

Nouvelles tendances pour l'agriculture mondiale : concilier l'environnement et la productivité

Alain Capillon

Ecole nationale supérieure agronomique de Montpellier

Au cours de l'histoire, l'homme a aménagé et transformé le milieu naturel (sols, végétation) au profit des cultures. Cette relation au milieu a évolué au cours du temps : elle a été une artificialisation d'origine biologique au début de l'agriculture par défrichage et concentration de la matière organique dont la décomposition ou les cendres des brûlis fournissaient les éléments minéraux pour les espèces cultivées. L'association agriculture et élevage a permis d'accroître l'apport d'éléments aux champs cultivés et a assuré un transfert de fertilité entre des zones pâturées et les champs cultivés. L'introduction de cultures améliorantes tant sur les plans chimiques (légumineuses) que physiques par leur enracinement dense ou herbicides (plantes sarclées et cultures denses étouffantes) a permis la culture continue, sans ou avec moins de jachère, et multiplié les possibilités de rotation de cultures (successions dans le temps des diverses espèces).

L'apparition des intrants chimiques d'origine industrielle (engrais puis produits phytosanitaires) autorise une dissociation de la culture et de l'élevage pour l'apport des fertilisants. Elle permet également une évolution des successions de cultures : les productions sont choisies selon les tendances des marchés et non pas seulement en fonction de critères agronomiques puisque les contraintes de besoins en minéraux, de parasitisme, pouvaient être résolues par des apports de produits chimiques. Les variétés améliorées créées pour une grande part à des fins de valorisation forte des intrants apportés sont performantes.

Aujourd'hui, pour l'agriculture développée, les conditions de milieu sont gérées sur le plan physique par le travail mécanique, sur le plan chimique par l'apport d'engrais en tant que de besoin, et sur le plan sanitaire par l'épandage de produits phytosanitaires.

Ce bref retour dans le passé montre que la notion de fertilité change, en particulier du point de vue de celui qui «l'entretient» : usage de la richesse minérale naturelle après brûlis, organisation de transfert d'éléments minéraux via le troupeau, maîtrise (ou tentative de maîtrise) des bio-agresseurs par la succession des cultures, couverture des besoins et protection par intrants chimiques, variétés améliorées pour valoriser les intrants. Le sol n'est-il plus considéré que comme un support sans

que l'on utilise vraiment ses propriétés biologiques dans leur relation avec les peuplements cultivés ?

Le contexte mondial de la production et les considérations environnementales amènent à envisager des changements dans les modes de culture. Notre propos est de souligner que ces changements orienteront les producteurs vers une plus grande prise en compte des composantes biologiques de la fertilité. De tels bouleversements demandent du temps et des travaux de recherche en vue de l'adaptation des techniques. Le champ d'investigation pour des agricultures écologiques est immense ; nous en évoquerons certaines pistes déjà engagées en agronomie.

Changer les agricultures ?

Sur les plans de l'accroissement des productivités du travail et des surfaces et de l'adaptation au marché et à la demande alimentaire, particulièrement en quantité, cette évolution a fait ses preuves au Nord mais aussi pour les agricultures du Sud qui ont bénéficié de la «Révolution verte» des années soixante, «adaptation des technologies des agricultures modernes des pays industriels à l'Asie des moussons» (M. Griffon, 2006) puis à d'autres pays du Sud. Elle s'est cependant faite en accroissant la consommation d'énergie par l'agriculture d'une manière directe (carburants...) ou indirecte (énergie fossile consommée pour la fabrication des intrants agricoles) et en générant des impacts sur l'environnement, en particulier la pollution des aquifères. Une telle consommation d'intrants pose également le problème de l'efficacité globale de ces derniers (figure 1, planche I) dans le cadre d'une agriculture durable (Tilman *et al.*, 2002).

De plus en plus, les considérations écologiques et environnementales prennent de l'importance dans la conduite des productions végétales et de l'élevage. Cela vient d'une prise de conscience par la société de la nécessité de préserver les ressources naturelles mises en danger du fait des activités humaines dont l'agriculture : eau, air, mais aussi sols, flore et faune, paysage..., et de sauvegarder la santé humaine en évitant les pollutions et en garantissant la qualité sanitaire des aliments. Les exigences du marché, au travers des associations de consommateurs et

des distributeurs, sont de plus en plus sévères sur les questions d'environnement et de qualité. Elles se manifestent par l'encadrement des pratiques en agriculture et en élevage, par des réglementations et des cahiers des charges variés en constante évolution. A titre d'exemple, le bien-être animal est de plus en plus fréquemment pris en considération dans les contrats en production animale.

Dans les pays développés, l'agriculture, outre la satisfaction des attentes en matière de qualité et de santé des produits qu'elle livre au marché, doit relever un double défi :

- d'une part, la baisse des coûts pour rendre rentable la production ;
- d'autre part, le respect de l'environnement et l'entretien de l'espace, fonction qui lui est désormais officiellement et socialement dévolue.

Cette situation entraîne une adaptation des pratiques culturales que l'on peut observer depuis plusieurs années. Tout d'abord, la simplification des opérations de travail du sol, les plus coûteuses en temps de travail (pour les grandes cultures, entre le quart et la moitié des temps de travaux selon les cultures et les itinéraires techniques pratiqués) a généré une économie de carburant, de main d'œuvre et d'équipement. Les techniques sans labour se sont répandues. Elles couvrent aujourd'hui environ 30 % de la surface cultivée en France, pays culturellement lié au labour. La perspective offerte par l'usage de biocarburants renforce la nécessité de réduire les dépenses énergétiques des cultures et tout particulièrement les intrants coûteux en énergie.

Il en résulte une tendance à économiser les intrants, voire à minimiser leur emploi. C'est alors «l'offre naturelle» du sol que l'on veut mieux utiliser et stimuler. Il s'agit de faciliter l'enracinement et la nutrition des plantes alors même que l'on arrête plus ou moins de travailler le sol et qu'on lui a fourni ou fait supporter des doses variées d'intrants chimiques. C'est bien «réapprendre le sol», comme le suggèrent Boiffin et Stengel dans leur état des lieux en 2000.

Le contexte mondial impose des contraintes importantes pour les agricultures du monde : hausse durable du prix de l'énergie et des intrants, raréfaction des ressources en eau et concurrence accrue des autres usagers, restriction des espaces cultivés du fait de l'urbanisation croissante partout sur la planète, compétition internationale exacerbée pour les marchés, exigences de plus en plus fortes des consommateurs en qualité des produits et qualité de service. Il provoque aussi une réflexion approfondie sur les moyens de nourrir

neuf milliards d'hommes au milieu du XXI^e siècle et de sortir de la pauvreté neuf agriculteurs sur dix.

Certes, cette perspective offre des possibilités de forte croissance aux agricultures développées ou susceptibles de l'être qui sont dans des situations écologiques favorables ; c'est le cas de l'Amérique latine et de l'Amérique du Nord et de quelques régions d'Europe. Il reste que pour un développement équitable, il n'est pas possible de se baser sur la seule production des régions «riches». Reprenant le terme du groupe de travail animé par Gordon Conway en 1994, Michel Griffon (2006) propose une «révolution doublement verte», productive et basée sur l'écologie pour ne pas laisser les petits producteurs pauvres en dehors de cet enjeu.

Adapter les manières de produire ?

La décomposition des matières organiques reste l'essentiel de l'apport minéral dans des agricultures actuelles non développées au Sud, pour des types d'agricultures dites organiques ou pour l'agriculture biologique qui s'interdit l'usage d'engrais de synthèse. Si son rôle de nutrition est minimisé dans l'agriculture développée avec usage d'intrants chimiques, la fourniture d'azote issu de la matière organique des sols (MOS) peut, selon la période de minéralisation, jouer (en plus ou en moins) sur la composition azotée des végétaux et, par là, sur la qualité des récoltes. Par ailleurs, la MOS stable confère des propriétés au sol qui assurent la durabilité de la culture : stabilité structurale, capacité d'échange des cations. Source de carbone, elle entretient l'activité biologique du sol et gouverne son intensité. Alors, les MOS et leur «offre naturelle» sont susceptibles de reprendre de l'intérêt, y compris en agriculture productive (figure 2).

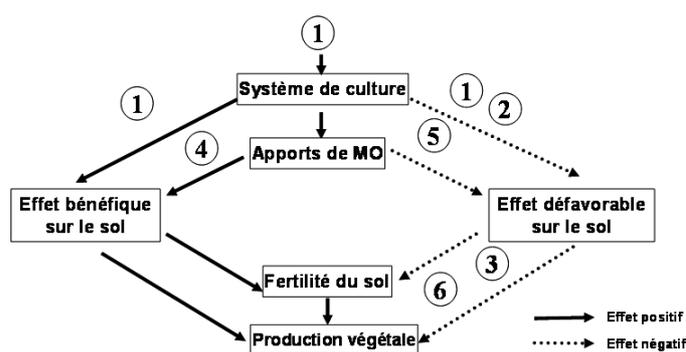


Fig. 2 : Les options de gestion biologique pour le maintien de la fertilité (Brigitte Brunel, in Capillon et al., 2006)

- 1 Choix des pratiques culturales
- 2 Contrôle génétique et résistance de la plante aux maladies
- 3 Inoculation de microsymbiotes, rhizobactéries, faune du sol
- 4 Manipulation du sol avec la MOS
- 5 Contrôle de la qualité de la MOS
- 6 Biocontrôle des maladies

Dans la perspective d'inscrire l'agriculture dans le développement durable, il sera nécessaire de repenser les manières de produire. Le simple aménagement des techniques de production ne suffira pas. Plusieurs raisons peuvent être évoquées :

- La teneur des aliments (y compris l'eau) en molécules indésirables autorisée par les divers règlements va décroissant au fur et à mesure que les techniques d'analyses se perfectionnent et que les études des effets sur l'organisme s'affinent. Le marché mondial et le jeu des échanges s'emparent de ces considérations pour établir des positions dominantes ou concurrentielles. Inévitablement, la tendance va vers le «zéro défaut» et cela remet à terme profondément en cause les techniques de culture et de protection.
- Une protection intégrée se doit de limiter l'occurrence d'une atteinte à la qualité par les manières de cultiver (rotations, respect de cycles...) ; la limitation des risques demande un changement de raisonnement des cultures, des cultivars, des successions de culture et des techniques.
- L'atteinte à l'environnement concerne d'autres aspects que la pollution chimique : le respect du paysage, reconnu comme valeur patrimoniale, le maintien de la biodiversité «naturelle» comme cultivée remettent en cause des pratiques agricoles au niveau de l'espace physique et économique et non plus seulement aux niveaux de la parcelle culturale ou de l'exploitation.

Ces raisons sont toutes effectives au Nord ; par le biais de la mondialisation, elles affecteront plus ou moins rapidement les agricultures du Sud.

D'un point de vue agronomique, deux voies d'évolution vers le développement durable doivent être menées simultanément :

- pour le court terme, la poursuite des adaptations des techniques et des matériels végétaux pour assurer qualité et moindre atteinte à l'environnement ;
- à moyen terme, la proposition de systèmes nouveaux conçus pour minimiser les recours aux pratiques potentiellement polluantes en misant sur les relations écologiques au sein des écosystèmes cultivés.

La première voie consiste à mieux raisonner le recours aux ressources en eau et aux intrants, tels les produits chimiques potentiellement polluants ou dangereux pour la santé. On peut penser à la production de nouvelles molécules moins agressives, au développement de luttés biologiques et intégrées, à la production de matériel végétal plus résistant obtenu par voie classique ou par transformation génétique. Au niveau de l'agriculteur, les méthodes actuellement disponibles de raisonnement d'interventions culturales (travail du sol, irrigation, épandage de produits phytosanitaires et d'engrais) à partir d'observations du milieu et de la végétation peuvent être améliorées sur les plans des performances techniques et de la faisabilité.

Aujourd'hui, les résultats de recherche permettent de se caler au plus juste sur les besoins des cultures pour la détermination des doses à apporter. C'est le cas pour l'irrigation où les apports sont raisonnés globalement dans un souci d'économie : choix de cultures selon la disponibilité en eau, apports limités en doses et durée, conception d'outils de pilotage et de redevance.

Pour les apports d'engrais, les acquis de la recherche sur les déterminants de la minéralisation nette de la matière organique du sol, sur la décomposition des apports organiques et sur la dynamique de l'azote de l'engrais ont abouti à la production de logiciels pour la détermination de la fumure et de son fractionnement. Il y a là convergence d'un double souci : économiser et limiter les risques de pollution sans renoncer à produire. Cela peut se faire sans négliger les effets sur la qualité ; ainsi, M.H. Jeuffroy *et al.* (2000) ont montré l'effet de carences modérées et temporaires en azote sur la qualité des blés. Ces démarches sont d'autant plus crédibles pour les agriculteurs que l'on peut désormais et commodément contrôler la nutrition à divers stades de la culture au champ.

Pour la fumure phospho-potassique, les recherches sur la biodisponibilité ont montré les limites des analyses chimiques de terres, limites que l'on contournait par la fixation de seuils élevés - potentiellement polluant - pour écarter le risque d'insuffisance. Cette attitude est incompatible avec le contexte économique de l'agriculture d'aujourd'hui et avec les préoccupations environnementales. Le diagnostic sur l'offre du sol module les résultats de l'analyse de terre selon des caractéristiques du sol et les exigences des cultures. A titre d'exemple, le logiciel Regifert® (Denoroy, 2004), issu des travaux de la recherche, permet de préconiser des fumures pour plusieurs éléments à partir d'analyses de terre en intégrant les références régionales sur les systèmes de culture et sur les milieux. La figure 3 montre l'évolution des préconisations et les économies d'intrants réalisées. La gamme des fumures préconisées a été restreinte. Pour plus du tiers des parcelles, la préconisation est l'impasse (pas d'apport). Sur l'ensemble des 1 152 parcelles testées, on passe d'une préconisation moyenne de 113 à 54 kg/ha, (F. Pellerin *et al.*, 2000).

Les paramètres de détermination des fumures sont, ainsi, mieux précisés grâce aux acquis de la recherche. Par ailleurs, les techniques de l'agriculture de précision (cf. l'article de Martine Guérif) doivent permettre d'assurer que les bonnes doses ont été épandues au bon endroit.

Des incertitudes subsistent notamment sur les interactions entre les systèmes de culture (espèces cultivées et techniques) et les dynamiques des matières organiques du sol. Un poste reste sujet à débat : les objectifs de rendement et par là, les besoins des cultures. Prévision agroclimatique et références locales sont à peaufiner pour alimenter des modèles technico-économiques permettant de déterminer les rendements visés selon les modes de production choisis. Elles devront anticiper et prendre en

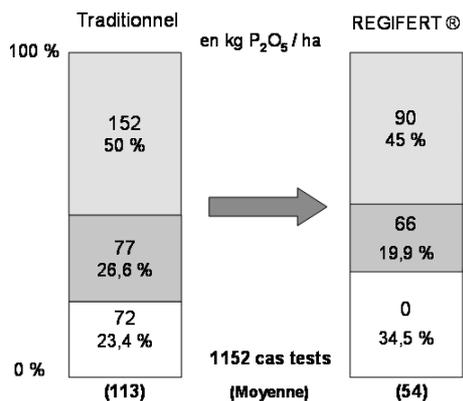


Fig. 3 : Evolution des préconisations de fumures phosphoriques (F. Pellerin et al., 2000)

considération les évolutions tendanciennes du climat (cf. exposés de Latifa Hénia et Bernard Séguin).

La *seconde voie* met en jeu les relations entre espèces végétales et le milieu biologique du sol et du couvert végétal. Les interventions culturales sont raisonnées en fonction de ces relations au sein de l'écosystème. Elle est encore à travailler par la recherche et à améliorer par des agriculteurs pionniers. C'est elle qui fera l'objet de la suite de cet exposé.

Vers des agricultures plus écologiques ?

La proposition est donc d'utiliser les mécanismes naturels au sein des écosystèmes cultivés : minéralisation de la matière organique des sols, modification de la structure du sol par les racines, relations entre plantes d'espèces différentes ou entre plantes et champignons et insectes, positives pour favoriser la croissance, et négatives pour des effets herbicides ou de protection sanitaire. Ces processus sont moins consommateurs d'énergie ; ils nécessitent la création de cultivars adaptés, par exemple en faisant synchroniser au mieux les cycles des cultures, donc les besoins avec la minéralisation ; ils sont, encore, pour partie méconnus et non totalement maîtrisés.

Sur le plan des principes et des démarches, cette vision rapproche l'agronomie de l'écologie et plus particulièrement de l'ingénierie écologique. Pour l'agriculture, les bénéfices attendus sont triples :

- La meilleure prise en compte des écosystèmes, végétation et sol, dans la conduite des cultures, devrait limiter les atteintes à l'environnement : ressources naturelles, biodiversité, paysage.
- L'utilisation des processus biologiques vise à limiter les recours aux traitements chimiques pour la protection des plantes et, pour partie aux fertilisants ; outre l'avantage écologique, on attend une réduction des

coûts à rendement égal.

- Ces manières de produire peuvent faire l'objet de certification et être intégrées au sein de labels de qualité ; on en attend un meilleur positionnement sur le marché.

Aujourd'hui, la recherche fournit des pistes et des éléments pour une conduite plus écologique des cultures. Des agriculteurs pionniers se sont lancés dans l'aventure d'une «écoagriculture» ou de l'«agroécologie» (Altieri, 1995). Ces nouvelles appellations recouvrent encore des réalités et des principes variés. L'imprécision des termes est un indicateur à la fois du caractère récent ou non stabilisé de ces notions et de la diversité des voies agronomiques et écologiques suivies ou tentées. Nous retiendrons ici qu'il s'agit toujours d'une combinaison de techniques de culture respectant et utilisant l'activité biologique au sein du sol et du peuplement végétal et visant le double objectif de la production, en quantité et en qualité, et du respect de l'environnement. Cet ensemble de techniques comporte toujours le recours raisonné aux produits de traitement chimiques et aux engrais minéraux. Le raisonnement de ces pratiques tient compte de l'état biologique du système sol-plante-atmosphère et des possibilités de régulation en son sein.

Les nouvelles conditions d'exercice de l'agriculture et les exigences de la société incitent à porter un autre regard sur les pratiques agricoles. Par exemple, aux niveaux de production physique : rendement en matière végétale ou en produit (sucre, amidon...) et de consommation d'eau et d'intrants (engrais, pesticides, semences, fuel), on peut ajouter des indicateurs de rendement énergétique mais aussi des évaluations d'impact écotoxicologique et d'effets sur divers compartiments de l'environnement.

On peut également revisiter les systèmes de grande culture à la lumière des principes et notions de l'écologie. Ces agrosystèmes apparaissent alors comme très réducteurs quant au nombre d'espèces présentes et utilisées au champ au cours d'une campagne. Il en résulte que l'on joue sur un faible nombre d'interactions entre espèces, interactions dont la recherche découvre et démontre les vertus. Une espèce végétale peut avoir des effets directs ou indirects sur d'autres végétaux par le biais de composés chimiques libérés dans le sol par les racines. C'est ce que l'on nomme allélopathie. Ces effets positifs ou négatifs sont connus empiriquement et parfois pris en compte dans les associations ou dans les successions de cultures. La connaissance de ces phénomènes a plus particulièrement avancé pour les crucifères excréant des glucosinolates dont on connaît désormais la composition chimique. Ils ont des effets sur des champignons parasites de cultures comme la pourriture molle du pois ou le piétin échaudage du blé. Comment, à terme, utiliser ces phénomènes pour la protection des cultures ?

Récemment, sont apparus en Europe des systèmes de culture assurant une couverture végétale permanente du sol ; ces systèmes, issus des régions tropicales, favori-

sent par le non labour l'accumulation de matière organique en surface et modifient la gestion des intrants et du calendrier cultural. Ils appliquent une simplification des techniques par suppression, ici totale, du travail du sol et, par là, la réduction très importante du temps de travail (globalement divisé par deux) qu'il soit manuel ou mécanisé. Ils se caractérisent par une couverture permanente du sol : la culture suivante est semée directement dans le couvert de la culture précédente. Ce couvert permanent remplit plusieurs fonctions : protection des sols en hiver et limitation du lessivage, augmentation de la teneur en matière organique en surface et donc des possibilités de minéralisation au profit des plantes cultivées toujours présentes. Le maintien d'une couverture permanente cultivée dans le froid de l'hiver comme dans la sécheresse estivale requiert un choix judicieux d'espèces végétales et de leurs conduites, particulièrement sous climat méditerranéen. La maîtrise du couvert hors compétition pour la plante cultivée amène à utiliser des herbicides chimiques. Un effort de recherche est en cours, dans le sens d'une réduction du recours à ces produits pour minimiser les risques d'atteinte à l'environnement.

Un des intérêts essentiels de ces pratiques est de redresser la teneur en matière organique des sols et, par là, de reconstituer une fertilité perdue suite à des techniques agressives ou minières. Ce mécanisme est illustré d'une part par l'effet de l'introduction d'espèces prairiales à fort enracinement dans les savanes d'Amérique latine sur le stockage du carbone (figure 4) (Fischer *et al.*, 1994), d'autre part, en grande culture (figure 5), par la capacité de ces systèmes de «récupérer» les pertes dues aux mauvaises pratiques des années précédentes (Séguy *et al.*, in Capillon et Séguy, 2002). Ces résultats donnent l'espoir de redresser la fertilité de sols par accumulation de matière organique quand le climat permet la production abondante de biomasse (parties aériennes et/ou racines).

Profondeur (cm)	Savane	<i>Brachiaria humidicola</i>	Différence	<i>Brachiaria humidicola + arachis pintoï</i>	Différence
0 – 20	70.3	76.0	5.7 ± 4.3	88.1	17.8 ± 4.2
20 – 40	52.4	57.6	5.3 ± 3.2	71.2	18.6 ± 6.0
40 – 100	74.3	89.2	14.9 ± 6.2	108.4	34.0 ± 10.0
0 – 100	197.0	222.8	25.9 ± 7.7	267.7	70.4 ± 15.5

Fig. 4 : Stockage du carbone (t/ha) comparé sous pâtures et savane (Llanos orientales de Colombia) (Fisher *et al.*, 1994)

Les systèmes agroforestiers associent espèces pérennes et annuelles sur une même parcelle en vue d'une double production, par exemple céréales et bois noble. Cette pratique est très répandue en agriculture tropicale mais aussi dans certaines régions européennes et méditerranéennes. Elle a été améliorée et associée à la gestion à court terme des cultures annuelles, et à moyen ou long terme avec les pérennes. Encore peu répandue, elle est appelée à se développer sur une partie de la surface d'exploitation pour atteindre deux types d'objectifs : des revenus futurs à 15-50 ans selon les espèces d'arbres choisies et un aménagement paysager de l'espace agricole. L'agroforesterie se comprend comme complémentaire d'un système de production classique, viticulture, semences et céréaliculture, systèmes fort répandus en zone méditerranéenne.

Horizon	t ₀	t + 5	t + 10		
	Forêt	5 ans x Monoculture de soja disques	5 ans Soja sur Triton	5 ans Riz sur <i>Arachis pintoï</i>	Riz + <i>Eleusine coracana</i> Soja + <i>Eleusine coracana</i> Maïs + <i>Stylosanthes guianensis</i> <i>Stylosanthes guianensis</i> Riz
Horizon 0 – 10 cm	3,4	2,6	2,8	3,2	3,5
Horizon 10 – 20 cm	2,0	1,8	2,3	1,8	1,9

Figure 5 : Evolution du taux de matière organique (en %) selon les systèmes de culture. Forêts tropicales humides du sud de l'Amazonie. Capillon et Séguy, 2002. Introduction de systèmes de culture avec couverture végétale (SCV) après cinq ans de travail aux disques et monocultures.

Ces agrosystèmes de type nouveau mettent fortement à contribution le compartiment biologique des sols. La macrofaune assure une aération et un brassage de la terre. Les micro-organismes gouvernent la minéralisation des composés organiques (pailles, racines, effluents d'élevage...) et contribuent par là à la nutrition des végétaux cultivés. Les micro-organismes contribuent également à dégrader ou à stabiliser des molécules indésirables apportées avec des amendements ou des traitements phytosanitaires. On est encore loin d'une connaissance et d'une maîtrise suffisantes de ce compartiment et des mécanismes favorables, défavorables ou pathogènes qui y ont lieu pour prétendre piloter le fonctionnement biologique du sol. Les écosystèmes microbiens sont encore une «*terra incognita*» : non seulement, on ne connaît pas encore toutes

les espèces microbiennes mais on n'a pas encore accès à la grande diversité de leurs fonctions. En écologie microbienne, les méthodes moléculaires ont permis d'avancer dans la connaissance et à terme dans la maîtrise. Des progrès ont été opérés dans les méthodes de diagnostic sur le fonctionnement biologique du sol et c'est déjà une avancée dans le pilotage des écosystèmes microbiens, en particulier dans le cas des épandages agricoles de sous-produits organiques ou de déchets urbains.

Des avancées sur la connaissance des mécanismes d'évolution de la matière organique et des relations avec les plantes sont nécessaires pour parvenir au pilotage des cultures à partir des processus de minéralisation de la fraction organique. Du point de vue de la production végétale, ces demandes concernent pour l'essentiel le contrôle de la biodisponibilité des éléments pour la croissance des couverts végétaux et les grands cycles (C, N, P, K). Elles concernent en premier lieu la rhizosphère, interface entre la plante et le sol, voie d'entrée des éléments minéraux dans les plantes et du carbone dans le sol, sur les grandes questions suivantes. C'est un milieu complexe et variable selon les conditions de milieu et les plantes concernées. La plupart des micro-organismes de la rhizosphère se développent opportunément à partir des exsudats carbonés racinaires. De nombreuses fonctions rhizosphériques résultent de la présence d'une population donnée de micro-organismes (symbiose, pathogénies, antagonismes, fonctions microbiennes spécifiques) mais aussi des relations entre populations et leur environnement.

Plusieurs questions se posent : est-il possible de modifier la structure des communautés microbiennes de la rhizosphère, et si oui, par quels moyens ? quels rôles respectifs jouent la plante et les communautés microbiennes de la rhizosphère ? d'une manière plus générale, dans quelle mesure ces acteurs modifient-ils les cycles biogéochimiques (INRA, 2003 et 2004) ?

Des programmes de recherche visent à répondre à ces questions par l'identification des populations de micro-organismes, des mécanismes de minéralisation et de réorganisation des éléments, des relations avec les plantes cultivées. Au sein des systèmes de culture, il s'agira d'identifier l'effet des techniques culturales (travail du sol, fertilisation, pesticides) et des apports de matière organique fraîche sur la biomasse microbienne et son fonctionnement puis sur sa capacité à fournir des éléments minéraux aux cultures selon le rythme de leurs besoins (figure 6).

Les racines sont les interfaces du peuplement cultivé avec le sol dans ses composantes chimiques pour la nutrition et la biodisponibilité des minéraux, physiques par la structure qu'elles subissent et contribuent à améliorer, organiques par leur rôle important dans la constitution du stock organique (J.-Roger Estrade et J. Caneill *in* Doré *et al.*, 2006). Un nouveau champ d'investigation s'ouvre pour les agronomes mais aussi pour les généticiens qui

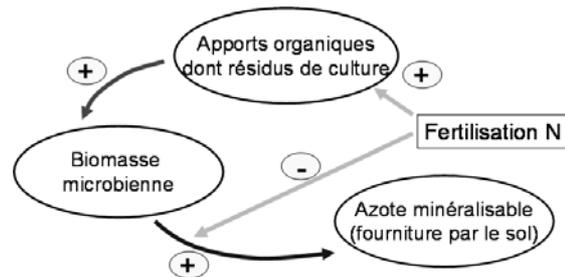


Fig. 6 : Relations biomasse microbienne - apports organiques et azote minéralisable (d'après Chaussod, 1996)

ont, jusqu'à présent, davantage fait porter leur effort sur les parties aériennes des plantes que sur leur aptitude à enrichir le sol en carbone.

Ces thèmes de recherche concourent à une meilleure compréhension des mécanismes et de la dynamique au sein du sol et du peuplement végétal cultivé. Ils constituent des préalables à la proposition de techniques et de règles de décision pour le pilotage des cultures basé sur «l'offre du sol». Le travail de recherche et d'adaptation de ces phénomènes - on peut même parler de domestication pour les écosystèmes microbiens ! - est encore important pour arriver à une entière intégration au sein des systèmes agricoles. Toutefois, ils offrent des perspectives nouvelles pour la production, dont certaines sont déjà effectives, surtout en matière de diagnostic sur la qualité des sols, et, au-delà, pour une activité agricole plus écologique et mieux acceptée par la société.

Conclusion

Des progrès importants ont été réalisés sur la connaissance des cycles biogéochimiques (carbone et azote) et de leurs relations avec le fonctionnement des peuplements cultivés. On a abouti à des préconisations plus serrées et régionalisées en matière de fertilisation, satisfaisant les besoins des cultures tout en limitant l'atteinte à la qualité de l'eau et de l'atmosphère. Les efforts de la recherche pour une meilleure compréhension de la dynamique des matières organiques endogènes et exogènes fournissent des données pour mieux caler les bilans de fertilisation ; ils ouvrent des perspectives pour la maîtrise et l'intégration de ces phénomènes dans le pilotage des cultures.

La progression dans les connaissances sur le compartiment organique et sur ses relations aux cultures apporte un éclairage sur les pratiques variées en «agroécologie» et sur la possibilité d'extrapoler les réussites enregistrées par les promoteurs de ces pratiques. Celles-ci doivent être confrontées à la double épreuve d'un fondement sur des réalités scientifiquement établies et d'une agriculture développée et performante où les progrès sont plus diffi-

ciles du fait du niveau de production atteint et visé et les effets plus difficiles à montrer du fait du niveau élevé des facteurs disponibles (en particulier la richesse chimique du milieu). Les voies suivies par les agriculteurs innovants et par les savoirs locaux interrogent et, par là, stimulent voire orientent les travaux des chercheurs. Il est donc important de leur accorder une attention curieuse, interrogative et rigoureuse.

Le défi pour l'agriculture est de savoir quitter l'assurance d'un apport d'intrants en excédent pour mieux solliciter le sol. Si les réponses ne sont pas encore toutes là, on peut toutefois constater que les perspectives offertes par la recherche sont réelles et vont dans le sens d'une production assurée et plus respectueuse de l'environnement. Cela concerne également la protection des cultures qui, en liaison avec les progrès génétiques, évolue vers des pratiques plus écologiques. Ce dernier aspect n'est pas abordé dans cet exposé.

Le travail de recherche et d'adaptation de ces phénomènes - on peut même parler de domestication pour les écosystèmes microbiens ! - est encore important pour arriver à une entière intégration au sein des systèmes agricoles. Toutefois, ils offrent des perspectives nouvelles, dont certaines sont déjà effectives, pour la production et, au-delà, pour une activité agricole plus écologique et mieux acceptée par la société. Ainsi, de vieilles notions, oubliées dans le vertige d'une artificialisation chimique performante et commode, refont surface : choix d'espèces et de variétés adaptées au cycle climatique et économisant l'eau, successions de cultures (les «rotations») limitant les risques de maladies, d'érosion et de lessivage des minéraux (donc de pollution) mais maximisant le stockage de la matière organique (donc du carbone) et son offre aux cultures. C'est bien un regard nouveau qu'il faut jeter sur des pratiques ancestrales !

Bibliographie

- 1 ALTIERI M.A., 1995. - *Agroecology the science of sustainable agriculture*. Westview Press Second edition, ISBN 0-8133-1717-7.
- 2 BOIFFIN J., STENGEL P., 2000. - Réapprendre le sol : Nouvel enjeu pour l'agriculture et l'espace rural. *In Déméter 2000*, pp. 147-211.
- 3 CAPILLON A., SÉGUY L., 2002. - Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. Cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 88, n° 8, pp. 63-70.
- 4 CAPILLON A. *et al.*, 2006. - Agriculture durable : Faut-il repenser les systèmes de cultures ? *In Déméter 2006*, pp. 57-168.
- 5 CHAUSSOD R., 1996 - La qualité biologique des sols : évaluation et implications. *Etude et gestion des sols* 3, pp. 261-278.
- 6 DENORROY P., *et al.*, 2004. - *Regifert, interpréter les résultats des analyses de terre*. Versailles, INRA éditions, «Techniques et pratiques», 132 p.
- 7 DORÉ T., LE BAIL M., MARTIN P., NEY B., ROGER-ESTRADE J., coord., 2006 - *L'agronomie aujourd'hui*. Editions Quae, Versailles.
- 8 FISCHER M. J. *et al.*, 1994. - Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, vol. 371, pp. 236-238.
- 9 GRIFFON M., 2006. - *Nourrir la planète*. Odile Jacob, Sciences, Paris, 456 p.
- 10 INRA, juin 2003. - *Rapport d'activité (1998-2002) et de prospective du département environnement et agronomie*.
- 11 INRA, mars 2004. - *Schéma stratégique du département environnement et agronomie, 2004-2008*.
- 12 JEUFFROY *et al.*, 2000. - Fonctionnement d'un peuplement de blé en conditions de nutrition azotée sub-tropicale. *In Bonhomme R., Maillard P. (eds), Fonctionnement des peuplements végétaux sous contraintes environnementales*, Paris, INRA, «Les colloques», 93, pp. 289-304.
- 13 PELLERIN F. *et al.*, 2000. - Evolution du raisonnement de la fertilité phosphatée des grandes cultures. *Etude et gestion des sols* 7, pp.53-71.
- 14 TILMAN D. *et al.*, 2002. - Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, vol. 418, pp. 671.

Alain Capillon

Agro Montpellier - 2 place Pierre Viala - 34060 Montpellier Cedex 1
capillon@supagro.inra.fr

Agriculture de précision : prise en compte d'informations issues de la télédétection dans la gestion des cultures

Martine Guérif
INRA, Avignon

Introduction

La promotion d'outils permettant une gestion durable des agrosystèmes constitue un enjeu de recherche et développement fort. Ces outils visent à raisonner les différentes interventions culturales de manière à optimiser les sorties des systèmes de production vis-à-vis de critères de durabilité économique aussi bien qu'environnementale. Un des moyens d'y parvenir est de jouer sur la réalisation spatialisée de l'optimum, concourant à constituer une agriculture de précision. Ce terme désigne le plus souvent la prise en compte de la variabilité intra-parcellaire des états des sols et des cultures dans la gestion des interventions techniques. Nous proposons ici d'en étendre le champ à la prise en compte de la variabilité des états et de son évolution temporelle, non seulement à l'échelle de la parcelle mais également à celle du petit territoire.

En Europe, la mutation de l'agriculture conduit, dans les zones de grande culture, à des surfaces d'exploitation et de parcelles grandissantes, intégrant des composants d'histoire culturale différente dont l'hétérogénéité peut être importante ; cela entraîne une difficulté accrue pour l'agriculteur d'appréhender par ses moyens traditionnels la variabilité spatio-temporelle des états de ses parcelles (Boiffin et Stengel, 2000). Indépendamment de cette évolution, certains milieux extériorisent une variabilité intra-parcellaire importante (zones avec relief, zones où la couverture pédologique est complexe...). La connaissance des états des parcelles constitue, dans le champ de contraintes défini par le système de production et la réglementation, la base de la prise de décision par l'agriculteur vis-à-vis de ses choix techniques ; elle conditionne donc la possibilité d'optimiser ces derniers vis-à-vis des objectifs à la fois de production et de limitation des impacts sur l'environnement. De même, pour le gestionnaire de bassins d'irrigation ou de zones de collectes d'organismes stockeurs, usines de transformation, la connaissance de la variabilité des états des parcelles et de son évolution temporelle est un élément essentiel de la prise de décision.

Par ailleurs, l'évolution du progrès technologique permet de disposer d'un grand flux d'informations spa-

tialisées et temporelles sur l'état des parcelles. Ces informations sont nouvelles, aussi bien par la nature des grandeurs qu'elles concernent (positionnement géographique, réflectance des couverts, résistivité électrique des sols, capteurs d'humidité et de rugosité de surface des sols, de rendement...) que par leur fréquence spatiale et temporelle accrue et leur mode d'acquisition (satellites, capteurs embarqués sur les engins agricoles ou opérés par des sociétés de service) ou de diffusion (industriels, prescripteurs ou conseillers agricoles). En outre, les progrès dans la caractérisation des performances des agro-équipements et la possibilité de moduler spatialement leur action ouvrent des possibilités sur un plan opérationnel de gestion spatialisée des interventions techniques. Indépendamment de cette possibilité de moduler les actions techniques, qui n'est encore que peu développée, et inenvisageable dans le cas de l'agriculture familiale des pays du Sud, il y a un enjeu fort à étudier comment le flux d'informations spatialisées rendu disponible par le progrès technologique peut permettre de développer des méthodes innovantes d'aide à la décision qui pourront s'appliquer à différents niveaux d'organisation (parcelle, exploitation, bassin). L'objectif est de fournir aux agriculteurs et aux gestionnaires des moyens pour raisonner de façon optimale leurs pratiques vis-à-vis de la variabilité du milieu et réaliser une meilleure adaptation spatiale des intrants aux potentialités de production des parcelles.

La démarche générale

L'intégration des flux d'informations spatialisées dans la chaîne de décision suppose une articulation entre deux domaines de compétences :

- celui de la mesure et de son interprétation dans un certain nombre de spécialités (télédétection, géophysique, capteurs de rendement...) pour avoir accès à des cartographies des états du système sol-plante ;
- celui de l'aide à la décision (figure 1).

L'ensemble des informations auxquelles donnent accès les différents moyens de mesure permet d'établir un dia-

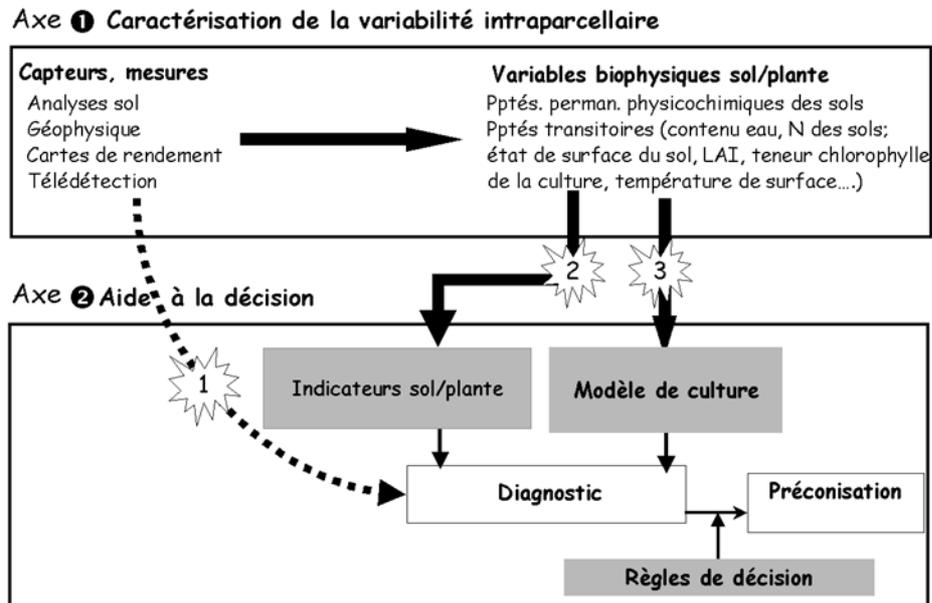


Fig. 1 : Le principe de l'approche proposée pour passer d'un ensemble de mesures spatialisées sur le sol et les cultures à une préconisation spatialisée. (Extrait de Guérif et al., 2001)

gnostic agronomique spatialisé sur le fonctionnement des cultures. Ce diagnostic peut être fait :

- par relation directe mesure-diagnostic, en court-circuitant l'explication par les variables biophysiques concernées ;
- à partir de variables diagnostiques - ou indicateurs - dérivées (le plus souvent par des méthodes corrélatives) des variables d'état mesurées ;
- ou bien à partir de modèles de fonctionnement du sol et/ou de la culture qui sont alimentés par les valeurs de ces variables.

L'association de ce diagnostic à des règles de décision adaptées permet ensuite d'établir une préconisation relative à l'intervention considérée. Nous donnerons par la suite des exemples de ces différents niveaux d'application : plutôt des indicateurs à l'échelle de territoires, des indicateurs et des modèles à l'échelle intra-parcellaire.

Mesures et caractérisation de la variabilité intraparcellaire

Nous illustrerons la démarche en limitant notre propos aux possibilités de caractérisation offertes par la télédétection satellitaire, et renvoyons le lecteur à des articles de synthèse sur le sujet (Pierce et Nowak, 1999 ; Cook et Bramley, 1998 ; Sylvester-Bradley *et al.*, 1999) pour ce qui concerne les caractérisations accessibles par d'autres méthodes de mesures (mesures ponctuelles spatialisées

grâce à des méthodes géostatistiques, méthodes géophysiques, capteurs divers embarqués sur les engins agricoles, cartographie du rendement...).

■ Variables accessibles par télédétection

Le signal émis ou réfléchi par la végétation et le sol dépend très étroitement des caractéristiques de structure (surface, rugosité, orientation taille, distribution spatiale) des éléments du couvert végétal et des caractéristiques optiques, diélectriques et de température des éléments qui le composent. Ces variables sont généralement appelées variables biophysiques du couvert végétal. On pourra se référer à Guérif *et al.* (2001) pour avoir un aperçu des potentialités des différents domaines spectraux et des différentes variables biophysiques auxquelles ils donnent accès.

Les caractéristiques du couvert végétal sont principalement accessibles dans le domaine solaire, i.e. du visible au moyen infrarouge, bien qu'elles interviennent dans le signal émis ou réfléchi dans les autres domaines. Les caractéristiques permanentes des sols telles que texture, matière organique, teneur en calcaire ou en fer modifient la signature spectrale des sols, et pourraient être estimées, sans toutefois qu'une étude n'en ait fait une démonstration convaincante. C'est donc principalement sur les variables du couvert, en particulier, l'indice foliaire et le contenu en chlorophylle des feuilles, que les travaux d'utilisation de la télédétection pour l'agriculture de précision se concentrent.

■ **Estimations des caractéristiques du couvert : les méthodes inverses**

Les premières approches d'estimation des caractéristiques du couvert par télédétection ont utilisé des relations statistiques calées sur des observations expérimentales. Toutefois, les limites de telles approches ont rapidement été identifiées, principalement liées à la qualité et la fiabilité de l'extrapolation de ces relations à d'autres conditions que celles qui prévalaient lors des observations utilisées pour l'étalonnage. Ces approches sont maintenant progressivement remplacées par des approches plus analytiques basées sur l'inversion des modèles de transfert radiatif (dans l'atmosphère, le couvert et la feuille).

D'une manière générale, le problème inverse en télédétection consiste à estimer des caractéristiques d'une cible, à partir d'un nombre limité d'observations (figure 2). Un modèle de transfert radiatif permet de simuler les observations (mesures radiométriques) à partir des caractéristiques des cibles (variables biophysiques du couvert ou du sol). Les modèles de transfert radiatif sont généralement complexes, non linéaires et dépendent de plusieurs variables biophysiques. Il n'est donc pas possible de calculer analytiquement leur fonction inverse. De plus, les modèles sont limités par leurs hypothèses et les mesures sont contaminées par des erreurs qui peuvent être importantes. Le problème inverse est donc généralement mal posé, en particulier par rapport au critère de convergence : une petite perturbation dans les entrées du problème (erreur sur les données radiométriques) peut engendrer de grandes variations sur la solution. Afin d'aboutir à des estimations plus précises et robustes, il est nécessaire de fournir au système un maximum d'informations pertinentes.

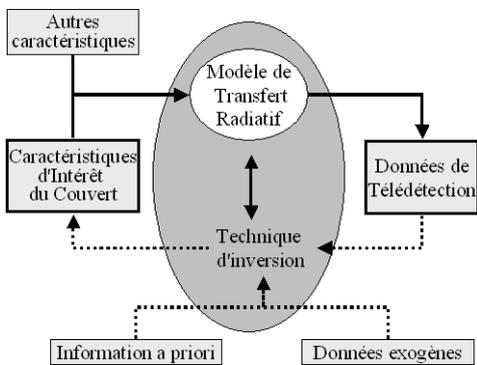


Fig. 2 : Schéma montrant le principe de l'inversion. Les flèches pleines correspondent au fonctionnement des modèles dans le sens direct. Les flèches discontinues correspondent à l'inversion des modèles. (Extrait de Guérif et al., 2001).

La figure 3 illustre des résultats obtenus par Moulin *et al.* (2007) en inversant des données de réflectance acquises par un radiomètre CASI sur une parcelle de blé en valeurs d'indice foliaire et de contenu en chlorophylle du couvert.

Intégration des informations spatialisées pour l'aide à la décision

On illustrera les démarches développées dans des applications diverses, aux deux échelles envisagées, celle de bassins et celle de la parcelle, avec des approches basées sur des mesures directes, des indicateurs ou encore des modèles (voies 1, 2, 3 de la figure 1).

■ **Utilisation de mesures directes ou d'indicateurs dérivés des mesures**

• *Gestion de périmètres canniers*

On peut envisager une utilisation directe des réflectances fournies par des images Spot par exemple pour dériver un certain nombre d'outils d'aide à la gestion de bassins de production. C'est par exemple ce qui a été réalisé pour des périmètres canniers dans le projet Sucrette conduit par Bégué *et al.* (2005) en Guadeloupe, Réunion et Maurice.

Grâce aux signatures spectrales contrastées des champs de canne en pleine végétation, coupés ou encore labourés (figure 4a, planche I), il est possible d'utiliser des images acquises à différentes dates pour cartographier l'évolution des coupes (figure 4b, planche I) et donc aider à

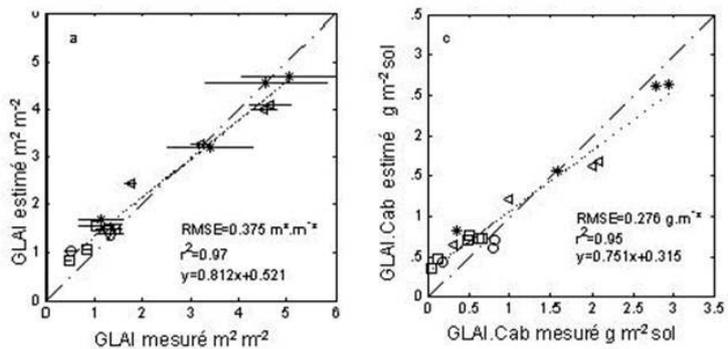


Fig. 3 : Résultats d'estimation d'indice foliaire (GLAI) et contenu en chlorophylle des feuilles (GLAI.Cab) sur une parcelle de blé par inversion de 4 dates de données acquises par capteur CASI aéroporté. (d'après Moulin et al., 2007).

l'organisation et au suivi de la récolte de canne (gestion des coupes, approvisionnement des usines, élaboration de statistiques).

Au-delà de cette étude, qui repose sur une classification des pixels de l'image, l'analyse des données de réflectance, combinées sous forme d'indices de végétation, permet de suivre la distribution spatiale des états de croissance de la végétation, et, si l'on dispose d'acquisitions répétées, son évolution temporelle. En effet, on sait qu'un indice de végétation tel que le NDVI est très lié à l'indice foliaire vert de la culture (Bappel *et al.*, 2005) qui est lui-même une variable essentielle pour porter un diagnostic sur l'état de croissance d'une culture. On peut donc caractériser les différentes parcelles constituant un bassin cannier par leur caractéristique de variabilité intra-parcellaire. Ces indications peuvent être utilisées par les gestionnaires du périmètre pour localiser les parcelles les plus (ou les moins) productives, les plus (ou les moins) variables spatialement (figure 5, planche II) et, à partir de cette information, prendre des décisions sur l'adaptation des itinéraires techniques à appliquer.

- *Gestion de périmètres irrigués*

Une autre application concerne la production d'indicateurs pour aider à une utilisation rationnelle de la ressource en eau, adaptée aux besoins des cultures. Cela constitue un enjeu capital pour un nombre croissant de régions du monde dont celles du pourtour de la Méditerranée, mais aussi de plus en plus dans les pays du Nord.

Une des difficultés dans ce domaine consiste à mieux connaître la répartition spatiale et l'évolution temporelle des besoins en eau des cultures et de leur prélèvement qui, pour une culture donnée, dépendent de son niveau de développement. Certains auteurs proposent d'utiliser l'indice NDVI pour estimer les besoins et la consommation d'eau par les cultures. C'est le cas de Duchemin *et al.* (2006) qui estiment le coefficient cultural (rapport de l'évapotranspiration maximale d'une culture à l'évapotranspiration potentielle représentant la demande climatique) à partir de NDVI, dans le contexte de la gestion d'un périmètre irrigué en zone semi-aride au Maroc (programme SudMed, Chehbouni *et al.*, 2007). Sur la base des relations curvilinéaires constatées entre le NDVI et le LAI vert d'une part, et entre le coefficient cultural et le LAI vert d'autre part, ils proposent une relation linéaire entre le coefficient cultural et le NDVI, qu'ils calibrent et valident à partir de mesures de terrain (figure 6 a, planche II). Grâce à une série de onze images qu'ils ont interpolées au cours du temps, et avec la connaissance de la demande climatique, ils ont pu estimer une cartographie de la consommation d'eau par les cultures au cours d'une saison de culture (figure 6 b, planche II).

- *Aide au pilotage de la fertilisation azotée*

La maîtrise de la fertilisation azotée est un enjeu capital pour permettre la pratique d'une agriculture performante, atteignant des objectifs ambitieux de rendement

et de qualité des produits, qui soit respectueuse de l'environnement, grâce à une limitation drastique des pertes d'azote vers l'atmosphère ou la nappe. Plusieurs outils de pilotage ont été mis au point, pour une utilisation par l'agriculteur. La méthode du bilan d'azote Azobil (Machet *et al.*, 1990) utilise une mesure ponctuelle d'un indicateur sol (le reliquat d'azote minéral en sortie d'hiver) ; la méthode Hydro-N-Tester utilise une mesure ponctuelle d'un indicateur plante (la mesure indirecte de l'état azoté des feuilles via sa teneur en chlorophylle) qui permet d'ajuster la dose en cours de culture pour les cultures d'hiver (blé, colza).

La télédétection permet d'envisager de disposer d'un indicateur spatialisé sur l'ensemble d'une parcelle, d'une exploitation, d'un bassin. On peut envisager différentes façons d'utiliser cet indicateur spatialisé : faire varier la dose pour optimiser en chaque point les performances agro-environnementales de la culture, ou définir une dose uniforme pour optimiser les performances à l'échelle de la parcelle ; on peut enfin vouloir obtenir des performances (qualité du grain) les plus homogènes possibles sur l'ensemble de la parcelle pour satisfaire un cahier des charges particulier.

Nous avons montré qu'il était possible, à partir des variables LAI et teneur en chlorophylle des feuilles, obtenues par inversion d'images de télédétection, d'estimer un indicateur, la quantité d'azote absorbée par la culture. Cet indicateur permet, par comparaison à une valeur de référence d'une culture dont les besoins en azote sont parfaitement couverts, de déterminer la quantité d'azote à apporter sous forme d'engrais, avec une précision de l'ordre de 20 kg d'azote par hectare (soit 20 %) (Houlès *et al.*, 2007). L'avantage de ce type de méthode est qu'elle donne directement une cartographie des doses d'azote à apporter. C'est le principe de produits proposés par Farmstar (Blondlot, 2005) et de façon moins automatique, les recommandations fournies par le système Nsensor de la société Yara.

■ Utilisation de modèles de culture

Les indicateurs que nous avons cités sont des instruments intéressants pour faire un diagnostic instantané, fondé sur une composante (la plante), mais pas sur l'ensemble du système (sol-plante) étudié. De plus, ils ne permettent pas d'avoir une vision prédictive de l'évolution de ce système. On s'est donc tourné vers l'utilisation de modèles de cultures, qui simulent le fonctionnement de l'ensemble du système, sous forçage climatique et anthropique. La principale limite à leur application spatialisée réside dans la difficulté de renseigner en tout point les variables d'entrée nécessaires, en particulier celles relatives au sol. Heureusement, ces modèles simulent des variables d'état qui sont de même nature que les variables biophysiques accessibles par inversion des données de télédétection ou très proches d'elles: il est donc pos-

sible de comparer ces observations avec les simulations du modèle pour corriger le modèle et estimer certaines variables d'entrée inconnues (figure 7, planche II). Cette assimilation des données de télédétection dans le modèle nous assure la possibilité d'en faire une application spatialisée, à l'échelle de la parcelle ou du bassin.

- *Diagnostic de croissance et estimations de rendement sur un bassin d'alimentation de sucreries*

Une application intéressante de ces méthodes a été réalisée pour estimer la croissance et le rendement de parcelles de betterave au sein d'un bassin sucrier, et ainsi donner des outils de diagnostic spatialisé des conditions de croissance et d'aide à l'organisation de la campagne de récolte.

Lors d'un travail conduit en Picardie, dans le nord de la France (Guérif et Duke, 1998 ; Launay et Guérif, 2005), on a montré qu'il était possible, grâce à l'assimilation de données de télédétection, de ré-estimer pour chaque parcelle certains paramètres et variables d'entrée mal connues du modèle et de permettre ainsi une bonne simulation de la croissance. Les paramètres et variables les plus importants dans ce contexte sont ceux qui expriment le résultat de la phase d'implantation de la culture, paramètre très variable et qui détermine largement la croissance ultérieure, et la réserve utile du sol, qui détermine la satisfaction des besoins en eau de la culture.

La figure 8 (planche III) montre l'amélioration de la simulation du LAI permise par la ré-estimation des paramètres d'implantation (pour la première parcelle) et de réserve utile (deuxième parcelle). Pour la première, la valeur des paramètres par défaut, trop optimistes par rapport à la situation réelle de cette parcelle, sous-estimait la dynamique du LAI, qui a pu être corrigée grâce à l'assimilation des données. Pour la seconde, située en contexte de sol crayeux, la réserve utile du sol était largement sous-estimée par la carte des sols disponible ; sa ré-estimation à une valeur plus élevée a permis de corriger cette différence. L'estimation des paramètres ainsi réalisée permet de mieux décrire le fonctionnement global de la culture et de mieux estimer le rendement final pour l'ensemble des parcelles étudiées (figure 9).

- *Outil de pilotage de la fertilisation azotée*

Pour dépasser les limites liées à l'utilisation d'indicateurs instantanés, nous avons exploré l'intérêt d'un modèle de culture associé à la télédétection pour réaliser une préconisation spatialisée (Houlès V., 2004 ; Houlès *et al.*, 2007 ; Guérif *et al.*, 2007)

Grâce aux variables fournies par le modèle, il est possible de construire un critère prenant en compte à la fois les objectifs agronomiques (maximisation du rendement et de la teneur en protéine des grains) et environnementaux (limitation des risques de lessivage des nitrates) assignés à l'agriculture. Par ailleurs, la simulation de ce critère pour une grande variété de scénarios techniques et

climatiques, permet de définir le scénario technique optimal (Houlès *et al.*, 2007 b).

L'assimilation de données obtenues par télédétection, mettant en œuvre une méthode bayésienne, (Guérif *et al.*, 2006) permet alors de spatialiser les scénarios optimaux, en ré-estimant localement les caractéristiques inconnues du sol.

La figure 10 et la figure 11 (planche III) montrent les résultats de la mise en œuvre de ce principe pour la préconisation du troisième apport d'azote sur une parcelle de blé en Picardie. Grâce à l'assimilation de quatre dates de LAI et de teneur en chlorophylle des feuilles, obtenues par inversion de données hyperspectrales CASI, il est possible d'estimer une distribution des rendements pour l'ensemble des pixels d'une parcelle : on constate que la variabilité est en bon accord avec les rendements observés, bien qu'avec un léger biais (figure 10 b), alors que sans assimilation on ne peut que prévoir un rendement moyen pour la parcelle, à partir de l'information a priori moyenne dont on peut disposer à partir d'une carte pédologique .

A partir des estimations spatialisées des variables d'intérêt (rendement, teneur en protéine des grains, bilan d'azote) qui permettent de calculer en tout point la valeur du critère agro-environnemental pour différents scénarios climatiques et techniques, il est possible de sélectionner pour chaque pixel le scénario optimal. C'est ce qu'illustre la figure 11 (planche III).

A l'issue de la phase d'assimilation, on dispose également d'une distribution spatiale des paramètres caractéristiques du sol, dont la réserve utile (cf. figure 7, planche II). Mais cette estimation se révèle non robuste : lorsqu'on simule la croissance et le rendement de la même parcelle pour une autre année, on constate un fort biais.

Cette approche, très prometteuse, reste donc à conforter, notamment en développant des méthodes robustes d'estimation des caractéristiques du sol. Ce problème d'inversion, est en effet par nature mal posé : compte tenu du grand nombre de paramètres en jeu, il n'y a pas unicité des solutions. La voie explorée consiste, outre l'utilisation d'informations a priori, à utiliser un nombre d'observations beaucoup plus important, de nature diverse (télédétection, mais aussi cartes de rendement), et acquises sur plusieurs années.

Conclusion

Nous avons vu à travers ces différents exemples comment l'accès à des informations spatialisées sur les états du couvert et du sol, par télédétection, à des temps précis et répétés au cours du temps, permet de produire des informations de niveau plus élevé. Ces nouvelles informations entrent alors dans les processus d'aide à la décision pour la gestion des cultures, à différentes échelle d'espace, depuis l'intra-parcellaire jusqu'au territoire.

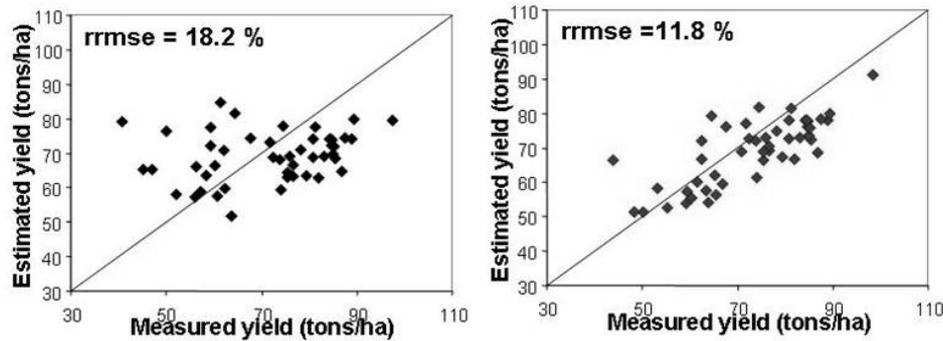


Fig. 9 : Amélioration de l'estimation des rendements de betterave sucrière grâce à l'assimilation de données de télédétection (SPOT et capteur aéroporté) sur une quarantaine de parcelles. A droite : situation après assimilation ; à gauche : sans assimilation (d'après Launay et Guéris, 2005).

rmse = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne

rmse = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne relative

measured yield = rendement mesuré ; estimated yield = rendement estimé

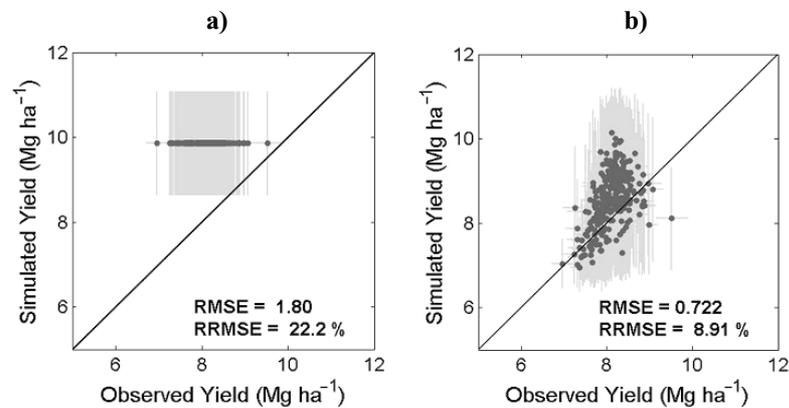


Fig. 10 : Comparaison simulé-observé pour la variable rendement sur les 280 pixels de la parcelle avant (a) et après (b) assimilation des données de télédétection (utilisation du climat réel, à posteriori).

Les gains permis par ces nouveaux modes de gestion résident d'abord dans des gains d'exhaustivité, des économies de temps et d'énergie. Grâce à la vision globale d'un territoire et l'accès à la variabilité spatiale au sein de ce territoire, il est en effet possible de planifier, orienter des contrôles sur le terrain, agréger des résultats individuels.

Les gains résident aussi dans des estimations et prévisions plus précises, spatialement explicites et répétées dans le temps, soit d'indicateurs entrant dans des systèmes de décision, soit directement de préconisations d'une technique, comme pour la fertilisation azotée.

Ces nouveaux moyens dont le développement doit être poursuivi constituent un enjeu fort en permettant aux agriculteurs et aux gestionnaires de mieux prendre en compte les nouvelles et multiples contraintes qui s'exercent sur la production agricole, et de concilier performance économique et respect de l'environnement.

Bibliographie

- 1 BAPPEL E., BÉGUÉ A., MARTINÉ J.F., PELLEGRINO A., SIEGMUND B., 2005, Assimilation in a sugarcane yield forecasting model of biophysical parameter estimated by remote sensing using SPOT4&5 data, *Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*, Guatemala, 30 Jan.-4 Feb., 25, 260-264.
- 2 BÉGUÉ A., DEGENNE P., BAILLARIN, F., LEMONNIER H., LEBOURGEOIS V., GARGAROS D., 2005, *Projet SUCRETTE (Suivi de la Canne à sucre par Télédétection)*, CIRAD, Spot Image, Montpellier (FR), Rapport final RTE, 97 p. + annexes.
- 3 BLONDOT A., GATE P., POILVÉ H., 2005, Providing operational nitrogen recommendations to farmers using satellite imagery. In: Wageningen Academic Publishers, *5th European Conference on Precision Agriculture*, Uppsala, 9-12/06/2005, pp. 345-351.
- 4 BOIFFIN J., STENDEL P., 2000, *Réapprendre le sol : nouvel enjeu pour l'agriculture et l'espace rural*, Déméter, Eds Armand Colin. pp 147-211.

- 5 CHEHBOUNI A.G., ESCADAFAL R., DUCHEMIN B., BOULET G., SIMONNEAUX V., DEDIEU G., MOUGENOT B., KHABBA S., KHARROU H., MAISONGRANDE P., MERLIN O., CHAPONNIÈRE A., EZZAHAR J., ER-RAKI S., HOEDJES J., HADRIA R., ABOURIDA A., CHEGGOUR A., RAIBI F., BOUDHAR A., BENHADJ I., HANICH L., BENKADDOUR A., GUEMOURIA N., CHEHBOUNI A.H., OLIOSO A., JACOB F., SOBRINO J., An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in arid and semi-arid regions: the SUDMED Program, Submitted to *International Journal of Remote Sensing*.
- 6 COOK S.E., BRAMLEY G.V., 1998, Precision agriculture - opportunities, benefits and pitfalls of site-specific crop management in Australia, *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38 : 753-63.
- 7 DUCHEMIN B., HADRIA R., ERR-RAKI S., BOULET G., MAISONGRANDE P., CHEHBOUNI A., ESCADAFAL R., EZZAHAR J., HOEDJES J., KHARROU M.H., KHABBA S., MOUGENOT B., OLIOSO A., RODRIGUEZ J-C., SIMONNEAUX V., 2006, Monitoring wheat phenology and irrigation in Center of Morocco: on the use of relationship between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices, *Agricultural Water Management*, 79:1-27, (doi:10.1016/j.agwat.2005.02.013).
- 8 HOULÈS V., 2004, *Mise au point d'un outil de modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture*, Thèse INA-PG, 294 pp.
- 9 HOULÈS V., GUÉRIF M., MARY B., 2007a, Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations, *European Journal of Agronomy*, Sous presse.
- 10 HOULÈS V., MARY B., GUÉRIF M., 2007b, Elaboration d'une méthode de préconisation spatialisée de la fertilisation azotée basée sur un modèle de culture et la télédétection 1- le modèle et les critères agro-environnementaux, In : *Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures : vers une agriculture de précision*, Guérif M. & King D (eds), Editions Quae, collection Update Sciences and Technologies.
- 11 GUÉRIF M., DUKE C., 1998, Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugarbeet using optical remote sensing data assimilation, *Eur. J. Agron.*, 9,127-136.
- 12 GUÉRIF M., BARET F., MOULIN S., BÉGUÉ A., 2001, Prise en compte de l'hétérogénéité parcellaire et de son évolution temporelle dans la gestion des interventions techniques : potentiel de la télédétection, In: *Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision*, E. Malézieux (ed), collection Repères, CIRAD, Montpellier (FRA), 303-326.
- 13 GUÉRIF M., HOULÈS V., MAKOWSKI D., LAUVERNET C., 2006, Data assimilation and parameter estimation for precision agriculture using the crop model STICS, In: *Working with Dynamic Crop Models*, Wallach D, Makowski D. and Jones J.W. (eds.), Elsevier, 395:401.
- 14 GUÉRIF M., HOULÈS V., MARY B., MOULIN S., MACHET J.M., 2007, Elaboration d'une méthode de préconisation spatialisée de la fertilisation azotée basée sur un modèle de culture et la télédétection 2- intérêt de la modulation et méthodes de spatialisation, In: *Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures : vers une agriculture de précision*, Guérif M. & King D. (eds), Editions Quae, collection Update Sciences and Technologies.
- 15 LAUNAY M., GUÉRIF M., 2005, Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111, 321-339.
- 16 LEBOURGEOIS V., BEGUE A., DEGENNE P., BAPPEL E., 2007, Monitoring sugarcane harvest and planting using geospatial technology: the Reunion Island experience, *International Sugar Journal*, (in press).
- 17 MACHET J.M., DUBRULLE P., LOUIS P., 1990, AZOBIL: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method, In: *Proceedings of the 1st ESA Congress*, Paris, 21-22.
- 18 MOULIN S., ZURITA R., GUÉRIF M., 2007, Estimation de variables biophysiques du couvert par inversion de modèles et télédétection dans le domaine optique, In: *Hétérogénéité parcellaire et gestion des cultures : vers une agriculture de précision*, Guérif M. & King D. (eds), Editions Quae, collection Update Sciences and Technologies.
- 19 PIERCE F.J., NOWAK P., 1999, Aspects of precision agriculture, *Advances in Agronomy*, 67 : 1-85.
- 20 SIMONNEAUX V., DUCHEMIN B., HELSON D., ER-RAKI S., OLIOSO A., CHEHBOUNI A., 2007, Using High Resolution Image Time Series for crop classification and evapotranspiration estimation over an irrigated area in south Morocco, *International Journal of Remote Sensing*, (in press).
- 21 SYLVESTER-BRADLEY R., LORD E., SPARKES D.L., SCOTT R.K., WILTSHIRE J.J.J., ORSON J., 1999, An analysis of the potential of precision farming in Northern Europe, *Soil Use and Management*, 15 : 1-8.

Martine Guérif

UMR CSE INRA-UAPV, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex
mog@avignon.inra.fr

Les impacts du changement climatique sur l'agriculture, en particulier en Europe

Bernard Seguin

INRA, Avignon, Unité Agroclim

Le changement climatique

Accroissement de la teneur en gaz carbonique et autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère, élévation de la température, modification des régimes pluviométriques, et donc des différents termes du bilan hydrique (évaporation, drainage, ruissellement), évolution de la couverture nuageuse, et donc du bilan radiatif : l'ensemble des facteurs bioclimatiques qui régissent le fonctionnement des écosystèmes est amené à se modifier, mais comment prévoir et quantifier ces modifications et leurs conséquences ?

A la fin du siècle, les modèles prévoient des concentrations atmosphériques en CO₂ situées entre 540 et 970 ppm, à comparer avec une concentration avant la révolution industrielle de 280 ppm et avec une concentration actuelle d'environ 367 ppm. L'accroissement moyen de la température de surface est estimé devoir être de 1,5 à 6 °C de 1990 à 2100. Cette augmentation serait sans précédent dans les 10 000 dernières années. Il est presque certain que toutes les surfaces continentales se réchaufferont plus rapidement que la moyenne, particulièrement celles situées à haute latitude en saison froide. Une comparaison des scénarios les plus récents d'évolution de la pluviométrie saisonnière dans 32 régions du monde faite par le groupe II de l'IPCC montre une tendance à l'augmentation pour l'Europe du Nord (0 à + 3 % par décennie) au printemps, à l'automne et en hiver. En revanche, pour la zone Europe du Sud et Afrique du Nord, les modèles prédisent une réduction de la pluviométrie estivale (de - 0,2 à - 6 % par décennie), qui pourrait également intervenir en Europe du Nord (de -1,8 à + 0,8 % par décennie). Une tendance similaire à un assèchement estival se retrouve dans les simulations concernant d'autres régions de l'hémisphère Nord (Amérique du Nord, Chine, Méditerranée), même si cette tendance est loin de constituer une certitude.

Le contexte pour l'agriculture

Le changement climatique aura évidemment, en premier lieu, un impact sur l'agriculture et la production ali-

mentaire qui demeure un défi majeur : s'il n'est toujours pas possible aujourd'hui d'alimenter correctement les six milliards d'habitants de la planète, dans cinquante ans, ce sont trois milliards d'habitants supplémentaires qu'il faudra nourrir dans un contexte climatique modifié.

Au-delà de cette ressource alimentaire, c'est l'ensemble de la production végétale et animale au sein de la biosphère continentale qui sera également perturbée, sachant que le changement climatique n'est qu'un des éléments de la pression exercée plus largement par l'homme, qui étend le qualificatif au changement global en prenant en compte :

- la déforestation ou au contraire la reforestation (si la destruction des forêts tropicales se poursuit, sait-on que la forêt progresse en France d'environ 30 000 ha par an ?) ;
- le surpâturage et la désertification, les incendies de forêts ;
- l'urbanisation (dont on vient d'évaluer l'effet aux Etats-Unis de diminution de la production de biomasse du continent nord-américain à environ 1,6 %) ;
- et bien sûr les pollutions diverses des milieux terrestres et aquatiques...

Les impacts du seul changement climatique seront donc fortement dépendants de l'ensemble de ces actions, et il est sans doute un peu artificiel de les considérer isolément. Il est cependant souhaitable de bien en connaître les grandes lignes pour mieux évaluer les conséquences futures de ces actions, et définir des modalités d'adaptation pour tirer éventuellement parti des conséquences positives (il peut y en avoir, un réchauffement n'étant pas forcément une mauvaise chose pour tout le monde...), et limiter les effets négatifs de ce changement qu'il faudra bien subir, même si notre action commune au niveau des gaz à effet de serre est encore susceptible de tempérer (ou non...) l'ampleur du réchauffement.

Par ailleurs, il n'est pas réaliste d'envisager l'avenir de l'agriculture sans tenir compte de l'économie de la production et des marchés. Dans le contexte français et européen par exemple, le futur (et même le présent) est à nouveau en question à travers les controverses sur l'évolution de la PAC (politique agricole commune) et des subventions qui y sont liées. C'est évidemment un enjeu majeur, car l'économie gouverne majoritairement

le choix des productions par les agriculteurs et les systèmes de culture ou d'élevage qu'il est amené à mettre en œuvre dans ce cadre. La prise en compte des influences sur les nuisances environnementales et la santé des consommateurs sont également au premier plan des préoccupations qui amènent à formuler les concepts d'une agriculture durable. Ceux-ci ne se limitent plus à la recherche d'une production optimisée pour assurer la seule nourriture de la population, mais doivent également répondre à la dimension de la multi-fonctionnalité de l'agriculture, devant assurer, entre autres, la préservation de l'espace rural. D'autres fonctions sont également émergentes, comme l'utilisation de la biomasse comme énergie renouvelable et, de façon plus large, la diminution de l'utilisation de l'énergie fossile (biocarburants, chimie verte, stockage de carbone).

Les caractères généraux des impacts prévisibles sur la production agricole

Dans ses grandes lignes, au niveau du fonctionnement écophysique des plantes cultivées, le premier élément à prendre en compte n'est pas directement lié à la modification des variables climatiques, mais plutôt au facteur qui en est essentiellement responsable, à savoir l'augmentation du gaz carbonique (ou dioxyde de carbone) atmosphérique CO_2 . En effet, celle-ci produira un effet spécifique aux couverts végétaux en stimulant la photosynthèse : avec l'hypothèse d'un doublement du CO_2 pour la fin de ce siècle, les résultats font état d'une augmentation de la photosynthèse brute de l'ordre de 30 % pour les plantes en C3 (telles que le blé, le riz, etc.) et 15 % pour les plantes en C4 d'origine tropicale comme le maïs, à cause d'un plateau de saturation de la photosynthèse atteint à des concentrations en CO_2 inférieures pour les C4. Ce qui conduit à une augmentation de l'assimilation nette de l'ordre de 20 % pour les C3 et 10 % pour les C4, en prenant en compte l'augmentation de la respiration liée à l'élévation de température. Par ailleurs, il faut envisager une augmentation de la résistance stomatique, limitant la transpiration et qui conduit à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau (rapport photosynthèse nette / transpiration) en particulier pour les C4 (Bethenod *et al.*, 2001). Le tout conduira à une augmentation significative de la production potentielle de biomasse, comme illustré dans la figure 1.

Cet effet sur la photosynthèse sera combiné à l'effet propre du réchauffement climatique sur la température en premier lieu, mais également sur les autres facteurs, en particulier la pluie. Bien que la réponse physiologique des plantes à un enrichissement de l'atmosphère en gaz carbonique et à une augmentation concomitante de la température entraîne en théorie une production plus importante de biomasse, les effets sur le rendement des espèces cultivées, à l'échelle du peuplement, risquent d'être beaucoup plus contrastés. Cela est particulière-

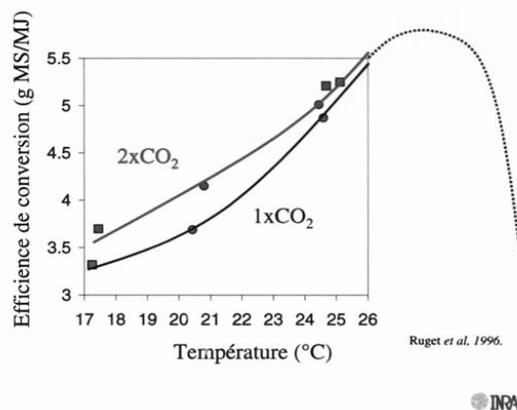


Fig. 1 : Augmentation de l'efficacité de conversion du maïs par un doublement de la concentration en CO_2 à différentes températures (d'après Ruget *et al.*, 1996)

ment vrai pour le Sud, où l'optimum thermique pour la photosynthèse est souvent déjà atteint (par exemple pour le riz, dont la fertilité des épillets décroît fortement au-delà de 34 °C, ou pour le maïs, dont la viabilité du pollen baisse au-delà de 36 °C), sinon dépassé dans certaines conditions. Dans les conditions tempérées, l'augmentation de température peut favoriser la plupart des processus physiologiques, mais elle aura également un impact négatif sur les cultures telles que pratiquées actuellement en accélérant leur rythme de développement et donc en raccourcissant les cycles de culture et, par suite, la durée de fonctionnement de l'usine photosynthétique. Au bout du compte, le bilan résultant en la production de biomasse devrait prendre des aspects variés, en fonction du type de couvert et des conditions climatiques associées aux conditions culturales pour les plantes cultivées.

C'est effectivement ce qui ressort du grand nombre d'études consacrées ces vingt dernières années à la prédiction sur l'impact du réchauffement climatique sur l'agriculture à l'échelle mondiale (voir par exemple les ouvrages de Rosenzweig et Hillel, 1998, ou Reddy et Hodges, 2000). L'analyse des dernières synthèses de l'IPCC (2001) fait clairement apparaître une tendance à un effet majoritairement défavorable dans les régions tropicales chaudes, alors que les résultats pour les régions tempérées sont plus contrastés (figure 2, planche III), avec cependant un effet plus négatif lorsque le réchauffement dépasse les 2 à 3 °C, comme illustré par la figure 3 pour le blé et le maïs. C'est un premier élément qui permet de situer le contexte général pour l'agriculture européenne, qui correspond pour l'essentiel à ce cadre géographique des régions tempérées, avec cependant une différenciation majeure entre les pays plus froids du nord de l'Europe et ceux plus chauds du sud, ce contraste se retrouvant clairement dans le cas de la France qui se situe assez bien à la charnière de ces deux grandes zones climatiques.

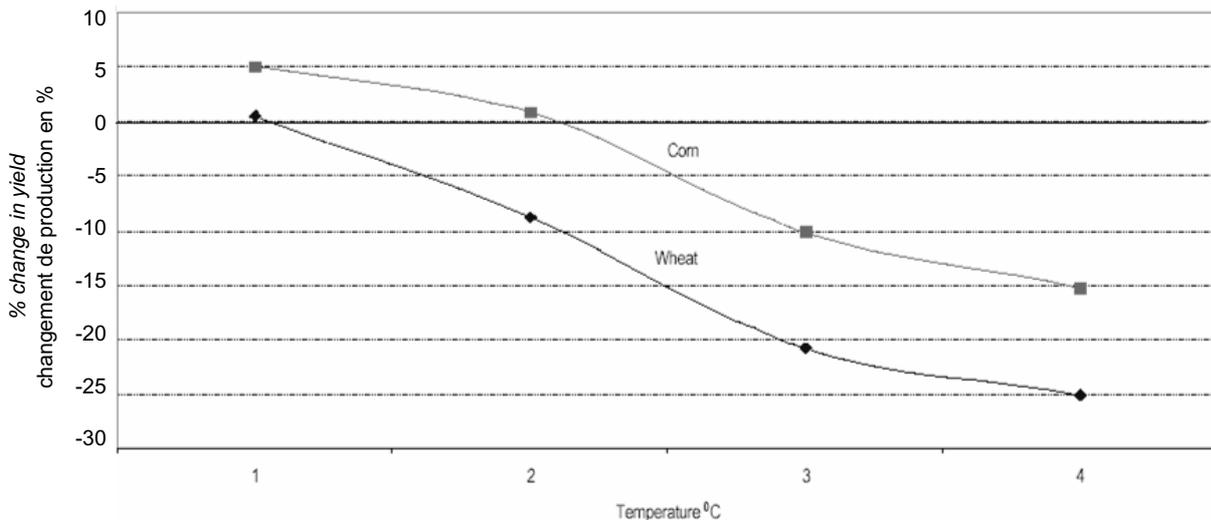


Fig. 3 (d'après Easterling et Apps, 2005) : Effet du réchauffement sur le rendement du blé (wheat) et du maïs (corn) en zone tempérée à partir des études répertoriées dans le 3^e rapport de l'IPCC.

Quels sont les effets sur la productivité des cultures en Europe ?

Les travaux effectués dans le cadre du projet européen CLIVARA (Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe, Downing *et al.*, 2000) et la revue des synthèses préparée par Olesen et Bindi (2002) permettent de dégager les grandes lignes suivantes pour les impacts potentiels :

- L'action conjointe de la stimulation de la photosynthèse et d'un réchauffement de l'ordre de 2 à 3 °C devrait se traduire par une augmentation de la productivité potentielle de la plupart des cultures (y compris les prairies) dans la plupart des régions. Hulme *et al.* (1999) ont établi que, pour le blé, l'influence du seul changement climatique (sans considérer de stimulation de la photosynthèse par l'augmentation du CO₂) n'aurait pas de poids significatif par rapport à la variabilité naturelle sur les trente dernières années, à l'exception de la Finlande, de l'Allemagne et des Pays-Bas. Par contre, l'introduction de cet effet du CO₂ conduit à des augmentations substantielles de 10 à 30 %. Pour l'ensemble des cultures, les valeurs chiffrées telles que celles rassemblées par Olesen et Bindi (2002) sont difficiles à interpréter directement car elles ont été obtenues par différents auteurs avec des hypothèses de départ différentes. Elles situent plutôt les augmentations dans un intervalle de 10 à 30 % pour le blé, de même que pour la pomme de terre, et plus pour le maïs ou le soja. Elles sont généralement plus fortes pour le nord de l'Europe (en particulier la Scandinavie) que pour le sud (Espagne, Portugal) ou l'est (Ukraine).

- Dans ces régions, mais plus largement (sud de la France, Italie, Grèce), l'effet déterminant sera celui de la pluviométrie, un stress hydrique élevé et répétitif étant susceptible de convertir l'effet potentiel positif en résultat très négatif, comme cela a été vérifié au cours de l'été 2003 (Seguin *et al.*, 2004). Totalement exceptionnel par les températures de canicule plus élevées de 4 à 5 °C que les normales saisonnières (Chuine *et al.*, 2005), il a aussi été marqué par une sécheresse intense, qui a provoqué des baisses de rendement pouvant atteindre 20 à 30 % localement pour les cultures d'été et plus de 50 % pour la production fourragère, avec des effets intégrés avoisinant les 10 % au niveau de l'Union européenne).

Ces tendances se retrouvent au niveau du territoire français, comme l'ont établi les articles de synthèse de Delecolle *et al.* (1999), Soussana (2001) et plus récemment Seguin *et al.* (2005).

Au niveau des grandes cultures, les résultats des simulations effectuées avec les modèles de culture sur le blé et le maïs permettent de conclure à des effets légèrement positifs sur le premier (avec des augmentations de rendement allant de 2,5 % à 5,7 %), et des effets plus variables sur le maïs (+ 10 % à - 16 % dans le cas d'une culture irriguée dans le Sud-Est).

Au niveau des prairies, la conjugaison de travaux expérimentaux (sous serre et en enrichissement naturel à l'extérieur) et de modélisation à partir d'un modèle d'écosystème prairial conduit à envisager, dans les conditions du Massif central, une augmentation de la production de biomasse aérienne de l'ordre de 25 % (dont 18 % attribuables au seul doublement de CO₂). En termes de système d'élevage, la valorisation de cette augmenta-

tion de production devrait permettre une augmentation du chargement animal (en gros de 20 %) ou une augmentation de la saison de pâturage de l'ordre de trois semaines, avec un accroissement de l'ingestion de 7 à 20 % et de 2 à 20 % pour la production de viande.

En ce qui concerne les cultures pérennes (arbres fruitiers et vigne), le facteur primordial devrait être l'avancée des stades phénologiques, d'autant plus marquée que l'on s'éloigne en cours de saison de la levée de dormance, qui risque d'être plus tardive à cause du manque de froid. Pour certaines espèces telles que l'abricotier, les hivers doux risquent même de créer des troubles physiologiques (chute de bourgeons, fruits avortés). Ensuite, l'action de la chaleur reprendra vite le dessus et l'avancée de la date de floraison peut conduire paradoxalement à augmenter le risque de gel (figure 4), et à envisager des conditions climatiques moins favorables pour la fécondation et la pollinisation, en dépit du réchauffement des températures. Pour la vigne, la période de la maturation sera décalée d'après le 15 août à courant juillet, avec des conséquences certaines sur la qualité de la vendange, plus chargée en sucre (et donc en degré alcoolique) et moins en acide.

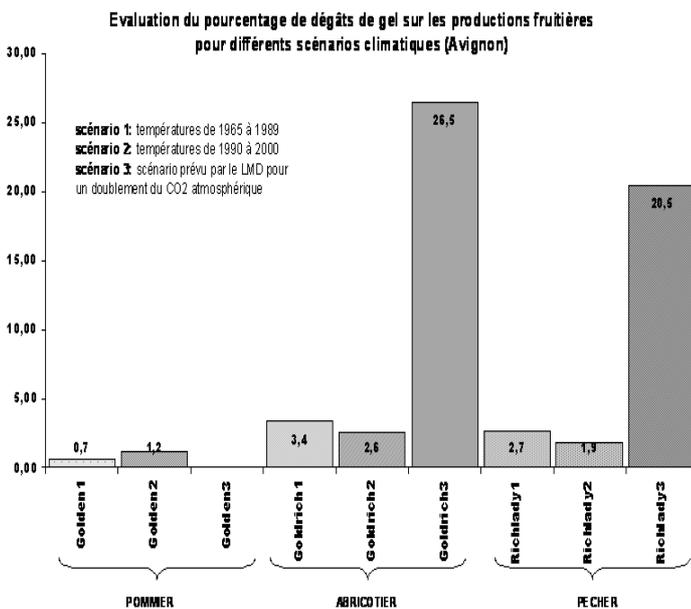


Fig. 4 : Effet du réchauffement climatique sur les dégâts de gel simulés pour trois productions fruitières (pommier, abricotier, pêcher) sur le site d'Avignon.

Il faut relativiser la portée de ces prévisions en notant que la disponibilité de l'eau peut devenir un facteur limitant prédominant, susceptible de fortement handicaper les cultures en cas de sécheresse forte et récurrente comme le montre l'expérience des années récentes, en particulier bien sûr 2003. Par ailleurs, les éléments qui viennent d'être présentés s'appuient uniquement sur les valeurs moyennes des facteurs climatiques. L'éventualité

d'événements extrêmes et, de façon plus large, la prise en compte de la variabilité de ces facteurs pourraient conduire à des impacts différents, par le dépassement de valeurs-seuils encore mal cernées. Enfin, il faudrait considérer l'impact sur les adventices (mauvaises herbes) et les insectes et maladies cryptogamiques, encore mal cerné à l'heure actuelle. Il a ainsi pu être constaté que, dans certains cas, le carpocapse des pommes est passé, dans le Midi, de deux à trois cycles par an. À l'inverse, le phoma du tournesol a été sans doute limité ces dernières années dans le Sud-Ouest par les fortes températures, et pratiquement éradiqué pour le moment par la sécheresse de 2003. Au-delà des bouleversements des systèmes écologiques complexes que représentent les relations entre hôtes et parasites (il est possible que les décalages de cycles en réponse à l'augmentation de température soient significativement différents pour les deux composantes), il faut également prendre en compte la possibilité de mouvements géographiques qui amènent certaines maladies ou ravageurs, véhiculés par les moyens modernes de transport, à s'installer dans des régions où les conditions climatiques le leur permettront. Des recherches sont en cours pour établir, par exemple, le rôle du réchauffement sur l'apparition dans les serres du Sud d'une aleurode (*Bemisia tabacci*).

Le passé récent préfiguration de l'avenir ?

Les éléments présentés ci-dessus résultent essentiellement de la considération de scénarios encore soumis à beaucoup d'incertitudes. Cependant, la mise en évidence récente d'un réchauffement significatif non seulement à l'échelle du globe, mais également au niveau du territoire français, sur le siècle passé, amène à rechercher des confirmations de ces projections à partir des observations sur l'évolution récente des productions correspondantes.

Si les agriculteurs (et les éleveurs) font état d'une modification des calendriers culturaux qui pourrait être liée à cette particularité climatique, d'ailleurs confirmée par des analyses récentes sur les dispositifs expérimentaux de l'INRA (pratiquement un mois d'avance depuis 1970 sur les dates de semis du maïs pour quatre sites couvrant l'ensemble du territoire), il n'a pas encore été possible de l'apprécier de manière objective, pas plus que d'évaluer son poids éventuel dans l'évolution récente des rendements. Par contre, l'analyse des données phénologiques (dates d'apparition des stades de développement) sur les arbres fruitiers et la vigne, cultures à priori beaucoup moins dépen-

dantes sur ce point des décisions culturelles, a permis de mettre en évidence des avancements significatifs de stades tels que la floraison des arbres fruitiers (une dizaine de jours en trente ans sur des pommiers dans le Sud-Est, d'après Domergue *et al.*, figure 5, planche III) ou la date de vendange pour la vigne (presque un mois dans la même région au cours des cinquante dernières années, d'après Ganichot, 2002).

L'adaptation : changer sur place ou se déplacer ?

■ Changer sur place...

Les perspectives présentées plus haut ont, pour le moment, surtout considéré les systèmes tels qu'ils sont pratiqués actuellement. Mais, en admettant implicitement leur stabilité géographique, une marge appréciable d'adaptation apparaît possible en mobilisant l'expertise agronomique au sens large pour les adapter aux conditions climatiques modifiées (recours au matériel génétique approprié, mise au point d'itinéraires techniques adaptés, ajustement de la fertilisation et de l'irrigation, etc.). De façon générale, on peut estimer que l'adaptation des grandes cultures pourrait s'effectuer sans trop de problèmes, dans la mesure où les années passées ont montré la capacité des agriculteurs à les faire évoluer rapidement en fonction, en particulier, des contraintes résultant de la PAC. De même pour les prairies et l'élevage. Il faut cependant relativiser cette vision optimiste sur une capacité d'ajustement rapide (quelques années), en soulignant une fois de plus les incertitudes actuelles sur la pluviométrie et le bilan hydrique. Pour les cultures pérennes, si le diagnostic sur l'adaptation des systèmes de culture reste identique dans ses grandes lignes, la capacité d'adaptation paraît moins forte. Elle nécessite de prendre en compte une durée plus longue, de l'ordre de dix à vingt années. D'ores et déjà, pour les arbres fruitiers, devant les évolutions phénologiques constatées, il faut se préoccuper maintenant du choix du matériel végétal adapté. Quant à la vigne, elle pose des problèmes spécifiques, à cause du lien au terroir (Seguin et Garcia de Cortazar, 2005).

■ Se déplacer...

Au-delà de ce premier niveau, il doit être envisagé cependant un deuxième niveau d'adaptation, passant par un déplacement géographique des zones de production ou de plantation. A l'heure actuelle, il n'apparaît pas encore de signe tangible de déplacement géographique des systèmes de production. Et pourtant, le réchauffement observé équivaut, sur le siècle, à un déplacement vers le Nord de

l'ordre de 180 km ou en altitude de l'ordre de 150 m. Ce qui traduit la plasticité déjà évoquée, mais jusqu'où ou jusqu'à quand ? On peut donc légitimement envisager l'éventualité de la remontée (vers le Nord ou en altitude) de certaines cultures, ou l'introduction de nouvelles cultures au Sud. Dans le premier cas, à l'échelle de l'Europe, on peut envisager de voir le pois et le colza remonter jusqu'en Scandinavie et Finlande, le maïs-grain (et la vigne !!!) s'étendre vers la Grande-Bretagne, les Pays-Bas ou le Danemark, ainsi que vers l'Est (Pologne, etc.), le soja et le tournesol suivre de près cette progression, etc. Pour le Sud, s'il ne paraît pas impossible d'envisager techniquement la possibilité d'une extension de l'aire de culture du coton et l'apparition de cultures tropicales comme l'arachide, leur opportunité économique apparaît faible actuellement, et c'est plutôt la menace sur la ressource en eau qui représente l'élément essentiel: si la tendance des scénarios à une diminution de la pluviométrie estivale (de l'ordre de 20 à 30 %) autour du Bassin méditerranéen est confirmée dans le futur, elle pourrait entraîner un abandon de l'agriculture dans certaines zones traditionnelles de culture en sec, et une tension accrue sur l'utilisation de l'eau entre les différents utilisateurs au détriment de l'irrigation.

Cependant, dans l'hypothèse de déplacements géographiques, la nature du lien avec le caractère local jouera un grand rôle : s'il apparaît possible, a priori, de cultiver du blé ou du maïs dans des régions différentes, cela n'irait pas de soi pour les productions plus typées (au premier rang, évidemment la vigne) dont une grande partie de la valeur ajoutée provient de l'existence d'une zone d'appellation ou d'un terroir. Dans la mesure où la notion de terroir implique une étroite adéquation entre le milieu physique (sol et climat), les variétés (cépages pour la vigne) et les techniques culturelles, elle implique évidemment un risque de fragilité particulière par rapport à une évolution du climat. Il n'est pas envisageable de délocaliser les AOC (appellations d'origine contrôlées)!!! L'année 2003 a été plutôt rassurante sur ce point : même s'il est encore trop tôt pour en connaître le millésime, et si la conjonction de la sécheresse et de la canicule a eu des effets néfastes par certains aspects, la vigne a démontré une capacité certaine d'adaptation à ces conditions exceptionnelles.

En guise de conclusion, le futur et le présent...

Bien évidemment, les projections sur les impacts reposent sur la crédibilité des scénarios du futur. Si la perspective d'une augmentation significative de la température moyenne apparaît fortement crédible, sa répartition saisonnière et sa variabilité, ainsi que la fréquence des extrêmes demeurent un sujet de questionnement, au même titre que les prévisions sur les pluies qui ont un impact tout aussi primordial.

Pour le moment, et de façon schématique, il est permis de penser qu'un réchauffement limité (de l'ordre de 2 °C) ne provoquerait qu'un léger déplacement d'équilibre, restant dans les limites des capacités d'adaptation presque traditionnelles : le siècle passé a bien surmonté des variations des températures estivales de l'ordre de + ou - 1 °C, et la génétique a permis de remonter la culture du maïs-grain, limité au sud-ouest de la France en 1945, d'environ 500 km (nord de Paris). Au-delà, il est difficile de cerner les conséquences d'un réchauffement avoisinant les 4 à 5 °C, qui provoquerait sans doute des ruptures significatives. Mais, dans ce cas, l'impact du réchauffement serait tel, sur tous les écosystèmes et tous les secteurs d'activité, qu'il serait vraiment illusoire de pronostiquer des impacts à partir des seules considérations de productivité potentielle.

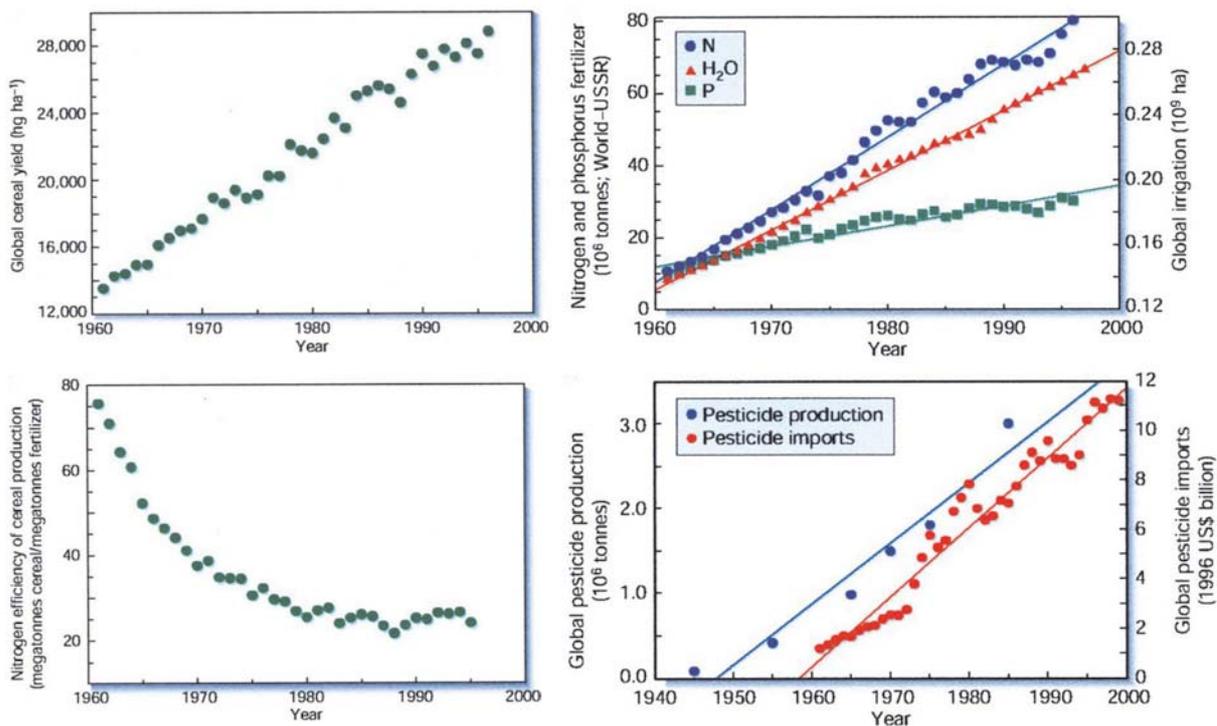
On en revient ainsi aux considérations de l'introduction sur le poids de l'impact du réchauffement par rapport à tous les aspects socio-économiques qui vont déterminer l'avenir de l'agriculture européenne. En considérant uniquement les aspects techniques, Olesen et Bindi (2002) ont pu évaluer le poids relatif du changement climatique à l'horizon 2050 à peu près équivalent à celui du progrès technologique pour les pays de la vieille Europe, alors qu'il s'élevait seulement au quart de celui-ci pour les nouveaux adhérents de l'Est. Il convient évidemment, pour se rapprocher de la réalité, de considérer aussi exhaustivement que possible l'ensemble des contraintes qui pèseront sur l'avenir de l'agriculture européenne, en prenant en compte différents scénarios qui affecteront diversement le coût de l'énergie, la disponibilité des terres, les marchés commerciaux, etc. Ewert *et al.* (2005) ont ainsi pu établir, à partir d'une telle étude intégrée, que le rendement du blé (et de la plupart des autres cultures) pour l'Union européenne à 15+2 devrait augmenter de 25 à 163 % par rapport à l'an 2000 suivant l'horizon considéré (2020, 2050, 2080) et les scénarios. A l'horizon 2050, par exemple, la progression serait de 37 % pour le scénario B₂ et de 101 % pour le scénario A₁F₁. Le poids du changement climatique est apparu faible, au final, sur la production globale de l'Union européenne.

C'est un résultat qui pourrait relativiser les interrogations sur l'impact du changement climatique sur l'agriculture européenne. Il faut cependant signaler que les auteurs de cette étude soulignent que ce faible effet global provient de pondération des effets régionaux, qui sont eux significatifs et du même ordre que les effets technologiques, comme l'ont estimé Olesen et Bindi (2002).

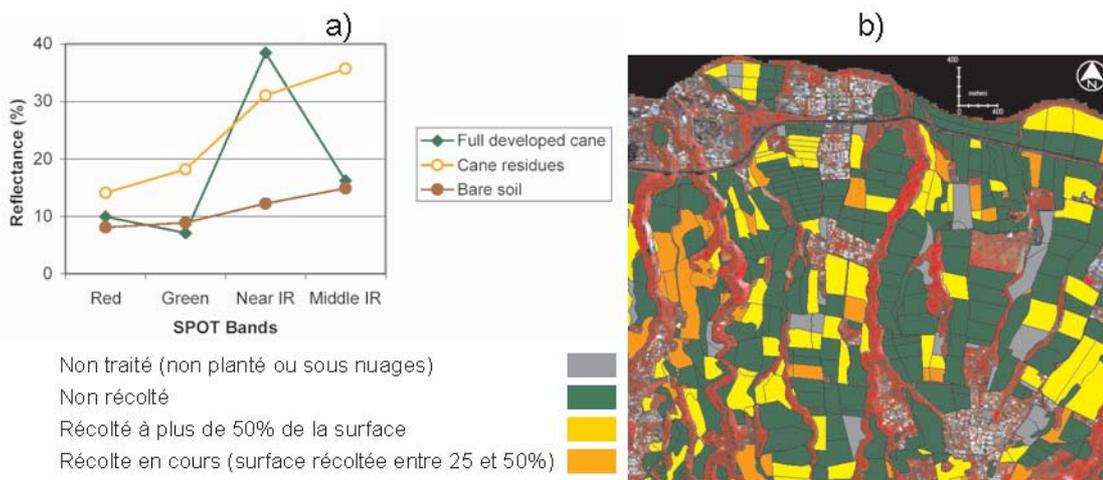
Le changement climatique ne sera donc pas le seul facteur qui jouera sur l'agriculture européenne, c'est sûr, mais son impact sur la productivité des cultures et la répartition géographique de leurs aires potentielles sera clairement significatif. Par ailleurs, l'éventualité d'un accroissement de la variabilité et d'un renforcement des événements extrêmes (en particulier des températures élevées et des sécheresses dans le Sud) pourrait renforcer cet impact.

Bibliographie

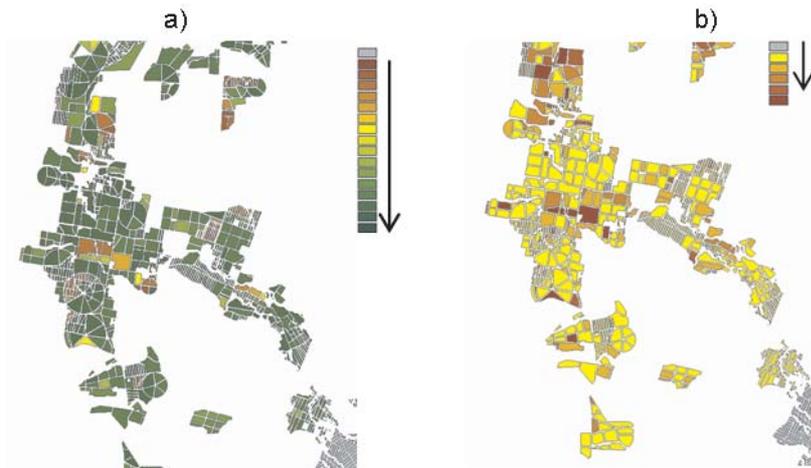
- BETHENOD O., RUGET F., KATERJI N., COMBE L., RENARD D., Impact of atmospheric CO₂ concentration on water use efficiency of maize. *Maydica*, 46 (2001), 75-80.
- CHUINEI, YIOU P., VIOUVY N., SEGUIN B., DAUX V., LE ROY LADURIE E. Back to the Middle Ages ? Grape harvest dates and temperature variations in France since 1370. *Nature*, (2004) 432, 289-290.
- DELECOLLE R., SOUSSANA J.F., LEGROS J.P., Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 85 (1999), 45-51.
- DOMERGUE M., GARCIA DE CORTAZAR I., SEGUIN B., BRISSON N., RIPOCHE D., Le réchauffement récent du climat en France et ses conséquences sur l'agriculture. *Actes du XVI^e colloque de l'AIC, Varsovie (Pologne), 10-14 septembre 2003*. Blazejczyk K., Adamczyk A.B. (eds.), Acad. Pol. Sci., doc. geogr. 39 (2003), 85-88.
- DOMERGUE M., LEGAVE J.M., CALLEJA M., MOUTIER N., BRISSON N., SEGUIN B., Réchauffement climatique : quels effets sur la floraison chez trois espèces fruitières ? *Arboriculture fruitière*, (2004), 578, 27-33.
- DOWNING T.E., HARRISON P.A., BUTTERFIELD R.E., LONSDALE K.G., *Climate change, climatic variability and agriculture in Europe. An integrated assessment*. Environmental change Institute, University of Oxford, Oxford (GB), (2000), research report n° 21, 443 pp.
- EASTERLING W., APPS M., Assessing the consequences of climate change for food and forest resources : a view from IPCC. *Climatic change*, (2005), 70, 165-189.
- EWERT F., ROUSEVELL M.D.A., REGINSTER I., METZGER M.J., LEEMANS R., Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 107, 101-116.
- GANICHOT B., Evolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales. *Actes des 6^{es} Rencontres Rhodaniennes*. Institut Rhodanien. Orange, France (2002), 38-41.
- HULME M., BARROW E.M., ARNELL N.W., HARRISON P.A., JOHNS T.C., DOWNING T.E., Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability, *Nature*, 397, 688-691.
- IPCC, *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*, Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge (2001).
- OLESEN J.E., BINDI M., Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy, *Eur. Journ. Agronomy*, (2002), 16, 239-262.
- PERARNAUD V., SEGUIN B., MALEZIEUX., DÉQUÉ M., LOUSTAU D., Agrometeorological research and applications needed to prepare agriculture and forestry adapt to 21st century climate change. *Climatic change*, (2005), 70, 319-340.
- REDDY K.R., HODGES R.F., *Climate change and global crop productivity*. CABI Publishing, Wallingford (2000).
- ROSENZWEIG C., HILLEL D., *Climate change and the global harvest*. Oxford University Press, Oxford (1998).
- RUGET F., BETHENOD O., COMBE L., Repercussions of increased atmospheric CO₂ on maize morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels. *Maydica* 41 (1996), 181-191.
- SEGUIN B., BACULAT B., BARET F., BRISSON N., HUARD F., RUGET F., An overview of the consequences of the 2003 summer for agriculture in France. *Proceedings of the*



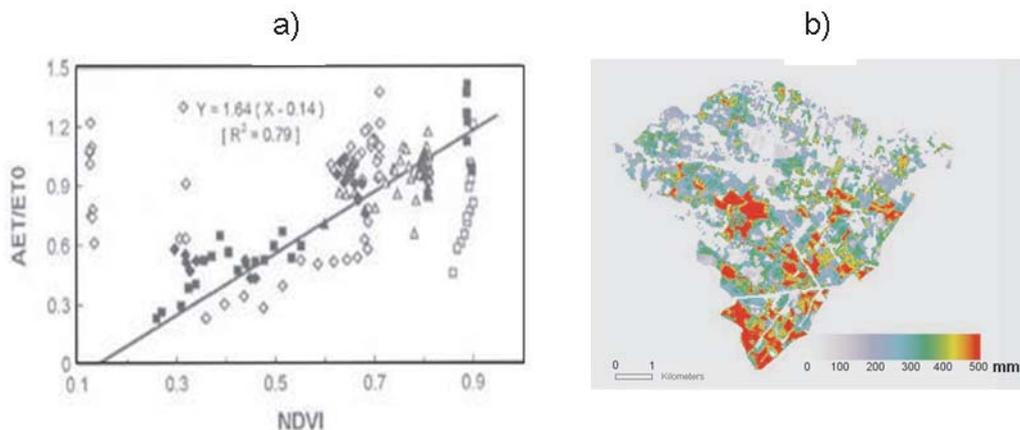
A. Capillon - Fig. 1 : Evolution de l'agriculture 1960 -2000. Tilman et al., 2002
 a : production mondiale de céréales (FAO, 2001) ;
 b : consommation mondiale d'engrais azotés et phosphorés et d'eau d'irrigation ;
 c : efficacité de la fertilisation azotée (production annuelle de céréales / consommation d'engrais) ;
 d : production et importation mondiales de pesticides.



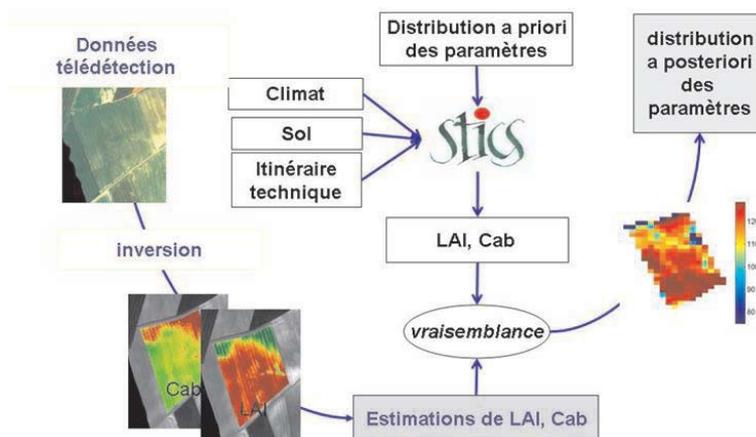
M. Guérif - Fig. 4 : Signature des surfaces de canne dans les différentes bandes spectrales du satellite SPOT et cartographie de l'évolution des chantiers de canne à sucre à partir de l'exploitation d'une image SPOT à La Réunion (d'après Lebourgeois et al., 2007).



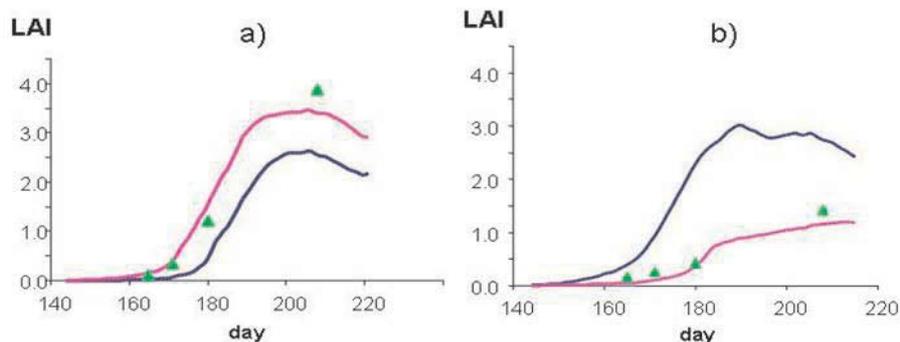
M. Guérif - Fig. 5 : Cartographie du NDVI moyen par parcelle (a) et de son coefficient de variation intra-parcellaire (b). Exploitation d'une image SPOT sur une grande plantation (4000 ha) de Maurice. Extrait de Bégué et al., 2005.



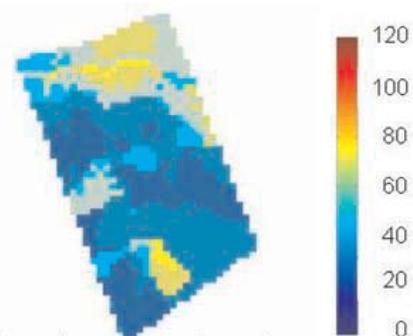
M. Guérif - Fig. 6 : a) Estimation du coefficient cultural à partir du NDVI (d'après Duchemin et al., 2006) ; b) Cartographie de la consommation d'eau par les cultures au cours de la saison de culture 2002/2003 (d'après Simonneaux et al., 2006)



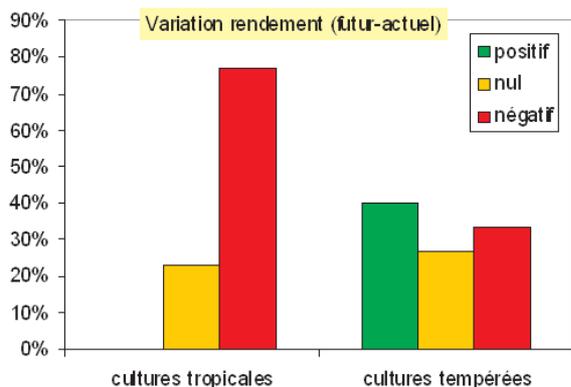
M. Guérif - Fig. 7 : Principe de l'assimilation de données issues de télédétection dans un modèle de culture (ici STICS), en réestimant des paramètres d'entrée inconnus. Les données d'entrée sont des réflectances fournies par un capteur hyperspectral CASI (obtention Astrium). La carte à droite illustre la distribution des réserves utiles au sein d'une parcelle estimée par assimilation.



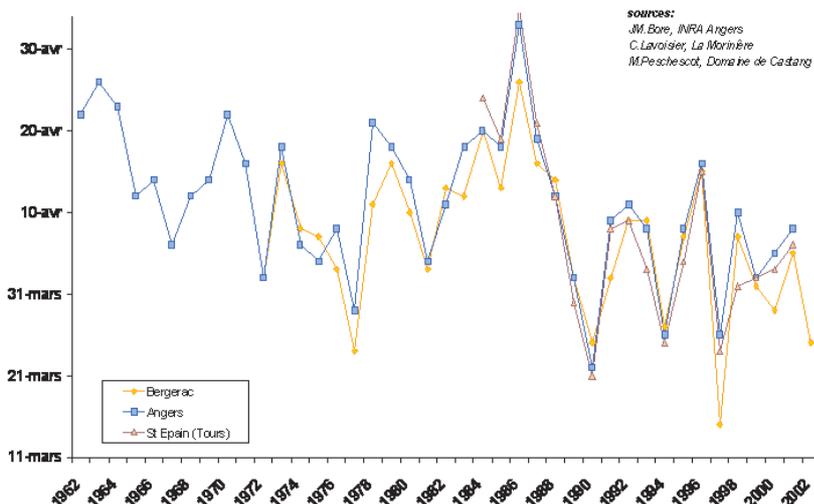
M. Guérif - Fig. 8 : Amélioration de la simulation du LAI (en rose) après assimilation de données de télédétection (triangles verts) par rapport à la simulation faite avec les valeurs par défaut (en bleu) des paramètres d'implantation (a) et de réserve utile (b) (d'après Launay et Guérif, 2005).



M. Guérif - Fig. 11 : Cartographie des doses optimales d'azote (en kg.ha⁻¹) à apporter sur une parcelle (cas du troisième apport sur blé), par évaluation de différents scénarios techniques et climatiques.



B. Seguin - Fig. 2 : Effet du changement climatique sur le rendement des cultures (à partir de 43 études répertoriées dans le 3^e rapport de l'IPCC).



sources:
JM. Bore, INRA Angers
C. Lavoisier, La Motteière
M. Peschescot, Domaine de Cadarg

B. Seguin - Fig. 5 : Evolution de la période de floraison de la poire Williams depuis 1962 (à partir de la base de données Phenoclim).

- 8th *European Society of Agronomy congress*. Copenhagen (Danemark), 11-15 juillet 2004. ESA (2004), 335-336.
- 18 SEGUIN B., GARCIA DE CORTAZAR.I., Climate warming: consequences for viticulture and the notion of terroirs in Europe. *Acta Horticulturae* (2005), 689, 61-71.
- 19 SEGUIN B., BRISSON N., LOUSTAU D., DUPOUEY J.L., Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt. *In : L'homme face au climat*, Actes du symposium du Collège de France, Paris, 12-13 oct. 2004, éd. Odile Jacob (2006), 177-204.
- 20 SOUSSANA J.F., Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles. *In : Demeter*, Armand Colin, Paris (2001), 195-222.

Bernard Seguin

Unité Agroclim - Mission Changement climatique et effet de serre (MICCES) - INRA Site Agroparc - Domaine Saint-Paul - 84914 Avignon Cedex 9
seguin@avignon.inra.fr

Les impacts probables des changements climatiques sur les ressources en eau du Maghreb

Latifa Hénia
Université de Tunis

Introduction

Les trois pays du Maghreb (Tunisie, Algérie et Maroc) sont pauvres en eau. Leurs ressources hydriques sont modestes, très irrégulières dans le temps, très inégalement réparties dans l'espace et elles ne sont pas toujours de bonne qualité. Elles subissent les effets d'un climat contraignant et d'une pression anthropique forte. Les changements climatiques peuvent aggraver aussi bien les contraintes climatiques qu'anthropiques qui pèsent aujourd'hui sur cette ressource. Dans cet article, nous nous intéressons à la vulnérabilité de cette ressource aux changements du climat et aux risques qui peuvent en découler. Connaître ces risques est un pas important vers l'adaptation au phénomène du réchauffement global.

La vulnérabilité des ressources en eau du Maghreb aux changements climatiques : des facteurs multiples

Les facteurs de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques sont multiples. Nous en exposons les plus marquants.

■ L'ampleur des changements climatiques dans la région

Les modèles prévoient un réchauffement à l'échelle globale de 1,5 à 6 °C de 1990 à 2100. A l'échelle régionale, l'intensité du réchauffement ne sera pas la même partout. Sur les marges sud de la Méditerranée, le réchauffement sera supérieur à la moyenne globale (IPCC 2001). Les scénarios récents de l'IPCC relatifs à l'évolution des précipitations prévoient, pour le Maghreb, une tendance à la diminution, notamment en été.

Le climat actuel du Maghreb présente des signes de changement. Au niveau de la température notamment, une tendance à la hausse est décelable à partir des années soixante-dix (figure 1).

Bien qu'aucune tendance claire n'a été relevée sur l'évolution des précipitations à partir des données mesu-

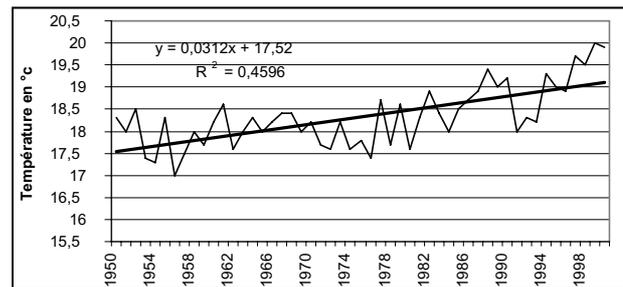


Fig. 1 : Evolution de la température moyenne annuelle à Tunis-Carthage (Ministère de l'Agriculture, 2005).

rées sur l'ensemble du XX^e siècle, une baisse de la pluie a été constatée à partir des années soixante dans plusieurs stations (figure 2). On a noté, en outre, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements pluviométriques extrêmes.

■ Le poids d'un climat contraignant

Les trois pays du Maghreb couvrent une superficie de plus de trois millions de km² dont les deux tiers appartiennent au Sahara. Les pluies sont modestes. La moyenne annuelle ne dépasse 300 mm que dans le tiers septentrional. Même dans le domaine tellien, domaine le plus arrosé, le nombre des jours de pluie est faible (de 70 à 110 jours). Il n'est plus que de 20 à 10 jours dans le Sud saharien. Le nombre de jours sans pluie est donc important. Les séquences sèches sont assez longues et peuvent s'étendre sur plus de 20, voire même sur plus de 30 jours successifs même en dehors de l'été.

Face à un apport pluviométrique modeste, le pouvoir évaporant du climat est très fort. Pour la Tunisie, les valeurs moyennes de l'ETP (évapotranspiration potentielle) Penman-Monteith, calculées pour la période 1970-2000, se situent entre 1 200 et 1 500 mm/an dans le Nord, entre 1 500 et 1 700 mm/an dans le Centre, et dépassent 2 000 mm/an dans le domaine saharien au sud-ouest du pays. Notons l'opposition entre l'évolution, à l'échelle spatiale,

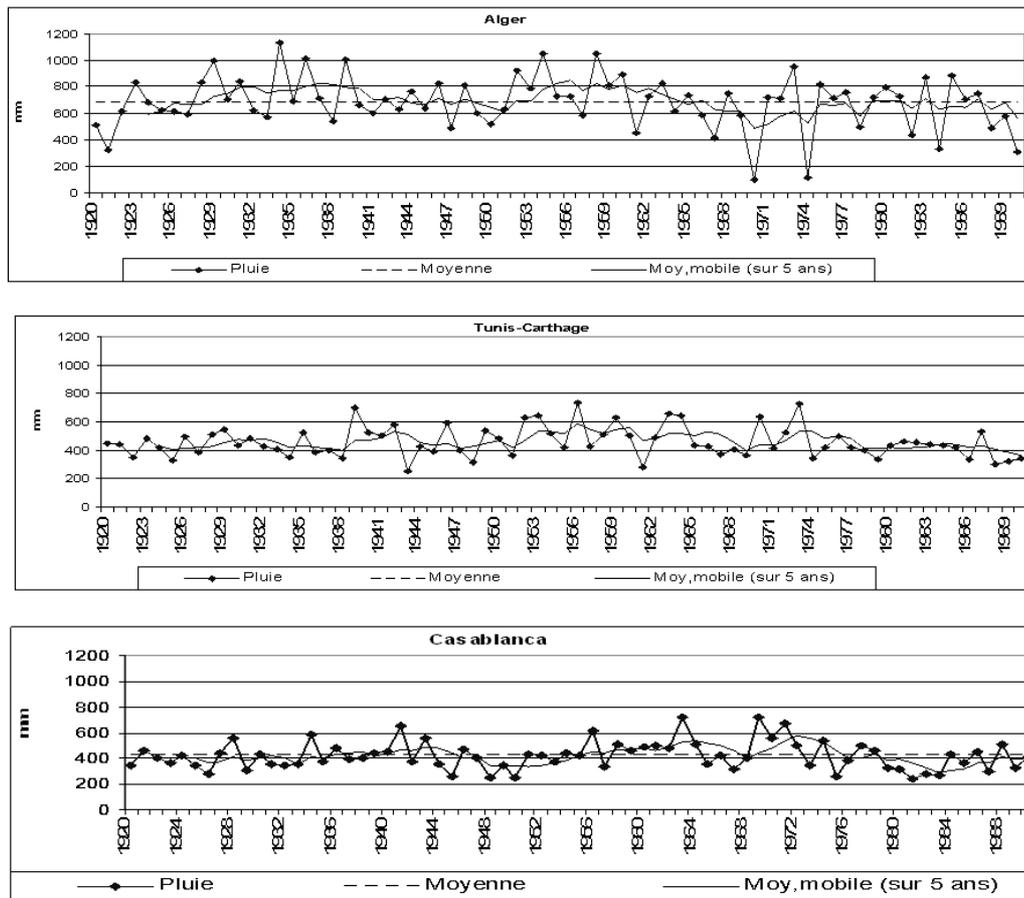
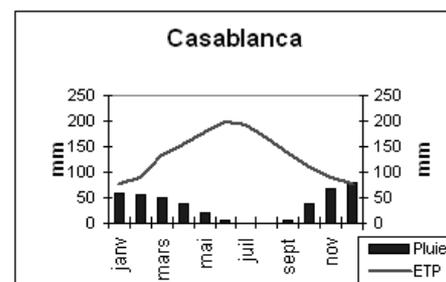


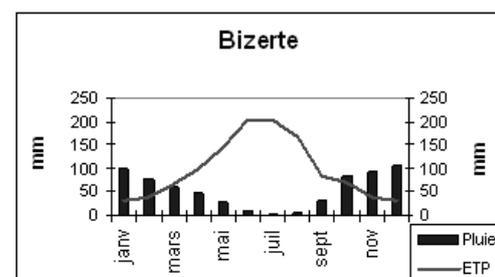
Fig. 2 : Variation des totaux pluviométriques annuels.

de la pluie qui diminue du nord vers le sud et l'ETP qui augmente dans le même sens. La même opposition caractérise l'évolution saisonnière des deux paramètres. En moyenne, la pluie estivale ne couvre même pas 10 % de l'ETP. Dans ces conditions, le bilan hydrique climatique est largement déficitaire. A l'échelle de l'année, il l'est pour la quasi-totalité de la région. Seuls quelques secteurs élevés et bien exposés aux flux humides peuvent connaître des totaux pluviométriques annuels supérieurs à ceux de l'ETP. En Tunisie, le déficit dépasse 1 200 mm en moyenne par an pour les deux tiers du pays, et il dépasse 2 000 mm dans l'extrême Sud-Ouest. Cependant, l'opposition entre le régime mensuel de la pluie et de l'ETP permet l'apparition d'un excédent de pluie de saison froide surtout dans le domaine tellien. Mais, la saison déficitaire reste longue (figure 3). De 4 à 6 mois dans le Nord, elle atteint 12 mois dans le Sud (Hénia, 1993).

De ce fait, l'évaporation reprend plus de 80 % de l'ensemble de l'apport pluviométrique de la région. Au Maroc, sur 150 milliards de m³ d'eau précipitée par an, le potentiel restant est de 30 milliards de m³. En Tunisie, sur un apport pluviométrique total moyen de 36 milliards de m³, l'évaporation reprend plus de 33 milliards (autour de 87 % du total).



Bilan hydrique climatique moyen à Casablanca (Maroc).



Bilan hydrique climatique moyen à Bizerte (Tunisie).

Fig. 3

La variabilité interannuelle est très forte. Les sécheresses pluriannuelles et de grande extension spatiale sont fréquentes (figure 2). Au cours des années quarante, la Tunisie a connu une grande sécheresse qui s'est étendue, selon les régions, sur quatre à six années successives (Hénia, 2001). Au cours des deux dernières décennies, elle a connu quatre sécheresses qui ont duré, selon les cas, deux à trois années de suite (figure 2). Alors que les pluies diluviennes, provenant des épisodes pluvieux de courtes durées, gonflent les totaux de certaines années et donnent des excédents pouvant atteindre ou même dépasser la moyenne annuelle et provoquer des inondations intenses. Citons, entre autres, le cas des pluies diluviennes qu'a connu Alger du 10 au 14 novembre 2001, celui du 20 au 27 novembre 2002 au Maroc, et les très fortes pluies qui se sont abattues sur Tunis en septembre 2003. Tous ces événements se sont soldés par des pertes humaines et des dégâts matériels.

En somme, par différents aspects, le climat actuel du Maghreb pèse lourd sur les ressources en eau.

■ La fragilité de la ressource

- Les ressources en eau du Maghreb sont modestes, le potentiel global en eau des trois pays est de 53 milliards de m³ (29 milliards de m³ pour le Maroc, 19,1 milliards de m³ pour l'Algérie, et 4,84 milliards de m³ uniquement pour la Tunisie). Les eaux de surface occupent une large part du potentiel hydrique global des trois pays (figure 4), d'où leur dépendance directe du climat. Les apports des cours d'eau sont très variables d'une année à l'autre (à titre d'exemple, pour la Tunisie, 4,319 milliards de m³ en 1986-1987 et 840 millions de m³ uniquement en 1987-1988). Une bonne partie des eaux souterraines est non renouvelable et présente des contraintes à l'exploitation (coût d'accessibilité à cause de la profondeur, qualité des eaux, localisation éloignée par rapport au potentiel en sol et aux zones à forte concentration de la population, comme c'est le cas de grands aquifères du continental intercalaire et du complexe terminal en Algérie).

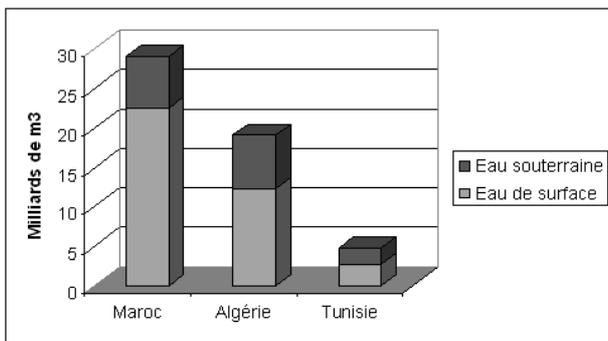


Fig. 4 : Potentiel en eau des pays du Maghreb.

Pour la Tunisie particulièrement, cette ressource est peu extensible. Son évaluation a peu évolué depuis les années quatre-vingt-dix (figure 5). Mais la demande en eau est en accroissement continu. Elle est passée de 1920 millions de m³ en 1990 à 2670 millions de m³ en 1996. L'augmentation de la ressource n'a été que de 1% pour la même période. En Algérie, la production d'eau potable était de 1,3 milliards de m³ en 1991. On prévoit qu'elle doit être de 3,9 milliards en 2025 (Hassani *et al.*, 1998).

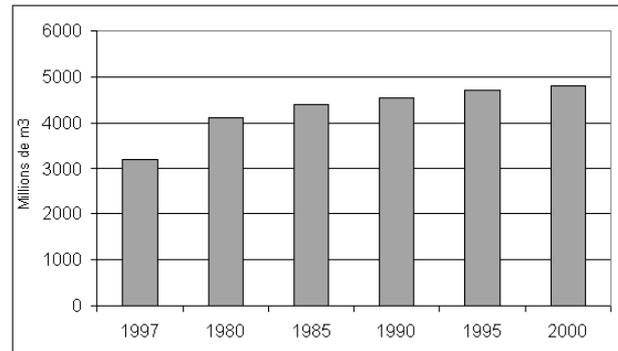


Fig. 5 : Evolution des évaluations des ressources en eau en Tunisie (Source des données : Ministère de l'Agriculture).

- La ressource est très convoitée. L'usage agricole prédomine dans les trois pays, mais à des niveaux différents. Ce secteur utilise 89 % de l'eau mobilisée au Maroc, 83 % en Tunisie et 60 % en Algérie. L'usage domestique prélève 25 % de cette ressource en Algérie, 14 % en Tunisie et 5 % au Maroc. Le reste est utilisé par l'industrie.
- L'eau est, en outre, inégalement répartie dans l'espace, d'où souvent la discordance entre les régions de l'offre et celles de la demande, et la nécessité des transferts parfois sur des grandes distances. Le transfert augmente évidemment le prix de revient de l'eau mobilisée. En Tunisie, les eaux de surface prédominent dans le Nord, les eaux souterraines profondes constituent la principale ressource dans le Sud. La plus forte demande se situe au niveau de la frange littorale orientale. Les eaux du Nord tunisien sont transférées vers les régions côtières du Centre et du Sud, sur une distance de plus de 500 km.
- Les ressources non conventionnelles sont encore très faibles, 67 millions de m³ sont injectés artificiellement dans les nappes en Tunisie, 12,332 millions de m³ produits par dessalement et 125 millions de m³ produits par épuration. Au Maroc, autour de 95 % des eaux usées sont rejetées à l'état brut dans la nature. L'expérience de dessalement est récente et limitée. L'Algérie dispose d'une quarantaine d'unités installées pour l'industrie, mais la plupart sont en mauvais état de fonctionnement.
- La qualité des eaux n'est pas toujours satisfaisante (taux de salinité élevés, contamination des eaux de surface

et des nappes phréatiques par des polluants de l'usage agricole et des rejets industriels et domestiques).

En Tunisie, les eaux à faible salinité (salinité inférieure à 1,5 g/l) sont situées essentiellement dans le Nord (91,9 %). Elles sont faiblement représentées dans le Centre (7,8 %) et presque inexistantes dans le Sud (0,3 %). 58 % du volume exploité d'eau souterraine a un résidu sec supérieur à 1,5g/l. La pollution urbaine et agricole des eaux accentue la dégradation de la qualité de l'eau de surface et des nappes phréatiques. Au Maroc, de grands aquifères (Tadla, Haouz, Sous, Triffa et Saïs) se trouvent sous des zones agricoles à forte utilisation des fertilisants et des produits phytosanitaires. La pollution industrielle et domestique affecte particulièrement les deux grands bassins hydrologiques du Sebou et d'Oum-Er-Rbia. Plus de 110 000 tonnes de matières oxydables sont rejetées dans le milieu naturel sans traitement préalable (Mokssit *et al.*, 1998). Notons en outre que dans les pays du Maghreb, les oueds drainent souvent des régions de collines et de montagnes, d'où l'importance du taux d'érosion spécifique (500 à 2 000 tonnes/km²/an en Algérie), du transport solide des cours d'eau et le risque d'envasement des barrages.

- La pression anthropique sur la ressource est importante. Le taux d'exploitation global pour les trois pays est de 57 %. La Tunisie détient le taux le plus élevé (figure 6) avec 88 % pour l'ensemble de la ressource, 79 % pour les nappes phréatiques, 105 % pour les nappes profondes et 88 pour les eaux de surface. L'Algérie a le taux le plus faible (32 %). La valorisation de l'eau est loin d'être satisfaisante dans les trois pays. Le problème des pertes et de l'utilisation de l'eau comme vecteur commode et peu coûteux des rejets industriels prend parfois des dimensions importantes. En Tunisie, les pertes affectent 40 % de l'eau destinée à l'agriculture et 27 % de l'eau de l'usage domestique.

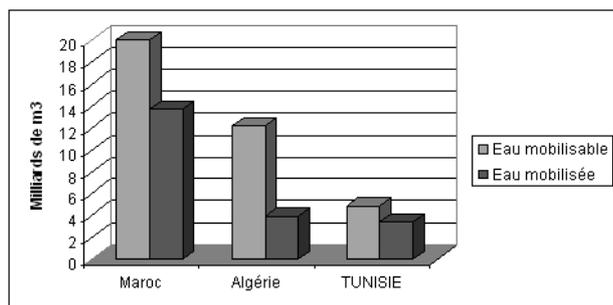


Fig. 6 : L'eau mobilisable et l'eau mobilisée.

Les caractéristiques de la ressource, à côté de la forte pression anthropique qui se traduit par une discordance entre la production et les besoins en eau, une exploitation intensive et une valorisation insuffisante de l'eau, sont autant de facteurs de la fragilité et de la grande vulnérabi-

lité de cette ressource face aux changements climatiques. Ajoutons à cela la faible capacité d'adaptation des pays du Maghreb.

Impacts potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau et risques associés

■ Diminution du potentiel

Le potentiel en eau de la région risque de diminuer d'abord en réaction à la hausse de la température et par conséquent de l'évaporation. Les impacts des changements climatiques sur les précipitations et le ruissellement risquent d'aggraver la situation. L'élévation de la température peut aboutir à une diminution de la neige sur les sommets élevés et, par suite, à une réduction du ruissellement notamment au niveau du Haut et du Moyen Atlas au Maroc, et des Kabylies en Algérie.

L'analyse de la situation lors des années sèches qui se produisent dans le cadre de la variabilité du climat actuel peut donner une idée assez concrète sur ce qui pourrait se passer avec les changements climatiques.

Les figures 7 et 8 donnent la variation de la pluie, de l'évaporation et de l'apport d'eau au niveau du barrage de Sid Salem (le plus grand barrage de la Tunisie du Nord) et du barrage de Sidi Saâd (le plus grand barrage de la Tunisie centrale) pour la période 1981-2001. Il est clair, sur ces deux graphiques, que lors des années sèches, la baisse de la pluie, corrélée avec la hausse de l'évaporation, occasionne une chute très nette de la ressource en eau de surface (Hénia et Benzarti, 2006).

■ La dégradation de la qualité

Dans leur situation actuelle, les ressources en eaux de la région ne sont pas toujours de qualité satisfaisante. Avec l'augmentation de la température et la diminution du ruissellement dans le cadre des changements climatiques, les eaux des oueds seront plus chargées en polluants. Leur salinité risque aussi d'augmenter avec l'accroissement de l'évaporation et la forte pression anthropique favorisée par l'accroissement des besoins dans un milieu climatique plus chaud. L'augmentation de la salinité risque de prendre des dimensions importantes au niveau des nappes phréatiques littorales menacées par le phénomène d'intrusion marine. Ce problème est déjà inquiétant en Tunisie et menace en Algérie la nappe de la Mitidja orientale, du littoral oranais et constantinois. L'élévation accélérée du niveau de la mer risque d'affecter aussi le fonctionnement des stations d'épuration des eaux usées, dont la plupart sont localisées sur la côte. En Tunisie, certaines stations connaissent déjà ce type de problème (station de Chotrana à Tunis, et station de Chaffar à Sfax).

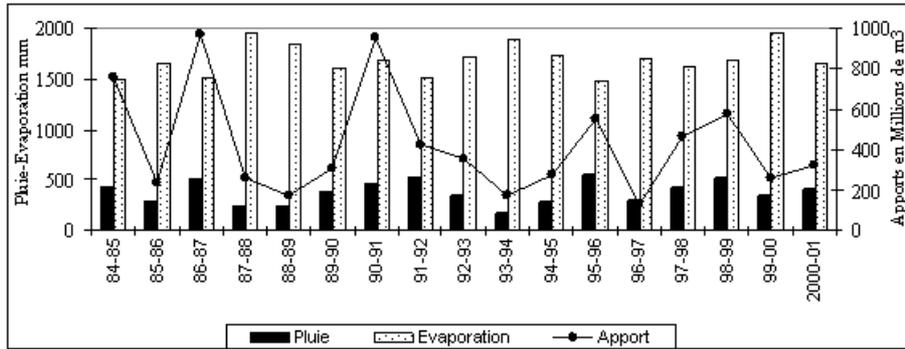


Fig. 7 : Répartition interannuelle des pluies, de l'évaporation et des apports au barrage Sidi Salem

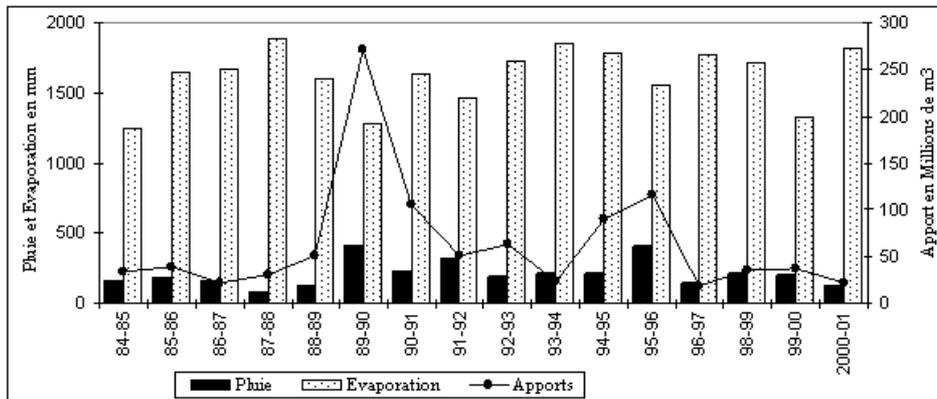


Fig. 8 : Répartition interannuelle des pluies, de l'évaporation et des apports au barrage Sidi Saad .

■ **L'accroissement de la demande**

Les besoins en eau risquent d'augmenter nettement avec l'accroissement de la température et du pouvoir évaporant du climat surtout que 60 % à 90 % de la ressource mobilisée, selon les pays, va à l'agriculture.

Cela ne sera pas sans conséquences sur le plan social et économique.

■ **Les risques socio-économiques**

Les changements climatiques se traduiront par une diminution du capital en eau par tête d'habitant. L'évolution de ce capital est prévue déjà à la baisse sans la prise en compte des effets des changements climatiques (tableau 1 et figure 9).

	1995	2025*
Tunisie	528	398 – 317
Algérie	684	474 – 379
Maroc	1074	798 - 645
Maghreb	754	544 – 437

Tableau 1 : Evolution du capital en eau (m³/habitant/an).

* Pour 2025, la première valeur correspond à l'hypothèse d'une faible croissance démographique. La deuxième valeur correspond à l'hypothèse d'une forte croissance démographique (Hassani, 1998 ; Hénia, 1998 ; et Mokshit, 1998).

La diminution de la ressource engendrera des conflits sectoriels, des conflits locaux et régionaux et des pénuries.

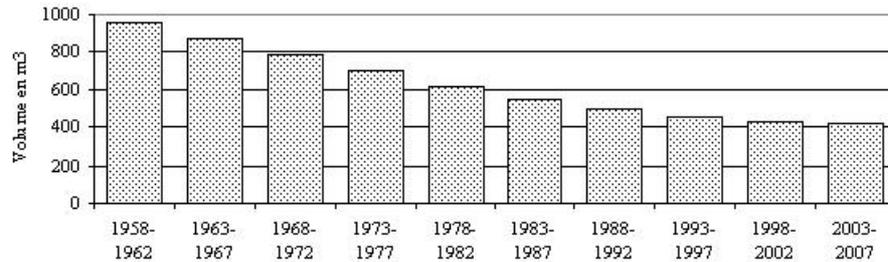


Fig. 9 : Evolution des ressources en eau en Tunisie : volume m³/habitant/an (moyenne sur 4 ans, source des données : ministère de l'Agriculture)

ries. Les conflits existent déjà. Ils s'accroissent nettement lors des périodes sèches et dans les régions pauvres en eau. En 1988, la population de l'Est algérien a manifesté contre les pénuries quotidiennes d'eau potable. Lors de la sécheresse des années 1980-1985, au Maroc, seuls les agrumes ont pu être irrigués. L'oasis de Gabès dans le Sud-Est tunisien était correctement irriguée jusqu'à la fin des années soixante, qui ont vu l'industrialisation de la ville. L'installation de l'industrie dans la région a eu comme conséquence, en plus de la pollution des eaux des nappes, la multiplication des pompages pour les usines. Ce qui a fait passer le tour d'eau dans l'oasis de Gabès d'abord de 15 à 20 jours, puis à 30, et enfin à 50 jours.

L'agriculture sera le premier secteur très affecté par les impacts des changements climatiques sur les ressource

ces hydriques étant donné qu'elle est la plus grande consommatrice d'eau, que son développement est étroitement lié à la disponibilité de la ressource et qu'elle occupe une place importante sur le plan socio-économique, notamment en Tunisie et au Maroc. La dégradation de la ressource et l'augmentation des besoins dans un climat plus chaud se traduiront par une diminution de la production agricole. Les figures 10 et 11 montrent la chute de la production du blé et de l'huile d'olive en Tunisie lors des années sèches telles que 1988, 1994, 1995, 1997 et 2002.

La diminution de la production agricole engendrera l'augmentation des prix. La figure 12 représente la variation des prix des produits agricoles sur le marché de gros de Tunis entre 1987 (année bonne sur le plan pluviométrique) et 1988 (année sèche).

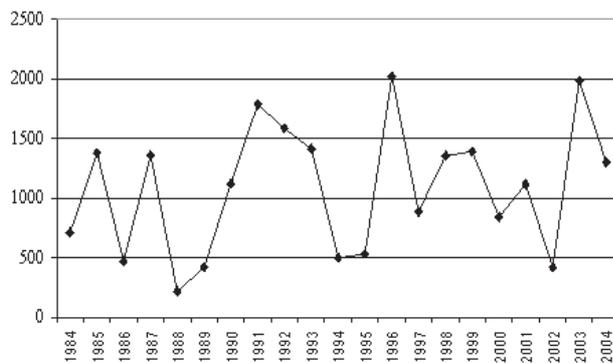


Fig. 10 : Production de blé (millions de tonnes).

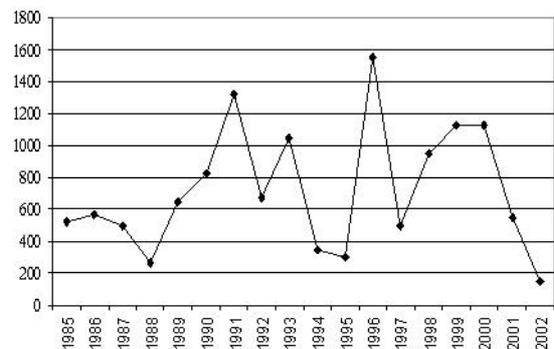


Fig. 11 : Production d'olives à huile (millions de tonnes).

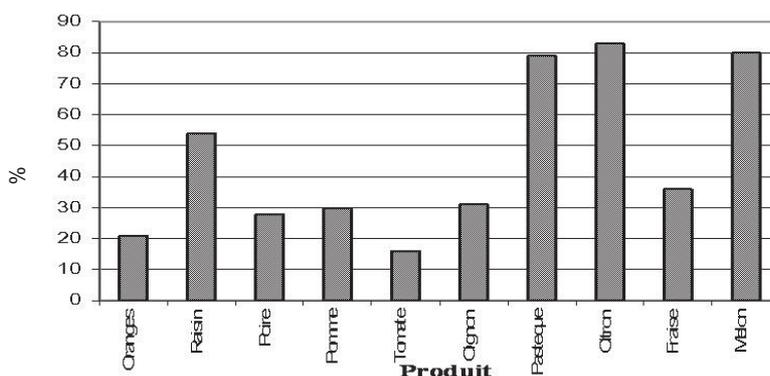


Fig. 12 : Augmentation des prix des produits agricoles sur le marché de gros de Tunis entre 1987 et 1988 (Hénia et al., 2006).

L'adaptation

■ L'insuffisance des stratégies nationales actuelles

En dehors même du cadre des changements climatiques, les ressources en eau dans les trois pays du Maghreb connaissent différentes faiblesses qui risquent d'entraver leur développement socio-économique. Conscient de ce problème, chaque pays a tracé une politique dans le domaine de l'eau.

Le Maroc a donné la priorité, depuis les années soixante, à l'agriculture, a beaucoup investi dans le domaine de la mobilisation de la ressource et continue à avoir une politique dynamique dans ce domaine, matérialisée par la création, au cours des années quatre-vingt, du Conseil supérieur de l'eau et du climat et par le développement de la planification par région. L'instauration de la loi de 1995 qui, entre autres, annonce le principe du préleveur/payeur, s'inscrit dans le même contexte. Aujourd'hui le pays cherche à concrétiser une gestion intégrée de l'eau par bassin versant, à continuer l'effort de la mobilisation et du transfert, à assurer l'eau potable à domicile pour 90 % de la population urbaine et 80 % de la population rurale, à dépolluer les eaux, à limiter l'augmentation de la demande et à développer et promouvoir les ressources non conventionnelles.

L'Algérie, au cours des années soixante a orienté son économie plus vers l'industrie. Elle a eu moins d'effort pour la mobilisation. Au cours des années quatre-vingt, il y a eu une relance de la politique hydraulique avec la création d'un comité national des ressources hydrauliques, la naissance du plan hydraulique en 1981 et le nouveau code des eaux en 1983. Aujourd'hui la politique nationale vise à mettre en place des structures régionales pour la gestion intégrée de la ressource par bassin-versant et à définir une politique de lutte contre les risques et les catastrophes liés à l'eau.

La Tunisie a donné la priorité à l'agriculture et a encouragé aussi le secteur touristique, d'où un intérêt précoce pour la mobilisation, le transfert et l'épuration des eaux usées. Aux cours des années soixante-dix, des plans directeurs ont permis la mise en œuvre de l'infrastructure hydro-agricole. En 1975, le code des eaux a donné les bases de la gestion de la ressource par les services centraux et régionaux. La stratégie décennale 1991-2000 pour le développement de la ressource a insisté sur quatre grands axes : la mobilisation de la totalité de la ressource, la prospection de nouvelles ressources conventionnelles, le développement des ressources non conventionnelles et la gestion rationnelle et l'économie de l'eau.

Chaque pays a tracé une politique de gestion de la ressource, mais des difficultés ont souvent imposé la reprogrammation des actions, l'allongement des délais et une perturbation de la réalisation de la planification. Sur un autre plan, cette politique n'a pas pris en considération

les risques qui peuvent être générés par les changements climatiques.

■ Des orientations qui s'imposent

La préparation de l'adaptabilité passe par une consolidation et une concrétisation des stratégies nationales dans le domaine de l'eau à court terme, à moyen terme et à long terme. Souvent la volonté et la loi existent. Mais encore faut-il en assurer l'application. Aujourd'hui, il s'agit de mettre en place une politique efficace pour :

- Développer la ressource par la mobilisation du reste des eaux conventionnelles surtout dans le cas de l'Algérie et du Maroc.
- Mettre en place une politique d'aménagement des bassins versants pour limiter l'érosion et ses conséquences sur la ressource.
- Promouvoir et développer les techniques et technologies permettant la production et une plus grande utilisation des ressources non conventionnelles. C'est d'une grande importance surtout pour la Tunisie. Notons ici l'intérêt de l'introduction de technologies de dessalement utilisant des énergies renouvelables.
- Protéger la ressource de la pollution urbaine, industrielle et agricole. Cela est capital pour le Maroc notamment, où l'expérience du traitement des eaux usées est encore très limitée.
- Mettre un programme pour limiter la demande en eau particulièrement en agriculture (maîtrise de l'irrigation, adaptation des cultures au contexte hydrique).
- Gérer des événements extrêmes. Il est prévu, dans le cadre des changements climatiques, une augmentation, de la fréquence et de l'ampleur des événements extrêmes du type inondation et sécheresse. L'élaboration d'un programme d'urgence, à l'échelle des pays et/ou de la région, pour faire face à ces événements, s'impose.
- Mettre en place des outils structurels et législatifs permettant d'atteindre les objectifs précités.

Conclusion

Les enjeux de l'eau sont majeurs pour les années à venir dans les trois pays du Maghreb. Dans la situation actuelle, cette ressource est déjà très fragile et très menacée. Son évolution future et les risques qui peuvent en découler seront tributaires des effets interactifs et rétroactifs de la variabilité naturelle du climat, des changements climatiques et des facteurs anthropiques. Assurer un développement socio-économique et une qualité de vie durable exige aujourd'hui, dans chacun des trois pays, une stratégie plus adéquate et plus ferme pour faire face au défi de l'eau. L'absence de stratégie a fait que jusqu'aux

milieu du XX^e siècle, les sécheresses au Maghreb se soldaient par des famines, des épidémies et des crises sur le plan socio-économique. La politique hydrique mise en place après l'indépendance, bien qu'insuffisante, a permis à ces pays d'éviter ces conséquences fâcheuses de la sécheresse.

Bibliographie

- 1 BEN BOUBAKER H., BENZARTI Z., HÉNIA L., Les ressources en eau de la Tunisie, contraintes du climat et pression anthropique, *Eau, Environnement et milieux méditerranéens*, ENS éditions, (2001), 38-52.
- 2 HASSANI M.I., KOUTI A., MATARI A., *Changements climatiques et ressources en eau en Algérie*, Rapport établi dans le cadre du projet PNUD-FEM RAB/94/G31, 30 p.
- 3 HÉNIA L., Les grandes sécheresses en Tunisie au cours de la dernière période séculaire, *Eau, Environnement et milieux méditerranéens*, ENS éditions, (2001), 25-36.
- 4 HÉNIA L., BEN BOUBAKER H., BENZARTI Z., Changements Climatiques et ressources en eau en Tunisie, Rapport établi dans le cadre du projet PNUD-FEM RAB/94/G31, 31 p.5.
- 5 HÉNIA L., *Climat et bilans de l'eau en Tunisie, essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques*, Publications de l'université de Tunis, (1993), 391 p.
- 6 HÉNIA L., BENZARTI Z., Changements climatiques et ressources en eau de la Tunisie. *Actes du XIX^e colloque de l'Association internationale de climatologie*, PRODIG, (2006), p. 15-20.
- 7 IPCC, *Climate Change 2001: the Scientific Basis third Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, (2001), 881 p.
- 8 Ministère de l'Agriculture, *Changements climatiques, effets sur l'économie tunisienne et stratégie d'adaptation pour le secteur agricole et les ressources naturelles*, Rapport 1^{ère} étape, Tunis, (2005), 266 p.
- 9 MOKSIT A. et al., *Changements climatiques et ressources en eau au Maroc*, Rapport établi dans le cadre du projet PNUD-FEM RAB/94/G31, (1998), 32 p.
- 10 URBAMA et CECRDSS, *L'eau et la ville dans les pays du Bassin méditerranéen et de la mer Noire*, Colloque de Rabat, Tours, (1991), 313 p.

Latifa Hénia

Université de Tunis - FSHS - 94 bd du 9 avril 1938 - 1007
Tunis - Tunisie
lhenia@yahoo.fr