



# Dominique DRON

Dominique Dron est ingénieur en chef des mines et professeur à l'École des Mines de Paris, au centre Energétique et Procédés. Elle préside également depuis 2000, le Comité scientifique et technique du réseau environnement du CNAM.

Présidente de la Mission interministérielle de l'effet de serre entre 2002 et 2004, elle crée et dirige à l'INRA le Projet ATEPE (agriculture, territoires et environnement dans les politiques européennes) de 2000 à 2001. Ce dernier a pour but de travailler sur les marges de manœuvres environnementales des productions agricoles en France. Avant cela, elle a dirigé la cellule prospective et stratégie du Ministère de l'environnement de 1994 à 1999, après avoir piloté à l'ADEME en 1992-3 le programme prioritaire « Déchets », puis occupé les fonctions de directrice du développement ; auparavant elle fut de 1989 à 1992 chef du service de l'environnement industriel en DRIRE Provence-Alpes-Côte d'Azur. Parallèlement, elle a assumé les fonctions de Responsable (2000-2004) de « Responsabilité et environnement » (*Annales des mines*), Rapporteur de la Commission française du développement durable (1996-1999), Vice-présidente de la task force « Transports durables » de l'OCDE (1996-1999), Membre du Forum des prospectivistes environnementaux du G8 (1996-1999), Membre du groupe de pilotage haut niveau de la stratégie environnementale de l'OCDE (1999-2000).

**Préserver la planète... et l'humanité :  
nos marges de manœuvre**



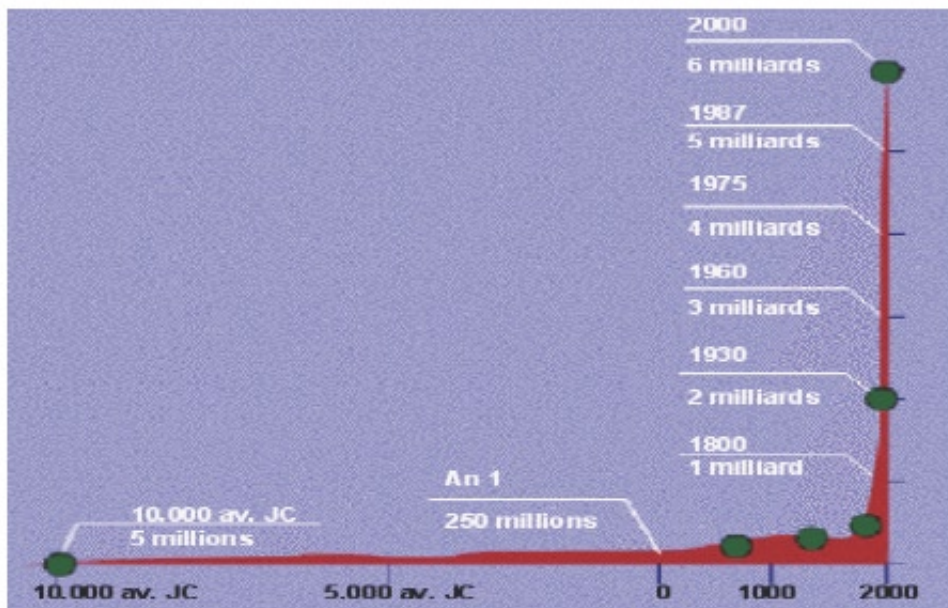
**L'ACCÉLÉRATION DU PHÉNOMÈNE CLIMATIQUE**

Je vais vous raconter une histoire, celle des décennies qui sont devant nous. Je voudrais la replacer d'entrée en faisant fond sur quelques ordres de grandeur qu'il est utile de conserver à l'esprit. Lorsque nous nous tournons ensuite vers ce que nous devons faire, nous voyons combien cela sera contraire à ce que cinquante années d'abon-

dance énergétique nous ont conduit à considérer un peu rapidement comme des habitudes éternelles.

Tout d'abord, je voudrais souligner la rapidité avec laquelle ce problème d'effet de serre s'est posé à nous. Vous voyez sur cette échelle que l'humanité est restée au-dessous du milliard d'habitants pendant très longtemps, jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle et que depuis, et notamment grâce à l'utilisation importante des combustibles fossiles qui ont

9 — Dominique DRON



[www.manicore](http://www.manicore) d'après Schilling & Al. (1977), IEA (1997).

©D. Dron ENSMP - MURS 210206 -

2

Figure 1

remplacé la peine humaine par de l'énergie apparemment abondante et peu chère, nous sommes montés très, très vite à plus de 6 milliards d'habitants.

Parallèlement à cet accroissement démographique, la consommation d'énergie par terrien a elle-même été multipliée par un facteur 8, et vous voyez que cette consommation d'énergie comporte une montée très récente, après la seconde guerre mondiale, au niveau planétaire.

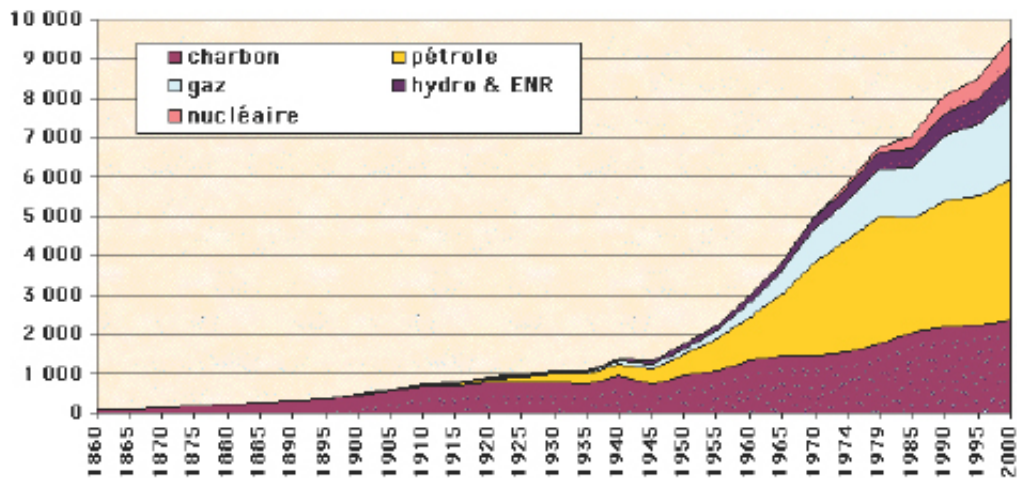
La consommation énergétique s'est développée extrêmement vite, à 89 % sur base d'énergie fossile : charbon, pétrole et gaz. Nous avons donc envoyé dans l'atmosphère, avec les gaz à effet de serre induits, une véritable gifle au système physico-chimique planétaire, à l'échelle du temps qu'il a fallu à ce système pour se mettre en équilibre, même si les équilibres ne sont jamais statiques, comme vous le savez.

10

Préserver  
la planète  
et l'hu-  
manité

## Consommation mondiale d'énergie (Mtep) www.manicore d'après

Schilling & Al. (1977), IEA (1997), Observatoire de l'Energie (1997)-



Depuis 1850, par habitant : **de 1 500km/an à 4 500 km/an (voyageurs)**  
**et de 10 t\*km/an à 10 000 t\*km/an (marchandises)**

Source Ademe

©D. Dron ENSMP - MURS 210206 -

3

Figure 2

Quels sont les deux moteurs de l'accroissement de consommation énergétique ? Deux sont majeurs aujourd'hui : la production d'électricité et le transport: ainsi, depuis 1850 nous avons triplé la distance parcourue par habitant, nous sommes passés en moyenne de 1 500 kilomètres à 4 500 kilomètres par an. En moyenne, car le paysan du Burkina-Faso se déplace beaucoup moins que le cadre de New York... Le constat est encore plus marqué pour les marchandises ; le facteur multiplicatif a été de 1000 : nous sommes passés de 10 tonnes/kilomètre/an à 10 000 tonnes/kilomètre/an/habitant. Nos activités ont donc produit ce petit excédent de carbone, de 6 (ou 7) gigatonnes<sup>1</sup> de carbone (ou carbone équivalent) par an. La rapidité de cette injection et le fait qu'elle n'ait pas de contrepartie, sont suffisants pour perturber l'ajustement planétaire. Car vous savez que pour déplacer un équilibre chimique, de petites quantités suffisent.

Ces modifications sont d'un ordre de grandeur que nous n'avons pas connu, en termes de CO<sub>2</sub>, d'après les carottages, depuis au moins 10 millions d'années. D'autre part, dans le passé, à l'inverse, ce furent les modifications de la température de la Terre associées essentiellement aux phénomènes astronomiques qui produisirent les alternances glaciation/ère interglaciaire, la forme de l'orbite de la Terre, l'inclinaison sur son axe, etc., et ce sont les hausses de températures qui ont entraîné les hausses de CO<sub>2</sub>.

---

<sup>1</sup> 1 gigatonne = 1.000.000.000 tonnes

Ce passé nous apprend plusieurs choses : d'une part, lorsque la température croît, elle déclenche des phénomènes accélérateurs que nous observons aujourd'hui, et qui accroissent les dégagements de CO<sub>2</sub>. Ainsi, lorsque vous augmentez la température de l'océan, vous diminuez sa capacité à dissoudre le CO<sub>2</sub>. Lorsque vous augmentez le CO<sub>2</sub> dissous dans l'océan, vous diminuez le pH de l'océan, donc la quantité de phytoplancton à coquille calcaire ; or leurs squelettes forment ensuite par sédimentation les roches carbonatées qui sont la pompe solide à CO<sub>2</sub> du globe. Lorsque vous faites fondre les glaces, vous diminuez l'albédo de la Terre, ce qui renforce sa capacité à absorber de la chaleur et fait donc fondre à nouveau les glaces, etc. Vraisemblablement, le passé nous dit que nous n'avons à attendre d'aucun phénomène naturel la sortie du cycle dans lequel nous sommes entrés par l'autre côté, c'est-à-dire par l'injection de CO<sub>2</sub> qui commence à faire monter la température, qui elle-même commence à provoquer des phénomènes « naturels » de relargage de CO<sub>2</sub>. Il nous revient par conséquent de le faire. Et je tiens à dire tout de suite que vous allez voir défiler des catastrophes dans une première partie de cet exposé, mais que nous avons encore les moyens d'éviter 80 % de tout cela.

Il m'a été demandé de faire un petit rappel des enjeux auxquels nous allons devoir faire face. Lorsque nous parlons d'effet de

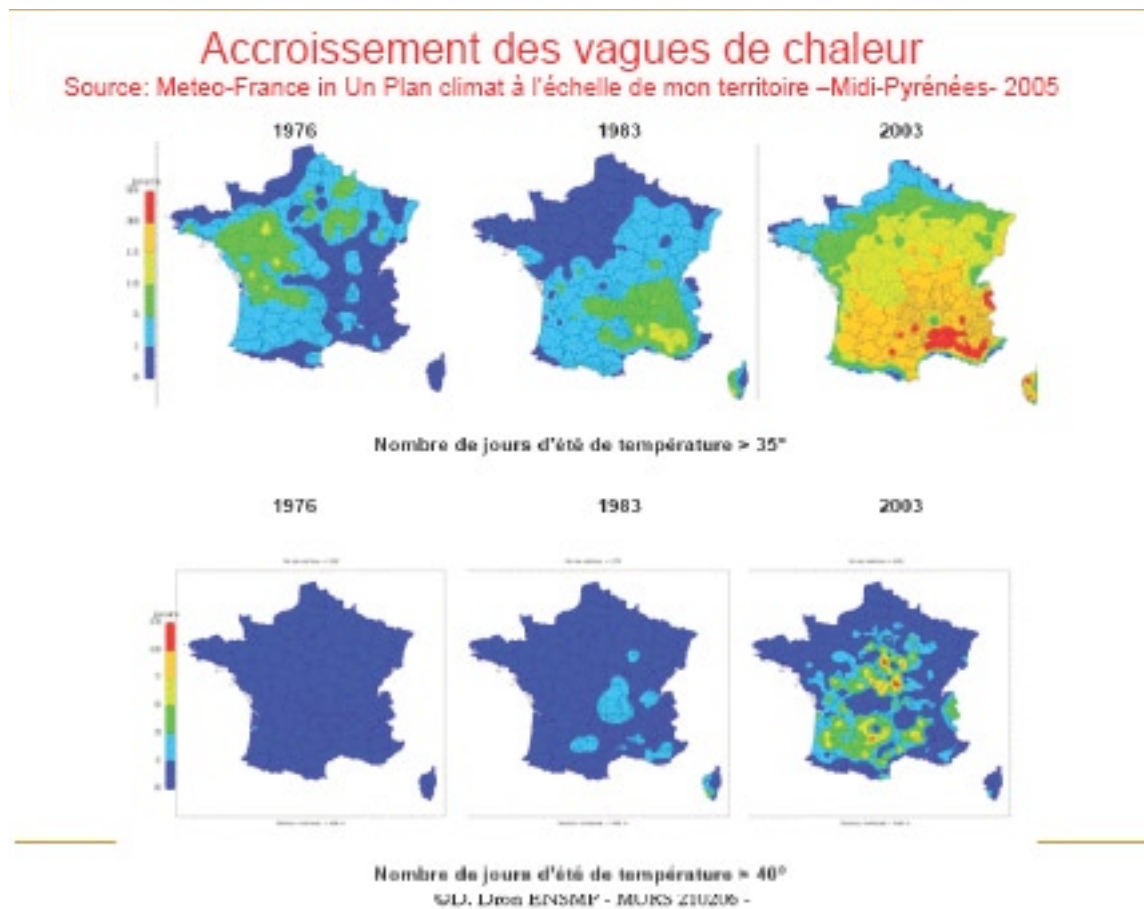
serre, nous parlons souvent de la nécessité de réduire ces gaz à effet de serre. Nous commençons aussi à parler davantage de la nécessité de s'adapter à la modification de température, puisque le mieux que nous puissions espérer aujourd'hui est une augmentation de 2°C de la température moyenne, soit environ de 3°C chez nous et de 6 à 8°C aux pôles, cela dépend des modèles. De toute façon, ce sont des ordres de grandeur déjà très difficiles à absorber par les écosystèmes. Aujourd'hui, nous avons observé des hausses de températures non seulement

globales, mais sur l'Europe et également sur la France, notamment des hausses des températures minimales, un accroissement des vagues de chaleur depuis cette fameuse année 1976 dont pourtant le nombre de jours d'été aux températures supérieures à 35°C était très limité, et qui a atteint à peu près toute la France durant l'été 2003. Quant au nombre de jours à une température supérieure à 40°C, il n'y en avait pas, même en 1976, et la situation est tout à fait différente en 2003.

12

Préserver  
la planète  
et l'hu-  
manité

Figure 3



Pourquoi parlons-nous de 2003 alors qu'il s'agit d'un évènement considéré comme extrême ? Comme le disait un agronome de l'INRA, « nous avons vécu en 2003 ce que nous « cauchemardions » de pire pour 2070 ». C'est-à-dire que l'évolution climatique ne se fait pas de manière linéaire, mais procède par à-coups avec une apparition de phénomènes plus extrêmes, qui ponctuent une tendance lourde. Vous voyez que l'augmentation de température de 2003, qui ne correspond sur la moyenne de l'année qu'à une augmentation de l'ordre de 1°C, signifie en fait des hausses de températures loca-

lement supérieures à 5°C par rapport aux températures extrêmes d'été et notamment sur une bonne partie de la France.

Concernant les précipitations, comme dans un monde qui contient plus d'énergie les phénomènes se produisent de manière plus intense, et avant que les cellules de convection de l'atmosphère ne changent de forme, il pleuvra plus là où il pleuvait, il fera plus sec là où il faisait déjà sec. Effectivement, à notre petite échelle européenne, nous retrouvons sur les années passées ce que les modèles décrivent pour la

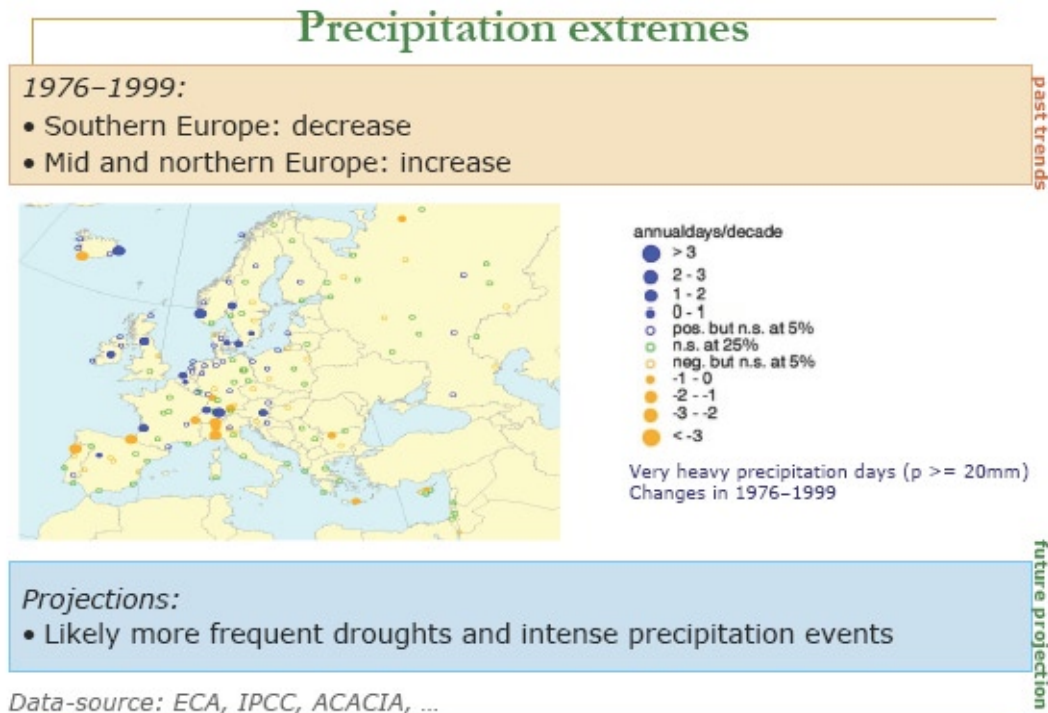


Figure 4



suite, c'est-à-dire plus de pluie vers le nord et moins de pluie vers le sud. Sans être exhaustive, je voudrais insister sur deux points. Le premier est que nous nous posons encore très récemment des questions sur la relation entre changement climatique et événements extrêmes, notamment la fréquence des cyclones ; or lorsque nous ne nous occupons plus du nombre de cyclones, mais de l'énergie totale qu'ils dissipent, nous voyons un doublement de celle des cyclones atlantiques entre 1930 et 2004, avec un doublement de la part des cyclones de catégorie 4 à 5, comme Katrina et Wilma, entre 1970 et 2004. Le second point est que ces modifications, qui se traduisent par des progressions de la température moyenne très différentes d'un point à l'autre du globe, se traduisent également en un point donné, par exemple en France, par des réactions importantes des écosystèmes. Alors que la température moyenne globale s'est élevée de 0,6°C depuis 1950, elle a gagné 0,9 à 1°C en France, ce qui entraîne une migration de 200 kilomètres vers le nord des conditions spécifiques des écosystèmes et des paysages, et déjà de certaines espèces.

Les modèles permettent d'intégrer de façon beaucoup plus complète qu'auparavant les processus de l'atmosphère, de la biosphère et de l'océan. Ils fournissent des scénarios de température : ceux publiés par le GIEC sont bien connus. Voici les courbes de températures moyennes de l'hémisphère nord estimée depuis l'an 1000, de la température moyenne mesurée depuis 1860 et

projetée pour le siècle qui vient, et je voudrais y souligner trois choses. La première est que le XIX<sup>e</sup> siècle montre une évolution des températures en rupture de pente totale par rapport aux mille ans qui ont précédé : il n'y a rien de commun non plus entre la différence de température que nous venons de vivre sur ce XX<sup>e</sup> siècle, presque un degré vers le haut, et ce que l'on appelle le « petit âge glaciaire », moins d'un demi-degré vers le bas. Le second point est qu'il n'y a non plus rien de commun entre ce que nous avons vécu durant le siècle dernier et ce qui nous attend dans celui qui commence, même dans les versions les plus optimistes, c'est-à-dire avec simplement 2°C de plus de température moyenne (figure 5).

Nous sommes donc conduits à envisager une différence de température en 100 ans de l'ordre de celle qui existe entre glaciations et périodes interglaciaires, souvent plutôt établie en 10 000 ans. Cette vitesse centuplée explique aussi pourquoi les écosystèmes ont de la difficulté à suivre, pourquoi nous humains risquons également d'avoir un peu de difficulté. En outre, l'humanité, depuis qu'elle existe, n'a semble-t-il jamais connu de températures supérieures à environ 1,5 à 2°C de plus qu'aujourd'hui, il y a 6000 à 8000 ans.

Devant ce constat assez vertigineux, nous avons cependant la moitié du risque entre nos mains : cette fourchette dépend pour moitié des politiques que les hommes vont choisir de suivre dans ce siècle et plus

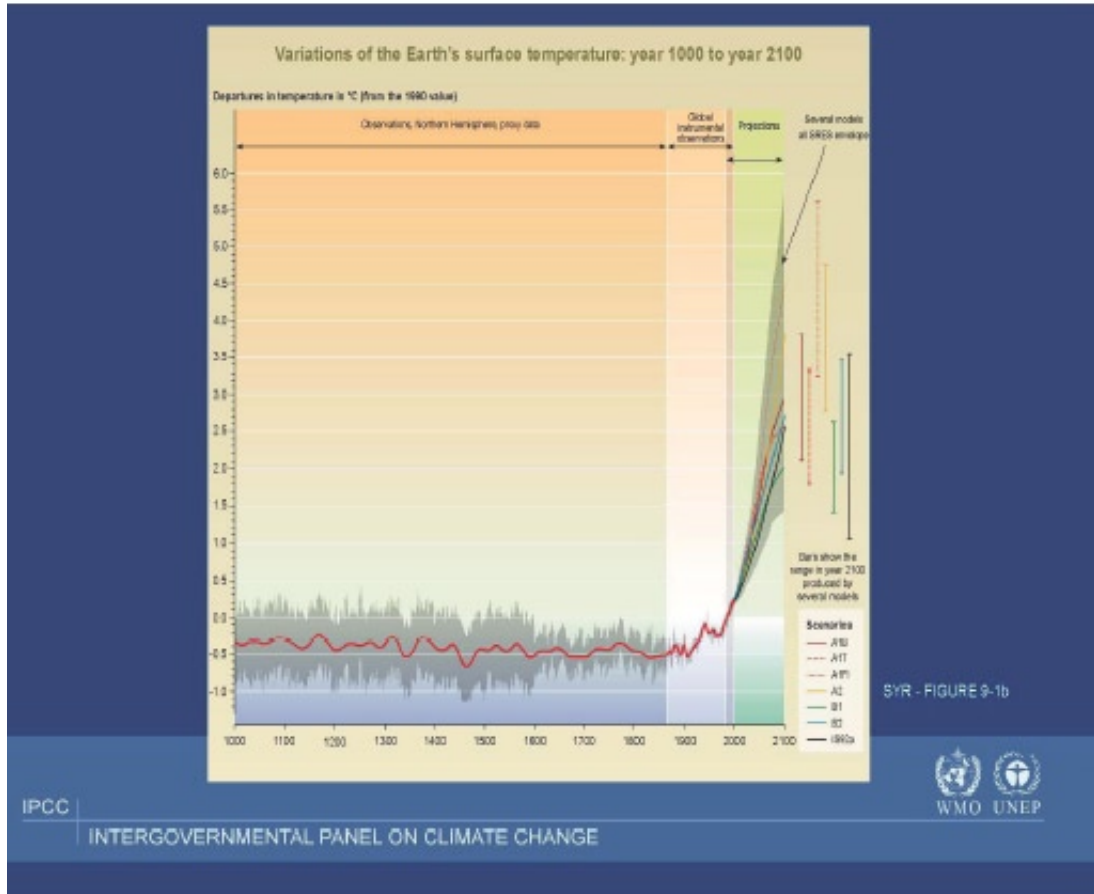


Figure 5

précisément dans les vingt à trente ans qui viennent puisque ce sont ces vingt à trente ans qui vont en grande partie décider du climat de la terre pour les siècles, voire les millénaires à venir. Ainsi l'élévation des océans,

à travers sa composante de ruissellement, mettra plusieurs millénaires à cesser à partir du moment où nous aurons commencé à réduire nos émissions de gaz à effet de serre.

## LES SCENARIIS FUTURS

Nous allons maintenant aborder les questions d'adaptation en illustrant la différence entre un scénario à 2°C de plus (scénario B1) et un scénario à 4°C ou 4,5°C de plus (scénario A2) pour la moyenne du globe (figure 6). Avec B1, comme l'indiquent les modèles et le confirment les évolutions actuelles, les modèles montrent aux hautes latitudes des températures accrues de 4 à 6°C, ce qui

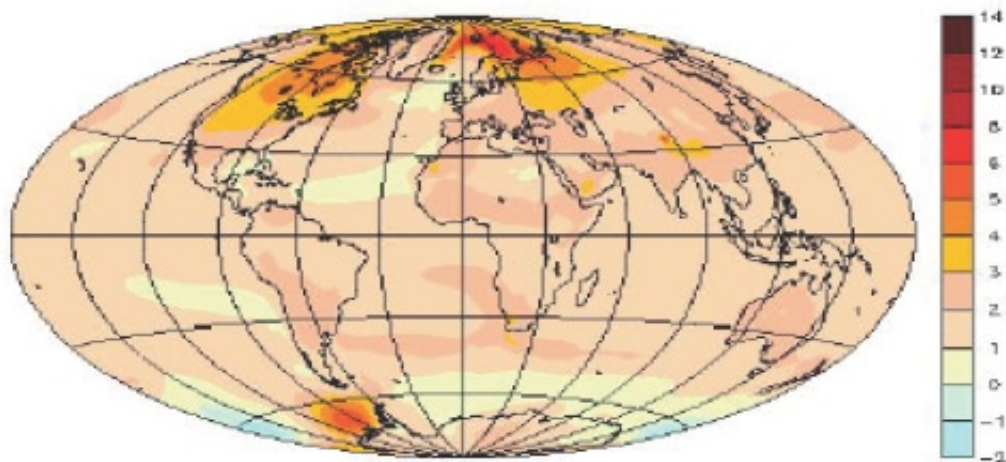
nous pose entre autres le problème de la fonte du permafrost. Avec A2, nous avons cette fois, à nos latitudes, des températures moyennes annuelles supérieures de l'ordre de 4 à 6, et 8°C vers les pôles (figure 7).

J'attire également votre attention sur ce point froid dans l'Atlantique nord, qui pourrait être associé au ralentissement de la dérive nord-Atlantique, et qui induit un moindre réchauffement sur l'Atlantique est : il n'indique donc pas l'entrée de la Terre dans

16

Préserver  
la planète  
et l'hu-  
manité

## Réchauffement fin XXI<sup>e</sup> sous B1 (IPSL 2005)



IPCC / IPSL - SRESB1 scenario - Anomalies de la température (deg C)  
(2090-2099) comparée à (2000-2009)

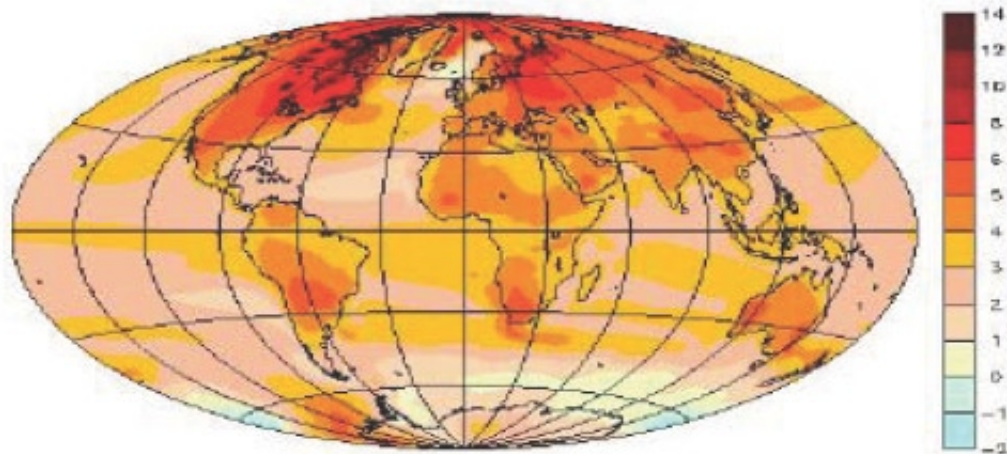
Figure 6

une glaciation, comme le suggérait le film « le jour d'après ». Mais il apporte d'autres désagréments : une absence d'oxygénation profonde, et donc une stratification de l'océan menaçant encore davantage les écosystèmes marins et les ressources halieutiques. Il n'y a donc pas lieu de s'en réjouir et ce n'est pas une bonne raison pour nous diriger vers le scénario A2 ! (figure 7)

Pour les précipitations, comme un surcroît d'énergie dans le système terre inten-

sifie les phénomènes et notamment les cycles hydrologiques, en gros il pleuvra plus là où il pleuvait déjà, et encore moins là où les pluies étaient rares, notamment en zone tropicale. Parmi les zones de déficit de précipitations très probables, (vous savez que le « très probable » dans les conventions du GIEC signifie entre 90 et 99 % de probabilité, « quasi certain » étant plus de 99 %), la zone méditerranéenne jusqu'à la mer Caspienne est une zone d'assèchement pour tous les modèles. Nous devons donc nous y

## Réchauffement fin XXI<sup>o</sup> sous A2 (IPSL - 2005)

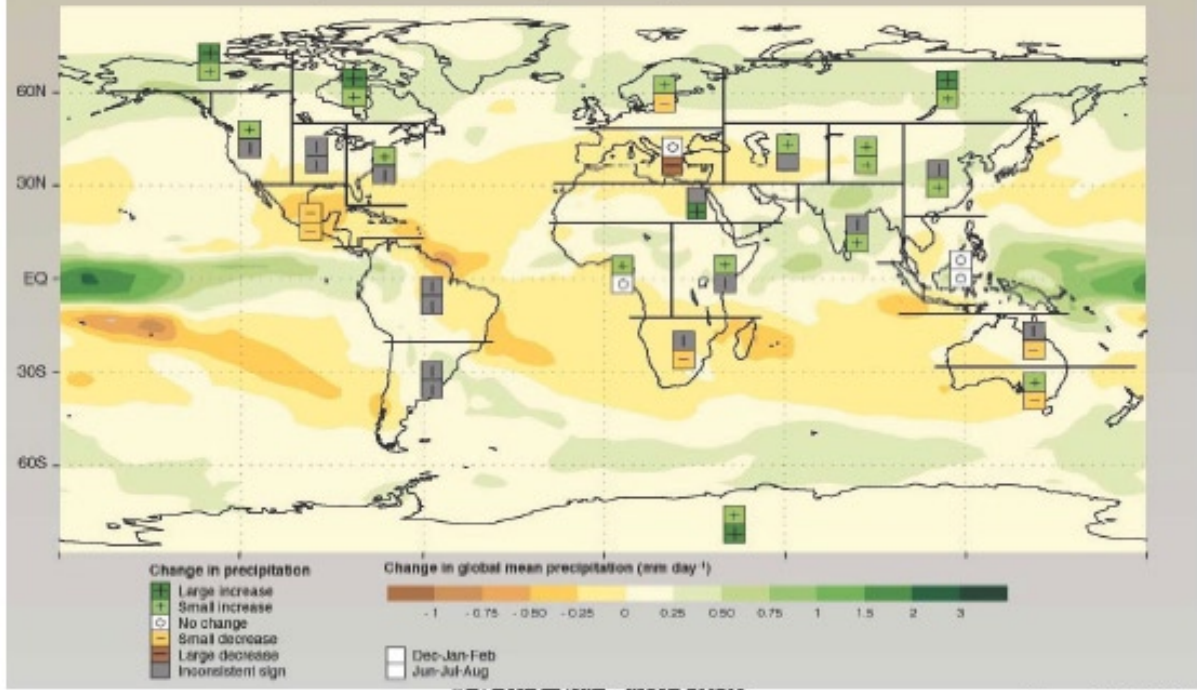


IPCC / IPSL - SRESA2 scenario - Anomalies de la température (deg C)  
(2090-2099) comparée à (2000-2009)

Figure 7

## Précipitations en 2100

### Changement des pluies pour le scénario A2



Source: GIEC 2001

Figure 8

préparer également. S'assècheraient aussi la Californie, le Mexique, les plaines à blé américaines, l'Australie...

Le niveau de la mer devrait monter de 25 centimètres à 1 mètre. Entre autres conséquences sur l'océan, sur ce scénario tendanciel, il se produit une acidification de l'océan qui en surface atteindrait près d'un point de pH en quelques siècles.

Nous tenons donc dans nos mains, pour les 20 à 30 ans qui viennent, ce qui va se passer pendant des siècles et des millénaires sur notre planète, ce qui est à la mesure de nos moyens technologiques et de nos connaissances. Cela sera-t-il à la mesure de notre sagesse ?

## Le manque de fossiles ne résoudra pas la question climatique

Source : GIEC, 2001

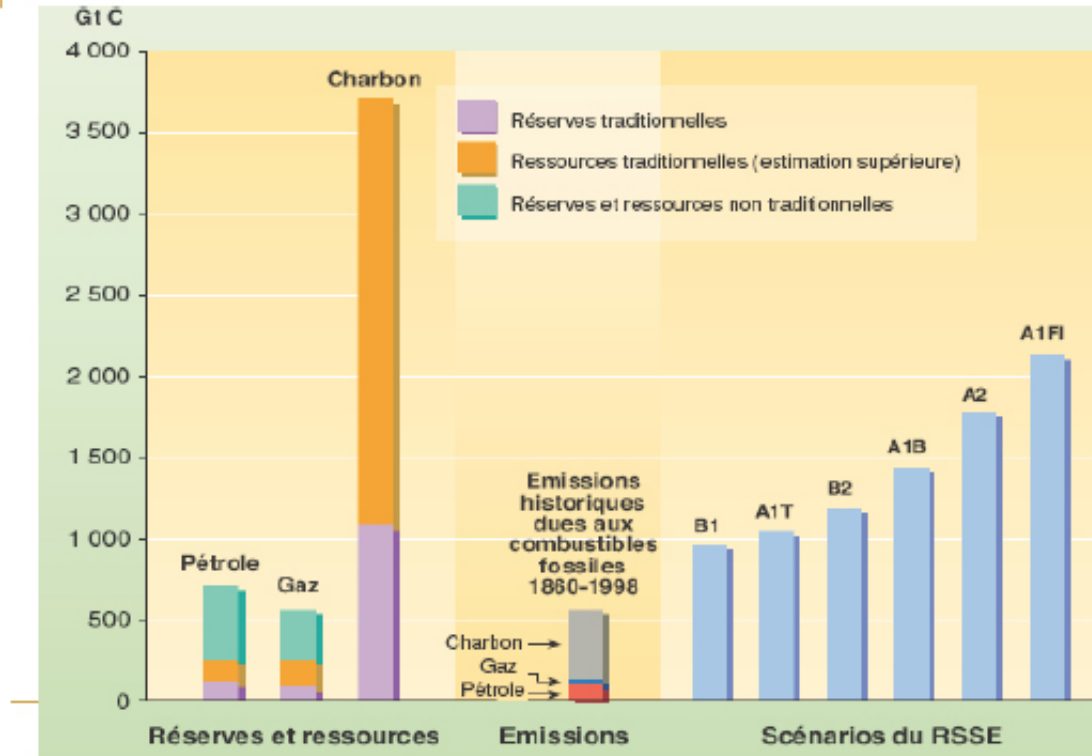


Figure 9

A propos de sagesse, justement, vous avez tous entendu parler de « manque de pétrole ». Et la question que nous pouvons nous poser est « Ne suffit-il pas d'attendre qu'il n'y ait plus de pétrole et nous serons alors sages malgré nous ? ». Mais non, cela ne suffit pas : nous avons suffisamment de charbon dans le monde pour émettre deux à trois fois plus de carbone que les quantités requises pour atteindre le scénario A2...

Nous ne pouvons donc pas compter sur le manque de fossiles pour résoudre la question, mais au contraire nous dire que nous ne devons utiliser que le tiers de nos ressources. (figure 9)

Si rester à plus 2°C dépend d'abord de ce que nous allons faire sur les 20 à 30 années qui viennent, cela signifie que nous dépendons de l'usage que nous allons faire

très vite des techniques existantes ou quasi existantes, de notre organisation des territoires et du fonctionnement de nos sociétés. Les technologies futuristes, comme leur nom l'indique, ne viendront qu'après !

Je viens de vous parler de technique, et j'y reviendrai largement par la suite, mais je voudrais vous parler, via l'adaptation, d'une part de biologie et d'autre part d'argent. Reprenons le cas français (figure 10) : réchauffement en hiver, températures plus élevées, précipitations accrues en hiver, précipitations déficitaires, manque d'eau dans le sud et réserves d'eau affaiblies, et un ennoyage des zones basses. En scénario A2, l'été 2003 qui était absolument impro-

bable avec le climat précédent, auquel nous devons dire adieu (nous ne reviendrons pas au climat précédent, nous devons bien en avoir conscience), cet été 2003 serait l'été moyen d'après 2050. Il y aurait toujours des étés « pourris » et des étés « chauds », mais le « pourri » d'après 2050 devrait être très relatif par rapport à ce que nous mettons sous ce vocable jusqu'ici.

Associés à cette modification des extrêmes, à cette modification de température et d'humidité, se trouvent des phénomènes auxquels nous ne pensons pas forcément spontanément, sauf les pompiers : les risques d'incendies de forêt (figures 11 et 12). En été normal - le 13 août 2004 était un été

20

Préserver  
la planète  
et l'hu-  
manité

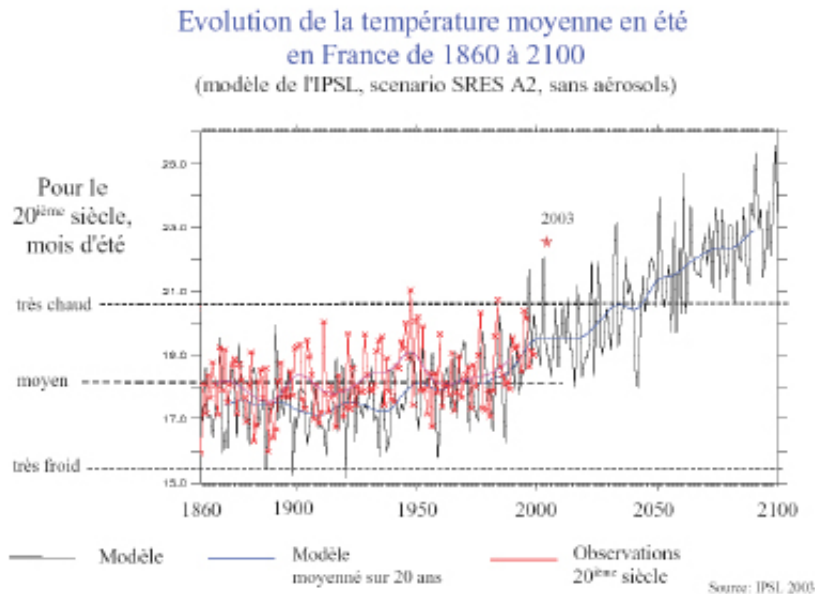
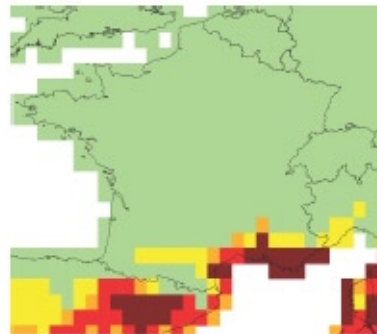


Figure 10

### Une situation « normale » - 13 Août 2004

Calcul de l'Indice Forêt  
Météorologique par le  
« JRC »



European Forest Fire Risk Forecasting System

Indices: Conditions FMI  
Date: 2004-08-14 (Forecast: +13)

Levels of Risk  
Low  
Moderate  
High  
Very High

Meteorological Data from MeteoFrance  
Administrative Boundaries from EUROSTAT - GISC  
Application by JRC - INFORREST Action

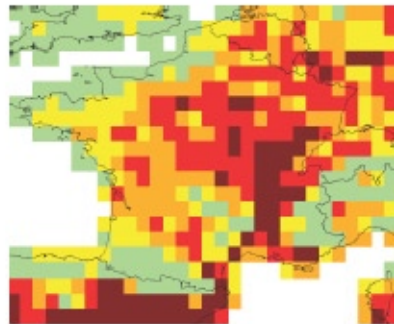


14

Figure 11

### Un aléa élevé - l'exemple du 13 Août 2003

Calcul de l'Indice Forêt  
Météorologique par le  
« JRC »



European Forest Fire Risk Forecasting System

Indices: Conditions FMI  
Date: 2003-08-13 (Forecast: +13)

Levels of Risk  
Low  
Moderate  
High  
Very High

Meteorological Data from MeteoFrance  
Administrative Boundaries from EUROSTAT - GISC  
Application by JRC - INFORREST Action



15

Figure 12



considéré comme normal - la répartition des incendies en France touchait comme d'habitude le sud-est et la Corse ; mais le 13 août 2003, le risque incendie couvrait la totalité de la France et des incendies spontanés ont eu lieu dans des zones qui n'avaient jamais connu cela. Ceci veut dire - j'arrive tout de suite aux questions d'argent - que nous allons avoir besoin de plus de moyens pour la prévention et la réparation des dégâts, comme pour l'ensemble des événements extrêmes. Un bon nombre de pays dans le monde connaissent des climats violents depuis très longtemps : il suffit de traverser l'Atlantique et d'aller voir nos voisins américains par exemple - mais nous pas encore. Nous devons donc en tenir compte, non seulement dans l'organisation de nos territoires, mais aussi dans l'affectation de l'argent, que ce soit dans les politiques publiques ou les stratégies privées. Si davantage de moyens sont mis dans l'adaptation et la prévention à ces conditions de vie, moins de moyens seront disponibles pour le reste, contrairement aux raisonnements « habituels ». Cela fait donc partie du réalisme de la période que de penser différemment nos futurs arbitrages financiers, budgétaires et stratégiques, qu'il s'agisse d'Etats, d'Europe, d'entreprises ou de communes.

Symétriques des incendies, les inondations (figure 13). Devoir réparer des dégâts importants perturbe beaucoup l'économie sur le moment. A titre d'exemple, en 2005 le Commissariat général du plan a publié une évaluation moyenne de ce que serait une

nouvelle crue de type 1910 à Paris. Premier élément : compte tenu de l'urbanisation et de l'artificialisation qui se sont développées depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, avec les mêmes précipitations, le niveau atteint serait supérieur de 70 centimètres. Vous pouvez évaluer dans les arrondissements les plus bas de Paris ce que signifient 70cm au-dessus des repères indiqués sur certains murs. Deuxième élément, la population a crû : les évaluations du CGP évoquent 170 000 entreprises et 880 000 personnes concernées, 200 000 personnes sans téléphone et 1 million sans électricité pendant un à plusieurs mois, ainsi qu'une perturbation à 70 % du métro et du RER pendant un mois (et ce dans le cas où le métro et le RER ne seraient pas inondés, c'est-à-dire si la RATP et la SNCF sont capables de boucher toutes les entrées d'air et autres conduites techniques du système métro-RER à temps). Dans ce cas, le coût serait de 30 milliards d'euros, et 10 % du PIB de l'Ile-de-France l'année de l'inondation. Ce genre d'évaluation a été plus systématiquement opéré par nos voisins britanniques, qui ont pris beaucoup d'avance sur la compréhension de l'adaptation au changement climatique tendanciel. Ils ont par exemple constaté que la première fois que les grandes marées passeraient le barrage sur la Tamise, qui n'a pas été conçu pour fonctionner jusqu'à 17 fois par an comme le prévoit le scénario tendanciel, cela représenterait 30 milliards de livres de dégâts et au total 2 % du PIB de la Grande-Bretagne. Ceci leur a fait dire, beaucoup plus vite qu'à nous, qu'il leur coûterait beaucoup

## Les assureurs ne paient pas tout...

(source Swiss Ré)

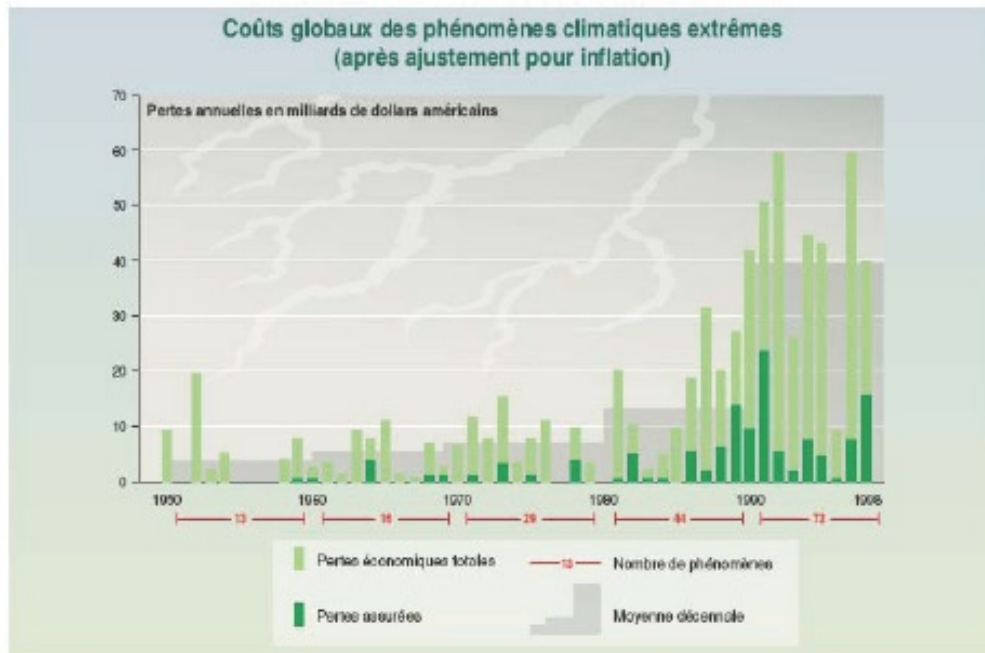


Figure 13

plus cher de s'adapter au scénario tendanciel que de mener une politique de réduction des gaz à effet de serre nationale et internationale qui permette d'éviter cela. Certes, les océans ne sont pas encore assez chauds près de chez nous pour provoquer des cyclones. Mais les événements dits extrêmes s'intensifient avec le contenu énergétique de l'atmosphère. Et les assureurs ne paient pas tout : ainsi, s'ils règlent 55 milliards de dollars pour Katrina, ce dernier a coûté plus de 200 milliards de dollars : le solde est payé par la société, par ses acteurs citoyens

et autres acteurs économiques sur tout ce qui n'a pas été assuré. Aujourd'hui, devant l'augmentation des dégâts climatiques sur l'ensemble de la planète, les assureurs, et notamment les assureurs britanniques qui sont déterminants pour le secteur, sont en train, d'une part, de se demander s'ils ne vont pas revoir l'assurabilité d'un certain nombre de dégâts qui deviennent certains et non plus probables, et d'autre part, de commencer à discuter avec les gouvernements et les collectivités pour assujettir l'assurabilité de ces territoires à la mise en

œuvre de politiques effectives de réduction des gaz à effet de serre et de prévention des dégâts : par exemple, cesser de construire en zone inondable.

Parlant d'adaptation, j'arrive aux écosystèmes en passant par le monde agricole en France ; en effet, à mon sens, les événements extrêmes ne sont pas les plus importants : ce qui pèsera le plus lourd est plutôt l'évolution rapide du fond du climat : il s'agit de vitesses de changement 100 fois plus élevées qu'un rythme « habituel ». Or beaucoup de choses ont été conçues et optimisées dans un climat sympathique, tempéré, dans lequel les événements météorologiques, sauf exception, étaient de plus prévisibles en nature et en ordre de grandeur. Qu'en une cinquantaine d'années les vendanges aient gagné un mois peut paraître anecdotique ; mais avec la montée des températures moyennes, simplement un degré, la qualité des raisins évolue. Outre le fait qu'il faudra sans doute bientôt changer de cépage dans bon nombre de vignobles, c'est toute la question des appellations d'origine contrôlée qui est posée. Si l'on caractérise les situations climatiques locales de nos principaux vignobles par les températures minimale et maximale, on voit que les vignobles du nord et du centre sont passés dans les années 1986-2002 en moyenne dans la situation dans laquelle était en 1970-1985 le vignoble de Bordeaux, qui est lui-même passé dans la situation du vignoble d'Avignon et de Montpellier, qui eux-mêmes sont passés dans la situation de vignobles

italiens. Les forestiers ont aussi mesuré une accélération de 30 % de la croissance des forêts qui ont capté plus de CO<sub>2</sub>, ce qui est intéressant. Mais l'augmentation de la quantité de carbone n'a pas accru la quantité d'azote disponible ; or le rapport carbone sur azote conditionne la structure des tissus vivants, en particulier les protéines. Des modélisations et des expériences montrent déjà qu'avec une concentration en CO<sub>2</sub> doublée (550ppm), les chenilles mangeraient 40 % de plus pour acquérir la même quantité de protéines, mais grossiraient pourtant de 10 % en moins, ce qui fait 10 % de moins pour la nourriture des oiseaux qui se nourrissent de ces chenilles, etc. Nous voyons par cet exemple parmi d'autres qu'il ne s'agit vraiment pas de la translation vers le nord d'un même système, mais bien d'une perturbation de leurs différents maillons, qui s'étaient ajustés et optimisés sur des millénaires ou des millions d'années. En outre, les événements extrêmes contrarient également de temps en temps cette croissance accélérée : lors de l'été 2003 la végétation a subi bon nombre de dégâts, les incendies et la sécheresse, et nous n'avons pas terminé de payer les conséquences directes sur les forêts de ces dégâts, sans oublier le relargage induit de carbone par les sols, équivalent à plusieurs années de captation par l'ensemble de la biomasse européenne. Effectivement en ne considérant que l'effet de la concentration en CO<sub>2</sub> sur la végétation du monde, les modèles avaient plutôt tendance à conclure à une augmentation globale de la productivité planétaire. Mais lorsqu'ils ont

pu coupler le CO<sub>2</sub> avec les réactions de l'activité biologique, et notamment de l'activité des sols, ils ont fait apparaître des zones dans lesquelles l'activité biologique décroîtrait plutôt, notamment du fait de la perte de carbone des sols, mais également de l'aspect plus aléatoire du climat.

J'ai un peu parlé d'écosystèmes au plan international ; je voudrais revenir sur la France avec cette modélisation de l'INRA et de l'ONF du programme CARBOFOR. Sont ici représentés les principaux biomes français et je voudrais attirer votre attention sur trois d'entre eux (figures 14 et 15) : en gris foncé la végétation méditerranéenne caractérisée par le chêne vert ; en gris clair ce triangle qui s'arrête à peu près en Bretagne est la végétation tempérée atlantique caractérisée par le pin maritime ; enfin ce tiers nord-est en gris médium est le chêne, emblématique dans notre culture. En scénario B1, c'est-à-dire avec simplement 2°C de plus sur la planète, le mieux que nous pourrions faire en réussissant à réduire considérablement les émissions mondiales, voici ce que donne l'évolution des conditions climatiques correspondant à ces espèces : la végétation méditerranéenne gagne toute la moitié sud de la France ;

**Les impacts en scénario B2 – (INRA - Meteo-France Arpège)**

**Conditions climatiques 1961-1990**

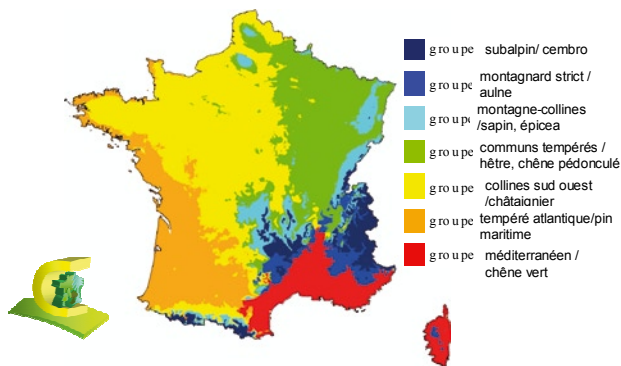


Figure 14

**Les impacts en scénario B2 - (INRA - Meteo-France Arpège)**

**Conditions climatiques 2071-2100**

- très forte régression des conditions montagnardes et communes nord
- migration vers le nord des conditions tempérées atlantiques
- extension des conditions méditerranéennes à tout le sud de la France
- ...les écosystèmes vont-ils pouvoir « migrer » à cette vitesse...?

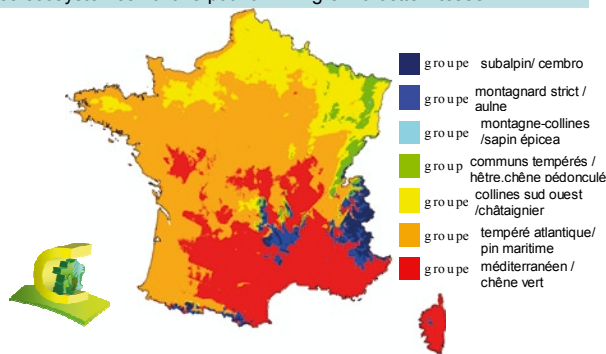


Figure 15

la végétation tempérée atteint la région parisienne et monte jusqu'à Dunkerque ; quant au chêne, il en reste quelques lambeaux sur l'extrême est et un peu sur les montagnes. Répétons que ceci correspond à l'évolution des conditions climatiques, car évidemment le problème est : les écosystèmes vont-ils savoir migrer à cette vitesse ? Comment vont-ils être capables de s'adapter notamment si le territoire comprend beaucoup de barrières artificialisées, qu'il s'agisse de grandes zones urbaines ou de larges surfaces d'agriculture monospécifique très imprégnée chimiquement (et donc pauvres en diversité adaptative) ? Il y a toute une structuration à réaliser pour l'aménagement du territoire, afin de permettre à une nature déjà assez fragilisée par ailleurs, notamment par l'imprégnation chimique et par l'absence de gestion raisonnable, d'encaisser cela et continuer à profiter des supports écosystémiques dont nous avons absolument besoin, aussi bien pour la nourriture que pour l'eau, le tourisme, ou notre propre existence.

Cette migration vers le nord s'observe également dans le domaine maritime, où le plancton migre à mesure que la température monte : pour un degré, les espèces en Atlantique, Manche et Mer du Nord ont, suivant les cas, migré de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de kilomètres, voire se sont enfoncées dans les profondeurs, en suivant leur nourriture qui elle-même réagissait immédiatement.

Conclusion, nous devons penser à cette transition climatique, violente en tout état de cause, en termes de vulnérabilité ou de robustesse. Comment organiser la robustesse de nos territoires, de nos activités par rapport à des modifications assez rapides pour lesquelles, lorsque nous les prenons les unes après les autres, nous pouvons imaginer des réponses, mais qu'il va falloir gérer en cohérence les unes avec les autres ? Il ne s'agit pas de « déshabiller Pierre pour habiller Paul » sinon, l'ensemble du territoire dysfonctionnerait. La situation pose question non seulement pour des secteurs économiques, nous pouvons penser bien sûr au tourisme, au ski de moyenne montagne, aux littoraux, mais aussi pour la répartition des budgets publics et privés : le poste réparation et prévention prendra beaucoup plus d'importance. Nous devons également faire appel aux scientifiques et aux ingénieurs pour essayer de comprendre vite à quoi nous pouvons nous attendre et ce que nous pouvons faire d'un point de vue technique – sachant que la technique ne suffira pas ! Ces perspectives vraisemblables avec 2°C de plus « seulement » pour la température du globe, expliquent que le Conseil européen ait adopté en 2002 comme objectif politique d'essayer d'éviter de dépasser la température maximale globale que l'humanité ait connue, donc pas plus de 2°C d'élévation de la température, soit 450 ppm de CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire 550 ppm pour tous les gaz, mesurés en CO<sub>2</sub> équivalent. Nous sommes à 380.

## L'OBJECTIF

Cet objectif implique de diviser par deux les gaz à effet de serre du monde au milieu de ce siècle. Or l'éventail d'émissions de gaz à effet de serre par habitant est large : moins de 1 tonne de CO<sub>2</sub> dans bon nombre de pays africains, une tonne de CO<sub>2</sub> pour l'Inde, encore moins de 3 tonnes de CO<sub>2</sub> pour la Chine, 6,5 tonnes pour la France, 8,5 tonnes pour l'Europe à 15, 11 tonnes pour la Russie et 20 tonnes pour les Etats-Unis ! Les pays industrialisés ont davantage de marges de manoeuvre, sans conteste, et devraient donc diviser par 4 à 5 leurs émissions d'ici 2050, les pays émergents stabilisant les

leurs au niveau actuel : c'est ce que l'on appelle le « facteur 4 », dont nous entendons de plus en plus souvent parler.

En 2005, le Conseil européen a fixé, au-delà des - 8 % en 2012 de Kyoto, le but final de -60 à -80 % en 2050, avec une étape intermédiaire de -15 à -30 % en 2020 (figure 16). Comme nous l'avons vu tout à l'heure, réduire de moitié la moyenne mondiale revient à diviser par beaucoup pour certains !

Qu'est-ce que cela veut dire dans le monde : essayer de ne gagner que 2°C de plus, et pas davantage ?

Quelques éléments de notre environnement vont peut-être nous amener à être plus sages que la simple obéissance à notre pente tendancielle culturelle - et non pas naturelle ! - ne nous y conduirait. Le premier, ce sont les assureurs : les réassureurs font une bonne partie de la mise boursière mondiale et commencent à considérer que Katrina leur ayant coûté deux fois plus cher que l'attentat du 11 septembre, il n'est pas question

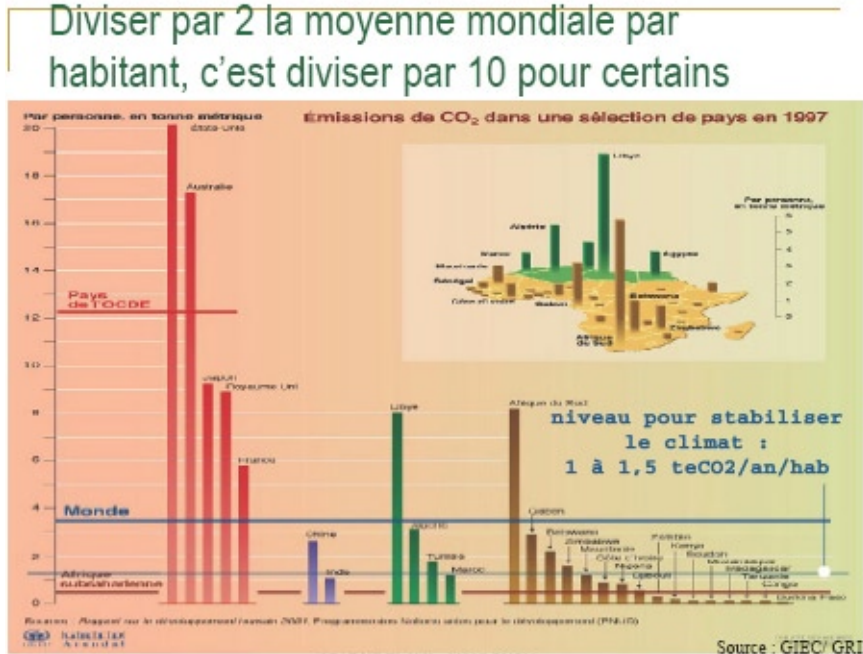


Figure 16

que cela continue à ce rythme. Et ils commencent à agir en tant qu'assureurs des entreprises et des collectivités d'une part, en tant qu'actionnaires d'autre part.

Le deuxième élément, c'est le monde de la finance. Vous savez que des marchés de permis négociables ont été instaurés, et à la plus grande échelle en Europe. Ces nouveaux marchés constituent un objet intéressant pour la finance, et elle a montré à Montréal fin 2005 qu'elle souhaitait que cela dure. Or l'existence des marchés de permis négociables est liée à l'imposition par les états de niveaux sanctionnables de réduction

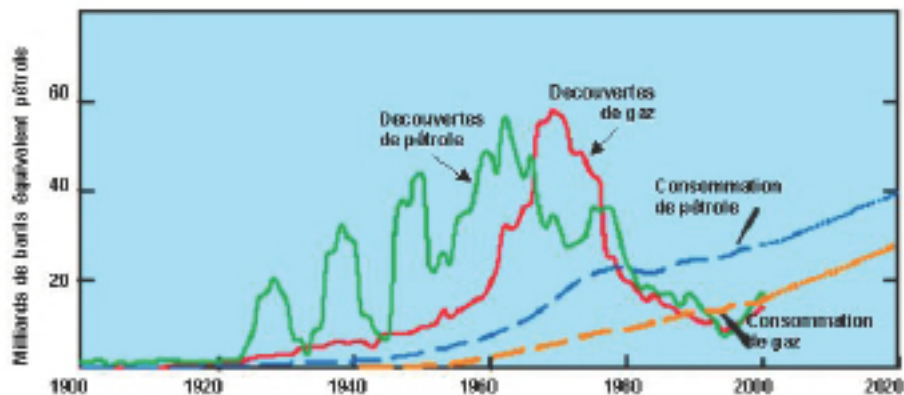
d'émission de gaz à effet de serre pour les opérateurs de ces marchés, aujourd'hui les grandes entreprises industrielles, demain d'autres secteurs sans doute comme l'aérien ; le monde de la finance souhaite donc une pérennisation et un renforcement de ces impositions de quotas d'émissions, si possible dans tous les pays du monde, et pas seulement les pays industrialisés.

Le troisième élément à nous « motiver » est le prix du pétrole (figure 17). Ce graphique émanant d'Exxon Mobil (qui ne peut pas être soupçonné d'être favorable aux politiques de maîtrise du changement climatique)

28

Préserver  
la planète  
et l'humanité

## Découvertes et consommations d'hydrocarbures — source Exxon Mobil 2002—



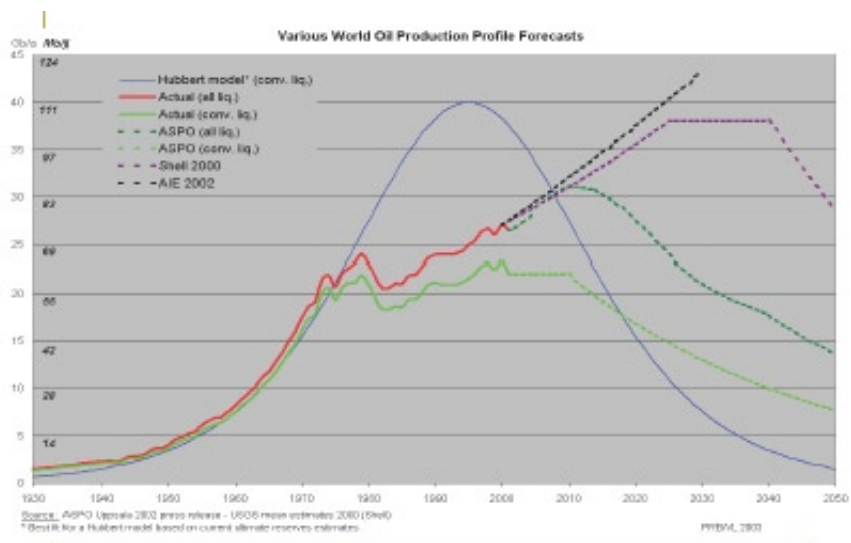
CD. Des ENSMP - MURS 210206 -

20

Figure 17

montre que nous avons connu le pic des découvertes pétrolières dans les années 60 et le pic des découvertes gazières dans les années 70. Les découvertes postérieures n'ont pas permis de retrouver des perspectives de combustible fossile, pétrole ou gaz, de l'ordre de grandeur de ce qui avait été repéré antérieurement. Or nous ne consommons que le pétrole que nous avons découvert... Le deuxième élément, c'est que le rythme des découvertes de pétrole est déjà passé sous le rythme d'augmentation de la consommation en 1980 ; même chose pour le gaz en 1990. Troisième élément, depuis les travaux de Hubbert, géologue pétrolier américain, des années cinquante-soixante, nous savons que le pic de production (c'est-à-dire le moment où quelqu'argent que vous mettiez dans les forages, la production des puits se réduit) advient environ une trentaine d'années après le pic des découvertes. Ce qui fait que nous n'avons pas encore connu le pic du pétrole bien que le pic des découvertes ait eu lieu en 1960 semble être... le choc pétrolier des années 70, qui a fait baisser la consommation des pays industrialisés et a repoussé le pic ; d'un point de vue géologique, ce dernier arrive néanmoins à un moment ou à un autre.

Figure 18



En fait, avec une **politique « facteur 4 » de réduction des émissions de gaz à effet de serre**, nous parviendrions aussi à repousser plus loin ces pics. Les estimations des ultimes réserves de pétrole sont restées entre 2 500 et 3 500 milliards de barils depuis les années 50. Aujourd'hui, d'après les géologues des compagnies pétrolières, sont exploités de l'ordre de 30 % de la ressource ; 50 % seraient atteignables en augmentant les prix, mais pas plus car le reste est trop imprégné dans la roche pour être extrait.

D'où la discussion sur la période de ce pic pétrolier : non pas celle de l'épuisement du pétrole, mais celle du moment où le robinet qui fait couler le pétrole aura un débit moindre que la bonde de notre consommation. Pour certains, plutôt des géologues, c'est maintenant, et pour les plus optimistes,



plutôt des économistes, ce sera vers 2030, mais en tout état de cause, aux rythmes de consommation actuels, ce n'est même pas une question de demi-siècle. En outre, les réserves de pétrole sont très inégalement réparties : aux problèmes purement physiques et quantitatifs se conjuguent les interrogations géopolitiques d'accès aux ressources (figure 18).

Si nous essayons de caler dans le temps les étapes énergétiques et climatiques aujourd'hui prévisibles du siècle qui vient, nous obtenons ceci (figure 19). L'origine, c'est maintenant : nous sommes en 2006, année 0. Le pic pétrolier quelque part entre 2005 et 2030, j'ai posé à titre d'exemple 2020, le pic gaz dix ans plus tard au plus. Vers 2025 l'Europe sera dépendante de l'extérieur à 70 % pour sa consommation énergétique. 2050, c'est l'horizon de réalisation du facteur 4 et c'est aussi le moment où la température en France sera, selon le scénario où nous serons, plus élevée de 1,5 à 3°C. En 2100, le pronostic de température est plus élevé, mais sans doute moins que ce que nous pourrions nous attendre des

hautes fourchettes de scénario, du fait du refroidissement atlantique : la température n'en continue pas moins de monter. Nous voyons donc qu'une grande part des décisions que nous prenons aujourd'hui portent sur des durées de vie qui relèvent beaucoup plus de ce nouveau monde que de celui d'où nous venons. Je pense d'abord aux infrastructures de transport : quand nous faisons une route, un aéroport, une voie ferrée, nous en avons pour bien plus d'un siècle, ainsi que pour la structuration induite du territoire et de ses villes. Il suffit de penser aux voies romaines.... Je me suis arrêtée à 120 pour les besoins du graphique. Les bâtiments dureront au moins trois quarts de siècle sauf s'ils sont vraiment mal construits. Vous voyez

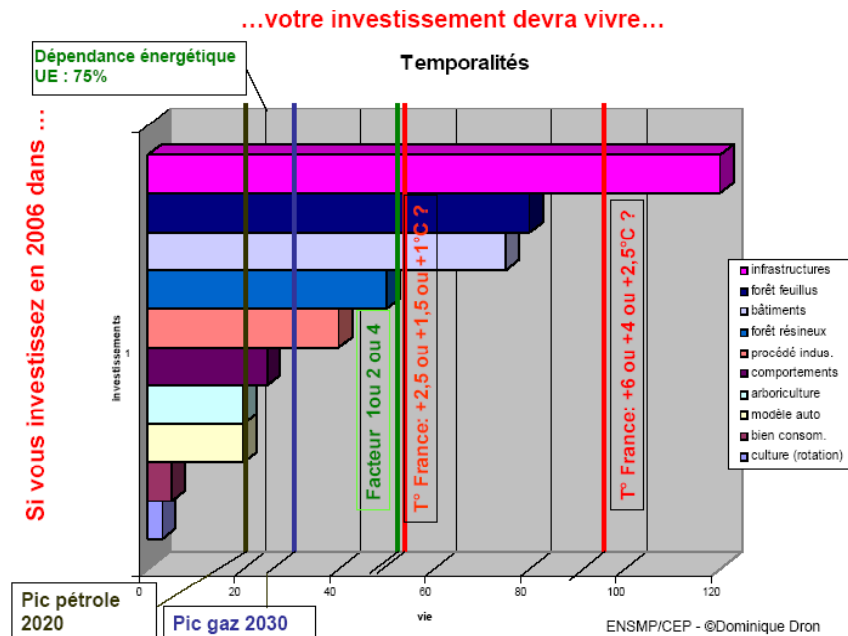


Figure 19

qu'un bâtiment va devoir passer le pic pétrole, le pic gaz, satisfaire au facteur 4, et ce avec un climat plus chaud - avec ce que cela veut dire en termes d'efficacité énergétique - et passer en fait le plus clair de son temps dans ce monde-là. Même chose donc pour l'infrastructure de transport qui devra passer le plus clair de sa vie dans un monde pas forcément privé de pétrole, mais en tout cas avec un accès au pétrole extrêmement restreint. Or vous savez que les transports dépendent aujourd'hui à 97 % du pétrole, et resteront majoritairement dépendants des moteurs à combustion pendant au moins trente ans. Lorsque vous plantez une forêt, suivant que vous êtes en résineux ou feuillus, vous en avez entre 60 ans et un siècle avant de rentabiliser l'investissement. Pour les implantations industrielles lourdes d'aujourd'hui, c'est 30 ou 40 ans au moins, et elles devront également passer le « peak oil » et le « peak gas ».

En ce qui concerne le nucléaire, si le nombre de réacteurs mondiaux croissait rapidement, ce serait avec les technologies actuelles (la « génération 4 » ne serait sans doute industrialisable que d'ici 30 ou 40 ans) et il y aurait aussi des tensions sur l'accès à l'uranium dans ce demi-siècle...

Pour la France, le premier poste d'émission de gaz à effet de serre est celui des transports, puis à peu près à égalité : le bâtiment, l'industrie manufacturière et l'agriculture. Si je prends maintenant l'énergie, nous en consommons une moitié dans nos usages domestiques, chauffage du logement, électricité domestique, usage de la voiture, une autre moitié dans la fabrication et le transport des produits et services que nous achetons et utilisons, dont le chauffage au travail qui fait partie du bâtiment. Graphiquement, le problème du facteur 4 semble impressionnant. La bonne nouvelle est que nous saurions le faire, mais nous devons aller vite.

J'emprunte ce schéma à Pierre Radanne

Evolution de la consommation d'énergie par habitant (MIES 2003, P. Radanne)

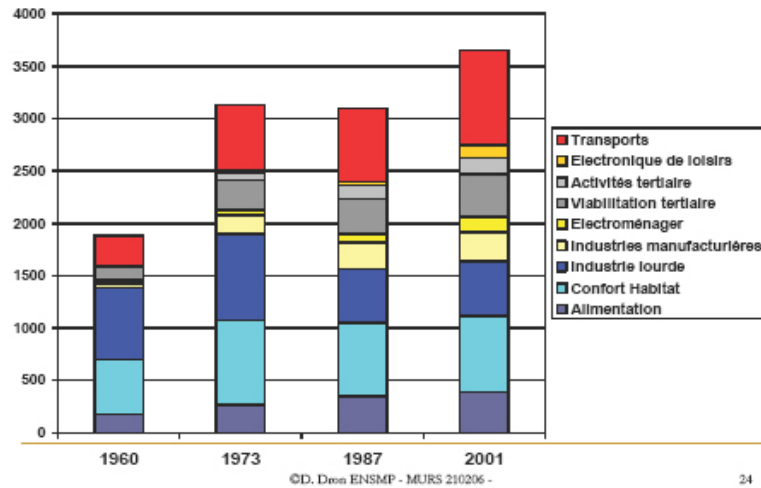


Figure 20

ne qui a réalisé une étude prospective à la mission interministérielle de l'effet de serre lorsque je dirigeais ce service (figure 20). Il illustre le fait que nous ne devons pas imaginer la société et la consommation d'énergie de demain comme une extrapolation des structures de l'économie actuelle. L'évolution de la société telle que dessinée par nos consommations énergétiques nous décrit dans les années 60 au stade où se trouve aujourd'hui la Chine – c'est-à-dire avec une consommation énergétique essentiellement axée sur l'habitat et l'industrie lourde : il s'agit de tout l'équipement du pays, toutes les infrastructures, l'acier, le béton, le ciment, le verre, etc. Nous avons poursuivi cette tendance jusqu'au premier choc pétrolier. Au premier, puis au deuxième choc pétrolier, nous avons compris que nous ne pouvons pas continuer ainsi et nous avons réussi à être plus riches en consommant moins : en 1987 nous sommes nettement plus riches, le PIB a beaucoup augmenté, et nous consommons moins d'énergie qu'en 1973, avec surtout une forte amélioration de l'industrie lourde : elle a gagné depuis 1973, 40 % en efficacité énergétique, soit presque un facteur 2... Il y eut aussi une amélioration non négligeable du bâtiment neuf. Mais il y a encore du travail et beaucoup de possibilités rapides dans par exemple le secteur agroalimentaire, (consommation d'énergie dans les systèmes agricoles, la distribution, le conditionnement de notre nourriture).

Nous voyons aussi dans les années 80 la montée du tertiaire. Aujourd'hui, cette part

n'a pas beaucoup bougé, celle de l'industrie lourde a même plutôt continué sa rétraction, le bâtiment n'a pas beaucoup progressé ; en revanche, l'électronique de loisir a beaucoup progressé – éteignez vos veilles d'ordinateurs, éteignez vos veilles de télévision qui consomment autant que pendant les trois heures d'usage national moyen et surtout les transports.

Autre bonne nouvelle : lorsque l'on réduit sa consommation d'énergie, on devient plus riche ; les investissements des années 80 nous ont rapporté aujourd'hui un point de PIB par rapport à ce que nous aurions dû dépenser si nous n'avions pas réagi aux chocs pétroliers.

Que veut dire un « facteur 4 » ? Regardons cette fois par secteur de façon un peu plus détaillée et en observant plusieurs scénarios possibles. Pour résumer, ce travail, réalisé sur une quinzaine de scénarios, a montré que nous pouvons effectivement diviser par 4 nos émissions de gaz à effet de serre en tenant compte des rythmes de percolation technologique, des techniques existantes et d'un certain nombre d'interrogations dont nous parlerons juste après, et ce avec des assortiments énergétiques différents.

Nous avons des obligations, notamment en matière d'efficacité énergétique (qui sera le paramètre-clé de la compétitivité du siècle qui vient, or l'Europe consomme déjà deux fois moins d'énergie par point

de PIB que l'Amérique du Nord) ; mais ce n'est pas tout, nous allons devoir continuer. A nouveau, c'est un rendez-vous aux ingénieurs et aux scientifiques, mais aussi aux sociologues, car il y a beaucoup à faire pour construire le prochain monde.

Nous disposons de plusieurs possibilités de substitution énergétique, mais la plupart dépendent, de résultats scientifiques ou techniques attendus dans les 10 à 30 ans, quelquefois davantage.

De la même manière que nous nous sommes trouvés plus riches en étant plus sobres et plus inventifs après les deux premiers chocs pétroliers, nous nous enrichirions en « société facteur 4 » : nous dépensions en 2000 environ 80 milliards d'euros en facture énergétique. En 2050 sans une augmentation du prix de l'énergie, nous passerions à 145 ; avec un prix du pétrole à 52 dollars le baril et avec seulement 20 % d'augmentation de l'électricité et du gaz, ce serait 240 milliards d'euros. Dans cette situation, le poste énergie en France représenterait davantage en pourcentage du PIB qu'aujourd'hui : nous serions donc plus pauvres. En revanche, avec le facteur 4, même à 52 dollars le baril, nous dégagerions de l'ordre de 150 millions d'euros de « manque à dépenser », comme marge de manœuvre pour l'efficacité et les progrès énergétiques d'une part, pour ce dont nous allons avoir besoin par ailleurs, comme la prévention et la réparation des dommages d'autre part.

## SECTEUR PAR SECTEUR

Je vais passer assez rapidement sur la signification globale de ces scénarios pour les différents secteurs : ils intègrent de toutes façons des renouvelables ; à part cela, ils peuvent être complètement nucléaire, avec nucléaire et charbon, sans nucléaire avec stockage du carbone, avec hydrogène et nucléaire, etc. D'abord, l'industrie lourde qui a déjà fait beaucoup en termes d'efficacité énergétique, n'est pas très sollicitable en termes de pourcentage de réduction de ses émissions, même si elle doit contribuer à l'ensemble avec les autres. Le résidentiel tertiaire doit faire beaucoup plus de progrès, mais la bonne nouvelle est que nous saurions déjà faire des bâtiments neufs qui consomment 5 fois moins qu'aujourd'hui, voire ont un bilan énergétique net positif ; l'attention se porte beaucoup plus maintenant sur l'existant. Il s'agit en fait, entre autres pour la compétitivité du BTP national, de se mettre à réaliser effectivement sur le territoire ce que nous saurions faire en théorie, et que plusieurs de nos voisins réalisent depuis longtemps.

**Le problème le plus difficile concerne les transports.** Ils émettent déjà aujourd'hui un quart de plus de gaz à effet de serre que l'ensemble de la société française ne pourra en émettre en 2050 (figure 21 page suivante). Pour eux, le facteur 4 est à peu près un facteur 3 à 5 en économies d'énergie et un facteur 7 en gaz à effet

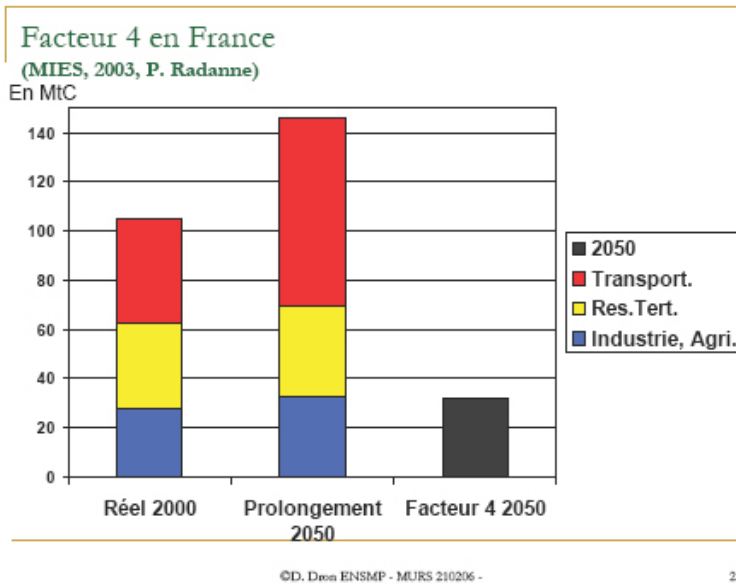


Figure 21

de serre. C'est énorme, mais pas non plus inaccessible, quoique, vu les délais impartis en recourant pour moitié à autre chose que la seule technique : des exemples illustreront tout à l'heure quelques gains potentiels importants par l'organisation de la vie et des territoires. Le message essentiel sur les transports est donc qu'il y a plusieurs possibilités, là aussi avec des mix différents. Faisons la liste de l'indispensable : à savoir que si l'une de ces actions n'est pas menée, quoi que nous fassions par ailleurs, nous n'atteindrons pas le facteur 4. Et donc, non seulement nous ne vendrons pas les technologies et les organisations correspondantes, et d'autres le feront, mais nous passerons également à une température supérieure :

- des transports ne dépendant plus que pour

un tiers des hydrocarbures et deux à quatre fois plus économes au moins ;

- des bâtiments en moyenne trois fois plus économes, c'est-à-dire neufs et existants, et sans fuel ; Nous aurons besoin du pétrole pour le transport sur les trente ans qui viennent, donc nous devons faire sortir le fuel de la consommation des bâtiments ;

- une production électrique très peu émissive ; Nous ne pouvons pas faire de « facteur 4 » si nous avons une production électrique qui repose sur des combustibles fossiles avec du CO<sub>2</sub> non ou

très partiellement stocké ;

- une efficacité maximale des biens et services, ainsi que des procédés industriels, et beaucoup reste à faire dans certains secteurs comme l'agro-alimentaire ;

Aujourd'hui l'efficacité énergétique générale du système français est de 35 %, nous étions à 25 % avant le premier choc pétrolier. Il y a là aussi du travail, mais nous n'avons aucune raison de ne pas arriver à faire beaucoup mieux que cela ;

- des énergies renouvelables diversifiées ; C'est une question de potentiel d'activités et d'emplois, mais aussi de sécurité et d'un certain degré d'autonomie aux échelles nationale et locale : « ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier ».

- des comportements économes ; ce sont nos propres comportements, dans notre vie quotidienne, soutenus notamment par la domotique, l'électronique de réglage, qui permet, comme aime le dire Pierre Radanne, « qu'aucune énergie ne soit plus dépensée sans plaisir » : supprimer déjà ce qui part en fuites, en pertes, en inefficacité. Tout ces scénarios ont été conçus à énergie utile inchangée, progressant comme le PIB : ils jouent sur l'efficacité des systèmes et non sur la richesse.

Dans tout cela, les techniques existent ou presque – le véhicule hybride rechargeable n'est pas compliqué, des kits sont déjà vendus (certes illégalement) aux Etats-Unis pour recharger les Toyota hybrides. Elles nous permettraient déjà de faire un grand pas, certains parlent déjà d'un facteur 2, rien qu'avec ce dont nous disposons. Comme les 20 prochaines années sont cruciales, compensables en termes de scénario climatique induit, le potentiel des techniques et organisations connues l'est tout autant.

Quelles sont les principales questions technologiques posées à la recherche aujourd'hui ? D'abord jusqu'où pouvons-nous **stocker le gaz carbonique** de manière sûre ? Par exemple, le mélange  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$  est très réactif sur les ciments qui obturent les anciens puits de pétrole et de gaz ; les mines de charbon sont en général faillées, les aquifères salins doivent être examinés, dissoudre davantage de  $\text{CO}_2$  dans les océans accélérerait plutôt le processus climatique

etc. Ensuite, jusqu'où pourrons-nous stocker l'électricité ? Cette voie constitue la principale marge de manœuvre des transports électriques et des énergies renouvelables intermittentes comme l'éolien et le solaire, qui ont par ailleurs l'avantage considérable de ne pas être accaparables, contrairement même à l'eau : on peut posséder un gisement de pétrole ou d'une source, mais personne ne se déclarera propriétaire du soleil. Les énergies renouvelables sont une brique importante de la robustesse des systèmes énergétiques.

**Stockage et distribution du vecteur hydrogène** : nous savons produire l'hydrogène (mais nous devons évidemment le faire en ne produisant pas trop de  $\text{CO}_2$  !), et il faut ensuite le stocker et le distribuer. Il s'agit d'une molécule très petite, qui diffuse, s'enflamme, explose... elle représente également une marge de manœuvre possible pour les systèmes de transport, en concurrence avec l'électricité.

**Nucléaire** : les réacteurs actuels posent des problèmes notamment de déchets, de prolifération, on en parle suffisamment dans les journaux à propos de l'Iran, et de sécurité intrinsèque. La génération suivante permettra peut-être de résoudre ces questions, mais nous aurons des réponses à ces questions d'ici 15 à 20 ans, avec une industrialisation possible à partir de 2030. En 2030, les dés seront jetés pour une bonne part de nos marges de choix de scénario climatique.

Ces diverses considérations ne signifient pas que la recherche ne sert à rien et que nous n'aurons pas besoin de ces techniques mais elles montrent que nous ne pouvons pas nous dispenser de généraliser ce que nous saurions déjà faire pour les 10 à 30 ans qui viennent.

Problème important : **les transports longue distance**. S'agissant des transports terrestres à courte distance, l'électricité par exemple pourrait remplacer le pétrole, soit en individuel soit en collectif. Mais remplacer le kérosène pour les avions, sauf en dirigeable, n'est pas pour tout de suite. Le maritime est efficace énergétiquement, mais c'est surtout lui qui a explosé avec les échanges internationaux et pour l'instant, à part inventer des voiliers rapides.... S'agissant du transport routier longue distance, même si les camions ne rouleront à l'électricité que bien après les trains, tant que nous n'avons pas en Europe un réseau ferré fret électrique performant, nous allons devoir nous reposer sur du « routier à pétrole » pour la longue distance. Cet exemple illustre les limites de la technologie et le recours nécessaire à des réorganisations logistiques dans la production et la consommation.

Autre question, elle non technologique : **la robustesse institutionnelle et sociale**. Nous venons d'évoquer des échéances technologiques « libératoires » ou du moins soulageantes à 30 ou 40 ans. Entre temps, nous devons nous adapter à des modifications climatiques et à des tensions énergé-

tiques à techniques quasi existantes. Or il n'est pas équivalent de gérer une société avec des réserves d'énergie abondantes et de le faire avec des tensions énergétiques et des prix fluctuants. Comment organiser les institutions et la société de manière à passer cette période de transition sans trop de danger, notamment pour la démocratie ?

J'illustrerai ici avec les transports la notion d'inertie des systèmes. Selon l'Ademe, à partir du moment où arrive une nouvelle technologie, il faut 13 à 15 ans en France pour équiper la moitié du parc et 24 à 25 ans pour équiper sa totalité. Si nous parlons de stockage électrique ou d'hydrogène qui arriverait au stade industriel par exemple vers 2020, en 2035 seule la moitié du parc serait équipée. Cela ne veut pas non plus dire que nous n'en n'aurons pas besoin ; cela veut dire que nous ne pouvons pas attendre 2035 si nous voulons rester à +2°C de plus seulement en température globale (soit +3°C en France).

Nous devons donc revenir à ce que nous savons déjà : d'abord, la relation de l'aménagement du territoire à la consommation de pétrole par les transports (figure 22). Certains ici connaissent forcément cette courbe qui représente en fonction de la densité moyenne des agglomérations, la consommation d'énergie par les transports des citadins : par consommation croissante, Hong-Kong, Singapour, les capitales européennes, les grandes villes australiennes et les grandes villes américaines. Un

## Formes urbaines et consommation énergétique des transports Newman & Kenworthy-

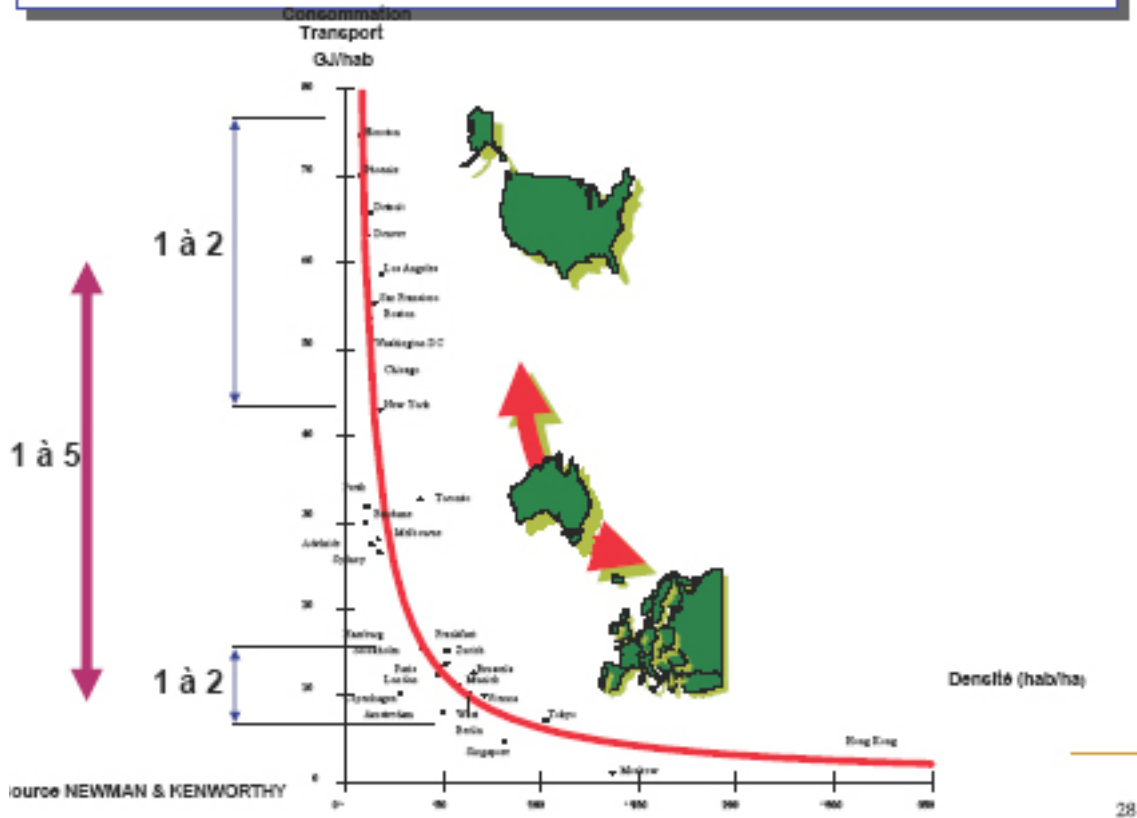


Figure 22

urbain américain est contraint de consommer 5 fois plus d'énergie en transport pour vivre qu'un citoyen moyen européen. C'est l'une des explications de la moindre efficacité énergétique du système américain et de leur forte dépendance au pétrole. La structure du territoire est l'un des composants lourds de la consommation totale de

carburant par habitant (elle est en Amérique du Nord le double de l'Europe de l'Ouest). Ainsi, les transports consomment les deux-tiers du pétrole en France, et la consommation de pétrole par habitant est la même en France et en Allemagne. On entend souvent « Oui, mais ceci est une question de richesse : quand nous sommes plus riches,



nous consommons plus d'énergie ». Ce n'est pas exact : vous avez vu qu'entre 1973 et 1987, nous étions devenus beaucoup plus riches tout en consommant moins. Ce n'est pas non plus vrai pour les pays au-dessus de 5 à 6 000 dollars de PIB par tête : dans ces catégories, pour un même PIB, les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux consommations de combustibles fossiles sont très différentes d'un pays à l'autre et ce n'est pas largement pas qu'en fonction de leur mix énergétique (figure 23).

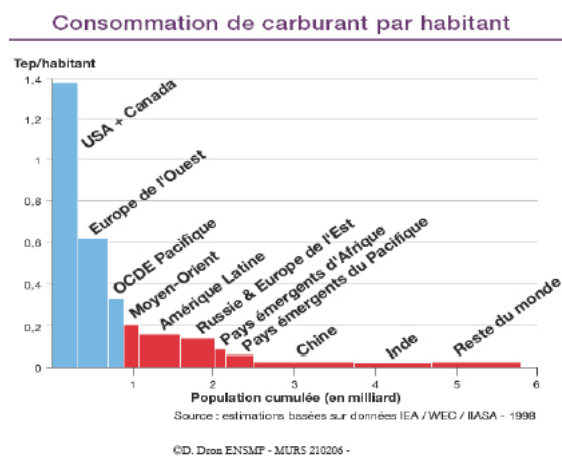


Figure 23

Autre marge très simple : nous ne sommes pas obligés de choisir une voiture qui consomme beaucoup. Sachant qu'une voiture reste à 80 % du temps stationnée, les 20 % d'utilisation se font à 80 % en ville, c'est-à-dire à des vitesses inférieures à 50 km/h. En cycle urbain européen normalisé, donc

pour un même trajet et service rendu, vous allez consommer, si vous avez une voiture conçue pour rouler à 220-240 km/h – ce qui est d'ailleurs strictement interdit –, va consommer deux à deux fois et demi plus de carburant qu'une voiture censée ne pas pouvoir dépasser 140. Vous n'êtes donc pas non plus obligés d'acheter une voiture qui grève votre budget pétrole avec le budget CO<sub>2</sub> de la planète. Une précision est intéressante à ce sujet : les achats de voitures neuves sont faits à 40 % par les entreprises qui souvent les revendent après 3 ans. Les parcs moyens des voitures d'entreprises consomment environ un demi-litre de plus que le parc moyen français. Selon Jean-Pierre Orfeuill, si les entreprises françaises n'achetaient plus que des voitures consommant un litre aux cent kilomètres de moins, la France économiserait un million de tep (tonnes équivalent pétrole) par an.

Puisque nous en étions à rouler en ville, faisons nos emplettes. Examiner les relations entre urbanisme et transport suscite inévitablement la réaction suivante : « Oui mais changer une ville, c'est très long ! ». Cependant, certaines interventions pourraient être beaucoup plus rapides : il s'agit des choix de fonctionnalité dans la ville et notamment des choix concernant la distribution et le commerce. L'exemple suivant est cher à l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (figure 24).

Vous avez trois solutions pour faire vos courses. La première est le scénario 2 : vous

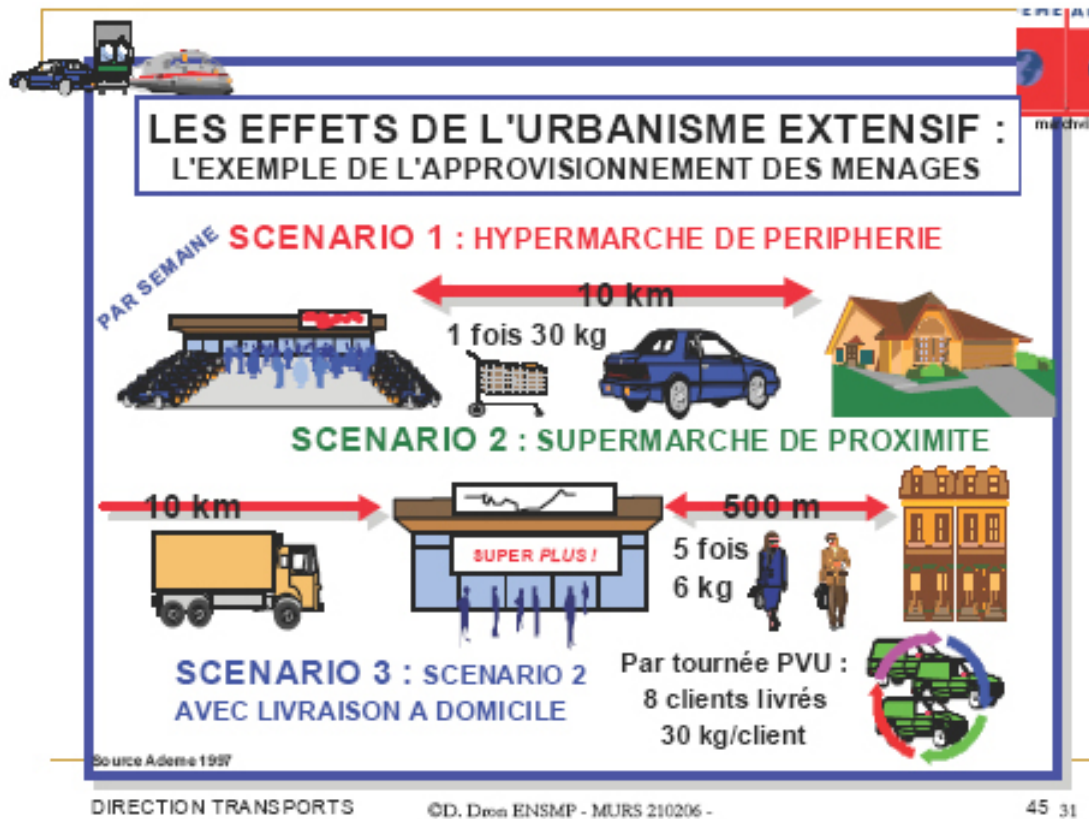


Figure 24

habitez dans une zone où il y a encore des commerces, vous pouvez, en rentrant du travail, passer à la supérette locale faire vos courses, à pied ou en transport en commun et les ramener chez vous plusieurs fois dans la semaine. Cette supérette est alimentée depuis un grossiste par un camion de 6 tonnes qui vient de 10 kilomètres deux fois par semaine. Autre scénario, le 1, vous habitez dans une zone désertifiée commercialement et vous allez à l'hypermarché tous les week-

ends. Vous prenez votre voiture, faites vos 10 kilomètres une fois par semaine et vous ramenez votre caddie. Troisième possibilité, vous faites vos courses par internet et vous vous faites livrer par une camionnette.

Le bilan est éloquent : par rapport au scénario de base, celui des villes équipées en commerces de proximité, le schéma hypermarché consomme 60 fois plus de pétrole. Si vous faites rouler des camionnettes avec l'e-

commerce, vous allez consommer encore 15 à 16 fois moins que dans le scénario hypermarché. Ce facteur 15 ou 60 est tout à fait bienvenu lorsque l'on parle de facteur 5 en énergies de transport. Il est d'autant mieux venu que beaucoup de personnes résidant dans ces zones sont contraintes d'avoir une voiture ou un deux-roues pour le travail et pour l'adolescent qui va au lycée ou à l'Université, quand la zone est mal desservie en transports en commun. Déjà en 1994, Orfeuil et Polacchini comparaient en Ile-de-France les zones dans lesquelles le prix du foncier est peu élevé et les zones chères, le centre ville par exemple : si le pourcentage du revenu occupé par le logement reste entre 20 et 28 %, plafonné par les prêts bancaires, le pourcentage du revenu occupé par le transport varie entre 5 et près de 30 %. Cette dépense est contrainte puisque selon une autre étude (IAURIF), si vous n'avez pas de voitures dans ces zones, vous divisez par 100 vos chances d'avoir un travail.

Le renchérissement inévitable du carburant et des charges de chauffage et d'électricité du bâtiment est donc en train de créer des situations socio-économiquement intenable et politiquement explosives, d'autant que ces dernières années, l'Ile-de-France, comme d'autres grosses agglomérations françaises, ont continué à se « ghettoïser » selon une étude publiée à la fin des années 90 par Vincent Piron et poursuivie récemment par Jean-Pierre Orfeuil : l'évolution des résidences au cours des années 90 chez les cadres d'Ile-de-France montre que la plu-

part d'entre eux ont déménagé dans des zones de bonne accessibilité, en général avec des transports en commun, seul un tiers est allé dans des zones de moindre accessibilité, à voiture obligatoire. En revanche, les mouvements d'employés se sont tous traduits par la perte des logements en zone à forte accessibilité au profit de zones où ils dépendent complètement des voitures. Ce qui conduit à méditer de façon moins simpliste le slogan selon lequel chacun souhaiterait à tout prix un pavillon avec jardin en banlieue. Il en va de même s'agissant des emplois. Les modifications d'emplois de cadres se sont réparties à égalité entre des zones de plus ou de moins bonne accessibilité, mais les emplois d'employés ont tous été perdus dans des zones de bonne accessibilité de transports en commun et reconstitués dans les zones où vous avez absolument besoin d'une voiture. Aujourd'hui, dans certains cas, le DRH d'une entreprise est contraint de recruter au moins autant sur le critère de la possession d'une voiture que sur l'adaptation au poste vacant.

Les préoccupations CO<sub>2</sub> recourent donc des préoccupations très classiques pour des gestionnaires de territoires et des politiques.

Rappelons les ordres de grandeur que nous pouvons gagner aujourd'hui, à technologie existante, en faisant du transfert modal : un facteur 60 si vous allez à Toulouse ou à Marseille en TGV plutôt qu'en avion. Si vous prenez le TGV plutôt que votre voiture,

vous pourrez tranquillement lire dans le train et vous gagnerez un facteur 35. S'agissant de marchandises, entre la route et le rail, avec des résultats variables selon que vous regardez la moyenne ou les meilleurs, les rapports peuvent aller jusqu'à 200 entre la moyenne du parc et le meilleur train de marchandises. Il existe un facteur de 2 à 3 entre la route et le fleuve. Vous pouvez même obtenir en « route-route », un facteur 2 à 4 ; c'est le cas dans les livraisons en ville, autre exemple cher à l'ADEME : si vous devez livrer 12 fois une demi-tonne en ville en envoyant des camionnettes simultanément à 12 endroits différents, parce que vos clients vous ont demandé de livrer entre 6 h 45 et 7h00 ou que le règlement de la collectivité impose de livrer dans un créneau restreint, vous allez consommer 2 à 4 fois plus d'essence que si vous pouvez déposer ces 6 tonnes dans un camion qui fait une tournée des 12 points. Voici donc là aussi des marges de manœuvre immédiates auxquelles nous ne pensons pas forcément.

Dernier secteur où existent des possibilités auxquelles nous ne pensons pas assez, en France : **agriculture et sylviculture**.

Nos systèmes agricoles sont beaucoup trop vulnérables aux changements climatiques, pour bon nombre de raisons. D'abord parce que nous les avons fortement appauvris : plantes et animaux ont été sélectionnés sur un critère unique, souvent le rendement en viande, en lait ou en grains, au détriment de leur robustesse ce qui devait

être compensé par la chimie. Par exemple, l'été dernier, l'Ile-de-France a été aspergée par hélicoptère de deltaméthrine, un pesticide, parce que les maïs étaient envahis de chrysomèles auxquelles ils n'étaient pas résistants. Pourtant le maïs est originellement résistant à la chrysomèle : il a la capacité, dès qu'il commence à être croqué par une larve de chrysomèle, d'émettre du caryophyllène, une substance qui attire les prédateurs des chrysomèles et lui permet de se débarrasser de ces ravageurs. Mais les sélectionneurs de maïs, obnubilés par le rendement en grain, n'étaient pas assez préoccupés de robustesse intrinsèque des variétés. Nos deux problèmes sont donc d'abord que nous avons moins le choix aujourd'hui dans ce que nous cultivons (mais tout n'est pas perdu car bon nombre de variétés existent dans les catalogues et les conservatoires de l'INRA ou d'ailleurs) et ensuite que ceux que nous avons sélectionnés sont généralement vulnérables.

Deuxièmement, notre agriculture majoritaire est très dépendante énergétiquement, elle consomme plus d'énergie qu'elle n'en fournit, alors qu'elle dispose du moteur de la photosynthèse qui en produit gracieusement. L'utilisation d'engrais de synthèse représente aujourd'hui 55 % à 65 % du bilan énergétique des grandes cultures. Pourtant, l'INRA et certains réseaux d'agriculteurs développent depuis au moins une dizaine d'années et parfois beaucoup plus des systèmes de grande culture et d'élevage bien plus économes en énergie, pesticides et en en-

grais, avec des résultats économiques tout à fait satisfaisants pour l'agriculteur.

En outre, des cultures comme le maïs ou le riz sont très dépendantes de l'eau (par irrigation), et cela sera handicapant en régime plus sec, notamment dans le Sud. Or il existe par exemple du riz naturel qui pousse sans ennoyage. Mais comme les pays qui ont le plus développé la culture du riz étaient les pays les plus humides, et utilisaient les rizières, nous avons souvent oublié cela.

Autre problème de vulnérabilité agricole, l'emploi de produits chimiques et d'engins lourds a réduit l'activité biologique et la capacité d'adaptation des écosystèmes supports de l'agriculture, notamment le sol : dans certains endroits, comme des vignobles de l'Hérault, le sol ne se reconstitue plus, les racines des ceps se fossilisent parce que l'activité du sol a été éteinte par la compaction et l'empoisonnement. En outre, pour éviter le recours à des fongicides, ou des insecticides comme dans le cas de la chrysomèle, encore faut-il disposer du prédateur de cette chrysomèle qui permette au maïs de jouer son rôle et d'éviter le recours au phytosanitaire. Pour cela, il faut que l'écosystème support soit en assez bon état pour héberger les prédateurs qui peuvent aider à réduire la pression exercée sur les écosystèmes. Il en va de même pour la sylviculture.

Pourquoi insister sur ce point ? Sous la perturbation climatique rapide qui se dé-

veloppe, les écosystèmes constituent notre « ceinture de sécurité » climatique. La capacité d'adaptation des écosystèmes est notre « éco-sécurité », pour nos ressources naturelles, pour nos ressources en eau, pour la fertilité des sols, pour la capacité à produire de la nourriture et pour la réduction des intrants fossiles. Les Américains, depuis une bonne quinzaine d'années, font des recherches que j'appellerai « écomimétiques », pour comprendre comment un écosystème naturel du type de la grande prairie est capable tous les ans de produire autant de biomasse sans aucun intrant. Pour cela, ils font un inventaire systématique de toutes les espèces présentes, des plus microscopiques aux plus grandes, et tentent de comprendre la façon dont tout cela fonctionne. L'idée est de faire non plus de la boxe avec la nature, mais plutôt du judo et de transposer ces fonctionnements à la production de nourriture.

Nous avons besoin d'écosystèmes en bonne santé. Or, nous ne savons absolument pas avec quelles espèces ni quelles associations d'espèces nous serons en mesure d'encaisser cette vitesse de changement. Seuls les fonctionnements naturels sont capables de les sélectionner, encore faut-il que nous la laissions faire. L'humanité a déjà essayé de reconstituer des écosystèmes, mais souvent à petite échelle et un peu « à la sauvette » ; et même avec des moyens importants, « Biosphère 2 » aux Etats-Unis fut un échec cuisant : en effet, il y a trop de paramètres à contrôler et simplement déjà

à connaître, effort que l'humanité n'a pas fait et qui est peut-être partiellement hors de portée. Nous avons également besoin de ces écosystèmes pour maîtriser les risques tels que les inondations, mais aussi les risques liés aux espèces invasives.

Pour finir, vous avez tous entendu parler de centaines de collectivités, aux Etats-Unis, en Europe, en France, ayant décidé des politiques de réduction de gaz à effet de serre : en France, Châlon-sur-Saône a récemment montré qu'elle avait réduit de 10 % de ses émissions de gaz à effet de serre en deux ans, mieux que les -5,2 % de Kyoto (sans parler de la stabilisation qui est l'objectif national global). Une fois que nous aurons répertorié et mis en œuvre toutes les possibilités existantes, nous pourrions nous pencher sur les questions plus futuristes dont nous parlions précédemment, et qui détermineront dans quelles directions nous avons intérêt à aller pour ce qui concerne l'avenir à moyen terme de la production d'énergie primaire.

Evidemment, les grands pays charbonniers - Etats-Unis, Canada, Chine, Australie, Inde - puiseront dans leurs réserves. Mais d'un point de vue climatique, l'utilisation du charbon devra se faire en fonction de la capacité à stocker le carbone ; ce qui suppose de toutes façons d'infléchir sérieusement les rythmes de consommation : pour rester à +2°C, il faudrait n'exploiter que le tiers des ressources fossiles du globe...

Est-ce que tout cela est cher ? Si nous en croyons les scénarios technico-économiques du GIEC, dont le CIRED a fait un compendium, le fait de plafonner à 450 ppm CO<sub>2</sub> stabilisées coûterait 4 % du PIB mondial cumulé en 2050. Autre source : le Secrétaire à l'Environnement britannique disait en 2004 que 60 % de CO<sub>2</sub> de moins en 2050 représentaient seulement 6 mois de retard de PIB théorique sur 50 ans... rien à voir avec ce que représenterait le traumatisme extrêmement violent d'un changement climatique tendanciel. Nous aurons en outre bon nombre de bénéfices secondaires, qui ne sont pas comptés dans les bilans précédents : moins de pollution de l'air, des conflits évités, un pic pétrole et gaz repoussé et des prix moins volatils, des tensions sur l'eau moins vives avec un changement climatique moins lourd. Vous avez certainement entendu qu'en scénario tendanciel sur les 50 prochaines années, le GIEC estimait en 2005 à entre 50 et 150 millions les migrants attendus pour ce demi-siècle pour raisons climatiques, par sécheresse ou submersion de terres littorales.

## CONCLUSION

Quelques points en conclusion :

- D'abord la conscience de l'ampleur du défi percole de plus en plus rapidement dans le public, et apparemment plus rapi-

dement dans le public que dans les cercles de décision ; nous avons dans ce contexte une chance avec le problème que nous pose aujourd'hui la question pétrolière : il devient pour ces deux raisons conjointes plus risqué de ne rien changer que d'évoluer.

- Ensuite, la tâche implique une complexité et des échéances qui vont requérir absolument toutes les disciplines et c'est ce que j'ai coutume, avec un peu de malice, d'appeler la revanche des scientifiques et des ingénieurs sur les financiers. Mais c'est aussi aux politiques et aux citoyens que la question s'adresse. L'organisation des territoires, la robustesse institutionnelle et sociale, la répartition des progrès à faire, se posent à nous tous et maintenant. Il s'agit d'un enjeu de fiabilité, de robustesse de nos sociétés. En effet, lorsqu'un territoire n'est pas capable de se relever rapidement soit de fortes fluctuations du prix de l'énergie, soit de dégâts climatiques, il est moins attractif parce qu'il fonctionne moins bien. L'inertie des systèmes commande d'agir maintenant : lorsque nous construisons une infrastructure, c'est pour un siècle et demi au bas mot ; lorsque nous construisons un bâtiment, c'est pour un siècle au moins ; lorsque nous construisons une usine c'est pour 40 ans. Nous devons donc changer nos critères de décision maintenant, en fonction du monde dans lequel nous allons vivre et qui n'a pas grand-chose à voir avec celui dont nous venons, sauf que nous en héritons quelques technologies et organisations que nous pouvons déjà appliquer davantage.

- L'efficacité énergétique sera un paramètre-clé du siècle à venir parce qu'il s'agit de la marge de manœuvre dont disposent tout les pays tout de suite et qui est tout ou partiellement récupérable en termes de dépendance et de facture énergétiques réduites.

- Les énergies renouvelables sont incontournables, mais pas n'importe comment : si vous voulez faire des agri-carburants façon agriculture intensive classique, avec des engrais qui font 60 % du bilan énergétique et beaucoup de phytosanitaires, vous allez réduire plus le carbone et la fertilité des sols, et accroître davantage la vulnérabilité territoriale, que vous n'allez gagner de CO<sub>2</sub> en transferts essence-éthanol ou gazole-diesel.

- Les marges de manœuvre existantes « gagnant-gagnant » supposent des conversions nécessaires pour certains acteurs économiques mais nous avons déjà des moyens considérables d'action et d'innovation.

- La bonne nouvelle aussi est que ce facteur 4 nous amènera vers un monde vraisemblablement plus riche et moins violent qu'un scénario tendanciel.

- Enfin, ce besoin de continuité et de cohérence des politiques sur plusieurs décennies fut un peu perdu de vue depuis une vingtaine d'années comme si les systèmes économiques avaient pris l'habitude de se mettre au pas de temps quasi instantané de

la finance. Objectivement, la mondialisation financière est un fait de notre organisation économique et elle influe énormément sur les rythmes et les perspectives. Beaucoup de chefs d'entreprises souffrent de cette situation récente parce qu'elle les empêche d'avoir des stratégies industrielles à moyen terme. Nous avons aujourd'hui besoin de continuité d'action sur plusieurs décennies et c'est au fond un pas de temps bien connu des gestionnaires de territoires et des industriels.

J'espère avoir pu faire passer trois messages : le premier est que le problème est sérieux, le deuxième est que nous pouvons éviter le cataclysme même si cela va beaucoup nous solliciter, et le troisième est qu'après tout, serons-nous si tristes de devoir modifier quelques caractéristiques de la période que nous vivons ?

Je vous remercie.

**Dominique DRON**

*Professeur à l'École des Mines de Paris  
Centre Energétique et Procédés*