

Cultivons notre planète : plus de biomasse, moins de gaz à effet de serre

Le XXI^e siècle devra relever deux défis : *primo*, augmenter la production végétale de la planète pour faire face aux besoins croissants d'une population, qui devrait être de l'ordre de 8 à 9 milliards d'habitants en 2050 – besoins alimentaires, au premier chef, qui, selon certaines hypothèses (1) devraient doubler [1], besoins en énergie, sous différentes formes (carburants, combustibles), besoins en fibres et en divers autres produits de base des industries ; *secundo*, atténuer l'évolution, déjà amorcée, du climat et s'y adapter – l'atténuer, pour rester dans des limites où il est encore possible de s'y adapter, tant il est prudent de prévenir des processus d'emballage toujours possibles (2).

par François PAPY*

La convention Climat instituée en 1992, au sommet de Rio-de-Janeiro, prévoit de diviser par 2 les émissions de gaz à effet de serre (GES), d'ici à 2050.

La photosynthèse, qui est à l'origine de la production de biomasse (ou production primaire), joue un rôle essentiel dans les échanges entre la biosphère et l'atmosphère ; elle consiste, en effet, en une bioconversion de l'énergie solaire en énergie chimique (la biomasse), qui fixe du dioxyde de carbone (CO₂) et contribue ainsi à atténuer le réchauffement climatique. C'est elle qui est à l'origine des réserves d'énergie fossile dont on libère le CO₂ lorsqu'on les brûle, cent millions d'années après qu'elles aient été constituées. Au cours de la période historique, la production de biomasse alimentaire a été obtenue par le défrichage de forêts et de couverts herbacés, provoquant ainsi des émissions de CO₂. A partir de 1950, dans le monde industrialisé, l'agriculture a consommé de plus en plus d'énergie fossile, par suite du développement de la motorisation, de l'emploi d'engrais azotés et d'intrants de plus en plus nombreux, du chauffage de serres, du séchage des fourrages... Les émissions de CO₂ qui lui sont attribuables ont continué à augmenter très rapidement, et s'y sont ajouté des émissions de protoxyde d'azote (N₂O) (3) et de méthane (CH₄) dues, pour les premières, essentiellement aux engrais azotés et, pour les secondes aux ruminants. Même s'il est vrai que l'agriculture n'utilise actuellement que 4 % des énergies fossiles, elle doit contribuer à l'effort général visant à les économiser. Comme on le voit, les relations entre la production des différentes formes de biomasse et les flux gazeux sont complexes et méritent examen.

Ajoutons à cela que jamais auparavant, dans le monde, les différentes formes d'utilisation des couverts végétaux n'avaient été aussi différenciées qu'aujourd'hui. Ici, une agriculture à très faibles rendements dispose encore de place pour se développer au détriment des forêts ; mais là, c'est une agriculture utilisant beaucoup d'intrants qui s'installe sur des défrichements ; ailleurs encore, une forte intensification de l'utilisation des espaces cultivés pour les besoins alimentaires permet un certain reboisement ; ailleurs, enfin, l'espace disponible pour nourrir la population est tellement restreint que tous les terrains sont cultivés intensivement.

Ainsi, les termes des défis auquel nous sommes confrontés se précisent : il faut produire deux fois plus d'aliments tout en contribuant à diviser par deux les émissions de GES et tout en économisant les énergies fossiles, et ce, à partir de situations très inégales en matière d'utilisation des ressources.

Remettons en lice le système agro-sylvopastoral

Qu'il soit forestier, herbacé ou cultivé, chacun de ces couverts végétaux aura une fonction spécifique pour atteindre l'objectif que nous visons. La forêt stocke 80 % du carbone de la biosphère terrestre, avec une nette différence entre la forêt tropicale humide et la forêt tempérée : celles-ci contiennent, respectivement, 220 tonnes et 80 tonnes de carbone par hectare (t C/ha) stockées dans la biomasse, mais aussi, respectivement, 160 et 100 t C/ha stockées dans le premier mètre de sol. Les champs cultivés en stockent beaucoup moins (seulement 6 t C/ha dans la biomas-

se d'une parcelle de céréales en Île-de-France, et 60 t C/ha dans le sol), les couverts herbacés (tels que les prairies) occupant une position intermédiaire [2]. Ces deux derniers types de couvert végétal servent essentiellement à nourrir les humains, soit directement, soit après transformation en produits carnés. C'est donc sur leur production que repose la réponse à apporter au défi alimentaire. La complémentarité de ces couverts végétaux nous incite à les considérer dans leur ensemble, comme un système sur lequel il est pertinent de procéder à des bilans tant en termes d'énergie que de flux.

Au cours de l'ère préindustrielle, les forêts, les prairies et les champs étaient liés entre eux par des flux de matière : les champs bénéficiaient d'un transfert de fertilité en provenance des forêts et des prairies, les animaux d'élevage servant de vecteurs. S'ajoutait à cela, grâce aux animaux de trait, un transfert d'énergie depuis les prairies vers les champs. Mais après le triomphe de la « théorie minérale » (4), la généralisation des engrais minéraux a fortement distendu ces liaisons. La culture des champs s'est rendue indépendante des forêts et des prairies (5) et ces différents espaces se sont spécialisés. La liaison systémique qui existait entre les trois types de couvert végétal a disparu des esprits. Ce phénomène s'est amplifié depuis la seconde moitié du siècle dernier, tandis que, dans les pays industrialisés du Nord, les techniques de culture et d'élevage devenaient de plus en plus consommatrices d'énergie fossile et de plus en plus émettrices de GES (CO_2 , N_2O et CH_4). A l'opposé, dans certains pays du Sud, notamment en Afrique sub-saharienne, l'agriculture ne consomme pas d'énergie fossile, mais elle brûle ses forêts ou ses savanes : 5 millions d'hectares par an, entre 1975 et 2000, ce qui a libéré un milliard de tonnes de CO_2 , soit un quart des émissions de l'Union européenne à 15 pays (6) [3]. A l'échelle planétaire, les défrichements de couverts pérennes produisent 18 % des émissions de GES. C'est pourquoi, dans l'objectif d'accroître la production alimentaire et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, il devient, là encore, nécessaire de considérer l'ensemble agro-sylvo-pastoral comme un système, devenu désormais planétaire, en raison de l'ampleur de ses échanges gazeux avec l'atmosphère.

L'on trouve cette position, clairement exprimée, chez Riedacker [4]. Celui-ci propose une méthode d'évaluation environnementale planétaire intégrée (EPI), qui s'applique au processus de production primaire sur des territoires incluant l'ensemble agro-sylvo-pastoral. De ce fait, sa méthode se distingue des analyses de cycle de vie (ACV) (7), qui ne prennent en compte ni la dimension territoriale des processus qu'elles évaluent, ni les effets compensatoires qui s'y manifestent. Elle complète donc ces analyses. L'EPI peut être appliquée tant au niveau planétaire qu'au niveau local. Dans le premier cas, l'on établit des bilans territoriaux d'énergie fossile et de GES ; dans le

second, l'on évalue les effets sur les ressources liées aux milieux : eau, sols, biocénose... Cette méthode permet de comparer les bilans environnementaux de différents scénarios d'augmentation de la production alimentaire totale sur un territoire : vaut-il mieux augmenter les rendements des champs cultivés ou vaut-il mieux défricher, là où ils existent encore, des couverts pérennes ? Au niveau planétaire, la réponse est sans ambiguïté : il faut augmenter les rendements. Sans doute faut-il, pour y arriver, utiliser des énergies fossiles, mais celles-ci augmentent avantageusement l'efficacité de la bioconversion de l'énergie solaire. Bien sûr, l'augmentation des rendements s'accompagne d'émissions de GES, mais éviter la déforestation permet d'en économiser bien davantage. L'on estime ainsi qu'entre 1950 et 2000 l'augmentation mondiale des rendements des cultures céréalières a permis d'éviter la déforestation de 1,1 milliard d'hectares de forêts, qu'il aurait fallu sacrifier pour obtenir la même production, tandis que, sur le territoire métropolitain, c'est le quart de la forêt française qui aurait dû disparaître pour obtenir la même production que celle qu'a permis d'atteindre l'augmentation des rendements agricoles durant la même période.

La question qui se pose alors est celle des rendements objectifs.

Arrêtons la course au rendement maximum

La deuxième moitié du siècle dernier a vu, dans de nombreux pays industrialisés, puis, sous l'appellation de « révolution verte », dans des pays en développement, une augmentation très régulière des rendements des champs cultivés : celle-ci résulte de l'amélioration variétale de certaines espèces cultivées, de l'emploi d'engrais, puis de l'emploi de pesticides et de la motorisation. Appuyée par des politiques de soutien des prix ou de subventionnement des intrants, l'augmentation de la production qui s'en est suivie a permis d'éviter les famines à des populations en expansion. Cependant, cet accroissement continu des rendements atteint désormais ses limites.

Au cours de cette période, les agriculteurs visaient le maximum de produit récoltable à l'hectare, et les agronomes se référaient au rayonnement solaire global et au régime pluviométrique probable comme déterminant du potentiel de rendement, en tenant compte, bien sûr, de l'aptitude culturale des terrains. Le catalogue d'inscription des variétés n'admettait que des variétés plus productives que les précédentes ; c'est ainsi que l'apparition de variétés de maïs hybrides a permis de réaliser un progrès considérable en matière de productivité. Mais l'augmentation des rendements constatée résulte aussi d'un recours croissant à l'énergie fossile, nécessaire, notamment, à la fixation industrielle de l'azote de l'air (procédé Haber-Bosch, découvert dès 1910), à raison d'une tonne et demie d'équivalent pétrole pour transformer une tonne



© Elyas Barbier/BIOSPOTO

« L'on estime ainsi qu'entre 1950 et 2000 l'augmentation mondiale des rendements des cultures céréalières a permis d'éviter la déforestation de 1,1 milliard d'hectares de forêts, qu'il aurait fallu sacrifier pour obtenir la même production, tandis que, sur le territoire métropolitain, c'est le quart de la forêt française qui aurait dû disparaître pour obtenir la même production que celle qu'a permis d'atteindre l'augmentation des rendements agricoles durant la même période. » Livraison de grain dans un silo, en Brie.

d'azote en un engrais actif et, dans une bien moindre mesure, pour fabriquer d'autres intrants. Par ailleurs, l'usage de l'énergie fossile s'est largement développé, en raison de la motorisation de l'agriculture. Celle-ci a permis de libérer pour la production alimentaire humaine des surfaces qui étaient auparavant consacrées à l'alimentation des animaux de trait ; ainsi, en France, ce sont 6 millions d'hectares qui ont été ainsi libérés, sur les 27 millions d'hectares de la surface agricole utile totale. La culture du blé illustre bien cette évolution vers un usage de plus en plus important de produits chimiques de synthèse. Pour se rapprocher du potentiel maximal de rendement, avec des variétés sélectionnées à cette fin, il a fallu allonger la durée de captation de l'énergie solaire en avançant la date des semences, augmenter l'interception du rayonnement solaire en semant dense et apporter une fertilisation azotée non limitante. L'apport d'azote a-t-il accru les risques de verse ? : les traitements raccourcisseurs de paille ont remédié à cet inconvénient ! L'avance des semis a-t-elle favorisé les adventices (« mauvaises herbes ») et les attaques de pucerons ? : peu importe, la panoplie des herbicides et des insecticides s'est enrichie, afin de maîtriser ces « bio-agresseurs ! Azote, semis précoces et denses, en cumulant leurs

effets, ont-ils favorisé le développement des maladies cryptogamiques ? : les fongicides, autorisés à la vente en 1972 ont fait florès ! On pourrait encore, aujourd'hui, continuer dans ce sens, si l'on se fixait comme objectif les limites éco-physiologiques des espèces végétales améliorées. Le rendement potentiel du blé est estimé en France à 150 q/ha – selon Arvalis, Institut du Végétal (8) – et à 160 en Nouvelle-Zélande ; le maïs, plante classée en C4 et à faible photo-respiration, a des potentialités plus élevées encore, surtout dans les situations qui permettent de développer de longs cycles de végétation. Mais c'est le degré d'artificialisation du milieu, nécessaire pour atteindre ces potentialités, qui limite les objectifs de rendement qu'il est raisonnable de se fixer.

A l'échelon local, la pollution nitrique de l'eau de consommation courante n'apparaît qu'au milieu des années 1970 [5], donc longtemps après le début de l'intensification des années 1950, en raison d'un cycle interne au sol, fait de réorganisations et de minéralisations successives, qui confère aux sols riches en matière organique une grande inertie [6]. Les risques de fuite d'azote, très faibles dans un écosystème non cultivé en raison de l'occupation permanente du sol par des végétaux, deviennent importants dans des par-

celles agricoles, qui sont souvent dénudées pendant une partie de l'année, surtout si elles sont fertilisées afin d'atteindre les rendements potentiels maximaux. Le rapport Hénin, en 1980 [7], établit définitivement la responsabilité des pratiques de fertilisation dans la pollution tant des eaux de surface que des nappes phréatiques profondes. La mise en évidence d'autres pollutions, par le phosphore et les pesticides, n'a pas tardé à venir. Le transport de nutriments vers les écosystèmes aquatiques (cours d'eau, lacs, littoraux) provoque une croissance incontrôlée de certains végétaux aquatiques, notamment la prolifération de cyanobactéries, qui entraîne le phénomène d'eutrophisation (aboutissant à l'asphyxie des écosystèmes aquatiques, en raison d'une réduction de la teneur en oxygène de l'eau). Enfin, les effets des modes de culture intensifs en intrants sur la biodiversité (tant sur les populations que sur les habitats) ont fini par être reconnus.

Mais, au-delà de ces effets sur les écosystèmes locaux, la fertilisation azotée des champs cultivés influe aussi sur la qualité de l'enveloppe gazeuse de notre planète : c'est l'émission de protoxyde d'azote (N_2O) qui en est responsable. Dès les années 1970, la fixation de l'azote (N_2) atmosphérique, principalement due à la fabrication d'engrais azotés, a dépassé les capacités de l'ensemble des écosystèmes de la planète à dénitrifier suffisamment pour pouvoir réémettre dans l'atmosphère la même quantité d'azote que celle qui était ainsi fixée [8]. Cela a pour conséquence une accumulation d'azote sous des formes actives dans les écosystèmes continentaux et marins et une augmentation des émissions de protoxyde d'azote (N_2O). Ainsi, depuis le début de l'ère industrielle (1750), l'émission de N_2O dans l'atmosphère a augmenté de 14 % (9), en très grande partie à cause de la fabrication d'engrais azotés par le procédé Haber-Bosch (10). A l'échelle de la planète, ce sont les systèmes de culture des pays

développés du Nord, gros consommateurs d'engrais azoté, qui émettent les plus grandes quantités de ce gaz à effet de serre [9].

On ne doit donc plus viser les rendements potentiels maximaux, correspondant au rayonnement solaire global sur la durée d'un cycle de culture et au régime pluviométrique probable. Des méthodes de calcul existent qui permettent d'estimer, par tâtonnements, des objectifs de rendement qui répondent à des objectifs de production et de réduction des émissions de GES (ACV, EPI, voir plus haut). Mais ce sont les références en matière de cycles biogéochimiques qui font particulièrement défaut, alors qu'il en faudrait beaucoup pour tenir compte de la variété des sols, des climats, des espèces cultivées [10]. Les émissions directes, celles qui se produisent en plein champ, parce qu'elles sont très sensibles aux conditions de culture, exigent encore de gros efforts de recherche de références, pour améliorer les modèles de flux. Même s'il reste difficile de calculer précisément des rendements objectifs conciliant production élevée et réduction des émissions de GES, il est certain que ces rendements seront nettement inférieurs aux potentiels éco-physiologiques. Il est clair aussi que l'on obtient une meilleure efficacité d'une quantité donnée d'un engrais azoté, qui comporte potentiellement un risque d'émission de N_2O , en la distribuant dans l'espace plutôt qu'en la concentrant en un lieu restreint, car l'efficacité productive de l'engrais décroît quand la dose épandue augmente.

Reste que, dans la pratique, il faut tenir compte d'un autre élément : l'aléa climatique. Il n'est pas possible, en effet, de savoir, au moment des épandages d'engrais, quel sera le rendement final. Aussi, tant que le surcoût d'une fumure excessive sera faible au regard de la perte environnementale imputable à une fumure insuffisante, l'agriculteur, par une stratégie d'assurance aura tendance à viser des rendements élevés. Le prix

Régions	1970	2003	coeff. multiplicateur
Union européenne à 15	2,8	5,2	1,8
PECO	2,1	2,8	1,3
Union européenne à 27	2,6	4,3	1,6
Amérique du Nord	3	5,2	1,7
Asie, Sud, Est, Sud-Est	1,7	3,4	2
Amérique centrale, Sud, Caraïbes	1,5	3,2	2,1
MONDE	1,8	3,1	1,7
Afrique du Nord, Moyen Orient	1,1	2,4	2,2
Océanie	1,3	2,1	1,6
Communauté des Etats indépendants*	?	1,7	
Afrique sub-Saharienne	0,8	1,1	1,4
<i>Sources : FAO, Eurostat, Nahid Movahadi</i>			
* ex-URSS moins les Etats baltes			

Tableau 1. Rendements céréaliers (t/ha).



© Christophe Courteau/BIOSPOTO

« En définitive, l'efficacité et la nécessité incitent à affirmer que c'est en Afrique sub-saharienne qu'il est le plus urgent de concentrer les efforts en matière de production agricole. » Un cultivateur et sa récolte de mil dans le Sahel, au Niger.

des engrais azotés est un facteur important de la régulation des GES. Parce qu'il va modifier les potentiels de rendement (et, si l'on en croit les modèles climatiques actuels, la variabilité interannuelle du climat), le changement climatique rendra plus délicat encore la gestion de la fertilisation azotée et, partant, la régulation des GES.

Équilibrons mieux, par région, rendements des cultures et bilans de GES

Dans les limites de la problématique que nous nous sommes fixée (augmenter la production de biomasse, tout en réduisant au mieux les émissions de GES), nous pouvons maintenant poser les principes suivants : a) il faut, autant que possible, conserver les forêts et les couverts végétaux permanents existants (voire les accroître), et les gérer de sorte à ce qu'ils jouent pleinement leur rôle de puits de carbone ; b) il faut utiliser de la façon la plus efficace possible la quantité d'azote puisée dans l'air et, pour ce faire, il faut la répartir, plutôt que la concentrer, ce qui permettra *grosso modo* d'augmenter la production de biomasse pour des risques d'émissions de N_2O équivalents. Reste maintenant à imaginer des principes de répartition. La réponse appropriée nous semble être :

là où c'est, à la fois, le plus efficace et le plus nécessaire [11].

L'efficacité maximale se situe dans les régions où les rendements sont encore très faibles, en raison des aptitudes culturales des terrains. Le tableau 1, qui donne les rendements en céréales et leur évolution récente par grande région, à l'échelle mondiale, ne tient pas compte de ces potentialités. Il est cependant possible de constater que même dans les régions les plus productives, les rendements sont éloignés des limites écopysiologiques données plus haut. Ils masquent une hétérogénéité qui signifie qu'un progrès du rendement moyen est possible, sans augmenter pour cela les rendements maximaux. Mais le plus frappant, c'est la faiblesse des rendements des pays de la Communauté des États Indépendants (11) et de l'Afrique sub-saharienne, où il existe des marges de progrès possible très importantes (voir le tableau 1 de la page précédente).

La nécessité d'accroître les rendements est dictée par les besoins alimentaires des populations. Or, en régionalisant l'estimation des besoins alimentaires, Collomb [1] calcule qu'entre 2000 et 2050, l'Afrique devrait plus que quintupler sa production, l'Asie plus que la doubler et l'Amérique latine presque la doubler, tandis que les pays industriels sont censés ne pas avoir à l'accroître : en définitive, l'efficacité et la nécessité incitent à affirmer que c'est en Afrique sub-saharienne

qu'il est le plus urgent de concentrer les efforts en matière de production agricole.

Or, tant les organismes internationaux que les États africains ont, dans les dernières décennies, délaissé les politiques agricoles. Par contre, pour compenser les fortes émissions de GES des pays industrialisés du Nord, le rôle de puits de carbone (et de réserves de biodiversité) que jouent les forêts tropicales humides intéresse de plus en plus la communauté internationale. Les propositions de « déforestation évitée », discutées à Bali en décembre 2007, pour mettre en œuvre l'après-Tokyo, en sont la preuve. Outre qu'elles sont d'une application délicate et qu'elles risquent de générer des mécanismes de réductions fictives [12], elles séparent totalement la question environnementale de la question alimentaire, et elles font fi des besoins non satisfaits des populations locales. Une politique d'intensification des cultures en Afrique subsaharienne présenterait le double intérêt d'éviter les déforestations et de mieux nourrir les hommes. Bien sûr, il ne faut pas occulter les difficultés structurelles que cette région a connues dans la mise en œuvre de la « révolution verte » [16]. Mais il faut prendre conscience du fait que, dans l'intérêt de tous, il convient d'éviter que ne se perpétue la situation actuelle, où l'on cherche à compenser, sur une partie de la planète, la consommation abusive faite par une autre partie de la planète d'une ressource (l'azote prélevé dans l'air), dont on doit modérer l'usage afin de limiter les émissions de N₂O.

Un meilleur équilibre régional des échanges gazeux entre l'ensemble agro-sylvo-pastoral et l'atmosphère doit donc être recherché, dans le cadre des politiques globales de gestion de la planète.

Remerciements : Je remercie Nahid Movahedi pour avoir traité les données statistiques que j'ai utilisées ici.

Notes

* Académie d'Agriculture de France.

(1) L'hypothèse retenue consiste à admettre que les pays développés ne reconsidéreront pas leur régime alimentaire et que tous les pays en voie de développement, qui ne sont pas actuellement au niveau du régime alimentaire du Mexique en 1990, atteindront ce niveau d'ici 2050.

(2) Voir l'article de MM. Paul-Henri Bourrellet et Jean Duglas dans ce même numéro de Responsabilité et Environnement.

(3) Ce gaz a un potentiel de réchauffement, calculé sur 20 ans, 275 fois supérieur à celui du CO₂.

(4) Elle a été largement vulgarisée par Liebig, à partir de 1840.

(5) Des villes, également, de par l'arrêt de l'utilisation des déchets ménagers comme éléments fertilisants.

(6) Sur l'ensemble de la planète, c'est 13 millions d'hectares qui sont ainsi défrichés annuellement, essentiellement dans les régions tropicales (FAO, 2006. Évaluation des ressources forestières mondiales).

(7) Il s'agit d'une évaluation de l'ensemble des impacts environnementaux d'un procédé de production d'un bien ou d'un service, qui implique l'étude des processus mis en jeu « du berceau jusqu'à la tombe ».

(8) Ce même Institut note un plafonnement général des rendements du blé en France depuis le début des années 1990 ; il l'attribue au changement climatique.

(9) D'après le GIEC, 2001, cité par [2]. Pendant la même période, le CO₂ a augmenté de 30 %. Le rapport entre les teneurs de N₂O et de CO₂ dans l'atmosphère est d'environ de 1/1000.

(10) Relativisons, cependant, le rôle que joue chacun des GES : depuis le début de l'ère industrielle, la part du N₂O dans le forçage radiatif global est de 0,15 W/m², contre 0,48 W/m² pour le méthane (CH₄) et 1,46 W/m² pour le CO₂ [2].

Bibliographie

[1] (P.) COLLOMB, *Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050*. Paris, Economica, FAO, 1999.

[2] (J.-L.) DUPOUEY, (D.) ARROUAYS, (J.) BALESSENT, (B.) GABRIELLE, (G.) GOSSE, (G.) PIGNARD, (B.) SEGUIN & (J.-F.) SOUSSANA, 2006. *Rôle de l'agriculture et des forêts dans l'effet de serre*. in P. Colonna. La chimie verte. Lavoisier, Paris, 532 p, 2006.

[3] (H. D.) EVA, (A.) BRINK & (D.) SIMONETTI, *Monitoring Land Cover dynamics in Sub-sahara Africa*, cité par (A.) RIEDACKER, *Un peu plus d'énergie fossile pour la sécurité alimentaire, le climat et la biodiversité*, Liaison Energie-Francophonie, n° 80, 56-61. 2008.

[4] (A.) RIEDACKER. *Reconsidering Approaches for land Use to Mitigate Climate Change and to Promote Sustainable development*. In *Global Warming and Climate Change*, 387-424, Science Publisher inc. Enfield, New Hampshire, USA, 2008.

[5] (J.) CHRETIEN, (J.) CONCARET & (C.) MERE., 1974. *Evolution des teneurs en nitrates dans les eaux d'alimentation (Département de l'Yonne)*. Ann. Agron. 25 : 499-513, 1974.

[6] (A.) MARIOTTI. *Quelques réflexions sur le cycle biogéochimique de l'azote dans les agro-systèmes*. In (G.) LEMAIRE et (B.) NICOLARDOT. *Maîtrise de l'azote dans les agro-systèmes*, Inra éditions, 1996.

[7] (S.) HENIN. Rapport du groupe de travail : Activités agricoles et qualité des eaux, Paris, ministère de l'Agriculture et ministère de l'Environnement (document ronéoté), 1980.

[8] (J. N.) GALLOWAY & (E. B.) COWLING, *Reactive nitrogen and the World: 200 Years of Change*. *Ambio*, 31, 64-71, 2002.

[9] (J.) GALLOWAY, (F.J.) DENTENER, (D.G.) CAPONE, (E.W.) BOYE, (R.W.) HOWARTH, (S.P.) SEITZINGER, (G.P.) ASER, (C.) CLEVELAND, (P.) GREEN, (E.) HOLLAND, (D.M.) KARL, (A.F.) MICHAELS, (J.H.) PORTER, (A.) TOWNSEND & (C.) VOROSMARTY. *Nitrogen cycles: past, present and futur Biochemistry* 70. 153-156. 2004.

[10] (K. G.) CASSMAN, (A.) DOBERMANN, (D. T.) WALTERS & (H.) YANG. *Meeting Cereal Demand While Protecting Natural Resources and Improving Environmental Quality*. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28: 315-358, 2003.

[11] (F.) PAPY, *Augmenter les rendements ? Oui, mais où et comment ?* Séance de l'Académie d'Agriculture du 4/02/09. C. R. Acad. Agric. France, Vol 95, n°1, 61-63 et sur le site (<http://academie-agriculture.fr/seances/2009>) 2009.

[12] (A.) KARSENTY & (R.) PIRARD. *Changement climatique : faut-il récompenser la « déforestation évitée » ?* Natures, Sciences, Sociétés, 15, 357-369. 2007.

[13] (M.) GRIFFON. *Nourrir la planète*. 456 p. Odile Jacob, Paris, 2006.