HAL
open science

Impacts locaux attendus de l'augmentation du CO2 dans l'atmosphère sur la productivité de l'eau du maïs dans la Drôme, France

J.M. González-Camacho, J.C. Mailhol, Francoise Ruget

To cite this version:

J.M. González-Camacho, J.C. Mailhol, Francoise Ruget. Impacts locaux attendus de l'augmentation du CO2 dans l'atmosphère sur la productivité de l'eau du maïs dans la Drôme, France. Irrigation and Drainage, 2008, 57 (2), p. 229 - p. 243. 10.1002/ird.332 . hal-00453837

HAL Id: hal-00453837

https://hal.science/hal-00453837

Submitted on 5 Feb 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IMPACTS LOCAUX ATTENDUS DE L'AUGMENTATION DU CO_2 DANS L'ATMOSPHÈRE SUR LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU DU MAÏS DANS LA DRÔME, FRANCE[1]

Juan Manuel González-Camacho[1*], Jean Claude Mailhol[2], Françoise Ruget[3]

[1] *Colegio de Postgraduados, Montecillo, Mexique*
[2] *Unité de Recherche Irrigation CEMAGREF, Montpellier, France*
[3] *INRA, Avignon , France*

RESUME

Cette étude a été réalisée pour évaluer les impacts locaux d'un doublement du taux de CO_2 atmosphérique (660 ppm) sur les besoins en eau d'irrigation et la productivité de l'eau du maïs dans la vallée de la Drôme (SE France). Cette région est caractérisée par des périodes d'étiage très sévères en été. Une comparaison de séries historiques entre les périodes 1960-1989 et 1990-2001, montre qu'en juillet, la température moyenne a augmenté de 2 °C et les débits de la rivière Drôme ont diminué de 16 %. En juillet les besoins en eau d'irrigation du maïs représentent 80 % de la demande en eau totale. Le modèle atmosphérique ARPEGE-CLIMAT régionalisé à haute résolution sur le bassin versant du Rhône a permis d'estimer les variations mensuelles attendues du climat. Pour un doublement du taux de CO_2, ce modèle prévoit en juillet, une augmentation de la température de 4 °C et une diminution de la pluie de 30 %. A partir de ces variations moyennes, le générateur climatique LARS-WG a permis de simuler des scénarii climatiques journaliers locaux pour les climats actuel ($1xCO_2$) et futur ($2xCO_2$). Les effets du changement climatique sur les besoins en eau d'irrigation et la productivité de l'eau du maïs ont été simulés par le modèle de culture STICS. Différentes conditions de simulation, relatives au type de sol, dates de semis et seuils de stress hydrique pour le déclenchement des irrigations, ont été étudiées pour les climats actuel et futur. Les résultats principaux montrent que le réchauffement climatique augmente la demande en eau d'irrigation de 14 %, réduit la durée du cycle du maïs de 20 % et baisse en conséquence le rendement de 15 %. Cependant, l'effet direct d'un doublement du taux de CO_2, considéré selon son effet sur les fonctions photosynthétiques, induit une augmentation du rendement de 18 %. Ces effets, qui se compensent, maintiennent ainsi le niveau de rendement. La productivité de l'eau du maïs WUE augmente de 13 % et cette amélioration est variable selon le niveau de stress hydrique. La simulation montre que des dates de semis plus précoces permettraient d'avancer la période d'arrosages et de supprimer un apport d'eau de 40 mm, en période de pointe et de faible disponibilité en eau.

Mot clés : effet de serre, déficit hydrique, perte en rendement, efficience de l'eau, demande en eau, modélisation des cultures**.**

Correspondence to : Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Edo. Mexico C.P. 56230 Mexique, email: jmgc@colpos.mx; tel: +52 55 58 04 59 48; Fax: +52 55 58 04 59 49

[1] LOCAL IMPACTS EXPECTED OF DOUBLING RATE OF CO_2 ON MAIZE CROP WATER PRODUCTIVITY IN THE DRÔME VALLEY FRANCE.

ABSTRACT

This study was conducted to assess local impacts of doubling rate of atmospheric CO_2 (660 ppm) on irrigation demand and maize crop water productivity in the Drôme valley (SE FRANCE). This region is characterised by severe water shortages in summer season. A comparison of historical records, between periods 1990-2001 and 1960-1989, shows that in July, the mean temperature increased by 2 °C and the river stream flow diminished by 16 %. In peak periods, the maize irrigation requirements represent 80 % of the season irrigation demand. The ARPEGE-CLIMAT atmospheric model, regionalised at high resolution on the Rhône catchments was used to calculate monthly climate variations. For a doubled rate of CO_2, in July, an increase of 4 °C in average temperature and a decrease of 30 % of rainfall are expected. Monthly climate variations were introduced into the stochastic weather generator LARS-WG to simulate local daily climate scenarios for present (1xCO_2) and future (2xCO_2) climates. Then, the STICS crop model was applied to simulate the direct and indirect effects of the atmospheric CO_2 increasing on irrigation demand and maize crop production. Several simulation conditions, such as, soil types, sowing dates and water stress levels were studied for current climate and future climate scenarios. Principal results show that global warming increases water irrigation demand by 14 %; lowers the maize cultivation cycle by 20 %; and reduces the yield by 15 %. On the other hand, a direct increase in CO_2 concentration induces an average yield increase of 18 %; these opposite effects balance the maize yield. The maize crop water productivity increases of 13 % but it strongly depends on the water stress level. Similarly, earlier sowing dates allow earlier irrigation and a reduction of the water application depth by 40 mm in peak water demand periods and low water availability.

Key words: greenhouse effect, water deficit, yield loss, water use efficiency, water demand, crop modelling.

INTRODUCTION

Les études ayant pour but d'évaluer l'impact régional du changement climatique sur la production agricole sont nombreuses, car l'enjeu est important. En effet, les modèles atmosphériques prévoient pour la période 2070-2099 une augmentation de la température moyenne de surface de 1.5 à 5°C, un accroissement des précipitations aux hautes latitudes et une diminution aux basses latitudes, la limite entre ces deux zones étant le plus souvent le Sud de la France (Boone *et al*., 2000; IPCC, 2001). Ce genre de prévisions invite les gestionnaires de l'eau à s'interroger sur le devenir de cette ressource dans certaines régions telle**s** que la vallée de la Drôme qui est depuis quelques années déjà sujette à des problèmes de déficits en eau, mettant en cause la viabilité de l'agriculture irriguée (Dols, 1995 ; Zanker, 1999).

Les modèles de circulation atmosphérique permettent de comprendre le comportement du climat à l'échelle globale et leur solution numérique se réalise à basse résolution considérant une maille de 4.5° de latitude par 7.5° de longitude. Cependant, dans les analyses d'impact à l'échelle régionale, une résolution plus fine est nécessaire, souvent de 0.3° de latitude par 0.3° de longitude (Giorgi et Mearns, 1991). La fiabilité des modèles atmosphériques dépend fortement de leur capacité à reproduire, en premier

lieu, les conditions climatiques passées et actuelles du climat. Ces modèles présentent des limites dans la prévision du comportement saisonnier des variables climatiques, notamment concernant la pluie. Parfois un changement dans la variance d'une variable s'avère plus important que son comportement moyen notamment dans le cas de la production agricole que l'on doit sécuriser grâce à l'irrigation. Par conséquent, les résultats des prévisions du changement climatique peuvent varier fortement selon le modèle choisi (Délécolle *et al*., 1995 ; Baron *et al*., 2005).

Les progrès des modèles de circulation générale permettent d'estimer ce que sera le climat futur et l'usage de modèles de simulation de culture de tester ses effets sur la production agricole. Les études agronomiques sur les effets du gaz carbonique et leur introduction dans les des modèles de cultures ont débuté au milieu des années 90 (Rosenzweig *et al.*, 1995). Ces études se poursuivent avec des améliorations relatives à la validité des prévisions du changement climatique, et à la connaissance des effets de la teneur en CO_2.sur la production végétale (Hansen et Indeje, 2004 ; Abraha et Savage, 2006).

Deux modèles de circulation atmosphérique sont disponibles en France, celui du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (Crossley *et al*., 2000) dont la résolution est faible (250 km x 250 km) et celui du Centre National de la Recherche Météorologique (CNRM), Météo-France (Déqué *et al*., 1998) dont la résolution plus fine (50 km x 50 km) convient mieux à une étude régionale. Les prévisions climatiques sont réalisées à partir des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols modérés (scénario B2) proposés par les experts internationaux (IPCC, 2001).

Un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) a été mis en place à partir de 1997 dans le but de diminuer l'impact négatif sur la rivière Drôme induit par un accroissement de la demande en eau et de la pollution. Dans cette vallée, les cultures les plus importantes sont le maïs, le tournesol, le blé, le maraîchage et les aromates. Ces dernières années, le déficit en eau a augmenté, principalement à cause de la variabilité du climat (représentée par les coefficients de variation des variables climatiques(CV = écart type / moyenne)) et de l'augmentation des superficies irriguées. Il convient de noter que celle-ci est modérée dans la Drôme par rapport à d'autres régions, où en effet, une sensible diminution du maïs pluvial est constatée au profit du maïs irrigué (Gleyses et Rieu, 2004). Les déficits en eau estimés d'après Dols (1995) sont nuls une année sur quatre, de zéro à deux millions de m^3 deux années sur quatre, et de deux à neuf millions de m^3 une année sur quatre. L'enjeu dans la Drôme est donc de diminuer les prélèvements pour l'irrigation en réduisant les surfaces irriguées. Lorsque les débits de la rivière diminuent, les prélèvements dans la nappe d'accompagnement augmentent pour satisfaire les besoins en eau d'irrigation à l'échelle du périmètre. Ces débits sont soumis à une forte variabilité en période d'étiage, 62 % de variabilité en juillet et 96 % en septembre.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet GICC-Rhône (Gestion et impacts du changement climatique dans le bassin versant du Rhône). Le but est d'évaluer les impacts possibles du changement climatique sur l'usage de l'eau et la productivité de l'eau du maïs dans la basse vallée de la Drôme. Pour cela, trois types d'outils de simulation sont utilisés : le modèle atmosphérique ARPEGE-CLIMAT (Déqué *et al*.,

1998 ; Gibelin et Déqué, 2001) pour les prévisions globales des changements climatiques, le simulateur LARS-WG (Semenov et Barrow, 1997) pour la génération de scénarii climatiques locaux, et enfin le modèle de culture STICS (Brisson *et al.*, 1998, 2002) pour la simulation du rendement et de la consommation en eau d'une culture phare comme le maïs dans la zone considérée. Dans le cadre de cette évaluation sont testées des stratégies qui permettraient, dans une certaine mesure, le maintien d'une production irriguée.

OUTILS ET METHODES

Données

Les données nécessaires à l'application de la méthodologie choisie concernent :

- la série de données climatiques journalières réelles constituée : des températures maximale (Tx) et minimale (Tn) de l'air en °C, de la pluie (P) en mm, du rayonnement global (Rg) en $MJm^{-2}j^{-1}$ et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) en mm) ; elles sont relatives à la période 1960-2001 et à la station de Montélimar (Latitude 44.35° N, Longitude 4.44° E, et Altitude 73 m).

- les séries climatiques journalières (Tx, Tn, P, Rg, ETP, humidité relative (Hr) en % et vitesse du vent (u2) en ms^{-1}) simulées par le modèle ARPEGE-CLIMAT pour un site ayant les coordonnées Latitude 44.43°N, Longitude 4.78° E et Altitude 371 m, celui-ci étant le plus proche de la zone d'étude.

- les débits moyens mensuels (période 1966-2001) correspondent à la station Saillans (Latitude 44.72° N, Longitude 5.1° E, Altitude 263 m).

- les caractéristiques des types de sol de la vallée de la Drôme ont été obtenues d'une étude réalisée par la S.C.P. (1987) ainsi que, les itinéraires techniques culturaux du maïs ont été obtenus à partir de références techniques reportés par Zanker (1999).

Modèle atmosphérique ARPEGE-CLIMAT

Des scénarii climatiques journaliers, simulés par le modèle ARPEGE-CLIMAT, ont été mis à la disposition de cette étude par Météo-France (Gibelin et Déqué, 2001). Ce modèle a été régionalisé sur une grille à haute résolution de 71 points d'environ 50 km x 50 km sur le bassin versant du Rhône. Pour chaque point de la grille étudiée, le modèle simule deux séries temporelles d'une durée de 30 ans, l'un**e** représentant l'état initial du climat avec un taux de CO_2 de 330 ppm (période 1960-1989) et l'autre l'état final du climat avec un doublement du taux de CO_2 (scénario B2, période 2070-2099), scénario relativement optimiste sur le comportement économique et environnemental des sociétés.

Ces séries ont permis de calculer les variations (ou anomalies) mensuelles au niveau des moyennes et des écarts types attendues de la température moyenne (Tm) où Tm=(Tx+Tn)/2, P, Rg et ETP. Les valeurs des ETP ont été calculées par la formule Penman-Monteith (Allen *et al*., 1998). On appelle anomalie la différence (pour les températures) ou le rapport (pour les pluies, le Rg et l'ETP) entre les moyennes des séries simulées futures et actuelles.

Simulateur de climat LARS-WG

Les simulateurs de climat sont utilisés pour générer des scénarios climatiques locaux basés sur les propriétés stochastiques des séries climatiques observées. LARS-WG a été utilisé dans plusieurs études de climat en Europe et a donné lieu à un bon ajustement des séries simulées aux séries historiques (Semenov *et al*., 1998).

Le simulateur LARS-WG a été appliqué à la série climatique journalière observée à la station de Montélimar (période 1960-1989). Les variables considérées sont : Tx, Tn, P et Rg. La comparaison entre les séries observées et celles générées est basée sur les tests statistiques de Student et de Fisher. Cette démarche a permis de générer une série climatique représentant le climat local actuel. La série d'ETP journalière a été calculée par la formule de Priestley et Taylor (1972) dépendant uniquement de Tx, Tn et du Rg. Ensuite, les anomalies mensuelles de température et de pluie ont été introduites dans le simulateur LARS-WG pour générer le scénario climatique journalier futur, tout en restituant une variabilité climatique, ce qui évite d'appliquer les mêmes variations moyennes mensuelles pendant toute la série (Semenov et Barrow, 1997).

Les effets des modifications climatiques et de l'enrichissement en gaz carbonique sur la production des cultures

En ce qui concerne l'effet du changement climatique sur les agro-systèmes, deux points sont essentiels : la prise en compte des effets climatiques stricts, se rapportant à l'augmentation de la température, et les effets résultants de l'enrichissement en CO_2.

Les effets strictement liées à l'accroissement de la température peuvent se traduire par une baisse de rendement en matière sèche totale du fait d'une réduction de la durée du cycle (on cumule moins d'énergie solaire, moteur de croissance) ou du fait que l'on dépasse des seuils de température critique, par exemple les températures élevées pouvant entraver la pollinisation ou la fécondation pour le sorgho ou le maïs (Wesley *et al*., 2002 ; Tardieu, 2005).

Les effets strictement liées à l'accroissement du taux de CO_2 sont de 2 types : la teneur élevée en CO_2 favorise la photosynthèse, tandis qu'elle provoque une fermeture stomatique, ayant pour conséquence de réduire la transpiration.

L'amplitude des effets sur les fonctions photosynthétiques, bien qu'ils soient l'objet de nombreux travaux actuellement, ont des résultats sont assez controversés. Le consensus est plus net sur une augmentation de production pour les C3 que pour les C4, mais elle est néanmoins reconnue pour la plupart des C4. (Ainsworth *et al*., 2002 ; Leakey *et al*., 2004 ; Long *et al*., 2006). Du point de vue de la production en grains, la question est plus difficile, car le rendement en grains met en jeu des phénomènes combinés de formation et de croissance d'organes. Souvent longs à observer et à analyser, plus difficiles à quantifier, (comme les durées de stades, le nombre et la taille d'organes initiés), ces phénomènes ont été peu étudiés dans le cadre de l'enrichissement en CO_2 et aucune conclusion n'est définitive à ce jour (Pritchard *et al*., 1999 ; Borras *et al*., 2004 ; Long *et al*., 2006). Si la morphogenèse des grains n'est pas perturbée par l'augmentation de teneur en CO_2, c'est-à-dire si le nombre de grains formés ne limite pas le rendement, l'indice de récolte (rapport grains/plante entière) peut ne pas être affecté.

L'autre conséquence de l'accroissement de CO_2 concerne la diminution de la conductance stomatique, qui a pour effet de réduire la transpiration de la plante, et d'augmenter ainsi l'efficience de l'eau consommée. L'expérimentation en conditions contrôlées sur maïs réalisée par Bethenod *et al.* (2001) montre, en effet, que le doublement de la teneur en CO_2 augmente l'efficience de l'eau de près de 25 %. Un même ordre de grandeur est confirmée dans les expérimentations de Samarakoon et Gifford (1996), ou en enrichissement de plein air (Conley *et al.*, 2001).

Le modèle de culture STICS :

STICS (Brisson *et al.*, 1998) permet de simuler au pas de temps journalier le bilan hydrique et la croissance de la culture au cours d'une année. Ses variables d'entrée son relatives au climat, au sol et au système de culture. Ses variables de réponse son relatives à la production et à l'environnement. La croissance de la culture de maïs est régie par le bilan de carbone, ainsi que par un indice thermique (degrés jour). L'existence de stress hydrique est prise en compte par deux indices qui peuvent réduire la croissance foliaire et l'accumulation de biomasse en conditions d'alimentation limitantes. Les effets des techniques culturales sur le fonctionnement du système sol-culture-climat sont aussi pris en compte.

Le principe de la production de grains, décrit dans Brisson *et al.* (1998) est celle d'un indice de récolte progressif (Muchow *et al.,* 1990), dont la vitesse est exprimée en inverse de jours. Le rendement en grains est normalement arrêté à la fin de la durée de remplissage des grains, mais il peut être limité par le produit du nombre de grains formés (dépendant de la vitesse de croissance de la plante pendant la période entourant la floraison (Andrade, 1995) et du poids maximum d'un grain.

Simulation des effets climatiques du CO_2 dans le modèle

Les effets climatiques simulés dans le modèle STICS sont ceux qui ont été validés sur maïs dans des conditions françaises variées (Brisson *et al.*, 2002). D'une façon générale, les effets des températures sont linéaires, et les effets des températures extrêmes (hautes ou basses) sont pris en compte à travers des seuils thermiques (blocage des vitesses de développement, de croissance foliaire et de croissance des grains, annulation de ces vitesses aux températures très élevées dans la version la plus récente).

Dans le modèle, les deux effets du CO_2 peuvent être pris en compte celui qui s'applique directement sur la production (modification du coefficient de conversion du rayonnement intercepté), celui qui, suite à une augmentation de la fermeture stomatique réduit la transpiration.

Le doublement du taux de CO_2 (effet direct du CO_2) induit une amélioration de l'efficience de conversion de la matière sèche. Cette efficience est modifiée proportionnellement à la teneur en CO_2 de l'atmosphère. Cette modification est basée sur le formalisme proposé par Idso (1991), dont le principe est la proportionnalité entre les ratios EPSIB enrichie/EPSIB standard appelé $ALPHACO_2$.

$$EPSIB = EPSIB \times ALPHACO_2 \times \left[1.4 - 0.4 \frac{CO_2}{330} \right]$$

Les valeurs d'$ALPHACO_2$ pour le maïs trouvées dans la bibliographie sont assez variables : 1.98 (Ruget *et al*., 1996) et 1.64 (Stockle *et al*., 1992).

L'effet du CO_2 sur la régulation stomatique est simulé dans STICS en utilisant un modèle résistif adapté du travail de Shuttleworth et Wallace (1985). Dans ce modèle, l'évapotranspiration est contrôlée par les résistances aérodynamiques entre sol, végétation et air. Ce calcul qui met en jeu un bilan d'énergie nécessite en outre des données de vent et d'humidité de l'air.

Configuration des simulations : scénarios, générateur climatique et modèle de culture

techniques culturales

Les conditions de simulation de la culture du maïs grain dans STICS sont : les scénarii climatiques locaux actuels et futurs générés avec LARS-WG ; trois dates de semis (5/04, 20/04 et 20/05) le 20 avril étant la date de semis la plus pratiquée dans la Drôme ; trois ratios de satisfaction des besoins en eau RS ; RS est défini par le rapport transpiration réelle (TR) / transpiration potentielle (TP). Ces ratios conduisent à des irrigations d'autant plus faibles et tardives que le ratio est, lui-même, faible. Trois types de sol ont été choisis sur la base des études pédologiques locales. Dans le calcul des jours thermiques, des seuils de température minimale et maximale (6° et 28°) ont été fixés, en rapport avec le type de culture analysé.

effet du CO_2 : production primaire, production de grains et transpiration

Pour le calcul de l'efficience de conversion une valeur de $ALPHACO_2$ égale à 1.98 a été retenue. Cette valeur a été obtenue sur des expérimentations faites en France sur une variété de maïs proche de celle utilisée dans la vallée de la Drôme.

En raison des incertitudes concernant les effets des changements climatiques et de teneur en CO_2 de l'atmosphère sur les lois de mise en place et de remplissage des grains, le choix fait a été d'estimer le rendement en grains par l'utilisation d'un indice de récolte fixé à 0.5, valeur la plus courante selon Muchow *et al*., (1990). Ce choix s'appuie sur deux hypothèses : la possibilité d'adapter les tailles de puits (nombre de grains) aux augmentations de productivité, et le faible risque d'occurrence de problèmes relatifs à la mise à grains. En effet, la fécondation et la mise en place des grains ne sont pas affectées, car elles se produisent à des températures moyennes journalières inférieures à celles auxquelles on constate des dommages de mise en place des grains, 35 °C pour le maïs selon Commuri et Jones (1999).

Enfin, l'effet de réduction de la conductance stomatique n'a pas été pris en compte, car sa mise en œuvre dans STICS nécessite des variables climatiques supplémentaires (vent et humidité) non accessibles au moment du travail à partir des données issues des modèles de circulation générale.

conditions initiales

Les simulations ont été considérées indépendantes d'année en année, la teneur en eau initiale du sol nu étant fixée à la capacité au champ au premier jour de la simulation : jour julien 85, la date de fin de simulation étant fixée au jour julien 360 (cf. Tableau 1).

La configuration de simulation retenue permet donc d'analyser séparément les effets climatiques stricts, en distinguant 2 types d'attribution d'assimilats aux grains, puis les

effets d'augmentation de production dus à la forte teneur en CO_2. Le fait d'avoir négligé l'influence de la teneur en CO_2 sur la conductance stomatique sera discuté ultérieurement.

Tableau 1. Données d'entrée du modèle STICS ; l'astérisque (*) indique les paramètres utilisés pour les simulations de référence.

Culture : maïs variété Cecilia*		Sol limono-argileux*		Seuil d'irrigation
Pilotage : température de l'air	Date de semis	Profondeur m	Réserve utile (RU) mm/m	RS =TR/TP
Kc max= 1.20*	05/04	1.2	180	0.7*
Seuil Tn 6 °C* ; Seuil Tx 28 °C*	20/04*	1.0*	129*	0.5
Densité de semis 8 plantes/m^2*	05/05	0.6	53	0.3
Azote 60 kg/ha, 5 jours avant la date de semis*	Indice de récolte 0.5*	Albedo 0.19*	Teneur en azote 0.12 %*	Non irrigué
Azote 140 kg/ha, 60 jours après la date de semis*	Profondeur de semis 4 cm*	Teneur en argile=15 % *	Dose maximale 40 mm*	Efficience d'application 100 %*
L'astérisque (*) indique les paramètres utilisés pour les simulations de référence				

traitements des données de sortie

Les résultas présentés sont des sorties de STICS moyennées pour les périodes de 30 ans étudiées, ainsi que leurs écarts-types et coefficients de variation. Sauf indication contraire, ces résultats concernent une production de maïs sous irrigation optimale pour des dates de semis usuellement appliquées dans la région.

RESULTATS

Comportement hydrologique et climatique observé

Une comparaison des débits mensuels moyens à la station de contrôle Saillans entre les périodes 1966-1989 et 1990-2001 atteste d'une diminution de 18 % des débits moyens pendant la période d'étiage (juin, juillet, août), passant ainsi de 9.4 à 7.7 m^3/s. Le débit moyen annuel quant à lui, diminue de 18.4 à 17.7 m^3/s. La température moyenne durant la saison d'étiage a augmenté de 1.1 °C avec un accroissement mensuel moyen de 0.7 °C en juillet. Les différences entre les moyennes annuelles de pluie sont faibles et pendant la saison d'étiage est constatée une diminution de la pluie moyenne de 7 %, celle-ci passant de 180 à 167 mm avec une variabilité de 45 % ; les précipitations augmentent de 25 % en juillet et diminuent de 40 % en août. En ce qui concerne l'ETP et le Rg les différences entre les deux périodes restent à peu près les mêmes (cf. tableau 2).

Tableau 2.Comparaison des variables climatiques et des débits historiques station météorologique de Montélimar et station hydrométrique de Saillans, Drôme.

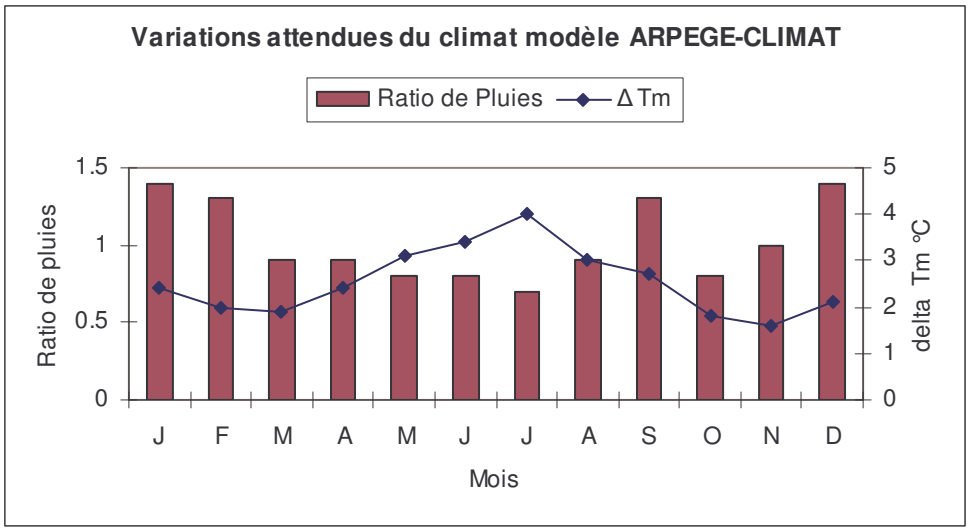
	Saison d'étiage juin juillet août (1960-1989)					Saison d'étiage juin juillet août (1990-2001)				
	Q[1] (m^3/s	Tm (°C)	P (mm)	ETP (mm)	Rg (MJm^{-2})	Q[1] (m^3/s	Tm (°C)	P (mm)	ETP (mm)	Rg (MJm^{-2})
Moyenne	9.4	20.5	180	517	2171	7.7	21.6	167	520	2136
Ecart type	3.9	1.8	81	42	82	6.2	1.9	76	40	100

CV(écart type/ moyenne en %)	42	9	45	8	4	81	9	45	8	5
Maximale	17.1	25	379	622	2323	23.7	24.3	315	582	2267
Minimale	2.2	17	43	422	1971	3.4	17.4	90	439	1933
Juillet	7.4	21.7	44	194	784	7.2	22.5	55	191	763
Annuelle	18.4	12.4	919	1069	5226	17.7	13.3	912	1080	5129
[1] Q : débit historique comparé entre les périodes 1966-1989 et 1990-2001										

Génération des scénarii climatiques locaux actuel et futur

Dans le cas de la Drôme, les variations mensuelles de la pluie et de la température prévues par le modèle ARPEGE-CLIMAT sont les suivantes : en juillet, la pluie moyenne diminue de 52 à 36 mm et sa variabilité diminue de 56 à 53 %. En revanche, la température moyenne augmente de 22.1 à 26.1 °C et sa variabilité passe de 9 à 7 %. La répartition des variations mensuelles de température montre une augmentation plus importante en été qu'en hiver. Celle-ci augmente de 4 °C en juillet et de 2 °C en décembre. Les précipitations en juin, juillet et août diminuent de 18 %, tandis qu'en décembre, janvier et février elles augmentent de 35 % (cf. figure 1).

Figure 1. Variations mensuelles régionalisées de la pluie et de la température moyennes



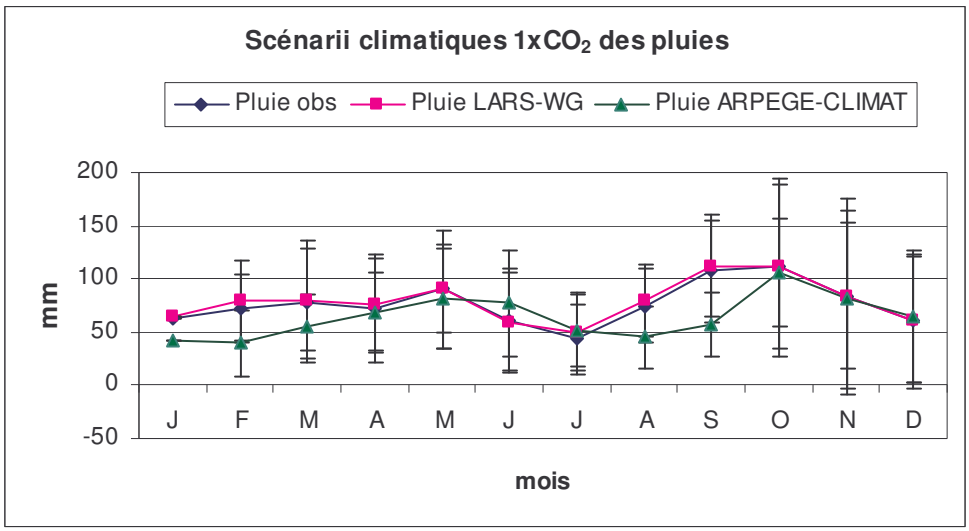
prévues par ARPEGE-CLIMAT dus à l'effet de l'augmentation du taux de CO_2 dans l'atmosphère; cas de Montélimar, Drôme.

En ce qui concerne la variabilité des facteurs climatiques, la précipitation reste de loin le paramètre le plus incertain, bien que la variabilité de la précipitation moyenne annuelle soit de 14 %, la variabilité intra annuelle peut aller jusqu'à 60 % pour les scénarios étudiés.

Le modèle LARS-WG a été ajustée de manière acceptable (en termes de moyennes et des écart types mensuels) à la série historique. Les tests statistiques de Student (pour les moyennes) et de Fisher (pour les variances) des séries mensuelles n'ont pas eu de différences significatives (au seuil $p > 0.5$). Les séries climatiques journalières de Tm, P, Rg y ETP ont été comparées pour le climat actuel (série historique 1960-1989, série

ARPEGE-CLIMAT 1xCO_2 et série climat local LARS-WG 1xCO_2). Les résultats attestent des faits suivants : le modèle LARS-WG reproduit de manière acceptable les valeurs moyennes de Tm et Rg par rapport aux séries historiques. La pluie est surestimée de 12 % et l'ETP est sous estimée de 5 %. Les écarts-types moyens annuels de Tm, Rg, ETP et P sont sous-estimés. Par contre, les valeurs moyennes et les écarts-types annuels de ces variables simulées par le modèle ARPEGE-CLIMAT présentent un biais plus important par rapport aux séries historiques. Notamment, dans le cas de la pluie (cf. Figure 2).

Figure 2. Comparaison des séries de pluies mensuelles (Scénario actuel 1xCO_2) entre : la série historique, la série simulée par ARPEGE CLIMAT et la série simulée par



LARS-WG ; cas de Montélimar, Drôme.

L'utilisation du scénario de base du modèle ARPEGE-CLIMAT, ne peut se faire que par un changement d'échelle, car le biais entre une échelle régionale et une échelle locale peut parfois être important (Schulze, 2000 ; Baron *et al.*, 2005). Toutefois, il est important de signaler, que la série synthétique journalière de pluie générée par LARS-WG sur un échantillon aléatoire de 30 ans, présente des écarts-types mensuels plus faibles que la série observée. De ce fait, la variabilité climatique simulée pour le climat présent est plus faible que l'observée.

Les variations mensuelles de Tm et P prévues par ARPEGE-CLIMAT ont été prises en compte dans le modèle LARS-WG pour générer le scénario du climat futur 2xCO_2. Les variables climatiques journalières générées, pour les climats actuel et futur sont Tx, Tn, Rg, P ; l'ETP a été calculée à partir de valeurs générées de Tx, Tn et Rg. Les scénarii climatiques concernant la pluie et la température sont décrits dans la Figure 3.

Figure 3. Simulation par LARS-WG des scénarii climatiques 1xCO_2 et 2xCO_2 des pluies et des températures, à partir des variations mensuelles prévues par ARPEGE-CLIMAT; cas de Montélimar, Drôme.

Effet indirect et direct du CO_2 sur le maïs

A. Effet indirect (climat seul) sur la durée, la dose d'arrosage et le rendement

Sous l'hypothèse $2xCO_2$ (cf. Tableau 3) la durée du cycle de culture se réduit en moyenne de 34 jours**,** soit 20 % et la dose d'arrosage augmente de 14 %. Le fait d'avoir à satisfaire les mêmes besoins en eau d'irrigation sur une période plus courte peut contribuer à accentuer le déficit en eau sur l'ensemble du bassin en période de pointe. De même, le rendement du maïs diminue de 15 % ; cet effet est lié au fait que la durée de cycle du maïs est caractérisée par une somme de températures plus vite atteint en climat plus chaud. Cela a pour conséquence une durée de production plus courte, donc un rendement plus faible.

Tableau 3. Effet simulé par le modèle STICS du réchauffement climatique sur la durée du cycle, la dose d'arrosage et le rendement en maïs grain, Drôme ; paramètres de référence (cf. Tableau 1).

Culture : Maïs	Scénario $1xCO_2$				Scénario $2xCO_2$ effet indirect du CO_2			
RS=0.7	Dose mm	Durée jours	MS t/ha	Rdt t/ha	Dose mm	Durée jours	MS t/ha	Rdt t/ha
Moyenne sur 30 ans	300	165	23.8	11.9	342	131	20.2	10.1
CV (%)	19	5	4	4	12	3	5	5
Maximale	420	182	25.6	12.8	420	138	22.0	11.0
Minimale	218	153	21.8	10.9	258	123	18.0	9.0
Rdt est le rendement en grain du maïs calculé avec un indice de récolte IR=0.5 ; MS est la matière sèche ;								

La fréquence des arrosages du maïs a été analysée pour les scénarii climatiques actuel et futur. Pour un scénario $2xCO_2$, la fréquence des arrosages augmentent pendant la saison d'étiage. Notamment au mois de juillet ; 27 années sur 30, il faut apporter quatre à cinq arrosages de 40 mm tandis que pour le scénario $1xCO_2$; 22 années sur 30, il faut apporter trois à quatre arrosages de 40 mm (cf. tableau 4). Dans cette période, les accroissements de température +4 °C en juillet et +3.1 °C en août, pourraient entraîner pour le maïs une augmentation des besoins en eau d'irrigation de 25 % en juillet.

Tableau 4. Effet simulé par le modèle STICS du réchauffement climatique sur le nombre et la répartition des irrigations nécessaires par cycle de culture du maïs ; paramètres de référence (cf. Tableau 1).

Culture : Maïs Nombre d'irrigations	Scénario $1xCO_2$				Scénario $2xCO_2$			
	Juin	Juillet	Août	Septembre	Juin	Juillet	Août	Septembre
1	4	1	0	12	15	0	1	1
2		5	10	6	10	0	12	0
3		11	13	0	0	3	15	0
4		11	7	0	0	14	2	0
5		2	0	0	0	13	0	0
Nombre d'années	30	30	30	30	30	30	30	30

Pour les trois profondeurs et trois réserves utiles des sols considérés dans les simulations, STICS simule une réduction de 15 % sur le rendement du maïs et un accroissement d'environ 40 mm de la dose d'arrosage avec une réduction de 20 à 12 % de sa variabilité (cf. tableau 5). L'accroissement de température pourrait donc augmenter la fréquence des apports et les besoins en eau.

Pour les trois dates de semis simulées du maïs sur un sol de un mètre de profondeur avec des apports en eau quasi optimaux (RS = 0.7). STICS simule une réduction de la durée du cycle de culture qui varie de 20 à 24 % avec une baisse des rendements semblable autour de 15 % lorsque l'efficience de conversion n'est pas corrigée de l'effet $2xCO_2$ (cf. tableau 5). De même, une réduction de la pluie saisonnière moyenne de 43 % avec une variabilité de 25 %, se traduit par une augmentation de la dose d'arrosage moyenne de 14 % dont la variabilité diminue de 19 à 12 %.

Tableau 5. Effets simulés par STICS du réchauffement climatique sur la durée du cycle, la dose d'arrosage et le rendement du maïs selon trois dates de semis et trois types de sol dans la Drôme ; paramètres de référence (Tableau 1).

Culture : maïs	Scénario $1xCO_2$					Scénario $2xCO_2$ effet indirect du CO_2				
Profondeur du sol (m)	Dose mm	CV %	MS t/ha	Rdt t/ha	CV[1] %	Dose Mm	CV %	MS t/ha	Rdt t/ha	CV[1] %
1.2	260	21	24.0	12.0	3	307	14	20.3	10.2	5
1.0	300	19	23.8	11.9	4	342	12	20.2	10.1	5
0.6	389	10	22.9	11.5	4	398	9	19.9	10.0	6
Date de semis	Dose mm	Durée jours	MS t/ha	Rdt t/ha	Pluie[2] Mm	Dose mm	Durée jours	MS t/ha	Rdt t/ha	Pluie[2] mm
05 avril	314	173	24.4	12.2	466	346	139	20.8	10.4	285
20 avril	300	165	23.8	11.9	462	342	131	20.2	10.1	265
05 mai	288	161	23.2	11.6	452	334	123	19.7	9.9	251

[1] Les coefficients de variation CV correspondent à MS et Rdt des deux scénarii ; [2] Le CV de la pluie est de 25 % pour les deux scénarii ; IR = 0.5 est considéré dans les deux scénarii ; RS = 0.7

Quelle que soit la date de semis, les besoins en eau d'irrigation augmentent dans la saison de culture. Cependant une date de semis précoce permettrait de réduire le nombre d'arrosages au mois d'août, qui est le mois le plus critique en matière de disponibilité en eau dans la rivière Drôme.

B. effet climatique et effet direct du CO_2 sur la photosynthèse

Effet sur le rendement du maïs selon le seuil de stress hydrique pour le déclenchement des irrigations

Pour le maïs, trois seuils de déclenchement des irrigations et l'absence totale d'irrigation (culture en sec) ont été simulés sur un sol limono argileux (cf. Tableau 1). Les rendements du maïs ont été calculés en considérant les effets combinés (indirect et direct) du CO_2. L'effet direct du CO_2 dû à l'amélioration de l'efficience de conversion avec un indice de récolte de 0.5 a été simulé pour le deux scénarii climatiques. L'effet du changement climatique sur le rendement du maïs, pour un RS = 0.7, reste à peu près le même, avec une augmentation de l'indice de productivité de l'eau WUE de 13 % et

une augmentation de la dose d'arrosage de 14 % avec une variabilité moindre. En revanche, dans des conditions de stress hydrique, les pertes en rendement varient de 4 à 20 % et les accroissements de WUE varient de 13 % à 5 % selon le niveau de stress (cf. Tableau 6).

Pour un scénario 1xCO_2 (Cf. Tableau 6), une réduction du RS de 0.7 à 0.3 induit une perte en rendement de 26 % avec une diminution de WUE de 10% et une réduction de la dose d'arrosage de 45 %. La variabilité des rendements passe de 4 % (apport d'eau quasi optimal) à 8 %. Par contre, dans le cas d'un scénario 2xCO_2, une diminution de RS de 0.7 à 0.3 provoque une perte en rendement de 32 % et une diminution de WUE de 15 %. La variabilité du rendement passe de 5 à 10 %.

Tableau 6. Simulation par le modèle STICS de l'effet du stress hydrique sur le rendement et la productivité en eau du maïs dans la Drôme ; paramètres de référence (Tableau 1).

Culture : maïs	Scénario 1xCO_2					Scénario 2xCO_2 avec effet direct et indirect du CO_2				
Ratio de stress hydrique RS=TR/TP	Dose (mm)	ETR (mm)	MS (T/ha)	Rdt (t/ha)	WUE kg/m^3	Dose (mm)	ETR (mm)	MS (t/ha)	Rdt (t/ha)	WUE kg/m^3
RS = 0.7										
Moyenne	300	683	23.8	11.9	1.73	342	615	23.9	11.9	1.95
CV (%)	19	3	4	4	5	12	3	5	5	6
RS = 0.5										
Moyenne	240	637	21.3	10.7	1.67	274	563	20.6	10.3	1.83
CV (%)	20	4	5	5	5	14	4	6	6	6
RS = 0.3										
Moyenne	164	570	17.7	8.8	1.56	193	491	16.3	8.1	1.66
CV (%)	27	5	8	8	6	16	5	10	10	9
En sec										
Moyenne		435	11.5	5.7	1.30		338	9.3	4.6	1.36
CV (%)		12	22	22	12		11	21	21	12
ETR est l'évapotranspiration réelle saisonnière ; WUE est la productivité de l'eau du maïs (Rdt/ETR) ; Rdt est calculés avec un IR = 0.5 pour les deux scénarii.										

DISCUSSION

Les effets des modifications climatiques et de l'enrichissement en CO_2 pris en compte dans le modèle STICS.

-production

Les effets spécifiques de la teneur en CO_2, la validité des lois d'effet des facteurs climatiques dans le cadre des changements climatiques (apparition de phénomènes spécifiques) ou les interactions entre facteurs, qui ont été simplifiés à l'extrême dans ces simulations nécessitent d'être réexaminés, de façon à estimer l'impact des approximations réalisées et savoir si elles sont de nature à remettre en cause les conclusions.

Les expériences sur l'enrichissement de CO_2 en conditions contrôlées réalisées par Ruget *et al*. (1996) montrent que l'augmentation de CO_2 a au plus autant d'incidence sur le rendement que sur la production en matière sèche totale. En fait, la production de

grains n'est augmentée par l'enrichissement en CO_2 que si celle-ci est relativement faible en atmosphère normale. L'augmentation de rendement a lieu lorsque la taille des puits initiés n'est pas limitante. Le maintien de l'indice de récolte correspond donc à la meilleure production possible : nos résultats correspondent à cette hypothèse.

Cela ignore les effets éventuels de limitation du rendement par le nombre de grains mis en place, qu'il s'agisse des phénomènes entourant la floraison (morphogénèse, floraison, fécondation) ou de leur remplissage, alors que de tels effets existent et sont bien connus (Andrade, 1995 ; Borras *et al*., 2004) ainsi que ceux relatifs à la période allant de l'anthèse à la floraison femelle qui est sensible aux températures très élevées (Commuri et Jones, 1999). Au total, malgré l'hypothèse du maintien possible de l'indice de récolte, le rendement n'est maintenu égal que grâce à la compensation, dans ces conditions, de la diminution due au raccourcissement du cycle par le gain lié à la stimulation de photosynthèse.

En conclusion, même si l'étude des conditions futures dans la vallée de la Drôme nécessite confirmation de l'hypothèse de maintien possible de l'indice de récolte, ainsi qu'une analyse fine des processus concernant la production de grains et si l'augmentation de température n'est pas valorisée par des variétés à cycle plus long (adaptation des pratiques agricoles), le rendement attendu est au maximum maintenu. Les risques d'accident climatiques entravant fécondation et mise en place des grains nécessiteraient une étude spécifique.

- efficience d'utilisation de l'eau

L'efficience d'utilisation ou productivité de l'eau WUE est environ 13 % plus forte en atmosphère future qu'en atmosphère actuelle, sans tenir compte de la réduction de conductance. La prise en compte de ce facteur diminuera encore la transpiration, donc améliorera WUE. Tout porte donc à croire que cette efficience puisse être bien supérieure à 13 %, référence faite aux travaux expérimentaux faisant état d'un accroissement de 20 à 25% en conditions bien irriguées (Samarakoon et Gifford, 1996 ; Bethenod *et al*., 2001).

En dépit d'importants efforts consentis pour améliorer la résistance à la sécheresse des plantes, il est cependant peu probable que l'on puisse atteindre, dans des conditions de restriction d'eau, des rendements aussi élevés qu'en conditions irriguées (Porter et Semenov, 2005 ; Tardieu, 2005), car le niveau de production d'une plante est fortement corrélé à celui de sa transpiration.

CONCLUSIONS

Les constations portant sur l'évolution du climat sont les suivantes :

- le climat historique de la Drôme a varié dans la dernière décennie. En effet, la température moyenne annuelle a augmenté de 0.9 °C. La pluie moyenne annuelle demeure au voisinage de 900 mm avec des variations mensuelles plus importantes.

- les anomalies du climat prévues par le modèle ARPEGE-CLIMAT sont une augmentation de la température moyenne annuelle de 2.5 °C et de 4.0 °C en juillet, et une pluie moyenne annuelle demeurant inchangée malgré une diminution de 30 % en

juillet. Compte tenu du biais observé entre le scénario climatique simulé par le modèle ARPEGE-CLIMAT et le scénario climatique historique à Montélimar (Drôme) le simulateur de climat LARS-WG a été utilisé pour générer un scénario climatique plus représentatif des valeurs historiques.

Les conclusions précédentes, décrivent les conditions dans lesquelles le modèle de culture STICS a été appliqué.

Eu égard aux discussions relatives à la façon dont le modèle STICS intègre les effets du changement climatique, les principales conclusions portant sur les effets possibles de ce dernier sur la production agricole et la demande en eau dans la vallée de la Drôme, sont les suivantes :

- l'effet indirect du changement climatique sous l'hypothèse $2xCO_2$ induit une réduction de 21 % de la durée du cycle du maïs et une perte en rendement de 15 % ainsi qu'une augmentation de la dose d'arrosage de 14 %.

- l'effet direct d'un doublement du taux de CO_2 se traduit par une amélioration de l'efficience de conversion de l'énergie incidente en biomasse qui compense l'effet de réduction de la durée cycle. Sous l'hypothèse du maintient de l'indice de récolte au voisinage de ses potentialités (IR = 0.5), le rendement en grain du maïs ne serait pas affecté par le changement climatique.

- les simulations montrent qu'une date précoce de semis permet de décaler la période d'arrosages et de réduire la dose d'irrigation en août, période où la disponibilité en eau de la rivière est la plus faible. Cette pratique visant à décaler la date de semis en vue de se soustraire aux contraintes d'irrigation, a d'ailleurs été testée avec succès dans deux pays du pourtour méditerranéen sur le cas du tournesol (Gimeno *et al*., 1989 en Espagne ; Boujghagh, 1990 au Maroc). On peut gager sur le fait qu'une telle pratique n'incite pas l'agriculteur à utiliser des variétés à cycle long dans le but d'accroître ses rendements suites aux contraintes fortes sur la ressource (faible disponibilité de la ressource en période d'étiage).

- En considérant les effets indirect et direct d'un doublement du taux de CO_2, une réduction du seuil de déclenchement de l'irrigation RS de 0.7 à 0.3, induit des pertes en rendement de 26 %, pour le climat présent et de 32 %, pour le climat futur. L'effet du stress hydrique sur le rendement peut être plus accentué pour un scénario $2xCO_2$ que pour le scénario $1xCO_2$. La variabilité du rendement passe de 4 % en conditions de satisfaction en eau quasi optimales à 22 % en l'absence d'irrigation. Ce résultat peut être rapproché de celui d'Utset et al. (2006) qui, analysant la variabilité des échanges hydriques, constatent aussi une variabilité beaucoup plus élevée en années sèches qu'en années humides.

- les effets indirect et direct d'un doublement du taux de CO_2 induisent dans des conditions d'apports quasi optimaux, une augmentation de la productivité de l'eau WUE d'environ 13 %. Cependant, dans des conditions de stress hydrique, ces accroissements diminuent de 13 % à 5 % selon le seuil de stress.

REFERENCES

Abraha MG, Savage MJ. 2006. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. Agriculture, Ecosystems & Environment 115(3): 150-160.

Ainsworth EA,. Davey PA, Bernacchi CJ, Dermody OC, Heaton EA, Moore DJ, Morgan PB, Naidu SL, Yoo Ra H, Zhu X, Curtis PS, Long SP. 2002. A meta-analysis of elevated [CO_2] effects on soybean (Glycine max) physiology, growth and yield. Global Change Biology 8(8): 695-709.

Allen R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Paper 56 FAO Irrigation and Drainage, Rome, 300 p

Andrade FH. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. Field Crops Research 41(1): 1-12.

Baron C, Sultan B, Balme M, Sarr B, Teaore S, Lebel T, Janicot S, Dingkuhn M. 2005. From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact. Phil. Trans. R. Soc. B360: 2095-2108.

Bethenod O, Ruget F, Katerji N, Combe L, Renard D. 2001. Impact of atmospheric CO_2 concentration on water use efficiency of maize. MAYDICA 46 (2): 75-80.

Boone A, Noihlan J, Etchevers P. 2000. GICC-Rhône climat scenarios. Rapport de travail, CNRM. 55p.

Borras L, Slafer GA, Otegui ME. 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. Field Crops Research 86: 131-146.

Boujghagh M. 1990. Effets des semis d'hiver sur deux génotypes de tournesol dans la région du Saïs –Fès. Helia 13(13): 107-119.

Brisson N, Mary B, Ripoche D, Jeuffroy MH, Ruget F, Nicoullaud B, Gate P, Devienne-Barret F, Antonioletti R, Durr C, Richard G, Beaudoin N, Recous S, Tayot X, Plenet D, P. P, Machet JM, Meynard JM, Delécolle R. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie 18: 311-346.

Brisson N, Ruget F, Gate P, Lorgeou J, Nicollaud B, Tayot X, Plenet D, Jeuffroy MH, Bouthier A, Ripoche D, Mary B, Justes E. 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. Agronomie 22: 69-92.

Commuri PD, Jones RJ, 1999. Ultrastructural characterization of maize (Zea mays L.) kernels exposed to high temperature during endosperm cell division. Plant Cell and Environment 22 (4): 375-385.

Conley MM, Kimball BA, Brooks TJ, Pinter PJ, Hunsaker DJ, Wall GW, Adam NR, LaMorte RL, Matthias AD, Thompson TL, Leavitt SW, Ottman MJ, Cousins AB, Triggs JM. 2001. CO_2 enrichment increases water-use efficiency in sorghum. New Phytologist 151(2): 407-412.

Crossley JF, Polcher J, Cox PM, Gedney N, Planton S. 2000. Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations. Climate Dynamics, 16 : 949-961.

Delécolle R, Ruget F, Ripoche D, Gosse G. 1995. Possible effects of climatic change on wheat and maize crops in France. In Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts. ASA special publication no. 59: 241-257.

Déqué M, Marquet P, Jones RG.1998. Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. Climate Dynamics 14: 173-189.

Dols F. 1995. Etude de la gestion de la ressource en eau. DIREN Rhône-Alpes, Agence de l'eau R.M.C. 20p.

Gibelin AL, Déqué M. 2001. Un scénario a l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXIème Siècle. Météo France, Centre National de Recherches Météorologiques. Note de Travail 79. 64p.

Gimeno V, Fernández-Martínez JM, Fererez E. 1989. Winter planting as a means of drought escape in sunflower. Field Crops Research 22: 307-316.

Giorgi F, Mearns LO. 1991. Approaches to the simulation of regional climate change: a review. Rev. Geophys. 29: 191-216.

Gleyses G, Rieu T. 2004. L'irrigation en France: état des lieux 2000 et évolutions. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (France) : Editions Cemagref 60p.

Hansen JW, Indeje M. 2004. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. Agricultural and Forest Meteorology 125: 143-157.

Idso SB. 1991. A general relationship between CO_2-induced increases in net photosynthesis and concomitant reductions in stomatal conductance. Environmental and Experimental Botany 31: 381-383

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Impacts, adaptation and vulnerability to climate change. Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 1005p.

Leakey ADB, Bernacchi CJ, Dohleman FG, Ort DR, Long SP. 2004. Will photosynthesis of maize (*Zea mays*) in the US Corn Belt increase in future [CO_2] rich atmospheres? An analysis of diurnal courses of CO_2 uptake under free-air concentration enrichment (FACE).Global Change Biology 10(6): 951-962.

Long SP, Ainsworth EA, Leakey ADB, Morgan PB. 2005. Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields, Phil. Trans. R. Soc. B360: 2011–2020.

Long SP, Ainsworth EA, Leakey ADB, Nösberger J, Ort DR. 2006. Food for thought: lower than expected crop yield stimulation with rising CO_2 concentrations. Science 312(30):1918-1921.

Muchow RC, Sinclair TR, Bennett JM. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. Agronomy Journal 82: 338-343.

Porter JR, Semenov MA, 2005. Crop responses to climatic variations. Phil. Trans. R. Soc. B360:2021-2035.

Priestley CHB, Taylor RJ. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100: 81-92.

Pritchard SG, Rogers HH, Prior SA, Peterson CM. 1999. Elevated CO_2 and plant structure: a review. Global Change Biology 5: 807-837.

Rosenzweig C, Ritchie JT, Jines JW, Tsuji GY, Hildebrand P, 1995. Climate change and Agriculture: analysis of potential international impacts. ASA Special publication number 59, 382p.

Ruget F, Bethenod O, Combe L. 1996. Repercussions of increased atmospheric CO_2 on maize morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels. Maydica 41: 181-191.

S.C.P. 1987. Cartes d'aptitudes et de contraintes des sols à la mise en valeur agricole: Secteurs de Crest-Ouest, basse vallée de la Drôme. Société du Canal de Provence. D.D.A. 26, 2p.

Samarakoon AB, Gifford RM. 1996. Elevated CO_2 effects on water use and growth of maize in wet and drying soil . Australian Journal of Plant Physiology 23(1): 53-62.

Schulze R. 2000. Transcending scales of space and time in impacts studies of climate and climate change on agrohydrological responses. Agriculture, Ecosystems and Environment 82: 185-212.

Semenov MA, Barrow EM. 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. Climatic Change 35: 397-414.

Semenov MA, Brooks RJ, Barrow EM, Richardson CW. 1998. Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. Climate Research 10: 95-107.

Shuttleworth WJ, Wallace JS. 1985. Evaporation from sparse canopy an energy combination theory. Q. J. Roy. Meteor. Soc. 111: 839-855.

Stockle CO, Williams JR, Rosenberg CA, Jones CA. 1992. A method for estimating direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield crops. Agricultural Systems 38: 225-238.

Tardieu F. 2005. Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress (Tolérance des plantes aux déficits hydriques : limites physiques et possibilités de progrès) Comptes rendus. Géoscience 337 : 57-67.

Utset A, Martinez-Cob A, Farre I, Cavero J. 2006. Simulating the effects of extreme dry and wet years on the water use of flooding-irrigated maize in a Mediterranean landplane. Agricultural Water Management 85(1): 77-84.

Wesley BB, Edmeades GO, Barker TC. 2002. Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. Journal of Experimental Botany 53(366):13-25.

Zanker S. 1999. Modélisation et gestion de la demande agricole en eau dans la Drôme : Cas de la mise en application du SAGE Drôme. Mémoire de fin d'études, ENGREF-Cemagref, 55p.