

Impacts du changement climatique sur la demande en eau d'irrigation. Exemple du maïs dans la Drôme (France)

■ J.-M. GONZALEZ GAMACHO¹, J.-C. MAILHOL², F. RUGET³

Mots-clés : déficit hydrique, effet de serre, demande en eau, perte de rendement

Introduction

L'étude de l'impact régional du changement climatique sur la production agricole représente un enjeu 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 [IPCC, 2001]. Ce genre de prévisions invite les gestionnaires de l'eau à s'interroger sur le devenir de cette ressource dans certaines régions comme la vallée de la Drôme. Celle-ci est en effet depuis quelques années déjà confrontée à des problèmes de déficit en eau, mettant en cause la viabilité de l'agriculture irriguée [ZANKER, 1999].

Les modèles climatiques à basse résolution (grille de 500 km x 500 km) permettent de comprendre le comportement du climat à l'échelle globale ; cependant à l'échelle régionale, une résolution plus fine (60 km x 60 km) est nécessaire [GIORGI et MEARN, 1991]. Les progrès des modèles climatiques 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. Le modèle atmosphérique ARPEGE développé par Météo-France [DEQUE et al., 1998] a été régionalisé sur le bassin-versant du Rhône avec une résolution (50 km x 50 km). 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 en 1997 pour le but de réduire 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 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 [GLEYES et RIEU, 2004]. D'après [DOLS, 1995], les déficits en eau en période d'étiage estimés sont nuls une année sur quatre, de zéro à deux millions de m³ deux années sur quatre, et de deux à neuf millions de m³ 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 ressources en eau de la nappe d'accompagnement sont fortement sollicitées pour remplir 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.

Le but de ce travail est d'évaluer les impacts possibles du changement climatique sur la demande en eau d'irrigation et le rendement du maïs dans la basse vallée de la Drôme. Pour cela, trois types d'outils de simulation sont utilisés : les sorties numériques du modèle ARPEGE [GIBELIN et DEQUE, 2001] pour estimer les variations mensuelles du climat, le modèle

¹ Colegio de Postgraduados, Montecillo, Mexique.

² Cemagref UMR G-EAU, Montpellier France.

³ INRA, Avignon, France.

LARS-WG [SEMENOV et BARROW, 1997] pour générer des scénarii climatiques à l'échelle locale et le modèle de culture STICS [BRISSON et al., 1998] pour simuler le rendement et la demande en eau du maïs, culture phare dans la zone considérée.

Ce travail est issu du programme de recherche « Gestion des impacts du changement climatique dans le bassin du Rhône » (GICC- Rhône) financé par le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

1. Outils et méthodes

1.1. Données nécessaires

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

- la série historique de données climatiques journalières constituée : des températures maximale (Tx) et minimale (Tn) de l'air en °C, de la pluie (P) en mm, du rayonnement global (Rg) en $\text{MJm}^{-2}\text{j}^{-1}$ et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) en mm ; elles sont relatives à la période 1960-2001 et à la station de Montélimar (L : 44°35 N, G : 4°44 E et altitude : 73 m) ;
- les scénarii climatiques journaliers (1xCO₂ et 2xCO₂) de Tx, Tn, P, Rg et ETP simulés par ARPEGE pour un site près de Montélimar (L : 44°43N, G : 4°78 E et altitude : 371 m), le plus proche de la zone d'étude ;
- la chronique des débits journaliers (période 1966-2001) à la station Saillans (L : 44°72 N, G : 5°1 E, altitude : 263 m) ;
- les caractéristiques des types de sol de la vallée de la Drôme issues d'une étude réalisée par la Société du Canal de Provence (1987) ainsi que les itinéraires techniques culturaux du maïs obtenus à partir de références techniques reportés par [ZANKER (1999)].

1.2. Modèles

1.2.1. Modèles atmosphérique ARPEGE

Le modèle ARPEGE 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'une représentant l'état initial du climat avec un taux de CO₂ de 330 ppm (période 1960-1989) et l'autre l'état final du climat avec un doublement du taux de CO₂ (scénario B2, période

2070-2099), scénario relativement optimiste sur le comportement économique et environnemental des sociétés. Ces séries ont permis le calcul des variations mensuelles au niveau des moyennes et des écarts-types, de la température moyenne et de la pluie.

1.2.2. Simulateur de climat LARS-WG

Le modèle LARS-WG génère des scénarii climatiques locaux basés sur les propriétés stochastiques des séries climatiques observées [SEMENOV et al., 1998]. Le modèle a été ajusté à la série climatique journalière observée à la station de Montélimar (période 1960-1989). Les variables considérées sont : Tx, Tn, P et Rg. Les comparaisons entre les séries observées et celles générées sont basées sur les tests statistiques de Student et de Fisher. 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 variations mensuelles de température et de pluie ont été introduites dans le simulateur LARS-WG pour générer le scénario climatique journalier futur [SEMENOV et BARROW, 1997].

1.2.3. Modèle de culture STICS

Ce modèle simule au pas de temps journalier le bilan hydrique et la croissance de la culture au cours d'une année. Les variables d'entrée sont relatives au climat, au sol et au système de culture. Les variables de sortie sont 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). La présence 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.

- Effets des modifications climatiques et de l'enrichissement en CO₂ sur la production des cultures

En ce qui concerne l'effet du changement climatique sur les agro-systèmes, deux points sont importants :

- la prise en compte des effets climatiques stricts, se rapportant à l'augmentation de la température qui engendrent une réduction de la durée du cycle et de ce fait une perte en biomasse totale ;
- les effets résultants de l'enrichissement en CO₂ qui peuvent compenser cette perte grâce à un accroisse-

ment de l'efficacité de conversion, avec une diminution de la conductance stomatique réduisant la transpiration de la plante [SAMARAKOON et GIFFORD, 1996].

Ce dernier point fait l'objet de recherches dont les résultats demeurent encore assez controversés [LEAKEY *et al.*, 2004 ; LONG *et al.*, 2005]. Du point de vue de la production du grain, la question est plus difficile, car le rendement en grains met en jeu des phénomènes combinés de formation et de croissance. Ainsi, à ce jour, il n'existe pas de réponse déterminante à cette question.

• **Simulation des effets climatiques du CO₂ dans le modèle**

Les effets climatiques que simule le modèle STICS 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). Dans le modèle, la production en grain calculée par l'indice de récolte progressif peut avoir une vitesse exprimée en fonction de la température ou en fonction de la durée en jours.

L'action du CO₂ intervient à deux niveaux :

- au niveau de la production en modifiant le coefficient de conversion du rayonnement intercepté,
- au niveau de la transpiration où elle initie la fermeture des stomates laquelle engendre une réduction de la transpiration.

Le doublement du taux de CO₂ (effet direct du CO₂) induit une amélioration de l'efficacité de conversion de la matière sèche. Cette efficacité est modifiée proportionnellement à la teneur en CO₂ 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 ALPHACO₂.

$$EPSIB = EPSIB \times ALPHACO_2 \times \left[1,4 - 0,4 \frac{CO_2}{330} \right]$$

où ALPHACO₂ est égale à 1,98 pour le maïs [RUGET *et al.*, 1996].

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

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 avril, 20 avril et 5 mai) ; deux ratios de satisfaction des besoins en eau RS (RS = transpiration réelle (TR)/transpiration potentielle (TP)) ; trois types de sol représentatifs de la zone d'étude. Dans le calcul des jours thermiques, des seuils de température minimale et maximale (6° et 28°) ont été fixés pour le maïs. 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 (*tableau I*). Dû aux incertitudes relatives à l'accroisse-

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*	5 avril	1,2	180	0,7*
Seuil Tn 6 °C* ; Seuil Tx 28 °C*	20 avril*	1,0*	129*	0,3
Densité de semis 8 plantes/m ² *	5 mai	0,6	53	
Azote 60 kg/ha, 5 jours avant la date de semis*	Indice de récolte 0,5*	Albedo 0,19*	Teneur en azote 0,12 %*	
Azote 140 kg/ha, 60 jours après la date de semis*	Profondeur de semis : 4 cm*	Teneur en argile 15 %*	Dose maximale 40 mm*	Efficacité d'application 100 %*

L'astérisque (*) indique les paramètres utilisés pour les simulations de référence

Tableau I. Données d'entrée du modèle STICS

ment de la teneur en CO₂ de l'atmosphère sur les lois de mise en place et de remplissage des grains, l'indice de récolte a été fixé à 0,5 pour les deux scénarii climatiques simulés, valeur la plus courante selon [MUCHOW *et al.*, 1990].

Il est possible d'analyser séparément les effets climatiques stricts, en distinguant deux types d'attribution d'assimilés aux grains, puis les effets d'augmentation de production dus à la forte teneur en CO₂. Cependant, dans le cadre de ce travail nous envisageons de ne considérer que les effets combinés induits par la température (réduction de la durée du cycle et éventuels effets négatifs des hautes températures) et le CO₂ responsable de l'accroissement de l'efficacité de conversion. Nous négligerons l'influence de la teneur en CO₂ sur la conductance stomatique.

Les résultats présentés sont des sorties de STICS moyennées sur 30 années simulées avec 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.

2. Résultats et discussion

2.1. Comportement hydrologique et climatique observé

La comparaison des débits mensuels de la rivière Drôme à 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 m³/s. Le débit moyen annuel quant à lui, diminue de 18,4 à 17,7 m³/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 on constate 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 (*tableau II*).

2.2. Génération des scénarii climatiques

Dans la basse vallée de la Drôme, les variations mensuelles de la pluie et de la température prévues par le modèle ARPEGE 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*).

En ce qui concerne la variabilité des facteurs climatiques, la précipitation est 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 scénarii étudiés.

	Saison d'été (1960-1989)					Saison d'été (1990-2001)				
	Q (m ³ /s)	Tm (°C)	P (mm)	ETP (mm)	Rg (MJm ⁻²)	Q (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	2 136
Écart-type	3,9	1,8	81	42	82	6,2	1,9	76	40	100
CV (%)	42	9	45	8	4	81	9	45	8	5
Maximale	17,1	25	379	622	2 323	23,7	24,3	315	582	2 267
Minimale	2,2	17	43	422	1 971	3,4	17,4	90	439	1 933
Juillet	7,4	21,7	44	194	784	7,2	22,5	55	191	763
Annuelle	18,4	12,4	919	1 069	5 226	17,7	13,3	912	1 080	5 129

Q : débits historiques périodes 1966-1989 et 1990-2001 ; CV : coefficient de variation

Tableau II. Comparaison des variables climatiques et des débits historiques, Drôme

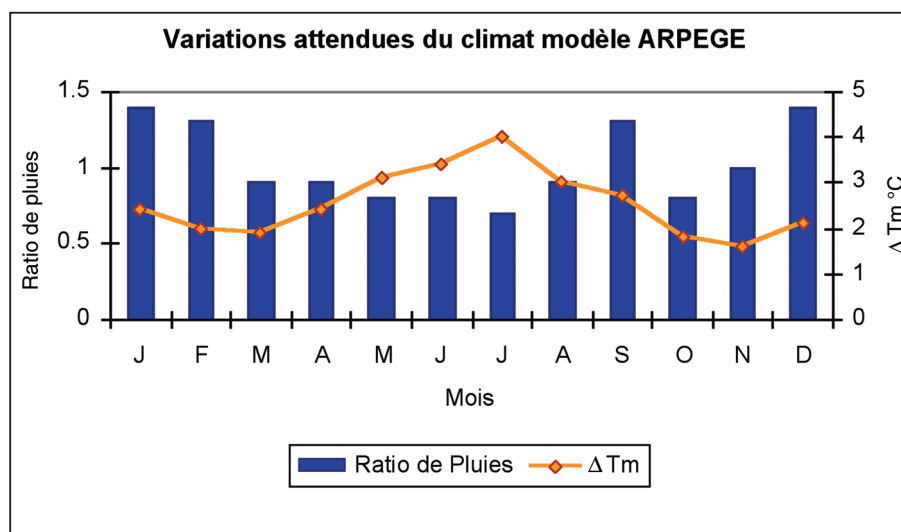


Figure 1. Variations mensuelles de la pluie et de la température prévues par le modèle ARPEGE, Drôme

Le modèle LARS-WG a été ajusté de manière acceptable (en termes de moyennes et des écarts-types mensuels) à la série historique observée. 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 et ETP ont été comparées pour le climat actuel (la série historique 1960-1989, la série ARPEGE 1xCO₂ et la série climatique LARS-WG 1xCO₂). 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 sur-

estimée 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 présentent un biais plus important par rapport aux séries historiques. Notamment, dans le cas de la pluie (figure 2).

L'utilisation du scénario de base du modèle ARPEGE 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 [BARON et al., 2005]. Toutefois, il est important de signaler, que la série synthétique journalière de pluie générée par LARS-WG sur

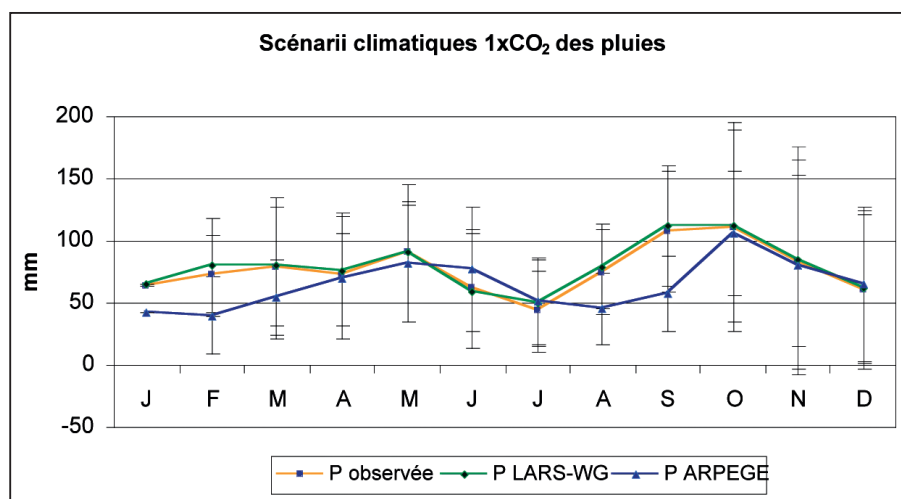


Figure 2. Comparaison des séries de pluies (scénario actuel 1xCO₂) entre : la série historique, la série ARPEGE et la série simulée par LARS-WG, Drôme

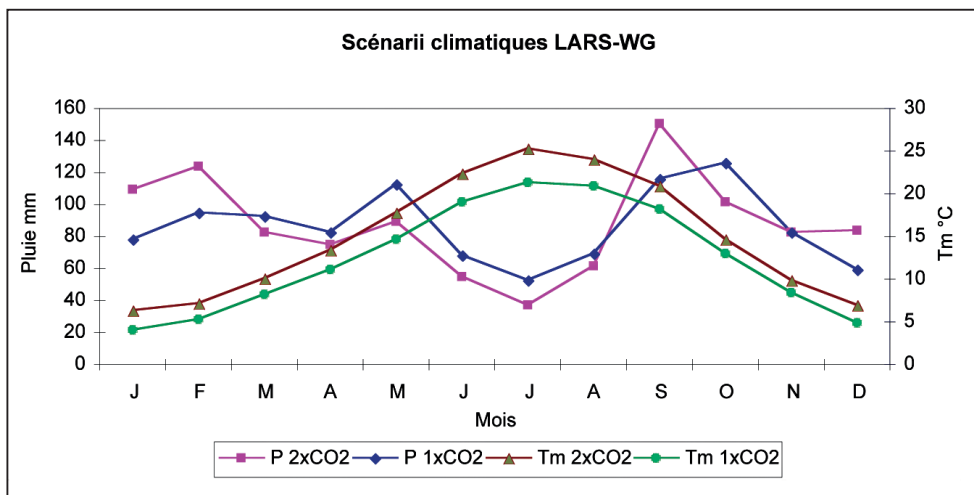


Figure 3. Scénarii climatiques 1xCO₂ et 2xCO₂ des pluies et températures générées par LARS-WG, Drôme

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 ont été prises en compte dans le modèle LARS-WG pour générer le scénario du climat futur 2xCO₂. 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.

2.3. Effet sur le rendement du maïs selon le niveau de stress hydrique

Pour le maïs, deux seuils de déclenchement des irrigations et en sec ont été simulés sur un sol limono-

argileux (cf. *tableau I*). Les rendements du maïs ont été calculés en considérant les effets combinés (indirect et direct) du CO₂. L'effet direct du CO₂ dû à l'amélioration de l'efficacité de conversion avec un indice de récolte de 0,5 a été simulé pour les 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 la dose d'arrosage de 14 % et selon une variabilité moindre. En revanche, dans des conditions de stress hydrique élevées, les pertes en rendement peuvent atteindre 20 % (*tableau III*).

Pour un scénario type climat présent (1xCO₂) une réduction du RS de 0,7 à 0,3 induit une perte en rendement de 26 % 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,

Scénario climat présent 1xCO ₂					Scénario Climat futur: 2xCO ₂			
Ratio de stress hydrique RS=TR/TP	Dose (mm)	ETR (mm)	MS (T/ha)	Rdt (t/ha)	Dose (mm)	ETR (mm)	MS (t/ha)	Rdt (t/ha)
RS = 0,7								
Moyenne	300	683	23,8	11,9	342	615	23,9	11,9
CV (%)	19	3	4	4	12	3	5	5
RS = 0,3								
Moyenne	164	570	17,7	8,8	193	491	16,3	8,1
CV (%)	27	5	8	8	16	5	10	10
En sec								
Moyenne		435	11,5	5,7		338	9,3	4,6
CV (%)		12	22	22		11	21	21

Tableau III. Simulation par le modèle STICS de l'effet du stress hydrique sur l'usage de l'eau et le rendement du maïs dans la Drôme ; paramètres de référence : *tableau I*

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 %. La variabilité du rendement passe de 5 à 10 %.

Conclusion

Les constatations portant sur l'évolution du climat sont les suivantes.

- Dans la basse vallée de la Drôme, la température moyenne annuelle a augmenté de 0,9 °C dans la dernière décennie. La pluie moyenne annuelle reste autour de 900 mm avec des variations mensuelles plus importantes.
- Les prévisions du modèle ARPEGE sont une augmentation de la température moyenne de 4,0 °C et une diminution de la pluie moyenne de 30 % en juillet. Les principales conclusions portant sur les effets possibles simulés par le modèle de culture STICS sur la production agricole et la demande en eau dans la vallée de la Drôme sont les suivantes.
- Le réchauffement climatique sous l'hypothèse $2xCO_2$ induit une réduction de la durée du cycle et une augmentation de la dose d'arrosage. L'effet de l'accroissement du taux de carbone dans l'atmosphère se traduit par une amélioration de l'efficacité de conversion de l'énergie incidente en biomasse qui contrebalance l'effet de réduction de la durée cycle. Sous l'hypothèse du maintien de l'indice de récolte au voisi-

nage de ses potentialités ($IR = 0,5$), le rendement en grain du maïs cultivé sans restriction hydrique importantes ($RS \geq 0,7$) ne serait pas affecté par le changement climatique moyennant un surplus d'apport d'eau de l'ordre de 14 %.

- En conditions de restrictions plus sévères (RS de 0,7 à 0,3), des pertes en rendement de l'ordre de 20 % peuvent être atteintes pour le climat futur. La variabilité du rendement passe de 4 % en conditions de satisfaction en eau quasi optimales à 22 % en l'absence d'irrigation. Ce résultat est à rapprocher de celui de [UTSET *et al.*, 2006] qui constatent également une variabilité beaucoup plus élevée en années sèches qu'en années humides.

Les simulations montrent qu'une date précoce de semis permettrait 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 le pourtour méditerranéen [GIMENO *et al.*, 1989]. 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).

Bibliographie

BARON C., SULTAN B., BALME M., SARR B., TEAORE S., LEBEL T., JANICOTS., DINGKUHN M., 2005 : "From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact". *Phil. Trans. R. Soc. B360*: 2095-2108.

BRISSON N., MARY B., RIPOCHE D., JEUFFROY M.H., RUGET F., NICOLLAUD B., GATE P., DEVIENNE-BARRET F., ANTONIOLETTI R., DURR C., RICHARD G., BEAUDOIN N., RECOUS S., TAYOT X., PLENET D., MACHET J.M., MEYNARD J.M., 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 M.H., 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.

DEQUE M., MARQUET P., JONES R.G., 1998 : "Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model". *Climate Dynamics* 14: 173-189.

DOLS F., 1995 : "Étude de la gestion de la ressource en eau". *DIREN Rhône-Alpes, agence de l'eau RM&C*, 20p.

GIBELIN AL., DEQUE M., 2001 : "Un scénario à l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXI^e siècle". *Météo France, Centre national de recherches météorologiques. Note de travail* 79. 64 p.

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

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

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. 1005 p.

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 [CO₂] rich atmospheres? An analysis of diurnal courses of CO₂ 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. B* 360: 2011-2020.

MUCHOW RC., SINCLAIR TR., BENNETT JM., 1990 : "Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations". *Agronomy Journal* 82: 338-343.

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

RUGET F., BETHENOD O., COMBE L., 1996 : "Repercussions of increased atmospheric CO₂ on maize

morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels". *Maydica* 41: 181-191.

Société du Canal de Provence, 1987 : "Cartes d'aptitudes et de contraintes des sols à la mise en valeur agricole : secteurs de Crest-Ouest, basse vallée de la Drôme". SCP - DDA 26, 2 p.

SAMARAKOON AB., GIFFORD RM. 1996 : "Elevated CO₂ effects on water use and growth of maize in wet and drying soil". *Australian Journal of Plant Physiology* 23(1): 53-62.

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.

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.

ZANKERS., 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*, 55 p.

Résumé

J.-M. GONZALEZ GAMACHO, J.-C. MAILHOL, F. RUGET. Impacts du changement climatique sur la demande en eau d'irrigation. Exemple du maïs dans la Drôme (France)

L'accroissement prévu du taux de CO₂ atmosphérique (660 ppm) et ses conséquences sur les variables climatiques associées telles que la température, a une influence sur la demande en eau et la production régionale. L'étude décrite dans cet article traite du cas d'une culture de maïs dans la vallée de la Drôme (SE France) région caractérisée par des périodes d'étiage très sévères. L'analyse de séries historiques entre les périodes 1960-1989 et 1990-2001, montre qu'en juillet, où les besoins en eau représentent 80 % de la demande totale, la température moyenne a augmenté de 2 °C et les débits de la rivière Drôme ont diminué de 16 %. Le modèle atmosphérique ARPEGE régionalisé sur le bassin-versant du Rhône a permis d'estimer les variations mensuelles attendues du climat. Pour un doublement du taux de CO₂, ce modèle prévoit en juillet, une augmentation de la température

de 4 °C et une diminution de la pluie de 30 %.

À partir de ces variations moyennes, des scénarii climatiques journaliers locaux ont été générés avec le modèle LARS-WG pour les climats actuel (1xCO₂) et futur (2xCO₂). Les effets du changement climatique sur la demande en eau et le rendement du maïs sont simulés par le modèle de culture STICS. Différentes conditions de simulation, relatives au type de sol, dates de semis et niveaux de stress hydrique sont analysées pour les climats actuel et futur. Les résultats principaux montrent que le réchauffement climatique pourrait augmenter la demande en eau d'irrigation de 14 %, réduire la durée du cycle du maïs de 20 % et baisser en conséquence le rendement de 15 %. Cependant, l'effet direct d'un doublement du taux de CO₂, induit une augmentation du rendement de 18 % ; ces effets qui se compensent maintiennent ainsi le niveau de rendement. 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.