

LA SENSIBILITE DE L'AGRICULTURE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : LE CAS DU BLE D'HIVER EN BEAUCE

S. BELLIA ¹, R. DELÉCOLLE ², A. DOUGUEDROIT ³

¹ * Institut de Géographie, Université Aix-Marseille I,
29 avenue Robert Schuman, 13621 Aix en Provence Cedex 1.
E-mail : sbellia@hotmail.com, annick.douguedroit@up.univ-aix.fr
² Institut National de Recherche Agronomique
Domaine Saint-Paul site Agroparc, 84914 Avignon,
[email: richard.delecolle@avignon.inra.fr](mailto:richard.delecolle@avignon.inra.fr)

Résumé

Dans cette étude, nous avons estimé l'impact du doublement de CO₂ sur les rendements de blé d'hiver en Beauce dans le Bassin Parisien (France). Les scénarios climatiques pour le XXI^e siècle sur le Bassin parisien ont été fournis par les sorties des modèles de circulation générale anglais (Hadley Centre) et français (LMD). Les simulations du rendement ont été établies avec le modèle de culture STICS à l'échelle régionale et parcellaire. L'augmentation de la température induite par un doublement de CO₂ provoque un raccourcissement du cycle de développement et une baisse du rendement. L'analyse de l'interaction entre les impacts de la température et du CO₂ montre les effets bénéfiques du dioxyde de carbone. Ils se traduisent par des rendements simulés plus élevés que ceux obtenus avec uniquement l'impact de la température. Néanmoins par rapport à la situation actuelle, l'influence combinée de l'augmentation de température et du doublement du CO₂ entraîne une diminution des rendements. Les simulations parcellaires ont fait ressortir qu'on peut s'attendre à une variabilité spatiale de cette baisse liée aux conditions de culture (type variétal, date de semis). L'introduction de l'influence des aérosols soufrés dans le modèle du Hadley Centre ralentit l'augmentation de température et la baisse des rendements.

Abstract

The objective of that study is to estimate the impacts of the greenhouse effect (2xCO₂) on the winter wheat yields in Beauce (Bassin Parisien, France). The climatic scenarios of the Hadley Center and LMD global circulation models have been used. The simulated yields have been calculated with the crop model STICS at the field and regional scales. With 2xCO₂, the temperature increase reduces crop season duration and yields decrease. The combination of the temperature and the CO₂ increases causes yields higher than in the previous case but lower than in the present situation. The field simulations show a spatial variability of yields decrease, caused by crop conditions (genotype and sowing date). Taking into account the atmospheric sulfate aerosols limits the yield decrease by mitigation of temperature elevation.

Mots-clés : Rendements blé, Température, Doublement de CO₂, Beauce (France), Modèle de culture.

Keywords : Wheat yields, Température, 2xCO₂, Beauce (France), Crop model.

Introduction

LTPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change, 2001) envisage une augmentation de la température de surface moyenne du globe liée à une hausse du CO₂ atmosphérique de 1.4 à 5.8°C sur la période 1990 - 2100. Des températures élevées raccourcissent la durée de croissance du blé, de la floraison au remplissage du grain, entraînant une diminution du rendement (Peiris et al., 1996). Au contraire, une augmentation du taux de CO₂ atmosphérique stimule l'intensité de la photosynthèse, et produit en conséquence une hausse du rendement (Dhakhwa et Lee Campbell 1998). Les effets interactifs de l'augmentation de la température et de la concentration en CO₂ atmosphérique provoquent une baisse des rendements : les effets bénéfiques du CO₂ semblent diminuer progressivement jusqu'à

ce que les impacts négatifs de la température deviennent dominants (IPCC, 2001 ; Rosenzweig et Tubiello, 1996). Certains auteurs estiment que l'intervention des effets d'une hausse du CO₂ se traduit par une augmentation des rendements (Hulme et al., 1999 ; Wolf, 1993).

La sensibilité du blé d'hiver au changement climatique dans la zone climatique de Versailles se traduit par une augmentation de la vitesse de développement induite par la hausse de température. Ce phénomène semble cependant être ralenti par l'intervention du CO₂ donnant lieu à une productivité plus élevée que celle obtenue avec les effets purement climatiques (Delécolle et al., 1994). Ces résultats ont été produits à une échelle régionale, avec une simulation de 2xCO₂ seule.

L'objectif de notre étude est de déterminer l'impact de scénarios climatiques associés au doublement de CO₂ (avec et sans l'évolution des aérosols soufrés) sur la production de blé d'hiver en Beauce. La Beauce est une plaine d'environ 7400 km², située en France dans la Région Centre, première région céréalière d'Europe (Fabries-Verfaillie et Stragiotti, 1996). Nous utilisons un modèle de culture pour simuler les rendements à l'échelle régionale, et à une échelle plus fine, celle de la parcelle.

1. Données

1.1. Les données agronomiques

Les données agronomiques sont issues d'une étude expérimentale en plein champ de 1996, menée sur huit parcelles situées sur la commune de Champhol (**figure 1**). Elles concernent les conditions techniques de culture : la date de semis, la variété (Soisson, Sidéral, Fortal), la fertilisation, et la quantité de matière sèche et de grains à la récolte en tonnes par hectare (t/ha).

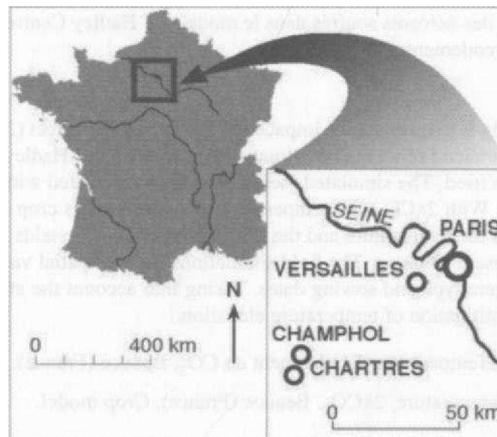


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

1.2. Les données météorologiques

Les températures minimales et maximales de l'air sous abri, les précipitations, l'évapotranspiration, le rayonnement, la température du point de rosée et la vitesse du vent, au pas de temps quotidien. Ces variables concernent les stations de Champhol (à 65 km de Paris) de 1995 à 1997, et de Versailles (à 10 km de Paris) sur la période 1968 - 1997 (**figure 1**). Versailles peut être considérée comme représentative de la Beauce car elle est corrélée avec la station de Champhol à 0.9 pour les températures moyennes journalières et 0.7 pour les précipitations.

Les scénarios climatiques avec un doublement de C_0 pour le Bassin parisien au XXI^{ème} siècle ont été fournis par les sorties des modèles de circulation générale (MCGs) du Hadley Centre (R.U.) nommé ici HADCM2 et du Laboratoire de Météorologie Dynamique, France (modèle LMD). Trois scénarios climatiques ont été utilisés :

- Deux scénarios régionaux ont été construits par le Climate Research Unit (Université d'East Anglia), à partir des sorties pour $2xCO_2$ du MCG transitoire HADCM2 sous deux forçages atmosphériques différents : une simulation faite uniquement à partir de l'augmentation des gaz à effet de serre (HC1) ; et une simulation prenant en compte à la fois l'évolution des gaz à effet de serre et des aérosols soufrés (HC2). Ces scénarios se traduisent par des tableaux mensuels d'écart par rapport aux conditions actuelles sur les températures de l'air, les précipitations, le rayonnement.
- Les sorties du LMD ($1x C_0$ et $2xCO_2$), fournies sous la forme de onze années de séries journalières, surestiment les températures minimales et les précipitations de la zone d'étude. Elles n'ont donc pas été utilisées directement mais ont servi à la création du troisième scénario climatique. Ce scénario a été établi selon le différentiel $2xCO_2 - 1xCO_2$ pour les moyennes mensuelles des températures et du rayonnement, et selon le rapport $2x C_0 / 1x C_0$ pour les précipitations et la variabilité des températures.

Les trois scénarios représentatifs du climat modifié suggèrent un réchauffement toute l'année, plus important durant l'automne (**tableau 1**). Le scénario HC 1 montre une élévation de la température plus forte que le scénario L M D. La prise en compte des aérosols soufrés (HC2) atténue le réchauffement annuel. Avec le modèle Arpège, Météo France simule pour le Nord de la France, incluant la Beauce, un réchauffement modéré l'hiver et le printemps (de 1 à 2°C) et élevé l'été et l'automne (de 2 à 3°C) (Déqué, 1998).

Tableau 1 : Augmentations de température dans les trois scénarios représentatifs du climat modifié retenus.

Mois	HC1	HC2	LMD
	Hadley Centre $2xCO_2$	Hadley Centre $2xCO_2$ et aérosols soufrés	$2xCO_2$
Printemps	2.0	0.8	1.7
Eté	1.9	1.9	1.0
Automne	2.9	1.9	2.2
Hiver	2.7	1.4	1.6
Moyenne Annuelle	2.4	1.5	1.6

2. Méthodologie

2.1. Le climat généré

Des séries climatiques synthétiques ont été produites avec le générateur climatique LARS - WG (Stochastic Weather Generator). LARS - WG est un outil numérique conçu par le Dr Mikhail Semenov (Long Ashton Research Station, IACR, Université de Bristol) (Semenov et al., 1998). Il produit des séries climatiques journalières 'artificielles' mais admissibles de précipitations, températures minimales et maximales et rayonnement solaire. Ces séries sont valables pour un lieu donné ; elles sont produites à partir des distributions statistiques caractéristiques pour ce lieu des différentes variables du climat. L'intérêt de cet outil est de pouvoir fournir une infinité d'années climatiques 'probables' en ce lieu. Propriété très intéressante dans le cas des études sur le changement climatique, où les séries, elles-mêmes simulées par les MCGs, sont courtes et chères. Les scénarios des MCGs

vont apporter au générateur les paramètres de changement climatique qu'il utilise comme suit : le paramètre de variabilité relatif à la moyenne des températures d'un mois donné est additionné à l'ensemble des valeurs des températures journalières minimales et maximales de ce mois ;

(2) LARS - WG multiplie chaque valeur qu'il choisit aléatoirement pour les précipitations et l'écart type des températures, par le paramètre de changement climatique correspondant. L'humidité et le vent ne sont pas générés par LARS - WG. L'estimation de l'humidité relative a été faite selon l'hypothèse que la quantité d'eau dans l'atmosphère est constante. La part d'humidité relative sera alors modifiée par le changement de la température de l'air. Pour le vent, les prévisions scientifiques concernant la modification du nombre de jours de vent et de sa force sont quasi inexistantes. Afin d'éviter toutes affirmations erronées, l'hypothèse d'une variation nulle du vent dans les décennies à venir a été posée.

LARS - W G nous a permis de produire des séries climatiques journalières :

- une série établie à partir du climat de Versailles (données climatiques plus longues que celles de Champhol), correspondant à la situation actuelle (1xCO₂),
- trois séries établies à partir du climat de Versailles et des scénarios climatiques du Hadley Centre et du L M D (une série pour chacun des scénarios).

Toutes ces séries ont été générées sur une période de 100 ans pour obtenir une meilleure estimation de la variabilité climatique.

2.2. Calage et validation du modèle de culture STICS

Le modèle de culture STICS développé par Brisson et al.(1998) est un modèle dynamique. Il prédit les changements d'états du système sol-plante en fonction de variables exogènes (climat par exemple), au pas de temps journalier au cours d'une année. Il modélise à la fois le développement (cycle phénologique) et la croissance (biomasse aérienne) d'une culture, le rendement en grains, ainsi que le bilan hydrique et azoté du système sol-culture. Le modèle se structure autour d'un schéma de croissance piloté par le bilan du carbone : le couvert végétal intercepte le rayonnement solaire par le feuillage et le transforme en matière végétale. STICS intègre à ses simulations les effets d'une teneur en CO₂ atmosphérique élevée estimée par une élévation de la résistance stomatique de la plante.

STICS a la faculté de s'adapter à diverses espèces et différentes conditions de culture. Il est par conséquent nécessaire de le caler aux conditions régionales de la station d'étude. Le calage consiste à rechercher le jeu de paramètres descripteurs du système sol - plante permettant aux résultats du modèle de s'ajuster au mieux à des résultats expérimentaux, la quantité de matière sèche produite. Le calage a été effectué selon deux méthodes. Dans un premier temps, nous avons utilisé la méthode « essai - erreur » correspondant à une modification progressive de la valeur des paramètres jusqu'à ce que les résultats de la simulation se rapprochent de la valeur de rendement mesurée (Bellia, 1999). Elle a été faite parcelle par parcelle, et nous a permis d'identifier les paramètres représentatifs de la variabilité parcellaire qui se définissent comme la capacité de la plante à puiser l'eau en profondeur, et la précocité de la plante. La seconde méthode a consisté à optimiser ces deux paramètres afin que la quantité de matière sèche obtenue avec STICS s'accorde avec la matière sèche observée lors de l'expérience. Leur optimisation a été établie sur chacune des huit parcelles, mais aussi simultanément sur l'ensemble de ces parcelles afin d'obtenir une valeur régionale. L'optimisation a été faite selon la méthode mathématique des moindres carrés (Brisson et al., 1998).

La validation du modèle est une comparaison entre les sorties du modèle et la réalité perçue par une série de résultats indépendante de celle qui a servi au calage. Elle a été élaborée sur les valeurs de rendements des huit parcelles exprimés en tonnes par hectare (t/ha). La comparaison rendements observés - simulés (**tableau 2**) met en évidence la présence d'écarts entre les deux uniquement pour les valeurs parcellaires et non pour les valeurs régionales (les moyennes étant proches). Ces écarts peuvent s'expliquer par l'hypothèse d'une incertitude des données de rendements relevées sur le

terrain et un manque d'informations sur les différents sols utilisés. Nous pouvons constater que les parcelles dont les rendements sont surestimés (+) par STICS ont en commun la variété Soisson et la date de semis (le 20 octobre). Par opposition, les parcelles aux rendements sous-estimés (-) sont de variétés différentes ou sont tardives, telle la parcelle 2 dont le semis date du 3 novembre (**tableau 2**).

Tableau 2 : Comparaison entre les rendements observés sur les huit parcelles et ceux simulés avec le modèle de culture STICS. Le signe + représente les parcelles aux rendements surestimés, et le signe - les parcelles aux rendements sous-estimés.

N° de parcelle	Variétés	Dates de semis	Rendements observés (t/ha)	Rendements simulés (t/ha)	
1	Soisson	17 octobre	6.0	6.0	
2	Soisson	3 novembre	8.1	6.8	
3	Soisson	20 octobre	5.6	6.3	+
4	Soisson	20 octobre	6.0	7.7	+
5	Soisson	20 octobre	6.5	8.0	+
6	Sidéral	20 octobre	7.2	6.4	-
7	Sidéral	25 octobre	7.5	7.4	
8	Fortal	20 octobre	7.5	6.8	
Moyennes			6.8	6.9	+

2.3. Les simulations

Les simulations des rendements ont été établies avec le modèle de culture STICS à deux échelles spatiales différentes : à l'échelle régionale et à l'échelle parcellaire. Nous avons cherché à estimer l'impact du changement climatique à l'échelle parcellaire afin de faire ressortir une éventuelle variabilité intra-régionale pouvant être liée aux conditions techniques de culture de chaque parcelle (variété, date de semis). Les conditions techniques de culture moyennes régionales ont été estimées à partir des résultats expérimentaux relevés sur les huit parcelles (moyenne des valeurs parcellaires).

3. Résultats

3.1. L'impact de l'augmentation de la température induite par un doublement de CO₂

D'après les résultats du modèle, la réaction du blé d'hiver à l'augmentation de la température induite par un doublement de CO₂ se traduit par un raccourcissement de son cycle de développement. A l'exception de la phase Semis-Levée, la longueur moyenne de toutes les phases diminue. Nous constatons une diminution de 12 jours du début de la croissance foliaire au remplissage des grains et de 2 jours à la maturité soit 14 jours au total qui représentent 5.5% du cycle total actuel (256 jours). La récolte se fera alors 2 semaines plus tôt. Delécolle et al. (1994) observent un raccourcissement plus important du cycle de végétation de 19 à 32 jours. Cette précocité entraînera une baisse de rendement. L'ajout de l'effet des aérosols soufrés, freinant l'augmentation des températures, nous ramène à des longueurs moyennes proches de celles obtenues sous le climat actuel.

Les simulations produites avec les scénarios HC 1 et L M D montrent qu'une hausse de la température liée à l'augmentation du CO₂ provoquerait une diminution des rendements moyens beaucoup plus obtenus actuellement (**figure 2**). Une baisse du rendement régional de 0.3t/ha (soit 4%) a ainsi été constatée pour une hausse des températures moyennes annuelles d'environ 2°C (Tabl.1). Nous retrouvons la même tendance que Delécolle et al. (1994), cependant avec une diminution des rendements moindre (entre -10 et -30% selon le MCGs utilisé). A l'échelle de la parcelle, le même phénomène se produit avec cependant une différence entre les parcelles (**figure 2**). La diminution du rendement avec HC 1 (-0.4 t/ha en moyenne) est moins prononcée qu'avec le scénario L M D (-0.8 t/ha) (Fig.3).

Dans le cas de nos huit parcelles, les écarts entre les rendements simulés avec une hausse de la température et les rendements obtenus sous le climat actuel vont du simple au double. La variabilité apparaît plus importante avec le scénario L M D (écart-types compris entre 0.8 et 1.5 avec L M D et entre 0.7 et 1.5 avec HC 1) (figure 2). La variété Fortal (parcelle 8) apparaît comme la variété la moins sensible à une augmentation de température, contrairement à la variété Soisson produisant les rendements les plus bas (parcelles 3 et 4) (figure 2). Une date de semis tardive semble également être bénéfique (parcelle 2). La présence des aérosols soufrés dans l'atmosphère (HC2) n'intervient pas de façon significative sur la baisse des rendements mais augmente la variabilité (écart-types compris entre 0.9 et 1.7) (figure 2).

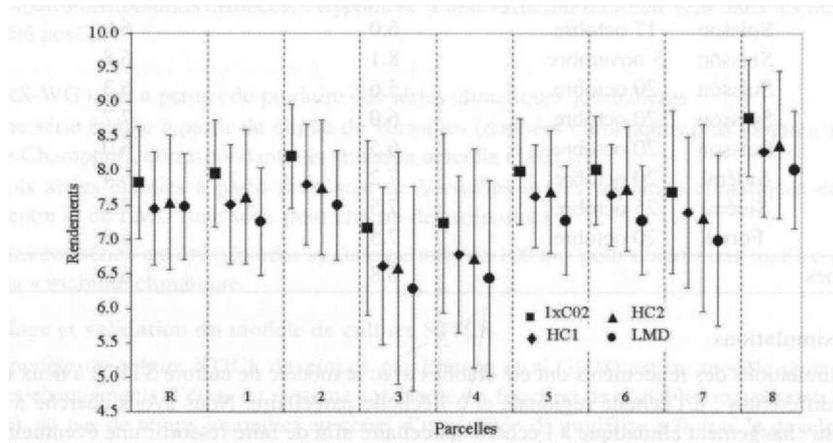


Figure 2 : Moyennes et écart-types (trait) des rendements régionaux (R) et parcelaires 1 à 8 en t/Matière sèche /ha simulés avec une hausse de la température liée à l'augmentation du C_0_2 selon trois scénarios. HC1 (Hadley Centre $2xC_0_2$), HC2 (Hadley Centre $2xC_0_2$ et aérosols soufrés) et LMD ($2xC_0_2$).

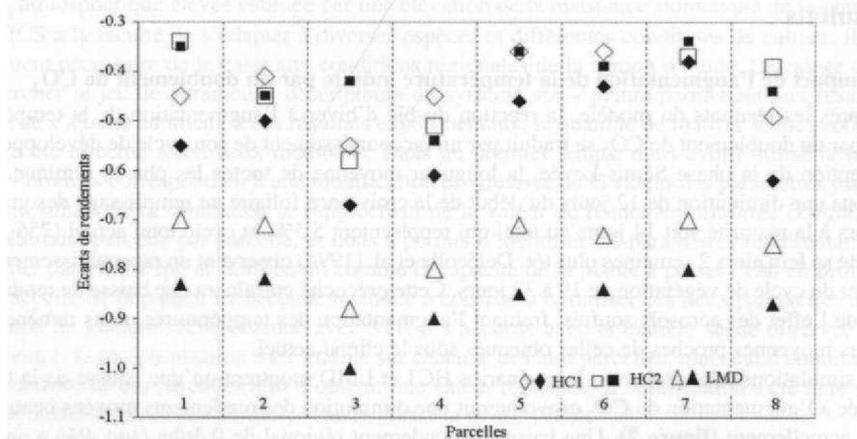


Figure 3 : Ecart entre les rendements simulés (t/ha) avec une hausse de la température (en blanc) et avec une hausse de la température et du C_0_2 (en noir) et les rendements obtenus sous le climat actuel.

3.2. L'influence combinée de l'augmentation de la température et du doublement de CO₂

L'influence combinée de l'augmentation de la température et du doublement de CO₂ provoque une diminution des rendements de blé d'hiver beaucoup plus par rapport à la situation actuelle (de 0.4 t/ha pour HC 1 et de 0.7 t/ha pour LM D) (figure 4). Nous retrouvons dans notre étude la même observation que celle présentée par ITPCC (2001), Rosenzweig et Tubiello (1996) et Delécolle et al. (1994). La diminution des rendements parcellaires fait ressortir l'existence d'une disparité territoriale de cette baisse qui est plus importante pour le scénario L M D (-0.9 t/ha en moyenne) que pour HC 1 (-0.5 t/ha) (figure 3). La variabilité est également plus forte pour L M D (écart-types compris entre 0.9 et 1.8 pour L M D et entre 0.9 et 1.4 pour HC 1). Les rendements les plus élevés sont également produits par les parcelles 8 et 2. Les aérosols soufrés limitent la baisse des rendements (figure 3) mais augmentent la variabilité (écart-types compris entre 1.1 et 2.1) (figure 4). L'analyse de l'interaction entre les impacts de la température et du CO₂ montre les effets bénéfiques du dioxyde de carbone.

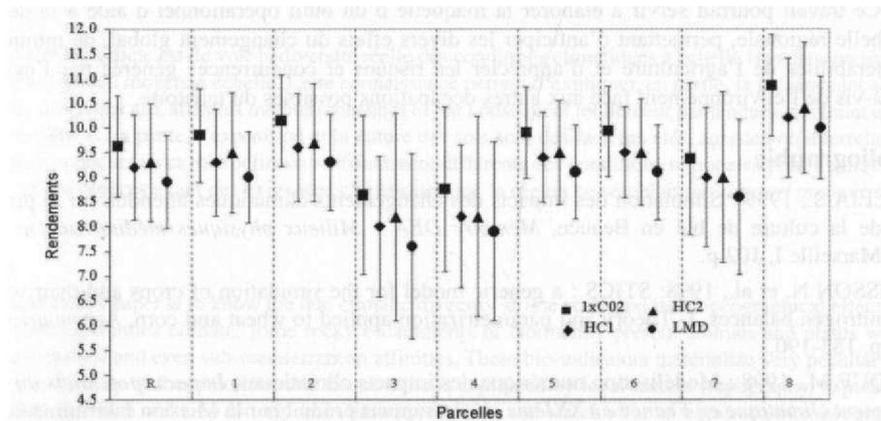


Figure 4 : Moyennes et écart-types (trait) des rendements régionaux (R) et parcellaires 1 à 8 en t Matière sèche /ha simulés sous l'influence combinée d'une hausse de la température et du doublement de CO₂ selon trois scénarios : HC1 (Hadley Centre 2xC0₂), HC2 (Hadley Centre 2xC0₂ et aérosols soufrés) et LMD (2xC0₂).

Ils se traduisent par des rendements simulés plus élevés que ceux obtenus avec uniquement l'impact de la température (figure 5). La diminution des rendements avec un doublement de CO₂, tous effets confondus, est cependant plus importante (figure 3).

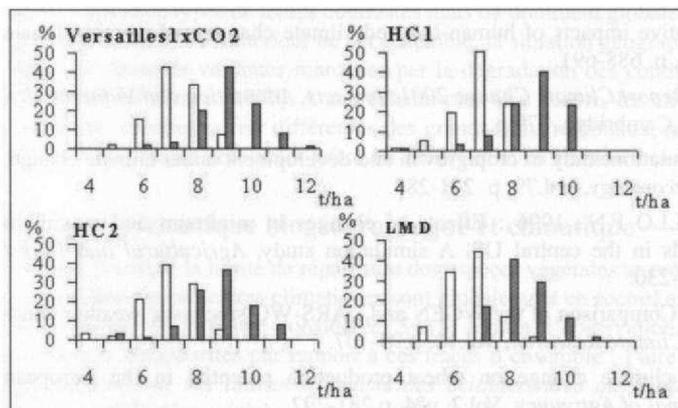


Figure 5 : Fréquence des rendements moyens régionaux simulés avec une hausse de la température (en blanc) et sous l'influence combinée d'une hausse de la température et du doublement de CO₂ (en gris). HC1 : Hadley Centre 2xC0₂, HC2 : Hadley Centre 2xC0₂ et aérosols soufrés, LMD : LMD 2xC0₂.

Conclusion

Avec un doublement de CO₂, la réponse physiologique de la culture à l'augmentation de la température se traduit par un raccourcissement de son cycle de développement et une baisse des rendements. En conclusion, un doublement de CO₂, tous effets confondus, provoque une diminution des rendements moyens régionaux par rapport à la situation actuelle de 4 % pour HC 1 et de 7 % pour LM D. Nous retrouvons, dans une moindre mesure, les résultats moyens obtenus par Delécolle et al. (1994) sur la zone climatique de Versailles : une baisse des rendements de 9 à 15% par rapport à la situation actuelle. Le modèle parcellaire a fait ressortir l'existence d'une disparité territoriale de ce phénomène qui confirme l'hypothèse d'une forte influence des conditions techniques de culture : date de semis, variété. La variété Fortal ou une date de semis tardive sembleraient limiter les effets du changement climatique. L'intervention des aérosols soufrés dans l'atmosphère a un impact positif limitant la baisse des rendements à 3 %.

Ce travail pourrait servir à élaborer la maquette d'un outil opérationnel d'aide à la décision à l'échelle régionale, permettant d'anticiper les divers effets du changement global, de minimiser les vulnérabilités de l'agriculture et d'apprécier les risques et concurrences générés par l'agriculture vis-à-vis de l'environnement face aux autres occupations possibles du territoire.

Bibliographie

- BELLIA S., 1999 : Simulation des impacts des changements climatiques attendus sur la production de la culture de blé en Beauce, *Mémoire DEA « Milieux physiques méditerranéens »*, Aix-Marseille I, 102 p.
- BRIS SON N. et al., 1998: STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I- Theory and parametrization applied to wheat and corn, *Agronomy*, Vol. 18, p. 183-190.
- DEQUE M., 1998 : Modélisation numérique des impacts climatiques, *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle*, rapport produit par la Mission Interministérielle sur l'effet de serre, 142 p.
- D H A K H W A G. B et C. Lee C A M P B E L L, 1998 : Potential effects of differential day-night warming in global climate change on crop production, *Climate Change*, Vol. 40, p. 647-667.
- D E L E C O L L E R. et al., 1994 : Effets possibles de modifications climatiques globales sur les cultures de blé et de maïs en France : une étude de simulation, *Les Dossiers de L'Environnement de l'INRA*, Vol. 8, p. 183-190.
- FABRIES - VERFAILLIE M. et STRAGIOTTI P., 1996 : *La France des régions*, Bréal, Rosny, 397 p.
- H U L M E M. et al., 1999 : Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability, *Nature*, Vol. 397, p. 688-691.
- IPCC, 2001 : *Third Assessment Report. Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge, 879 p.
- PEIRIS D.R et al., 1996 : A simulation study of crop growth and development under climate change, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol.79, p. 271-287.
- ROSENZWEIG C. ET TUBIELLO F.N., 1996 : Effects of changes in minimum and maximum temperature on wheat yields in the central US. A simulation study, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 80, p.215-230.
- SEMENOV M.A. et al, 1998 : Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates, *Climate Research*, Vol. 10, p.95-107.
- W O L F J., 1993 : Effects of climate change on wheat production potential in the European Community, *European Journal of Agronomy*, Vol.2, n°4, p.281-292.