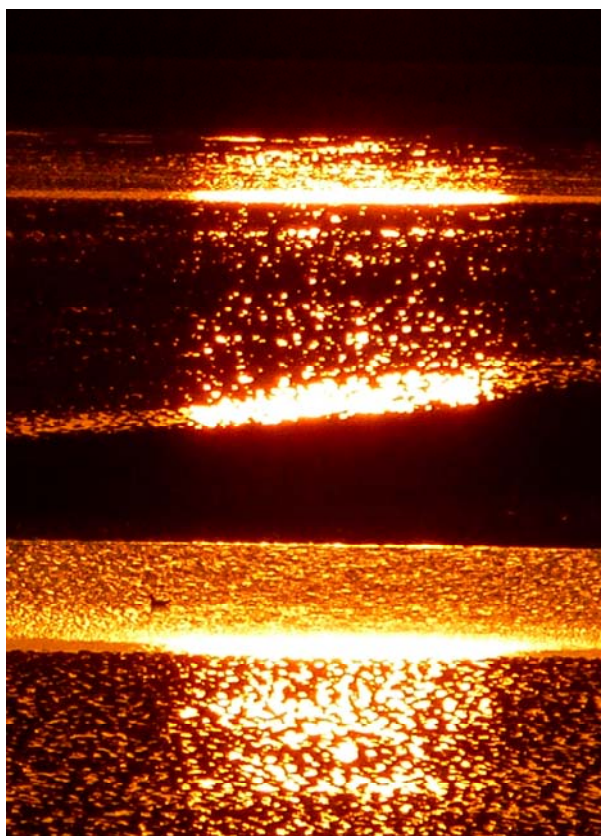


CHRONIQUES de L'ENVIRONNEMENT

La nature est-elle bonne ?



Chronique 8 : La Dictature des modèles

ROGER PAPP

Professeur honoraire de l'Ecole Centrale de Paris

Conseil National des Experts en Environnement de l'Industrie Chimique

CNEEIC

2013

L'ensemble des Chroniques

- Chronique 1 Le bon vieux temps ?
- Chronique 2 La Nature est- elle bonne ?
- Chronique 3 Les produits naturels sont-ils meilleurs pour la santé ?
- Chronique 4 La peur de l'Apocalypse
- Chronique 5 Histoires de Dioxines
- Chronique 6 Un trou sur l'Antarctique
- Chronique 7 Histoire de chenilles et autres histoires
- Chronique 8 La Dictature des modèles**
- Chronique 9 L'Homme va-t-il disparaître ?
- Chronique 10 Greenwashing
- Chronique 11 Le droit gazeux et le principe de précaution
- Chronique 12 Le steak-frites est-il dangereux pour la santé
- Chronique 13 Au feu !!
- Chronique 14 Experts et contre-experts

Liste des sigles utilisés

Table des unités utilisées

Les opinions exprimées dans ces chroniques n'engagent que leur auteur

© CNEIIC, 2013 tous droits réservés



Préface

Roger Papp a achevé la rédaction de ces chroniques quelques mois avant son décès en janvier 2012. Co-fondateur du CNEEIC, ingénieur industriel de grande réputation doté également de compétences scientifiques, pédagogiques et humaines reconnues, l'enseignement qu'il a dispensé tant à l'Ecole Centrale de Paris qu'aux sessions de formation du CNEEIC a toujours été basé sur une approche scientifique et technique rigoureuse et exhaustive.

Dans cet ouvrage, il se livre à un exercice délicat et salutaire de passage au crible de la plupart des thématiques environnementales trop souvent sujettes à controverse : les produits bio, la foi absolue dans les modélisations, l'influence des perturbateurs endocriniens sur la fertilité humaine, le rôle et les limites de l'expertise pour n'en citer que quelques uns.

Avec une grande honnêteté intellectuelle, les articles scientifiques publiés sur chaque thème sont passés en revue, commentés, dans le souci de dépasser les présentations trop souvent schématiques des médias ou la recherche du sensationnel.

Il s'apprêtait à publier en 2012 ces chroniques dans un ouvrage qui aurait représenté sa pensée, son opinion, sa contribution d'une qualité scientifique inestimable au débat sur l'environnement. Nous remercions son neveu Stéphane Papp de nous avoir autorisés à publier ces chroniques car c'est un honneur pour le CNEICC de rendre ainsi hommage à la contribution majeure qu'il a apportée à nos travaux.

Mars 2013,

Pierre Jomier, Président du Conseil Scientifique,

Michel Monzain, Délégué Général

Jacques de Gerlache, Président du CNEEIC

« Il se fait en ce moment une religion de la nature (dans un sens qui est celui de Jean-Jacques Rousseau) et elle est aussi redoutable. »

Pierre- Gilles De Gennes, Prix Nobel de physique

Chronique 8 : La Dictature des modèles

Lorsqu'en 1798, l'économiste et pasteur anglais **Thomas Malthus publie son «*Essai sur le principe de la population*»**, il publie un premier modèle de prévision, qui va s'avérer, comme beaucoup d'autres, par la suite, bien hasardeux... Que dit Thomas Malthus dans cet essai ? La population du globe augmente en progression géométrique, alors que la quantité de nourriture disponible ne progresse que de façon arithmétique... Donc, il y aura pénurie : famines et catastrophes sont inévitables... Pour éviter la fin du monde des hommes, dit Malthus, la croissance de la population ne doit pas excéder celle de ses ressources.

Dans l'échelle de temps pris en compte par Thomas Malthus, les lois qu'il énonce sont sans doute exactes, ses prévisions sont raisonnables, mais son « modèle » néglige complètement les facultés d'adaptation et l'intelligence de l'homme, qui, même s'il met parfois du temps à réagir, modifie toujours les données en présence.

La croissance de la population ne doit certes pas excéder celle des ressources : mais ces deux données ne sont pas immuables. Elles ont beaucoup changé depuis Malthus !

La croissance des ressources

L'homme a inventé les engrais, la sélection des semences, les croisements d'animaux... la teneur en nitrates de la terre est l'élément principal limitant la croissance des plantes. Dans un champ de blé, la production, à partir de semences sélectionnées, augmente parallèlement à l'apport d'engrais (et d'eau), jusqu'à un maximum au-delà duquel l'agriculteur dépasse les capacités d'absorption du sol et de la plante, et perd son argent, tout en polluant les nappes phréatiques, les rivières, et même l'atmosphère par dénitrification et émission d'ammoniac et de protoxyde d'azote. Les désherbants sélectifs permettent au blé de ne pas être en concurrence avec les herbes folles. L'analyse des sols, permet d'ajuster la quantité et le moment de l'apport d'engrais et sa nature, pilotés éventuellement par ordinateur! La croissance des ressources a été fortement sous-estimée par Malthus. On peut le comprendre : c'était l'époque du « petit âge glaciaire », du 17^e siècle au milieu du 19^e siècle... Cette période froide s'accompagne de mauvaises récoltes, alors que la productivité est faible. La grande famine de 1693 à 1694 avait été particulièrement meurtrière : Emmanuel Leroy Ladurie estime à 1.300.000 morts supplémentaires son impact en France, dont la population

n'était à l'époque que de 20 millions d'habitants. Nouvelle famine en 1709 : 600.000 morts ! Comment Malthus aurait-il pu être optimiste ?

La production de blé par hectare était de l'ordre de 15 quintaux jusqu'à la fin du 19^e siècle, et pourrait être, du temps de Thomas Malthus, du même ordre de grandeur que celle des pays peu développés aujourd'hui : moins de dix quintaux ! Et en 1800, il y avait beaucoup de pertes, car les procédés de conservation étaient rudimentaires et peu efficaces ! (Il y a encore beaucoup de pertes aujourd'hui dans certaines régions du globe). Un champ de blé d'un hectare produisait 25 quintaux de blé en 1950, 50 quintaux en 1970. Il en produit entre 75 et 90 trente ans plus tard (statistiques du Ministère de l'Agriculture), et le record est de 130 quintaux. On commence d'ailleurs à se poser des questions sur cette forme d'agriculture intensive, dont les intrants nuisent à l'environnement.

La consommation mondiale d'engrais est passée de 73,8 millions de tonnes en 1972 à 132,7 millions de tonnes en 1992, et la FAO (Food and Agriculture Organisation des Nations Unies) estime sa consommation dans le monde à 80 kg par habitant et par an.

Grâce à des progrès de la connaissance et l'optimisation dans l'utilisation des engrais, l'Europe, qui en consommait 55 kg par habitant et par an en 1972, n'en consommait plus que 30 en 1998. L'heure est à la prévention de la pollution des eaux. Les plantes ne peuvent absorber l'azote nécessaire à leur croissance que lorsqu'il est dissous dans l'eau du sol. Ce passage obligé représente un risque de pollution en cas de surdose.

Tous ces progrès ont permis à la France de produire 70 millions de tonnes de céréales en 2009 (dont environ 38 millions de tonnes de blé) et d'être le cinquième producteur et le deuxième exportateur mondial, avec 27 millions de tonnes exportées (Parmentier, 2007, Service Central des Etudes et Enquêtes Statistiques du Ministère de l'Agriculture, 2010).

La production de blé de la France a sans doute plus augmenté que sa population, entre 1798 et aujourd'hui ! Et des progrès sont aussi réalisés ailleurs : Guy Sorman (2008), note que la révolution verte indienne des années 1970, a doublé la production de riz en 10 ans : *« une population deux fois plus nombreuse en 2000 qu'en 1947 eut accès à deux fois plus de calories par habitant. Malthus avait eu tort : les subsistances progressent plus rapidement que la population, et la démographie ralentit au fur et à mesure que les subsistances augmentent... »*. La FAO estime que la production mondiale de l'agriculture a augmenté de 72% entre 1980 et 2004, soit à un rythme de 2,3% par an alors que la population dans la même période a augmenté de 1,2% par an (Le Bras, Vie et mort de la population mondiale, 2009).

Même les vaches laitières ont fait preuve d'une forte productivité : *« La productivité de la vache du 19^{ème} siècle est sans rapport avec celle de 2007.*

Les progrès génétiques, l'utilisation de races laitières, une rotation rapide du cheptel, une alimentation riche et équilibrée ont permis de multiplier la lactation moyenne par cinq en moins d'un siècle ». (Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de la Manche ; Note n°3 Sept. 2007). Ces progrès ont aussi leurs revers : les vaches produisent du lait aujourd'hui 10 mois sur 12, car une nouvelle gestation commence avant la fin de la période de lactation de la gestation précédente : résultat, le lait contient beaucoup plus d'œstrogènes, qui, heureusement, semblent peu actifs pour les humains ! Mais les troupeaux de vaches rejettent sept à huit fois plus d'œstrogènes dans l'environnement, et on retrouve ces œstrogènes dans les rivières.

Il faut aussi remarquer que l'on gaspille beaucoup : dans son rapport du 17 Février 2009, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement affirme qu'une meilleure organisation de la chaîne de production alimentaire permettrait à elle seule de nourrir l'excédent de population attendu pour le monde à l'horizon 2050. Et le rapport cite des exemples : au Royaume Uni, un tiers de la nourriture achetée n'est pas consommée. Des fruits et légumes sont détruits en Europe parce que non « conformes » à des normes de taille ou d'aspect, qui viennent heureusement d'être révisées. Ou parce que le prix proposé ne couvre pas les frais de cueillette, situation scandaleuse ! La moitié de la production des fruits et des légumes serait ainsi perdue. Au total, affirme Le Monde du 19 Février 2009, « *près de la moitié de la production alimentaire mondiale est aujourd'hui perdue parce qu'elle ne correspond pas à des normes de marché, ou gaspillée lors de la consommation (Laurence Caramel)*. Le rapport de la FAO de 2011, « Global food losses and food waste » estime à 1,3 milliard de tonnes la quantité de nourriture gaspillée dans le monde. L'Europe et les Etats Unis se distinguent particulièrement avec des pertes de 280 à 300 kilos par an et par habitant, tandis qu'en Afrique sub-saharienne et en Asie du sud-est, les chiffres sont de 120 à 170 kg/an. Les pertes dans les pays en développement sont attribuées à des causes techniques, mauvais matériel de récolte, mauvaises conditions de stockage, insuffisances de la chaîne du froid, du conditionnement, des techniques de marketing. Pour les pays développés, sont accusées les normes de marché, et aussi les mentions « à consommer de préférence avant... », que le consommateur interprète comme une limite stricte à ne pas dépasser. Les pertes au niveau du consommateur sont estimées entre 95 et 115 kg par an et par habitant pour l'Europe et les Etats-Unis, ces chiffres étant de 6 à 11 kg pour les pays du sud Sahara ou de l'Asie du sud-est. Sept millions de tonnes de poissons seraient rejetées en mer chaque année par les bateaux de pêche...

On gaspille donc beaucoup. C'est aussi l'avis de Gilles Pison, Directeur de recherches à l'INED, pour qui la production alimentaire n'est pas le problème, mais plutôt le mode de vie, de consommation et de conservation (Alternatives Economiques n°83, 2009). On peut aussi remarquer avec Yves Berthelot (2010)

que « *la faim ne s'explique pas par un manque de nourriture au niveau mondial, mais par l'incapacité d'une partie de la population à y accéder, faute de revenus suffisants.* » Lutter contre la faim suppose donc de lutter contre la pauvreté, en particulier dans les pays du Sud, où très souvent les richesses ne profitent qu'à des minorités.

La deuxième affirmation, selon laquelle la population augmente de façon géométrique, est tout aussi inexacte !

On constate que l'augmentation du revenu par habitant, la baisse du taux de mortalité en bas âge, diminuent le taux de natalité. Dans leur ouvrage : « *Le rendez-vous des civilisations* » (2007) Emmanuel Todd et Youssef Courtage relèvent également le rôle important de l'alphabétisation des femmes sur le taux de natalité du monde musulman, et constate une forte corrélation entre ces deux facteurs. Ils notent que ce taux pour le monde musulman est passé de 6,8 enfants par femme en âge de procréer, en 1975, à 3,7 enfants en 2005, et que des pays comme l'Iran et la Tunisie, ont des taux de natalité semblables à celui de la France, c'est à dire voisins de 2. La corrélation entre taux de fécondité et éducation est particulièrement nette en Iran, où le taux d'alphabétisation des plus de 15 ans est passé de 36,5% à 84,4% entre 1976 et 2007 tandis que le taux de fécondité passait de 6,7 à 1,83 dans la même période. Hervé Le Bras attribue la diminution de la natalité dans ces pays à deux motivations des femmes : l'aspiration à plus d'égalité, particulièrement dans l'accès à l'espace public, qu'il soit politique ou économique, et les espoirs d'ascension sociale de leurs enfants par l'éducation. C'est la théorie de la transition démographique. Dans ces conditions, dit-il, la population mondiale atteindrait un maximum vers 2040, puis commencerait à décroître assez lentement (Le Bras, 2009). Evidemment l'idée de contrôle volontaire des naissances par les femmes ne pouvait être prise en compte par un homme d'Eglise tel que Thomas Malthus ! La population du monde a dépassé le chiffre de 7 milliards en Octobre 2011. Sept fois plus qu'il y a deux siècles ! Mais l'augmentation n'est plus en 2011 que de 1,1%, contre 2% il y a cinquante ans (INED, 2011).

Mais l'insécurité alimentaire existe dans de nombreuses régions de la planète...

On objectera qu'il existe sur terre des régions qui vérifient la thèse de Malthus : surpopulation et manque de nourriture. Selon la FAO (2006), 854 millions de personnes étaient sous alimentées dans le monde en 2003, et le rapport de 2011 porte ce nombre à 925 millions. En Afrique sub-saharienne le pourcentage de personnes sous alimentées atteint le record de 35% de la population. Mais il faut chercher d'autres raisons à cette situation dramatique :

conflits et instabilité politiques, corruption, rendements agricoles dérisoires, sécheresses ou inondations à répétition, insuffisance de la protection des cultures et de l'irrigation, mauvaise conservation des récoltes, et répartition scandaleuse des richesses du pays...

Le Zimbabwe était naguère considéré comme le grenier de la région australe de l'Afrique, du temps où le pays s'appelait Rhodésie et, avant la réforme agraire imposée en l'an 2000, malgré le vote contraire de la population. Les fermiers blancs sont expropriés, parfois assassinés, et la plupart émigrent vers les pays voisins. Aujourd'hui, le Zimbabwe dépend de l'aide alimentaire mondiale et connaît un taux d'inflation annuel supérieur à 11 millions pour cent, un chiffre qui défie les lois de l'économie ! Et il s'y ajoute une épidémie de choléra ! Pour survivre, ses habitants émigrent en Afrique du Sud ou d'autres pays du Sud de l'Afrique. L'Ukraine espère bien redevenir le grenier à blé de l'Europe. Actuellement, sur ses 42 millions d'hectares de terre arable fertile, la fameuse terre noire d'Ukraine, un tiers est en friche, et un autre tiers très mal exploité.

Et, comme l'écrit Bruno Parmentier : *« Y-a-t-il vraiment un point commun entre les 28 millions d'agriculteurs de la planète qui sont équipés de tracteurs et de tout ce qui va généralement avec : surface importantes, semences sélectionnées, eau, engrais, pesticides et conseils techniques, et les 250 millions qui utilisent bœufs, chevaux, mulets, zébus, buffles et autres animaux... et enfin le milliard de paysans qui ne peut compter que sur la force de ses bras, munis d'une houe, et bien souvent sans aucun accès aux techniques modernes ! »* Il est vrai que certains pays sont privilégiés par le pourcentage de terres cultivables et le climat, mais de grands progrès sont possibles ailleurs.

Laurence Roudart, dans son étude « terres cultivables, terres cultivées », réalisée à la demande du Ministère de l'Agriculture français, remarque que : *« Sur les 13,4 milliards de terres émergées de la planète, quelque 30% soit 4,2 milliards, sont considérées comme cultivables, sans qu'il soit besoin d'irriguer. Or, sur ces 4,2 milliards, 60% ne sont pas cultivés. Cela fait tout de même 2,5 milliards d'hectares. »* Si l'on doit en exclure les forêts, puits de carbone et réserves de biodiversité, ainsi que les espaces protégés, les prairies et pâturages, *on dispose quand même de 970 millions d'hectares pouvant être cultivés, principalement en Amérique latine et en Afrique sub-saharienne* (La Recherche n°454, 2011). Plus d'un tiers des surfaces émergées est recouvert de forêts, (41%), un autre tiers est consacré aux activités agricoles : 11% de cultures et 20% de prairies et pâturages. L'emprise des villes est inférieure à 1%, ce qui relativise les craintes des partisans de la densification de l'urbanisation. Mais la priorité n'est pas d'étendre les surfaces cultivées, ce qui entraîne des risques de déboisement et des pertes de biodiversité, mais plutôt d'accroître les rendements par hectare, qui peuvent être améliorés dans de nombreuses régions du monde.

En Afrique, les conflits incessants entraînent des migrations massives de population et la destruction de toute activité agricole. *On meurt, plus souvent, par la faute d'erreurs économiques que du Sida, dit l'économiste catalan Sala y Martin, cité par Guy Sorman dans : « l'économie ne ment pas » (2008), évoquant le Zimbabwe, ou le « grand bond en avant » de la Chine de 1960. L'érosion des sols, la désertification, l'abandon des cultures vivrières au profit d'agricultures spécialisées soumises à la spéculation, aux évolutions brutales des cours, ont aussi leur part de responsabilité dans le fait qu'un habitant de la planète sur six est aujourd'hui sous-alimenté (Food and Agriculture Organisation of the United Nations, 2006). Et la spéculation s'étend aujourd'hui aux terres agricoles : à la tribune des Nations Unies le 17 février 2011, le Ministre français de l'Agriculture Bruno Le Maire déplorait cette situation : « La terre est elle-même devenue un objet de spéculation. Nous assistons partout à travers la planète à des achats massifs de terres agricoles : 45 millions d'hectares de terres agricoles ont été achetés, selon la Banque mondiale, début 2010 dans le monde. 70% de ces terres agricoles ont été achetés en Afrique. Ces achats privent l'Afrique du développement autonome de son agriculture. »*

Il faut aussi remarquer, avec Hervé Le Bras (1996), que 60% des céréales produites dans le monde sont destinées à la nourriture des animaux domestiques, et que, suivant une formule attribuée à Alfred Sauvy, les concurrents des pauvres affamés ne sont pas les riches, mais leurs vaches ! Il faut en effet 7 kg de céréales pour produire un kilo de bœuf, 4 kg pour un kilo de porc, 2 kg pour un kilo de volaille. On admet en général qu'une calorie animale en porc ou en poulet nécessite 4 calories végétales, mais que la calorie animale en bœuf ou en mouton en requiert 11 ! La demande croissante dans le monde de protéines animales participe évidemment à la hausse des prix des céréales. Ainsi les 1,315 milliard de Chinois auraient consommé 70 kg de viande chacun en moyenne en 2006, contre 13,7 kg en 1986, alors qu'ils n'étaient « que » 1,225 milliard ... Selon la FAO (2009), la production de viande de la Chine est passée de 8 millions de tonnes en 1965 à 74,3 millions en 2004 et plus de 90 millions en 2006 (dont 7,3 millions de tonnes de bœuf). Dans la seconde moitié du XX^e siècle, la population mondiale a été multipliée par 2,4 (6,09 contre 2,52 milliards d'habitants) et la consommation annuelle de viande a été multipliée par 4,6 (35 kilos par personne contre 18 en 1950, en moyenne). Ainsi, la conversion à des régimes carnés accroît le besoin en matières premières agricoles.

La concurrence des agrocarburants

Qu'en ce début du XXI^e siècle, on encourage la transformation des céréales, blé ou maïs, de la canne à sucre, du soja, de l'huile de palme, en carburant pour les automobiles, devrait interpeller ceux qui se soucient de nourrir l'humanité, indépendamment des bilans contestables sur l'effet de

serre. En mars 2007, le Conseil de l'Europe a décidé qu'à l'horizon 2020, 10 % des carburants utilisés pour le transport soient des agrocarburants. Et en 2011, seuls les agrocarburants de première génération, fabriqués à partir de canne à sucre, de betterave à sucre, de blé, de colza, de soja, de maïs, sont disponibles. Et la France fait preuve d'un activisme étonnant en fixant l'objectif de 10% pour 2015 !

Les prévisions les plus folles d'utilisation de céréales pour la production de biocarburants, ont entraîné une augmentation spectaculaire et spéculative des prix, avant que la crise financière et économique de l'automne 2008 ne fasse baisser les cours. Le blé est passé de 110 EUR la tonne au début 2006, à 284 EUR en février 2008, et a atteint un sommet en mars de la même année à 420 EUR la tonne. Dans la même période de janvier 2006 à février 2008 le soja est passé de 200 EUR la tonne à 343 EUR et le maïs de 75 EUR la tonne à 137 euros/tonne (le Point n° 1849 du 21 Février 2008). Même tendance pour l'huile de palme (+ 70% en un an). L'indice des prix des denrées alimentaires de base de la FAO, le FAO Food Price Index, est passé de 85 en 2000 à 238 en 2008. Malgré la crise financière de 2008, il était encore à 152 en mai 2009 et il atteint le niveau de 225 en septembre 2011, soit 13 points seulement au dessous de son pic de 2008 (Cet indice, créé en 1991, agrège les prix des céréales, des huiles et matières grasses, de la viande, des produits laitiers et du sucre). En 2008, le Brésil a produit 22,11 milliards de litres d'éthanol à partir de canne à sucre, à usage de carburant. Les Etats Unis, premier producteur mondial de maïs, utilisaient en 2008, 22% de sa production pour la transformer en 38,4 milliards de litres d'éthanol. Entre 2001 et 2007, la capacité de production d'éthanol des États-Unis a augmenté de 220%. Pour que cette production soit compétitive par rapport à la production du Brésil à partir de canne à sucre, le gouvernement des Etats Unis la subventionne à raison de 1 dollar par gallon (3,78 litres), qui s'ajoute à 0,5 dollar de droits de douane (Stiglitz, 2010). Il faut environ 3,3 tonnes de blé pour produire une tonne d'éthanol et de l'ordre de 3,3 tonnes de maïs (Source : Rapport Agrocarburants et Environnement ; 2008, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire).

C. Ford Runge et Benjamin Senauer, dans *Foreign Affairs* de mai-juin 2007, écrivent qu'il faut 225 kg de maïs pour remplir le réservoir d'un 4 x 4 américain (96 litres), (248 kg avec les chiffres précédents), de quoi nourrir un mexicain une année entière ! La part de la production mondiale de betteraves et de canne à sucre destinée aux carburants est passée de 11% en 2001, à 20% en 2008. Celle du maïs de 2,5 à 8% ! Les pauvres affamés n'ont plus seulement la concurrence des vaches des pays riches, mais aussi celle de leurs automobiles... alors même que le bilan des biocarburants vis-à-vis de l'effet de serre est de plus en plus contesté. En particulier par Paul Crutzen, prix Nobel 1995, qui affirme, sur la base d'une mesure des quantités de protoxyde d'azote

émis par les cultures, que certaines filières ont un potentiel d'effet de serre double de celui des carburants fossiles ! (P.J.Crutzen et al. 2007). Dans son rapport sur l'état de l'insécurité alimentaire dans le monde de 2011, la FAO relève que « *toute nouvelle expansion du secteur des agrocarburants exercera une pression supplémentaire sur le secteur vivrier* » et que « *les crises ont frappé les pauvres et les plus faibles* ».

Mais revenons à nos modèles. Avec Malthus, on identifie les défauts courants de l'exercice. Non seulement ils sont indûment étendus dans le temps et dans l'espace, mais ils raisonnent de façon globale, ignorent les hétérogénéités et les comportements, et parfois des paramètres déterminants. Mais le thème de la surpopulation continue à alimenter le catastrophisme de certains « prévisionnistes » : Paul Ehrlich, biologiste à Stanford, (ne pas confondre avec le prix Nobel du même nom) écrivait dans son ouvrage *The population bomb*, publié en 1968 : « *la bataille pour nourrir l'humanité est perdue. Durant les deux prochaines décennies, des centaines de millions de personnes vont mourir en dépit des programmes d'aide lancés à ce jour. Et rien ne pourra empêcher une augmentation substantielle de la mortalité dans le monde.* » Il prédisait que l'Inde, 540 millions d'habitants, ne pourrait pas nourrir 200 millions d'habitants de plus en 1980. Et dans une seconde édition en 1971, il affirmait que la terre ne pouvait pas nourrir plus d'un milliard d'humains. L'Inde a recensé 1 milliard d'habitants en 2000. Et on a vu que la révolution verte indienne des années 1970, a doublé la production de riz en 10 ans : « *une population deux fois plus nombreuse en 2000 qu'en 1947 eut accès à deux fois plus de calories par habitant* (G. Sorman). Paul Ehrlich reprenait en 1968 les thèses de Malthus, mais en termes beaucoup plus catastrophistes ! Une telle persévérance dans l'erreur est assez rare ! Maintenant que l'explosion de la population mondiale semble faire long feu, écrit Hervé Le Bras, le vieillissement de la population est la nouvelle catastrophe démographique annoncée ! La modélisation est devenue le meilleur outil pour nourrir les peurs de l'humanité ! Et pourtant, tous les modèles sont faux, lorsqu'ils prétendent modéliser une nature infiniment complexe, et, s'agissant des comportements de l'homme, assez imprévisibles.

Un autre modèle célèbre, peut faire l'objet des mêmes critiques : le modèle World utilisé par le Club de Rome, fondé à la fin des années 1960 par un industriel italien, Aurélio Peccei.

Le modèle World et le Club de Rome

World est le modèle créé au début des années soixante par Jay Forrester, ingénieur électricien au Massachusetts Institute of Technology, et appelé « dynamique des systèmes » qui a été utilisé par une équipe de jeunes chercheurs, dont Dennis Meadows et son épouse Donella. Le premier modèle

World 1 est composé de quarante équations non linéaires, dans lequel on introduit les données d'un ouvrage de Peccei : *the chasm ahead* (1969) (l'abîme devant nous). Le modèle s'articule autour de cinq variables : population, industrie, agriculture, ressources et pollution. Son titre n'est pas modeste et il annonce l'objectif.

Plusieurs scénarios sont étudiés : le prolongement des tendances des « trente glorieuses » aboutit évidemment à l'effondrement (overshoot and collapse). D'autres scénarios introduisent un peu de progrès technologique : les conclusions restent les mêmes, le résultat n'est que retardé dans le temps.

Les conclusions de ces travaux sont présentées en 1972, dans un ouvrage au contenu catastrophiste *the limits to growth*¹ traduit de façon racoleuse et inexacte, en France, par « Halte à la croissance ». L'impact médiatique fut énorme et des bataillons de partisans de la croissance zéro s'appuyèrent sur ce rapport pour étayer leurs thèses. Pourtant, de nombreuses critiques du rapport et du modèle lui-même se firent entendre dès la publication : on reprochait en particulier au modèle de ne prendre en compte aucune considération économique. Ainsi, la rareté d'une ressource devait la rendre plus coûteuse et entraîner une baisse de la consommation, ce qui n'était pas prévu par le modèle. Cette loi simple sera bien constatée dans les années 1970. De même, l'interchangeabilité de certaines matières premières était ignorée, et pour cause, l'ingéniosité de l'homme étant sans limites ! Et surtout, ce modèle n'anticipait aucun progrès scientifique ou technologique, comme si l'homme était devenu subitement idiot ! Il manquait un Jules Verne au Club de Rome !

Le but du club de Rome était, suivant l'expression d'Aurélio Peccei, « *d'ouvrir une brèche dans la citadelle d'auto-complaisance, dans laquelle la société s'était retranchée follement...* » Il était peut-être utile qu'au terme des « trente glorieuses », les années d'après-guerre mondiale qui avaient connu des croissances fortes, mais peu soucieuses de protection de l'environnement, quelques « sentinelles » donnent l'alerte ! Mais la méthode employée, utiliser un modèle mathématique très insuffisant, voire simpliste, et en publier les résultats comme une vérité scientifique, était plus que discutable ! Il n'est pas exclu de penser que le modèle n'a servi qu'à étayer des idées préconçues... en particulier celles d'Aurélio Peccei, exposées dans l'ouvrage : *l'abîme devant nous*. La « boîte noire » est idéale pour cela, et la recette est toujours utilisée ! L'ouvrage *Halte à la croissance !* est encore cité aujourd'hui comme un avertissement sur les limites des ressources de la planète, mais on oublie les erreurs grossières qu'il contenait ! Certes, la planète a des limites, mais les modèles aussi ! Quoiqu'il en soit, l'impact du livre fut à la mesure des espérances des promoteurs du club de Rome !

¹ Meadows D. & D. Richardson J. et Bruckmann (1972) – the limits to growth .New York University works traduction : Halte à la croissance Fayard (1972)

D'abord, un passage du baril de pétrole de 1,9 dollar en 1972, à 10 dollars en 1974, avec la guerre de Kippour au Moyen Orient, puis à 34 dollars en 1982 (Cahiers Shell 1990- La Documentation Française 1983). Ce que l'on a appelé « les deux chocs pétroliers » ont ébranlé l'économie mondiale par cette hausse énorme, mais surtout brutale ! Le premier choc pétrolier se produit à une période de « peak oil » aux Etats Unis, qui réalisent que leurs réserves s'épuisent et que le prix du pétrole n'est pas suffisant pour permettre les investissements nécessaires pour disposer de nouvelles ressources. Les exigences de l'OPEP, organisation des pays producteurs de pétrole, n'étaient donc pas pour déplaire aux Etats Unis et à leurs compagnies pétrolières.

Certes, le baril de pétrole à 1,9 dollar encourageait le gaspillage, et ne permettait pas de mettre en exploitation économiquement les ressources de plus en plus profondes ou en « offshore », nécessaires pour satisfaire une demande croissante alors que certains gisements étaient en déclin. Mais une telle hausse en dix ans, ne pouvait qu'avoir des effets dévastateurs pour l'économie mondiale. Alors que dans les pays industrialisés, l'inflation (jusqu'à 20% par an) était compensée par une hausse des salaires, il n'en était pas de même dans les pays en développement, qui ont payé le plus lourd tribut à cette crise ! Mais le taux de chômage en France, qui était de 3% en 1973, passe à 5% en 1978, 6% en 1980, 9% en 1984, et 10,5% en 1987 (Source : INSEE). Il ne redescendra jamais par la suite au-dessous de 7%.

C'était bien : « halte à la croissance », au grand plaisir de Paul Ehrlich, biologiste à la Stanford University (Californie), l'auteur de *The population bomb*, qui avait déclaré : « *Nous avons trop de développement économique aux Etats Unis. Le développement économique des pays riches, comme les nôtres, est une maladie, non un remède.* ». Et encore : « *Fournir de l'énergie bon marché à la société, c'est comme donner une mitrailleuse à un enfant idiot.* » Fortes paroles ! On prête à Ted Turner, fondateur de CNN, la déclaration suivante : « *Une population de 250–300 millions d'hommes, pour la planète, c'est à dire 95% de moins qu'aujourd'hui, serait l'idéal.* » Certains appelaient de leurs vœux un bon virus pour diminuer la pression démographique ! Ces idées malthusiennes ont encore des partisans aujourd'hui : en France, nous avons eu droit à un ouvrage intitulé *Faire des enfants tue* de Michel Tarrier (2008), entomologiste et écologiste radical.

Les prévisions du Club de Rome ne se sont pas réalisées. Elles faisaient vraiment trop peu de cas des facultés d'adaptation et de l'intelligence de l'homme !

Alors que les ressources en pétrole devaient être épuisées en 2000, « *nous disposons en 2005, de réserves suffisantes pour assurer 43 années de consommation de pétrole et près de 65 années de consommation de gaz* »

déclare Thierry Desmarest, Président de Total, « *Nous parlons de réserves prouvées... Certes, les réserves de pétrole ne sont pas infinies, et les territoires vierges de toute exploration se font rares, comme les découvertes de gisements géants. Mais, les progrès considérables réalisés dans les techniques d'exploration et de production... ont permis une meilleure connaissance des gisements et une amélioration sensible du taux de récupération des hydrocarbures, allongeant, sans aucun doute, la durée de vie des réserves.* »

« *Vraisemblablement, d'autres innovations technologiques nous aideront à repousser les limites imposées par la nature* » (Desmarest, 2005). Les progrès techniques permettent d'atteindre des gisements profonds, ou situés sous d'importantes masses d'eau, comme le gisement découvert en 2011 au large de la Guyane française, où les géologues voient un nouvel « off-shore » africain.

Actuellement, le taux de récupération moyen des hydrocarbures liquides est de 32% du pétrole présent dans les gisements au niveau mondial. On peut espérer porter ce taux à 37%, ce qui permettrait de produire 300 milliards de barils supplémentaires, soit l'équivalent de 10 ans de production au rythme actuel (de Margerie, 2008). Ce taux est de 33% en 2010. Le taux de récupération du gisement d'Alwyn en mer du Nord, atteint 45% (Michel Hourcard et Alain Lehner, *Energies* n° 19). Paradoxalement, la hausse du prix du baril de pétrole augmente les réserves, car de nouveaux gisements deviennent exploitables économiquement. Les réserves étaient de 1.003 milliards de barils en 1990, elles sont passées à 1.105 en 2000, et à 1.383 en 2010. Soit 46 ans de consommation mondiale en 2010 (BP statistical review, 2011). D'autres ressources sont actuellement peu exploitées : les sables bitumineux et les huiles ou gaz de schistes (« shale gas ») qui imprègnent les roches profondes. Dans la seule province américaine de la « Green River formation », qui couvre une partie des Etats du Colorado, de l'Utah, du Wyoming, les réserves exploitables sont estimées au triple des réserves en pétrole de l'Arabie Saoudite. Les Etats Unis exploitent aussi le gaz de schistes, (shale gas), non conventionnel car situé à grande profondeur, et qui nécessite la fracture hydraulique des roches par de l'eau sous pression pour augmenter la perméabilité à proximité des puits, les fluides ne migrant pas naturellement dans les argiles. Douze pour cent du gaz consommé aux Etats Unis proviennent de cette ressource en 2010, contre 1% en 2000, (Roland Vially, *IFP Energies nouvelles*, 2011). Cette exploitation ne fait pas l'unanimité, du fait de pollutions importantes, soit par défaut d'étanchéité des puits, soit par les grandes quantités d'eaux utilisées, et les pollutions associées aux additifs ajoutés à l'eau de fracturation. La production du gaz de schistes aux Etats Unis est passée de 19,4 milliards de mètres cubes à 57 milliards entre 2004 et 2008. Des progrès seront nécessaires pour réduire les nuisances pour l'environnement. Mais ces progrès sont possibles.

Même constat pour le gaz naturel :

« *De nouvelles découvertes, des progrès technologiques importants et l'accès à l'offshore profond, ont permis aux réserves gazières d'être en augmentation continue depuis 1975, date à laquelle elles s'élevaient à 60 téramètre-cubes (10^{12} m^3). Au premier janvier 2005, elles s'élevaient à 180 Tm³, trois fois plus, soit une durée de vie de soixante-cinq ans, au rythme de la consommation actuelle* » (Yves Mathieu, Guy Maisonnier, Institut Français du Pétrole, 2005). Mais les réserves de gaz de schistes sont encore plus élevées : on estime que des gisements importants existent aux Etats Unis, au Canada, mais aussi en Europe, Royaume Uni, France, Allemagne, Pays Bas, Pologne... Certains experts évaluent à 666 Tm³ les réserves, soit près de quatre fois les réserves de gaz conventionnel. Sans compter 256 Tm³ de gaz de charbon. Si les réserves sont importantes, le coût d'exploitation est également élevé, et il faudra maîtriser les atteintes à l'environnement. Des progrès sont possibles, et il serait étonnant que l'on renonce à ces ressources. Le contraire serait de « l'obscurantisme », suivant l'expression du Président de l'Association Française des Techniciens du Pétrole. Des ressources nouvelles pourront aussi être trouvées par l'exploitation des hydrates de gaz, les clathrates, certes difficile à maîtriser, et situés dans des lieux inhospitaliers. Ces gisements situés dans les océans, représenteraient des réserves de 20.000 Tm³ ! À comparer aux réserves actuelles de 180 Tm³ ! Un site de recherche international a été créé pour l'étude des hydrates de gaz naturel de l'Arctique dans le delta du Mackenzie, au nord-ouest du Canada, au début des années 2000.

Et on peut toujours faire du gaz – et des carburants – à partir du charbon, dont les réserves sont énormes !

Ce n'est pas très difficile : le gaz de synthèse (CO et H₂), issu de la gazéification du charbon est condensé sur des catalyseurs appropriés. C'est le procédé Fischer Tropsch, inventé en 1923 par Franz Fischer et Hans Tropsch. Ce procédé a permis au III^{ème} Reich de produire 750.000 tonnes par an de carburants en Allemagne. Avec, il est vrai, quelques explosions pour réactions de condensation mal contrôlées ! Un deuxième procédé, connu sous le nom de son inventeur, Friedrich Bergius, réalise la liquéfaction du charbon sous haute pression d'hydrogène et haute température, en présence de catalyseurs. Ce procédé produisait 3 millions de tonnes de carburants en Allemagne en 1944. Franz Fischer et Friedrich Bergius ont partagé le prix Nobel de chimie en 1931 pour leurs travaux. Ces procédés « coal to liquids » ont fait beaucoup de progrès depuis la seconde guerre mondiale. L'Afrique du Sud, sous embargo pour apartheid, a fabriqué ainsi ses carburants à Sasolburg, et à grande échelle : 4,5 millions de tonnes de carburants en 1983. Le procédé est relativement polluant du fait des nombreux sous-produits de la gazéification du charbon. Aujourd'hui le gaz naturel a remplacé le charbon pour produire le gaz de synthèse à Sasolburg. De nombreux projets dans le monde proposent de

produire du gaz ou des carburants à partir de charbon : les plus avancés sont en Chine (Yangkuang, Shenhua). En Mongolie intérieure, une fabrication de diméthyléther à partir de charbon d'une capacité de 400.000 tonnes/an est cofinancée par la Banque Mondiale. Le Dakota Gasification Project aux Etats Unis se propose de transformer du lignite en méthane avec une capacité de 5 millions de mètres cubes par jour.

L'oxy-combustion du charbon, qui remplace l'air de combustion par un mélange oxygène-gaz carbonique recyclé, permet, pour une centrale électrique à charbon, de séquestrer le CO₂ plus facilement, puisqu'il se trouve concentré dans les fumées. Cette technique permettra sans doute le maintien du charbon pour la production d'électricité, le coût de l'oxygène pouvant être compensé par le prix moindre du charbon par rapport au pétrole ou au gaz. C'est en tout cas l'opinion du Département Energie des Etats Unis, (projets FutureGen 2.0), et de nombreux projets sont en réalisation dans le monde. La gazéification du charbon produit du gaz de synthèse, CO + H₂, matière première de la fabrication du méthanol. Ce dernier peut être transformé en oléfines, éthylène, propylène, coupes C4, grâce à des catalyseurs zéolithes acides. Le procédé dit MTO, pour « methanol to olefins », est exploité par TOTAL à Feluy en Belgique dans une unité de démonstration, et il est prévu à l'échelle industrielle en Chine. Le procédé MTO comprend un lit catalytique circulant entre le réacteur et un régénérateur, semblable au schéma d'un cracking catalytique de raffinerie, dont le but est d'« alléger » les fractions lourdes d'un pétrole brut.

Une des filières des biocarburants de seconde génération reprend la fabrication de gaz de synthèse à partir de déchets cellulosiques, suivie du procédé Fischer Tropsch amélioré, pour la production de biocarburants. Et on craint déjà la pénurie de matière première, car une unité de taille économique en requiert de grandes quantités ! Les études actuelles considèrent au moins 100 tonnes par heure de biomasse sèche !

Tous ces développements ont bien sûr été omis par le modèle World et le Club de Rome, qui ont scandaleusement ignoré des innovations pourtant prévisibles, ou même déjà développées. (Le procédé Fischer Tropsch a été inventé en 1923 !) On peut hésiter entre ignorance ou volonté de prouver la pénurie prochaine ! Les deux, sans doute... L'ouvrage *The limits to growth* a moins démontré les limites de la croissance que l'ignorance de ses auteurs.

Une évidence : toutes ces nouvelles ressources ou techniques seront plus chères que les anciennes, ce qui permettra sans doute le développement d'énergies renouvelables ou quasiment inépuisables, comme l'énergie solaire ou la géothermie. La géothermie devra aussi faire des progrès pour être « durable » en évitant de mettre en communication des nappes phréatiques dont certaines sont polluées. Mais la géothermie est disponible en permanence, et ne dépend pas, comme l'éolien ou le solaire, de la force du vent ou du niveau de l'ensoleillement. La durée effective annuelle d'utilisation

d'une éolienne est de 2.500 à 3.000 heures, exceptionnellement 3500 heures, et plutôt 2.000-2.500 heures dans l'Union Européenne. (Une année compte 8760 heures). La centrale électrique de Bouillante en Guadeloupe est actuellement la seule production d'électricité française par géothermie (10% des besoins de l'île). Mais d'autres sites volcaniques sont à l'étude en France métropolitaine, à la Réunion et en Martinique. L'Italie exploite ses ressources géothermiques à grande échelle : production équivalente à 5 millions de tonnes de pétrole en 2008 ! La chaleur de la terre est produite à 90% par la désintégration de matières radioactives : la Terre est donc un réacteur nucléaire dont le combustible est quasi inépuisable ! La température du sol augmente avec la profondeur, en France, de 3 à 4°C par 100 mètres. Jusqu'à présent, on a surtout utilisé les aquifères des zones volcaniques, une géothermie « haute énergie », qui suppose des températures de l'ordre de 150°C, comme à Bouillante. Mais pour le chauffage, des températures beaucoup plus faibles sont suffisantes. En fonction de la température de la ressource, la chaleur peut être utilisée directement ou relevée avec l'utilisation de pompes à chaleur. Les bassins parisiens et aquitains exploitent des ressources géothermiques « basse énergie », mais le développement de ces ressources a été freiné par la concurrence de la cogénération à partir de gaz, procédé de production combinée d'électricité et de chaleur, dont le rendement élevé est imbattable, lorsque la production de chaleur est intégralement consommée.

La cogénération est aussi un concurrent des agro carburants pour l'utilisation de la biomasse.

Les scientifiques d'aujourd'hui portent un regard critique sur la modélisation du Club de Rome dont les corrélations simplistes ne pouvaient, en aucun cas, refléter le monde réel, si complexe. Ce qui confond, aujourd'hui, est le fait qu'un travail de « doctorant », d'une valeur aussi faible, surtout pour le prestigieux MIT, ait pu avoir un pareil impact ! Jean François Deniau était, à l'époque, membre de la Commission Européenne à Bruxelles. Son témoignage est étonnant : « *Mon collègue Mansholt, qui devait participer, au Chili, à une grande conférence de l'ONU sur ce thème (l'aide au développement) m'invite à venir et insiste : c'est quand même une des dernières occasions de prendre l'avion. Il avait cru lui aussi aux extrapolations du Club de Rome, médiatisées de façon si efficace. C'était il y a plus de vingt-cinq ans. Le risque de ne pas prendre l'avion est moins celui d'un manque de carburant que celui d'une grève des bagagistes au sol* » (Deniau, 1996, dans L'Atlantique est mon désert).

Il faudra attendre 1987 et le rapport Brundtland, pour mettre fin à la propagande de la croissance zéro, qui semble revenir aujourd'hui. L'histoire bégaie : l'année 2004 a vu la publication en France de la revue *Décroissance* le mensuel des objecteurs de croissance « *contre le développement durable, la croissance verte, pour la décroissance et l'anti-productivisme* ». Et de nombreux

auteurs saluent encore aujourd'hui le livre *The limits to growth* comme un ouvrage majeur. Certes, il y a des limites à la croissance, mais la démonstration de 1972, avec son modèle aux sérieuses insuffisances, était à la limite de l'imposture...

Madame Gro Harlem Brundtland, ancien premier ministre de Norvège, présidait la « Commission sur l'Environnement et le Développement » créée en 1983, par l'ONU, et cette commission publie en 1987, un rapport intitulé *Our Common Future*, qui jette les bases de ce que l'on a appelé « le développement durable », et qui peut se résumer ainsi : « *L'humanité a la possibilité de réaliser un développement durable, qui comble les besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à pourvoir à leurs propres besoins* ». Avec trois objectifs : une situation écologique saine, une situation économique stable, et une situation socialement équitable et acceptée. On oublie souvent l'homme et l'économie quand on se réfère au développement durable.

Le rapport *Croissance et Environnement* de la Commission Bertrand Colomb de 1993, déclare : « *à la thématique des limites écologiques de la croissance, tous les pays ont répondu dès les années 1970 par l'idée qu'il n'était ni rationnellement fondé, ni socialement acceptable de récuser la croissance en tant que telle, mais qu'il fallait identifier les modèles de développement susceptibles de préserver la qualité de l'environnement...* »

L'agriculture se veut aujourd'hui « écologiquement intensive » pour limiter les atteintes à l'environnement, mais des progrès sont nécessaires... Et les expressions sont à la recherche d'une définition consensuelle. La loi Grenelle II 2010/788 du 12 Juillet 2010, portant Engagement National pour l'Environnement, a créé une nouvelle certification pour les exploitations agricoles respectueuses de l'environnement : *exploitation de haute valeur environnementale* (Article L.109). Avec, on peut l'espérer, des bases moins dogmatiques que celles de l'agriculture dite biologique, qui refuse tout produit de synthèse, au nom de vieilles théories anti-productivistes, voire ésotériques.

La contestation de la croissance trouve son origine dans le sacre du Produit National Brut, devenu « *croyance, baume miracle, pour tout panser sans avoir à penser* » selon l'expression de Jean Gadrey. La croissance mesurée par la production, sans tenir compte du progrès social et du bien-être des peuples, est en effet inadaptée à la mesure du progrès. Il existe bien un « Indice de Développement Humain » établi par le Programme des Nations Unies pour le Développement depuis 1990. L'indice de Développement Humain (IDH), regroupe des informations sur l'espérance de vie, la scolarisation, et le revenu, dans une seule mesure composite. Dans le classement 2010, la France est 14ème, avec une espérance de vie de 81,6 années, une durée de scolarité moyenne de 10,4 ans, un revenu national brut de 34.3 dollars. Elle est dans la moyenne des pays de l'OCDE.

Dans le rapport de l'Union Européenne *L'économie des écosystèmes et de la biodiversité* (2008) Pavan Sukhdev écrit que « *la mesure du PIB ne prend toutefois pas en compte de nombreux aspects essentiels de la richesse et du bien-être nationaux, tels que les changements qualitatifs en matière de santé, les changements dans le degré d'éducation et les modifications au niveau de la qualité et de la quantité de nos ressources naturelles. Nous pourrions dire que nous essayons aujourd'hui de naviguer dans des eaux inconnues et agitées avec une vieille boussole économique défectueuse.* »

Le rapport Stiglitz-Sen-Fitoussi (2009) commandé par le Président Nicolas Sarkozy au Professeur d'économie Joseph Stiglitz, « pour la mesure de la performance économique et du progrès social », propose quelques idées supplémentaires, dont en particulier la prise en compte des coûts environnementaux dans la mesure des performances économiques, et la création d'un indicateur de bien-être social qui prendrait en compte :

- I. les conditions de vie matérielles (revenu, consommation et richesse) ;
- II. la santé ;
- III. l'éducation ;
- IV. les activités personnelles, dont le travail ;
- V. la participation à la vie politique et la gouvernance ;
- VI. les liens et rapports sociaux ;
- VII. l'environnement (état présent et à venir) ;
- VIII. l'insécurité, tant économique que physique.

Nul doute qu'un tel indice soit plus représentatif du bien-être social que l'IDH. Mais quantifier la valeur de l'environnement paraît une tâche impossible. Pavan Sukhdev, dans le rapport déjà cité, affirme que : « *tout ce qui est très utile (l'eau, par exemple) n'a pas nécessairement une valeur élevée et tout ce qui a beaucoup de valeur (par exemple, un diamant) n'est pas forcément très utile.* » Et pourquoi utiliserait-on l'utilité comme seul critère ?

Les produits écologiques sont souvent plus chers : l'agriculture écologique en fait la démonstration. L'amélioration de nombre de ces indicateurs suppose des augmentations de la dépense publique qui n'est possible que par l'augmentation de la richesse du pays. D'où le sacre du PNB, qui pourrait néanmoins améliorer son mode de calcul. Parmi les anomalies de ce calcul, la prise en compte de la TVA qui n'est pas synonyme de création de richesse ! Mais surtout les catastrophes en tout genre augmentent le PNB car il faut reconstruire : on arrive cependant au même résultat après la reconstruction. Anomalie déjà signalée en 1848 par l'économiste Frédéric Bastiat dans le sophisme de la vitre cassée : « *A quelque chose malheur est bon... que deviendraient les vitriers, si l'on ne cassait jamais de vitres ? Or, il y a dans cette formule de condoléance toute une théorie, qu'il est bon de surprendre in flagrante delicto (en flagrant délit)...* » William Nordhaus et James

Tobin ont repris ces critiques dans un article : *Is Growth obsolete ?* en 1973, à l'Université de Yale (USA). Ils écrivent : « *Il faut éviter le paradoxe fou suivant lequel des efforts délibérés pour rendre les biens plus périssables augmenteraient le PNB.* » Hélas, le paradoxe fou est à l'œuvre ! Ces auteurs distinguent le Produit National Net du Produit National Brut, en déduisant des activités qui ne sont pas utiles en soi mais qui accompagnent des activités utiles, telles que le trajet pour aller de son domicile à son travail. Ces activités sont qualifiées de « regrettables » car elles n'augmentent pas la richesse du pays... Il y a cependant dans cette étude des propositions surprenantes, comme celle d'exclure du PNB les dépenses de Défense Nationale ! Ces dépenses peuvent pourtant empêcher le pire ; les exclure suppose une paix harmonieuse entre les peuples : douce rêverie... La liberté a aussi un prix, et fait partie du bien-être social !

Un modèle est une représentation mathématique du monde réel.

On peut ainsi, simuler l'écoulement complexe de l'air, autour d'une aile d'avion. Pour ce faire, il faut écrire et résoudre les équations classiques de la mécanique des fluides, différentes suivant le régime de l'écoulement, laminaire, turbulent ou de transition. Autrefois, on aurait construit une maquette et on l'aurait étudiée en soufflerie.

Les résultats pouvaient être transférés au réel par similitude. Il est beaucoup moins coûteux d'effectuer aujourd'hui ce travail par simulation numérique. En outre, on peut facilement modifier le modèle et donc optimiser le résultat ; c'est-à-dire, trouver le meilleur profil aérodynamique, puis vérifier les performances en soufflerie. Dans cet exemple, la connaissance des lois de la physique de base – l'écoulement de l'air – est fondamentale, et ces lois sont bien connues. Le modèle ne gère que la complexité du système dû en particulier au calcul par maillage de plus en plus serré. A raison de plusieurs paramètres par maille, pression, vitesse, température, énergie cinétique, etc. On arrive facilement à des milliers d'équations à résoudre, ce que les supercalculateurs actuels savent faire, en consommant d'ailleurs beaucoup d'énergie. Il semble que l'on ait ainsi réussi à modéliser le phénomène de l'onde de choc supersonique, le fameux bang des avions supersoniques, ce qui devrait permettre d'étudier son atténuation.

Dans tous les domaines où les lois de la physique, de la résistance des matériaux, de la mécanique des fluides, de la biologie ou de la chimie, sont bien connues, le calcul numérique permet de simuler des systèmes complexes avec une bonne chance de succès.

Mais souvent les lois qui régissent les phénomènes en cause, ne sont pas bien connues. La science est souvent « molle et incertaine » ! Le concepteur du modèle fait alors des hypothèses : on écrit les relations « telles que l'on pense

qu'elles doivent être... » et on valide le modèle en comparant ses prédictions avec les mesures d'expériences disponibles, à condition qu'elles soient en nombre suffisant, couvrent un domaine assez vaste et statistiquement représentatif.

Un tel modèle n'est validé qu'à l'intérieur du domaine d'expérience. Mais, évidemment la tentation est grande d'en sortir. D'autant plus que l'utilisateur du modèle n'est pas son concepteur, qu'il en connaît plus ou moins bien les limites, et que si l'ordinateur le dit, c'est que c'est vrai !

Autre problème : plus le système est complexe, plus il faut de données pour le caractériser, données qui font souvent défaut. Alors on a inventé le système de « données par défaut » dans lequel le logiciel choisit lui-même une donnée introduite dans une banque de données. Inutile de dire que ces données diffèrent souvent de la réalité.

Prenons un exemple en principe simple : pour évaluer le devenir d'un polluant en rivière, on dispose de modèles dits de fugacité ou modèles de Mac Kay, qui tiennent compte des propriétés physiques, chimiques, biologiques et environnementales de la substance. Mais aussi des caractéristiques de la rivière : largeur, profondeur, vitesse du courant, température, nature du fond et sa teneur en carbone organique apte à adsorber les polluants peu solubles, taux d'oxygène, capacité de biodégradation, etc. Une rivière n'est pas un canal creusé par l'homme et tous ces paramètres changent le long du parcours. Et les polluants hydrophobes ne s'adsorbent pas que sur le carbone organique ! Les matières organiques dissoutes, les acides humiques et fulviques naturels, sont à l'origine de la formation de nombreux complexes volumineux qui modifient le comportement du polluant, y compris sa toxicité !

Bien sûr, on peut valider le modèle en faisant des mesures. Mais on réalise la complexité d'une simulation pourtant simple en apparence ! La nature n'est pas simple et vouloir la modéliser nécessite un grand courage, beaucoup de travail, et beaucoup de données ! Et plus le système représenté est complexe, plus le risque « d'oublier » une variable importante est grand !

Tous les modèles sont faux, même s'ils peuvent être utiles

Les modèles ne sont donc que très rarement la représentation exacte des processus qu'ils sont censés représenter, et cela est particulièrement vrai lorsque qu'ils s'appliquent à la nature.

Dans ce domaine, il existe un modèle, baptisé EUSES, utilisé par l'Union Européenne pour l'évaluation des risques présentés par l'usage des produits chimiques et leur rejet dans l'environnement. Le modèle prétend prévoir les concentrations d'une substance dans les différents compartiments de

l'environnement, eau, air, sols, sédiments, biota, à partir de ses propriétés environnementales et de ses rejets.

A l'origine, le modèle était hollandais : le territoire hollandais est peut-être un peu moins compliqué que d'autres, puisqu'il a été en grande partie « poldérisé » ! L'idée des promoteurs du programme était de simplifier le modèle en restant toujours du côté de la sécurité : le « worst case », le scénario le plus conservatif. Ainsi, si le modèle concluait à l'absence de risques, on pouvait passer à autre chose. Dans le cas contraire, il était temps de faire des mesures dans l'environnement. Cette démarche intelligente avait pour objectif d'éviter des mesures inutiles. C'est celle des « écotoxicologues », qui aiment bien les critères de sélection des problèmes.

Mais, tout s'est dégradé quand le programme hollandais a été adopté par l'Union Européenne...

Quand on se rappelle les difficultés de modéliser une simple rivière, alors modéliser l'Europe ! En outre, la diversité de réponse des espèces biologiques est énorme. Il faut donc espérer en protéger le plus grand nombre, en recherchant les plus vulnérables. Mais les résultats obtenus au laboratoire ne sont pas toujours transposables à l'environnement, en particulier parce que la biodisponibilité de la substance, c'est-à-dire son aptitude à être absorbée par une espèce biologique, n'est pas la même dans les deux cas, et en outre sensible à une quantité de paramètres propres au milieu.

Le modèle « EUSES » avait pour mission de détecter les problèmes liés à la production et à l'usage d'une liste de substances chimiques prioritaires, en simulant les rejets dans l'environnement européen, à l'aide de scénarios représentatifs de l'utilisation de ces substances. Et il sévit aussi dans l'évaluation de ces substances, en vue d'interdictions éventuelles.

Pour prendre en compte les nombreuses transformations subies, une foule de sous-modèles particuliers ont été développés : par exemple, le fonctionnement d'une station d'épuration biologique, la dispersion atmosphérique, la biodégradation, les modèles de fugacité... et le tout à grand renfort de « données par défaut ». La plupart de ces modèles sont beaucoup trop simplistes pour simuler correctement les phénomènes complexes en cause. Ainsi, les relations qui prétendent calculer le transfert d'une substance de la terre cultivée à la plante en utilisant le coefficient de partage de la substance entre l'eau et l'octanol, n'a, isolément, aucune valeur scientifique, comme le reconnaît la récente norme ISO 17402 sur la biodisponibilité des substances, norme qui indique que ce transfert est spécifique de la plante, de la substance et des propriétés du sol dans lequel la plante est cultivée ! Certes, l'usage de ces formules simplistes est facultatif, mais l'utilisateur du logiciel les utilise parfois sans même s'en rendre compte ! Le coefficient de partage de la substance entre l'eau et l'octanol, censé représenter l'affinité pour les graisses,

est la tarte à la crème de la réglementation européenne en matière de protection de l'environnement, en particulier pour modéliser les transferts entre l'eau, les sols et les sédiments et les espèces biologiques. Tant pis s'il n'est pas représentatif !

Utilisé comme une « boîte noire », le modèle EUSES a fourni des résultats très différents des mesures disponibles. Telle substance, qui avait été mesurée dans les boues de nombreuses stations d'épuration d'eaux usées urbaines en Allemagne, était censée s'y trouver à une concentration cinquante fois plus élevée d'après le modèle ! Le modèle EUSES utilise des algorithmes aussi faux que ceux qui ont causé la ruine de la finance mondiale en 2008. Les auteurs suédois de l'étude, mettaient en avant les difficultés des mesures (sic), mais pas la validité du modèle. Il n'est pas exclu de penser que le bureau d'études en charge du dossier en Suède, avait pour mission de démontrer la persistance de la substance dans l'environnement ! L'usage d'une « boîte noire » est idéal pour ce genre de démarche, comme on l'a vu avec le modèle World ! Autre exemple : l'European Chemicals Bureau, agence officielle, écrit avoir trouvé à l'aide du modèle EUSES une concentration d'un ignifugeant bromé de 5.420 microgrammes par kilo dans les poissons, en concentration moyenne régionale, alors que les mesures indiquent 20 µg/kg., soit 271 fois moins ! Peut-on vraiment réglementer avec des modèles faux ?

Certains experts officiels de l'Union Européenne, et en particulier les Britanniques et les Français, ont préféré sagement s'en tenir aux mesures faites dans l'environnement. Mais le modèle EUSES a fait perdre beaucoup de temps, entre 1983 et 1998, à cause des interminables discussions entre pays membres de l'Union, du fait des résultats très contestables des études ! Et malgré toutes ces difficultés, le même modèle, légèrement amendé, va encore sévir dans l'application du Règlement REACH.

Il existe un grand nombre de modèles, dits « multimédias », pour évaluer les risques pour la santé présentés par un sol pollué. Ils s'appellent HESP, CSOIL, CLEA, CalTOX, RISC etc. L'INERIS, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, centre d'expertise officiel en France, a eu l'idée intéressante de les appliquer à des sols réputés non pollués, c'est-à-dire loin de toute source de pollution. Les résultats ont été édifiants : ils font apparaître des risques importants, nécessitant des actions immédiates ! (INERIS 2006 Hazebrouk et al.). Démonstration par l'absurde des limites de ces modèles. Modèles simplistes et Nature complexe ne font pas des résultats fiables. Malheureusement, ces graves insuffisances n'empêchent pas des décisions contestables au nom de la protection de l'environnement.

Une opinion courante, en Europe, est que l'on utilise des milliers de substances chimiques de synthèse dont on ignore les risques... On évoque le chiffre de 100.000, en mélangeant des substances produites en milliers de tonnes avec celles que l'on utilise par gramme au laboratoire ! En réalité, le

programme des Nations Unies a comptabilisé 4.843 substances commercialisées à plus de 1.000 tonnes par an dans le monde. On utilise certainement beaucoup plus de substances naturelles dont on ignore les risques ! Et c'est oublier les différents programmes d'évaluation réalisés depuis quarante ans ! Qu'on en juge : le premier programme a concerné la fourniture de fiches de données de sécurité. Ces fiches, qui devaient obligatoirement être adressées à tout industriel utilisateur, comprenaient de nombreux renseignements : propriétés physiques, chimiques, dangers identifiés, propriétés toxicologiques et éco-toxicologiques. En Europe, le contenu de ces fiches a été d'abord normalisé par l'AFNOR en France, DIN en Allemagne, BS en Grande Bretagne...

La Commission Européenne a attendu que tous les standards nationaux soient utilisés pour éditer le sien, évidemment différent. Quand une société vend un millier de substances, on imagine le travail... alors que chaque fiche doit être traduite dans la langue du pays de l'acheteur... Les fiches de données de sécurité sont toujours utilisées et elles sont parfois aujourd'hui disponibles sur internet.

Deuxième programme, le programme « HEDSET », les producteurs des substances produites à plus de 1.000 tonnes/an dans l'Union Européenne, (la majeure partie des 4.843 substances répertoriées par les Nations Unies) devaient fournir un dossier complet des renseignements en leur possession : propriétés physiques, chimiques, toxicologiques, écotoxicologiques, facteurs de risques, etc. L'European Chemicals Bureau d'ISPRA, en Italie, a été désigné pour recevoir ces tonnes de papier. Il en a fait une base de données appelée ESIS (European Chemical Substances Info System) accessible gratuitement sur son site.

Troisième programme, « Existing Chemicals » entre 1983 et 1998 (voir plus haut).

Sans oublier l'étiquetage des produits chimiques dans l'Union Européenne, qui obéit à des critères précis, programme mené en parallèle avec le programme HEDSET (n°2) et qui a heureusement fait l'objet d'une harmonisation au niveau mondial le 1^{er} Octobre 2010 adaptée en Europe via le Règlement CLP (Classification, Labelling and Packaging of chemical substances).

Enfin, le quatrième programme que certaines organisations écologiques présentent indûment comme le premier, commence en 2007. C'est le Règlement européen REACH, dont la nouveauté est qu'il ne concerne pas seulement les producteurs, mais aussi les utilisateurs industriels pour les applications. Mais qui n'a tiré aucune leçon des difficultés rencontrées dans le passé.

Il faut aussi préciser que depuis 1993 (Directive 93/67/EEC), les nouvelles substances mises sur la marché dans l'Union Européenne, font l'objet d'une

procédure d'agrément en plusieurs étapes, suivant le tonnage fabriqué, où les coups bas entre concurrents ne manquent pas !

Il est impossible de parler des modèles, sans évoquer les modèles de changement climatique.

Selon Hervé le Treut, professeur à l'Ecole Polytechnique, directeur de recherches au CRNS, très impliqué dans les travaux du GIEC (Groupement International sur l'Evolution du Climat) :

« Le développement des modèles numériques utilisés, représente une trentaine d'années de travail dans un grand nombre de laboratoires. A l'origine se pose une question fondamentale : les lois de la physique permettent-elles de reconstruire le climat de notre planète ! en d'autres termes : est-il possible de créer, à partir des équations de la thermodynamique, ou de la dynamique des fluides, une planète virtuelle, dont le comportement serait proche de celui de la planète réelle ? La réponse est désormais très clairement positive... Certes, les « planètes numériques » ne sont pas des copies exactes des planètes réelles. Les modèles souffrent de plusieurs fragilités et difficultés conceptuelles qu'il est important de recenser. »

Hervé le Treut, recense trois types de difficultés :

« On ne peut pas résoudre les équations de la dynamique de l'atmosphère, ou de l'océan, sur toute la sphère terrestre, les vents ou les courants, la température, la vapeur d'eau, les nuages, la salinité de l'eau océanique, tout est calculé aux nœuds d'un maillage très large : quelques centaines de kilomètres à l'horizontale, de l'ordre du kilomètre à la verticale. Pour les écoulements atmosphériques et océaniques, la partie « grande échelle » à l'échelle de centaines ou de milliers de kilomètres est la seule écrite de manière explicite... même limités à un maillage grossier, les modèles climatiques saturent la puissance des ordinateurs les plus rapides. » (Le Treut, 2004) (Dans les modèles numériques actuels, après discrétisation, on obtient des systèmes de millions d'équations à des millions d'inconnues, dont la résolution se situe à la limite des ordinateurs les plus puissants et pour lesquels des méthodes numériques performantes doivent être développées. (Temam, 2009))

« Deuxième limite actuelle des modèles : leur construction n'est pas achevée. D'abord, purement atmosphériques, les modèles ont intégré une représentation de plus en plus complexe des océans, puis de la glace de mer... Le couplage étroit entre les cycles chimiques et biochimiques, qui contrôle la composition de l'atmosphère et le climat lui-même commence à être pris en compte... A l'évidence, il s'agit d'un énorme travail collectif. Dans cette catégorie se trouvent les connaissances incomplètes des phénomènes et de leurs conséquences, et la non prise en compte de paramètres importants.

Lorsqu'on introduit les phénomènes de chimie, de biochimie et de biologie dans les modèles, on quitte le domaine des équations prédictives « dures » pour des équations plus empiriques. » (Le Treut, 2004)

Nos connaissances dans ces domaines sont en effet très incomplètes. Dans ces conditions, le niveau d'incertitude devrait croître au fur et à mesure que l'on tient compte de phénomènes moins bien connus. Mais, curieusement, les rapports successifs du GIEC ne le montrent pas. On peut donc s'étonner que l'incertitude sur la valeur du réchauffement à l'horizon 2100 n'ait pas augmenté mais au contraire s'est réduite, d'un rapport du GIEC à l'autre². Hervé Le Treut confirme que l'incertitude aurait dû logiquement augmenter. Et explique cette anomalie par la pression sociale : les chercheurs qui trouvent des écarts plus grands auront tendance à chercher et à trouver les raisons de ces différences et à les réduire. Cette pression ne s'exerce pas sur les équipes qui trouvent des résultats à l'intérieur des limites. (Entretien avec Hervé Le Treut, climatologue, Le Prisme à idées ENS Cachan, 2008). On peut sourire de ces explications : avec « la pression sociale » on risque peu de sortir du « consensus » et de la pensée unique !

Les reproches les plus courants faits aux modèles concernent le cycle de l'eau, l'influence des nuages, dont la modélisation est « inachevée », comme le dirait Hervé Le Treut. En particulier des chercheurs ont montré que ce cycle n'est pas indépendant de l'activité solaire et du flux de rayons cosmiques atteignant la Terre, ces rayons favorisant la formation des nuages par la création d'aérosols. Ce phénomène est étudié au CERN dans le cadre du programme CLOUD (cosmic leaving outdoor droplets). La formation des nuages modifie l'albédo³, c'est-à-dire le pouvoir réfléchissant de l'atmosphère vis-à-vis du rayonnement solaire. On considère l'albédo des nuages, 0,4 à 0,9, et l'albédo des sols. Un sol enneigé a un albédo de 0,8 à 0,9. Une forêt 0,06 à 0,20, un sol cultivé 0,07 à 0,14. L'activité solaire est peu prévisible, de même que l'activité volcanique, et leur influence n'est pas négligeable ! La Terre est bien un réacteur nucléaire qui dégage de la chaleur, mais cette contribution est très faible devant l'énergie reçue du soleil.

Dans son numéro de décembre 2007, la revue « La Recherche » revient sur ces inconnues, parmi lesquelles :

Le rôle des forêts. Elles sont considérées, en général, comme des puits de carbone. Mais, dans les régions enneigées la déforestation occasionnerait un refroidissement car la neige réfléchit davantage de rayonnement solaire

² entretemps, en octobre 2013, le GIEC a publié la première partie de son 5^{ème} rapport qui passe en revue l'évolution des données et modèles disponibles : <http://www.climatechange2013.org/>

³ L'albédo est le rapport entre l'intensité de la lumière réfléchie, et l'énergie incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1 : 0 correspond au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et 1 au blanc, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit. (CNRS)

que la forêt. Le processus de base de la captation du CO₂, la photosynthèse, commence seulement à être modélisé, et son rôle est considérable. Les forêts tropicales, de l'Amazonie, du Congo, de l'Asie du Sud Est, capteraient deux fois plus de carbone que les forêts des zones tempérées : la déforestation à l'œuvre au Brésil pour la canne à sucre et l'élevage intensif, pour l'huile de palme en Asie, modifie le bilan environnemental des biocarburants issus de ces matières premières, et cet impact est souvent largement sous-estimé ! Pourtant l'impact de cette déforestation représente au moins 20% des émissions de carbone anthropique de la planète (FAO, 2006). Comprendre et améliorer le bilan de la photosynthèse est un enjeu majeur, si on observe qu'elle absorbe 27 fois plus de carbone que les émissions anthropiques n'en libèrent !

Les turbulences dans l'océan, qui renfermerait 40.000 gigatonnes de carbone, soit cinquante fois plus que l'atmosphère (780 Gt). (Une gigatonne est égale à 10⁹ tonnes). L'océan est considéré comme un puits de carbone qui absorberait, en moyenne, près de la moitié des émissions anthropiques (2,5 Gt sur 6 Gt par an en 1990). L'absorption du CO₂ par les océans est le résultat de l'action du phytoplancton en été, et de l'absorption physique en hiver à partir de la surface lorsque les eaux sont froides. Mais, un réchauffement des océans diminue la capacité d'absorption. Aujourd'hui, l'augmentation de l'acidité des océans, si elle existe, n'a pas d'impact, et cette acidification est peu probable car les océans possèdent d'énormes réserves de chaux. Mais rien ne prouve que cette situation soit durable, en particulier localement. Et les émissions anthropiques augmentent toujours. En 2010, les émissions anthropiques de CO₂ ont atteint 33 milliards de tonnes (9 Gt de carbone) : elles étaient de 22,7 milliards de tonnes en 1990 (6 Gt de carbone)!

L'action du phytoplancton alimenté par le CO₂ et les sels nutritifs remontant du fond des océans, peut être modifiée par une diminution des courants ascendants liés au réchauffement. Un article de la revue Nature du 29 Juillet 2010 fait état d'une stratification des eaux qui s'opposerait à la remontée des nutriments, diminuant la production de phytoplancton (de 1% par an à partir de 1955). D'autres articles font état d'une diminution des capacités d'absorption par suite de la turbulence des courants marins. Pourtant, l'augmentation de la température et de la concentration en CO₂ sont en principe des éléments favorables à cette absorption, important puits de carbone de la planète.

Le rôle des aérosols : certains refroidissent la Terre grâce à leur pouvoir réfléchissant – à tel point que le Prix Nobel Paul Crutzen a préconisé d'en créer artificiellement... mais les aérosols carbonés n'ont pas les mêmes effets que les aérosols soufrés. La dépollution et la diminution des rejets de SO₂ dans l'atmosphère de la planète a eu à cet égard un impact négatif sur l'effet de serre, impact qui n'a pas été évalué, mais qui pourrait expliquer une partie du réchauffement.

La stabilité des hydrates de méthane enfouis dans les océans ou dans les sols gelés. Un réchauffement peut-il créer un dégazage ? Cette hypothèse est probable, bien que l'inertie thermique soit grande. Et une tonne de méthane vaut 23 tonnes de gaz carbonique. Un article de H. Fischer dans Nature (2008) nous apprend que la concentration du méthane atmosphérique a doublé il y a 18.000 ans par émission de méthane des tourbières boréales : mais en 6.500 ans tout de même !

La circulation océanique, chef d'orchestre du climat planétaire, va-t-elle se modifier ? Y a-t-il un lien entre cette circulation et le refroidissement de la stratosphère ? Des experts envisagent un déplacement du Gulf Stream de l'Irlande vers Gibraltar, ce qui refroidirait fortement l'Europe, dans un monde en réchauffement ! En 1975, les craintes sur le Gulf Stream faisaient prédire une glaciation prochaine de l'Europe !

L'activité solaire a déjà dans le passé influencé fortement le climat, ce qui n'est pas surprenant, compte tenu de l'énergie en jeu ! (la Terre reçoit en permanence 345 Watts par mètre carré mesuré au sommet de l'atmosphère, en réfléchit une partie variable suivant les lieux et le temps, mais chaque mètre carré des territoires les plus habités de la planète reçoit en moyenne 1.000 KWh par an). Le « petit âge glaciaire » entre 1645 et 1715, périodes d'hivers rigoureux et de famines en France, semble dû à une baisse d'activité du soleil. L'astronome britannique Edward Walter Maunder (1851-1928), en étudiant les archives des observations solaires remontant à Galilée, a constaté une disparition des taches solaires pendant une période de 70 ans (1645-1715), appelée le « minimum de Maunder ». Or l'activité solaire semble corrélée au nombre de taches solaires. « La diminution d'activité du soleil constitue une explication plausible pour la période froide des 17^e et 18^e siècles appelée petit âge glaciaire. » (LeTreut, 2004). D'autres périodes froides, liées à la disparition des taches solaires, ont été relevées : le minimum de Wolf (1280-1340), le minimum de Spörer (1420-1530). Activité solaire et volcanisme, phénomènes imprévisibles, ne sont pas inclus dans les modèles. L'Université de Chicago, après le suisse Rudolf Wolf (1816-1893), directeur de l'observatoire de Zurich, a établi une chronologie des cycles solaires qui semblent avoir une période voisine de onze ans. Le cycle solaire de Wolf était à son minimum en 2006, et devrait être maximum en 2012. Mais le soleil fait parfois la grève des taches solaires : 266 jours sans taches solaires en 2008, record depuis 1913 ! Si bien que certains envisageaient déjà un nouveau « minimum de Maunder » ! Toutefois l'activité du soleil a repris depuis le début de l'année 2010. Le cycle de Wolf, appelé aussi de Schwabe, de 11 ans, n'est pas le seul cycle observé : le cycle de Gleissberg a une période de 90 ans, celui de Suess ou de De Vries a une période de 150 à 200 ans ! Si on additionne ces influences, on trouve qu'une période de réchauffement due au soleil a débuté en 1912 et devrait être à son maximum en 2025 !

Il faut remarquer que de nombreuses incertitudes sont plutôt des facteurs d'aggravation, que d'amélioration et elles illustrent la grande difficulté de créer « une planète numérique » qui soit une copie conforme de la vraie, dans toute sa complexité ! La nature n'est pas simple et de nouveaux aspects doivent être pris en compte progressivement par les modèles.

A la question : **Quelle est la crédibilité des modèles mathématiques pour prévoir les changements climatiques éventuels et leurs conséquences ?** L'Académicien Roger Temam répond : « *la seule complexité des phénomènes entraîne une grande incertitude sur les résultats. Cette incertitude est exprimée dans les rapports du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat). Les prévisions du GIEC concernant le réchauffement au cours du siècle présent comportent une différence d'un facteur 3 entre la valeur supérieure et la valeur inférieure. Les incertitudes portent sur des phénomènes mal compris qui prendront beaucoup de temps pour être finement décrits. Cela inclut des processus physiques, physicochimiques, chimiques et biologiques tels que :*

- *les températures, les précipitations, les courants des océans, les vents de l'atmosphère, les échanges avec la stratosphère ;*

- *les grands cycles biogéochimiques ;*

- *les aérosols ;*

- *les grandes structures climatiques comme les moussons.*

(Libres points de vue d'Académiciens sur l'environnement et le développement durable, 2009)

Autre limitation, plus fondamentale, selon Hervé Le Treut : « *le système climatique n'est pas complètement prévisible, et cette contrainte se répercute sur la représentation numérique... L'incertitude qui accompagne les prédictions des modèles, reflète, de moins en moins, l'ignorance des scientifiques et de plus en plus, le fait que le monde réel demeure, en partie, imprévisible.* » Cette remarque est intéressante : les modèles sont construits avec ce que l'on a déduit de l'observation du passé. On suppose donc la prolongation dans le temps des observations du passé, pas toujours bien comprises et représentées. Avec des paramètres non pris en compte : activité solaire, volcanisme, circulation océanique. Mais il est très probable que des faits nouveaux, inconnus aujourd'hui, devront être pris en compte, par exemple un nouveau minimum de Maunder, si le soleil continue à faire la grève des taches ! Cela rend les projections à plus de cent ans bien hasardeuses ! Pourtant certains n'hésitent pas à faire des prévisions pour l'an 3000 !

Quatre grandes familles de scénarios sont retenues pour évaluer les émissions futures de gaz à effet de serre (CO₂, méthane, protoxyde d'azote,

dioxyde de soufre), suivant l'évolution de la démographie et du type de développement. Les scénarios introduisent des fourchettes importantes, de l'ordre de 5, pour les émissions de CO₂ en 2100 et de 2 pour les émissions de méthane.

En 2001, le GIEC annonçait pour 2100, et pour un doublement des émissions de CO₂, une augmentation des températures globales, de 1,5 à 6° C. par rapport aux valeurs de 1900.

La dispersion des résultats pour un même scénario, suivant les modèles, peut atteindre 2°C, et la différence entre scénarios, 2°C. L'incertitude liée à la représentation imparfaite de la machine climatique par l'ordinateur est aussi de l'ordre de 2°C (Le Treut, 2004). Le rapport du GIEC de 2007, resserre les écarts de +2 à + 4,5 °C au lieu de +1,5 à + 6°C. C'est la limite basse, +2°C, qui devait servir d'objectif à la conférence de Copenhague sur le climat en 2009. Il est clair que le niveau d'incertitude lié aux différents modèles (2°C), et à l'imperfection des modèles (2°C) étant du même ordre de grandeur que l'écart prévisionnel, il est difficile d'avoir des certitudes, mais seulement des craintes très fondées. D'autant plus que les mesures effectuées semblent confirmer la tendance au réchauffement : la température de l'atmosphère a augmenté de 0,5°C depuis 1970, et 1°C depuis le début du XX^e siècle. La hausse n'est cependant pas continue : la température a baissé entre 1940 et 1970. (données NASA Godard Institute et National Oceanic and Climatic Administration). La température de l'eau de mer a également augmenté, de 0,5 °C en surface depuis 50 ans. Avec également des périodes de refroidissement ou stables : entre 1980 et 1988, et entre 2003 et 2010. Mais on ne dispose de données fiables que depuis 1970. Et on observe une fonte de la glace de mer et des glaciers. La température de la stratosphère, contrairement à celle de l'atmosphère, est à la baisse : ce fait est interprété par des experts comme la preuve que le réchauffement provient de la terre et non du soleil...

On se trouve donc dans le champ d'application du principe de précaution pour un risque « grave et irréversible » qui prévoit que « *l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées, visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles, à l'environnement, à un coût économiquement acceptable...* ». Comme l'écrivait Gérard Mégie, en février 2004, « *Un jour, les effets seront suffisamment importants pour que les doutes se lèvent... Mais il sera probablement, trop tard pour en corriger les effets* ».

« *Tout le monde est d'accord pour reconnaître que les incertitudes sont grandes* » écrit Jacques Villain, membre de l'Académie des Sciences, (2009), « *mais quelles que soient les incertitudes, on ne peut ignorer le fait que, à partir du XX^e siècle, l'ordre de grandeur du réchauffement de la terre résultant des activités humaines n'est pas a priori négligeable. Sa valeur précise*

est en effet la somme de contributions dont certaines (comme l'effet des nuages) sont difficiles à évaluer, mais dont d'autres sont calculables et importantes. Supposer que les diverses contributions vont se compenser, ce serait un acte de foi non justifié ». Avis pertinent d'un physicien non spécialiste du climat, qui s'affranchit des résultats discutés des modèles et de leurs imperfections. Le caractère irréversible du phénomène est évident car, même en réduisant les émissions de CO₂, il faudrait plusieurs siècles pour revenir à des niveaux préindustriels. La prévision d'un réchauffement de la planète par les effets de la combustion des combustibles fossiles est ancienne : déjà en 1896, le savant Arrhénius remarquait que le gaz carbonique absorbant le rayonnement infra rouge émis par la Terre aurait pour effet d'augmenter la température de la planète. Personne ne conteste que les gaz à effet de serre, CO₂, N₂O, CH₄, peuvent avoir un tel effet. L'incertitude porte sur l'influence contraire d'autres facteurs, comme l'augmentation des nuages et des aérosols, qui augmentent l'albédo, l'augmentation de la photosynthèse lorsque la concentration en CO₂ augmente. Mais « *supposer que les diverses contributions vont se compenser est un acte de foi non justifié* » !

On peut toutefois s'étonner que de nouveaux prophètes de l'An Mil, comme Monsieur Al Gore qui, semble-t-il, ne montre pas l'exemple à titre personnel, sa propriété consommant, paraît-il, beaucoup plus d'énergie que la moyenne aux Etats Unis, déjà très élevée, (Les USA rejetaient en 2007, 20,4 tonnes de CO₂ par habitant et par an, contre 8,4 en Europe) dressent des tableaux apocalyptiques, cartes à l'appui, pour noyer les Pays Bas et autres calamités du même genre. Et en prenant un certain nombre de libertés avec les faits. La population des ours blancs de l'Arctique, en danger selon Al Gore, semble avoir plus que doublé depuis cinquante ans ! L'humanité a-t-elle besoin de se faire peur pour prendre des décisions « effectives et proportionnées » ? Notre société est-elle devenue une société anxieuse du spectacle ?

A n'en pas douter, si la mer monte de 25 centimètres, et même un peu plus, les Pays Bas auront surélevé leurs digues depuis longtemps ! On peut s'étonner, qu'un ancien Vice-Président des Etats Unis, pays qui n'a pas été capable de renforcer les digues menaçant la Nouvelle Orléans, alors que de nombreux rapports en soulignaient la nécessité, et dont les infrastructures ont été depuis longtemps négligées, si l'on en croit Joseph Stiglitz, puisse faire la leçon au reste du Monde ! Et reçoive, en outre, la moitié du Prix Nobel de la Paix en 2007 !

Parfois les choix des jurys sont déconcertants : Le prix de la Banque de Suède, improprement appelé « Nobel de l'économie », n'a-t-il pas été attribué en 1997 à Myron Sholes, associé dirigeant du célèbre hedge fund LTCM, dont la faillite en 1998 a coûté plusieurs milliards de dollars à la planète financière ? Il est vrai que le directeur de ce fonds s'appelait John Meriwether,

phonétiquement : joyeux temps ! John Meriwether a d'ailleurs créé un nouveau « hedge fund », après la faillite de LTCL, qui a explosé en avril 2008, dans l'indifférence générale d'une actualité financière débordée par la crise des subprimes. (C.J.Nijdam). Pablo Triana Portela, chroniqueur au *Financial Times*, demande la suppression du prix de la Banque de Suède, du fait des dégâts qu'il a causé en sanctifiant les théories financières contemporaines en dépit de tous leurs errements.

Al Gore, et tous les prophètes du genre, mettent en application les recommandations de Hans Jonas (le principe de responsabilité 1979) et Jean-Pierre Dupuy, lequel propose dans son ouvrage *Pour un catastrophisme éclairé* (2002) « *d'obtenir une image de l'avenir, suffisamment catastrophiste pour être repoussante et suffisamment crédible pour déclencher les actions, qui empêcheront sa réalisation* ». Un juge britannique, saisi par des opposants à la projection du film d'Al Gore « une vérité qui dérange », dans les écoles britanniques, a relevé neuf erreurs dans ce film, toutes destinées à en accentuer le caractère catastrophiste. Exemple : la fonte des neiges du Kilimandjaro, attribuée à l'augmentation de l'effet de serre. Or, ce phénomène a été important dans la première moitié du XXe siècle, avant les émissions importantes de CO₂ de la seconde moitié du siècle. Betsy Mason, journaliste scientifique, écrit dans « *Nature* » du 24 novembre 2003 : "*Bien qu'il soit tentant d'accuser le réchauffement global de la fonte des glaces, les chercheurs pensent que la déforestation des contreforts est le coupable le plus vraisemblable*".

Le GIEC projette une hausse du niveau de la mer de 18 à 59 cm en 100 ans. Ce chiffre est basé sur les observations précises du Satellite TOPEX POSEIDON qui met en évidence une montée du niveau de la mer de 3,2 millimètres par an, quand Al Gore prédit une montée des eaux de 6 ou 7 mètres ! Voilà bien une vérité qui dérange ! Et encore les 3,2 mm constatés seraient dus en partie à des modifications de niveau des fonds sous-marins !

Al Gore prédit des élévations du niveau de la mer de 6 mètres : pour parvenir à ce résultat, on doit supposer une élévation de la température de 8°C au niveau du Groenland, mais qui est prévue en l'an 3000 ! Le ridicule de prévisions à mille ans n'a pas besoin d'être démontré ! Le catastrophisme peut-il être « éclairé » ?

Une illustration de la dictature des modèles est fournie par un graphique proposé par Jean Marc Jancovici dans son article de septembre 2007 « Les océans vont-ils tout submerger ? », et qui représente la prédiction de l'élévation du niveau de la mer en fonction de l'élévation de la température à terme au-dessus du Groenland. (www.manicore.fr). L'échelle de temps va de l'an 2000 à 3000 ! Et l'élévation de température va de +3 à +8 °C. Imagine-t-on que l'homme va rester mille ans sans rien faire ? Certes, l'inertie est grande, mais le modèle sera obsolète bien avant.

L'ordinateur n'invente rien : il ne fait que mettre en forme, grâce à sa puissance de calcul, les données et les lois que les chercheurs lui ont fournies. Mais dès qu'il sort de la machine, le modèle, même s'il est notoirement insuffisant- voire complètement nul, comme le modèle World du Club de Rome- prend un caractère sacré : idoles de notre temps !

Ce qui frappe actuellement dans les études du changement climatique, c'est la focalisation sur les seules émissions de gaz carbonique anthropique. Pourtant, elles ne représentent « que » 7 à 8 milliards de tonnes de carbone par an à comparer à un total d'émissions de 121 ! (FAO, 2006 ; Le Treut, 2004 ; GIEC, 2001). En 2009, le bilan mondial des principales émissions anthropiques de gaz carbonique était le suivant, en milliards de tonnes de CO₂ ou de carbone : (1 t de carbone = 3,7 t de CO₂)

Déforestation :	5,8	1,60
Combustion du charbon :	13	3,54
Combustion du pétrole	13	3,54
Combustion du gaz	6	1,63
Production du ciment	2	0,54
Total	39,8	10,85

(Source : J.M.Jancovici manicore.fr, 2010)

Le total des émissions comprend 62 milliards de tonnes de carbone provenant de la végétation et des sols, (production primaire nette), 60 milliards de tonnes de respiration de la biosphère, plus les effets de la déforestation, du changement d'affectation des sols, et les émissions anthropiques. Les seuls effets de la déforestation par l'homme sont évalués à 2 milliards de tonnes de carbone par an, (1,6 plus ou moins 1 milliard de tonnes, selon le GIEC en 2007) soit 20% des émissions anthropiques, qui mobilisent toutes les attentions. La photosynthèse retire 120 milliards de tonnes de carbone chaque année de l'atmosphère, tandis que le bilan des échanges avec les océans en retire 2,5 milliards de tonnes. Le phytoplancton qui transforme le gaz carbonique et les nutriments en matière organique est un acteur primordial de l'équilibre du CO₂, de même que la photosynthèse des plantes. Mais on commence seulement à en connaître les mécanismes. La production de carburants à partir d'algues lipidiques, avec consommation de CO₂, est un espoir d'avenir, si le coût peut en être maîtrisé. La production d'une tonne d'algues consomme en effet près de 1,8 tonne de gaz carbonique. De nombreuses recherches dans le monde concernent les algocarburants. Les triglycérides produits par les algues permettent d'obtenir des carburants ayant les propriétés du kérosène et plusieurs vols d'avion de démonstration ont déjà eu lieu. Mais le coût actuel de cet algocarburant est prohibitif. Les huiles d'algues intéresseront plutôt les pharmaciens et les fabricants de cosmétiques !

La connaissance du rôle exact des forêts dans le cycle du carbone est un enjeu important de la régulation de l'effet de serre. La France a augmenté la surface de ses forêts de 8,5 à 15,5 millions d'hectares entre 1826 à 2006 et les forêts représentent un puits de carbone important. Mais les forêts françaises ne sont pas des forêts tropicales, la séquestration du CO₂ y est plus faible. L'INRA estime à 17,1 millions de tonnes de carbone la séquestration des forêts françaises, soit 17% des émissions anthropiques nationales (INRA 2006). « *La forêt peut apporter une contribution très significative à l'atténuation du changement climatique pour des coûts faibles, (...) Pourtant cette opportunité est perdue dans le contexte institutionnel actuel et le manque de volonté politique, ce qui a conduit à la réalisation d'une très faible partie de ce potentiel jusqu'à présent.* » écrit le Rapport du groupe III du GIEC 2007.

Saisir ces opportunités devrait être une priorité, même si ces actions nécessitent des compensations financières pour les pays concernés ! Des chercheurs ont montré que l'on pouvait améliorer de 44% la production de riz et de 47% celle du blé en doublant sous serre la concentration de CO₂ (Zisca et Bruce, *New Phytologist* 2007). Voilà une utilisation utile du CO₂ ! Lutter contre la déforestation, améliorer la photosynthèse, réduire les émissions de l'élevage (18% des émissions de gaz à effet de serre, principalement sous forme de méthane et de protoxyde d'azote) aiderait grandement à rétablir l'équilibre. Le stock de carbone de l'atmosphère, c'est à dire le carbone du CO₂ de l'atmosphère, de l'ordre de 750 milliards de tonnes, augmente actuellement chaque année, le bilan n'étant pas équilibré. C'est évidemment ce solde qui pose problème, et malheureusement il augmente chaque année : Entre 1990 et 2010, la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère a augmenté de 10,35% (de 355 ppm à 391,76 ppm, chiffres de la National Oceanic and Atmospheric Administration. USA). Mais les actions qui pourraient rétablir l'équilibre ne relèvent pas des résultats d'un modèle discuté, mais de progrès dans la gestion raisonnée de la planète ! Soixante-dix pour cent des terres autrefois boisées de l'Amazonie servent aujourd'hui au pâturage. L'expansion de l'élevage est un facteur clé de déboisement, surtout en Amérique Latine. En Asie, c'est le palmier à huile qui remplace la forêt. Inverser la tendance nécessitera des actions de compensation. On voit mal les « nantis » du Nord contester aux populations du Sud l'accès aux progrès de l'ère moderne.

En termes de coût-bénéfice, ces actions seront sans doute moins coûteuses que certains projets des plans européens ou américains. Les Etats Unis semblent décidés à de telles actions : ils ont transformé en 2010 une dette du Brésil vis-à-vis des Etats Unis en programme de protection de la forêt brésilienne. Premier pas dans la bonne direction. Un deuxième pas a été franchi en décembre 2010 à la conférence de Cancun, avec la création du programme REDD, « Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation ». Le principe est de compenser les efforts réalisés par les Etats

tropicaux pour réduire la déforestation des forêts primaires. Les forêts primaires couvrent 15% de la surface du globe mais environ 13 millions d'hectares sont détruits chaque année pour la culture, le pâturage, ou le chauffage et les exportations de bois. Cette destruction et ce changement d'affectation des sols représentent plus d'effet de serre que tout le transport réalisé dans le monde (The little REDD book 2008). Les modalités d'application du programme restent à préciser. Il faudra éviter plusieurs écueils : une estimation correcte des besoins de surface pour le développement du pays, et le choix approprié de la date de référence de la situation initiale, en évitant de pénaliser les Etats qui ont peu déboisé, et de favoriser ceux qui l'ont beaucoup pratiqué !

Les leçons du Protocole de Montréal

Le premier protocole de Montréal, de 1987, pour la protection de la couche d'ozone, appliquait le principe de précaution. Il eut été sage d'attendre quelques progrès dans la compréhension de la chimie de la stratosphère à basse température, et dans l'identification des facteurs influençant la concentration de l'ozone stratosphérique, pour aller plus loin. On a vu, dans la Chronique 6, le niveau de surenchère atteint en 1990 et à chaque révision, en 1992, 1995, 1997, 1999, jusqu'à l'interdiction totale de la plus petite molécule contenant du chlore ou du brome ayant une durée de vie dans l'atmosphère supérieure à un an (alors que la durée de vie des CFC 11 et 12 est de 45 et 100 ans !), et quelle que soit l'importance des émissions, en particulier, par comparaison avec les émissions naturelles des océans et des volcans ! Ces excès ont entraîné des marchés parallèles, en provenance principalement des pays en développement, prompts à réclamer des compensations financières ! Le « trou de l'Antarctique » a été maximum en 2006, malgré la diminution constatée de la teneur en chlore... Il s'est réduit en 2007 mais a été de nouveau énorme en 2008, la cinquième surface la plus grande jamais mesurée, selon la NASA. Il paraît aujourd'hui évident que les modèles numériques utilisés ne représentaient pas les phénomènes réels. L'Organisation Météorologique Mondiale, dans un rapport de 2006 relève plusieurs paramètres importants non pris en compte en 1990 : en particulier, la dimension du « trou » de l'Antarctique est très sensible à la variation de la température dans le vortex polaire, aux variations de la dynamique des courants, aux aérosols, aux émissions volcaniques... et même aux variations solaires. Le refroidissement de la stratosphère attribué à l'effet de serre serait également en cause.

Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement a ajouté au protocole de Montréal un nouvel amendement en 2007 pour réduire de dix ans la dérogation accordée pour les HCFC, aux pays en voie de développement (Directive CE 2037/2000). Mais cette fois, ce n'est plus au nom de la protection de l'ozone stratosphérique, car on reconnaît –c'est nouveau- que l'impact des

HCFC est faible, mais au nom de l'effet de serre. Il est évidemment plus facile de s'acharner sur quelques molécules, dans l'indifférence générale des pays développés, que d'obtenir de ceux-ci des réductions d'émission de gaz carbonique, ou l'arrêt des déforestations en zone tropicale !

La responsabilité des modèles mathématiques dans la crise financière de 2008.

La crise financière de 2008 a sans doute une de ses origines dans l'abus de modèles mathématiques faux, comme le relève Pablo Triana Portela (2009), lequel abus s'est ajouté au « triomphe de la cupidité » décrit par Joseph Stiglitz (2010). La crise remet en question un standard de l'ingénierie financière : le modèle de Black, Sholes et Merton, établi en 1973, (oui, le « prix Nobel d'économie » de 1997 !) qui détermine le prix des dérivés d'actions, et le « mythe » de la couverture qui est censée annuler le risque d'une opération. « *Les modèles sont simplificateurs, et les procédures proposées souvent limitées par des réalités non prises en compte, comme des défauts de liquidités, des mouvements massifs des marchés...* » écrit Bernard Lapeyre, Professeur de mathématiques financières à l'École des Ponts et Chaussées, qui pourtant les défend. Joseph Stiglitz relève que les événements « rares » étaient supposés suivre une distribution log normale, variante de la célèbre courbe en cloche. Or, cette représentation est souvent fautive. Lorsque les biologistes utilisent une distribution log normale pour déterminer la dose sans effet toxique d'une substance pour les espèces biologiques, ils sont priés de vérifier que les données d'écotoxicité utilisées suivent effectivement cette loi. Apparemment ce n'est pas le cas pour les financiers. Jean-Philippe Bouchaud, Professeur à l'École Polytechnique, demande que les innovations financières soient analysées de manière critique, testées et réglementées comme le sont les innovations dans d'autres industries à risque (nucléaire, chimie, pharmacie, aéronautique...) (La Recherche n°434, octobre 2009). Mais qui a testé et réglementé le modèle World, et les prévisions du Club de Rome ? On n'empêchera jamais de nouveaux Nostradamus de s'approprier les possibilités énormes du calcul numérique, pour conférer à leurs thèses le statut de modèle scientifique, nouvelle icône de notre temps. Edgar Morin est encore plus sévère : « *L'économie qui est la science sociale mathématiquement la plus avancée, est la science socialement la plus arriérée, car elle s'est abstraite des conditions sociales, historiques, politiques, psychologiques, et écologiques, inséparables des activités.* » (Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur. Le Seuil, 2000)

oooooooooooooooooooo

Références de la Error! Style not defined.

- Académie des Sciences (2009) : Libres points de vue d'Académiciens sur l'environnement et le développement durable
- Berthelot Yves (2010) : Pour en finir avec la faim. Alternatives Economiques n° 295, 86-89
- BP statistical review of world energy. Juin 2011.
- Cahiers documentaires Shell (Juin 1990)
- Commissariat Général du Plan (1993) Croissance et environnement Rapport de la commission Bertrand Colomb
- Crutzen P.J. et al. (2007) N₂O release from agro biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. Atm. Chemistry and Physics Discussions 7 11191-11205
- Deniau Jean-François (1996) L'Atlantique est mon désert. Gallimard
- Desmarest Thierry (2005) Energies n°7 revue TOTAL Mars 2005
- Directive CE n° 2037-2000 du 29 Juin 2000 relative aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone
- Dupuy J.P. (2002) Pour un catastrophisme éclairé : quand l'impossible est certain. Le Seuil
- Food and Agriculture Organisation (2006) L'ombre portée de l'élevage. Impacts environnementaux et options pour leur atténuation. Traduction de « Livestock's Long Shadow. »
- Food and Agriculture Organisation (2009) la situation mondiale de l'agriculture et de l'alimentation.
- Food and Agriculture Organisation (2006) L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde
- Food and Agriculture Organisation (2011) Global food losses and food waste. Extent, causes and prevention. (J.Gustavsson et al)
- Food and Agriculture Organisation (2011) L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde.
- GIEC (2007) 4^e Rapport d'évaluation
- INED (2011) Sept milliards d'humains aujourd'hui. Combien demain ? Populations et Société n°482, Octobre 2011

INERIS (2006) Exercice d'évaluation d'un site non impacté par une activité industrielle particulière. Conséquences en termes de fixation de critères génériques des sols. Rapport DRC-06-75999-DESP/R10 Benoit Hazebrouk et al

INRA (J.L. Dupouey 2006) La séquestration de carbone en forêt. Colloque chimie verte du 28 Février 2006

L. Roudart, (2011) Il y a assez de terres pour nourrir 9 milliards d'humains. La Recherche n°454, p94

Le Bras Hervé (1996) Les limites de la planète. Flammarion

Le Bras Hervé (2009) Vie et mort de la population mondiale. Le Pommier

Le Monde du 19 Février 2009 : Laurence Caramel Pour nourrir l'humanité, il suffirait de moins gaspiller.

Le Treut H. et Jancovici J.M. (2004) L'effet de serre p 88 à 106. Flammarion

Le Treut H. (2008) Le réchauffement climatique. Modèles, impact et solutions Le Prisme n°1 ENS Cachan

Mathieu Y., Maisonnier G. Institut Français du Pétrole dans : Energies n°7 revue TOTAL Mars 2005

Meadows D. et D., Richardson, J. Bruckmann (1972). The limits to growth. Traduction française "Halte à la croissance ". Fayard (1973)

de Noblet-Ducoudré N., Dupouey J.L., Lévy M., Boff L., Boucher O.(2007) « les trois inconnues du climat » dans La Recherche n°414, p 31-45

Nordhaus W.D. et James Tobin (1973) Is Growth obsolete? Dans Milton Moss : The measurement of economic and social performance. Studies in Income and Wealth Vol 38 NBER Cowles Foundation paper n°398 Yale University

Parmentier B. Nourrir l'humanité (2007) La Découverte

Problèmes économiques n° 1826 (1983) Le prix de l'énergie La Documentation Française

Rapport Stiglitz-Sen-Fitoussi sur la mesure de la performance économique et du progrès social (Sep 2009)

Sorman G. (2008) L'économie ne ment pas. Fayard

Stiglitz J. (2010) Le triomphe de la cupidité. Les liens qui libèrent.

Todd E. et Courbage Y. (2007) « Le rendez-vous des civilisations ». La République des idées Le Seuil

Triana Portela P. (2009) Lecturing Birds on Flying. Can mathematical theories destroy the financial markets? Wiley

Union Européenne (2008) « *L'économie des écosystèmes et de la biodiversité* » Pavan Sukhdev, responsable d'étude. ISBN-13 978-92-79-09445-3

World Coal Institute (2006) Coal: liquid fuels report

World Meteorological Organization. (2006) Global Ozone research and monitoring project. Report n° 50

oooooooooooooooooooooooooooo

Liste des sigles utilisés dans ce document

ADEME Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'énergie

AESN Agence de l'eau Seine Normandie

AFSSA Agence française de sécurité sanitaire des aliments

AFSSAPS, Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé

AFSSET Agence française de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail,

AIRPARIF Organisme de surveillance de la qualité de l'air en Ile de France

ANSES Agence Nationale de sécurité sanitaire, alimentation, environnement, travail (ex AFSSA, AFSSET)

ARET Association pour la recherche en toxicologie

ATSDR Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Edite la base de données toxicologiques du Ministère Fédéral de la Santé des Etats Unis)

CEA Commissariat à l'énergie atomique

CEMAGREF Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement

CERN Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

CIRC Centre International de Recherches sur le cancer (OMS/ONU)

CITEPA Centre Interprofessionnel d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

CNAM Conservatoire National des Arts et Métiers

CNRS Centre National de la Recherche Scientifique

CRIIRAD Commission de recherche et d'information indépendantes sur la radioactivité

CSTEE Comité Scientifique sur la Toxicité, l'Ecotoxicité, et l'environnement de L'Union Européenne

DL 50 Dose létale pour 50% des sujets exposés

EAWAG Institut suisse des sciences et des technologies de l'eau

ECB European Chemical Bureau de l'Union Européenne (Ispra Italie)

ECHA European Chemicals Agency . Agence Européenne des Produits Chimiques. (Helsinki Finlande)

EDEN Endocrine Disruption research (Europe)

EFSA Autorité européenne de sécurité des aliments. (European Food Safety Authority)

ENPC Ecole Nationale Supérieure des Ponts et Chaussées

FAO (Nations Unies) Food and Agriculture Organisation

FDA Food and Drug Administration (Etats Unis) Agence de l'alimentation et des produits de santé

GIEC Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

HAP Hydrocarbures aromatiques polycycliques

IAEA International Atomic Energy Agency (Agence Internationale pour l'Energie Atomique)

IARC International Agency for Research on cancer (CIRC)

IFPRI International Food Policy Research Institute

IFREMER Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

INED Institut National d'Etudes Démographiques

INERIS Institut National de l'environnement Industriel et des Risques

INRA Institut National de Recherches Agronomiques

INRS Institut National de la Recherche Scientifique

INSEE Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

INSERM Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

InVS Institut de Veille Sanitaire

IPCC Intergovernmental Panel on Climate change

IPCS International Programme of Chemical Safety (UNEP/OMS)

IPIECA The International Petroleum Industry Environmental Conservation Association

IRD Institut de Recherche pour le développement

IRIS Integrated Risk information System (base de données toxicologiques de l'US EPA)

IRSN Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry

JECFA "Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives" désigne le comité international mixte FAO/OMS d'experts sur les additifs alimentaires.

JRC Joint Research Centre de l'Union Européenne (ECB Ispra Italie)

LOAEL lowest observed adverse effect level. Niveau le plus faible d'observation d'un effet adverse.

NIH National Institutes of Health des Etats Unis.

NOAEL No Observed Adverse Effect Level. Niveau sans effet observé

NOEC Non Observed Effect Concentration. Concentration sans effet observé

NRC National Research Council (USA) Organisme de Recherches pour la National Academy of Sciences, la National Academy of Engineering et l'Institute of Medicine. Il existe aussi un NRC Canada

NTP National Toxicology Programme (Ministère de la Santé des Etats Unis)

OCDE Organisation de coopération et de développement économique.

ODP Ozone depletion potential. Potentiel de destruction d'ozone.

OFEG Office Fédéral suisse des eaux et de la géologie.

OMS Organisation Mondiale de la Santé (ONU)

ONEMA Office National de l'Eau et des milieux aquatique

PBL Netherlands Environmental Assessment Agency

PCB Polychlorobiphényles

PNEC Predicted No Effect Concentration : Concentration au dessous de laquelle aucun effet adverse n'est anticipé.

PNUE ou UNEP Programme des Nations Unies pour l'Environnement (United Nations Environmental Programme)

PRG Pouvoir de réchauffement global

RAIS Risk Assessment Information System, du Oak Ridge National Laboratory (USA)

RASFF The EU Rapid Alert System for Food and Feed

RAPEX EU rapid alert system for all dangerous consumer products, except food

RDA Recommended Dietary Allowance, (USA) publiées par le US National Research Council, (NRC) Food and Nutrition Board

RIVM National Institute for Public Health and the Environment (Pays Bas)

TNO Netherlands Organization for Applied Scientific Research

UFIP Union Française des Industries Pétrolières

UNEP United Nations Environment Programme. Programme des Nations Unies pour l'Environnement

US-EPA Environmental Protection Agency des Etats Unis

WCRF World Cancer Research Fund. Fond Mondial de recherches contre le cancer.

WHO World Health Organisation : Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

WMO World Meteorological Organisation (Organisation météorologique mondiale ONU)

oooooooooooooooooooooooooooo

Unités de masse utilisées

Unités de masse (moins de 1 gramme)			
1 milligramme	mg	10 ⁻³ mme gra	0,001 gramme
1 microgramme	µg	10 ⁻⁶ mme gra	0,000001 gramme
1 nanogramme	ng	10 ⁻⁹ mme gra	0,000000001 gramme
1 picogramme	pg	10 ⁻¹² mme gra	0,000000000001 gramme
1 fentogramme	fg	10 ⁻¹⁵ mme gra	0,000000000000001gramme

Unités de masse (plus de 1 kilogramme)			
1 tonne	t	10 ³ kilogrammes	1000 kg
1 kilotonne	Kt	10 ⁶ kilogrammes	1000000 kg
1 mégatonne	Mt	10 ⁹ kilogrammes	1000000000 kg
1 gigatonne	Gt	10 ¹² kilogrammes	1000000000000 kg
1 tératonne	Tt	10 ¹⁵ kilogrammes	1000000000000000 kg