

INSTALLATION DU BUREAU POUR L'ANNÉE 2010

Discours de Monsieur Jean Dunglas

Président sortant¹

Mes chères consœurs, mes chers confrères,

Durant une année de mandat, il n'y a que trois moments au cours desquels le Président a l'opportunité de s'adresser directement à l'ensemble des membres de l'Académie. Pour moi, celui de l'installation du Bureau a représenté un honneur, celui de la séance solennelle a, sans aucun doute, été le plus fort; mais le plus émouvant est certainement, aujourd'hui, celui de la passation du pouvoir à mon successeur. J'ai été très fier de vous avoir représentés et je vous sais gré de m'avoir confié cette charge qui m'a apporté beaucoup de satisfactions scientifiques, intellectuelles et amicales. J'espère avoir, à vos yeux, bien rempli ma tâche et les différents témoignages d'amitié et de soutien reçus m'amènent à le penser.

Cette allocution présentera trois parties : un hommage à notre communauté de travail, un bref rappel des aspects importants de l'année et un point qui me tient particulièrement à cœur, le positionnement de notre Compagnie vis-à-vis du corpus scientifique et de ses acteurs qui est à la base de notre vocation et de nos missions.

I. Je tiens d'abord à rendre hommage à tout le Bureau pour l'excellente atmosphère de collaboration qui y règne et l'efficacité de son fonctionnement. Un grand merci à notre Secrétaire perpétuel, Guy Paillotin, à qui échoit la lourde charge du fonctionnement intellectuel de l'Académie et à notre Trésorier perpétuel, Jean-Paul Lanly, qui gère remarquablement nos dépenses, nos investissements et nos finances, et à notre nouveau Président, Bernard Saugier, qui me succède aujourd'hui. Un grand merci également à Jean-François Morot-Gaudry et Pierre Marsal ainsi qu'à nos assistantes et secrétaires qui se dévouent avec efficacité et gentillesse.

Il me paraît indispensable de rappeler que, en particulier grâce à notre trésorier, notre fonctionnement a été sensiblement facilité et l'agrément du travail grandement accru par les améliorations apportées à notre cadre d'activité, parallèlement à une mise aux normes de la sécurité : réfection de l'éclairage, restauration des peintures, de la climatisation et de la ventilation de la grande salle, réfection de la peinture du hall d'entrée et des protections anti-incendie de la cave. Des problèmes sérieux avec le serveur informatique et la nécessité de changer le standard téléphonique ont pu être résolus dans des délais finalement assez brefs.

Ils ont toutefois montré notre vulnérabilité vis-à-vis de ce type de matériel et de la gestion de son entretien. Il est satisfaisant de constater que, après réparations, notre site Internet fonctionne maintenant de façon tout à fait correcte.

¹ Président de l'Académie d'Agriculture de France pour l'année 2009, Ingénieur général honoraire du Génie rural, des Eaux et des Forêts.

II. L'année 2009

L'année 2009 a comporté 27 séances dont 2 communes avec l'Académie des Sciences (l'une d'elles à l'Institut) et une autre avec l'Académie de Médecine. Toutes ont été de bonne qualité et il faut souligner que plusieurs parmi elles ont été remarquables par leur très haut niveau. Il s'agit là d'un aspect particulièrement important ; le niveau scientifique de nos travaux est un des points clés de notre situation et de notre réputation. Nous y reviendrons plus en détail.

Comme tous les ans, nous avons été frappés par la disparition de plusieurs confrères. Il n'est malheureusement pas possible dans un temps limité de revenir sur leurs mérites. La chronique en est reprise dans les Comptes Rendus de l'Académie.

Permettez-moi simplement, ici, de rendre encore une fois hommage à notre ancien Secrétaire perpétuel André Cauderon dont l'intelligence, la rigueur intellectuelle et l'humanité nous ont tous marqués et dont le souvenir restera longtemps vif dans nos cœurs et nos esprits.

Trois événements importants ont marqué les douze derniers mois

Tout d'abord la mise au point définitive des statuts et le lancement **de l'« Association des Amis de l'Académie d'Agriculture de France »** destinée à faciliter le mécénat vers notre Compagnie. Il faut remercier vivement Jacques Risse, notre ancien Président, qui a complètement mené cette affaire et a pu la conclure avec le concours de plusieurs de nos confrères. L'association va se mettre en action progressivement dès le début de l'année 2010.

Ensuite le lancement **de la préparation de la célébration du 250^e anniversaire de l'Académie**. Initiée par une lettre de notre précédent Président, Georges Touzet à René Groussard puis analysée en détail et étudiée par ce dernier qu'il convient de remercier particulièrement, l'opération a été finalisée par le Bureau puis prise en main par notre Secrétaire perpétuel qui l'a intégrée dans la préparation du programme 2010/2011 et lancée au niveau des sections.

Enfin, comme pour le "Grenelle de l'Environnement", le Ministre de l'écologie, du développement durable de l'aménagement et de la mer, Jean Louis-Borloo, a demandé à l'Académie **d'émettre un avis sur les textes de préparation du "Grenelle de la Mer"**.

Dans un temps très limité, durant la dernière semaine de juin, le Bureau, quelques confrères et moi-même avons pu rédiger une réponse détaillée quoique suffisamment courte. J'en remercie vivement ceux qui nous ont ainsi apporté leur contribution.

III. Accompagner au plus près la recherche

Dans mes deux précédentes interventions, j'avais insisté sur l'impérieuse nécessité, pour notre compagnie, de travailler dans la rigueur et donc d'appuyer ses travaux sur la meilleure information scientifique possible. Avaient été abordées, en particulier, les difficultés liées au contrôle par les publications dans les meilleures revues à comité de lecture, celles inhérentes au traitement des données et celles résultant de l'utilisation insuffisamment contrôlée de modèles mathématiques et informatiques.

Il m'est apparu intéressant aujourd'hui, pour terminer ce tour d'horizon, de vous entretenir de façon un peu plus détaillée de deux autres problèmes : *la maîtrise insuffisante des aspects météorologiques* et *la difficulté de l'étude des phénomènes rares*.

Pas de science sans observations et sans mesures, ni de connaissances, ni même de prises de décisions rationnelles.

D'où un premier thème de réflexion, la métrologie, qui est en quelque sorte le "bras armé" des sciences de la mesure. *L'analyse dimensionnelle est une des branches les plus brillantes* de ces sciences. On sait son rôle fondamental en physique, où elle permet des raccourcis de raisonnement saisissants, et fournit d'élégants moyens de contrôle. La métrologie, quant à elle, passe pour une discipline ingrate, considérée trop souvent comme subalterne, et laissée aux seuls soins des techniciens de laboratoire ou de terrain.

Le chercheur doit pourtant savoir très précisément ce qu'il veut mesurer et devrait dominer la physique de la méthode et de l'instrument utilisé. Si le phénomène étudié est variable, régulièrement ou non, il faut en maîtriser la dynamique. Il faut connaître les conditions physiques et chimiques de la mesure, et l'influence éventuelle de l'environnement. S'il s'agit d'une mesure ponctuelle au sein d'un phénomène étendu, il est nécessaire d'en analyser la représentativité.

Pour que des mesures soient comparables dans le temps et dans l'espace, il faut être capable, dans des conditions similaires, de comparer le fonctionnement des instruments et l'expression des résultats obtenus. Par ailleurs, la physique des instruments devenant très complexe, il est indispensable de contrôler les risques de dérive ou de dysfonctionnement.

A chaque mesure correspond une plage d'incertitude qui dépend, bien sûr, de l'instrument mais aussi du phénomène, de l'opérateur et des conditions dans lesquelles il travaille.

Un exemple typique et intéressant est fourni par la mesure, à priori pourtant très simple, de la hauteur d'eau ou du niveau dans une rivière, un lac ou en mer. On pourrait passer des heures à décrire en détail les différents types d'appareils utilisables ou utilisés. Il faudrait également parler de l'influence des irrégularités de surface, des vagues, des courants, du vent et de la pression atmosphérique, etc. Disons qu'il est pratiquement impossible de mesurer significativement le niveau d'une surface libre extérieure avec un risque d'erreur inférieur à un demi centimètre (en fait dans la plupart des cas de l'ordre du cm).

Est-il raisonnable, dans ces conditions, de publier des résultats de mesures brutes ou de leurs moyennes avec des chiffres exprimant des millimètres ou des fractions de millimètres ?

Quelle est la valeur exacte d'une mesure de niveau d'une surface plus ou moins agitée, même et surtout, si l'instrument en filtre les mouvements. Si ces mouvements avaient une forme géométrique définie (p. ex. trochoïdale ou sinusoïdale), il pourrait y avoir, théoriquement, une solution mathématique. Inutile de dire que ce n'est presque jamais le cas.

Dans beaucoup de publications, il est impossible de savoir si la précision affichée, réellement (fourchette d'erreur) ou virtuellement (nombre de chiffres fournis donc considérés comme significatifs), correspond aux conditions réelles de la mesure. *C'est une dérive regrettable, dont il faut être conscient.*

Il est intéressant de mettre en évidence ce genre de difficulté dans le problème de la variation du niveau moyen des océans

La connaissance de la cote moyenne des eaux en un point défini d'un rivage marin est, en effet, une donnée très importante qui conditionne les aménagements de la zone et l'utilisation de la bande côtière. Or, l'élévation importante ou rapide de ce niveau, qui fait actuellement l'objet de nombreuses études et projections, pourrait conduire à des catastrophes sociales et écologiques très graves.

On sait que le niveau des océans est monté d'environ cent vingt mètres depuis la fin de la dernière glaciation, il y a un peu plus de douze mille ans. Les nombreuses traces

géomorphologiques permettent d'en préciser assez finement l'évolution un peu partout dans le monde.

Cela étant, il est difficile de définir le niveau moyen en question

Suivant une vue théorique un peu trop simplifiée, il devrait se confondre avec le "géoïde" c'est-à-dire la surface de niveau du champ de pesanteur de la Terre, située à la même cote.

Mais cela n'est pas tout à fait exact car le niveau de l'océan par rapport au géoïde dépend de la densité de l'eau, donc de sa température et de sa salinité, paramètres variables suivant les zones et l'époque de l'année. Ce niveau change également suivant l'effet des marées, de la houle, des courants, du vent (intensité et direction), de la pression atmosphérique (1 hectopascal correspond à une variation de niveau d'environ 1 cm), de l'évaporation et des précipitations. Au moment d'une tempête, l'influence combinée de ces facteurs peut entraîner une montée des eaux de l'ordre de plusieurs mètres.

Classiquement, les niveaux sont mesurés dans des stations équipées de marégraphes, instruments qui mesurent la hauteur de l'eau dans des puits reliés à la mer par des conduits et des dispositifs destinés à filtrer les effets des vagues et de la houle. Toutefois, il ne s'agit là que du niveau par rapport à un repère fondé sur le rivage et tout ce socle est lui-même sujet, par rapport au centre de masse de la Terre, à un mouvement journalier dû à la gravité de la Lune et du Soleil appelé "marée continentale" et dont l'ampleur, peut atteindre plusieurs dizaines de cm.

Il peut également être soumis à des mouvements d'origine géologique locaux, tassements ou consolidations de zones sédimentaires, mais aussi plus généraux, phénomènes tectoniques ou encore mouvements verticaux liés à la remontée des plaques continentales enfoncées dans le manteau par le poids des grands inlandsis durant les périodes glaciaires précédentes et maintenant libérées de cette charge (isostasie). Le phénomène est particulièrement spectaculaire en Scandinavie où l'on peut observer des plages "perchées" remontées de quelques mètres depuis la fin de la glaciation. Inversement, des tassements sédimentaires peuvent faire baisser le niveau du rivage de plusieurs cm par an (c'est le cas de certaines zones de la Nouvelle-Orléans aux États Unis).

Par ailleurs, du fait de la tectonique des plaques et des remaniements beaucoup plus rapides et brutaux, dus aux séismes et aux volcans sous-marins, la topographie du fond des océans et l'éloignement des continents sont en perpétuel changement.

La variation du "niveau moyen des océans" n'est pas une mesure simple

Comment suivre avec précision le niveau d'un réservoir dont le fond et les bords bougent, soumis à toute une série d'influences et en particulier à une pression atmosphérique changeante selon les phénomènes météorologiques et la position des grands bassins barométriques (les « gyres ») ?

Il faut par ailleurs définir un niveau de référence ; or le géoïde n'est pas connu avec une précision suffisante. On utilise donc, comme en cartographie classique, l'ellipsoïde dit "de référence", ce qui n'est pas forcément aisé. On opère pour cela maintenant par mesures satellitaires, comme avec le réseau GPS, grâce à des satellites équipés d'instruments travaillant en interférométrie radio, avec une précision altimétrique donnée pour être de l'ordre de 2 cm.

La méthode classique de suivi du niveau marin, toujours largement utilisée, consiste à travailler dans des stations équipées de marégraphes, qui comparent localement le niveau marin à celui du socle continental. Cette manière de faire comporte des difficultés méthodologiques évidentes. D'abord parce que le nombre de stations est forcément limité, et est loin de couvrir de façon homogène l'ensemble des rivages des océans, ensuite à cause des influences perturbatrices

décrites plus haut. Il faut donc choisir des stations considérées comme représentatives et prendre en compte les changements d'appareillage ainsi que de méthodes de mesure intervenus au fil du temps.

Les procédés satellitaires (satellites Topex-Poseidon puis plus récemment, Jason 1 et 2 équipés de l'instrument interférométrique Doris et des sondes altimétriques radar Poseidon 3) permettent des mesures au large et sont plus homogènes pour la couverture planétaire. Ils souffrent de handicaps analogues quand les mesures sont faites par rapport à des points de référence continentaux. Ils restent complexes et délicats en altimétrie absolue du fait des corrections liées à l'état électrique de l'atmosphère, la structure des vagues (analysée par le pinceau d'onde), la densité et la température de l'eau, les marées et surtout les variations de la pression atmosphérique locale qu'il n'est pas aisé d'obtenir au moment et de la mesure. Bien que la physique de ces corrections soit bien connue, leur ampleur par rapport à la mesure brute reste considérable et largement supérieure aux variations que l'on veut déceler, en particulier en ce qui concerne la pression atmosphérique.

L'hétérogénéité des mesures des stations marégraphiques et les difficultés des mesures satellitaires expliquent pour une part les plages relativement larges du taux de variation annuelle qu'on trouve dans les diverses publications.

Elles n'expliquent pas l'expression de ces taux avec un nombre de chiffres (significatifs ?) allant jusqu'au centième de mm. On se retrouve devant les mêmes interrogations vis-à-vis des vitesses de montées issus des modélisations climatiques. Il s'agit, bien entendu de moyennes spatiales et annuelles. Mais même multipliés par 100 pour avoir des nombres séculaires, a-t-on vraiment une précision millimétrique à partir de quelques milliers de mesures ponctuelles ou linéaires, opérées au mieux au cm, dans les conditions décrites ci-dessus ?

De toute façon, les moyennes tendanciennes de ce type ne peuvent être considérées comme des données physiques. Il faut les voir uniquement comme des indicateurs, évidemment précieux pour suivre les variations, mais inutilisables en projection locale

En effet, elles contiennent, en elles-mêmes, beaucoup moins d'informations que le tableau de mesures dont elles sont issues et leur degré réel de précision reste très difficile à évaluer. Par ailleurs, il est irrationnel de partir de ces taux moyens pour contrôler et prévoir, en un point déterminé, la montée de l'eau.

Il convient toujours, dans ce cas, de corriger les projections en partant du comportement passé de la zone, issu des mesures des marégraphes représentatifs des stations proches.

Notre second thème de réflexion couvre **les phénomènes météorologiques et économiques extrêmes**, lesquels ont une action directe et souvent brutale sur l'activité agricole. Une meilleure maîtrise de leur dynamique serait hautement souhaitable. *Tout progrès significatif sur ces points intéresse directement notre Académie.*

Les méthodes d'étude statistique des phénomènes rares ont été largement étudiées depuis des décennies. Il a été rapidement constaté que la loi de Gauss, bien adaptée à l'étude d'un grand nombre de petits phénomènes indépendants, ne convient absolument plus lorsque les événements rares et extrêmes sont dominants.

En hydrologie, l'étude des pluies et des débits catastrophiques en est un exemple typique. Après les travaux de Pareto – généralisés par Levy – concernant les phénomènes économiques, un groupe de mathématiciens, dont l'allemand Emil Gumbel, a étendu ces méthodes aux événements naturels comme les pluies et les débits des rivières. A partir de la loi qui porte son nom, un groupe d'hydrologues d'EDF a mis au point, il y a une trentaine d'années, une méthode d'étude des débits

extrêmes, très efficace, dite du "Gradex". L'expérience en a pourtant montré les limites car elle sous-estimait les probabilités des valeurs extrêmes.

Après avoir constaté que les modélisations classiques en climatologie ne permettaient pas de résoudre convenablement leur problème, les ingénieurs d'EDF ont perfectionné la méthode du "Gradex" en tenant compte des différents types de circulations atmosphériques locales suivant les saisons. La nouvelle version appelée "Shadex" considère les types de situations météorologiques (types de temps) de la zone conduisant aux pluies et aux débits les plus importants. La nouvelle méthode semble beaucoup mieux couvrir les événements observés des cinquante dernières années.

En partant de constatations analogues, les hydrologues du Cemagref ont élaboré une méthode radicalement différente qui consiste à développer une représentation stochastique de pluies horaires susceptible de reproduire, au mieux, les caractéristiques temporelles des pluies observées.

La modélisation du phénomène de persistance des averses, mis en évidence au cours des événements extrêmes, amène à une asymptote plus qu'exponentielle des distributions de fréquence des différentes pluies.

La méthode "Shypre" a été développée à partir de ces principes.

Sa version régionalisée "Shyreg" repose sur la prise en compte des caractéristiques régionales des pluies journalières aboutissant à une connaissance spatiale fine du modèle de génération de pluies horaires.

La description un peu détaillée de ces méthodes et de leurs applications nécessiterait, au strict minimum, une séance de l'Académie. Disons qu'elles ont permis des avancées très significatives dans l'analyse et la possibilité de probabiliser l'occurrence de ces phénomènes extrêmes destructeurs.

En ce qui concerne les aspects économiques, les travaux récents de Bertrand Munier sur la modélisation des variations brutales des marchés de certains produits spéculatifs et applicables en particulier à ceux des denrées alimentaires, et les recherches de Daniel Zadjenweber sur l'économie des catastrophes naturelles, également basées sur l'utilisation des lois de Pareto et de Levy, paraissent devoir être une source de progrès très intéressante.

L'Académie et le savoir

Pour remplir notre principale mission, qui est de « faire savoir » et de « comment faire avec le savoir », il faut d'abord savoir, c'est-à-dire se tenir le plus proche possible du corpus scientifique et de ceux qui le font vivre et croître, artisans eux-mêmes de la recherche.

Au-delà du cercle étroit des initiés, la source essentielle de connaissances nouvelles se trouve dans les revues scientifiques à comité de lecture. Il y a un an, j'avais abordé ce problème devant vous par une analyse rapide de leur rôle et de leurs limitations. Au-delà de la diffusion du savoir, les publications restent l'outil essentiel dans le déroulement de la carrière d'un chercheur par la garantie de sérieux que cette méthode offre à son travail et par la prise de date de ses résultats.

Toutefois, et ce n'est un secret pour personne, cette presse spécialisée, comme beaucoup de presses écrites, connaît des difficultés.

Baisse très sensible des ventes et abonnements d'abord, liée essentiellement au développement massif et accéléré d'Internet qui pousse à la mondialisation de l'information gratuite (phénomène analogue à celui qui frappe actuellement les formes d'art transmissibles sur le web, le cinéma et la musique). Toutefois, parallèlement à la gratuité, le principal moteur de cette évolution est le besoin immédiat de nouveauté ainsi que de rapidité et de facilité d'accès.

Baisse de confiance plus ou moins marquée ensuite en relation, semble-t-il, avec la perception de l'existence d'intérêts croisés, divergents ou convergents, des pairs relecteurs, des rédacteurs en chef et des éditeurs. Par ailleurs, beaucoup de recherches appliquées résultent maintenant de contrats comportant des clauses de confidentialité.

Ces divers obstacles amènent souvent à allonger de façon démesurée les délais entre l'envoi du premier texte proposé et sa version définitive plus ou moins remaniée suivant les observations des « *referees* ». De ce fait, de plus en plus de chercheurs publient des *versions provisoires* (ou limitées) de leurs papiers sur leurs sites ou certains sites libres du Web (comme arXiv.org de la Cornell University) pour à la fois prendre date et commencer à discuter, avec un ensemble beaucoup plus large de leurs pairs, des résultats exposés.

Il y a 15 à 20 ans, les Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, étaient considérés comme de bonnes références par les chercheurs appliqués qui y publiaient leurs travaux. Mais, devant la prééminence actuelle, dans la recherche, des revues, exclusivement en anglais et de rang « A » (importance des citations, index dans la carrière du chercheur), cette opportunité a été progressivement délaissée. C'est ce qui a conduit notre Académie à s'orienter plutôt vers un statut de revue francophone de science et culture agronomique.

Cette évolution générale vers les publications en anglais des textes scientifiques de haut niveau est certainement irrémédiable. Mais le site de l'Académie pourrait nous permettre de retrouver un certain lustre auprès des chercheurs en leur donnant la possibilité d'y présenter leurs « papiers », qui bénéficieraient d'une prise de date rapide, avant une acceptation définitive dans une revue scientifique reconnue, processus souvent long. Par ailleurs, les discussions sur site sont propices à des progrès intéressants.

Comme vous le voyez, armés de nos connaissances et de notre esprit critique, de notre réseau de relations avec le milieu de la recherche, et compte tenu des nouvelles opportunités que nous venons d'évoquer, un certain nombre d'intéressantes perspectives s'ouvrent devant nous.

Notre nouveau Président et notre Secrétaire perpétuel sauront, j'en suis sûr, les exploiter au mieux.

Mes vœux vont évidemment dans ce sens.

Et, bien sûr, que 2010 vous apporte à toutes et à tous le meilleur de ce que vous en attendez !

RESSOURCES NATURELLES ET CYCLE DU CARBONE

par Bernard **Saugier**¹

INTRODUCTION

Je vous remercie vivement de la confiance que vous m'avez ainsi faite : c'est un grand honneur pour moi de présider l'Académie d'Agriculture pour cette année, dans la foulée de ceux qui m'ont précédé depuis 2001 : Jacques Delage, Jean-Claude Clavel, Claude Gleizes, André Frouin, Jean-Claude Mounolou, Alain Rérat, Jacques Risse, enfin Gorges Touzet et Jean Dunglas, dont j'ai pu apprécier les qualités en participant au Bureau cette année.

Je remercie aussi tous ceux qui acceptent d'apporter de leur temps et leurs compétences à notre Académie pour la faire vivre à l'intérieur et à l'extérieur. Les tâches sont nombreuses entre le Bureau, les instances de l'Académie, les commissions, les comités inter-académiques, les sections, les groupes de travail, le site Internet, la revue, la bibliothèque, les relations avec la presse, l'organisation des sorties. Notre Secrétaire perpétuel ne ménage ni son temps ni ses remarques exigeantes lors de nos séances, notre Président sortant a su animer nos séances avec à la fois rigueur, gentillesse et humour, j'ai beaucoup appris à ses côtés. Notre Trésorier perpétuel a réalisé en peu de temps un travail impressionnant d'entretien de notre bâtiment et de rétablissement de nos finances. Le personnel de l'Académie travaille efficacement et avec dévouement pour assurer la vie de notre Compagnie au quotidien. Nous allons être beaucoup sollicités pour préparer le 250^e anniversaire de l'Académie ; c'est une bonne occasion pour préciser notre rôle de veilleur et notre vision à long terme. Il nous faudra pratiquer un exercice d'intelligence collective pour tirer le meilleur parti des richesses intellectuelles de notre Compagnie.

Je voudrais vous présenter rapidement mon parcours, qui est celui d'un scientifique universitaire : chercheur au CNRS à Montpellier pendant 12 ans, dont 2-3 ans passés en Saskatchewan au Canada, puis professeur en Écologie à Orsay. Je suis physicien de formation, et me suis spécialisé dans les échanges d'énergie et de matière entre la végétation et l'atmosphère, sur des cultures, des prairies et des forêts. A Orsay, notre équipe a étudié la production de biomasse des taillis de châtaigniers et de peupliers. Puis nous avons étudié avec Marianne Mousseau l'effet stimulant d'un enrichissement en CO₂ sur la photosynthèse et la croissance de jeunes arbres. Par ailleurs, les satellites d'observation de la Terre commençaient à devenir opérationnels ; nous avons développé avec Gérard Dedieu, de Toulouse, des méthodes permettant d'étudier la couverture végétale, la production de biomasse des continents et son rôle dans le cycle global du carbone. Dans mes dernières années d'activité j'ai aussi travaillé sur la culture de la pomme de terre dans des systèmes à jachère longue dans les Andes, avec le regretté Pierre Bottner, de Montpellier. On voit d'après ce parcours que les sujets de recherche ont été pour une bonne part influencés par des événements extérieurs : chocs pétroliers qui ont stimulé un temps les recherches sur la biomasse, augmentation du CO₂ atmosphérique par les activités humaines, possibilités offertes par les mesures satellitaires. Au cours de ces années j'ai été souvent en contact avec des collègues de l'INRA,

¹ Président de l'Académie d'Agriculture de France. Professeur à l'Université Paris-Sud, Laboratoire d'Écophysiologie végétale, 91405 Orsay cedex.

surtout en Environnement-Agronomie et en Ecologie des milieux forestiers, prairiaux et aquatiques. Mais j'ai encore beaucoup de lacunes dans ma culture scientifique et aurai donc souvent le rôle du naïf.

Je voudrais maintenant utiliser le privilège du nouveau président pour vous présenter quelques remarques sur les ressources naturelles de notre planète.

L'espèce humaine s'est considérablement multipliée sur Terre, au point de mettre en danger le reste de la biosphère et sa propre survie. Cette croissance a été rendue possible par les progrès des sciences qui ont permis d'accroître la production de nourriture et de diminuer la mortalité. Nous sommes maintenant près de 7 milliards d'humains et serons très probablement 9 milliards en 2050. Toutefois le taux d'accroissement de notre population baisse régulièrement, de 2% en 1970 il est maintenant à 1,2 % et pourrait devenir négatif après 2050, conduisant à une décroissance démographique.

La production agricole a bénéficié au 20^e siècle d'une augmentation spectaculaire des rendements, due en partie à l'amélioration des plantes et en partie aux progrès de l'agronomie (fertilisation, contrôle des ennemis des cultures...). Elle a reposé, comme beaucoup d'autres activités, sur la disponibilité d'une énergie abondante et bon marché, principalement le pétrole. Depuis une dizaine d'années, les rendements tendent à plafonner dans les pays à agriculture développée, un signe un peu inquiétant pour le futur.

Par ailleurs, depuis l'origine de la vie il y a quelque 3,8 milliards d'années, la biosphère terrestre a complètement transformé la surface de la Terre et la composition de l'atmosphère, ainsi la photosynthèse a converti le CO₂ primitif en oxygène et carbone fossile. Les activités humaines exercent depuis peu un rôle significatif sur les grands cycles biogéochimiques. Nous allons nous efforcer de préciser ce rôle en nous focalisant sur le cycle du carbone qui est bien représentatif du fonctionnement global, et sur la façon dont il est modifié par les activités humaines.

Cycle global du carbone

L'entrée du carbone dans la biosphère terrestre se fait par la photosynthèse. On estime qu'environ 120 milliards de tonnes de carbone (Gt C ou Pg C) sont ainsi fixées chaque année. Comment connaît-on ce chiffre et avec quelle précision ? Les estimations les plus récentes reposent sur environ 250 sites de mesures continues des flux de CO₂ et d'H₂O. Ces mesures ont été réalisées de 1998 à 2006 au dessus de divers types d'écosystèmes (cultures, prairies, forêts) dans toutes les zones climatiques du globe (réseau FLUXNET). Elles ont permis d'obtenir des estimations fiables sur ces stations, puis en les complétant par des mesures par satellite, d'extrapoler à l'ensemble des continents (Beer *et al.*, 2009). On obtient 122±8 Gt C an⁻¹. Les forêts représentent 45% de ce total et les cultures 14%. Le rendement global moyen de cette conversion photosynthétique est seulement de 0,56% du rayonnement solaire incident (dans tout le spectre) ; ce chiffre est trois fois plus élevé pour les forêts tropicales humides, dont les feuilles sont actives toute l'année.

La respiration consomme environ la moitié de la photosynthèse, laissant comme production de biomasse 55 à 60 Gt C an⁻¹, à comparer à environ 50 Gt C an⁻¹ pour la production océanique (sur une surface 2,5 fois plus grande). Plusieurs chercheurs ont tenté de chiffrer la fraction de cette production qui est utilisée pour les besoins humains de nourriture et de bois. D'après Haberl *et al.* (2007), ce sont 15,6 Gt C an⁻¹ qui sont utilisés pour les hommes, soit un quart de la production globale. Les cultures en représentent 50%, les pâturages 28%, les forêts 11%, le reste étant consommé par les infrastructures (4%) et par les feux d'origine humaine (7%). D'autres estimations ont fourni des chiffres légèrement différents mais ceux donnés ici paraissent réalistes et l'article a

l'avantage de fournir leur distribution géographique. Ces estimations correspondent à une population d'environ 6 milliards, et il y a lieu de les augmenter de 50% pour connaître nos besoins en 2050, et même un peu plus si on souhaite une élévation du niveau de vie moyen. On voit qu'avec des taux de prélèvement de 38% et plus sur la production de biomasse (production renouvelable de la biosphère), on approche des limites possibles.

A très long terme, le cycle du carbone est dominé par les échanges entre le CO₂ atmosphérique, les océans et les carbonates des sédiments marins qui sont enfouis par la tectonique des plaques. L'activité volcanique assure le recyclage du CO₂ par la décomposition thermo-chimique des carbonates. Quantitativement, les carbonates représentent un stock de carbone de plus de 60 000 000 Gt (contre 800 Gt pour l'atmosphère, 2500 pour la biomasse et la matière organique des sols, et 38 000 pour les océans). Comme les dépôts sédimentaires sont d'environ 0,2 Gt C an⁻¹, la durée de vie d'un atome de carbone des carbonates est de 60 000 000/0,2 soit 300 millions d'années, ce qui justifie qu'on n'en tienne pas compte sur quelques siècles ou millénaires. Bien sûr, chaque éruption volcanique majeure entraîne une légère augmentation du CO₂ atmosphérique, mais il y a compensation par la sédimentation sur le long terme.

Le cycle du carbone est perturbé par les rejets de CO₂ liés à la consommation de carbone fossile et à la déforestation qui est surtout tropicale. Il en est résulté une augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique, de 280 ppm par volume avant 1750 à 385 ppm en 2009. La consommation de carbone fossile, exprimée en milliards de tonnes de carbone par an, est passée de 0,5 en 1900 à plus de 8 en 2009. Les rejets par déforestation ont crû de 0,8 à 1,4 ou 1,5 durant la même période, soit un total d'émissions atteignant presque 10 Gt C an⁻¹. Ces émissions se font sous forme de CO₂, mais l'augmentation du CO₂ atmosphérique en représente un peu moins de la moitié ; le reste est absorbé en parties à peu près égales par les océans (par voie essentiellement chimique) et par les continents (par photosynthèse). Le carbone absorbé par les continents doit être stocké dans la biomasse et dans le sol, mais il est difficile à mesurer directement ; on peut imaginer le scénario suivant : la photosynthèse est stimulée par les changements globaux, cela tend à augmenter la biomasse (principalement stockée dans les arbres), puis la fraction de cette biomasse qui en mourant arrive au sol pour l'enrichir en matière organique. Plusieurs résultats récents montrent ainsi que les forêts non exploitées agissent actuellement comme des puits de carbone (Jacques et Saugier, 2008). Quels sont les facteurs stimulant la photosynthèse ? Le CO₂ bien sûr a augmenté, et on sait que c'est un facteur limitant de la production de la majorité des espèces végétales, dites en C3. Les apports d'azote ont aussi augmenté, par fertilisation sur les cultures, et parce que les activités humaines (moteurs thermiques notamment) engendrent la formation d'oxydes d'azote qui retombent sous forme de dépôts atmosphériques) dans de grandes régions du monde. Enfin, le réchauffement climatique allonge la durée de la saison de croissance là où elle est limitée par le froid. La Terre est devenue plus verte et cela a bien été mis en évidence par les observations satellitaires : Nemani *et al.* (2003) ont estimé que la production nette de biomasse avait augmenté de 6% en 18 ans, entre 1982 et 1999.

Un point intéressant est la grande variabilité apparente du puits de carbone continental, qui est déterminé par différence entre les rejets totaux de carbone dans l'atmosphère et l'accumulation de carbone dans l'atmosphère (bien mesurée par l'augmentation de la teneur en CO₂) et dans les océans (mesures des flux de surface et modèles) (Canadell *et al.*, 2007). Cette variabilité est causée par les variations climatiques interannuelles considérables qui affectent les continents. Elle pourrait influencer la production agricole mondiale, qui demeure tendue : la demande de nourriture augmente avec la population, et la demande de biocarburants croît avec le prix du pétrole.

Ce puits de carbone continental, en fixant plus du quart des rejets mondiaux de CO₂, atténue l'augmentation du CO₂ atmosphérique et ses conséquences sur le réchauffement. Cet effet est-il durable ? Pour l'étudier, divers modèles du fonctionnement de la biosphère continentale ont été mis au point, avec une représentation plus ou moins réaliste des processus : photosynthèse, transpiration et ouverture stomatique, respiration des plantes et des organismes du sol, croissance et sénescence etc. Les processus sont contrôlés par des variables climatiques comme le rayonnement, la teneur en CO₂, la température, les précipitations. Les modèles permettent de simuler l'évolution du puits continental de carbone avec les variations attendues du CO₂ et du climat. Dans la plupart des modèles ce puits augmente jusque vers 2050 puis diminue pour devenir une source de carbone après 2100. La raison en est qu'on a deux effets opposés : un effet stimulant de l'augmentation du CO₂ sur la photosynthèse, et un effet négatif du réchauffement sur les bilans hydrique et carboné (le réchauffement augmentant la respiration) ; l'effet stimulant s'estompe aux fortes teneurs en CO₂ et l'effet négatif l'emporte alors. On voit ici une raison de plus de mettre en place rapidement des politiques de limitation des émissions de CO₂ si l'on veut éviter d'atteindre des concentrations et des réchauffements trop élevés.

CONCLUSION

Quel avenir souhaitons-nous ?

Si le 20^e siècle a été celui d'une expansion sans précédent de l'espèce humaine, le 21^e siècle sera celui d'une stabilisation de la population et de son impact sur l'environnement global. Les défis sont nombreux : assurer à tous nourriture, eau potable, vêtement, logement et éducation, remplacer le pétrole par une autre énergie. Nous avons à exploiter les ressources naturelles de façon équitable et responsable. Les sciences seront fortement sollicitées pour relever ces défis, mais elles ne suffisent pas, il faut encore une volonté collective. Comment la mobiliser sans retomber dans les dictatures que nous avons connues au 20^e siècle et qui continuent dans bien des pays aujourd'hui ? Le catastrophisme écologique nous laisse assommés, sans volonté : à quoi bon ? C'est perdu d'avance. Mais l'abus de confiance dans la technologie nourrit l'insouciance : de toute façon, nos enfants ou petits-enfants trouveront bien un moyen pour régler les problèmes que nous avons laissés, autrement dit : après moi, le déluge !

Notre avenir nous appartient, jamais l'humanité n'a disposé d'autant d'atouts pour faire face aux défis qui nous attendent, mais la question fondamentale est une question métaphysique : trouvons-nous la vie assez belle pour vouloir la transmettre ? Si dans certains pays d'Afrique, les femmes ont encore en moyenne 6 ou 7 enfants, dans certains pays d'Europe ou au Japon ce nombre est bien inférieur à 2, le nombre qui permet – à peine – un maintien de la population. Le résultat est une population vieillissante plus soucieuse de l'approche de la mort que du renouvellement de la vie. Pour préparer l'avenir il faut y croire. Les sciences mais aussi les religions sont bien placées pour redonner de l'espérance à notre monde. Les sciences parce que dans l'histoire de l'univers et de la vie sur Terre, elles illustrent l'extraordinaire dynamisme de la puissance vitale qui a su résister jusqu'ici à toutes les catastrophes qu'elle a subies. Les religions parce qu'en donnant du sens à la vie elles ouvrent sur l'avenir. C'est je pense le rôle d'une Académie de penser le temps long qui est souvent négligé par ceux qui ont à décider au jour le jour. C'est aussi de penser qu'il peut y avoir plusieurs modèles de développement : en agriculture comme ailleurs, la mondialisation n'est pas incompatible avec une certaine diversité.

Je voudrais terminer par une anecdote. J'ai participé à la visite de l'amidonnerie Roquette organisée cet automne par notre Académie, une vraie usine avec beaucoup de bâtiments et de tuyaux, et j'ai découvert tout ce qu'on pouvait faire avec de l'amidon. Surtout, j'ai été impressionné

par la capacité de cette entreprise à se mettre au service de ses clients : ses ingénieurs réalisent des « pilotes » pour fabriquer en quantité limitée les produits des clients, de façon à comprendre de l'intérieur les procédés de fabrication et à contribuer à leur amélioration. C'est une façon d'anticiper sur l'avenir. Au cours de l'excellent repas qu'il nous a offert, Marc Roquette nous a donné sa vision des choses, concluant que notre siècle avait sans doute besoin maintenant de sagesse pour l'avenir. J'ai apprécié qu'un dirigeant d'entreprise ne s'en tienne pas à son bilan économique et financier mais ait un regard large qui peut lui être utile aussi au sein de son entreprise.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) BEER C., REICHSTEIN M., CIAIS P., CAVALHAIS N., JUNG M., RÖDENBECK C., TOMELLERI E., BALDOCCHI D., CESCATTI A., LUYSSAERT S., MARGOLIS H., ROUPSARD O., WILLIAMS C. and PAPALE D., 2009. – Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and co-variation with climate. *Science* (in press).
- (2) CANADELL J.G., LE QUERE C. RAUPACH M.R., FIELD C.B., BUITENHUIS E.T., CIAIS P., CONWAY T.J., GILLET N.P., HOUGHTON R.A., MARLAND G., 2007. – Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104**, 18866–18870.
- (3) HABERL H., ERB K.H., KRAUSMANN F., GAUBE V., BONDEAU A., PLUTZAR C., GINGRICH S., LUCHT W., FISCHER-KOWALSKI M., 2007. – Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104**, 12942–12947.
- (4) JACQUES G. et SAUGIER B., 2008. – Les puits de carbone. Lavoisier, 171 p.
- (5) NEMANI R.R., KEELING C.D., HASHIMOTO H., JOLLY W.M., PIPER S.C., TUCKER C.J., MYNENI R.B., and RUNNING S.W., 2003. – Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science* **300** (5625), 1560 – 1563.