



QUEL CLIMAT FERA-T-IL DEMAIN ?

SÉANCE DU 20 NOVEMBRE 2003

*Avec Jean-Claude André, météorologue et physicien,
et Emmanuel Cloppet, agronome.*

LYCÉE BEAUREGARD (VILLEFRANCHE DE ROUERGUE, AVEYRON)

270 élèves ont assisté à cette séance accompagnés de leurs enseignants. Inscrits en seconde, première, terminale ou en post-BTS, dans des filières très diverses, ils étaient issus de cinq établissements : le Lycée agricole Beaugard (Villefranche-de-Rouergue, Aveyron), le lycée polyvalent de Villefranche-de-Rouergue, les lycées agricoles de Figeac (Lot) et de La Roque (Rodez, Aveyron), ainsi que le lycée général et technologique Alexis Monteil (Rodez, Aveyron).



CONSEIL
RÉGIONAL
MIDI-PYRÉNÉES



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PRÉFECTURE
DE LA RÉGION
MIDI-PYRÉNÉES



L'UNIVERSITÉ DES LYCÉENS

UNE EXPÉRIENCE PILOTE EN MIDI-PYRÉNÉES POUR METTRE LA SCIENCE EN CULTURE

En France et en Europe, la régression des effectifs étudiants dans certaines filières scientifiques préoccupe les pouvoirs publics. Ce phénomène pose à moyen terme le problème du renouvellement des cadres scientifiques et techniques, des enseignants et des chercheurs. De plus, le désintérêt des jeunes à l'égard de la science risque de nuire au débat démocratique sur les choix d'orientation de la recherche et de ses applications. La revalorisation de la place de la science dans la cité est d'ailleurs l'une des priorités du Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation et de la Recherche.

LA CONNAISSANCE ET LA CULTURE SCIENTIFIQUE AU CŒUR DES RAPPORTS ENTRE LA SCIENCE ET LA SOCIÉTÉ

La Mission d'Animation des Agrobiosciences (MAA), créée dans le cadre du Contrat de Plan État-Région Midi-Pyrénées 2000-2006, a pour vocation, au plan régional et national, de favoriser l'information, les échanges et le débat entre la science et la société. Elle est à l'initiative de l'Université des Lycéens : une série de rencontres visant à rapprocher les chercheurs, les professionnels, les lycéens et leurs enseignants. Cette démarche destinée aux lycéens de Midi-Pyrénées et qui devrait à terme être transposée dans d'autres régions de France, voire d'Europe, est réalisée en partenariat avec : l'Académie de Tou-

louse, le centre régional de documentation pédagogique, le comité national des programmes et le cercle Pierre de Fermat.

UNE INITIATIVE POUR SENSIBILISER LES JEUNES À LA CULTURE SCIENTIFIQUE

Les principaux objectifs de l'Université des Lycéens sont :

- Inscrire les sciences, les technologies et les techniques dans la culture générale afin de permettre aux jeunes de se forger un esprit critique,
- Redonner du sens aux savoirs scientifiques en montrant les passerelles existant entre les disciplines, les relations entre la science et le contexte socio-économique et culturel, ainsi que les liens entre les savoirs et les métiers,
- Incarner la science à travers l'exemple du parcours de scientifiques venus à la rencontre des élèves pour « raconter » la science et dialoguer.

UNE QUESTION, UNE DISCIPLINE, UNE TRAJECTOIRE

- La découverte d'une discipline scientifique : chaque séance, animée par l'équipe de la MAA, fait intervenir un chercheur, le conférencier principal, qui explore un champ scientifique à travers sa trajectoire individuelle, mais aussi à travers l'histoire collective de sa discipline : les grands enjeux, les questionnements, les perspectives.
- La confrontation des approches et l'interdisciplinarité : en contrepoint du conférencier principal, un intervenant de discipline ou de secteur professionnel apporte son point de vue et réagit aux propos du chercheur.
- Un dialogue avec les lycéens : à l'issue de ces exposés, une heure est consacrée au débat entre les lycéens et les intervenants.

UN ACCOMPAGNEMENT PÉDAGOGIQUE DES CLASSES

- L'édition d'un dossier préparatoire permet aux enseignants de préparer le débat en amont : listes des ressources documentaires, biographies des intervenants, principaux points de repères sur les sujets...
- La diffusion du contenu des séances est assurée par la mise en ligne sur les sites de la MAA www.agrobiosciences.org et de ses partenaires, ainsi que par la diffusion d'un document écrit.

UNE ÉVALUATION DES SÉANCES

La mise en place et la validation d'un protocole d'évaluation sont assurées par des chercheurs de l'équipe de recherche en didactique des sciences, à l'École Nationale de Formation Agronomique, auprès des lycéens : recueil de leurs réactions, appréhension des évolutions de leur opinion et de leur appropriation des connaissances.



LE SUJET

POURQUOI ET COMMENT PRÉVOIR LES CHANGEMENTS DU CLIMAT ?

La planète a toujours connu des changements climatiques, alternant des périodes de glaciation et des périodes chaudes. Grâce aux avancées des connaissances et des technologies, l'homme peut ainsi aujourd'hui retrouver l'histoire des climats les plus anciens, remontant à des milliers d'années. Mais il peut aussi prévoir les évolutions à venir. Un point important à l'heure où la planète semble vivre l'un des changements climatiques les plus rapides depuis 400 000 ans. Or quelques degrés de plus au niveau des températures ont de nombreuses conséquences : élévation du niveau des océans et des mers, modification du régime des pluies, bouleversements écologiques... Ainsi, déjà, certains végétaux croissent plus vite (notamment les arbres, stimulés par le CO₂), des floraisons sont plus précoces, des rendements augmentent, la composition de certaines plantes se transforme, des maladies et des ravageurs se déploient sur des zones géographiques plus grandes... Certaines de ces conséquences sont donc positives pour l'agriculture ou pour la forêt, d'autres sont négatives. Quoi qu'il en soit, elles impliquent un changement de paysage et la transformation des pratiques agricoles (par exemple, le calendrier des cultures).

SANS PHYSICIENS, PAS DE PRÉVISION CLIMATIQUE

Les physiciens ont des compétences indispensables pour mieux comprendre le fonctionnement global du système climatique terrestre et son évolution possible : leur rôle consiste à mesurer toutes les rela-

tions entre l'activité de l'atmosphère, de l'océan, de la glace et de la biosphère. Ils prennent en compte tous les éléments tels que les températures, les vents, les courants, les conséquences de l'effet de serre, pour décrire différents scénarios possibles de changements du climat sur 50 ou 100 ans. Les données qu'ils utilisent mêlent des mesures recueillies par les satellites et des données calculées par des logiciels de simulation et de modélisation.

QU'EST-CE QUE L'EFFET DE SERRE ?

C'est un phénomène naturel lié à la couche atmosphérique de la Terre, qui agit comme les parois d'une serre : quand il n'y a pas de nuages, elle laisse passer les rayons du soleil, mais elle retient la chaleur accumulée : les gaz qu'elle contient (notamment la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, CO₂) piègent en effet une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et la renvoient vers cette dernière au lieu de la laisser passer dans l'espace.

Sans cet effet de serre, la Terre aurait une température moyenne de - 18 °C ! Cependant, les activités humaines amplifient ce phénomène, en augmentant les émissions de gaz absorbant les rayonnements infrarouges.

MÉTÉO FRANCE

Cet établissement public a pour mission de surveiller l'atmosphère, l'océan et le manteau neigeux, d'en prévoir les évolutions et de diffuser les informations correspondantes. Mais il a également d'autres rôles : alerter les autorités en matière de sécurité météorologique, prévenir les risques majeurs, opérer des expertises, mener des recherches, former les personnels à travers l'École Nationale de Météorologie, située à Toulouse. Météo France rassemble 3 700 salariés permanents, répartis entre le siège parisien et de nombreux sites en France et dans les Dom-Tom. Outre l'École, Toulouse accueille également le Centre National de Recherches Météorologiques.

LA CONFÉRENCE

QUEL CLIMAT FERA-T-IL DEMAIN ?

C'est un véritable voyage dans le temps que propose Jean-Claude André : le temps qu'il a fait dans le passé, en remontant jusqu'à la préhistoire, et le temps à venir, d'ici la fin du XXI^e siècle. Une promenade qui, d'abord, apprend à différencier la météorologie et le climat. Et qui, ensuite, s'attarde sur le fameux effet de serre : contrairement aux idées reçues, celui-ci est d'abord un phénomène naturel qui existe depuis des millénaires. Sans effet de serre, la planète serait glaciale. Mais trop d'effet de serre provoque une augmentation des températures et, de ce fait, un changement de climat. C'est ce qui se passe depuis 150 ans : jamais nous n'avons connu un tel réchauffement. Un coup de chaud qui a peu de chance de ralentir si l'homme ne change pas de comportement, y compris dans ses gestes quotidiens.

PRÉVOIR SUR 15 JOURS : LA MÉTÉOROLOGIE

« Je vais vous parler du climat que nous connaissons dans 30 à 50 ans. Mais avant, je souhaiterais vous expliquer la différence qui existe entre le climat et la météorologie, celle que vous entendez ou voyez quotidiennement à la radio, à la télé ou dans le journal.

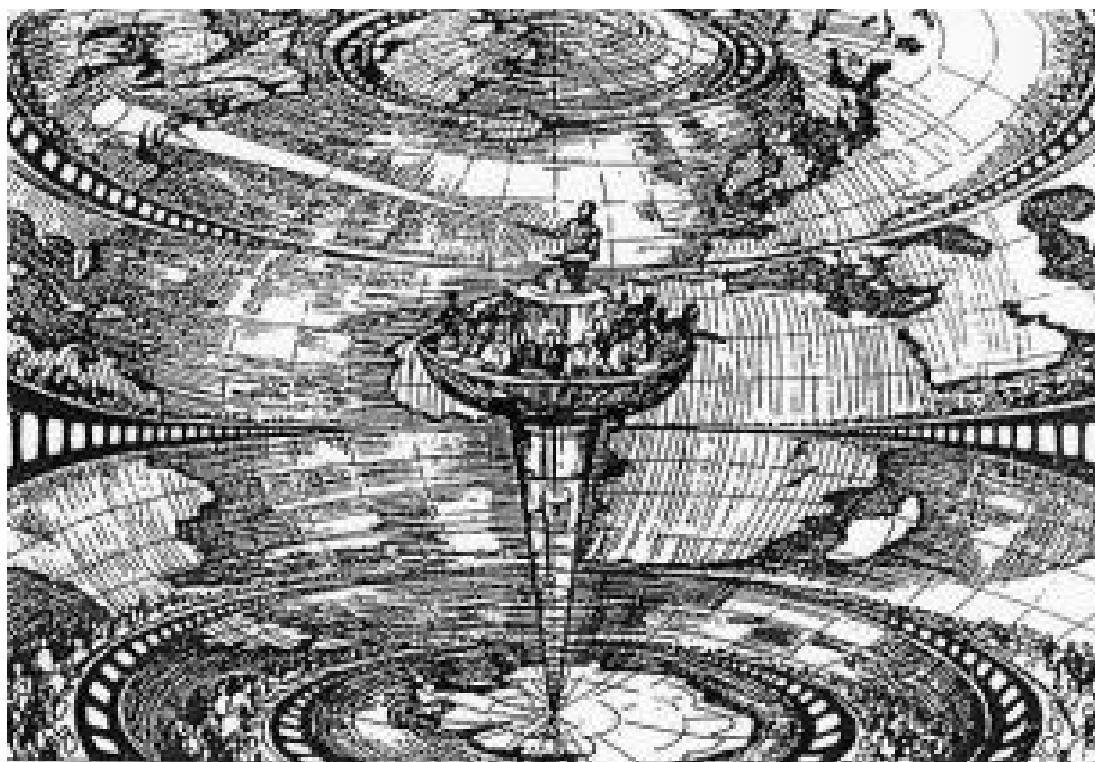
La météorologie indique le temps qu'il fera à court terme, dans un endroit précis. Cette science n'est pas si ancienne, d'ailleurs. Car il fallait d'abord comprendre que ce qui se passe dans l'atmosphère répond à des lois précises. A l'origine, c'est un astro-



JEAN-CLAUDE ANDRÉ : EXPERT EN CHANGEMENTS CLIMATIQUES...

Ingénieur de l'Ecole Polytechnique, mais aussi météorologue et physicien, Jean-Claude André dirige le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). Membre de conseils scientifiques prestigieux (ceux de la Défense, d'Electricité de France, de l'Institut Géographique National, du Centre National de Recherche Technologique « Aéronautique et Espace »), il préside le programme « Gestion et impacts du changement climatique ». Il a reçu de nombreux prix et médailles pour ses travaux de recherche, qui concernent le climat, l'océan et l'atmosphère, dont il étudie les relations complexes en mettant au point des modélisations numériques.

nome français, Urbain Le Verrier, responsable de l'Observatoire de Paris au milieu du XIX^e siècle, qui eut une intuition déterminante, au moment de la guerre de Crimée. Au cours de ce conflit contre les Russes, une gigantesque tempête dans la Mer Noire anéantit la flotte française, en 1854, causant le naufrage d'une quarantaine de vaisseaux. Or cette même tempête avait auparavant balayé l'Europe de l'Ouest. La conviction de Urbain Le Verrier est alors faite : si on avait eu des informations à temps sur l'existence de cette tempête et la direction qu'elle avait prise, on aurait pu éviter le naufrage. Il se met alors à organiser, pour la première fois, l'échange de informations météorologiques entre les observatoires des pays européens. C'est, en quelque sorte, le point de départ des services météorologiques. Quelques années plus tard, un autre pionnier inventa, bien avant l'ère des ordinateurs, le calcul numérique.



Il s'agit du physicien anglais Richardson, en 1923. Son rêve ? Faire une météorologie mondiale, et, pour cela, quadriller la surface de la Terre en petits cubes, puis placer dans chacun d'eux des hommes chargés de relever les températures et l'humidité. Il ne resterait plus alors qu'à envoyer toutes ces mesures dans une immense rotonde représentant la terre en miniature... Un raisonnement et une méthode qui sont exactement ceux employés aujourd'hui, mais où les milliers d'hommes sont remplacés par la puissance de super-ordinateurs ! Car ce sont des centaines de millions d'observations venues du monde entier qui arrivent chaque jour à Toulouse, en moins d'une heure, pour que Météo France établisse ses prévisions.

L'EFFET PAPILLON

Ces prévisions vont de plus en plus loin : alors qu'elles ne pouvaient aller au-delà de deux jours il y a une vingtaine d'années, elles sont aujourd'hui établies pour des échéances atteignant pratiquement 10 jours à venir. Mais il est impossible de prévoir la météo au-delà, en raison de ce qu'on appelle l'effet papillon. Vous connaissez peut-être cette histoire selon laquelle un battement d'aile de papillon à Paris peut provoquer quelques semaines plus tard une tempête sur New-York. Cette image nous vient du météorologue E. Lorenz. Dans les années soixante, ce dernier s'est aperçu qu'il était impossible de prévoir ce qui peut se passer dans l'atmosphère au-delà de 15 jours, car les calculs comportaient trop d'inconnues. Or l'atmosphère

Une rotonde imaginée par Richardson

une mappemonde quadrillée, où des milliers d'hommes inscrivent les mesures reçues du monde entier.

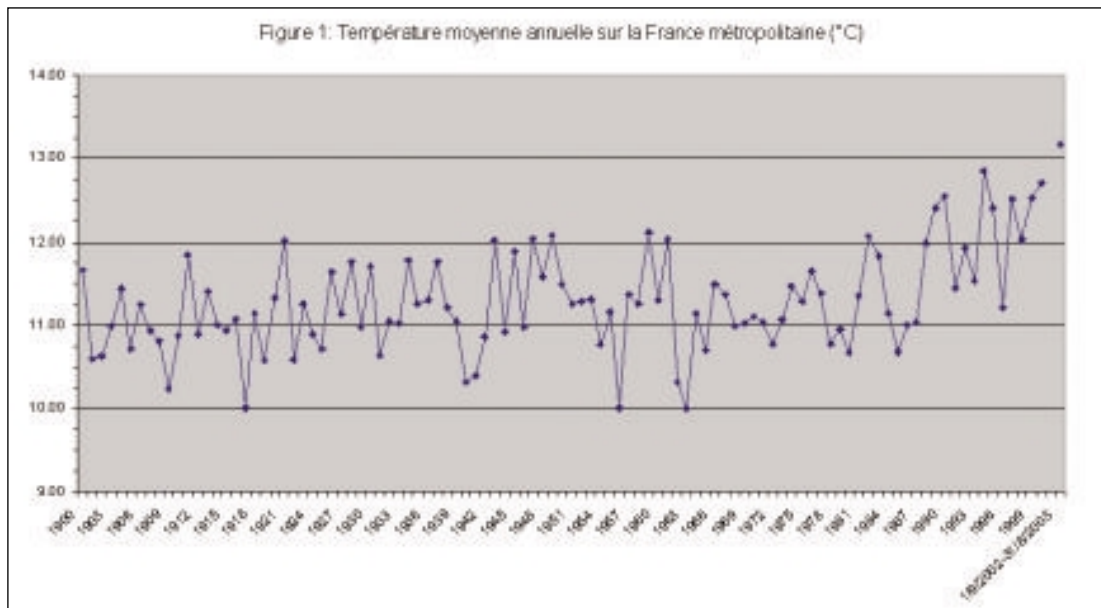
Au milieu, une sorte de chef d'orchestre éclaire les endroits où doivent se faire les calculs.

est si sensible que le moindre battement d'aile de papillon en un point de la terre suffirait à la perturber, jusqu'à aboutir, en s'amplifiant au fil des jours, à une véritable tornade à l'autre bout du monde.

Je vais vous en donner un exemple concret grâce à une expérience que nous avons réalisée.

Imaginez qu'il y ait deux Terres et que nous étudions leur météorologie. Entre les deux Terres, tout est strictement identique, sauf la température à Bordeaux, qui a un centième de degré de différence. Vous allez me dire : franchement, un centième de degré de différence à Bordeaux ne peut pas créer de perturbations ! Eh bien, nous avons vérifié. Le premier jour, il n'y a absolument aucune différence. Le surlendemain, vous distinguez à peine une très légère différence. Au bout de cinq jours, vous commencez à apercevoir quelques différences plus nettes. Et puis on continue... Au bout de huit jours, les deux météorologies n'ont plus beaucoup de rapports entre elles, et peu à peu, deviennent totalement différentes.

La météorologie, vous le voyez, supporte très mal les petites imprécisions, car celles-ci finissent par rendre le calcul complètement aléatoire.



LE TEMPS SUR DES SIÈCLES : LA CLIMATOLOGIE

On ne peut pas prévoir la météorologie précise au-delà de 15 jours, et pourtant, on peut prédire des tendances à très long terme. Car au-delà de la météorologie, il y a le climat, qui est en fait la moyenne du temps météorologique : par exemple, la moyenne des températures sur une saison, une année, une décennie... Nous autres climatologues faisons en général ces moyennes sur trente ans, que nous mettons bout à bout pour mettre en évidence des évolutions à l'échelle du siècle. Ce qui a permis de montrer clairement, par exemple en France, que les températures augmentent depuis une trentaine d'années, révélant un changement climatique.

Le changement climatique est dû en grande partie à l'effet de serre. Mais il convient de rappeler brièvement ce qu'est ce fameux effet de serre.

La Terre reçoit sa chaleur du soleil, mais si elle n'avait aucun moyen de se refroidir, il y ferait excessivement chaud. Il faut donc qu'il y ait un mécanisme qui renvoie la chaleur : la Terre ré-émet son énergie vers l'espace et un équilibre s'établit entre la chaleur qu'elle reçoit et celle qu'elle renvoie. S'il n'y avait aucun effet de serre, la température d'équilibre de la planète serait de -18°C ! Toute l'eau serait à l'état de glace et il n'y aurait probablement pas de vie sur Terre. Ce n'est pas le cas, tout simplement parce que l'atmosphère entourant la terre contient des gaz dits à effet de serre - tels que la vapeur d'eau et le gaz carbonique - qui ralentissent la ré-émission de la chaleur de la Terre vers le Soleil. Ils filtrent cette perte d'énergie. Grâce à cet effet de serre naturel, la température d'équilibre de la Terre est de 15°C . C'est donc l'effet de serre qui rend la vie possible sur Terre.

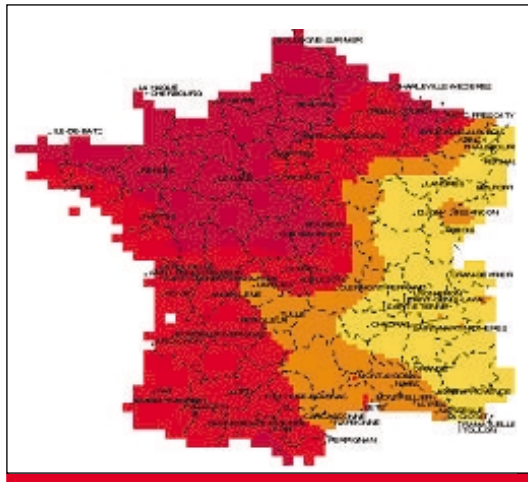
En France, un degré de plus en un siècle.

La température moyenne sur la France, année après année, de 1900 à 2003, est passée depuis une trentaine d'années de 11° à 12°C .

LA PLANÈTE SE RÉCHAUFFE

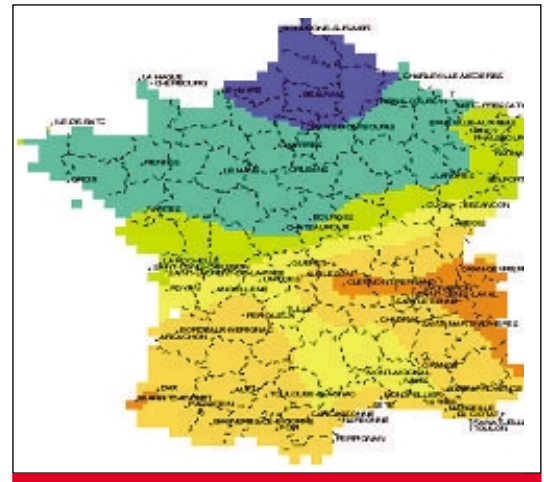
En revanche, ce qui nous préoccupe, c'est lorsqu'on change l'intensité de cet effet de serre naturel, car on risque ainsi de nuire à l'équilibre de la planète. C'est là ce qu'on appelle « l'effet de serre additionnel » qui peut poser problème : en rajoutant des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, on dépasse les quantités naturelles. La ré-émission de l'énergie solaire est alors davantage freinée et les températures augmentent.

Pour mieux comprendre ce phénomène, il est utile d'étudier les climats du passé, 200 000 ou 300 000 ans en arrière, ce qui permet de distinguer les périodes glaciaires et les périodes inter-glaciaires, plus chaudes en moyenne de 6 à 8°C . Si nous mettons en parallèle les températures et les taux de gaz à effet de serre, nous voyons immédiatement que les deux courbes sont quasiment identiques : ce sont les gaz à effet de serre qui sont la principale cause des périodes de réchauffement ou de refroidissement. Il est possible de mesurer ces moyennes sur l'ensemble de la planète et donc de dessiner le climat mondial. Si nous retraçons la moyenne des températures de l'hémisphère nord, depuis le Moyen-Âge (an 1000) jusqu'à nos jours, jusqu'au milieu du XX^{e} siècle, les variations sont peu marquées : le climat reste relativement stable, avec des moyennes sur 30 ans qui, les unes après les autres, se situent à peu près sur la même ligne. En revanche, depuis 1950, les températures augmentent année après année. Le climat a donc bougé.



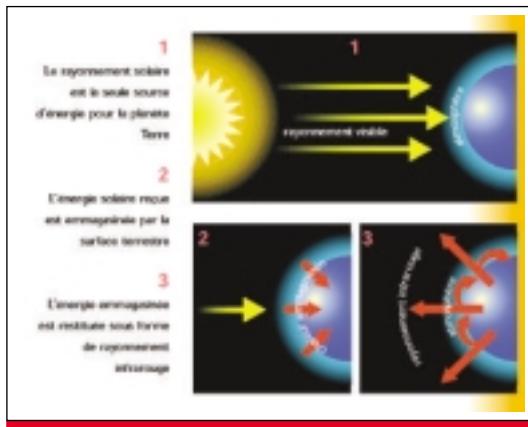
© Météo France

Des températures minimales... moins froides.
 La carte ci-dessus retrace la température minimale journalière en 2000 par rapport à ce qu'elle était en 1901. Plus on va vers le rouge, plus la température minimale en 2000 est élevée par rapport à celle de 1900. C'est principalement dans la partie Ouest de la France que les températures minimales quotidiennes ont augmenté par rapport au début du siècle : elles sont environ plus chaudes de 2 °C.



Des températures maximales plus chaudes.
 Cette deuxième carte retrace la même chose pour les températures maximales. Au nord, il n'y a guère de changement par rapport à 1900. Au centre, on note un petit réchauffement de deux dixièmes de degré. Dans la moitié sud, les températures maximales ont augmenté de près de 1 °C depuis 1901.

L'effet de serre : un phénomène naturel !



© Météo France

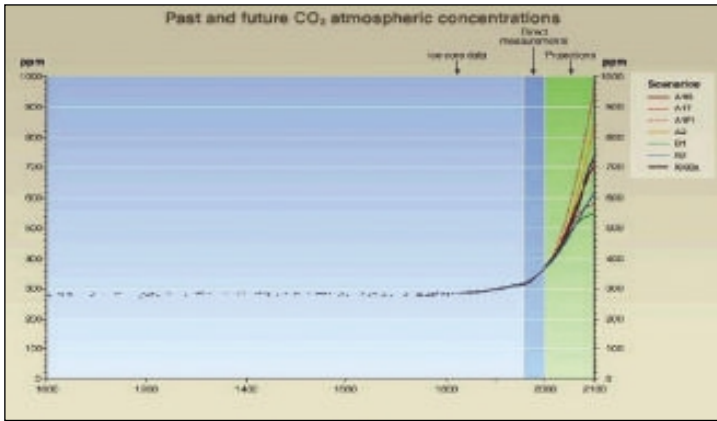
UNE AUGMENTATION SANS PRÉCÉDENT DES GAZ À EFFET DE SERRE

Alors que l'effet de serre naturel a toujours connu, malgré tout, de faibles variations, l'homme envoie actuellement dans l'atmosphère des quantités de gaz beaucoup plus importantes. C'est ce que montre la courbe de la teneur en gaz carbonique dans l'atmosphère depuis l'an Mille, caractéristique des ères interglaciaires. Au lieu de rester dans les limites naturelles, cette courbe s'élève de façon très nette à partir du milieu du XIX^E SIÈCLE, époque à laquelle l'homme, par ses activités industrielles, a envoyé

un grand nombre de gaz dans l'atmosphère. Si on se projette dans le futur, et quelles que soient les hypothèses qu'illustrent les différentes courbes au-delà de 2000, les gaz à effet de serre continuent d'augmenter comme jamais ils ne l'avaient fait dans notre histoire.

DEMAIN : UN DÉSÉQUILIBRE AGGRAVÉ

Pour savoir ce qu'il va se passer, il faut prendre en compte un certain nombre de phénomènes qui entrent en jeu dans le climat : l'océan, la banquise, les calottes glaciaires, les rivières et les lacs, les continents, les forêts, le volcanisme, l'atmosphère, les activités humaines génératrices de gaz à effet de serre... Toutes ces informations sont intégrées dans un modèle de prévision climatique qui calcule l'évolution du climat. Et pour l'heure, la courbe montre que l'augmentation de la température va continuer : pour l'ensemble de la planète, elle pourrait atteindre 3 °C de plus en 2 100 par rapport au milieu du 20^e siècle. Les conséquences ne sont pas négligeables : quelques degrés de plus perturbent le rythme des pluies, pouvant générer selon les saisons une multiplication des inondations et des périodes de sécheresse. Ainsi, nous avons prévu qu'en France, à la fin du 21^e siècle, l'hiver devrait être plus pluvieux, et l'été, principalement dans la moitié sud, pourrait connaître un réchauffement de 3 à 4 °C. Plus spectaculaire encore, à l'échelle de la planète, quelques degrés supplémentaires suffisent à faire reculer les glaciers et la neige, sans oublier la banquise arctique qui, du côté du pôle nord, diminue déjà et sera peut-être amenée à disparaître. Résul-



© IPCC

La croissance des gaz à effet de serre.

En ordonnée, les taux de dioxyde de carbone : ppm signifiant « partie par million », soit le nombre de molécules de gaz carbonique sur un million de molécules d'air. En abscisse, la courbe part de l'an 1000 et est projetée jusqu'en 2100.

LES GAZ À EFFET DE SERRE

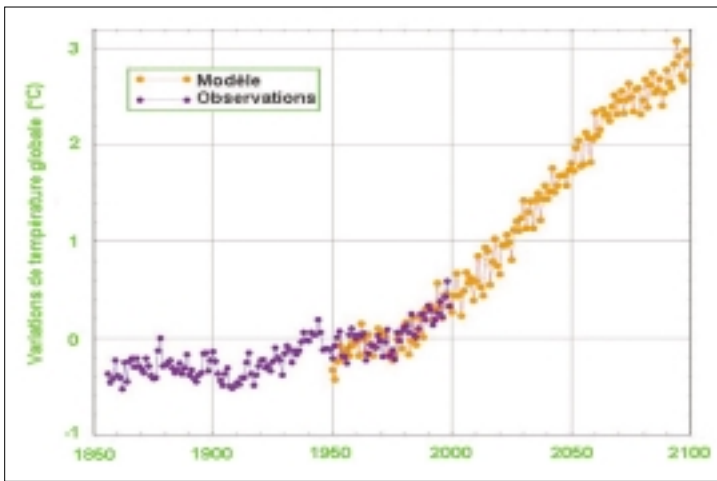
Les deux principaux gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau et, surtout, le dioxyde de carbone (CO2), qui existent à l'état naturel. On émet principalement du dioxyde de carbone quand on brûle du pétrole, du charbon ou des forêts, car on libère ainsi le gaz carbonique qu'ils renfermaient.

Bien d'autres gaz ont le même effet absorbant, permettant de retenir la chaleur accumulée sur la terre, mais ils sont présents en moindre quantité.

Citons, d'abord, par ordre d'importance, le protoxyde d'azote (N2O), dont l'augmentation est due principalement à l'utilisation d'engrais par l'agriculture.

Puis vient le méthane (CH4), qui s'échappe des décharges, des mines de charbon, des rizières, mais aussi... des gaz et des rots des ruminants ! Enfin, viennent les gaz fluorés :

perfluorocarbones (PFC), hydrofluorocarbones (HFC) et hexafluorure de soufre (SF6). Ceux-ci sont dégagés par les bombes aérosols, les systèmes de climatisation, ou encore lors de la fabrication des mousses plastiques, de composants d'ordinateurs et d'aluminium.



© Météo France

La température de la terre dans 100 ans.

Les points violets retracent le temps passé : la température moyenne de la terre entre 1850 et aujourd'hui. Les points orange indiquent le modèle de prévision climatique.

tat : une montée du niveau des océans et des mers, due à la fois à la fonte des glaciers et à la dilatation de l'eau de mer par la chaleur. En clair, si la température moyenne de la Terre augmente de 1 °C, le niveau moyen des océans augmentera de 10 cm par effet de dilatation et fonte des glaciers. Dans les régions où la température augmentera de 3 à 4 °C, les océans pourraient donc s'élever de 30 à 40 cm...

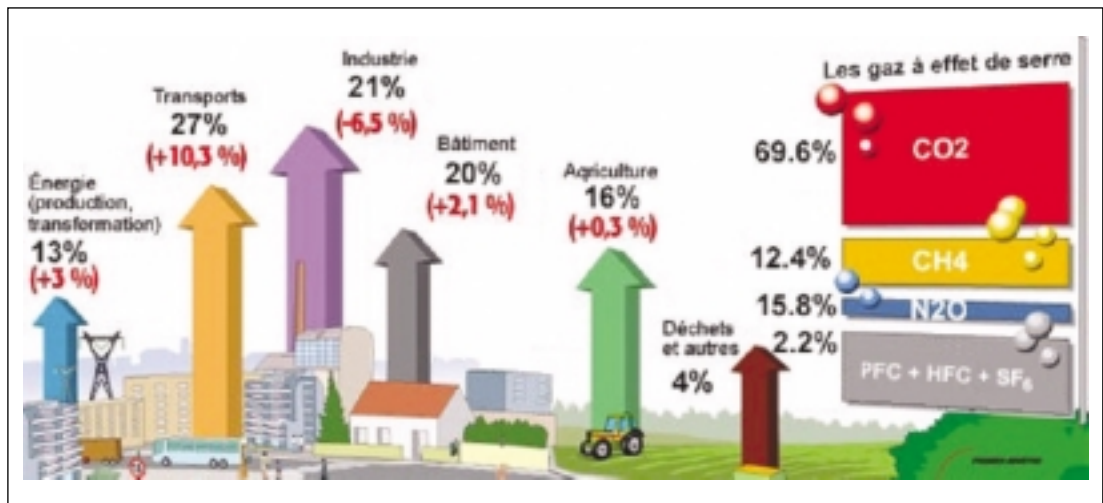
QUI SONT LES COUPABLES ?

Reste une inconnue : si nous n'avons plus de doute scientifique sur le réchauffement, nous ne savons pas encore s'il sera de 1 °C ou s'il peut aller jusqu'à

5 ou 6 °C. Nous faisons donc des prévisions en maintenant plusieurs hypothèses différentes sur les quantités de gaz à effet de serre. En fait, tout dépend du changement ou non de nos habitudes de vie...

Car en l'occurrence, s'il faut réduire les gaz à effet de serre, il convient d'abord de savoir qui en envoie le plus. Au niveau de la planète, c'est l'Amérique du Nord qui jusque-là est le principal fautif. Viennent ensuite les Européens, la Russie et l'Europe de l'Est. Bref, il s'agit principalement des pays riches, fortement industrialisés et qui gaspillent plus ou moins l'énergie.

Mais si l'on se projette dans le futur, les choses changent : les pays riches devraient un peu moins émettre de gaz à effet de serre. A l'inverse, les pays pauvres devraient se développer économiquement et donc consommer plus d'énergie. C'est le cas de la Chine et de l'Inde notamment, qui ont d'importantes réserves de charbon. D'où la difficulté des discussions climatiques : comment s'organiser pour réguler le climat à l'échelle de la planète ? Les pays en développement accusent légitimement les pays riches d'être responsables depuis des années de la situation actuelle. Tandis que les pays riches disent qu'ils font désormais des efforts et que les fautifs de demain seront les pays en développement...

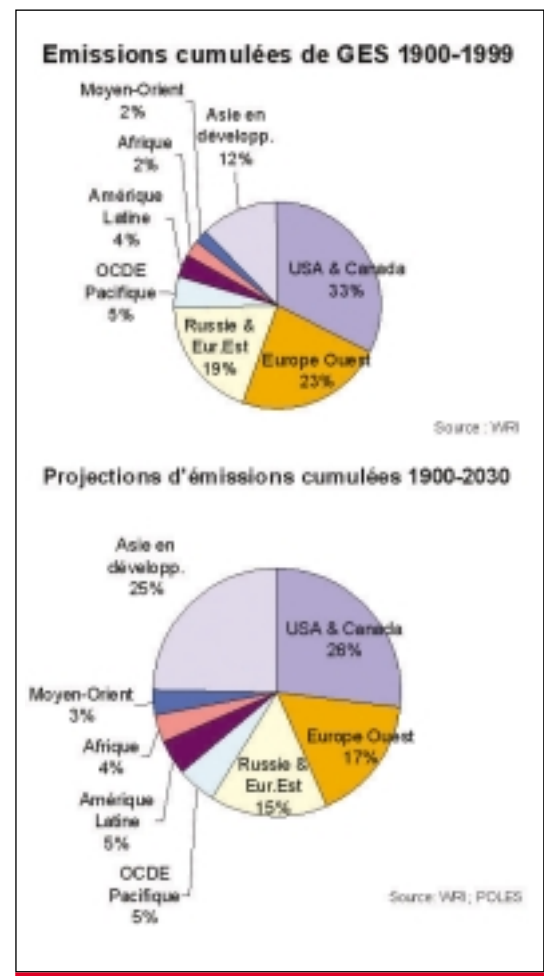


© MIES

TOUS RESPONSABLES...

En fait, nous avons tous un peu notre part de responsabilité. Pour mieux s'en convaincre, il suffit de regarder quelles sont les sources des gaz à effet de serre, non plus par pays, mais par activité. Là, d'autres surprises nous attendent. Car on accuse souvent les industries -il est vrai qu'elle est la source de 21 % des gaz à effet de serre- mais celles-ci font des efforts qui commencent à se faire sentir. Elles sont d'ailleurs à peu près au même niveau que l'agriculture et le bâtiment (chauffage, climatisation...). En fait, les principaux émetteurs de gaz, ce sont les transports, en forte augmentation... Voilà la menace la plus importante et, en même temps, la plus difficile à contrôler. Car les transports, c'est vous et moi, tous les jours... A nous d'être capables ou non de diminuer ces chiffres pour réduire l'ampleur d'un réchauffement qui reste inéluctable et auquel il faut aujourd'hui se préparer ».

Gaz à effet de serre : les pays fautifs



© Météo France



EMMANUEL CLOPPET

C'est notamment grâce à sa double formation - il est à la fois diplômé de l'Ecole Nationale de la Météorologie et de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon - que Emmanuel Cloppet, âgé de 25 ans seulement, est actuellement responsable de la division Agrométéorologie, au sein de Météo France ; au cours de ses études, il s'est largement spécialisé dans l'étude des écosystèmes et l'impact du climat, notamment au niveau des forêts. A Météo France, son équipe mène des études à la demande d'instituts de recherche agronomique ou du ministère de l'Agriculture. Emmanuel Cloppet est membre de l'Organisation Mondiale de la Météorologie.

LE POINT DE VUE DE L'AGRONOME

« QUEL EST L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'AGRICULTURE ? »

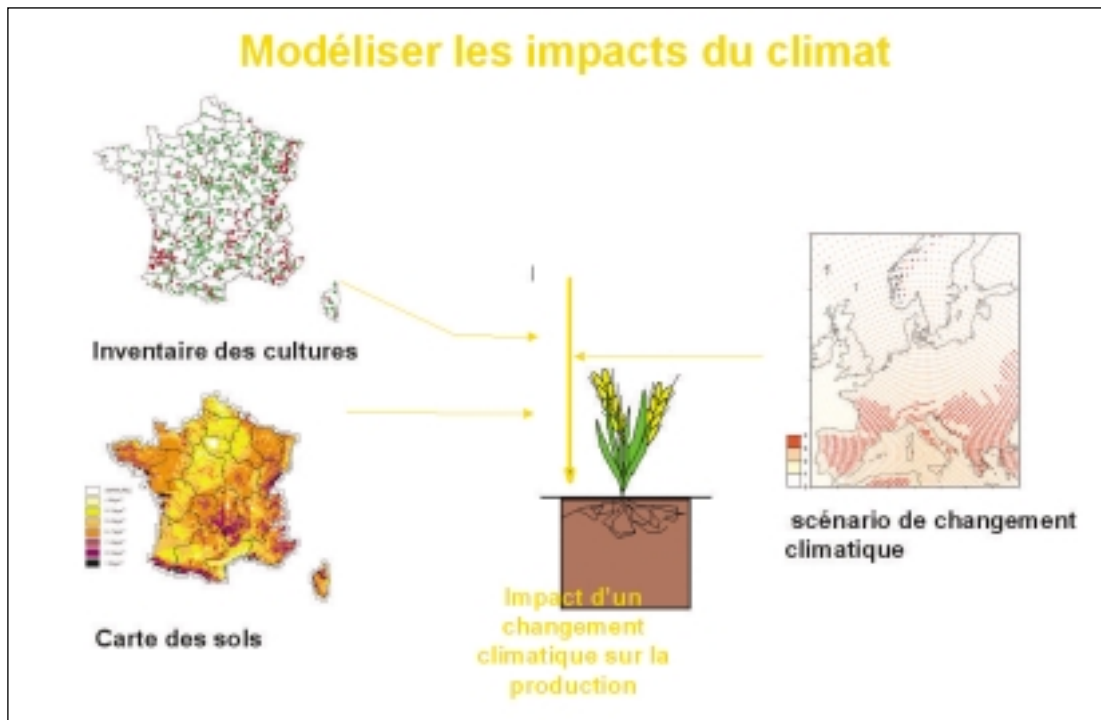
Quelques degrés de plus et quelques millimètres de pluie en moins peuvent, en quelques décennies, bouleverser nos paysages et nos agricultures : si certains pays pourraient bénéficier de ce réchauffement, voyant même leurs productions agricoles augmenter, d'autres risquent de voir décliner leurs cultures, essentielles à leur alimentation. Des espèces végétales pourraient également se déplacer progressivement, notamment du sud vers le nord. Sans oublier l'extension géographique de ravageurs et nuisibles des arbres, à la faveur d'un climat plus doux. A la fois agronome et météorologue, Emmanuel Cloppet fait le point sur les recherches que mène son équipe pour mieux cerner toutes les conséquences du réchauffement sur les plantes et l'agriculture.

« Un changement climatique affectera tous les êtres vivants sur terre. Or, quand on sait que 40 % de la surface de la terre est couverte par des forêts et des surfaces agricoles, on mesure à quel point cela peut changer l'aspect de notre planète, bouleverser l'agriculture et donc l'alimentation. Sachant que 800 millions d'habitants dans le monde souffrent encore aujourd'hui de la faim, vous comprenez immédiatement les conséquences désastreuses s'il y avait un accroissement des sécheresses. Etudier les effets du changement climatique sur l'agriculture est absolument nécessaire pour essayer de prévenir ou de limiter les impacts négatifs, en proposant par exemple de nouvelles manières de cultiver ou des plantes plus adaptées.

DES CONSÉQUENCES NÉGATIVES... ET D'AUTRES POSITIVES.

Comment prévoir la manière dont les plantes vont réagir au changement climatique, si elles vont pousser mieux ou moins bien ? Nous partons du principe, comme l'a dit Jean-Claude André, que nous aurons un climat globalement plus chaud, avec des étés probablement plus secs et une augmentation du taux de dioxyde de carbone. Les conséquences ne sont d'ailleurs pas toutes négatives : plus de gaz carbonique permet d'augmenter la photosynthèse et d'obtenir une croissance plus rapide des plantes. De même, la douceur du climat fait que la floraison est plus précoce, comme nous le constatons depuis plusieurs années. Mais il y aura aussi des effets négatifs : on a vu au cours de l'été 2003 que les prairies ont littéralement grillé en raison des chaleurs caniculaires et du manque d'eau. Sans aller forcément jusque là, il est certain que des températures trop élevées et un stress hydrique accru font baisser les rendements et donc les récoltes.

C'est pourquoi, pour y voir plus clair, il faut passer par des modèles de culture : il s'agit de dresser d'abord un inventaire des cultures en France, puis d'ajouter une carte des sols qui permettent de définir s'ils retiennent plus ou moins l'eau, s'ils sont plus ou moins riches en azote etc. Enfin, s'y ajoutent les différents scénarios du changement climatique à venir. Tous ces paramètres, entrés dans un modèle, per-



mettent d'avoir une estimation de la production végétale dans 50 ans.

Je voudrais toutefois signaler les incertitudes qui pèsent encore sur ces estimations et le regard critique qu'il faut garder. D'abord, quand on fait une expérience scientifique et qu'on fait varier un paramètre - là, le climat - le principe est de garder tous les autres paramètres constants : une même culture, au même endroit... Or, c'est un peu irréaliste car d'abord, on sait que l'agriculteur peut changer de variétés d'une année sur l'autre, ou les déplacer d'un champ à l'autre. Ensuite, cela ne prend pas en compte les éventuels progrès techniques qui peuvent être mis au point dans les années à venir. Il faut donc être humble : nous ne faisons que des hypothèses. Enfin, il faut être conscient que l'économie peut également peser sur le choix des cultures : la Politique Agricole Commune, par exemple, selon les aides qu'elle accorde ou non est un facteur essentiel sur les productions que les agriculteurs décident de faire ou non.

Dernière précision : il est important de distinguer ce qu'on appelle les cultures annuelles, (récoltées tous les ans) et les cultures pérennes, dont la durée de vie est supérieure à l'année (les arbres fruitiers, les forêts...), car l'impact du changement climatique n'est pas le même. Face à un changement climatique, on peut déplacer les cultures annuelles, ou planter l'année suivante d'autres variétés, par exemple plus résistantes à la sécheresse. En revanche pour les cultures pérennes, comme la vigne ou les forêts, c'est le végétal qui devra s'adapter aux nouvelles conditions climatiques.

CE SONT LES PAYS LES PLUS PAUVRES, EN MILIEU TROPICAL, QUI PERDRONT LE PLUS

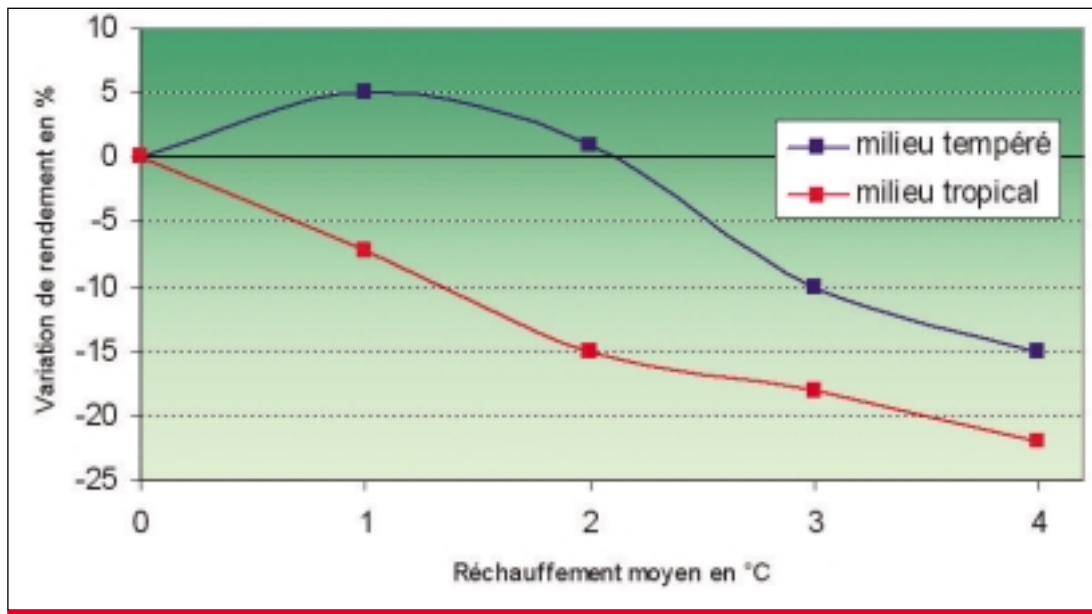
Voyons à présent les résultats que nous avons obtenus, notamment pour les trois espèces les plus cultivées au monde, le maïs, le blé et le riz. De nombreuses études sont actuellement menées pour étudier la modification des rendements en fonction du changement climatique.

Globalement, ces études montrent que la tendance est à la baisse du rendement, mais avec de très grandes différences entre les espèces et entre les régions du monde. Ainsi, les résultats sont globalement beaucoup plus négatifs pour le blé que pour le maïs, mais avec de fortes distinctions selon les pays : la Mongolie et l'Egypte verraient leurs rendements de blé baisser alors qu'ils augmenteraient en Australie. Enfin, il y a une énorme variabilité selon les hypothèses climatiques, pour une même culture et dans un même pays. J'évoquais la Mongolie : la baisse de ses rendements va de -30 % à -70 %. La fourchette est donc très large, car les incertitudes sont encore grandes.

Il n'empêche que certaines tendances ne font aucun doute. Ainsi, nous avons étudié la variation du rendement du maïs en fonction de plusieurs hypothèses climatiques qui vont d'un réchauffement nul, à un réchauffement de 4 °C. Et, surtout, nous avons distingué les milieux tempérés et les milieux tropicaux.

Le constat est très net : le milieu tropical et le milieu tempéré ne sont pas du tout égaux entre eux. Dans

Tendance du rendement du maïs en fonction du réchauffement.



un climat tempéré, un réchauffement de 1 °C fait monter les rendements et un réchauffement de 2 °C ne pose pas encore de problème. Alors que dans un climat tropical, les rendements baissent immédiatement, dès le 1 °C de réchauffement. Ce qui signifie qu'en cas d'augmentation des températures, il y aura des pays gagnants et des pays perdants.

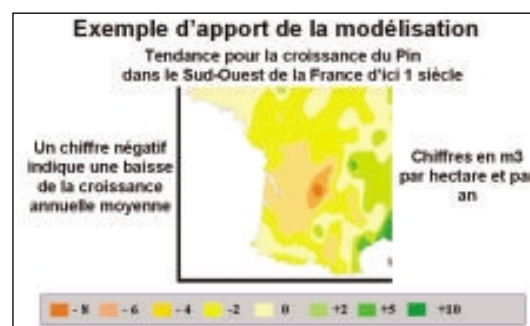
LA RECHERCHE AGRONOMIQUE PEUT AIDER LES PLANTES À RÉSISTER AU RÉCHAUFFEMENT

Cette situation pourrait cependant être modifiée par certains progrès techniques qui peuvent être faits dans les années à venir, à condition toutefois que les pays les plus touchés puissent y avoir accès. Un exemple : la recherche agronomique met au point actuellement de nouvelles variétés de plantes plus résistantes à la sécheresse. Nous avons ainsi comparé deux variétés de tabac : l'une est sauvage, donc non modifiée.

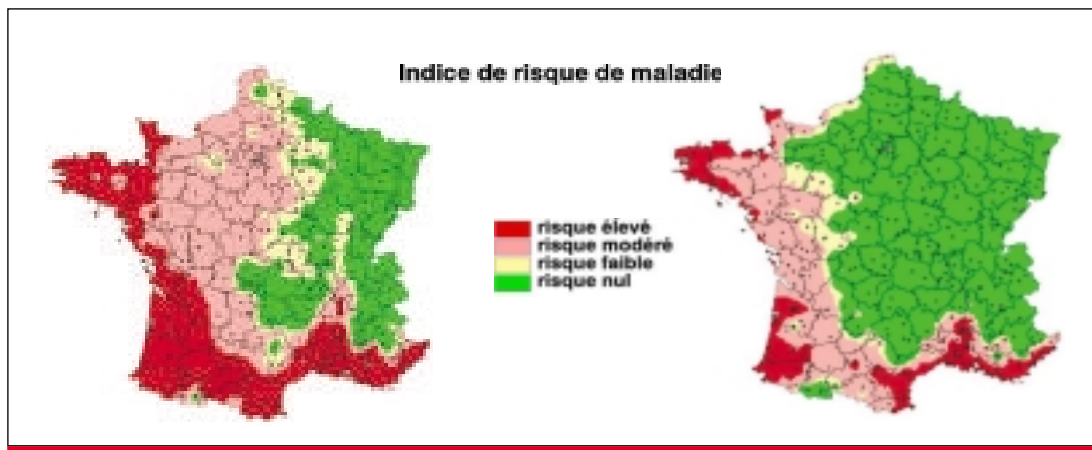
L'autre a été génétiquement modifiée : nous avons introduit dans son génome le gène d'une autre plante qui lui permet de mieux croître en cas d'augmentation des températures. Dès que la température augmente, on constate que la variété sauvage décline : elle ne s'adapte pas à ce nouvel environnement. Au contraire, la variété génétiquement modifiée augmente sa production lorsque le réchauffement est modéré et ne se met à décliner qu'à partir d'une température de 40 °C.

LES FORÊTS, LES FRUITIERS ET LA VIGNE : COMMENT VIVRONT-ILS LE RÉCHAUFFEMENT ?

Le changement climatique peut également avoir des répercussions sur les cultures pérennes que sont les arbres. La forêt, notamment, est en effet un écosystème à part, à cause de sa longévité : elle peut vivre une centaine d'années, voire beaucoup plus, ce qui signifie que nos forêts d'aujourd'hui connaîtront le réchauffement. C'est aussi un système qui connaît des relations étroites avec l'atmosphère et le climat, car les arbres pouvant fixer le gaz carbonique, ils jouent donc un rôle sur l'effet de serre. Il est donc absolument nécessaire de pouvoir anticiper leur réaction. Du côté positif, l'effet de serre additionnel, en augmentant les taux de dioxyde de carbone, stimulerait la croissance des arbres. Mais cela n'est pas si évident. Ainsi, nous pensions qu'un réchauffement stimulerait la croissance du pin. La carte ci-dessous démontre le contraire : sur cette image du quart sud-ouest de la France, qui intègre notamment les Landes, la production baisserait d'ici un siècle, jusqu'à -30 % dans la forêt des Landes.



Une maladie qui se propage



De même, un réchauffement climatique avance la floraison des arbres fruitiers et de la vigne. Nous le constatons déjà depuis plusieurs années : les vendanges, par exemple, ont lieu de plus en plus tôt. Mais cela peut comporter un risque : le moindre gel au printemps peut faire d'importants dégâts sur les bourgeons précoces, mais il existe d'autres conséquences.

Enfin, nous craignons une recrudescence des maladies et des parasites des arbres. Nous le constatons déjà, un réchauffement modifie les aires géographiques de certains ravageurs, tels que la chenille processionnaire du pin, qui s'étend à présent vers le Nord. De même, nous avons mené une étude climatique, en France, sur la maladie de l'encre qui touche le chêne. Ce parasite d'origine tropicale est très sensible au gel. Dans les régions froides, la maladie ne parvient donc pas à se développer. Mais, une hausse des températures fait progresser la maladie. La carte ci-dessus indique que la maladie de l'encre du chêne se développe aujourd'hui uniquement sur la Bretagne, le Pays basque et la côte méditerranéenne. La carte de droite présente l'extension de la maladie dans un siècle, au vu du réchauffement : les zones à risque augmentent, englobant notamment une bonne partie du sud-ouest.

HAUSSE DES TEMPÉRATURES = HAUSSE DES PRIX ?

Vous l'aurez compris : si certaines tendances sont claires, de grandes incertitudes existent encore pour réellement dessiner le paysage de demain. C'est pourquoi les recherches agronomiques et climatologiques tentent actuellement d'avancer dans les connaissances. Tout d'abord, nous cherchons à améliorer les modèles de culture, en recueillant plus d'informations sur les écosystèmes et les réactions des végétaux, ce qui nous aidera à mieux comprendre le fonctionnement présent pour mieux pré-

voir de quoi sera fait l'avenir. Ensuite, il est nécessaire d'intégrer le plus possible l'environnement économique de l'agriculture. Par exemple en déterminant l'évolution des prix mondiaux moyens des produits agricoles, en fonction des hausses de température. Dans un premier temps, lorsque le réchauffement de la planète est inférieur à 2 °C, les prix ont plutôt tendance à baisser, ce qui signifie généralement que la production augmente. Mais progressivement, au fur et au mesure que la température s'élève, les prix montent en raison de la baisse de la production. Le changement climatique a donc également des effets, non seulement sur les milieux naturels, occasionnant des bouleversements écologiques, mais aussi sur les marchés économiques. Pour prévoir tous ces effets, il faudra donc prendre en compte les aspects agronomiques, génétiques, économiques et politiques ».


**EMMANUEL CLOPPET
ET JEAN-CLAUDE ANDRÉ**

QUESTIONS ET RÉPONSES

DES RÉACTIONS À CHAUD !

La canicule de l'été dernier, les inondations à venir, l'énergie de demain, le manque d'eau douce, les politiques mises en place... Autant de questions concrètes que l'on est en droit de se poser ne serait-ce qu'en regardant la météo. Qu'est-ce qui est vrai, qu'est-ce qui est faux ? Que doit-on vraiment craindre et que peut-on faire ? Ce sont là les interrogations qui ont été exprimées par les lycéen(ne)s et les enseignant(e)s présents, à l'issue des deux conférences, qui ont permis d'obtenir des éclaircissements complémentaires des deux intervenants.

J'ai lu dans un journal que dans un siècle, Paris serait sous l'eau. C'est vrai ou pas ?

Jean-Claude André : « Je ne serai pas là dans un siècle mais, très honnêtement, je pense que ce n'est pas vrai. Car même si la température moyenne s'élevait de 6 °C, la montée des océans serait de 60 cm, or Paris est à une altitude moyenne de 50 mètres au-dessus du niveau de la mer ! Vous avez peut-être vu cette image où l'on voit le dernier étage de la tour Eiffel émerger seule au milieu d'un océan... Heureusement, ce n'est pas scientifique.

En revanche, d'autres régions pourraient être immergées, du moins être inondées de plus en plus fréquemment, comme la Camargue, le Delta du Gange et certains atolls du Pacifique, qui se situent au niveau de la mer ou à un mètre seulement au-dessus. »

Toutes les sources d'énergie créent un effet de serre, à l'exception du nucléaire. Est-ce la solution à tous les problèmes ?

Jean-Claude André : C'est une question difficile. Nous savons cependant que les réserves de pétrole s'épuiseront à partir de 2050. Au-delà, ce combustible se fera rare et nous le paierons de plus en plus cher. En revanche, il restera énormément de charbon. Nous pourrions donc imaginer qu'il remplace le pétrole, même s'il coûte un peu plus cher. Sauf que pour nous procurer la même énergie, il dégage encore plus de gaz à effet de serre que le pétrole... A l'horizon 2050, nous aurons ainsi une décision très importante à prendre : ou bien nous passons au charbon en augmentant l'effet de serre, ou bien nous mettons en place d'autres sources de production de l'énergie. Actuellement, les énergies dites renouvelables - les barrages hydrauliques, l'énergie solaire, l'énergie éolienne - représentent seulement 10 % de la totalité de l'énergie utilisée. La Commission Européenne fait des plans très volontaristes pour faire monter ce taux à 15 % dans dix ou quinze ans. Ce sont des technologies qui évoluent doucement et qui ne sont pas encore prêtes à remplacer le pétrole. En tout cas, ces énergies renouvelables ne seront pas suffisantes pour répondre à nos besoins en 2050. Si nous continuons à consommer autant d'énergie, il faudra donc faire un choix entre deux nuisances : soit le recours au charbon avec tous les problèmes d'effets de serre, soit le recours au nucléaire, avec les problèmes liés au stockage des déchets. Ce n'est pas facile.



Et le Diester, alors ? Des voitures roulent déjà avec cette source d'énergie qui est mélangée au gazole...

Jean-Claude André : Ce sont là effectivement des énergies également renouvelables : le carbone émis lorsqu'on transforme ces cultures est recapté au moment de la pousse suivante. Le problème, c'est qu'on ne parvient pas encore à développer ces technologies à l'échelle de la planète. C'est une source d'énergie d'appoint, qui n'est pas encore capable de remplacer le pétrole.

Vous avez beaucoup parlé de la France, j'aurais voulu savoir si vous aviez également des résultats sur l'influence des changements climatiques à l'échelle mondiale ?

Jean-Claude André : Nous savons que le réchauffement climatique sera plus important vers les latitudes les plus polaires. En d'autres termes, d'ici la fin du siècle, le réchauffement sera 1 à 2 °C dans les zones équatoriales, de 2 à 3 °C en Europe et de 5 à 6° du côté de la Sibérie ou de la Scandinavie.

Emmanuel Cloppet : Il est vraiment important de raisonner à l'échelle de la planète. C'est pour cela que les études sur l'agriculture que je vous ai montré ne concernaient pas que la France. Les résultats tendent à montrer que les zones froides seront plutôt favorisées par le réchauffement, alors que les régions tropicales et équatoriales seraient défavorisées. Leurs cultures sont en effet déjà proches de leur optimum thermique : elles auront du mal à supporter un degré de plus en moyenne, contrairement aux zones tempérées. De plus, le type de cultures en zone tropicale réagira moins bien à une augmentation du taux de concentration en CO₂. Or ce sont ces mêmes pays qui auront le moins les moyens techniques, humains et financiers pour mettre au point des cultures qui s'adapteront mieux. L'écart pourrait même grandir entre les pays riches, plutôt en zone tempérée, et les pays pauvres.

Pourriez-vous nous rappeler les grandes lignes des fameux accords de Kyoto : qui les a mis en place ? Qui en a eu l'idée ?

Jean-Claude André : Kyoto, c'est une étape d'un long processus qui a commencé avec le sommet de Rio en 1992. C'est là que s'est opérée pour la première fois une prise de conscience des organisations non gouvernementales et de quelques scientifiques qui ont commencé à dire : attention, nos émissions de gaz à effet de serre sont en train de changer le climat de la planète. Un groupe d'études scientifiques international s'est alors mis en place : il réalise tous les trois ou quatre ans un état des connaissances sur le climat de la planète et fait des projections sur ce que sera le climat du futur. Je vous en ai présenté certains résultats.

Très rapidement, il est apparu qu'il fallait limiter les gaz à effet de serre. Cette fois-ci, il y a eu une prise de conscience des gouvernements : en 1997, à Kyoto, les pays industrialisés se sont engagés à réduire les gaz à effet de serre de sorte qu'on revienne, en 2012, aux niveaux de 1990. Mais tous les Etats industrialisés n'ont pas ratifié cet accord - l'Europe ne l'a signé qu'en 2002 - et même si ces engagements étaient respectés, cela ne suffira pas à freiner le changement climatique. Ce n'est qu'un premier pas.

Concrètement, qu'est-ce qui est fait contre les inondations du littoral ?

Jean-Claude André : EDF, par exemple, est en train de revoir tous les schémas de fonctionnement de ses centrales nucléaires. S'il fait plus chaud en été, il y aura des problèmes de refroidissement des centrales. Si le niveau de la mer monte lors de tempêtes, il peut y avoir des inondations, comme cela a été le cas pour la centrale de Blaye, il y a quatre ans. Beaucoup d'autres secteurs se préoccupent d'adapter leurs installations, de revoir l'architecture des maisons, de bâtir des digues...

Emmanuel Cloppet : C'est la même chose du côté de l'agriculture, qui commence à intégrer les données climatiques pour gérer la forêt à 50 ans. Il s'agit de planter dès aujourd'hui des espèces qui s'adapteront au réchauffement, dans des endroits qui ne souffriront pas trop de la sécheresse.

Vous indiquiez que l'agriculture émet 16 % des gaz à effet de serre. Quelles sont les sources de ces émissions ?

Jean-Claude André : Les végétaux ne posent pas de problème car ils absorbent le gaz carbonique pendant la période de croissance, et en relâchent la même quantité au moment de la putréfaction des feuilles. Le bilan sur une année est donc équilibré. En revanche, certaines techniques de production agricole augmentent les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, si on laboure profondément, on remet dans l'atmosphère du carbone qui était jusque là stocké dans le sol et qui n'y revient plus. De même, des processus liés à l'enrichissement des sols peuvent dégager des gaz à effet de serre. Enfin, l'agriculture est la première source de production et d'émission du méthane dans l'atmosphère, un gaz qui se dégage des matières à l'état de pourriture. Les zones humides, comme les rizières, en émettent beaucoup. Mais aussi les ruminants qui, lors de la digestion, envoient beaucoup dans l'atmosphère...

Vous remontez jusqu'à l'an mille pour les données climatiques. D'où proviennent-elles ?

Jean-Claude André : Quand nous faisons des reconstitutions historiques du climat, nous ne disposons évidemment pas de stations météorologiques ni de mesures directes. Il faut donc reconstituer le climat

Le Diester est tiré de deux noms : le Diesel et l'ester. Il désigne un carburant « vert », élaboré à partir de végétaux : le colza.



à partir de ses traces : nous pouvons par exemple étudier les couches de glace et, à partir de carottages, qui consistent à prélever en profondeur un échantillon, étudier ce qu'était leur structure mille ans auparavant. Nous parvenons ainsi à voir les grandes tendances. Nous disposons aussi de registres, où sont notées les dates de vendanges. Si elles sont plus ou moins précoces, cela nous donne une indication du climat.

Il y aurait à la fois une diminution de l'eau douce et une montée des océans, donc une augmentation de l'eau salée. Y a-t-il des recherches pour utiliser cette eau salée dans l'agriculture ?

Jean-Claude André : il s'agit d'un phénomène très compliqué dont le climat n'est qu'un des éléments. Autour de la Méditerranée, beaucoup de pays consomment plus d'eau douce qu'ils n'en reçoivent par les précipitations. Ils sont donc déjà en train de puiser dans les réserves, les nappes phréatiques profondes qui sont là depuis des centaines de milliers d'années. Le changement climatique va accentuer ce phénomène. Effectivement, la mer va monter, mais c'est de l'eau salée. Or, la dessaler consomme énormément d'énergie. Donc d'un côté, on peut résoudre ainsi le problème du manque d'eau douce, mais de l'autre côté, on envoie a priori beaucoup de gaz à effet de serre dans l'atmosphère...

Emmanuel Cloppet : On cherche plutôt à économiser l'eau douce, en particulier en agriculture, pour utiliser au mieux chaque goutte d'eau. Par exemple, comment apporter une dose d'irrigation au moment où la plante en a le plus besoin, et à la partie du terrain qui en a le plus besoin... Le but est de pouvoir réduire la consommation sans affecter le rendement. C'est ce que nous appelons l'agriculture de précision.

L'homme est-il vraiment le seul responsable du réchauffement climatique ?

Jean-Claude André : Si on cherche les coupables sur la planète, apparemment, on ne trouve pas grand monde... Il y a eu des changements climatiques par le passé, et ce ne sont pas les petites colonies d'hommes de Néandertal qui à eux seuls ont fait passer le climat d'une ère glaciaire à une ère interglaciaire ! Il y a donc également des causes naturelles à ce changement, que nous avons pu reconstituer : ces variations s'expliquent par le fait que l'orbite de la Terre autour du Soleil n'est pas tout à fait régulière. Elle a des espèces de petits à-coups qui sont suffisants pour déclencher des variations climatiques. Cela se reproduit tous les 100 000 ans.

En revanche, nous n'avons jamais vu dans le passé de telles quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Un chiffre : la quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère, dans une période glaciaire, est de 180 parties par millions. Cela signifie qu'à chaque

million de molécules d'air, il y a 180 molécules de gaz carbonique. Et dans une période interglaciaire naturelle, on en compte 280 parties par millions. Voilà la fourchette naturelle : une variation de 100 parties par millions. Aujourd'hui, par la combustion du pétrole et du charbon, nous avons atteint 365 parties par millions... Dans le futur, selon les différentes projections, cela pourrait monter à 500, 800 ou 1 000. Ce sont les variations dues uniquement là à l'homme.

Est-ce que la canicule que nous avons connue cet été marque le début du changement climatique ?

Jean-Claude André : Rien ne prouve que la canicule de l'été 2003 ou la tempête de 1999 sont liées à l'effet de serre. Mais ce n'est pas démontrable. Cela pourrait être un événement naturel qui arrive une fois tous les 100 ou 500 ans. Pourquoi pas ? En revanche, nous savons que dans le climat du futur, ce genre d'événements sera plus fréquent.



QUELQUES RESSOURCES DOCUMENTAIRES

LA MÉTÉO A UNE HISTOIRE

- CHABOUT, René. *Pleuvra, pleuvra pas ? La météo au gré du temps*. Gallimard, Découvertes Gallimard 1994. Comment s'est élaborée, à travers l'histoire, la science de l'atmosphère et de la prévision météorologique.
- MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS, MÉTÉO-FRANCE. *La météorologie, du baromètre au satellite : mesurer l'atmosphère et prévoir le temps*. Delachaux et Niestlé, 2000. L'histoire des instruments de mesure en météorologie et de la prévision du temps, du XVIII^e siècle à nos jours. Comprendre la météorologie
- CHALON, Jean-Pierre, ALLÈGRE, Claude préf. *Combien pèse un nuage ? Ou pourquoi les nuages ne tombent pas*. EDP Sciences, 2002. Ce petit livre explique les bases de la météorologie à partir du cas des nuages et de leur rôle

dans l'atmosphère. Il décrit en particulier les moyens d'investigation dont disposent les chercheurs pour comprendre orages et cyclones.

- KESSLER, Jacques. *Météo : comprendre les secrets du temps*. Jacob-Duvernet Balland, Guide France Info 1999. L'atmosphère a ses lois, le climat ses particularités, et la prévision ses méthodes. Jacques Kessler, ingénieur à Météo-France et présentateur météo à Radio-france, explique tout ce qui se cache derrière la présentation médiatique de la météo.
- MÉTÉO-FRANCE : ESPACE DÉCOUVERTE. Météo- France www.meteo.fr/meteonet/decoouvr/dec.htm Météo-France propose des dossiers thématiques (mesurer l'atmosphère, les cyclones tropicaux, el niño, effets de serre, la prévision...), classés par niveau d'utilisation, du

débutant à l'expert. Situations météo commentées, documents TPE et glossaire complètent cette rubrique.

- MÉTÉOROLOGIE ET ENSEIGNEMENT www.educnet.education.fr/meteo

Ce site a pour objet d'apporter une aide pratique à tous les enseignants désireux d'intégrer les apports des nouvelles technologies à leur démarche pédagogique dans le domaine de la météorologie.

- MÉTÉO-FRANCE/HISTOIRE-GÉOGRAPHIE. Académie de Toulouse www.ac-toulouse.fr/histgeo/meteo/index.htm

- Météo-France et ses missions, météorologie et histoire, paysages et environnement, climatologie, images satellitaires... Ce site est le fruit d'un partenariat Météo-France/Éducation nationale-Académie de Toulouse.

- ROCHAS, Michel, JAVELLE Jean-Pierre. *La météorologie : la prévision numérique du temps et du climat*. Syros, 1993. Les méthodes de prévision numériques du temps et du climat, ou comment trouver les équations qui décrivent l'évolution des conditions atmosphériques.

- SADOURNY, Robert. *Peut-on croire la météo ? Le Pommier, les petites pommes du savoir 2003*. État des énormes progrès faits en matière de prévisions météorologiques.

- *Utilisation pédagogique des images des satellites météorologiques*. CRDP de Poitou-Charentes, 1998. Livre et cédérom. Présentation des satellites



météorologiques et de leurs données. L'ouvrage est accompagné d'un cédérom comportant de nombreuses données satellitaires Météosat et NOAA, et des exemples de travaux réalisables en classe.

FAIRE SA PROPRE MÉTÉO

• ISABEL, Guy. *Construire ses capteurs météo*. ETSF, 1998. Comment réaliser des capteurs spécialisés mesurant température, vitesse et direction du vent, pression atmosphérique... Pour construire anémomètre, girouette, baromètre, hygromètre, héliographe ou détecteur de gel.

LE CLIMAT A UNE HISTOIRE

• ACOT, Pascal. *Histoire du climat*. Perrin, pour l'histoire, 2003. L'auteur reconstruit l'histoire du climat en s'appuyant sur des données scientifiques et historiques et montre qu'elle est indissociable de celle des hommes. Il éclaire ainsi certains épisodes historiques (déclin de Rome, famines au Moyen Âge, Fronde...).

• *La fin des temps glaciaires : paléoenvironnement de l'homme dans les Alpes du Nord*. CRDP de Grenoble, 2000. Cédérom. Découverte de l'évolution du climat et du milieu naturel en rapport avec l'homme à la fin des temps glaciaires.

• LE ROY-LADURIE, Emmanuel. *Histoire du climat depuis l'an mil*. Flammarion, 1990. 2 vol. Un livre fondateur sur l'histoire du climat. Les mécanismes du climat.

• CHÉMERY, Laure. *Petit atlas des climats*. Larousse, petite encyclopédie Larousse. L'auteur explique les différents climats existant dans le monde et les grands facteurs qui les déterminent.

• *Le climat de la France*. Météo-France, 1999. Cédérom. Ce cédérom regroupe des cartes, graphiques et tableaux climatologiques obtenus à partir de 30 ans de mesures de paramètres météorologiques (température, vent...) par 113 stations d'observation en France métropolitaine.

• *Océans, atmosphère et climat : sciences de l'univers*. Hachette Éducation, 1996. Importance des interrelations entre circulation atmosphérique et circulation océanique dans le climat.

• PAGNEY, Pierre. *La climatologie*. PUF. Que sais-je ? 2000. Une synthèse des principaux aspects de la climatologie fondamentale.

• *Question d'atmosphère : exposition permanente*. Palais de la découverte. www.palais-decououverte.fr/expos/atmosphere.htm Le site du Palais de la

découverte propose une visite virtuelle de son exposition sur le climat : la météo, les mécanismes du climat, les changements au cours des temps, les questions d'ozone.

• *Climat*. CNRS. Sagascience www.cnrs.fr/dossiers/dosclim/index.htm

La collection Sagascience propose un dossier sur le climat à destination du grand public. La rubrique Images offre une intéressante photothèque sur les différents climats ainsi que des extraits de films diffusés par le CNRS.

• VOITURIEZ, Bruno. *Les humeurs de l'océan : effet sur le climat et les ressources vivantes*. Unesco, 2003. L'auteur donne les clés de la compréhension des évolutions océaniques et de leurs interactions avec les climats et la biosphère.

LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

• *Changement climatique : un défi majeur*. ADEME. www.ademe.fr/htdocs/publications/publipdf/climatiq.htm

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie publie sur son site un dossier clair et bien illustré pour scolaires ou grand public.

• *Coup de chaud sur la planète : les dérèglements climatiques*. Le Monde Librio, 2001. Un petit livre qui reprend les principaux articles rédigés par des spécialistes du journal Le Monde sur le sujet.

• *Le cycle du carbone et l'évolution du climat*. CNDRP, 1998. Vidéocassette. Ce film montre la complexité des différents paramètres intervenant dans l'évolution du climat de notre planète.



- DUBOIS, Philippe, LEFÈVRE, Pierre. *Un nouveau climat ? Les enjeux du réchauffement climatique*. La Martinière, 2003. Les bouleversements climatiques, leurs causes, les solutions à mettre en oeuvre pour préserver notre planète.
- *Étude du climat*. CEA www.cea.fr/fr/magazine/dossierMag.asp?th=5#id52
Le CEA propose plusieurs dossiers sur le climat : les variabilités, les évolutions probables, le réchauffement climatique et l'effet de serre.
- KANDEL, Robert. *Le réchauffement climatique*. PUF, que sais-je ? 2002. Une présentation scientifique du phénomène physique qu'est le réchauffement climatique : écosystèmes, effet de serre, prévisions difficiles ; la dimension politique n'est pas oubliée.
- LE TREUT, Hervé, JANCOVICI, Jean-Marc. *L'effet de serre*. Flammarion, 2004. Champs. (2^e éd. à paraître, remplacera la 1^{re} éd. de 2001). La composition chimique de l'atmosphère, la part de l'homme dans l'effet de serre, les risques biologiques et géologiques liées au réchauffement de la terre.
- PETIT, Michel. *Qu'est-ce que l'effet de serre ?* Ses conséquences sur l'avenir du climat. Vuibert, planète vivante, 2003, Planète vivante Description scientifique du phénomène et conséquences annoncées si l'effet de serre résultant des activités humaines n'est pas maîtrisé.
- *Réchauffement climatique*. Planet-Terre www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Climats/Historique
Passé et futur du climat, rôle des aérosols dans les variations climatiques, l'atmosphère en équilibre fragile... Planet-Terre, site conçu pour l'enseignement scientifique dans les lycées, propose un dossier complet réalisé avec la participation de chercheurs.
- SADOURNY, Robert. *Le climat est-il devenu fou ?* Le Pommier, Les petites pommes du savoir 2002. L'auteur montre que l'hypothèse d'un réchauffement climatique est de plus en plus probable.
- TISSOT, Bernard. *Halte au changement climatique*. Odile Jacob, 2003. L'auteur montre comment notre consommation de pétrole et de charbon a produit un effet de serre, et livre les conditions qui nous permettraient de garder une planète verte. Les effets du réchauffement climatique sur notre environnement
- BAZZAZ, Fakhri. *Changements du climat et production agricole*. Polytechnica, 1997 Les changements du climat et leurs effets sur la croissance des végétaux. Pour enseignants uniquement.
- *Changement climatique, développement durable : quels enjeux pour l'agriculture et la recherche agronomique ?* INRA www.inra.fr/presse/COMMUNIQUES/sia2003/sommaire.htm
L'impact sur l'agriculture et la forêt du changement climatique : un important dossier de presse de l'INRA réalisé en mars 2003 à l'occasion du Salon international de l'Agriculture.
- *Changements climatiques et événements météorologiques extrêmes*. Rapport du WWF, 2000 www.wwf.fr/pdf/extreameweatherFR.pdf
Pour le WWF, les changements climatiques sont une menace pour la survie de nombreuses espèces végétales et animales, ainsi que pour le bien-être des hommes sur terre.
- *Désertification : déceler les symptômes pour lancer les remèdes*. RDT Info n° 23 europa.eu.int/comm/research/rtdinf23/fr/change.html
RDT Info, magazine édité par la Commission européenne, consacre un article à la désertification du bassin méditerranéen liée en partie au changement climatique.
- *Événements climatiques extrêmes*. Réseau Action Climat France. www.rac-f.org/rubrique.php?id_rubrique = 44
La RAC-F, réseau d'associations contre les changements climatiques, offre sur son site une étude sur les récents dérèglements climatiques, sécheresses ou inondations.
- GUYOT, Gérard. *Climatologie de l'environnement*. Dunod, 1999 Les incidences physiques et biologiques du climat sur l'environnement : applications dans les domaines de l'agriculture, des eaux et forêts, de l'aménagement du territoire. Pour enseignants uniquement.



- PASKOFF, Roland. *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers : le mythe et la réalité*. Institut océanique, 2001. Les risques d'une élévation du niveau de la mer dans les prochaines décennies, conséquence du réchauffement climatique, et les effets sur les marais, polders, mangroves ou deltas. Rapports officiels, engagements nationaux et internationaux.
 - *La forêt française après les tempêtes : bilan et perspectives*. CRDP de Bordeaux, 2001. L'ouvrage traite de toutes les questions relatives aux dramatiques tempêtes de décembre 1999 dans les forêts françaises.
 - *Les changements climatiques à l'horizon 2025, 2050, 2100* - Les rapports de l'OPECST de 1985 à 2001. 2 cédéroms. Le cédérom n° 1 contient le rapport du sénateur Deneux sur les changements climatiques ; le cédérom n° 2 reprend tous les rapports de l'Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques concernant le même sujet.
 - *Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?* INRA, 2002.
 - *Convention-cadre et protocole de Kyoto*. UNFCCC. unfccc.int/cop7/fr/convkp/index.html Les textes de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto, consultables sur le site de l'UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change.
 - DENEUX, Marcel. *L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*. Rapport d'information. OPECST, 2002. www.senat.fr/rap/r01-224-1/r01-224-1.html Climat et environnement, effet de serre, aménagement du territoire, agriculture, transports, énergie, santé... Cet important rapport consultable en ligne est assorti de plus d'une centaine de recommandations.
 - GIEC. *Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques*. www.ipcc.ch Le Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Évaluation du Climat, organisation mise en place par le G7, propose sur son site le 3e rapport d'évaluation consacré à la science des changements climatiques : analyse du système climatique ainsi que détection de l'influence humaine sur son évolution récente.
 - *Les impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e SIÈCLE*.
- www.inra.fr/actualites/rapport-carbone.html
Rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du ministère de l'Écologie et du développement durable.
- <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/savoir/impact.htm>
Sous l'initiative de la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (MIES) et du ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, un état des connaissances a été réalisé par des experts scientifiques et regroupé dans une publication consultable en ligne.
- Bibliographie réalisée par Joëlle Caillard. CRDP Midi-Pyrénées. Octobre 2003