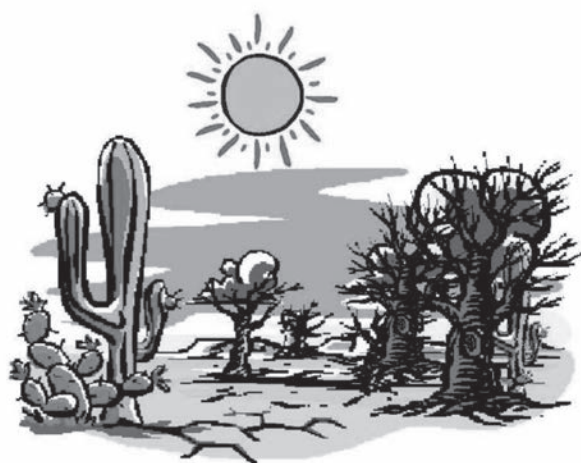


## La forêt face au changement du climat

**Exposé présenté le 5 août 2005 à Florac, lors de la réunion d'information sur « La sylviculture et les changements climatiques », organisée par le Centre régional de la propriété forestière du Languedoc-Roussillon**

Par Yves MARTIN\*-



### Histoire de l'atmosphère

Il y a 4,5 milliards d'années, l'atmosphère était composée de vapeur d'eau et de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Sa température était de 800°C. Elle était, *a priori*, impropre à la vie. Un premier refroidissement a permis la condensation de la vapeur d'eau et la création des océans. Il y a environ 3,8 milliards d'années, la vie est apparue dans les océans sous la forme de bactéries qui se sont nourries du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et y ont rejeté un déchet, l'oxygène. Le rayonnement du soleil a partiellement transformé celui-ci en ozone (O<sub>3</sub>), qui a la propriété d'arrêter dans l'atmosphère les rayons ultraviolets (UV) durs, dont l'intensité interdisait toute vie hors des océans (l'eau des océans, comme l'ozone de l'atmosphère, arrête les UV).

Lorsque la concentration en ozone a été suffisamment forte, il y a 500 millions d'années, la vie a pu sortir de l'abri des océans et conquérir les continents.

La vie a ainsi éliminé la quasi-totalité du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère pour le stocker sous forme de calcaire (CO<sub>3</sub>Ca) et de « futurs » combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz). La vie n'est donc pas apparue parce que l'atmosphère lui était favorable ; c'est au contraire la vie qui a façonné l'atmosphère.

Faisons un grand bond à travers les âges : à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère était tombée à seulement 280 parties par million (ppm), soit 0,028 %.

Mais, avec la découverte des combustibles fossiles, qui sont à l'origine de l'ère industrielle, nous avons entrepris,

depuis deux siècles, le déstockage de ce carbone fossile et, de ce fait, la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère augmente de façon accélérée.

Dans la partie gauche du graphique 1 de la page suivante sont reportées les mesures directes de CO<sub>2</sub> que l'on effectue depuis 1950 ; les oscillations annuelles, autour de la tendance à une croissance accélérée, sont dues au cycle annuel de la végétation dans les zones tempérées de l'hémisphère Nord : la concentration en CO<sub>2</sub> passe par un minimum en été. À droite sont présentés les résultats des dosages du CO<sub>2</sub> dans les bulles d'air emprisonnées dans les glaces du pôle Sud et du Groenland au cours des trois derniers siècles ; ces bulles d'air ont conservé la teneur en CO<sub>2</sub> qu'elles avaient lors de leur piégeage.

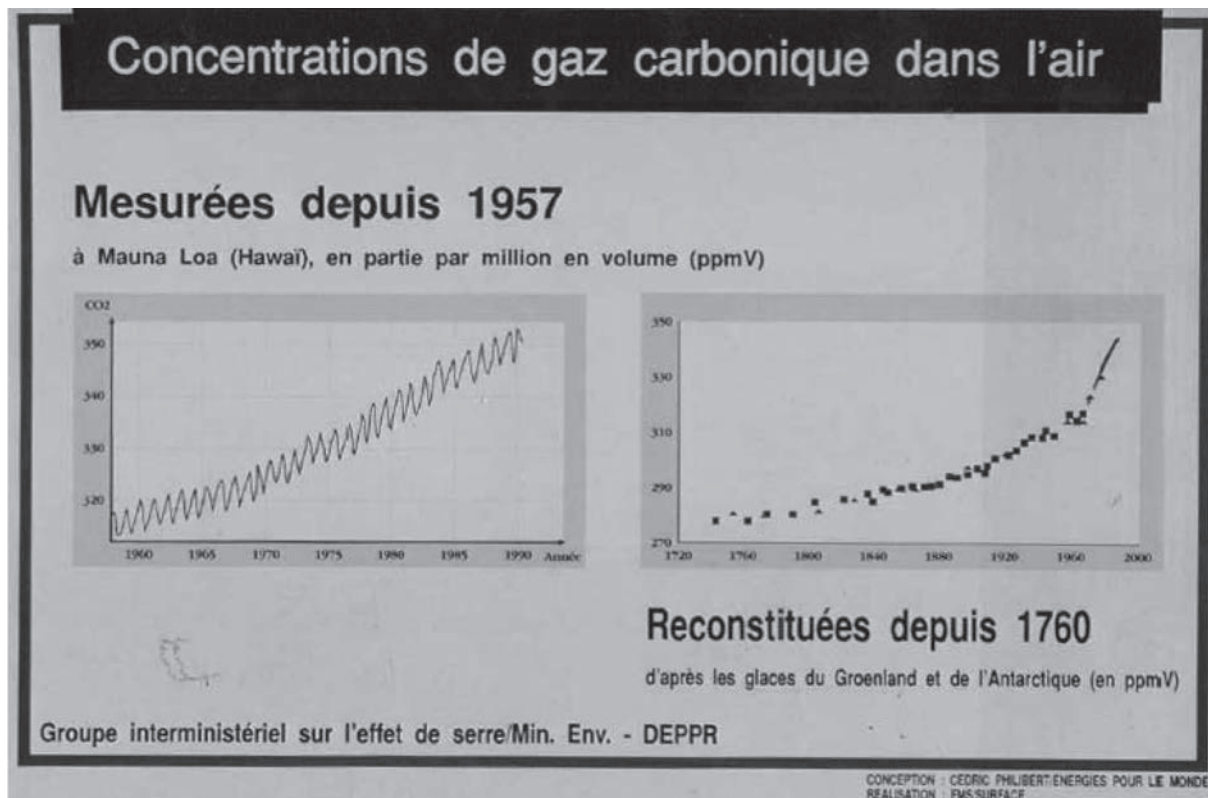
### Qu'est-ce que l'effet de serre ?

Tout corps émet un rayonnement dont la longueur d'onde est fonction de la température de sa surface. La surface du soleil étant à 6 000°C, il nous envoie un rayonnement composé de la lumière visible et d'ultras violets. Le rayonnement solaire chauffe la Terre avec un apport de 237 watts par m<sup>2</sup>. Ainsi chauffée, la Terre se refroidit en émettant vers l'espace un rayonnement qui, compte tenu de sa température, est un rayonnement infrarouge invisible. Sa puissance est égale à celle du rayonnement reçu du soleil (voir le graphique 2 de la page suivante - NDLR). Quatre gaz, dont le principal est le CO<sub>2</sub>, qui ne représentent que 0,05 % de l'atmosphère, jouent un rôle crucial dans son équilibre thermique, car ils ont la propriété de retenir, dans l'atmosphère, une fraction du rayonnement infrarouge.

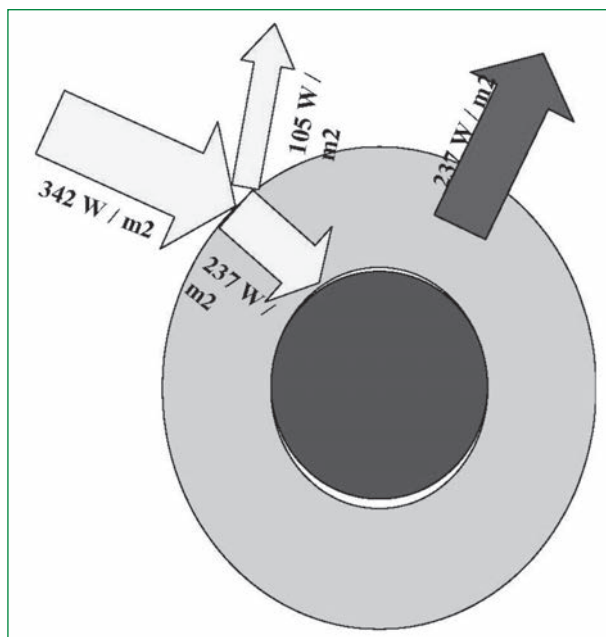
Ces gaz, dits gaz à effet de serre, jouent un rôle positif car, sans eux, la température moyenne sur notre globe serait de -18°C alors que, grâce à eux, nous bénéficions de +15°C. À -18°C, aucune vie ne serait possible sur Terre. Notre écosystème a donc eu la sagesse de conserver ce petit matelas de CO<sub>2</sub>.

Mais, en retenant aujourd'hui dans l'atmosphère 2,5 watts supplémentaires par m<sup>2</sup>, les gaz additionnels rejetés par l'Homme vont modifier le climat.

On pourrait peut-être penser que ces 2,5 watts par m<sup>2</sup> sont négligeables en comparaison des 237 watts par m<sup>2</sup> que le soleil nous envoie. Et ce d'autant que le climat varie constamment, à l'échelle du mois et de l'année, et qu'il connaît même ces variations cycliques naturelles de très



Graphique 1 : Concentration du gaz carbonique dans l'air.



Graphique 2

grande ampleur que sont les glaciations, dont la dernière était encore là il y a 15 000 ans.

Les glaciations résultent des fluctuations de la position de la terre dans le système solaire. Ces fluctuations, dont la périodicité est de l'ordre de 100 000 ans, induisent des variations très faibles de l'apport d'énergie solaire à la Terre.

En une dizaine de milliers d'années, un surcroît moyen d'énergie de 0,7 watt par  $m^2$  seulement (soit le tiers de l'effet de serre additionnel d'aujourd'hui) nous a fait sortir de la dernière glaciation en augmentant de  $5^\circ C$  la température moyenne de la Terre. Cette élévation de température a été seulement de  $+2^\circ C$  à l'Equateur (dont la très grande stabilité climatique permet une diversité végétale exceptionnelle), mais de  $+15^\circ C$  à la latitude de la France.

### Quelles sont les conséquences de l'effet de serre sur le climat global de la planète ?

Des modifications, même très faibles, de l'équilibre radiatif de l'atmosphère peuvent donc avoir un impact considérable sur le climat.

Pour comprendre la dynamique de tels changements, il faut avoir conscience de deux faits.

**Le premier** - L'atmosphère a une inertie thermique faible. Elle est efficacement brassée par les vents et réagit vite à la chaleur retenue par les gaz à effet de serre. Il n'en va pas de même pour les océans dont l'inertie thermique est énorme. Leur masse est 150 000 fois supérieure à celle de l'atmosphère, et les courants marins, qui en homogénéisent la température, n'accomplissent leur boucle autour de la Terre qu'en un millénaire. L'impact du Gulf Stream sur le climat de la France montre que la température des océans a un rôle très important sur le climat. La température moyenne de l'océan n'augmente que très lentement

sous l'impact de notre effet de serre additionnel : dans l'immédiat, les océans ralentissent donc le réchauffement de l'atmosphère et masquent temporairement les conséquences du brûleur que nous avons allumé.

Le second - Nous déstockons aujourd'hui 7 milliards de tonnes (Gt) de carbone par an : 6 par l'usage d'énergie fossile et 1 par la déforestation tropicale. L'océan absorbe la moitié de ces 7 Gt, l'autre moitié s'accumule dans l'atmosphère et y restera pendant des siècles.

Pour stabiliser la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>, il ne suffit pas de stabiliser les émissions, il faut les diviser par deux, et le niveau de la stabilisation dépendra du temps que nous mettrons pour obtenir cette division par deux.

Quand nous déversons une pollution dans un cours d'eau, la concentration en pollution de son eau est proportionnelle à notre émission de polluant. Si nous divisons par deux notre déversement, la pollution du cours d'eau est instantanément divisée par deux.

Il n'en va pas de même avec la pollution que nous rejetons dans l'atmosphère, qui est cumulative et non en transit.

### Peut-on affirmer que le climat a déjà changé ?

Il est difficile de mettre en évidence une évolution lente d'un phénomène aussi variable à chaque instant que le climat. Néanmoins, la quasi-totalité des scientifiques du monde entier spécialistes du climat, réunis dans une instance de coopération permanente, le Groupe intergouver-

nemental sur l'évolution du climat (GIEC), considèrent que l'effet de serre additionnel que nous provoquons est bien la cause d'une évolution du climat, statistiquement significative, que nous constatons depuis un siècle et demi.

Cette évolution se traduit par :

a) L'accroissement de la température moyenne sur terre. Celle-ci a déjà augmenté de 0,6°C depuis 1900 et de l'ordre de 1°C depuis 1800 (voir le graphique 3). Cette élévation n'est pas uniforme. Elle croît de l'Equateur aux Pôles : depuis 1900, elle est de 1°C en France et voisine de 2°C au Groenland.

Comme le montre le graphique 3, publié par le GIEC, l'augmentation de température enregistrée au cours du dernier siècle [NDLR : XIX<sup>e</sup> siècle] n'a pas de précédent sur le dernier millénaire.

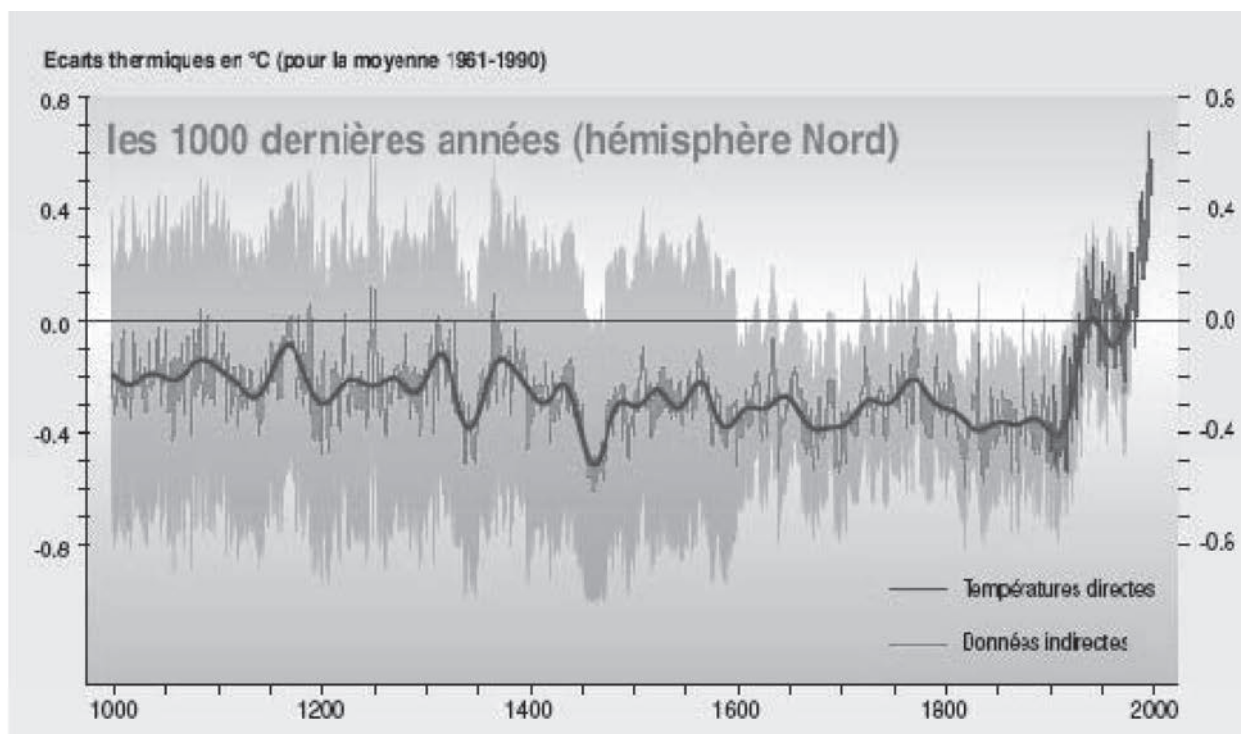
b) L'élévation du niveau des mers de 10 à 20 cm.

c) La fonte des glaces de mer. Celles-ci, dans l'Atlantique Nord, surveillées par les satellites, voient leur surface s'amenuiser de 37 000 km<sup>2</sup> par an (soit la surface de la France tous les quinze ans), et leur épaisseur, moins aisément observable, a probablement diminué de 40 %.

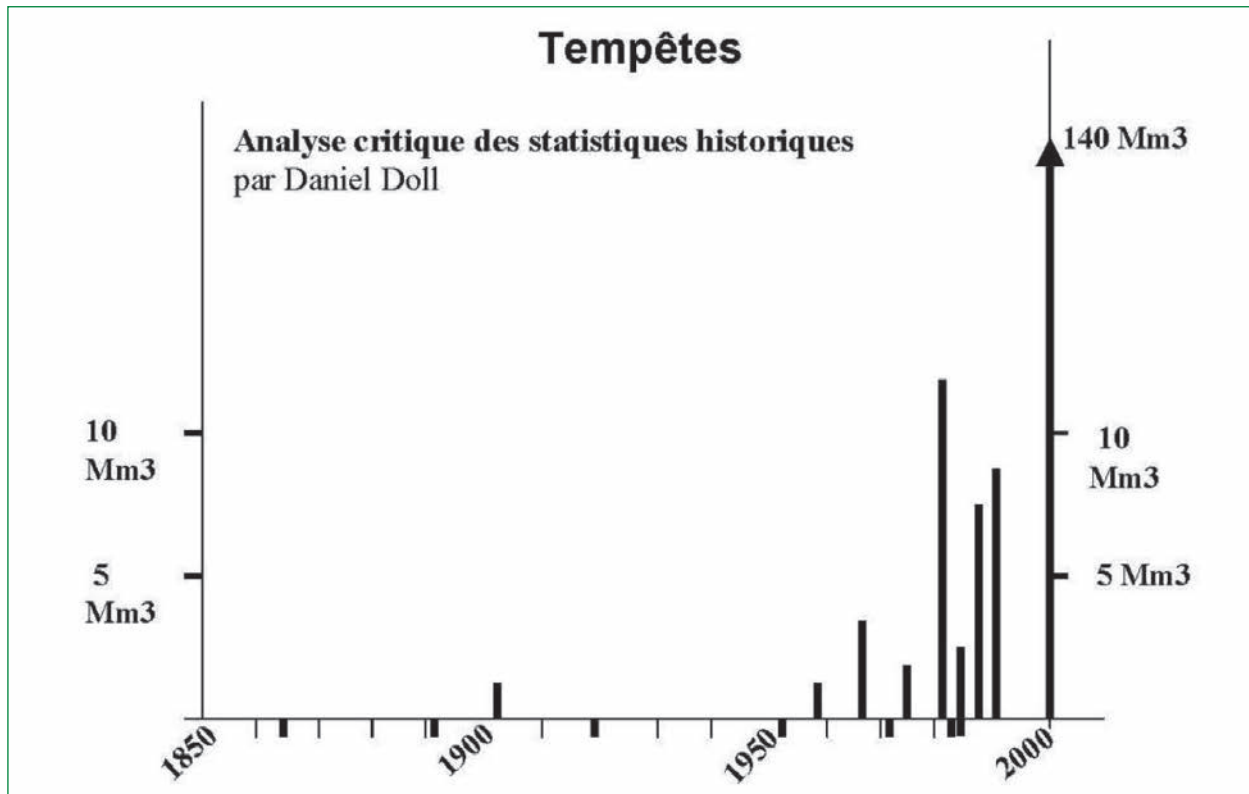
d) Le recul des glaciers de nos montagnes de plusieurs centaines de mètres en un siècle.

e) L'augmentation de la pluviométrie annuelle de 5 à 10 % aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

Concernant les phénomènes climatiques extrêmes (inondations, tempêtes, sécheresses, canicules), il est plus difficile d'affirmer qu'ils ont vu leur fréquence et leur intensité augmenter, car ces phénomènes extrêmes étant par défini-



Graphique 3 : Données indirectes : épaisseur des cernes, coraux, carottes glaciaires



Graphique 4 : Tempêtes.

tion peu fréquents, les observations passées que l'on a pu en faire n'ont pas été quantifiées et ne permettent donc pas d'estimer leur intensité et leur fréquence historique normale.

Cette difficulté existe surtout pour les épisodes brefs et locaux comme les tempêtes ; elle est moindre pour les sécheresses et les canicules, dont la durée se chiffre en mois et qui affectent des surfaces plus importantes. Les scientifiques estiment aujourd'hui, par exemple, que la probabilité de canicules comme celle de 2003 a au moins doublé. Quant à la tempête exceptionnelle de fin 1999, on ne sait pas scientifiquement l'attribuer au changement de climat, mais le graphique 4 montre une évolution impressionnante des destructions de peuplements forestiers par le vent en France depuis 1850 (1).

Sur ce graphique, au-dessous de l'axe des abscisses, les petits tirets (tous de même taille) correspondent à des volumes de bois abattus par des tempêtes compris entre 500 000 et un million de m<sup>3</sup>. Au-dessus de cet axe, les traits sont proportionnels aux volumes de bois abattus, sauf pour 1999 et ses 140 millions de m<sup>3</sup> qui sortent des limites du graphique.

On voit que dans notre pays, de 1850 à 1960, les dégâts sont minimes, puis les événements graves se multiplient. Il faut aussi savoir que la Suède vient de connaître, en janvier dernier, une tempête record pour ce pays, qui a mis par terre 75 millions de m<sup>3</sup> de bois.

L'accroissement de la fréquence et de l'ampleur des dégâts des tempêtes, au cours des dernières décennies, est peut être dû autant à une plus grande vulnérabilité de nos

forêts qu'au changement du climat, mais l'évolution est inquiétante.

Au-delà de ce que nous constatons déjà, divers modèles de plus en plus sophistiqués, élaborés dans le cadre d'une étroite coopération internationale, s'attachent à simuler l'évolution future du climat en tenant compte de l'interaction entre l'océan et l'atmosphère.

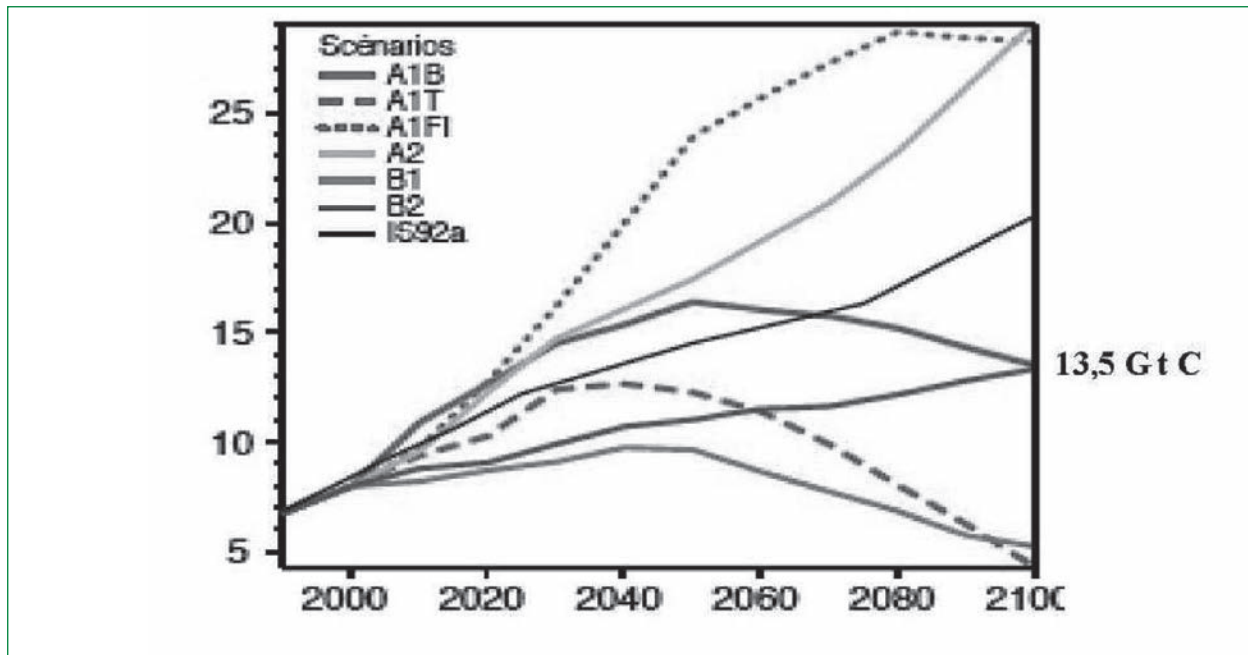
Ces modèles ont conduit à faire des hypothèses sur l'évolution future des émissions de CO<sub>2</sub>, car l'augmentation de ces émissions restera durablement forte malgré la mobilisation internationale engagée, en 1992, par la convention de Rio.

Le tableau 1 de la page 71 montre que les émissions ont continué à augmenter de 16 % entre 1990 et 2002 malgré un début de mobilisation.

Le graphique 5 présente les scénarios envisagés d'ici à 2100 dans diverses hypothèses :

- ✓ les scénarios A1F1 ou A2 supposent l'échec de la mobilisation internationale et la poursuite de la croissance non maîtrisée des émissions ;
- ✓ le scénario B2 est fondé sur la perspective d'une division par deux du rythme de cette croissance (ce scénario est celui retenu par les recherches françaises sur l'impact du changement du climat sur la forêt française) ;
- ✓ B1, enfin, est le scénario vertueux de la division par deux des émissions, qui est nécessaire à la stabilisation des concentrations, stabilisation qui n'aurait lieu que plusieurs siècles après 2100 ;
- ✓ les autres scénarios (A1B, A1T et IS92a) sont des variantes des scénarios précédents qui sensiblement arri-

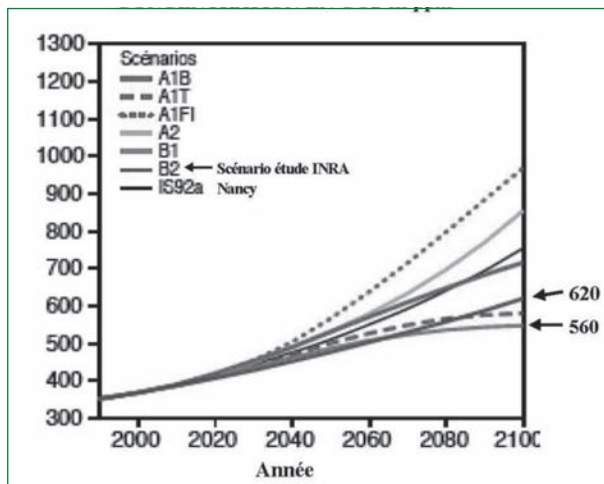




Graphique 5 : Scénarios d'émission de CO<sub>2</sub> du GIEC.

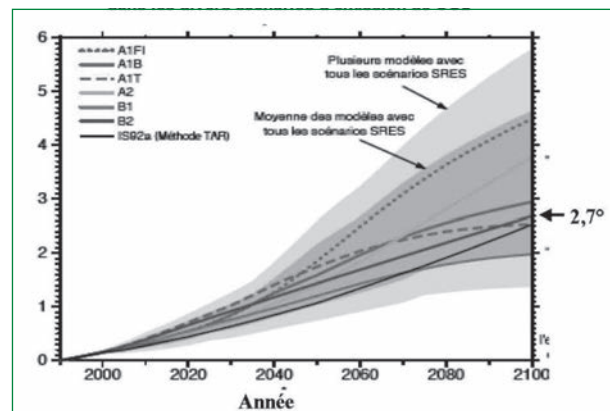
vent aux mêmes résultats. Pour ne pas alourdir notre exposé, nous ne les expliciterons pas plus ici que dans les graphiques suivants.

Le graphique 6 montre que la concentration en CO<sub>2</sub>, qui est déjà passée de 280 à 367 ppm aujourd'hui, serait, en 2100, de 620 ppm avec B2 (le scénario retenu par l'INRA



Graphique 6 : Concentration en CO<sub>2</sub> (en ppm).

de Nancy) et 560 avec B1 (le scénario vertueux). Le graphique 7 montre que, dans les scénarios B1 et B2, la température augmenterait de 2 ou 2,7°C, au-delà des 0,6°C d'augmentation déjà enregistrée, et qu'elle pourrait, dans les scénarios du « laisser faire », approcher des 5°C d'amplitude que notre terre a déjà connus (lors de la der-



Graphique 7 : Evolution de la température dans les divers scénarios d'émission de CO<sub>2</sub>.

nière déglaciation), mais, cette fois, avec une vitesse 100 fois supérieure.

Ces modèles prévoient en outre que :

- ✓ le niveau des mers s'élèverait de 30 à 50 cm, voire de 80 cm.
- ✓ la pluviométrie continuerait à augmenter en hiver sous les latitudes moyennes (c'est-à-dire chez nous), mais serait de plus en plus irrégulière, dans le temps, avec une aridification probablement accrue à l'intérieur des continents.
- ✓ s'agissant des phénomènes extrêmes (inondations, sécheresses, tempêtes), les modèles suggèrent une augmentation de la fréquence des écarts importants par rapport à la moyenne, mais ne sont pas aptes à quantifier les valeurs extrêmes peu fréquentes ; ils suggèrent qu'il y aura davantage de vent, mais ne savent pas pré-

	Millions de tonnes	Tonnes par habitant	Évolution 1990-2002
USA	1 541	5,36	+ 16%
Europe des 15	875	2,29	+ 3%
Ex «Pays de l'Est»	652	2,28	- 30%
Chine et Inde	1 432	0,51	+ 50%
Total monde	6 573	1,06	+ 16%

Tableau 1 : Evolution des émissions annuelles de CO<sub>2</sub> des principaux pays (et du monde) intervenues depuis 1990.

voir comment ce « davantage » se répartira, dans le temps, entre la moyenne et la pointe.

### Peut-on maîtriser les émissions de CO<sub>2</sub> pour limiter le changement du climat, qui est prévisible ?

En 1992, au début de la mobilisation mondiale lors de la conférence de Rio, les pays industrialisés ont affiché leur intention de ne pas émettre plus de CO<sub>2</sub> en 2000 qu'en 1990. C'était une déclaration d'intention, non un engagement...

Le tableau 1 montre que :

- ✓ si l'Europe des Quinze est presque parvenue à la stabilisation, les Etats-Unis ont accru scandaleusement leurs émissions de 16 %, tandis que la Chine et l'Inde ont légitimement augmenté les leurs de 50 %, et que l'effondrement de l'économie des Pays de l'Est a entraîné une réduction de 30 % de leurs émissions ;
- ✓ les émissions par habitant de ces groupes de pays sont extrêmement différentes : chaque américain du Nord émet 10 fois plus que les habitants des pays en développement, et 5 fois plus que la moyenne mondiale.

Diviser par deux les émissions pour stabiliser la composition de l'atmosphère, malgré un doublement de la population mondiale et l'augmentation des niveaux de vie, n'est pas impossible. Cela suppose une action mondiale très forte, pour laquelle les pays industrialisés doivent donner l'exemple, ce que n'acceptent toujours pas les Etats-Unis.

Avec le quart seulement de la population mondiale, les pays industrialisés sont responsables de plus des deux tiers des émissions actuelles. Ils sont aussi responsables de l'essentiel du CO<sub>2</sub> déjà accumulé dans l'atmosphère, et

leur modèle culturel et technologique inspire l'évolution aujourd'hui rapide du reste de l'humanité. Une division par deux des émissions mondiales ne sera possible que si les pays industrialisés divisent les leurs par quatre au moins. La répartition en France (voir le tableau 2 ci-dessous) des émissions entre les divers secteurs de notre activité et leur évolution montrent le poids des transports, que nous n'avons absolument pas maîtrisés, et l'effet de nos mauvaises habitudes en matière de chauffage des logements. Nous augmentons constamment nos températures de chauffage au-delà des 19°C réglementaires, plutôt que d'adapter nos vêtements d'intérieur.

Il nous faut susciter un changement de mode de vie et une mobilisation forte de l'innovation technologique. Une telle évolution ne sera pas ruineuse si elle est optimisée, progressive et programmée.

La plupart des gouvernements de l'Europe des Quinze se sont fixé un objectif de division par quatre de leurs propres émissions d'ici à 2050, mais aucun n'a jusqu'ici adopté de politique susceptible d'y conduire !

Nous devons les y aider.

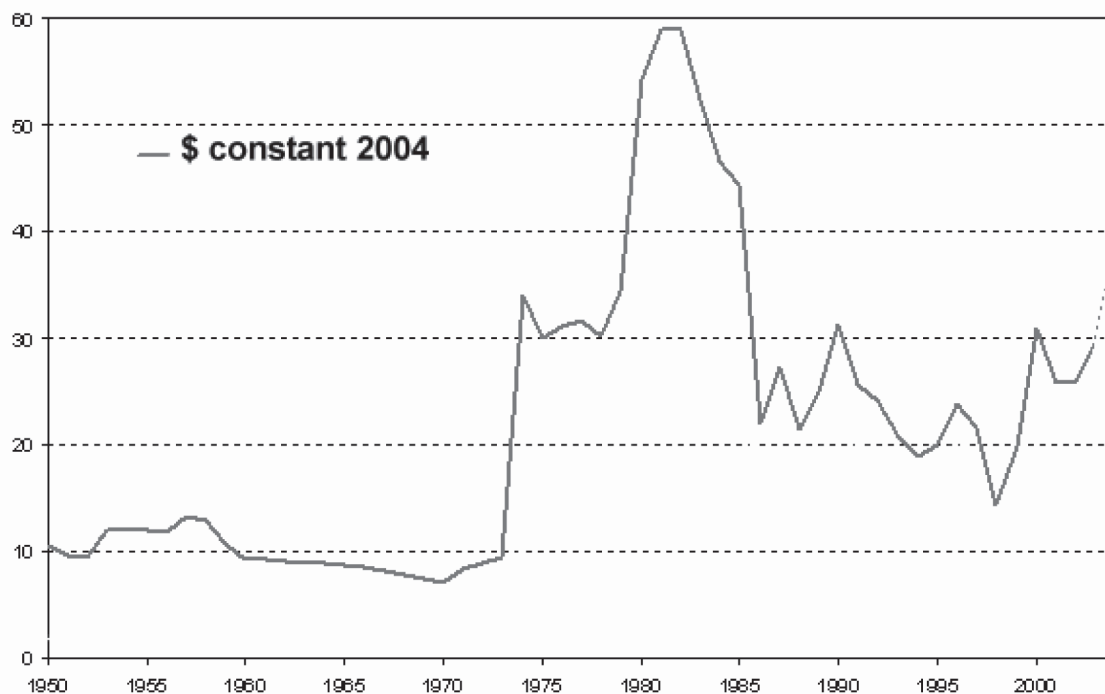
Il n'y a, à mes yeux, qu'une seule politique qui permette d'atteindre cet objectif : c'est la taxation progressivement croissante de l'énergie fossile. On ne peut pas, en effet, sans d'énormes gaspillages, rationner, par des décisions de l'Administration, l'énergie que chacun de nous utilise. Seule l'augmentation du prix TTC de l'énergie peut nous conduire tous à faire les économies de CO<sub>2</sub> les moins coûteuses et à susciter une forte innovation, en donnant à nos entreprises la certitude qu'elles auront un marché pour leurs innovations.

Notre économie industrielle s'appuie, en effet, sur ces deux facteurs de production majeurs que sont la main-d'œuvre et l'énergie fossile. La main-d'œuvre est renouvelable,

	1990	2004	Evolution de 1990 à 2004
Transports	34,0	41,0	+ 20,6 %
Résidentiel et tertiaire	26,3	28,0	+ 6,5 %
Industrie (et agriculture)	31,5	27,4	- 13 %
Centrales électriques	10,9	9,1	- 16,5 %
<b>Total</b>	<b>102,7</b>	<b>105,5</b>	<b>+ 2,73 %</b>

Tableau 2 : Emissions de CO<sub>2</sub>, par secteur, en France (en millions de tonnes de carbone par an).

## Prix du pétrole brut depuis 1950



Graphique 8 : Prix du pétrole brut depuis 1950 (en dollars constants de 2004).

nous ne l'importons pas et sa sous-utilisation est génératrice des coûts du chômage (50 milliards d'euros par an dans le budget de l'Etat). L'énergie fossile, au contraire, n'est pas renouvelable, nous l'importons en totalité et sa consommation est génératrice des coûts futurs du changement du climat. Or, 38 % de nos prélèvements obligatoires sont assis sur les salaires (cotisations sociales et impôts divers de l'Etat, des régions, des départements, des communes...) et 3,5 % seulement sont assis sur l'énergie fossile (taxe sur les carburants). Il faut diminuer progressivement les prélèvements sur les salaires et augmenter, d'un volume global équivalent, la taxation de l'énergie, afin de remplacer une incitation à créer du chômage en économisant de la main-d'œuvre, par une incitation à économiser l'énergie. Dans une telle politique, il n'y aurait pas davantage d'impôts, au contraire, puisque l'on diminuerait les coûts actuels du chômage et les coûts futurs du changement du climat.

Nous avons fait, depuis la Seconde guerre mondiale, grâce à l'innovation, des progrès spectaculaires dans l'efficacité de la main-d'œuvre, parce que son coût a constamment et fortement augmenté de façon prévisible, stimulant des innovations dont la rentabilité était assurée.

Or, le prix de l'énergie en monnaie constante (voir le graphique 8) est resté stable jusqu'en 1974, avant de connaître des évolutions erratiques dont l'instabilité n'a pas permis de mobiliser l'effort d'innovation indispensable pour accroître notre efficacité énergétique.

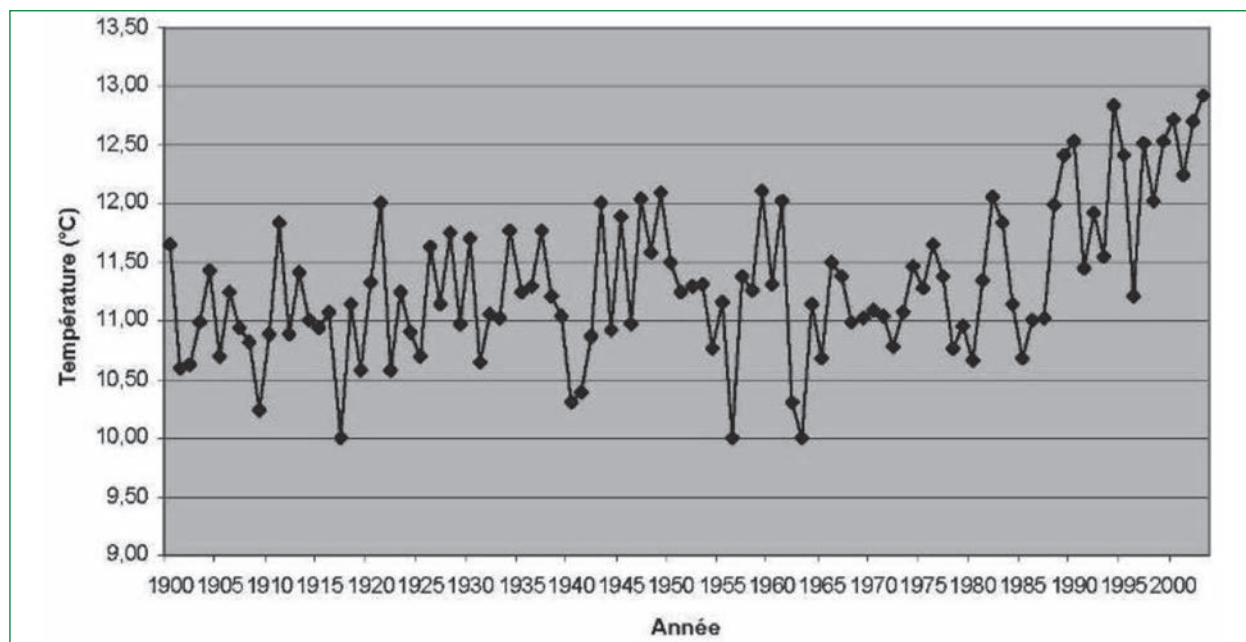
Dans le domaine du bois, l'organisation des circuits de commercialisation du « bois-énergie » ne sera entreprise efficacement que si ses promoteurs sont assurés de leurs marges futures.

Je suis persuadé que nous n'atteindrons les objectifs fixés par les gouvernements européens que si le prix TTC de l'énergie fossile est augmenté de façon prévisible, en quelques décennies, d'au minimum 500 € par tonne de carbone contenu. Cela conduirait à multiplier par trois au moins le prix qu'a connu, en moyenne, cette énergie pendant les vingt ans qui ont précédé la guerre d'Irak, prix qui a structuré notre organisation urbaine, nos technologies et nos comportements.

### Quel impact le changement de climat peut-il avoir sur notre écosystème forestier ? Comment adapter la sylviculture ?

J'exprimerai d'abord une crainte et une question :

- ✓ **une crainte** : dans un écosystème forestier, l'arbre connaît une génération par siècle. Face à lui, ses concurrents que sont les insectes, les champignons et les plantes annuelles connaissent une génération par an et ont donc 100 fois plus d'occasions que l'arbre de s'adapter à un changement du climat rapide ;
- ✓ **une question** : saurons nous choisir les espèces que nous plantons en fonction du climat sous lequel elles pousseront dans trente, cinquante ou cent ans, et non



Graphique 9 : Température moyenne annuelle sur 19 stations représentatives de la France métropolitaine (°C).

plus, comme nous l'avons toujours fait jusqu'ici, en fonction de l'expérience du siècle précédent ?

*a) On constate, dès à présent, des évolutions sensibles aux plans national et local.*

Météo France a procédé à une analyse statistique très intéressante (2) des observations de température et de pluviométrie faites sur toutes les stations métropolitaines pour lesquelles il a été possible de valider les données recueillies depuis cent ans.

Le problème, ici encore, est de savoir s'il émerge, au sein des fluctuations aléatoires que nous connaissons, une tendance que l'on appelle « statistiquement significative » d'un phénomène non dû au hasard.

Les fluctuations des températures étant moindres que celles de la pluviométrie, les tendances observées sont toutes significatives pour la température, mais le sont beaucoup moins souvent pour la pluviométrie.

Ceci ne signifie pas que le changement du climat ne modifie pas la pluviométrie, mais qu'il la modifie trop lentement pour qu'une tendance émerge de façon significative de la forte variabilité naturelle des précipitations.

*b) Au niveau national :*

- ✓ l'élévation de température est en moyenne de 1°C sur un siècle (voir le graphique 9), et le changement intervenu est équivalent à un déplacement de 200 km vers le Sud (par exemple, de Limoges à Toulouse), ou à une diminution d'altitude de 100 à 200 m.
- ✓ les précipitations annuelles sont très généralement en hausse et aucune baisse n'est statistiquement significative. Météo France note toutefois que la tendance

constatée dans le Sud est néanmoins à la baisse, par exemple dans le sud de la Lozère. Au plan saisonnier, on observe, en hiver, des hausses partout dont un tiers sont significatives et, en été, une majorité de baisses qui ne sont que rarement significatives.

*c) Zoom sur la Lozère*

Sur chacun des graphiques suivants a été tracée une droite de tendance. Bien entendu, cela n'a pas été fait « au doigt mouillé », mais par une approche mathématique.

Les graphiques 10 et 11 montrent que la température moyenne annuelle au mont Aigoual a tendanciellement augmenté de 0,95°C en cent ans, mais de 1,2°C depuis cinquante ans.

Le graphique 12 montre bien cette accélération.

Le graphique 13 montre que la température moyenne de l'été a augmenté plus vite encore : 1,8°C en cinquante ans.

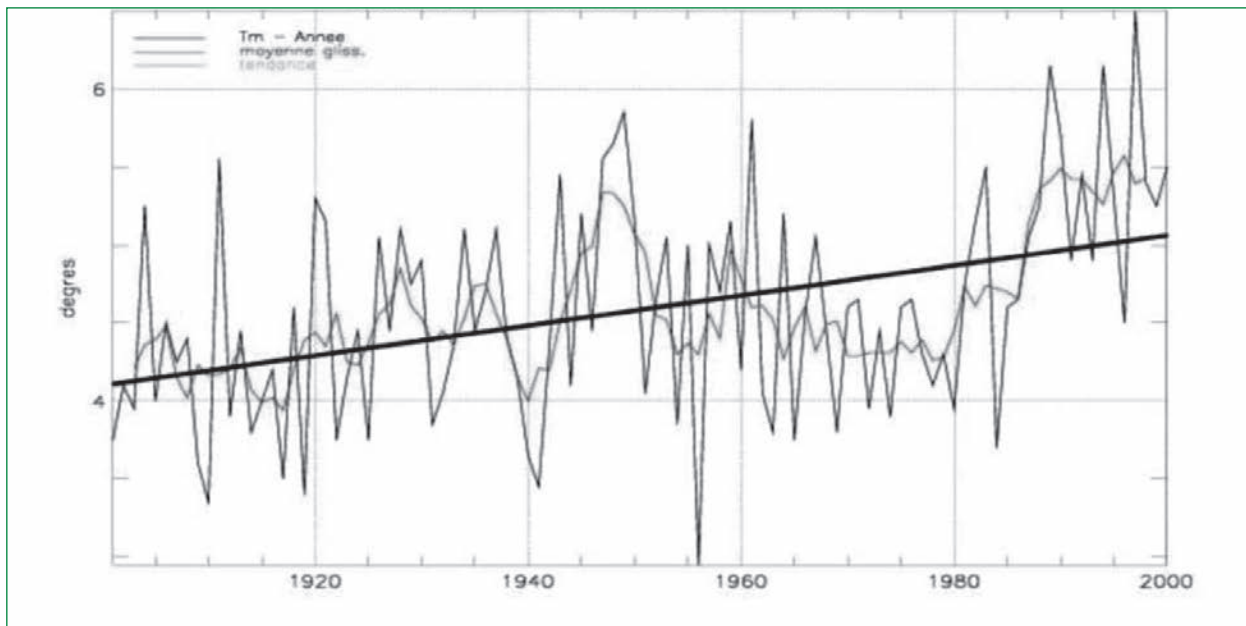
Le graphique 14 montre que la pluviométrie annuelle à Nasbinals a augmenté de façon significative de 13 % depuis cinquante ans.

Le graphique 15 indique que les précipitations estivales y ont tendanciellement baissé (de façon non significative) de 11 %.

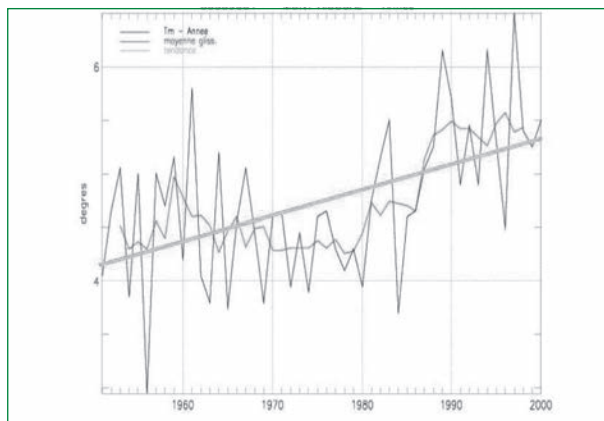
La pluviométrie a donc tendance à augmenter l'hiver, mais à baisser l'été. Simultanément, la température augmente, surtout l'été, ce qui accroît les besoins en eau de nos arbres. La ressource estivale baissant alors que le besoin augmente, il y a accroissement du risque de stress hydrique.

Le besoin en eau de la végétation est caractérisé par ce que l'on appelle l'évapotranspiration potentielle (ETP). Morgane Goudet, étudiante (Master EBE) en stage au CRPF, a établi les graphiques 16 et 17 qui concernent Le Puy-en-Velay, à défaut d'avoir pu disposer des valeurs de

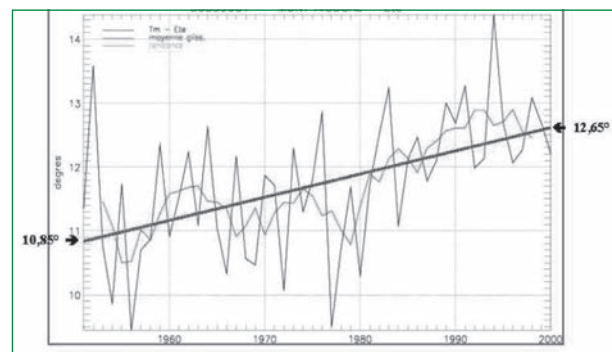




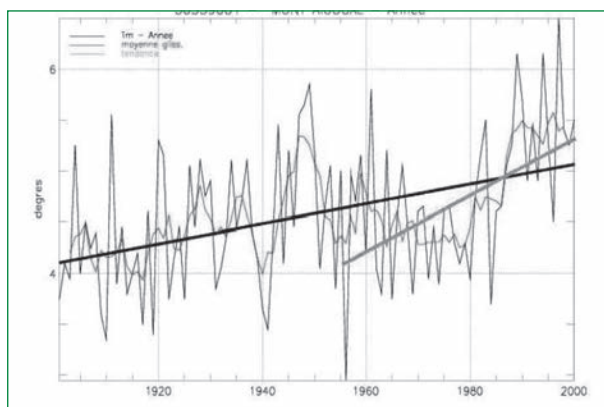
Graphique 10 : Aigoual - Tendence de la température annuelle moyenne de 1900 à 2000 : + 0,95°C



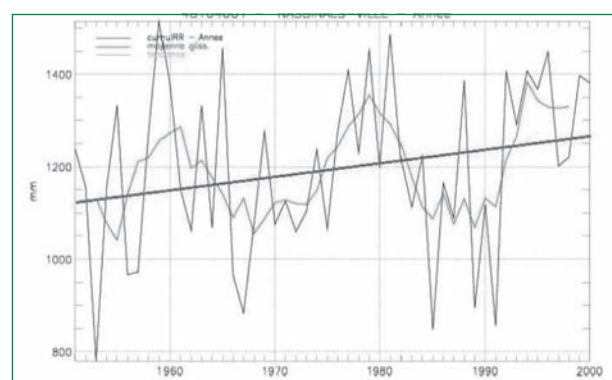
Graphique 11 : Aigoual - Tendence de la température annuelle moyenne de 1950 à 2000 : + 1,2°C



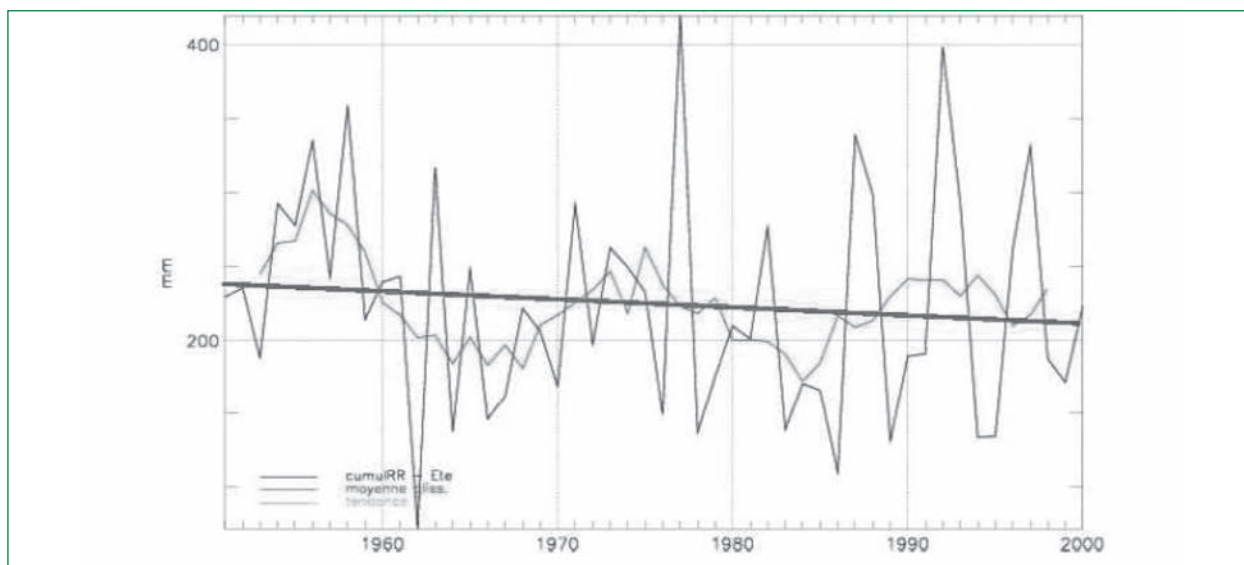
Graphique 13 : Aigoual - Tendence température été de 1950 à 2000 : + 1,8°C (moyenne année : + 1,2°C)



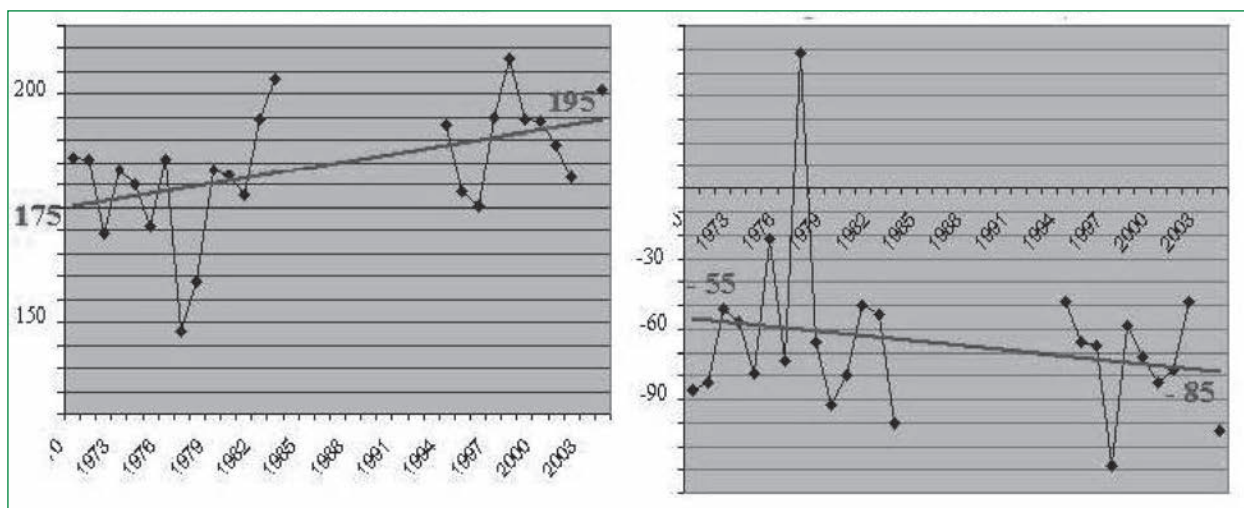
Graphique 12 : Aigoual - Tendence de la température annuelle moyenne de 1900 à 2000 : + 0,95°C et de 1950 à 2000: + 1,2°C



Graphique 14 : Nasbinals - Tendence des précipitations annuelles de 1950 à 2000 : augmentation significative de 141 mm, soit + 13 %



**Graphique 15 :** Nasbinals – Tendence des précipitations d'été de 1950 à 2000 : - 27 mm, soit - 11 % (baisse statistiquement non significative)



**Graphique 16 :** Augmentation tendancielle de 11,4 % du besoin représenté par l'ETP cumulée de mai à septembre

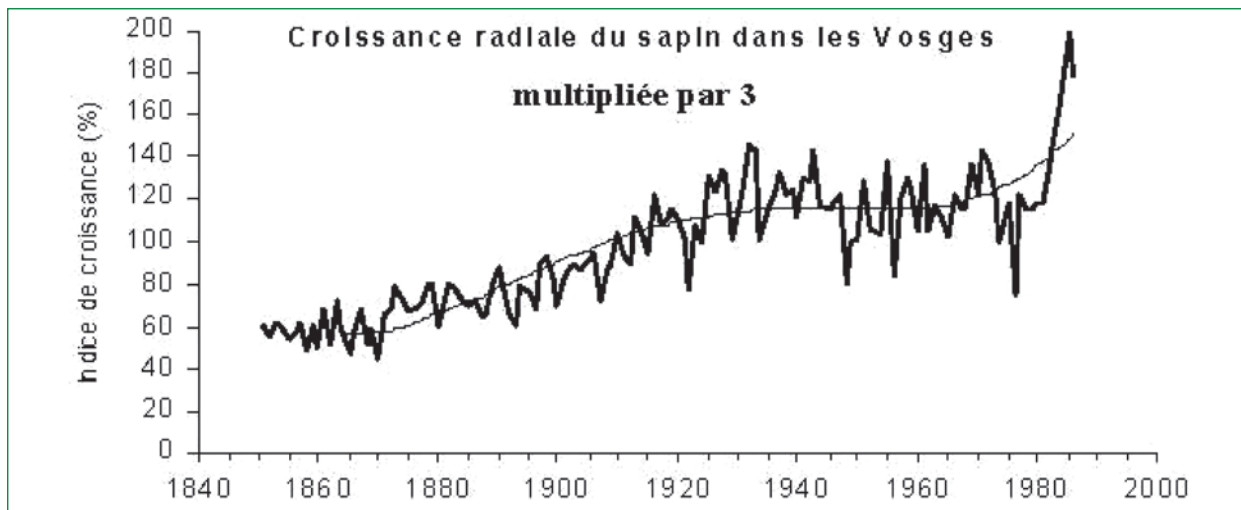
**Graphique 17 :** Augmentation tendancielle de 45 % du déficit (entre la ressource P et le besoin ETP) cumulé de mai à septembre

l'ETP sur une station météo de Lozère. Le graphique 17 montre une augmentation en été, de 45 % en trente ans, de l'écart entre le besoin en eau et la ressource. La capacité de nos sols forestiers à stocker les pluies hivernales pour faire face au déficit estival va devenir un facteur majeur pour notre forêt. Or, cette capacité est le plus souvent mal connue, me semble-t-il. Les « catalogues de stations forestières », comme celui de la Margeride lozérienne, peuvent apporter une première aide. Mais ne faudrait-il pas constituer des banques de données régionales conservant les résultats de reconnaissance du sol et élaborer, comme indicateurs de la qualité « hydrique » du sol, des clés basées sur l'observation de l'ensemble de la flore présente en un lieu donné ?

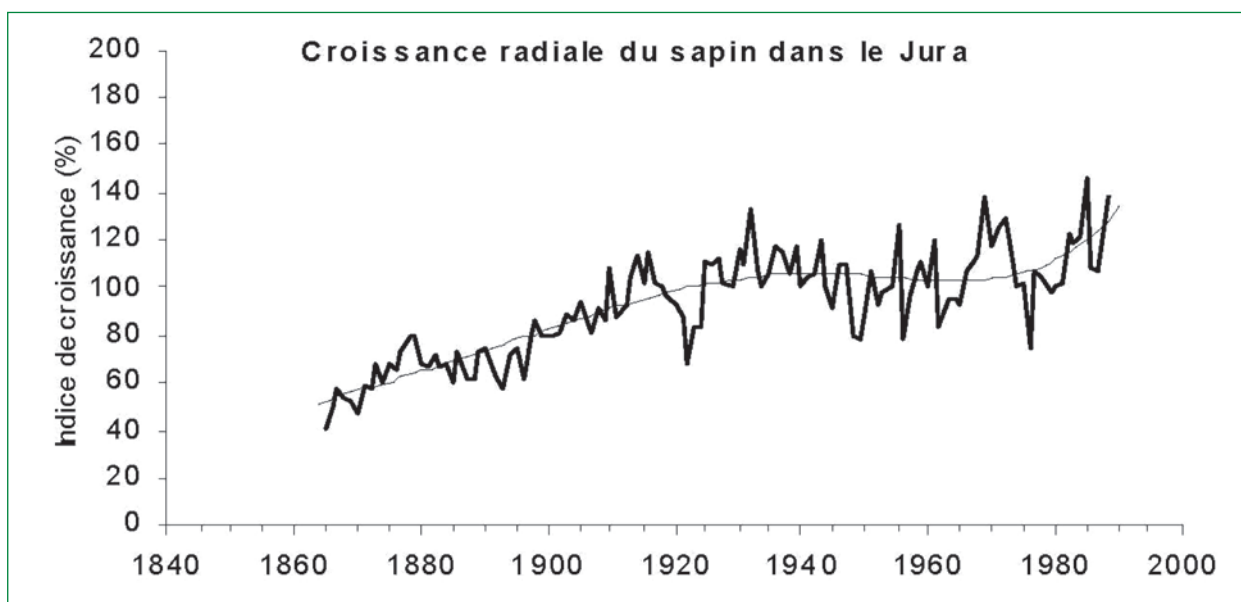
Un autre changement concrètement mesurable est l'augmentation de la croissance annuelle de nos arbres (*Les graphiques 18 à 21 sont extraits de travaux de l'INRA Nancy-Phytoécologie forestière - Becker et al., 1994*)

On constate, depuis 1850, une multiplication par deux, en moyenne, de l'accroissement annuel de la section de nos arbres, qui est la conséquence de trois facteurs liés à la pollution de l'atmosphère :

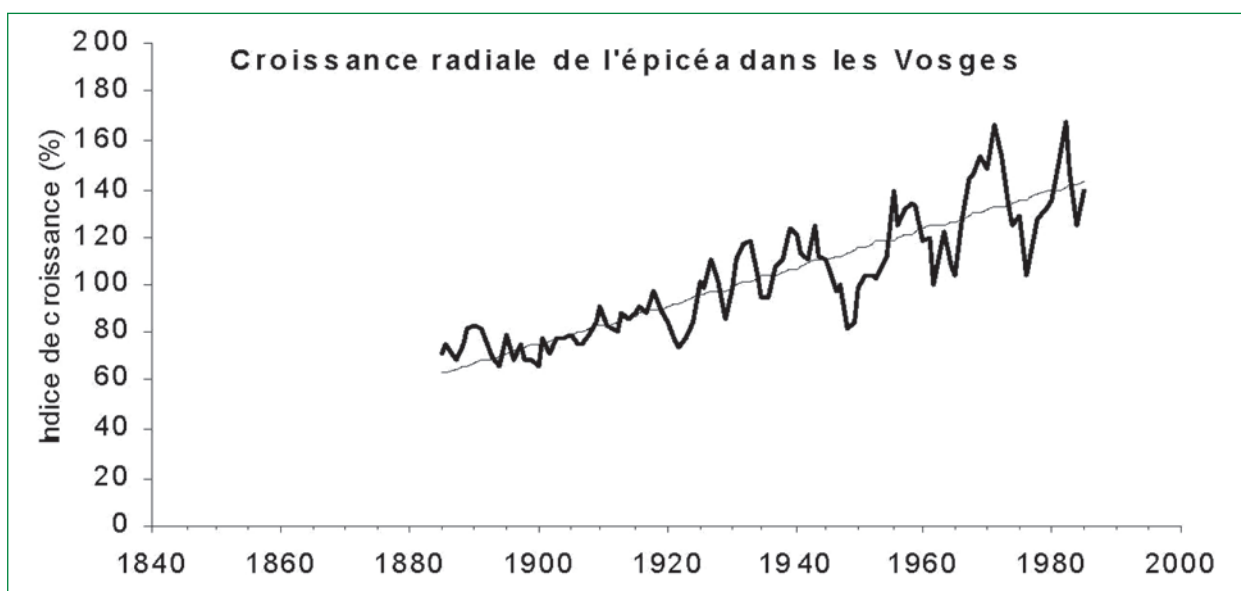
- ✓ accroissement du  $CO_2$ , qui est le carburant de la photosynthèse ;
- ✓ apports d'engrais azotés, dus aux oxydes d'azote émis par les moteurs à explosion ;
- ✓ allongement de la période de végétation, dû à l'augmentation des températures hivernales.



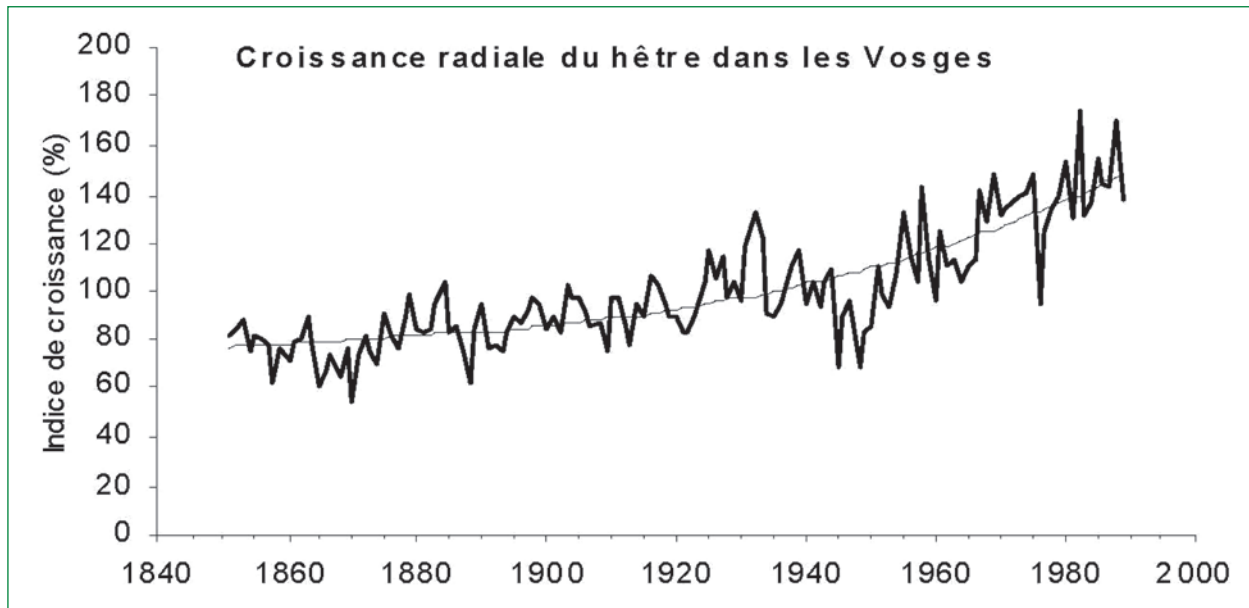
Graphique 18 : Croissance radiale du sapin dans les Vosges



Graphique 19 : Croissance radiale du sapin dans le Jura



Graphique 20 : Croissance radiale de l'épicéa dans les Vosges



Graphique 21 : Croissance radiale du hêtre dans les Vosges



Graphique 22 : Augmentation de 22 jours en cinquante ans (+ 12 %) de la période de croissance végétative – Météo France

Cet allongement de la période végétative a été estimé au mont Aigoual (voir le graphique 22) :

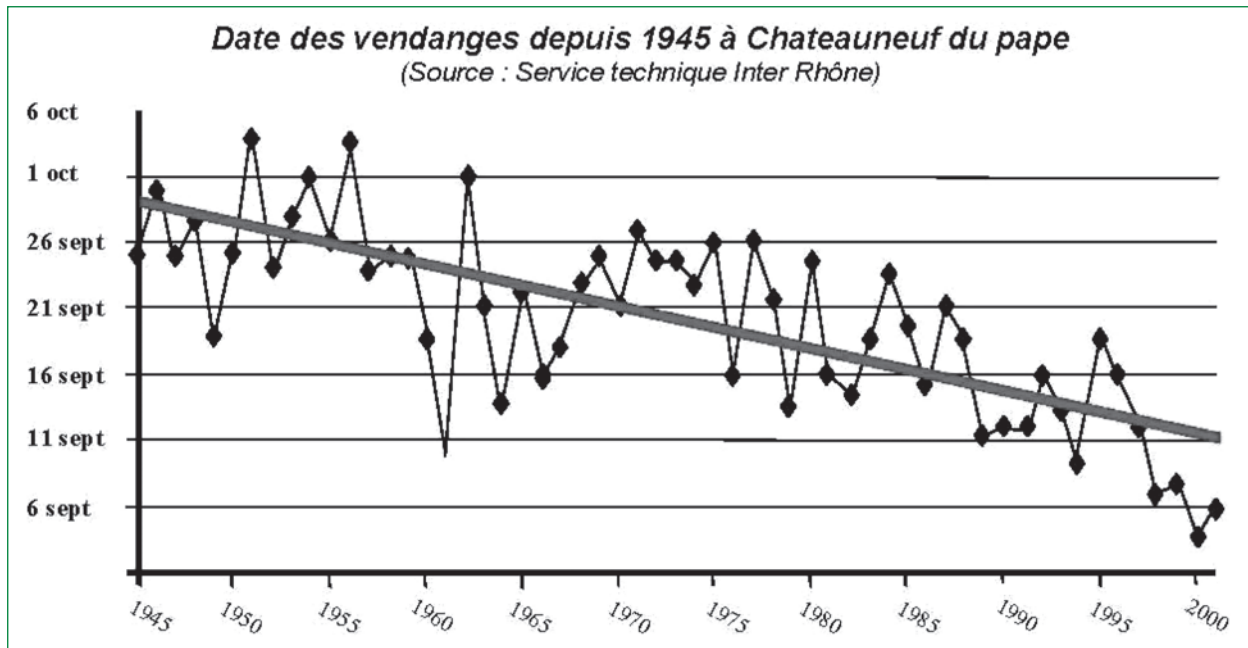
La période de l'activité végétative est considérée comme étant le nombre de jours, dans l'année, qui séparent les six premiers jours consécutifs, en début d'année, où la température moyenne dépasse 5°C et les six premiers jours, à l'automne, où la température moyenne retombe en dessous de 5°C. Cette durée a augmenté de 22 jours depuis cinquante ans. L'avance de la date des vendanges (voir le graphique 23) est une preuve très concrète de cet allongement.

Cet accroissement de la vitesse de croissance de nos arbres est aujourd'hui une aubaine, mais elle constitue un facteur supplémentaire d'accroissement des besoins en eau et donc de fragilisation de la forêt.

#### d) Premières manifestations fâcheuses

✓ **Le dépérissement massif des sapins Grandis**  
Dans les régions de l'Ouest (Bretagne, Normandie et des Pays de la Loire), des surfaces considérables de sapins





Graphique 23 : Date des vendanges depuis 1945 à Chateauneuf-du-Pape



Figure 1 : La forte progression vers le Nord de la chenille processionnaire du pin

Grandis, plantés dans les années 1960, ont commencé à dépérir en 1990, et la canicule de 2003 a accéléré le phénomène. Il n'y a plus aujourd'hui de Grandis en bon état dans ces régions. Ce dépérissement a été parachevé par des attaques d'armillaires (un champignon entraînant la pourriture des racines) sur des arbres déjà affaiblis. Plus de 80 % des boisements sont concernés, ce qui représente près de 7 000 hectares. Cet exemple montre l'impact du changement climatique (épisodes répétés de sécheresse) sur une espèce exigeante en humidité, qui avait été introduite en limite des stations susceptibles de la recevoir.

✓ **La forte progression vers le Nord de la chenille processionnaire du pin**

Cette chenille est très sensible à la température hivernale, car elle se développe en hiver.

Le réchauffement a permis sa progression vers le Nord et en altitude. Partie du Sud-Ouest du Massif Central, elle l'a contourné par l'Est et par l'Ouest, puis, au cours des douze dernières années, sa progression a été de 60 km vers le Nord, à partir d'Orléans (voir la figure 1 de la page précédente).

✓ **Les tempêtes**

Si la démonstration de leur lien avec le changement du climat n'est pas établie, les dégâts sont impressionnants et traduisent une grande vulnérabilité de nos forêts actuelles. Celle-ci est certainement due en partie à nos habitudes sylvicoles, mais sans doute aussi à la croissance accélérée de nos arbres.

*e) Au-delà de ces constatations factuelles que l'on peut faire, dès à présent, que peut-on prévoir pour l'avenir ?*

Des travaux de modélisation sont en cours. Les équipes de l'Inra de Nancy ont publié, il y a un an, les premiers

résultats de la recherche, dite « Carbofor », sur l'impact que peut avoir l'évolution du climat, d'ici à 2100, sur les grands types d'écosystèmes forestiers français (3).

L'Inra s'est d'abord efforcé d'identifier les paramètres climatiques qui pèsent sur la répartition géographique de nos principales essences forestières et qui expliquent leur répartition actuelle. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, beaucoup de progrès restent à faire sur ce plan car, au-delà des valeurs moyennes de la température et de la pluviométrie, et de leurs variations au cours de l'année, beaucoup d'autres paramètres sont à prendre en compte, tels que le rayonnement solaire reçu, l'évapotranspiration potentielle (ETP), le déficit hydrique, le nombre de jours de gel, la fréquence des gels tardifs printaniers..., dont les rôles respectifs et les synergies sont encore mal connus.

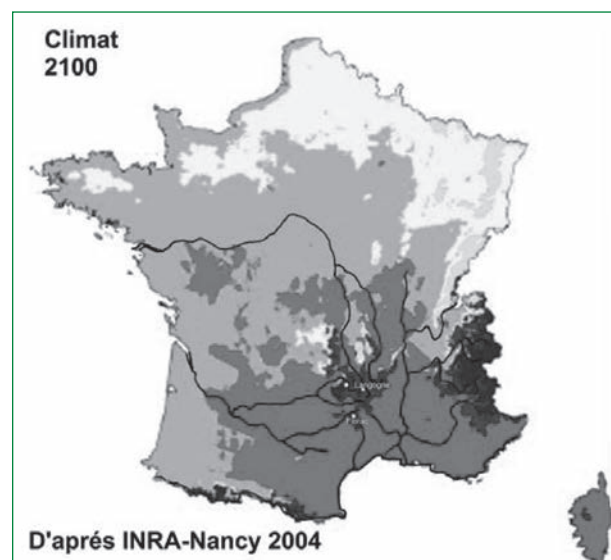
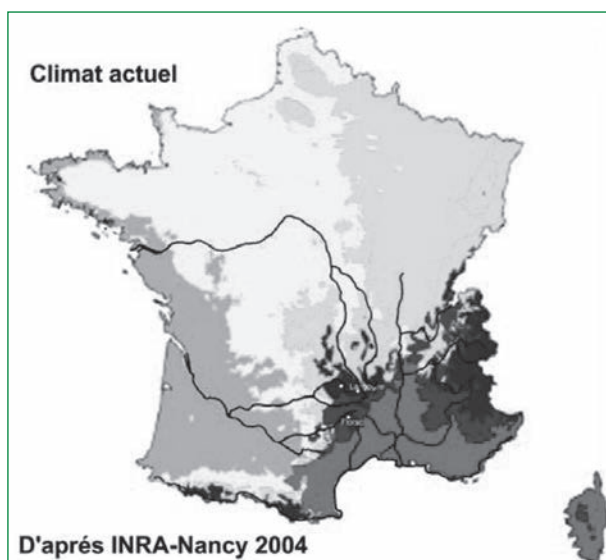
Ces travaux ont ensuite utilisé un modèle de Météo France (ARPEGE B2) comme outil de prédiction de l'évolution future du climat de notre pays. Ce modèle constitue une régionalisation des modèles planétaires. Il émet l'hypothèse que les émissions de CO<sub>2</sub> évoluent selon le scénario B2 du GIEC. Celui-ci fait partie des scénarios relativement optimistes et débouche sur une concentration en CO<sub>2</sub> de 660 ppm en 2100 (pour 367 ppm, aujourd'hui) et sur une élévation de la température moyenne de la planète de 2,7°C au-delà du réchauffement tel qu'il était déjà constaté en 1990.

Cette recherche a défini divers groupes d'espèces forestières ayant des exigences assez homogènes, que l'on trouve fréquemment associées sur un même territoire.

Ont ainsi été distingués (voir les figures 2 et 3) :

- ✓ 3 groupes d'espèces montagnardes ;
- ✓ 3 groupes d'espèces de plaine et de colline du Sud-ouest, du Centre-ouest et du Nord-est ;
- ✓ et, enfin, le groupe des espèces méditerranéennes.

Les figures 2 et 3 montrent donc bien le changement de localisation des groupes biogéographiques d'essences



Figures 2 et 3 : Evolution de la localisation des groupes « biogéographiques » d'essences

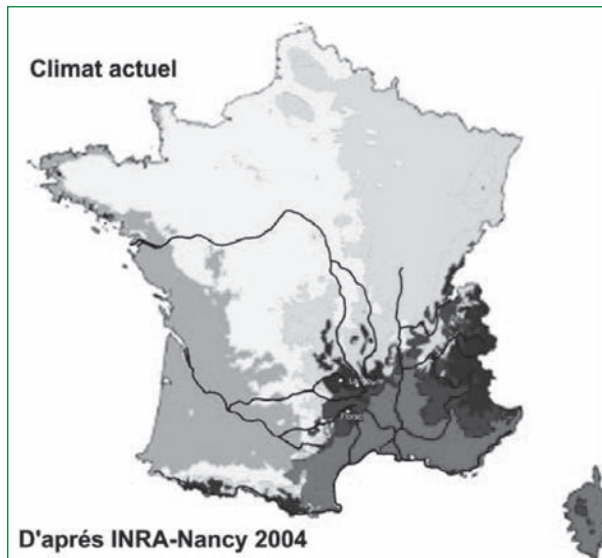


Figure 4 : Forêt montagnarde 2000

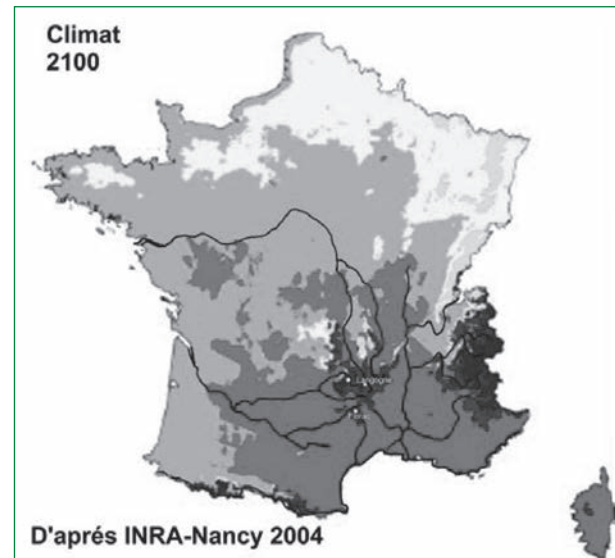


Figure 5 : Forêt montagnarde 2100

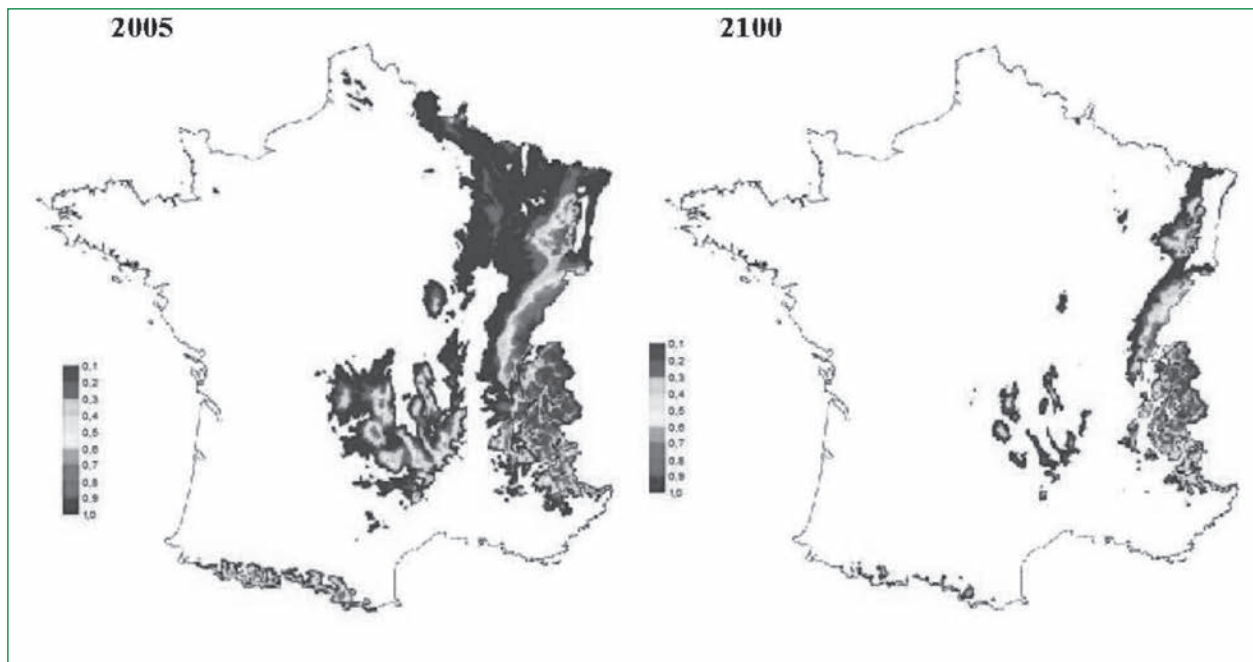


Figure 6 : Aire de l'épicéa 2005-2100

d'ici à 2100, et notamment la forte réduction des zones favorables aux espèces montagnardes et l'explosion du domaine de la forêt méditerranéenne.

Les figures 4 et 5 montrent le rétrécissement du champ de la forêt montagnarde.

La figure 6 montre la quasi-disparition, en dehors des Alpes, de l'aire de l'épicéa.

La figure 7 de la page suivante suggère la réduction de moitié de l'aire du hêtre.

La figure 8 dessine par contre la forte expansion de celle du pin maritime.

Ces simulations sont fort inquiétantes. Les évolutions à venir seront peut être atténuées par l'adaptabilité des

espèces qui n'a pas été prise en compte dans ces travaux, mais cette adaptabilité peut-elle beaucoup jouer face à un changement du climat aussi rapide ?

En sens contraire, les évolutions peuvent aussi être aggravées par les attaques d'insectes et de champignons qui trouveraient dans ce nouveau climat des conditions favorables à leur prolifération.

**Beaucoup d'incertitudes demeurent donc, mais nous devons être certains de la nécessité de ne plus cultiver notre forêt comme avant.**

*f) Peut-on déjà faire des recommandations pour changer nos habitudes en matière de choix des espèces à planter ou*

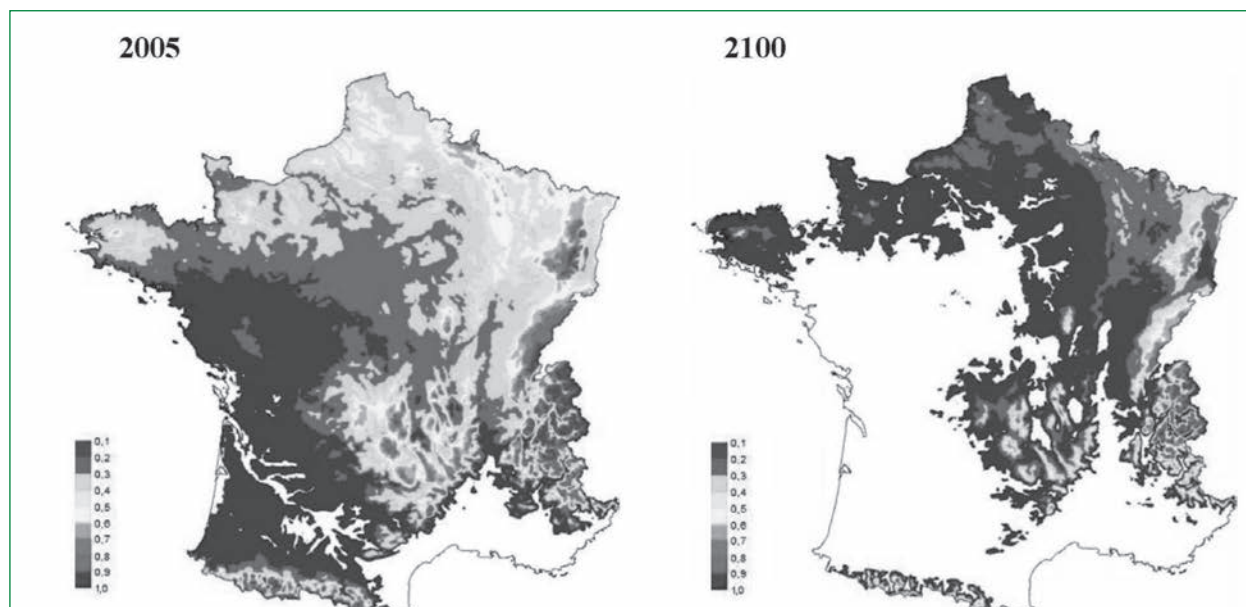


Figure 7 : Aire du hêtre 2005-2100

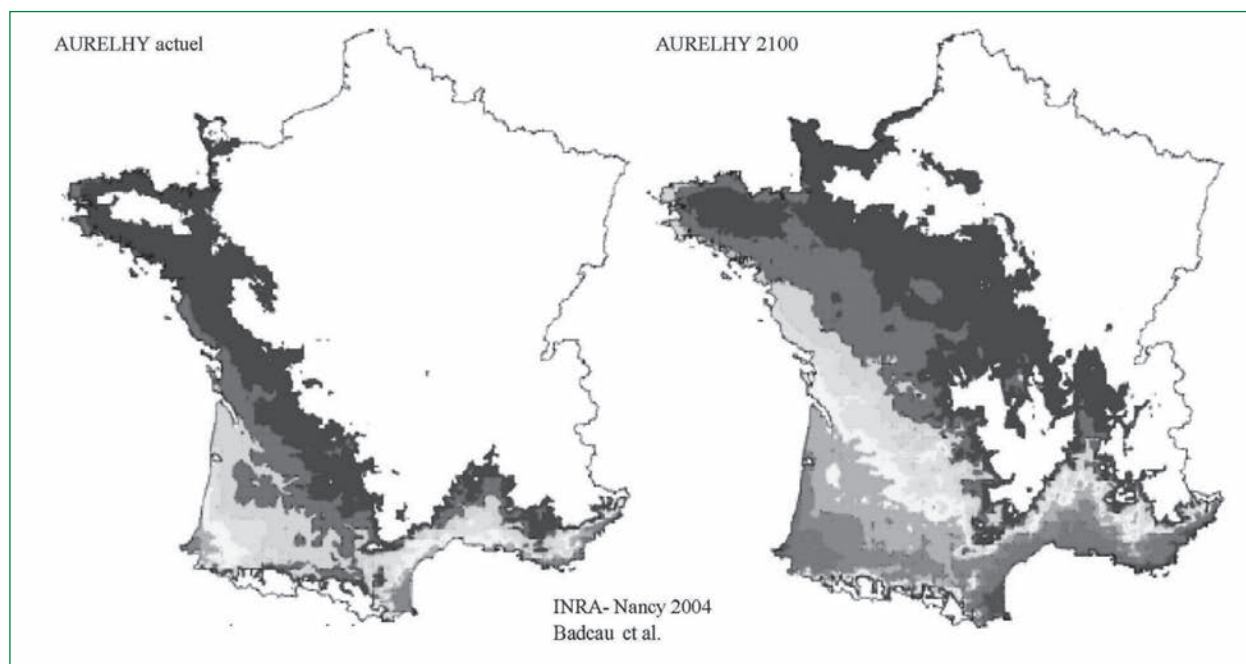


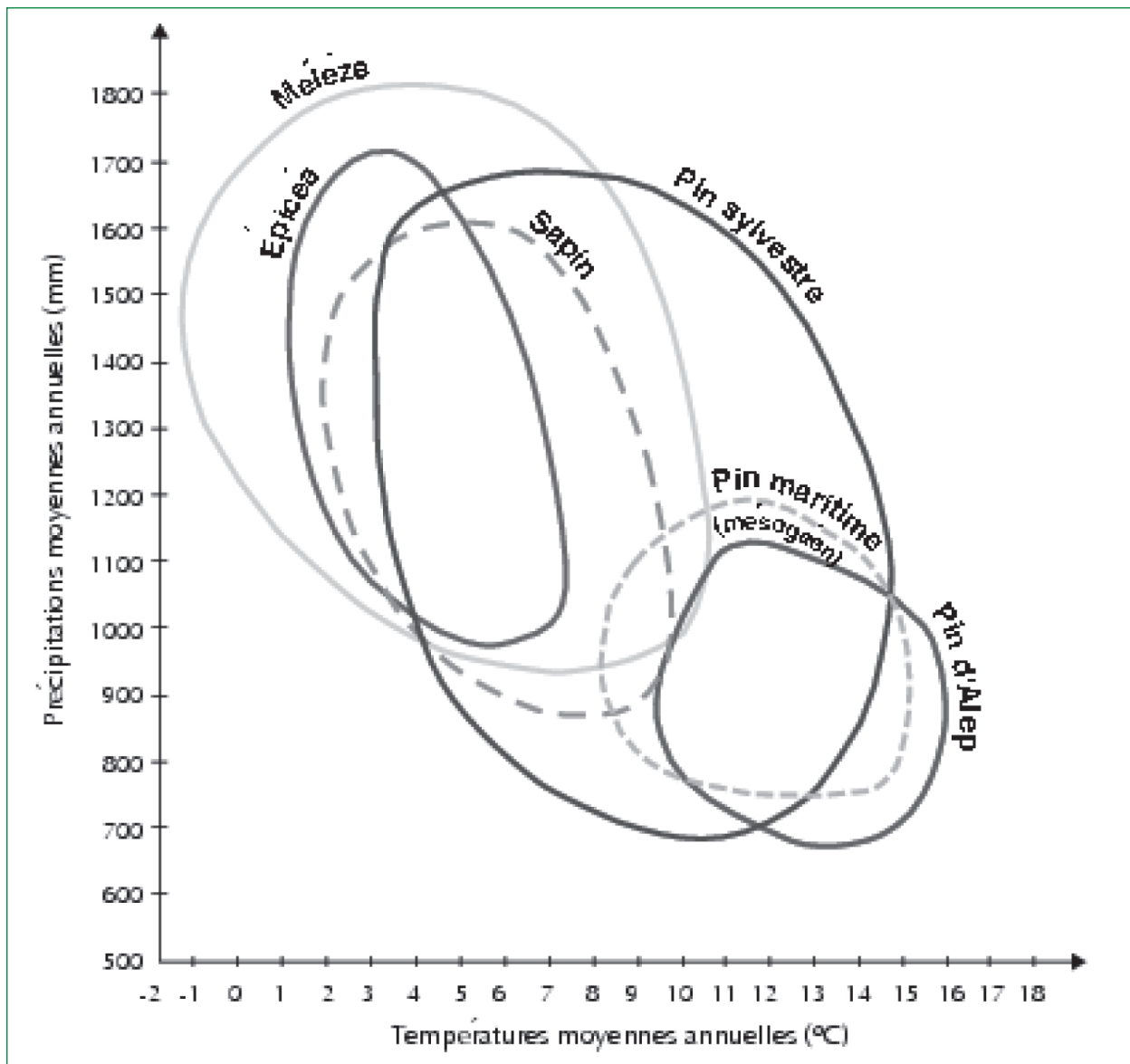
Figure 8 : Aire du pin maritime 2004-2100

de celles dont la régénération naturelle doit être évitée ou au contraire encouragée ?

Le graphique 26 de la page 82 présente ce que l'on appelle les aires ombrothermiques, c'est à dire la tolérance de diverses espèces vis-à-vis du couple « précipitations-température ». Elle donne une première idée de la direction à suivre, mais la température moyenne et la pluviométrie annuelle ne sont pas des critères suffisants. Il faut, en outre, tenir compte notamment des altitudes, des expositions, de la nature et de la profondeur du sol, de son hydromorphie, ... Philippe Riou Nivert, de l'Institut pour le Développement Forestier, (4) a entre autres suggéré, lors d'un récent exposé dans le Tarn, que, pour l'avenir :

- ✓ l'épicéa était à éviter ;
- ✓ le douglas pouvait être maintenu (reboisement, régénération naturelle), mais avec prudence là où les précipitations sont inférieures à 800 mm ;
- ✓ les espèces à développer seraient :
  - le mélèze là où les précipitations sont supérieures à 800 mm ;
  - le sapin de Nordmann, le pin sylvestre et le cèdre de l'Atlas (la provenance et la sylviculture étant à préciser pour ces trois espèces) ;
  - le pin laricio de Corse enfin, là où les précipitations excèdent 700 mm.
  - [et qu'il fallait - Ndlr] jouer la carte de la diversité (peuplements mélangés ou parcelles d'une même





Graphique 26 : « Précipitations – température »

essence dont la surface serait limitée à quelques hectares) en associant des essences dont les exigences ne sont pas les mêmes, car il ne servirait à rien de mélanger des essences d'ombre également exigeantes en eau.

*g) Quelles recommandations ensuite pour la sylviculture des forêts déjà installées ?*

- ✓ En premier lieu, réduire la concurrence pour l'eau par des éclaircies plus fortes ou, mieux, plus fréquentes (afin que chacune perturbe le moins possible le boisement) et éliminer la végétation des sous-bois.
- ✓ Réduire l'âge de récolte des peuplements quand leur avenir est incertain, c'est-à-dire quand leur croissance ou leur état sanitaire sont médiocres, ou que l'on a des doutes sur leur adéquation à la station.

- ✓ Veiller à la stabilité des forêts, en leur appliquant une sylviculture guidée par les facteurs d'élancement et d'espacement, ainsi qu'en soignant le traitement des lisières, surtout Ouest, qui devront être étagées et perméables (voir la figure 9 de la page suivante).

Ces suggestions sont en phase avec tous les bons traitements de sylviculture, tels qu'on les connaît aujourd'hui, mais il faut sans doute aller plus loin, sur chacun de ces thèmes. Il ne s'agit plus seulement d'optimiser la valeur de la récolte, mais également de réduire les risques de dépérissement des peuplements, surtout s'ils sont jeunes aujourd'hui.

Ces suggestions ont hélas un défaut commun qui est de coûter cher, alors que la rentabilité de la forêt est aujourd'hui bien mal en point. Le prix du bois, constaté lors des ventes de notre coopérative, a été divisé par quatre en monnaie constante, depuis 1977.

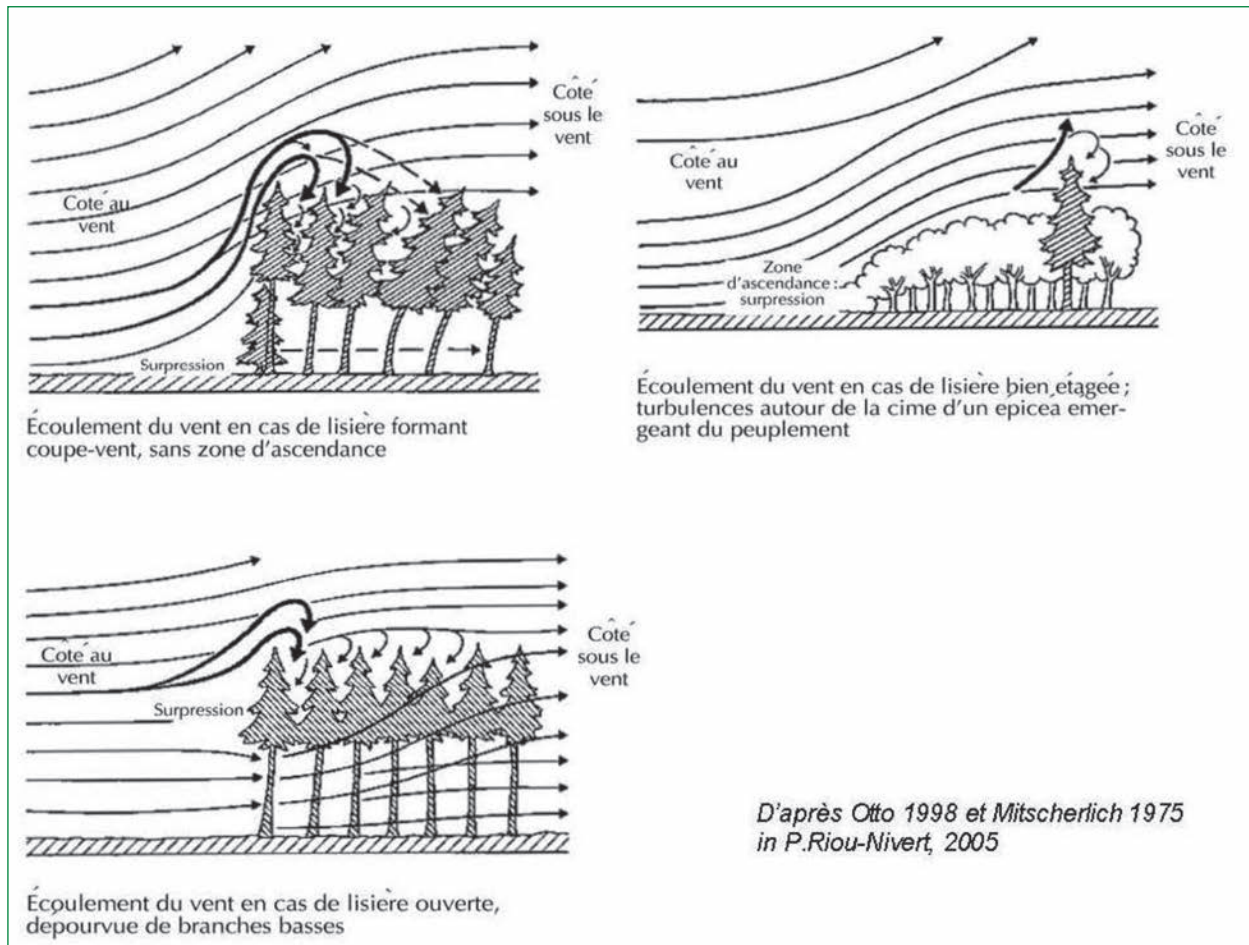


Figure 9 : Recommandations pour la sylviculture des forêts déjà installées, d'après Otto 1998 et Mitscherlich 1975, in P. Riou-Nivert, 2005.

### Quel impact sur l'économie de la forêt ?

Paradoxalement, et heureusement, le changement du climat devrait aussi avoir un impact positif sur l'économie de la forêt.

Si nous nous organisons pour susciter toutes les économies d'énergie fossile dont le coût s'élève à plusieurs centaines d'euros par tonne de carbone (notamment par la taxe que j'ai longuement évoquée), la marge pour vendre du bois-énergie sera considérablement accrue. Il en ira de même, bien qu'à un degré moindre, pour vendre du bois d'œuvre en substitution de matériaux concurrents, dont la production consomme beaucoup d'énergie (fer, ciment, aluminium, plastique) et dont le coût ne pourra que croître.

Par ailleurs, la forêt constitue, au moins pour le moment, un puits de carbone dont la valeur pourrait être un jour monétarisée (voir la figure 10 de la page suivante).

Essayons de quantifier ces évolutions en partant de la référence que constitue la valeur actuelle, sur pied, de l'ensemble du bois commercialisé (bois d'œuvre, bois d'industrie et bois de feu), qui est de 1,34 milliard d'euros (G€) par an. Le bois-énergie nous fait économiser aujourd'hui 5 millions de tonnes d'équivalent-pétrole (Mtep) d'énergie fossile par an, et l'on prévoit que ce chiffre pourrait être porté

à 13 Mtep. Ce bois-énergie ne procure aujourd'hui qu'une recette très faible à la sylviculture française, mais, si l'on retient l'ordre de grandeur de 500 € comme valeur attribuée à une tonne de carbone évitée et si l'on renchérit d'autant le prix TTC de l'énergie fossile, la marge potentielle du bois énergie par rapport à ses concurrents fossiles serait globalement accrue de 5,4 G€ /an.

Si les forestiers touchaient la moitié de cette marge, leur revenu actuel serait triplé ; s'ils n'en percevaient que le tiers, leur revenu serait encore plus que doublé.

Le bois d'œuvre devrait aussi connaître une forte croissance en volume et en prix. S'il est difficile de chiffrer l'augmentation des coûts des matériaux concurrents du bois dans la construction, on peut cependant avoir une idée de ce que pourrait être l'ordre de grandeur de l'augmentation des débouchés dans ce secteur.

En effet, sur les 220 000 maisons individuelles construites chaque année en France, 7 000 seulement sont, aujourd'hui, des maisons à ossature bois ou, mieux, en bois massifs empilés, soit 3,2 % des maisons individuelles construites.

Ce pourcentage est à comparer au 90 % de l'Amérique du Nord et de la Scandinavie, et aux 50 % du Japon.

Le jour où nous construirons en bois 90 % de nos maisons individuelles, les débouchés de la forêt en bois d'œuvre seront accrus de 2 à 3 millions de m<sup>3</sup> par an. Ce volume

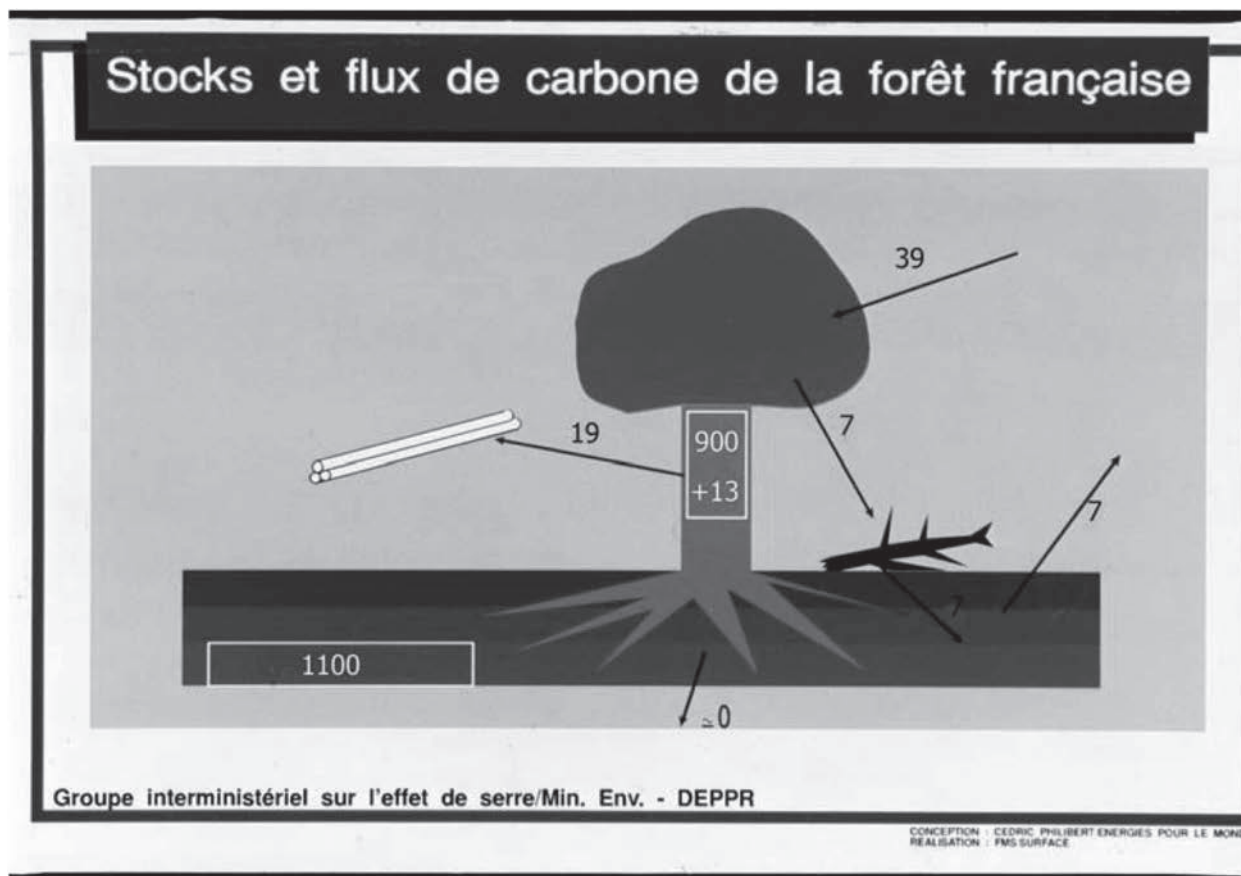


Figure 10 : Stocks et flux de carbone de la forêt française

est à rapprocher des 10 millions de m<sup>3</sup> de bois façonnés produits aujourd'hui par nos scieries.

Si, enfin, les 13 millions de tonnes/an d'augmentation du stock de carbone en forêt étaient également portés au crédit de la sylviculture, sur la base par exemple du tiers ou de la moitié des 500€ par tonne de carbone, cela représenterait entre 2,2 et 3,2 fois le revenu actuel.

Ainsi, au total, sans tenir compte du bois d'œuvre, la valorisation de la forêt serait multipliée par quatre ou cinq.

S'agissant des aides publiques à la forêt, qui ont globalement fortement diminué depuis trente ans, je pense profondément que l'on ferait mieux de consacrer plus d'argent public aux études et recherches propres à guider la sylviculture, qu'à subventionner des plantations qui ne seraient pas très judicieusement choisies. Il convient effectivement de développer les recherches sur les facteurs qui délimitent les stations favorables aux diverses espèces, les recherches sur les insectes ravageurs et maladies pathogènes et sur l'amélioration de la sélection des semences.

### En conclusion...

Le changement climatique dû à la consommation d'énergie fossile est une réalité aux conséquences graves.

Nous devons tous militer pour la taxation de cette énergie, afin de limiter les dégâts qui concerneront particulièrement la forêt.

Il est indispensable d'affiner la modélisation du futur climat pour simuler ses conséquences ; de poursuivre les observations permettant de mieux connaître le fonctionnement de l'écosystème forestier ; de développer les recherches sur les provenances des essences, leur adaptation, leur amélioration génétique,...

Nous avons également grand besoin des conseils d'un CRPF de mieux en mieux documenté.

L'économie de la forêt devrait nous permettre de financer les adaptations indispensables de la sylviculture.

### Notes

\*Ingénieur général des Mines honoraire, ancien président de la Mission interministérielle sur l'effet de serre.

(1) Expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts et sur leur reconstitution, coordonnée par Olivier Laroussine et Sébastien Drouineau du GIP ECOFOR.

(2) « Etude des longues séries homogénéisées de données de températures et de précipitations » de Jean-Marc Moisselin, Michel Schneider, Claire Canellas et Olivier Mestre, de Météo France.

(3) « Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises » par Vincent Badeau, Jean-Luc Dupouey, Catherine Cluzeau, Jacques Drapier, Christine Le Bas de l'INRA Nancy, Inventaire Forestier National, Unité Infosol INRA.