of the Environment*, 35, 141-148
- Seguin B., Baculat B., Baret F., Brisson N., Huard F., Ruget F. (2004). An overview of the consequences of the 2003 summer for agriculture in France. 8th European Society of Agronomy congress. Copenhagen (Denemark), 11-15 July 2004. Proc. ed. by ESA, 335-336
- Steinmetz S., Lagouarde J.P., Delecolle R., Guerif M., Seguin B. (1989). Evapotranspiration and water stress using thermal infrared measurements. A general review and a case study on winter durum wheat in southern France. Symposium on Physiology-breeding of winter cereals for stressed mediterranean environments, ICARDA-INRA, 3-6 juillet 1989, Montpellier. C.R. ed par l'INRA, 89-114
- 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
- Trouvat J.L. (1997). Concepts de base de la gestion quantitative de la ressource en eau. In: Lacroix F. (Ed). *Irrigation, outil de qualité et de régularité de la production agricole pour les marchés et les industries d'aval. La gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant: l'exemple du Sud-Ouest*, [AFEID-AGPM], 15-10-1997. Antony, AFEID, 121-136

Annexe 1. Le bilan hydrique : estimation des termes

(d'après Itier et al., 1996)

1. La réserve en eau du sol

Dans l'analogie réservoir du sol, on est amené à considérer la taille maximale de ce réservoir (figure 1). Si cette taille est définie par rapport aux possibilités de prélèvement d'eau par les plantes, deux valeurs d'humidité, caractéristiques du sol, sont nécessaires : la capacité au champ et le point de flétrissement permanent.

- **La capacité au champ** (θ_{cc}) représente la valeur de l'humidité au-dessous de laquelle les forces de capillarité deviennent prépondérantes. L'eau est alors retenue dans le sol par capillarité et ne s'écoule plus par gravité. Lorsque le sol atteint la capacité au champ, il contient la plus grande quantité d'eau possible avant que celle-ci ne s'écoule rapidement en profondeur. De façon pratique, on considère en général que θ_{cc} correspond à un potentiel hydrique de -0,33 bar.
- **Le point de flétrissement permanent** (θ_{fp}) représente la valeur d'humidité du sol à partir de laquelle les forces de capillarité et d'adsorption qui lient l'eau au sol sont telles que les plantes ne peuvent l'extraire pour leurs besoins de transpiration et de croissance. La plante se flétrit alors. On admet en général que θ_{fp} correspond à un potentiel hydrique de -16 bars, mais cette valeur dépend en fait du type de plante et des transferts sol-plante.

On peut ainsi définir la **réserve utile du sol** (RU) qui est la quantité d'eau potentielle totale dans le sol à laquelle la plante peut accéder (Z_r est ici la profondeur d'enracinement) :

$$RU = (\theta_{cc} - \theta_{fp}) \cdot Z_r$$

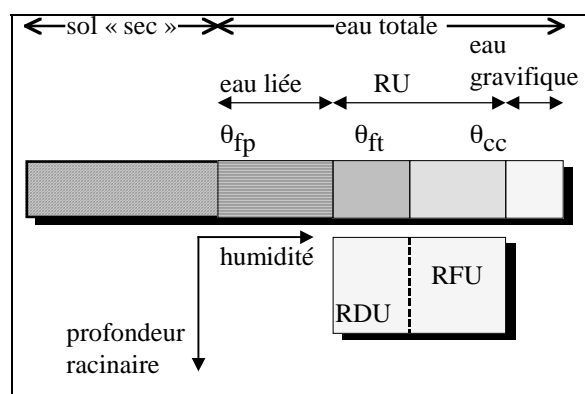


Figure 1. Valeurs de l'humidité définissant la réserve utile (RU) ainsi que la réserve facilement utilisable (RFU) et difficilement utilisable (RDU).

L'eau gravifique est l'eau pouvant circuler sous l'action de la gravité.

On s'est rendu compte, au travers d'enquêtes, que les agriculteurs avaient souvent une idée très vague des profondeurs d'enracinement de leurs cultures, ce terme jouant un rôle important dans la définition de la RU. Pour faciliter l'estimation de cette profondeur, on peut trouver dans la littérature des valeurs représentatives telles que celles présentées figure 2.

On décompose habituellement cette réserve utile en une somme d'une réserve facilement utilisable (RFU) et une réserve difficilement utilisable (RDU) par la plante (cf. figure 1), la valeur de l'humidité séparant ces deux domaines étant le point de flétrissement temporaire (la détermination de cette valeur sera abordée plus loin à propos de l'ETR).

La réserve utile dépend de la texture et de la structure du sol, les sols limoneux présentant en général la plus grande réserve utile (tableau 1 et figure 3.a). On peut affiner cette définition de réserve utile en discrétisant le volume de sol prospecté par les racines et en tenant compte du fait que la densité racinaire diminue avec la profondeur (figure 3.b).

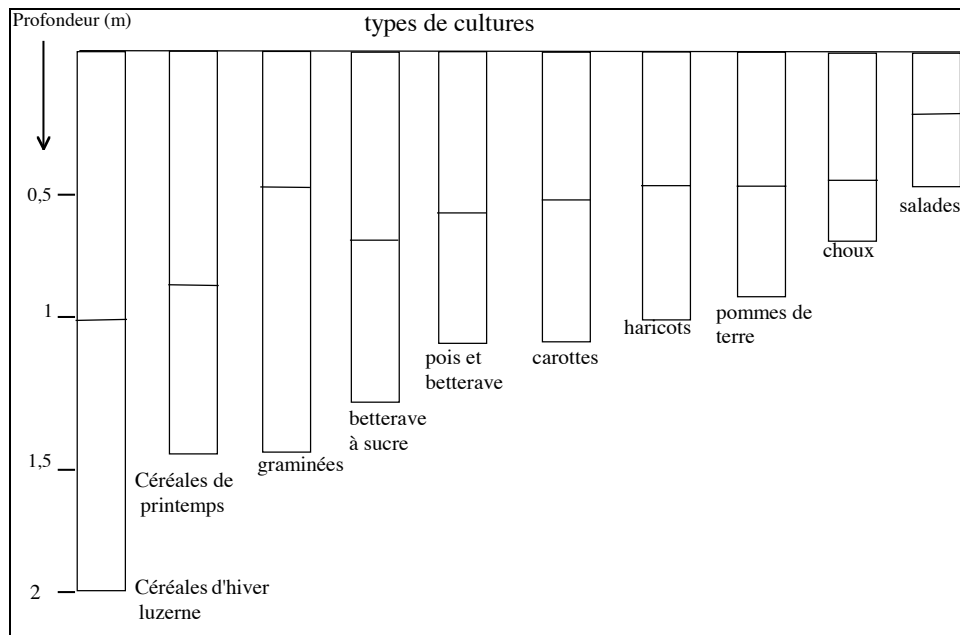


Figure 2. Profondeurs typiques d'enracinement de quelques cultures. Les profondeurs minimum et maximum sont indiquées (d'après B.S.I., 1989)

Tableau 1. Réserve utile "moyenne" de divers types de sols (d'après B.S.I., 1989)

Type de sol	Réserve Utile par unité de profondeur (mm/cm)
Sableux	0.8
Sablo limoneux	1.2
Limono sableux	1.7
Limono argilo sableux	1.7
Argilo sableux	1.7
Limono argileux	1.8
Limon fin argileux	1.8
argileux	1.8
argilo limoneux	1.8
limon fin sableux	1.9
Limon fin	2.2
tourbeux	3.2

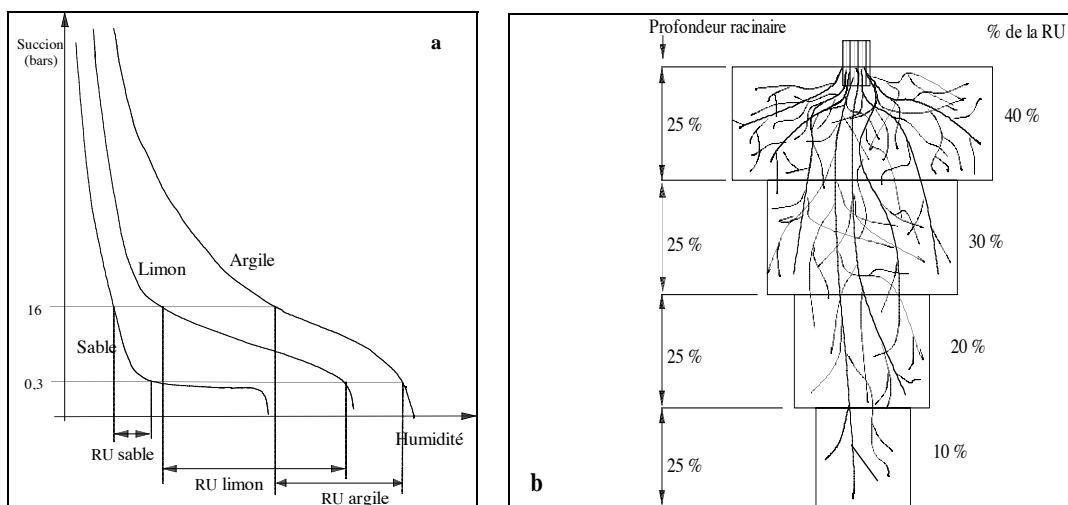


Figure 3. - a) évolution des valeurs caractéristiques d'humidité (capacité au champ et point de flétrissement permanent) en fonction du type de sol. - b) discrétisation de la Réserve Utile en fonction de la profondeur en tenant compte de la décroissance de la densité racinaire avec la profondeur.

2. L'évapotranspiration

2.1. Définitions

- ET_{ref} : Evapotranspiration de Référence, qui correspondait anciennement à l'évapotranspiration mesurée d'un couvert de gazon ras, bien irrigué (évapotranspiration potentielle). Actuellement, elle correspond plutôt à un calcul provenant d'une formule considérant différents paramètres climatiques pour estimer la demande évaporative de l'atmosphère.
- ETM : Evapotranspiration Maximale, elle correspond à l'évapotranspiration maximum du couvert considéré bien irrigué.
- ETR : correspond à l'évapotranspiration réelle de la culture. Elle est fonction du stade phénologique et de l'état hydrique du sol. Elle reste inférieure ou égale à ETM .

L'estimation d' ETR peut se faire par mesure directe (lysimètres, méthode des corrélations turbulentes, flux de sève) ou indirecte (méthodes du rapport de Bowen, aérodynamique). Cependant, ces méthodes de mesure posent des problèmes de représentativité et/ou des difficultés techniques les rendant difficiles d'accès aux agriculteurs. C'est pourquoi on utilise généralement en agrométéorologie des *estimations d'ETR calculées*. Ces calculs sont effectués sur une base offre/demande : les données climatiques permettent de définir la demande évaporative de l'atmosphère, tandis que les connaissances agronomiques concernant le comportement des cultures à différents stades et l'estimation de la disponibilité de l'eau dans le sol définissent l'offre.

La démarche de calcul de ETR à partir de ET_{ref} est la suivante :

$$ETM = \underline{kc} \cdot ET_{ref}$$



$$ETR = \underline{ks} \cdot ETM$$

$$\text{avec : } kc = \underline{kcb} + \underline{ke}$$

- kc est le coefficient cultural ; Wright (1982) a proposé de le décomposer en un terme dépendant de la plante (kcb) et un terme dépendant du sol (ke).
- kcb est le coefficient cultural de base, indiquant les possibilités de transpiration maximale de la culture envisagée suivant son stade phénologique et l'approfondissement des racines. Il existe des valeurs de kcb établies pour diverses cultures (tableau 2) ainsi qu'une courbe généralisée de kcb donnant son évolution tout au long de la croissance de cette culture (figure 4). Normalement, le terme kcb ne dépasse pas une valeur de l'ordre de 1,2. Si c'est le cas, il est probable que les expérimentations menées pour déterminer kcb ont été faites sur une surface trop petite posant des problèmes d'advection locale. De plus, il est nécessaire d'utiliser le coefficient cultural avec l'équation donnant ET_{ref} à partir de laquelle ils ont été déterminés.
- ke est un coefficient tenant compte de l'évaporation du sol nu (fonction de la couverture par la végétation), le plus souvent exprimé par (Wright, 1982) :

$$ke = (1 - kcb) \left(1 - \sqrt{\frac{t}{td}}\right) fw$$

où t est le temps écoulé après la fin de la pluie ou de l'irrigation, td est un temps caractéristique du type de sol pour l'évaporation (5 jours pour un sol limoneux) et fw est la fraction de sol mouillé. Ce paramètre fw dépend essentiellement du mode d'irrigation, il peut valoir 1 en irrigation par aspersion.

- ks est le coefficient de sécheresse ou de stress. Deux types de modèles sont principalement utilisés pour le représenter (figure 5). Le premier correspond à la formule de Jensen *et al.* (1970), très utilisée aux USA :

$$ks = \frac{\text{Log}(ASW + 1)}{\text{Log}(101)}$$

où ASW est le pourcentage d'eau disponible restante. Bien que très simple, cette formule ne tient pas compte des différences entre cultures, sols et climats. Pour pallier ces manques, et sur la base d'observations expérimentales, le deuxième type de modèle proposé pour k_s a la forme d'une fonction à seuil. En deçà d'une fraction p consommée de la réserve utile du sol $ETR = ETM$. Au-delà, k_s (équivalent à ETR/ETM) décroît linéairement jusqu'à s'annuler. La valeur du seuil p dépend de la capacité physiologique de la plante à absorber l'eau du sol à des potentiels hydriques plus ou moins faibles, mais aussi de l'intensité de la demande évaporative (qui influe, entre autres, sur la résistance au transfert de l'eau dans le sol). Le tableau 3 présente un certain nombre de valeurs de $(1-p)$ classées suivant ces deux facteurs. On notera que la valeur de l'humidité au seuil p correspond au point de flétrissement temporaire définissant la RFU et la RDU.

Tableau 2. Coefficients culturaux de base (k_{cb}) déterminés pour quelques cultures (d'après Doorenbos et al., 1978)

Plante	coefficient initial	coefficient en plein développement	coefficient moyen sur la période de culture
Haricot	0,4 - 0,5	0,95 - 1,1	0,85 - 0,9
Chou	0,4 - 0,5	0,95 - 1,1	0,7 - 0,8
Coton	0,4 - 0,5	1,05 - 1,2	0,8 - 0,9
Maïs	0,3 - 0,5	1 - 1,15	0,8 - 0,95
Pois	0,4 - 0,5	1,05 - 1,2	0,8 - 0,95
Pomme de terre	0,4 - 0,5	1,05 - 1,2	0,75 - 0,9
Oignon	0,4 - 0,6	0,95 - 1,1	0,8 - 0,9
Riz - pluvial - inondé	0,5 1,1	1,1 - 1,2 1,1 - 1,2	1,05 - 1,2
Sorgho	0,3 - 0,4	1 - 1,15	0,75 - 0,85
Betterave	0,4 - 0,5	1,05 - 1,2	0,8 - 0,9
Canne à sucre	0,4 - 0,5	1 - 1,2	0,85 - 1,05
Tournesol	0,3 - 0,4	1,05 - 1,2	0,75 - 0,85
Tabac	0,3 - 0,4	1 - 1,2	0,85 - 0,95
Tomate	0,4 - 0,5	1,05 - 1,25	0,75 - 0,9
Luzerne	0,3 - 0,4	1,1	0,85 - 1,05
Banane	0,4 - 0,6	1 - 1,1	0,7 - 0,8

Premier chiffre : Valeur sous forte humidité ($H_{rmin} > 70\%$) et vent faible ($U < 5$ m/s).

Deuxième chiffre : faible humidité ($H_{rmin} < 20\%$) et vent fort (> 5 m/s).

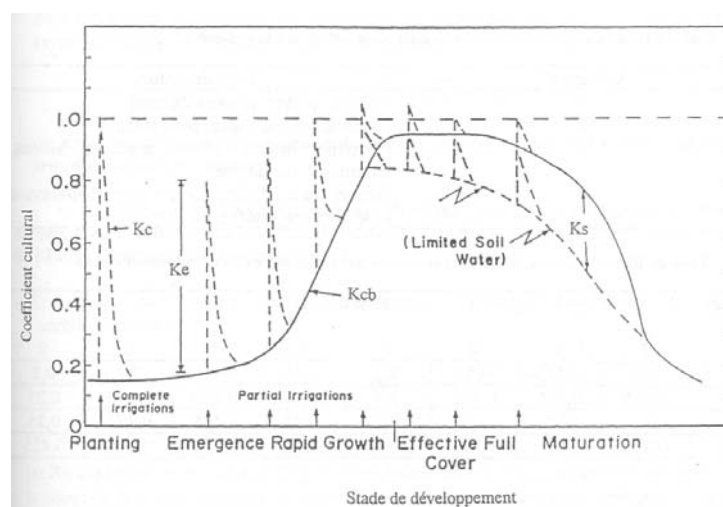


Figure 4. Courbe du coefficient cultural de base généralisé (k_{cb}) montrant le coefficient d'évaporation du sol (k_e) et le coefficient de stress (k_s).

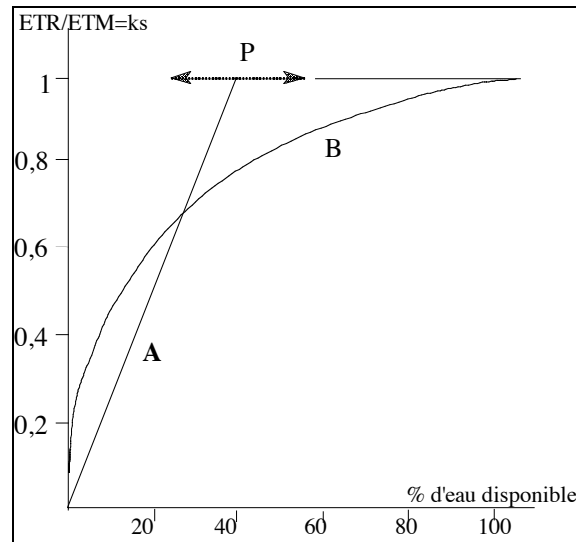


Figure 5. Evolution du coefficient de stress k_s en fonction du pourcentage d'eau disponible suivant la formule (courbe B) de Jensen (1970) ou suivant une courbe à seuil (courbe A). Le coefficient p qui définit la limite entre RFU et RDU varie de 30 à 60% quand ET_{ref} augmente.

Tableau 3.a. Catégories de cultures classées selon l'aptitude à la sécheresse

Groupe n°	Type de culture
1	oignon, poivre, pomme de terre
2	banane, choux, vigne, pois, tomate
3	luzerne, haricot, citron, arachide, ananas, tournesol, melon, blé
4	coton, maïs, olivier, sorgho, soja, betterave à sucre, canne à sucre, tabac

Tableau 3.b. Valeurs de $RFU/RU = 1-p$ classées suivant les catégories de cultures et l'ETM

Groupe n°	ETM (mm/j)							
	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,5	0,425	0,35	0,3	0,25	0,225	0,2	0,2
2	0,675	0,575	0,475	0,4	0,35	0,325	0,275	0,25
3	0,8	0,7	0,6	0,5	0,45	0,425	0,375	0,35
4	0,875	0,8	0,7	0,6	0,55	0,5	0,45	0,425

2.2. Estimation d' ET_{ref}

Par rapport aux données météo disponibles, de nombreuses formulations ont été développées depuis les années 40. Tout d'abord basées sur des formulations empiriques (à partir du rayonnement ou de la température), ces estimations se sont fondées ensuite sur des approches plus "physiques". On ne fera pas ici un inventaire de l'ensemble de ces formules pour présenter seulement les plus connues.

- Parmi les formules empiriques, on distinguera les méthodes fondées sur le rayonnement et celles fondées sur la température (dans la suite de ce paragraphe a et b représentent des coefficients de calages suivant le site et F des fonctions liées à la durée du jour) :

- *Méthodes utilisant le rayonnement* : la plus connue est celle de Jensen (1974), utilisée sur des intervalles de temps de 10 jours :

$$ET_{ref} = a(T - b)Rs$$

où T est la température moyenne et Rs le rayonnement solaire. Turc (1961) reprend le même type de formulation en y incluant l'humidité de l'air.

- *Méthodes utilisant la température* : elles permettent d'utiliser uniquement la température qui est la donnée météo la plus facile à obtenir. Les plus utilisées étaient celles de Thornthwaite (1948) et de Blaney et Criddle (1950) :

$$ET_{ref} = \frac{aT^b}{F} \quad (\text{Thornthwaite, 1948})$$

$$ET_{ref} = (a + bT)F \quad (\text{Blaney \& Criddle, 1950})$$

Plus récemment, Hargreaves (1974) a proposé une formule qui permet de tenir compte du rayonnement par la différence entre T_{min} et T_{max} :

$$ET_{ref} = a(T + b)\sqrt{T_{max} - T_{min}}$$

où a est proportionnel au rayonnement solaire. Ces formulations sont utilisées sur un pas de temps décadaire ou mensuel.

- Les formulations ayant une base physique sont celles de Penman et Penman-Monteith, fondées sur le bilan de masse et d'énergie du couvert (cf. Actes de l'Ecole Chercheur en Bioclimatologie, tome 1).

- L'équation de Penman combine des termes "d'énergie disponible" et un terme "aérodynamique" :

$$L \cdot ET_{ref} = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a C_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma}$$

où Rn est le rayonnement net, G le flux de chaleur du sol, γ la constante psychrométrique, Δ la pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température ambiante, ρ_a la densité de l'air, C_p la capacité calorifique massique de l'air, $e_s - e_a$ le déficit de saturation et r_a la résistance aérodynamique. Dans le cadre d'une application agrométéorologique, les paramètres climatiques ne peuvent être que des moyennes journalières. Il a ainsi été nécessaire d'accepter un certain empirisme dans les formules opérationnelles comme la très répandue "FAO 24 corrected Penman method" :

$$ET_{ref} = a(T + b)\sqrt{U(T_{max} - T_{min})}$$

où U est la vitesse moyenne du vent, a et b des coefficients calibrés, C est un coefficient correcteur tenant compte des effets non linéaires.

Différentes formulations du terme aérodynamique ont mené à diverses formes de l'équation de Penman. Une étape supplémentaire dans l'empirisme a consisté à obtenir les termes "énergétique" et "aérodynamique" par des mesures simples. C'est le cas, par exemple, de la formule de Brochet et Gerbier (1972) qui estime le premier terme à partir de la fraction d'ensoleillement et le second à partir de l'évaporation observée grâce à un évaporimètre Piche placé sous abri.

L'équation de Penman (ou ses dérivées) a longtemps servi d'équation de référence pour le calcul de l' ET_{ref} et de nombreux coefficients culturaux ont été établis avec cette dernière. Cependant, la tendance actuelle est de remplacer le calcul standard d' ET_{ref} avec l'équation de Penman par l'équation de Penman-Monteith, ce qui ne va pas sans poser quelques problèmes.

- L'équation de Penman-Monteith : elle est semblable à celle de Penman mais en ajoutant une résistance supplémentaire au transfert de l'eau vapeur qui représente la résistance du couvert (r_c) :

$$L \cdot ET_{ref} = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a C_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma}$$

On retrouve l'équation de Penman quand r_c est nul. De même que précédemment, un certain nombre de fonctions de vent ont été introduites dans cette formulation amenant à des versions modifiées de l'équation de Penman-Monteith qui nécessitent un calage. De plus, Allen et al. (1994) ont proposé que le terme de résistance stomatique soit fixé à 70 s.m^{-1} et que l'équation de P.M. ainsi modifiée remplace la FAO 24. Cette valeur fixe de r_c présente deux inconvénients : a) tout d'abord, elle

supprime l'argument fondé sur l'introduction des régulations biologiques à l'interface et donc le passage de l'équation de Penman à Penman-Monteith ; b) ensuite, cela conduit à des possibilités de calcul de valeurs supérieures à l'énergie disponible ($R_n - G$) par forte aridité.

On notera que, quelle que soit la formule utilisée (Penman ou Penman-Monteith), la base de temps dans une application agrométéorologique est de l'ordre de la semaine.

2.3. Le bilan hydrique dans les modèles de culture

Contrairement à une vision statique de la culture présentée ci-dessus, nous allons considérer ici l'ensemble du cycle cultural. Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager le cas d'une culture peu couvrante en début de culture (et donc un effet prépondérant du sol sur l'évapotranspiration) et l'éventualité d'apports en eau faibles par rapport à la demande. Dans cette vision dynamique, les principaux points à prendre en compte dans l'évaluation du bilan hydrique sont :

- l'augmentation de la taille du réservoir sol (RU) au cours du temps du fait de la croissance racinaire qui permet de prospecter des volumes de sol de plus en plus importants ;
- l'estimation des besoins en eau en début de culture. En effet, le coefficient cultural (k_c) va fortement varier suivant une situation de sol sec ou humide en surface, soulignant l'importance de la fréquence des apports d'eau (figure 6). La décomposition de k_c en k_{cb} et k_e permet de prendre en compte cet effet.

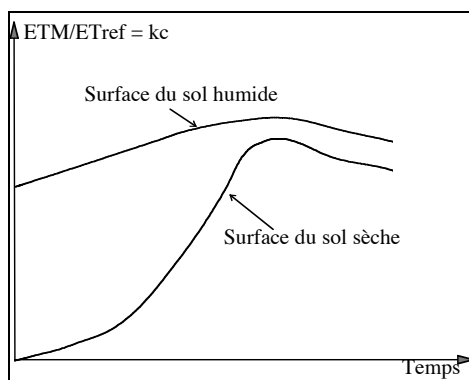


Figure 6. Variation du coefficient cultural au cours du temps (en début de culture) en cas de sol humide ou sec en surface

- le seuil RDU/RU (coefficient p , voir figure 7) va varier dans le temps en raison de l'augmentation de la profondeur d'enracinement, puis se stabilise à partir d'une certaine profondeur. Comme nous l'avons vu, il varie également avec la demande climatique et le type de plante (tableau 3 et figure 8).

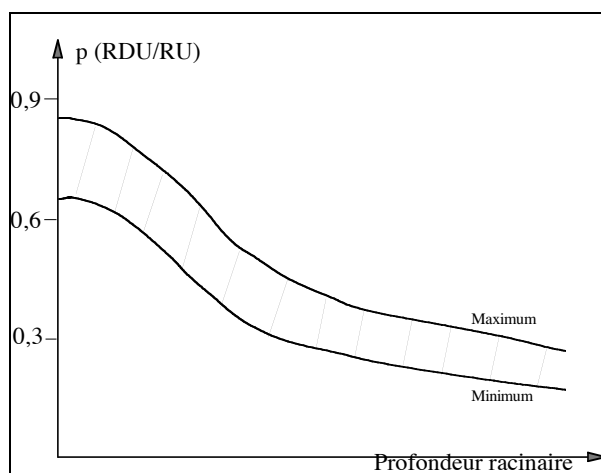


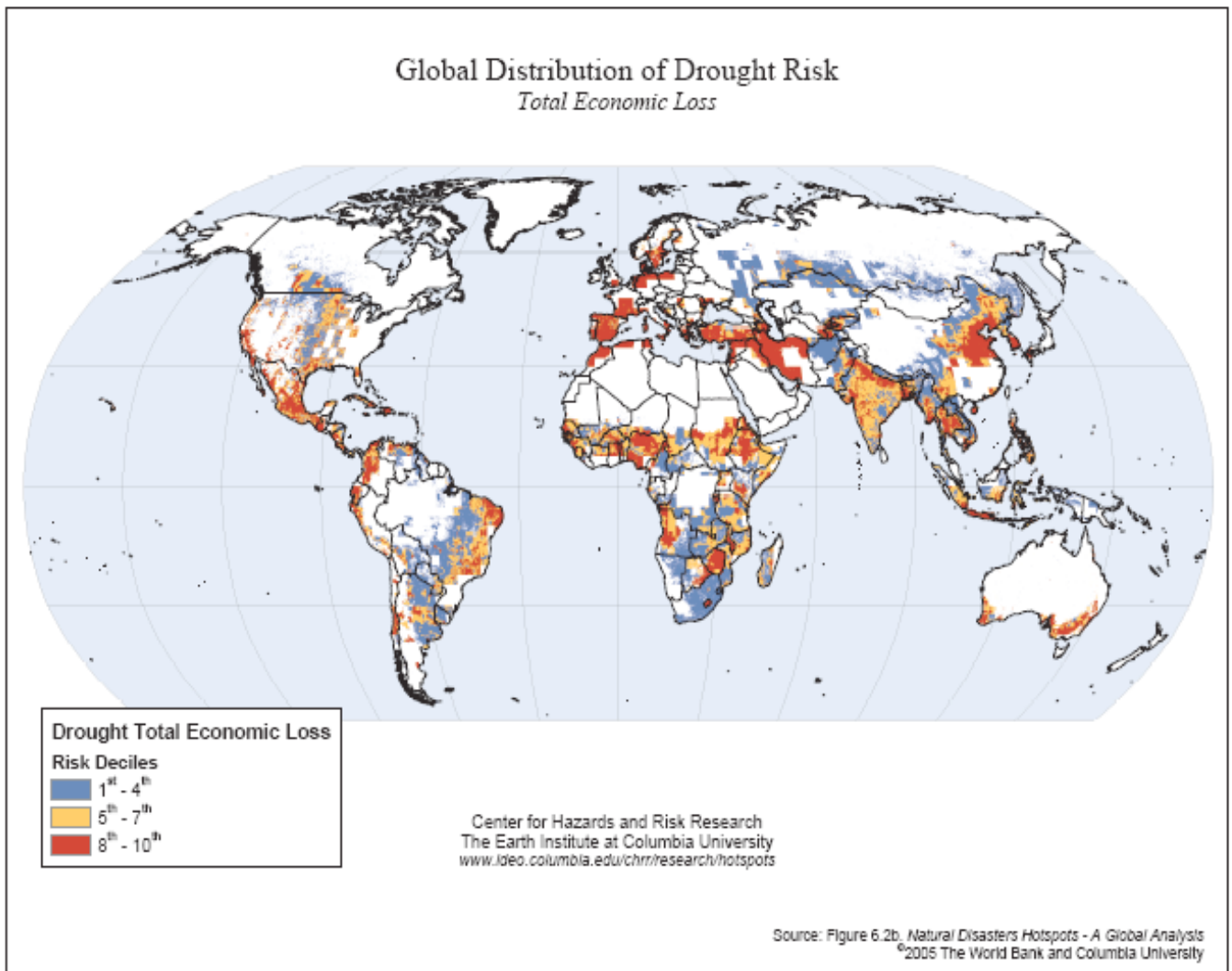
Figure 7. Variation du seuil p (ou RDU/RU) en fonction de la profondeur d'enracinement. Les courbes maximum et minimum dépendent de la demande climatique et du type de plante (régulation stomatique).

Bibliographie de l'Annexe 1.

- Allen R.G., Smith M., Perrier A., Pereira L.S. (1994). An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 43(2), 1-34.
- B.S.I. Standards. (1988). Draft code of practice for the planning design and installation of irrigation schemes in the UK. Part 2. Irrigation water requirements. B.S.I. Standards, Technical committee AGE/30, Irrigation and drainage equipment, n° 88/73803 DC.
- Brisson N., Seguin B., Bertuzzi P. (1992). Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 59, 267-287.
- Doorenbos J., Kassam A. H., Bentvelder C., Uittenboogaard G. (1978). *Yield response to water*. FAO irrigation and drainage paper, 33, FAO, Rome, 144 p.
- Franquin P., Forest F. (1977). Des programmes d'évaluation et analyses fréquentielles des termes du bilan hydrique. *Agronomie Tropicale*, 32(1), 1-22.
- Hargreaves G.H.(1974). Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Transactions of the ASAE*, 17, 701-704.
- Hillel D. (1974). *L'eau et le sol : principes et processus physiques*. Editions Vander, Louvain.
- Itier B. (1994). Measurement and estimation of evapotranspiration. NATO Workshop : "Sustainability of irrigated agriculture", Vimeiro, 1994
- Itier B., Flura D., Belabbes K., Kosuth P., Rana G., Figueiredo L. (1992). Relations between relative evapotranspiration and predawn leaf water potential in soybean grown in several locations. *Irrigation Science*, 13, 109-114.
- Itier B., Maraux F., Ruelle P., Deumier J.M. (1995). Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. ICID - FAO Workshop on "Irrigation Scheduling from theory to practice", Rome, 1-16.
- Jensen M.E., Robb D.C.N., Franzoy C.E. (1970). Scheduling irrigations using climate-crop-soil data. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, 96, 25-28.
- Jensen M.E. (ed.) (1974). Consumptive use of water and irrigation water requirements. Rep. Tech., Committee on Irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage Division ASCE, 227 p.
- Musy A., Soutter B. (1991). *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 331 p.
- Wright J.L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, 108, 57-74.

Annexe 2. Risques de pertes économiques liés à la sécheresse

(d'après le site < www.ldeo.columbia.edu >)



Exemple de caractérisation des risques liés à la sécheresse présenté dans un rapport récent de l'université Columbia de New York pour la Banque mondiale. Le critère climatologique retenu est la fréquence (sur la période 1980-2000) d'épisodes avec 3 mois consécutifs de pluviométrie inférieure à 50% de la normale. Selon ce critère, le sud de la France figure parmi les zones du globe à risques de dommages élevés.

Annexe 3. Les composantes du bilan hydrique sur la France : les sorties des simulations effectuées pour l'étude sur les indices de productivité de prairie (IPP) réalisée conjointement par l'INRA et Météo-France pour le compte du MAP

(d'après Ruget et al., 2006)

Dans le cadre de la refonte de la PAC à partir de 2007 et du dossier sur les "Indemnités compensatoires de handicaps naturels", le MAP souhaite disposer d'un outil permettant de délimiter de manière objective les zones défavorisées en raison de la "faible productivité des sols et de conditions climatiques difficiles". L'estimation de potentialités de production est réalisée à partir du modèle de culture STICS-prairie, qui présente la qualité d'intégrer les effets combinés du climat et du sol sur le fonctionnement de la culture. La culture prise comme référence est la prairie naturelle, représentée dans le modèle par les caractéristiques d'une graminée moyenne. La prairie fournit en effet un indicateur robuste, étant donné qu'elle est potentiellement productive pendant l'ensemble de l'année et sur l'ensemble du territoire. La variabilité du climat est prise en compte grâce à l'utilisation d'une grille météorologique de plus de 4 000 points sur la France. Les sols sont caractérisés à partir des informations de la carte des sols de France au millionième, construite par Infosol (INRA Orléans), grâce à l'utilisation de règles de pédotransfert. Cette base de données permet au modèle STICS, qui fonctionne au pas de temps journalier, de mettre en évidence des variations de production au niveau spatial et temporel sur la période d'étude 1993-2004.

Le produit pilote

Le domaine d'espace considéré dans cette étude est l'ensemble du territoire français continental. L'exclusion des zones montagneuses ou d'autres zones à conditions physiques défavorables (sols salins...) sera faite a posteriori par le MAP. Les résultats de cette étude sont des indices spatialisés de productivité de la prairie (IPP), et des indicateurs de variabilité de ces indices. Ils sont élaborés en deux temps : la fourniture d'un produit pilote – décrit ci-dessous -, puis, après évaluation de ce produit et améliorations, la fourniture du produit final. L'INRA CSE Avignon, responsable du modèle, a fourni à Météo-France le modèle et les fichiers caractérisant la plante, les techniques et les conditions initiales. L'INRA Infosol Orléans a fourni à Météo-France le fichier caractérisant l'ensemble des sols de France, ainsi que leurs proportions dans chacune des mailles, définies au préalable par Météo-France. Météo-France utilise ses propres données météorologiques pour réaliser les exécutions du modèle, à partir des configurations de simulation fournies par l'INRA Infosol Orléans. Les principaux paramètres de la plante réestimés spécifiquement pour la prairie concernent les fonctions suivantes : la mise en place d'indice foliaire (durées des phases, seuils de températures et vitesse de mise en place), l'efficacité de conversion du rayonnement, la sénescence, la consommation d'eau (évapotranspiration maximale par rapport à l'ETP climatique) et les besoins en azote (paramètres des courbes de dilution). Le fichier-plante fourni caractérise une prairie standard moyenne à émission de feuilles permanente. L'émission de feuilles permanente permet de reproduire le fait que le couvert est composé d'espèces multiples, et que l'émission de feuilles n'est jamais terminée. Ce jeu de paramètres a été construit sur 91 situations réparties en France et sur plusieurs années, avec ou sans irrigation et fertilisation, à différentes saisons, et validé sur 177 situations ; il fait l'objet d'un article accepté à *Fourrages* (parution en 2006).

Les données climatiques utilisées sont des données quotidiennes en point de grille (grille carrée en degrés de 0,125°, soit environ 12 km). Elle est composée de 4 145 points sur la France métropolitaine et la Corse. La méthode d'interpolation retenue est la pondération par l'inverse du carré de la distance des 5 stations les plus proches. Les données sol sont issues de la Base de données Géographique des Sols de France à l'échelle du 1/1 000 000. Aucun des paramètres nécessaires à STICS n'est disponible directement dans la Base de données des Sols de France à 1/1 000 000 ; il est donc nécessaire d'utiliser des règles de pédotransfert.

Les variables de sortie sont la production cumulée, présentée sous forme d'indice (IPP, de 0 à 10), c'est-à-dire rapportée à la valeur maximale des moyennes interannuelles de toutes les mailles

(maximum de la production moyenne de toutes les mailles), la date de fin de cumul, la minéralisation, les indices de stress hydrique et azoté, et le taux de remplissage de la RU. Ces variables renseignent sur les niveaux de stress calculés et expliquent les niveaux de production estimés par le modèle. Les résultats seront présentés sous quatre formes principales :

- les histogrammes : ils présentent la fréquence des valeurs des variables de sortie des simulations individuelles, par année ;
- les cartes de valeurs des variables : les cartes présentées contiennent les moyennes interannuelles des variables intégrées par maille, c'est-à-dire après pondération sur les différents sols ;
- les cartes de variabilité : elles présentent les écarts-types et les coefficients de variations des indices de production. Les écarts-types et coefficients de variations sont calculés pour deux types de variation : la variation entre années des variables intégrées à la maille, ce qui renseigne sur la variabilité due au climat (moyennes pondérées entre sols) et la variation entre sols des variables issues des simulations moyennées sur l'ensemble des années, ce qui renseigne sur la variabilité liée à l'hétérogénéité des sols de la maille (moyennes inter-annuelles) ;
- les régressions : les outils statistiques utilisés sont des régressions multiples, soit simples, soit "stepwise", c'est-à-dire avec introduction progressive des variables selon la part de variance qu'elles expliquent. Les variables explicatives sont soit des variables d'entrée, caractéristiques du milieu (climat, sol), soit des variables intermédiaires calculées par le modèle, indépendantes du couvert, comme la minéralisation, ou explicitant le fonctionnement du couvert, comme les niveaux de stress hydrique et azoté, le taux de remplissage de la réserve hydrique du sol.

La cohérence et la pertinence des résultats sont analysées en deux temps, par le contrôle du nombre de simulations bien exécutées et grâce aux histogrammes de fréquence des variables intermédiaires et de la variable de sortie.

Les composantes du bilan hydrique en sortie des simulations

Les moyennes inter-annuelles pour l'ensemble de la France sont présentées dans les cartes ci-dessous.

Pour les variables climatiques d'entrée, la valeur moyenne des précipitations est de l'ordre de 1000 mm/an (932 mm), avec une très forte variabilité entre mailles (de 248 à 3388 mm annuels), alors que la valeur moyenne de l'ETP est de 773 mm, avec des variations allant de 449 à 1419 mm : les valeurs vont croissant du nord-ouest au sud-est, de la Manche à la Méditerranée.

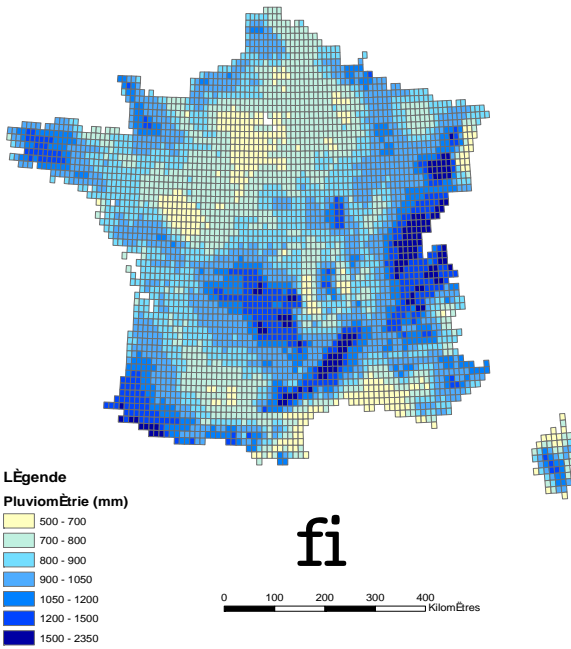
Pour les valeurs calculées, il en résulte une valeur moyenne de l'ETR de 567 mm/an, qui varie en total annuel par maille de 176 à 1038 mm. Les valeurs élevées sont observées dans le Sud-Ouest et, dans une moindre mesure, sur les massifs montagneux arrosés (Ouest du Massif Central, Sud du Jura, Nord des Alpes). Les valeurs faibles se trouvent dans le Sud-Est, l'Est du Massif Central surtout et dans une grande zone s'étendant de l'embouchure de la Loire à la montagne de Reims.

Au niveau du drainage, la valeur moyenne est de 374 mm/an, avec des valeurs extrêmes annuelles qui s'étalent de 0 à 2 836 mm. Les valeurs élevées sont observées dans les régions suivantes : Vosges, Jura, Nord des Alpes et Cévennes, puis dans une moindre mesure Ouest du Massif Central et des Pyrénées. Pour les valeurs faibles, on trouve : Bassin Parisien, bassin de la Garonne, Alsace, vallées de la Loire et de l'Allier, basse vallée du Rhône.

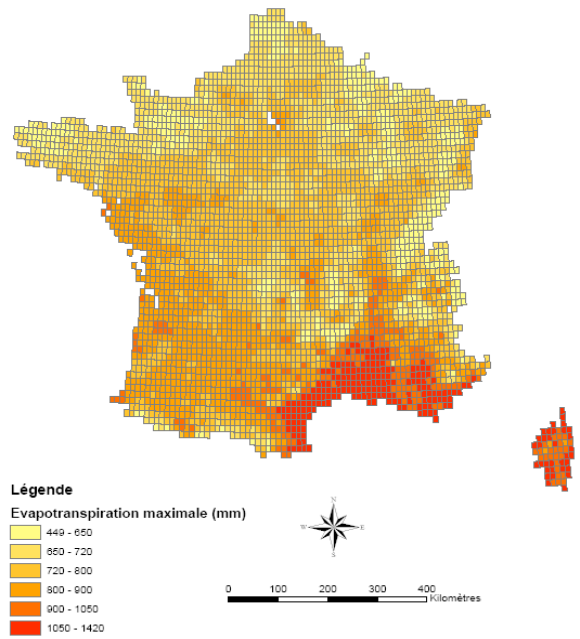
Au niveau des écarts-types, traduisant la variabilité inter-annuelle :

- pour la pluie, on note une variabilité forte dans les zones les plus arrosées (Cévennes, Jura, Nord des Alpes), moins fortement marquée en Bretagne et dans l'extrême Sud-Est. Elle est assez faible dans toute la zone centrale : des pays de Loire à l'Aquitaine et à la Bourgogne, y compris dans des régions bien arrosées comme le versant Ouest du Massif Central. Pour l'ETP, elle est forte sur la frange Est de la France et dans le bassin de la Garonne. Elle est variable d'une maille à l'autre et assez faible ailleurs.
- pour l'ETR, la variabilité est assez forte de la Loire à l'Alsace (grand Bassin Parisien), et plus dispersée ailleurs (pas de continuité entre mailles), sans doute à cause d'une forte influence du sol.

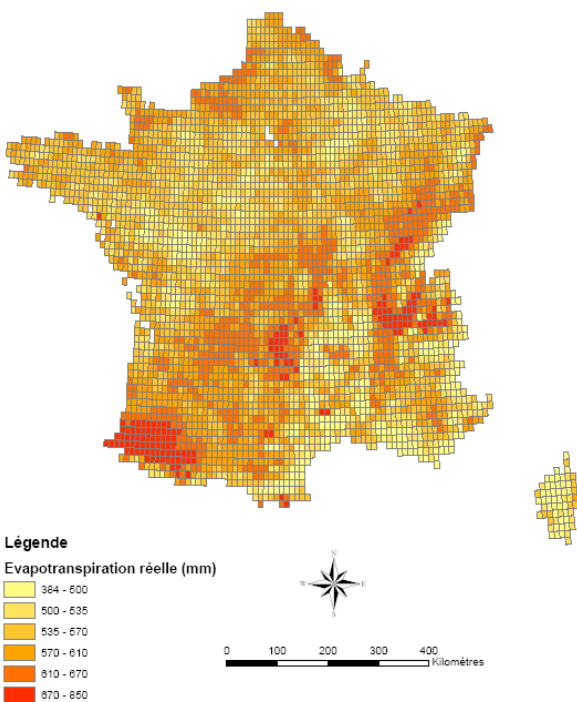
PluioMÈtre annuelle moyenne de 1993 à 2004



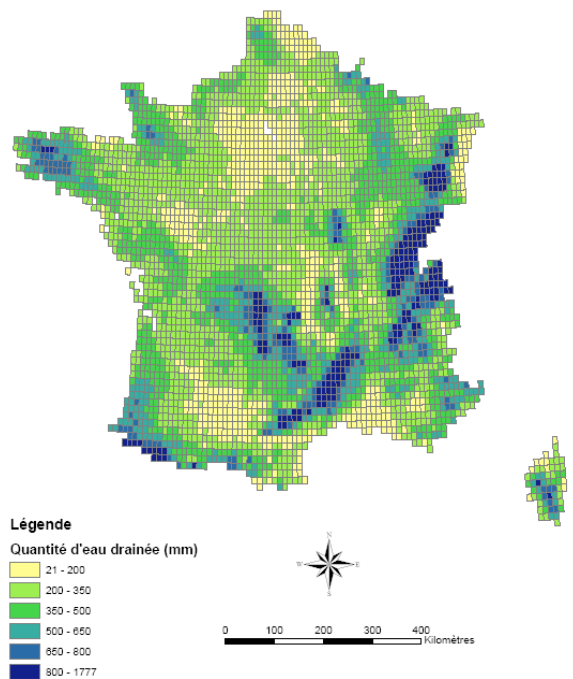
Evapotranspiration maximale moyenne annuelle de 1993 à 2004



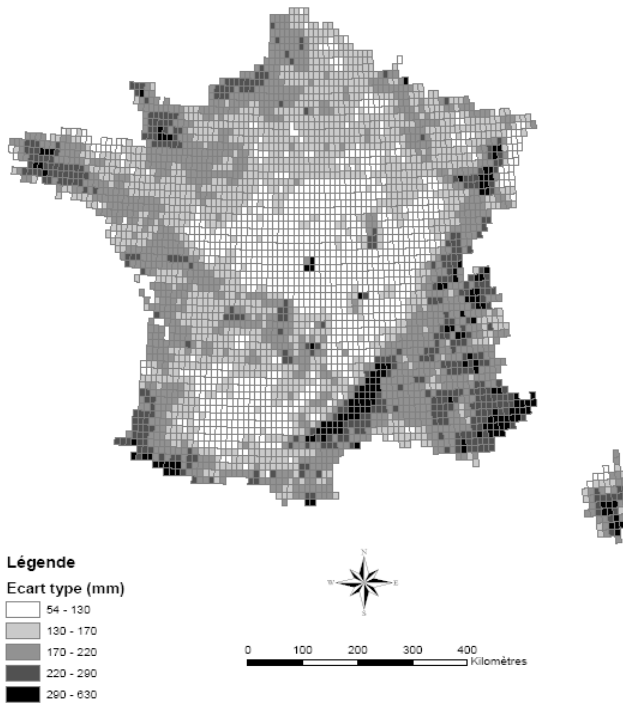
Evapotranspiration réelle moyenne annuelle entre 1993 et 2004



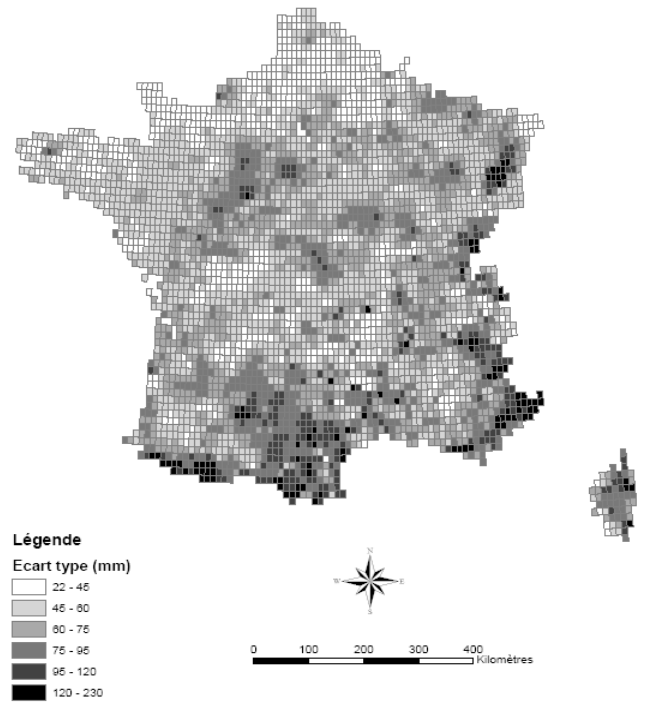
Quantité annuelle moyenne d'eau drainée entre 1993 et 2004



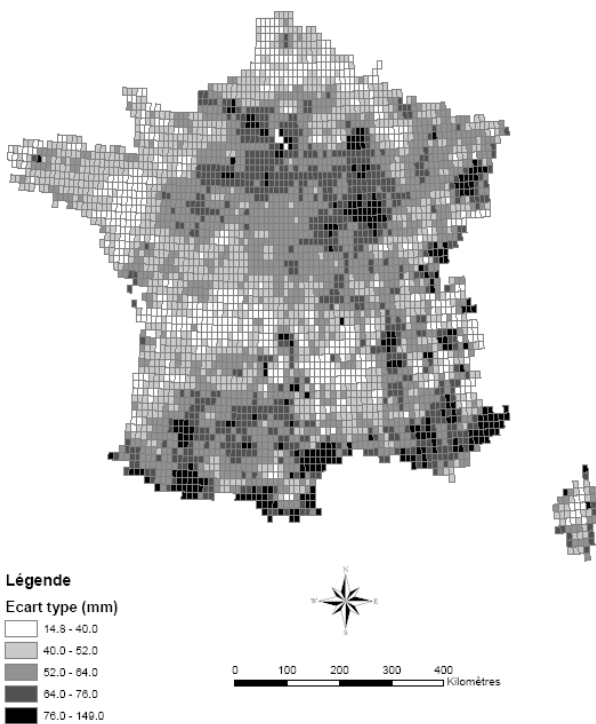
Ecart type moyen annuel de la pluviométrie entre 1993 et 2004



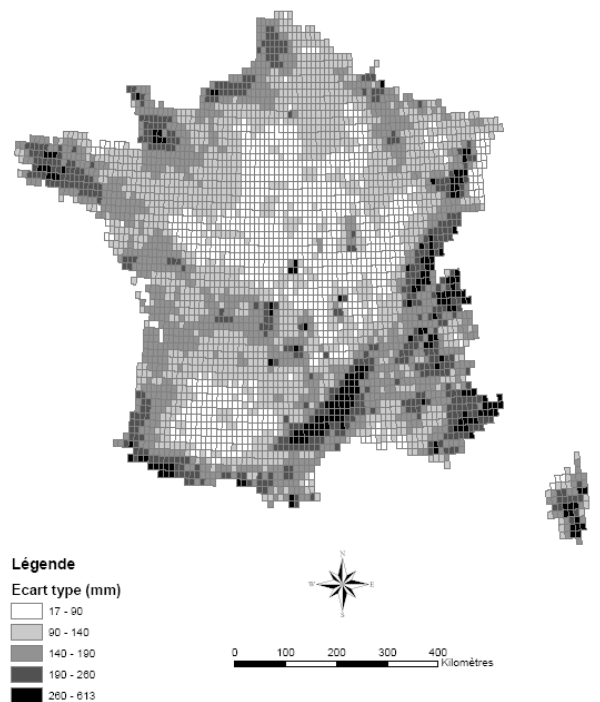
Ecart type de l'évapotranspiration maximale annuelle de 1993 à 2004



Ecart type moyen annuel de l'évapotranspiration réelle entre 1993 et 2004



Ecart type de la quantité d'eau drainée annuelle entre 1993 et 2004



- pour le drainage, on observe globalement une faible variabilité locale, ce qui traduit une influence plus forte du climat, à variation continue, que du sol, qui change rapidement, à échelle fine. La variabilité est forte dans les zones pluvieuses, et faible dans les zones à drainage faible.

Précipitations, évapotranspiration et drainage : moyennes et écarts-types annuels

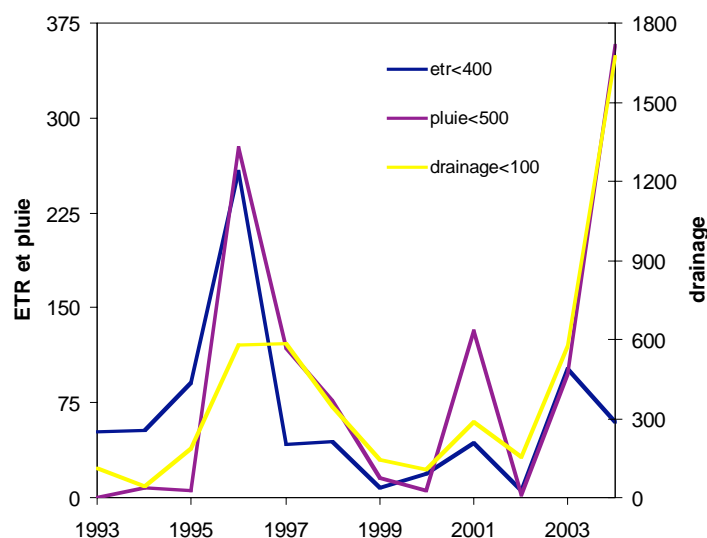
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
pluie	1015.92	1078.02	901.34	853.72	883.8	878.43	1001.12	1132.49	926.17	1017.85	782.89	714.5
	286.33	278.73	282.46	317.76	251.34	238.02	262.63	274.55	268.1	267	204.4	191.24
ETP	701.73	745.86	764.54	727.81	797.32	768.94	763	773.59	771.68	780.07	897.08	787.15
	129.18	139.98	138.51	125.21	127.77	148.95	128.45	142.19	145.5	137.91	125.48	124.32
ETR	567.87	575.23	545.63	519.06	591.09	542.16	589.78	621.91	593.75	593.16	512.24	555.23
	77.26	69	74.14	84.51	79.59	66.43	65.59	76.42	68.92	70.54	60.13	62.28
drainage	461.03	507.37	370.09	341.39	299.87	340.98	421.3	510.6	355.63	417.38	283.23	180.59
	280.3	283.36	272.51	285.73	231.87	218.84	255.54	276.64	235.31	255.24	185.08	166.23

Nombre de valeurs extrêmes par an, pour l'ETR, le drainage et la pluie

Année	ETR		Drainage		Pluie	
	<400	>800	<100	>1300	<500	>1500
1993	52	16	111	78	0	277
1994	53	7	44	94	8	356
1995	91	13	185	66	6	171
1996	258	8	578	62	276	186
1997	42	30	582	20	118	113
1998	44	7	343	14	76	88
1999	8	19	141	65	15	218
2000	19	57	107	60	5	418
2001	43	17	287	32	132	154
2002	6	46	153	53	2	251
2003	102	3	573	6	97	35
2004	60	3	1673	0	357	7

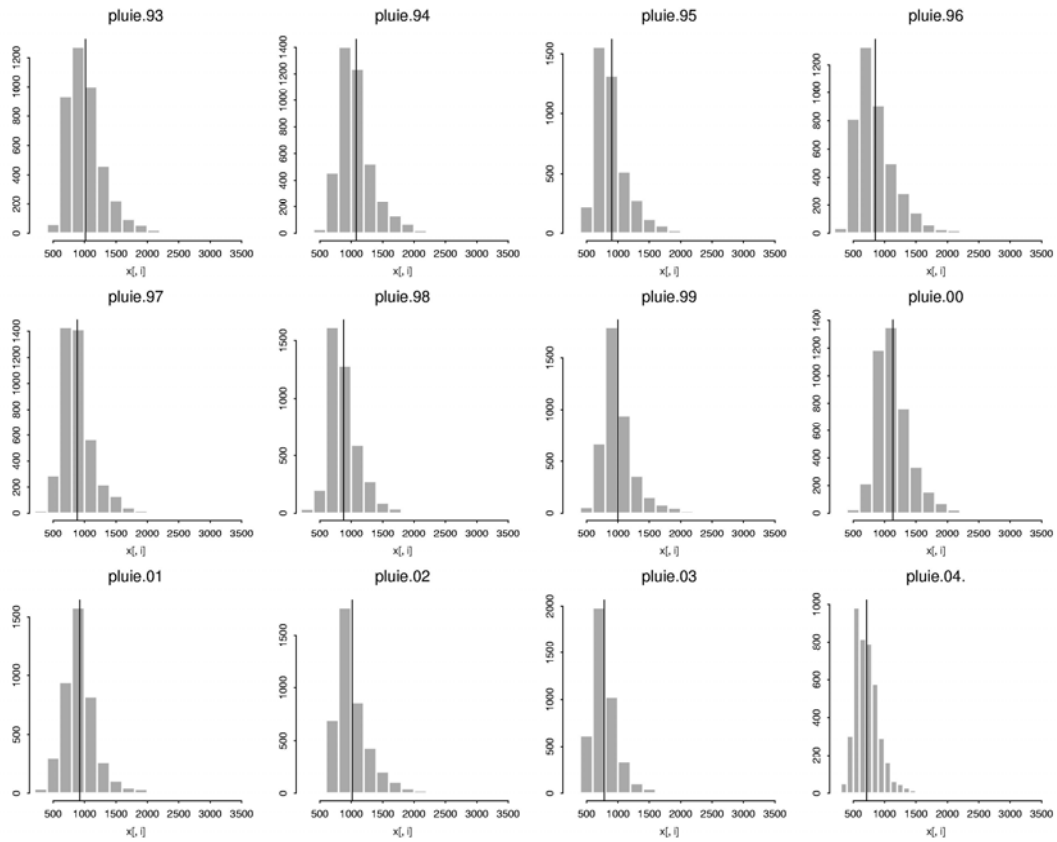
Notons que les années "humides" peuvent être de nature différente :

- en 2000, plus d'ETR que d'habitude, pas plus de drainage ; la pluie est donc bien consommée,
- en 1994, plus de drainage, pas d'ETR élevées, probablement pluies d'hiver, à un moment où la consommation est faible.

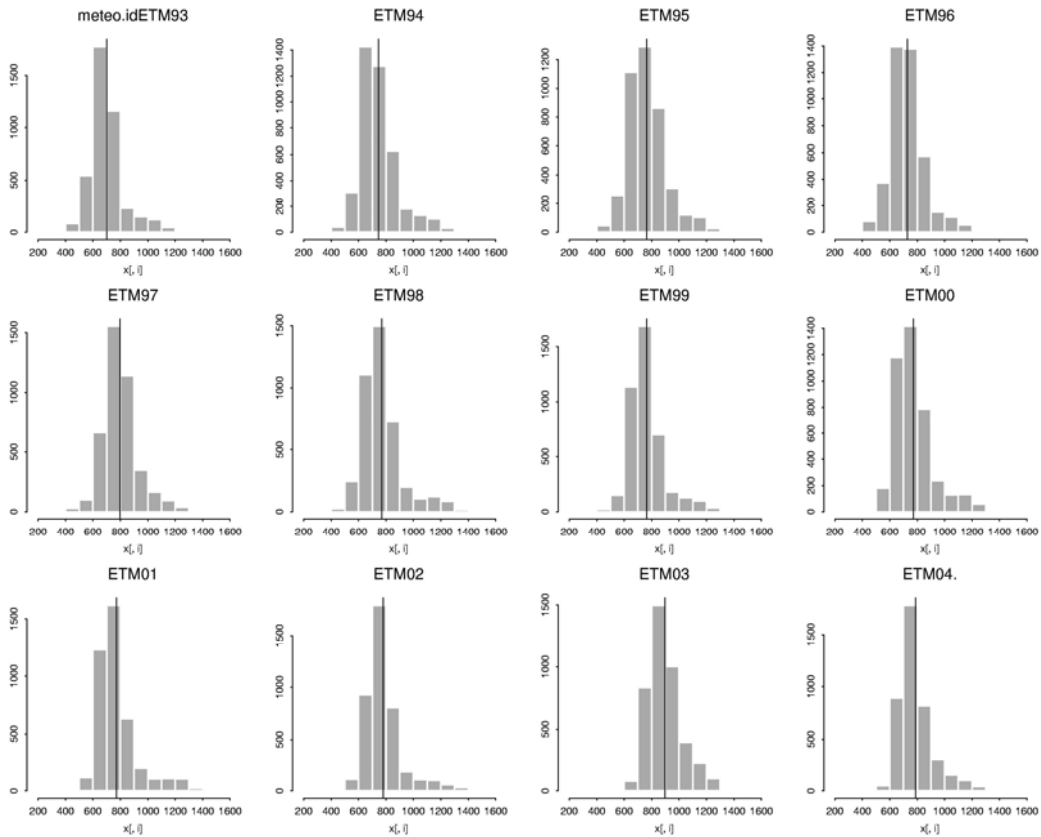


Nombre de mailles à moyenne annuelle de pluie, ETR et drainage inférieures à un seuil (Pour la variable représentant le nombre de mailles où le drainage est inférieur à 100 mm, il faut lire l'axe des ordonnées à droite). Noter que le drainage faible est fréquent non seulement l'année où pluie et ETR sont faibles, mais aussi l'année suivante, donc existence d'un effet retard.

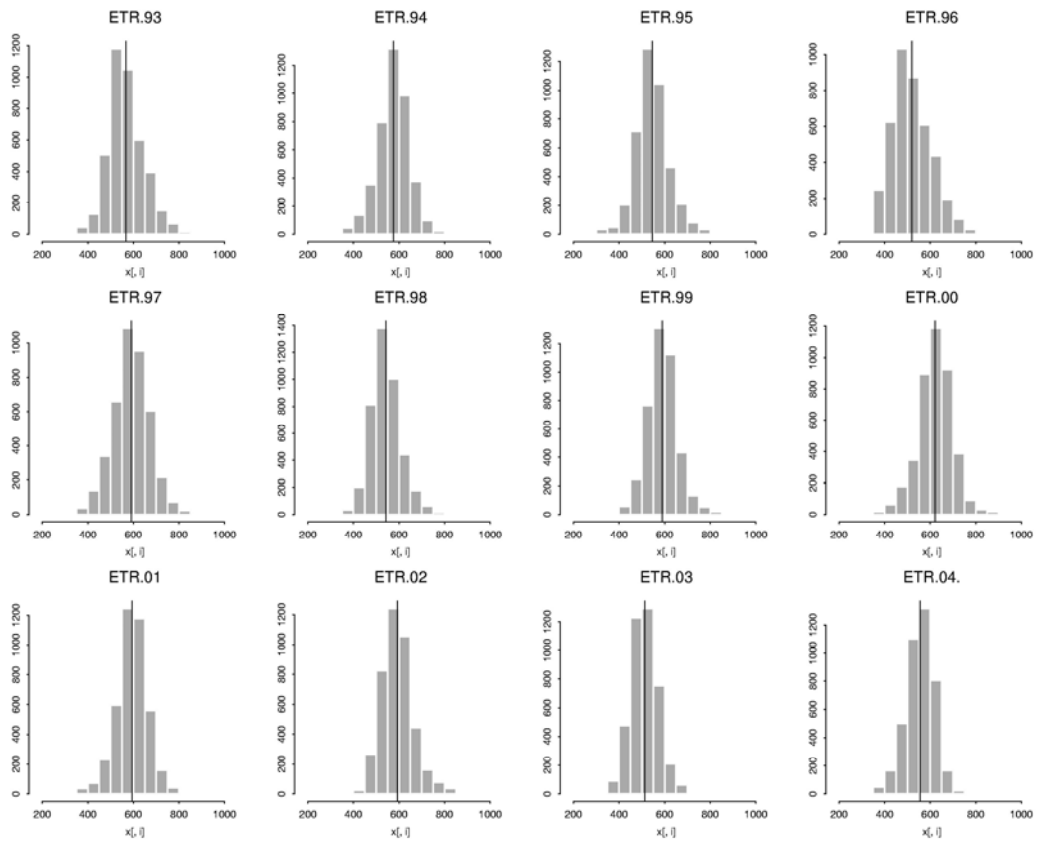
Précipitations, pour les années 1993 à 2004



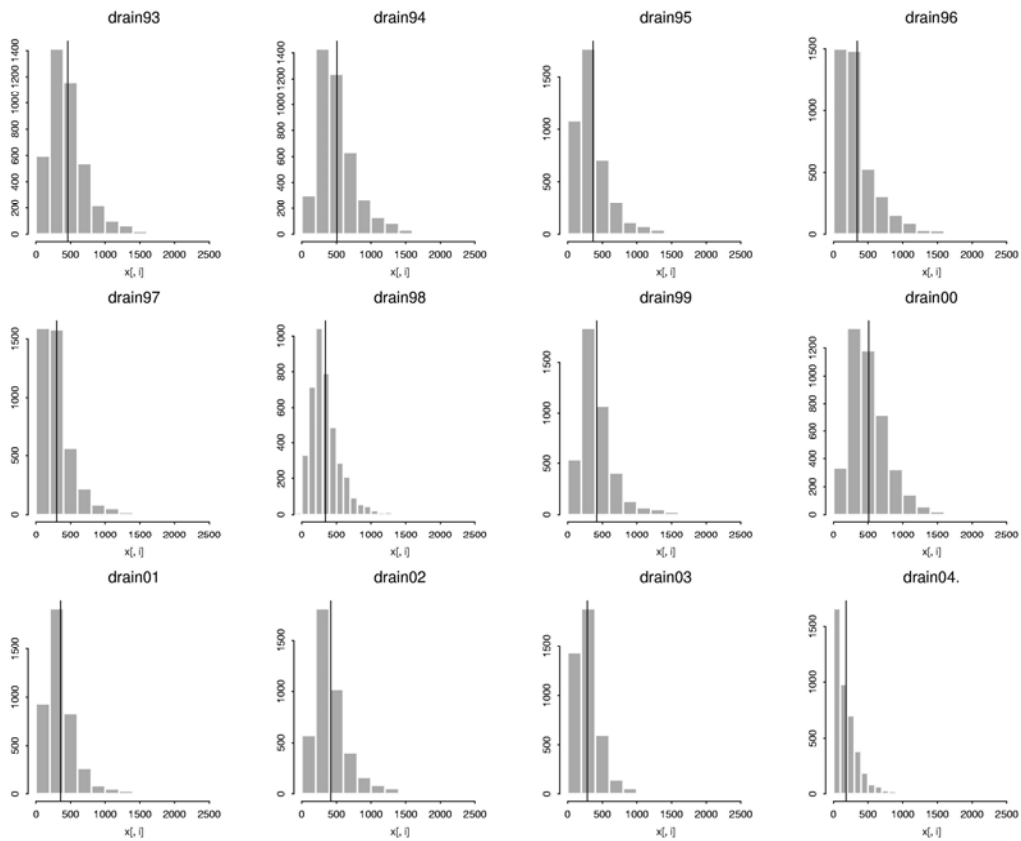
Evapotranspiration maximale, pour les années 1993 à 2004



Evapotranspiration réelle, pour les années 1993 à 2004



Drainage, pour les années 1993 à 2004



Nous présentons également ci-dessous les histogrammes d'une année humide et de 3 années sèches, pour les variables pluie, ETR et drainage.

Pour la pluie, en moyenne, 2004 est plus sèche que 2003 : ses valeurs les plus faibles sont encore plus basses (295 mm au lieu de 324) et ses pluies fortes sont beaucoup plus basses que celles de 2003 aussi (1611 mm en 2004 et 2959 en 2003). 1996 a un plus grand nombre de mailles à faibles pluies et faibles ETR que 2003, tandis que 2004 se distingue surtout par un très grand nombre de mailles à faibles pluies (environ 1700). L'ETP est sensiblement plus élevée en 2003 qu'en 2004, paradoxalement assez proche de celle de 2000. Entre les années 2003 et 2004 ou 2004 et 2000, ce sont les régimes des pluies qui sont différents, et expliquent les différences de types de ces années. C'est l'année 1996 qui a la plus faible ETP moyenne.

Au niveau des sorties, l'ETR moyenne de 2003 (512 mm) est équivalente à celle de 1996 (519 mm), sensiblement plus faible que celle de 2004 (555 mm), alors que la moyenne la plus élevée est 622 mm en 2000 (moyennes de toutes les mailles). La valeur minimale en 2003 est 310 mm et 320 en 2004, les valeurs maximales extrêmes sont 1038 mm en 2003 et 834 en 2004.

Le drainage est beaucoup plus faible en 2004 (181 mm en moyenne) qu'en 2003 (283 mm), ce qui semble être un arrière-effet de sécheresse visible aussi en 1997 (300 mm après l'année 1996 sèche, dont le drainage est 341 mm). Le drainage maximum est de 2836 en 2000, tandis qu'il est de 2130 en 2003.

Précipitations, évapotranspiration et drainage, pour une année humide et 3 années sèches

