

NOTES DE COURS

INITIATION À LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

- ING 610 -

MARCEL LACROIX
Université de Sherbrooke

TABLE DES MATIÈRES

Préface

Génie et nature Chapitre 1

Science et environnement Chapitre 2

Le 20^e siècle Chapitre 3

...et le 21^e siècle Chapitre 4

Quatre grandes idées en physique..... Chapitre 5

Science, pseudo-science et démocratie Chapitre 6

Mot de la fin

Bibliographie

PRÉFACE

Contrairement à des matières classiques comme la mécanique newtonienne ou la thermodynamique, matières pour lesquelles le professeur peut, sans effort, construire un cours en s'inspirant d'ouvrages précis et complets, il n'existe pas un manuscrit sur lequel il peut s'appuyer pour bâtir un cours d'initiation à la recherche scientifique s'adressant à de futurs ingénieurs. En fait, devrais-je préciser, il existe des centaines de livres et d'articles à propos de la science (et de la technologie), de son histoire, de ses réalisations et des gens qui la font. Puisque le sujet est aussi vaste que passionnant, j'ai donc laissé libre cours à mon imagination et profité de cette occasion pour coucher sur papier quelques idées et réflexions qui forment la trame du cours d'Introduction à la recherche scientifique ING 610.

Malgré le fait qu'elles soient éclatées et incomplètes, je souhaite que ces notes personnelles alimenteront votre réflexion et stimuleront votre curiosité. Tout au long du texte, j'ai tenté d'éviter un discours trop technique sans toutefois délaissier la rigueur et la beauté scientifique. J'ai voulu également élargir la discussion au-delà des frontières traditionnelles de la science pure. Ces notes s'adressent donc à tous ceux et celles intéressés par la science. Un avertissement cependant. Ce document a parfois le ton d'un pamphlet. C'est intentionnel. Il risque d'écortcher des idées reçues, de secouer des dogmes, de froisser des susceptibilités. Mon but n'est pas de choquer mais plutôt de montrer le rôle incontournable de la science dans le monde où nous vivons.

La science, d'après le dictionnaire de la langue française le Petit Robert, est tout corps de connaissances ayant un objet déterminé et reconnu et une méthode propre. Cette définition, certes succincte et précise, ne m'exalte guère. Je préfère celle plus inspirée proposée par le Professeur Jean-René Roy dans son beau livre intitulé *Les héritiers de Prométhée* : «La science est d'abord une démarche intellectuelle visant à comprendre et à expliquer le monde. Elle signifie aussi le vaste ensemble de connaissances encyclopédiques que nous avons du monde et de l'Homme. Par les laboratoires, les universités et les centres de recherches, la science est une institution sociale. Enfin, la science constitue la base de la médecine et de la technologie qui sont présentes dans la vie de tous les jours». Dans les pages qui suivront, les quatre sens distincts de cette définition reviendront sans cesse.

Dans le premier chapitre, je jette un bref regard sur la nature avec les yeux de l'ingénieur.

Au second chapitre, je discute de deux grands problèmes environnementaux. J'y défends la thèse selon laquelle la science est le meilleur outil dont nous disposons pour éviter des catastrophes environnementales planétaires et sauvegarder la vie.

Au chapitre 3, je brosse un tableau de ce que la science nous a apporté au 20^e siècle alors qu'au chapitre 4 je me risque à prédire ce que seront certaines technologies au 21^e siècle.

Au chapitre 5, je discute brièvement de quatre grandes idées en physique et de leurs retombées.

Dans le sixième chapitre, j'oppose la science à la pseudo-science, la pensée rationnelle à la croyance. Je m'inquiète des conséquences de l'illettrisme scientifique collectif et j'établis un parallèle entre la science et la démocratie.

Je termine en démystifiant un peu les études de deuxième et de troisième cycles.

(Première version : été 1997 ; version révisée : été 1998)

GÉNIE ET NATURE

Chapitre 1

On ne peut demeurer indifférent face aux multiples designs de la nature. Les formes qui nous fascinent, voire qui nous séduisent, dans les arbres, les fleurs, les oiseaux, les animaux et le corps humain sont en réalité le résultat de designs pratiques et hautement efficaces dessinés par des millions d'années d'évolution.

Regardons par exemple la jambe. Sa masse, comme c'est le cas chez tous les animaux, est concentrée à l'extrémité près du corps de sorte à réduire l'effort nécessaire pour vaincre son inertie. Cette caractéristique du design est d'autant plus remarquable (et importante) chez les sprinters ou les animaux rapides (cheval, jaguar). Leurs jambes sont massives et musclées au niveau de la cuisse et se terminent par un pied (ou une patte) léger presque fragile. Afin de minimiser l'inertie et de maximiser la portée du pied, la hanche possède trois degrés de liberté alors que le genou n'en possède qu'un seul. Il en va de même pour le système épaule-coude-main. Ces concepts d'inertie, de portée et d'économie de degrés de liberté dictent la structure des os et des articulations. En y ajoutant les muscles pour assurer le mouvement, un réseau sanguin pour alimenter les muscles et enfin la peau pour envelopper et protéger le tout, on obtient le membre. Décortiquée ainsi, la beauté que nous percevons dans une jambe galbée n'est autre qu'un design optimal.

Le design dans la nature est assujéti aux critères les plus sévères et contraignants qui soient. Et, sans aucun doute, les plus exigeantes sont les méthodes de reproduction et de croissance qui limitent le type de matériau utilisé, les mécanismes possibles et les

structures résultantes. Par contre, la nature ne craint pas la complexité du design. Contrairement à l'ingénieur, la nature dispose de beaucoup de temps pour améliorer graduellement un design. L'ingénieur doit de plus trouver un équilibre entre les coûts de production et de maintenance et la performance de sorte que les composantes qu'il conçoit ont en général des formes faciles à produire plutôt que la forme idéale. Par exemple, une articulation artificielle est toujours plus simple et symétrique que l'articulation organique à remplacer parce que cela facilite sa production et peut-être aussi parce que l'on ne comprend pas parfaitement bien son fonctionnement.

Je ne saurais énumérer ici les plus grandes inventions de la nature mais je me risque tout de même à en souligner quelques-unes. Comme je le mentionne plus loin dans la section portant sur la deuxième loi de la thermodynamique, la matière a tendance à s'organiser en systèmes hiérarchisés. N'échappant pas à cette loi, la nature a développé, il y a plus de trois milliards d'années, des organismes multicellulaires à partir d'organismes unicellulaires. Cette formidable invention a permis à la vie de s'écarter et d'atteindre le niveau de complexité que nous connaissons aujourd'hui.

La nature a aussi inventé la chlorophylle permettant aux plantes de transformer l'énergie solaire en énergie chimique pour s'alimenter et croître. Afin d'assurer leur reproduction, les fleurs ont appris à se maquiller de couleurs vives et à produire de la nourriture. Elles attirent ainsi des insectes qui, butinant d'une fleur à l'autre, les fécondent probablement à leur insu.

Chère aux insectes et aux crustacés, la carapace protectrice est économique en termes de poids et de matières vivantes. Elle a toutefois un inconvénient majeur : elle ne permet pas aux organismes qu'elle abrite de grandir. De là, certaines espèces de poissons se sont développées avec à la fois un squelette interne et une carapace externe. Petit à petit, cette carapace devint plus encombrante que protectrice et elle finit par disparaître (la lourde armure des preux chevaliers médiévaux connut le même sort). Cette évolution a favorisé l'émergence des vertébrés (poissons, amphibiens, reptiles, oiseaux et mammifères). Notre cage thoracique est le dernier modèle de carapace mis au point par l'évolution naturelle. De même, les écailles et les nageoires chez le poisson se transformèrent en plumes et en ailes chez l'oiseau. Ces ailes se muèrent à leur tour en membres chez le mammifère.

Mais selon moi une des inventions les plus surprenantes et les plus belles (décidément on n'échappe pas à ce qualificatif) de la nature fut celle de l'oiseau il y a environ 100 millions d'années. Je ne me lasse jamais de les observer en plein vol. Ils sont imbus de grâce, d'agilité et de liberté. Je les envie. Je peux nager comme un poisson, marcher comme un bipède mais je ne peux pas voler comme un oiseau. Voler est une extravagance de la nature.

L'OISEAU ET L'AVION

En plein vol, le poids de l'oiseau ou de l'avion est compensé par la portance des ailes alors que la traînée est surmontée par la poussée. La poussée est assurée, chez l'oiseau, par le battement des ailes et dans l'avion par les moteurs. Le défi principal de la nature ou de l'ingénieur en aérodynamique est alors de concevoir une machine volante dont le rapport de la portance à la traînée est maximal. Pour un avion, ce rapport varie de 10 à 40. Chez l'oiseau, il prend des valeurs entre 6 et 24. Ce résultat peut sembler surprenant à prime abord mais il faut dire que des critères beaucoup plus contraignants ont dicté la conception, ou plutôt l'évolution, de l'oiseau. Par exemple, l'oiseau doit être en mesure de voler entre les branches, de se poser en douceur dans un arbre, de construire un nid et de pondre des œufs. J'imagine la tête que ferait un ingénieur à qui on imposerait de respecter ces critères dans la conception d'un engin volant... Comparons tout de même les besoins énergétiques d'un oiseau et d'un avion dont le rapport portance/traînée est le même soit 15. Ce rapport est typique chez les gros transporteurs aériens.

L'oiseau a une masse de 300 g soit un poids d'environ 3 N. Puisque la portance compense le poids, on en déduit que la traînée sera de $3/15 = 0.2$ N. Si l'oiseau se déplace à 15 m/s, la puissance requise sera de $0.2 \text{ N} \times 15 \text{ m/s} = 3 \text{ W}$. Supposons maintenant que cet oiseau migre dans le sud et entreprenne un vol de 3 000 km sans refaire le plein (sans manger). L'énergie dépensée pour vaincre la traînée est donnée par le produit de la force de traînée et de la distance parcourue soit $0.2 \text{ N} \times 3.0 \times 10^6 \text{ m}$

= 0.6 MJ. Cette énergie est emmagasinée sous forme de gras. En pratique, les matières grasses fournissent 40 MJ par kilogramme mais environ 7.5 % de l'énergie chimique est convertie en énergie mécanique (2^e loi de la thermodynamique). Le reste est dissipé en chaleur. Trois (3) MJ par kilogramme de gras sont donc convertis en énergie utile et la masse de gras requise pour couvrir 3 000 km sera $0.6 \text{ MJ} / 3 \text{ MJ/kg}$ soit 200 g. Dans ces calculs, très approximatifs, j'ai supposé que la masse de l'oiseau demeurerait constante. En réalité, l'oiseau subira une perte de masse relativement importante. Si au départ sa masse est disons 400 g, à l'arrivée elle ne sera plus que 200 g de sorte que sa masse «moyenne» sera environ 300 g.

Puisque la traînée ne dépend que du poids et du concept aérodynamique de l'oiseau, et puisque le travail est le produit de la force et de la distance, la vitesse affecte peu la consommation de carburant pour couvrir une distance donnée. Elle influence toutefois la puissance débitée.

On sait d'autre part qu'il faut 1 kg de masse musculaire chez l'oiseau pour développer 50 W. Pour débiter 3 W, comme c'est le cas ici, il faut donc $3\text{W}/50\text{W/kg} = 0.06 \text{ kg}$ de muscle. Cela représente 30 % de la masse totale de l'oiseau ($0.06 \text{ kg}/0.2 \text{ kg}$). 70 % de la masse restante comprend les autres muscles, les matières grasses, la tête, les systèmes respiratoire, de circulation et de digestion, les pattes et les plumes.

Cet exemple démontre à quel point voler est difficile presque qu'une anomalie dans le monde vivant. Concevoir une machine vivante volante est à la limite du possible.

À cause des effets d'échelle de grandeur, il est moins difficile pour des petits organismes de voler. La nature a conçu les oiseaux principalement pour voler. Le vol sur place consomme davantage d'énergie. En fait, il nécessite environ deux fois plus d'énergie que le vol en déplacement. Il n'est pas surprenant alors que les organismes vivants réussissant cet exploit pèsent moins de 20 g (oiseau-mouche, insecte).

Examinons maintenant le cas de l'avion. Un inconvénient majeur du gros transporteur vis-à-vis l'oiseau est sa grande masse. En revanche, sa conception est assujettie à des contraintes beaucoup plus simples. On ne demande pas à l'avion de se poser en douceur sur une branche ou de pondre un œuf. De plus, le rapport puissance débitée/masse des moteurs est beaucoup plus élevé que celui des muscles et l'efficacité de la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique est supérieure.

Supposons que la masse de l'avion soit 150 tonnes. Le rapport portance/trainée est, rappelons-le, 15. Le poids est alors 1.5×10^6 N et la traînée sera le quinzième du poids soit 100 000 N. Pour parcourir 3 000 km, il faudra dépenser $100\,000 \text{ N} \times 3 \times 10^6 \text{ m} = 300\,000 \text{ MJ}$. Les turbines à gaz convertissent environ 33 % de l'énergie chimique en énergie utile soit $1/3 \times 40 \text{ MJ}$ par kilogramme de combustible. La masse de combustible requise sera alors $300\,000 \text{ MJ} / (1/3 \times 40 \text{ MJ/kg}) = 22.5 \text{ tonnes}$ soit 15 % de la masse totale

de l'avion. Si l'avion se déplace à 250 m/s, la puissance requise sera $100\,000\text{ N} \times 250\text{ m/s} = 25\text{ MW}$. En régime de croisière, le rapport puissance/masse des turbines à gaz est d'environ 6 kW/kg. La masse des moteurs représente alors ici 4 tonnes, soit 3 % de la masse totale de l'avion.

PUISSANCE DE CRÊTE

Afin de s'arracher du sol, l'oiseau comme l'avion doit disposer, au moment du décollage, d'une puissance de crête égale à plusieurs fois la puissance de croisière. Pour ce faire, l'oiseau compte sur des fibres musculaires rouges et blanches. Les tissus musculaires rouges doivent leur couleur foncée à la présence d'une protéine appelée myoglobine. Cette protéine participe au procédé chimique dans lequel les matières grasses combinées à l'oxygène libèrent de l'énergie. Environ 20 % de cette énergie est convertie en énergie utile alors que 80 % est dissipée en chaleur. Les fibres musculaires rouges qui nécessitent un apport constant d'oxygène via les systèmes respiratoire et de circulation sont donc sollicitées lors d'un effort constant et prolongé. Les fibres musculaires blanches utilisent, d'autre part, de l'énergie moins concentrée stockée dans le glycogène. Les réactions chimiques se produisent sans la présence d'oxygène de sorte que les fibres blanches peuvent développer une grande puissance pendant une courte période de temps. Ce sont les fibres blanches qui sont sollicitées au moment du décollage et les fibres rouges en régime de croisière.

Les poulets sont les descendants d'une espèce d'oiseaux qui volaient occasionnellement, se déplaçant le plus souvent sur leurs pattes. C'est la raison pour laquelle la chair de leur poitrine est blanche alors que celle des cuisses est foncée. La chair du lapin est blanche car cet animal compte sur sa vitesse explosive pour échapper à ses prédateurs alors que la chair du lièvre est foncée puisque ce dernier réussit à semer ses prédateurs en courant de longues distances.

Un athlète peut déployer, pendant quelques dizaines de secondes, une puissance de 1 kW. Après une minute, le combustible anaérobique (sans oxygène) est épuisé et la puissance chute à 700 W. Au bout de deux minutes environ l'athlète peut poursuivre son activité mais en débitant seulement 400 W grâce à la consommation aérobique (avec oxygène). Il ne pourra fournir un nouvel effort court et violent que lorsque sa réserve de combustible anaérobique (glycogène) se sera renouvelée.

Le sprinter olympique (courses de 100 m et 200 m) compte sur le procédé anaérobique pour réaliser ses performances alors que le coureur de fond (courses de 1 500 m et plus) s'appuie sur le procédé aérobique. Il n'est pas surprenant alors que le gabarit de ces athlètes soit si différent. Mais le coureur de 800 m, qui couvre cette distance en moins de 2 minutes, dépend à la fois de la combustion anaérobique et de la combustion aérobique. Il doit être à la fois sprinter et coureur de fond. C'est la raison pour laquelle la course de 800 m est, selon les athlètes, la course la plus difficile.

À titre d'information et de comparaison, je présente, dans le tableau suivant, l'énergie spécifique et la puissance spécifique de différents combustibles et systèmes de stockage.

ÉNERGIE SPÉCIFIQUE (kJ/kg)

Marée motrice	0.04
Ressort d'une montre bracelet	0.04
Ancienne catapulte	0.1
Saut d'une puce	1.5
Catapulte moderne	10.0
Roue d'inertie (250 m/s)	25.0
Eau dans une bouilloire (100°C)	39.0
Accumulateur électrique	80.0
Eau dans une bouilloire (230°C)	230.0
Poudre à canon	2.8×10^3
Combustible à fusée	9.0×10^3
Hydrocarbures (gaz, huile, etc.)	40.0×10^3
Réaction de fusion nucléaire	24.0×10^9

PUISSANCE SPÉCIFIQUE (kW/kg)

Muscle	0.05
Batterie plomb/acide	0.18
Moteur électrique	0.25
Moteur à piston	1.5
Turbine à gaz	6.0

Même si sa puissance spécifique ne représente que le sixième de celle de l'oiseau, l'homme a néanmoins réussi à voler à bord d'appareils à propulsion humaine. Il a même traversé la Manche ainsi. Son handicap musculaire était compensé par une voilure

considérablement accrue (faible vitesse) et une meilleure efficacité de propulsion (engrenages).

L'ARBRE ET LE GÉNIE MÉCANIQUE

Si l'arbre était l'œuvre de l'homme, il aurait probablement été imaginé et conçu par un ingénieur mécanicien. En effet, en étudiant cette plante, on retrouve les principaux éléments qui constituent le bagage technique de l'ingénieur mécanicien : structures, mécanique des fluides, transfert de chaleur et de masse, matériaux, thermodynamique et contrôle de systèmes.

L'arbre est une structure complexe dont la fonction principale est de supporter un réseau de feuilles afin de capter le maximum de rayonnement solaire tout en minimisant le coût des matériaux vivants. Cette fonction est davantage compliquée par la position changeante du soleil dans le ciel et la compétition féroce entre les plantes pour une place au soleil. Le coût de la structure par unité de surface des feuilles est minimal si la plante est compacte. Toutefois, à certains moments de la journée, une grande partie de la surface totale des feuilles sera cachée du soleil par son propre feuillage. À l'opposé, une ramure épanouie permet une exposition solaire soutenue mais le coût est plus grand. Une structure élevée coûte très cher, mais elle peut être l'avantage décisif dans la course au soleil. Pour pousser dans la forêt, une espèce de plante doit être un grand arbre, une plante grimpante qui utilise la structure des autres ou une plante aérienne. Les autres plantes plus petites, qui poussent au sol, doivent s'adapter, soit en utilisant la faible

lumière qui les éclaire ou encore en s'alimentant de matières vivantes ou mortes photosynthétisées par d'autres plantes.

Non seulement la surface des feuilles permet-elle de capter la lumière solaire mais en plus elle favorise l'absorption de gaz carbonique. On saisit davantage la nécessité pour la plante d'offrir la plus grande surface de feuilles quand on considère que la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère est relativement faible (environ 0.03 % soit 500 fois plus faible que celle de l'oxygène). En utilisant la vapeur d'eau et le gaz carbonique ainsi que la lumière solaire, la plante produit des hydrates de carbone qui assurent son alimentation et sa croissance.

L'absorption de gaz carbonique s'effectue grâce à des millions de pores appelés stomates qui tapissent la surface de la feuille. Sans un système sophistiqué qui contrôle l'ouverture de ces pores, la plante perdrait très rapidement son eau et ses matières nutritives et succomberait inexorablement par temps sec et chaud. Dans de telles conditions, l'ouverture des milliards de stomates est continuellement ajustée afin de régler l'évaporation de l'eau qui assure le refroidissement et l'alimentation de la plante sans provoquer toutefois une déshydratation fatale.

Un des aspects le plus intrigant et incompris chez l'arbre relève de la mécanique des fluides. Certains arbres (le séquoia de l'ouest américain par exemple) atteignent une hauteur vertigineuse de 120 mètres. Face au problème de pomper de l'eau à une telle

hauteur, l'ingénieur mécanicien suggérerait sans doute une des deux solutions suivantes : La première, consisterait à installer une pompe dans les racines pour pousser l'eau jusqu'à la cime. La seconde proposerait de placer, à tous les 10 mètres de hauteur environ, une pompe à suction. L'arbre, toutefois, ne retient aucune de ces solutions. Il semble que l'eau soit plutôt déplacée vers le haut le long des fibres un peu comme si un fil de coton était tiré à travers un tube. Dans ces conditions, la longueur du fil d'eau en tension peut atteindre 300 mètres !

D'un point de vue thermodynamique, l'arbre est un système fort efficace. C'est sans doute la machine dont le rendement est le plus élevé pour convertir l'énergie solaire et alimenter les réactions chimiques complexes qui produisent les hydrates de carbone nécessaires à sa croissance. Par comparaison, les meilleurs capteurs solaires font piètre figure. À la surface du soleil, la température est environ 7 000° C (énergie de grande qualité) alors que dans le capteur solaire elle n'est, au plus, 80° C (énergie de faible qualité). De surcroît, seulement 20 % de l'énergie thermique captée peut être convertie en énergie utile.

L'arbre est aussi un exemple remarquable de matériau composite. Les fibres de bois, faite de cellulose, ressemblent à de petits tubes au sein desquels circulent la sève. Ces fibres sont soudées ensemble avec une substance appelée lignine. Afin de mieux résister aux efforts de tension, les fibres se déploient hélicoïdalement le long de l'axe. Ces caractéristiques uniques permettent aux arbres, mêmes ceux dont la ramure est épaisse et

épanouie, de résister aux formidables efforts de tension et de compression subis lors de vents violents.

SCIENCE ET ENVIRONNEMENT

Chapitre 2

Les possibilités de la technologie moderne sont telles qu'elle est devenue, consciemment ou à notre insu, un danger pour nous tous. La science et la technologie ont sauvé des milliards de vies humaines, amélioré les conditions de vie d'encore plus de gens et en même temps changé le monde à un tel point que certains ne s'y reconnaissent plus. Nous avons créé de nouveaux problèmes difficiles à circonscrire, difficiles à comprendre et qui ne pourront être résolus sans faire appel à toute notre ingéniosité et notre bonne volonté. Plus que jamais, il est essentiel que nous comprenions, collectivement, la science. Plusieurs scientifiques prétendent que nous ne pouvons plus exploiter la planète comme nous le faisons sans courir à la catastrophe. Il faut changer les choses radicalement. Prendre leurs affirmations au pied de la lettre coûterait toutefois cher. Très cher. L'activité industrielle serait sérieusement compromise. Les profits chuteraient, l'économie telle que nous la connaissons périliterait. Il est alors naturel d'ignorer leurs appels. Peut-être ces scientifiques sont-ils de mauvaise foi, des alarmistes illuminés, des prophètes de malheur. Peut-être éprouvent-ils un plaisir pervers à alimenter la psychose parmi la population. Ou encore peut-être est-ce une façon de mousser leurs travaux de recherche et de recueillir des subventions additionnelles. Après tout, il y a d'autres scientifiques qui ne semblent pas alarmés et qui, au contraire, affirment même que l'environnement s'adapte très bien à notre activité industrielle. Naturellement, c'est plus réconfortant croire ces derniers. Ne faisons pas de bruit. Ne réagissons pas trop rapidement. Soyons prudents. Procédons lentement. Assurons nous que le danger est réel avant d'entreprendre quoique ce soit.

Qui croire et comment décider ? Et puis, peut-on se fier à la science ? Après tout, des affirmations extraordinaires nécessitent des évidences extraordinaires. Chaque génération croit que ses problèmes sont les plus grands et les plus complexes. Pourtant, les générations se suivent toujours. Cet argument a sûrement contribué à apaiser les anxiétés à travers les générations mais je pense qu'aujourd'hui son effet s'estompe.

Récemment je bouquinais dans une bibliothèque et je suis tombé, par hasard, sur un ouvrage traitant de procédés industriels. La première ligne de la première page disait quelque chose comme ceci : L'atmosphère est le réservoir le plus économique et le plus vaste pour se débarrasser des rejets gazeux d'une usine. Ce livre, écrit dans les années septante par un ingénieur chimiste, montre à quel point le souci de la pollution semble être un phénomène récent. Même chez les scientifiques et les ingénieurs.

L'atmosphère terrestre est une mince couche de gaz dont l'épaisseur représente 0,1 % du diamètre de la planète. C'est à peu près ce que représente la couche de vernis recouvrant le traditionnel globe terrestre trônant dans toutes les classes de géographie. Qui plus est, si la couche d'ozone de la stratosphère était rapportée à la surface de la Terre, son épaisseur représenterait $2,5 \times 10^{-10}$ diamètre terrestre. **Une couche d'à peine 3 mm d'épaisseur.**

Aujourd'hui, nous faisons face à une situation sans précédent dans l'histoire de l'humanité. Il y a plusieurs centaines de milliers d'années, la densité de la population était de l'ordre de 1/100 d'habitant par kilomètre carré et les triomphes de la technologie étaient les outils de pierre et le feu. Nous étions incapables de provoquer des changements majeurs à l'environnement planétaire. Cette idée ne nous serait d'ailleurs jamais venue à l'esprit. Nous étions trop peu et notre technologie trop primitive. Mais le temps a passé, la technologie s'est améliorée et la population a cru de façon exponentielle. Aujourd'hui, on se retrouve à 10 habitants au kilomètre carré et, nous avons entre les mains, une technologie que nous comprenons et contrôlons mal. Nous avons atteint un point où nous sommes maintenant capables, intentionnellement ou par inadvertance, d'altérer l'environnement planétaire.

Dans les pages qui suivront, la discussion portera sur l'amincissement de la couche d'ozone et le réchauffement de la planète, deux problèmes environnementaux auxquels nous faisons face. Ces deux problèmes nous conduiront naturellement à deux activités propres à l'ingénieur : l'utilisation des chlorofluorocarbones et la production d'énergie utile. Bien sûr, il y a d'autres conséquences environnementales de la technologie moderne aussi graves et dont je ne discuterai pas ici : l'extinction de nombreuses espèces animales et végétales qui auraient pu, peut être, mener à un traitement pour le cancer, le SIDA, les maladies du cœur ou autres maladies graves ; les pluies acides ; les armes nucléaires, biologiques et chimiques ; les produits chimiques toxiques et les déchets nucléaires.

La Terre est une anomalie. C'est la seule planète habitée dans tout le système solaire. Peut-être dans l'univers bien que nous n'en savons rien. Nous, les humains, sommes une espèce parmi des millions qui vivons dans un monde bourgeonnant de vie. Et pourtant la plupart des espèces qui ont existé n'existent plus. Après avoir régné sur Terre pendant 180 millions d'années, les dinosaures se sont éteints. Tous sans exception. Il n'y en existe plus malgré Jurassic Park. Aucune espèce n'est assurée de la permanence sur la Terre.

Notre espèce existe depuis environ un million d'années. C'est aussi la première et la seule espèce qui s'est donné les moyens de se détruire, de détruire toutes les espèces, d'anéantir la vie sur Terre. Notre espèce a aussi le pouvoir (et le privilège) d'influencer et de contrôler son avenir. Comme le rapporte Albert Jacquard, l'homme est le seul animal qui sait que demain sera. Je crois que nous avons le devoir de se battre pour la vie sur Terre. Pas seulement pour nous, mais aussi pour toutes les espèces et pour ceux et celles qui viendront après nous. Il n'existe pas de cause plus noble, plus urgente que de protéger l'avenir de la vie. Presque tous nos problèmes sont créés par l'humain et ne peuvent être résolus que par l'humain. Aucun contrat social, aucun régime politique, aucun système économique, aucune doctrine religieuse n'est plus important.

LA COUCHE D'OZONE

Il vous est sans doute déjà arrivé de vous retrouver près d'un moteur électrique et de discerner une odeur étrange, une odeur pas désagréable mais légèrement piquante. Cette odeur signale la présence d'une forme plus rare d'oxygène, une forme appelée ozone. En se déchargeant dans l'air, un courant électrique brise les molécules d'oxygène moléculaire (O_2) qui se recombinent sous forme d'ozone (O_3). On peut exprimer ce phénomène par les équations chimiques suivantes :



suivi de :



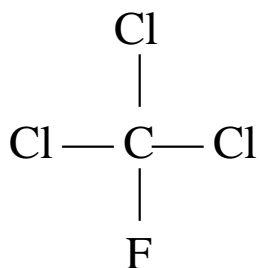
où M représente une autre molécule, un catalyseur, le plus souvent, bien sûr, l'azote (N_2).

L'ozone est aussi produit par les moteurs de voiture et plusieurs activités industrielles contribuant à la pollution atmosphérique. Le danger avec l'ozone, ce n'est pas ce qui est produit au sol mais plutôt ce qui est détruit dans la haute atmosphère.

Dans les années 20, le réfrigérateur était perçu comme étant une bonne invention. Il permettait de transporter et de préserver la fraîcheur des fruits, des légumes, des

produits laitiers et de la viande contribuant indiscutablement à la santé publique. Mais les fluides réfrigérants utilisés à l'époque, l'ammoniac et le dioxyde de soufre, présentaient un inconvénient majeur : libérés dans l'air, ces gaz sont poisons. Il fallait inventer un substitut. Un nouveau fluide réfrigérant qui ne serait ni poison, ni inflammable et, ni corrosif. Un produit inoffensif. Une telle substance ne semblait pas se trouver dans la nature.

Alors des chimistes américains et de l'Allemagne Nazie inventèrent (puisque la nécessité est la mère de toute invention) une nouvelle classe de molécules qui n'avaient jamais existé sur Terre auparavant. Ces molécules furent baptisées chlorofluorocarbones ou plus simplement CFC. Elles sont faites d'atomes de carbone auxquels sont rattachés des atomes de chlore et/ou de fluor. Par exemple,

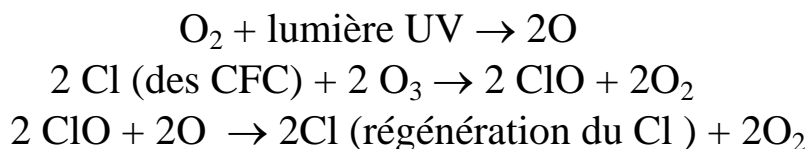


Ces molécules dépassèrent toutes les attentes et leur utilisation connut un essor fulgurant. Non seulement devinrent-elles le fluide réfrigérant le plus populaire mais en plus on les utilisa pour la climatisation. Elles se retrouvèrent également dans les

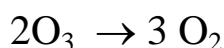
canettes d'aérosols, dans la mousse isolante, dans les solvants industriels, et dans des agents nettoyants. La marque la plus connue est le FREON, un produit de la compagnie DuPont. Au début des années 70, on en produisait annuellement plusieurs millions de tonnes.

Mais voilà. Une molécule de CFC propulsée à l'extérieur d'une canette de désodorisant ne colle pas à la peau. Rebondissant sur les murs de la salle de bain, elle s'échappe éventuellement de la maison. Transportée par les mouvements convectifs de l'air extérieur, elle se retrouve quelques jours, quelques semaines, quelques années plus tard dans la haute atmosphère circulant autour de la planète. À quelques exceptions près, ces molécules ne se brisent pas, ne réagissent pas avec d'autres molécules. Elles sont pratiquement inertes.

À une altitude d'environ 25 km, les rayons ultraviolets du soleil (UV) réagissent avec les molécules d'oxygène moléculaire. Ils les brisent en atomes d'oxygène qui se recombinent pour former de l'ozone, tout comme ce qui se passe dans un moteur électrique. À cette altitude, les molécules de CFC survivent en moyenne 100 ans avant que les UV ne les brisent et qu'elles libèrent leur chlore. Le chlore libre s'attaque alors à l'ozone. Avant d'être précipité au sol et emporté par les eaux fluviales, on estime qu'un seul atome de chlore détruit 100 000 molécules d'ozone. La chaîne de réactions chimiques se lit comme suit :



de sorte que le résultat final est



Deux molécules d’ozone ont été détruites pour donner naissance à trois molécules d’oxygène. Et l’atome de chlore est toujours en liberté prêt à recommencer son œuvre.

Bon. Et après ? Quel est le problème ? Pourquoi devrait-on se préoccuper de cette réaction chimique qui se produit à des kilomètres de la surface terrestre?

La réponse est que l’ozone est un bouclier aux rayons ultraviolets du soleil. Si la couche d’ozone de la stratosphère était amenée à la pression et à la température prévalant au sol, elle ne représenterait qu’une couverture de 3 mm d’épaisseur. C’est bien mince. Mais c’est tout ce qui nous sépare des rayons UV pénétrants et nocifs du soleil.

On entend souvent dire que les rayons UV peuvent causer le cancer de la peau. Les gens à la peau claire sont particulièrement vulnérables. Les gens à la peau foncée, plus riche en mélanine, sont mieux protégés. Le bronzage est d’ailleurs un mécanisme d’adaptation de la peau produisant plus de mélanine lorsqu’exposée aux rayons UV.

Ironiquement, il y a un peu de justice cosmique dans le fait que les gens à la peau claire qui ont inventé les CFC sont aussi les plus vulnérables à ses effets nocifs. Je me demande ce que Hitler aurait pensé d'une invention allemande qui s'attaque préférentiellement à la race «aryenne » ?

On rapporte aujourd'hui dix fois plus de cancers de la peau qu'en 1950. Bien qu'une partie de ceux-ci soit imputable à un meilleur dépistage, l'amincissement de la couche d'ozone et l'exposition accrue aux rayons UV est indéniablement en cause.

Mais le cancer de la peau qui menace des millions de gens n'est pas le pire fléau résultant d'une exposition accrue aux rayons UV (Remarquez qu'une telle affirmation est odieuse pour une personne déjà atteinte d'un cancer). Ni d'ailleurs l'augmentation alarmante des cas de cataractes prématurés ou l'affaiblissement du système immunitaire chez l'humain. Pire encore, est le fait que les molécules organiques constituant toutes formes de vie sur Terre sont cassées ou leur structure chimique altérée lorsqu'elles sont bombardées par ces rayons. Le phytoplancton qui flotte à la surface de tous les océans de la Terre (et les océans couvrent les 2/3 de la surface terrestre) ne peut hélas leur échapper. Il vit de lumière solaire. Pas question de plonger plus profondément. Des expériences montrent qu'une légère augmentation de l'exposition aux UV est suffisante pour causer de sérieux dommages à ces organismes unicellulaires et, au-delà, ils meurent massivement. Au cours des dernières années, on a mesuré une baisse radicale de 25 % dans la concentration de phytoplancton dans les eaux de l'Arctique. Cette

baisse est inquiétante et peut entraîner, à long terme, des conséquences dévastatrices. Tout comme les arbres, le phytoplancton extrait du gaz carbonique de l'atmosphère. En mourant, moins de gaz carbonique est absorbé et ce gaz s'accumule dans l'atmosphère accentuant l'effet de serre. D'autre part, le zooplancton, qui se nourrit de phytoplancton, voit son garde manger s'appauvrir et n'arrive pas à se nourrir convenablement. Ils meurt à son tour. Les petits poissons qui s'alimentent de zooplancton subissent le même sort. De même que les plus gros poissons qui mangent les petits poissons. Et la chaîne remonte jusqu'à l'homme. Alors, dans un geste courageux mais tardif, le ministre des Pêches et des Océans impose un moratoire sur la pêche à la morue de l'atlantique car l'espèce est en voie de disparition et il faut refaire les stocks. Mais est-ce vraiment la solution ?

Cette histoire est aussi valable sur Terre que sur mer. Par exemple, les bactéries dans les racines des plantes de riz qui absorbent l'azote dans l'air sont très sensibles au rayonnement ultraviolet. En accroissant ce rayonnement, la survie de l'aliment le plus consommé sur Terre est menacée. Je n'arrive pas à imaginer les conséquences mondiales d'une telle éventualité.

En détruisant la couche d'ozone, on accroît le rayonnement UV à la surface du globe. Cela pose un sérieux défi à la vie telle que nous la connaissons. Nous ne saisissons pas l'interdépendance complexe de toutes les espèces vivantes et nous comprenons mal la séquence des événements que peut engendrer la disparition

d'espèces à l'échelle planétaire. Nous reconnaissons toutefois l'ampleur du problème. Personne, je pense, ne croit que la couche d'ozone est sur le point de disparaître et que la surface de la Terre deviendra aussi aseptisée que celle de Mars. Mais une réduction de 10 % de la couche d'ozone, et plusieurs scientifiques estiment que c'est la réduction qu'entraînera les CFC **actuels** dans l'atmosphère, est une menace sérieuse.

En 1974, F. Sherwood Rowland et Mario Molina, deux chercheurs de l'Université de la Californie à Irvine, travaillaient au dépouillement des données atmosphériques de la planète Vénus relevées par la NASA. Deux chimistes poursuivant des travaux de recherche fondamentale loin des préoccupations quotidiennes du monde. Deux scientifiques curieux et passionnés. Ils découvrirent alors comment les atomes de chlore et de fluor réagissent chimiquement avec les gaz atmosphériques. Ils firent l'analogie avec la planète Terre et estimèrent qu'au rythme où nous déchargions les CFC dans l'atmosphère au début des années septante (plusieurs millions de tonnes annuellement) nous risquions d'endommager irréversiblement la couche d'ozone. Dans les années qui suivirent, des scientifiques à travers la planète refirent leurs calculs, effectuèrent des expériences et confirmèrent leurs conclusions.

Entre temps, la compagnie DuPont qui empochait la jolie somme d'un milliard de dollars annuellement grâce à la vente des CFC nia, bien entendu, cette découverte. Elle inonda les quotidiens et les journaux scientifiques d'annonces réfutant l'effet nocif des CFC sur la couche d'ozone et plaida sa cause devant le Congrès américain. Après tout,

une multinationale aussi puissante et riche n'allait sûrement pas perdre des milliards de dollars à cause des découvertes de deux photochimistes. Mais le chat était sorti du sac. Sous la pression grandissante des scientifiques, des médias, des associations pour la protection de l'environnement, bref des électeurs, certains gouvernements cédèrent et dès 1978, les propulseurs aux CFC utilisés dans les canettes furent déclarés illégaux aux États-Unis, au Canada, en Norvège et en Suède. Mais la plus grande partie de la production des CFC n'est pas destinée aux canettes. La tempête était passée, le public lassé et l'attention des média pouvait se tourner ailleurs. Pendant ce temps, la concentration des CFC dans l'atmosphère continuait d'augmenter. Au début des années quatre-vingt, la concentration des atomes de chlore dans l'atmosphère avait doublé depuis la découverte de Rowland et Molina huit ans plus tôt, cinq fois ce qu'elle était en 1950...

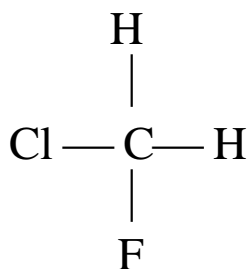
Pendant des années, une équipe de scientifiques britanniques stationnés à Halley Bay a étudié la couche d'ozone au-dessus du continent Antarctique. Puis en 1985, ils rapportèrent une nouvelle déconcertante : la couche d'ozone dans cette région du monde avait diminué de moitié en quelques années seulement. Cette découverte fut rapidement confirmée par un satellite de la NASA. Et voilà que les appels au bannissement des CFC refont surface. Pointée du doigt, l'industrie échafaude des scénarios apocalyptiques pour l'économie si elle doit cesser la production et l'utilisation des CFC. Mais attention. On ne parle pas ici de la survie d'une industrie. On parle de la survie de toutes les espèces vivantes sur cette planète. DuPont cédera finalement en

1988 (si on peut s'exprimer ainsi), 14 ans après la découverte du danger que pose les CFC. Elle annonce qu'elle va réduire progressivement sa production de CFC jusqu'à zéro... en l'an 2000. D'autres manufacturiers américains et ailleurs dans le monde n'ont toutefois pas fait cette promesse.

En 1987, toutes les nations productrices et utilisatrices de CFC sont réunies à Montréal pour établir les termes d'un accord visant à réduire l'emploi des CFC. La France, l'Italie et la Grande-Bretagne sont hésitantes. Ces nations comptent des industries chimiques puissantes qui jouent un rôle clé dans leurs économies. Elles craignent de perdre un marché important et elles soupçonnent DuPont d'avoir inventé un substitut aux CFC et de vouloir profiter de la nouvelle réglementation. Plusieurs nations ne signeront pas cet accord mais soulignons le leadership du premier ministre britannique de l'époque, Margaret Thatcher, qui, plus que tout autre chef d'état, comprit l'urgence et l'enjeu de ce problème pour la planète. Ce n'était pas un hasard. Mme Thatcher a une formation de chimiste.

Aujourd'hui, fort heureusement, presque toutes les nations du monde, soit 156 en tout, dont la Chine, la Communauté des États Indépendants, la Corée du sud et l'Inde ont adhéré à cet accord. Suite à plusieurs amendements on s'entend pour éliminer graduellement les CFC.

Un substitut aux CFC a été inventé. Ce sont les HCFC, des molécules semblables dans lesquelles se trouvent des atomes d'hydrogène. Par exemple,



Ces molécules sont aussi dommageables à l'environnement. Beaucoup moins toutefois que ne le sont les CFC. Elles contribuent également au réchauffement de la planète. Mais pour l'instant elles remplacent graduellement les molécules de CFC et d'ici l'an 2030 elles seront à leur tour remplacées par un autre composé chimique. Ou encore les techniques de réfrigération par compression de vapeur ou par absorption chimique seront remplacées par une toute nouvelle invention. Voilà un sujet de recherche fort intéressant et dont les retombées pourraient être faramineuses.

Le nombre d'atomes de chlore par milliard d'atomes d'air dans la stratosphère a atteint un maximum de quatre et ce nombre est maintenant en décroissance. Il est trop tôt pour assouplir les mesures de protection de la couche d'ozone. On doit d'abord s'assurer que la production de CFC cesse sur Terre. On doit continuer la surveillance de la couche d'ozone partout autour de la planète (stations météorologiques, avions de reconnaissance, satellites d'observation). Et on doit mesurer également l'effet d'éruptions volcaniques, du réchauffement de la planète et d'autres substances

chimiques sur l'atmosphère terrestre. Si aucune mesure n'avait été instaurée pour contrôler la production et l'utilisation des CFC, la concentration d'atomes de chlore dans la stratosphère aurait été, en l'an 2010, trois fois plus grande qu'elle ne l'était en 1997 et l'épaisseur de la couche d'ozone aurait été réduite de 30 % !

La saga de la couche d'ozone ressemble à toutes les histoires de menaces environnementales. On rejette dans l'atmosphère une substance. On ne fait pas d'études approfondies de son impact sur l'environnement car ce serait vraisemblablement trop coûteux ou encore ça risquerait de retarder la production et d'amputer les profits. Ou peut-être parce que nous n'avons pas encore inventé les outils scientifiques qui nous permettraient de mesurer son effet. Ou, tout simplement, parce que nous, les humains, sommes faillibles. Alors, soudainement, on se retrouve en face d'un problème aussi inattendu que complexe aux dimensions et aux conséquences planétaires. Un problème que nous ne pouvons pas résoudre localement et à court terme.

Il est clair que l'homme, même de bonne volonté, n'est pas toujours assez intelligent ou assez sage pour prédire les conséquences de ses actes. L'invention des CFC lui a rendu de grands services. C'est indéniable. Mais aussi brillants puissent-ils avoir été, les chimistes qui les ont découverts ne pouvaient prévoir que des molécules aussi stables pourraient causer de tels dommages à la couche d'ozone stratosphérique. Notre capacité de créer et d'inventer est extraordinaire. Toute aussi extraordinaire est

celle de détruire, consciemment ou inconsciemment. En tant qu'ingénieur ou scientifique, nous devons penser et agir, non pas en termes d'entreprises ou de nations mais plutôt en termes planétaires et de générations à venir.

En 1995, F. Sherwood Rowland et Mario Molina reçurent le prix Nobel de chimie pour leur découverte. Le Comité Nobel tint à souligner que cette découverte contribua à sauver le monde en évitant un problème dont les conséquences auraient été catastrophiques à l'échelle planétaire.

LE RÉCHAUFFEMENT DE LA PLANÈTE

Il y a trois cents millions d'années, la Terre était couverte de marais. Quand les fougères, les queues de cheval et les tourbières mouraient, elles étaient ensevelies dans la boue. Les années passèrent. Leurs restes s'enfoncèrent davantage dans le sol et se transformèrent petit à petit en un solide organique qu'on appelle charbon. À une autre époque, des organismes unicellulaires se retrouvaient, après leur mort, au fond de l'océan. Avec les années, leurs restes furent ensevelis sous des couches de sédiments et ils se transformèrent lentement en des liquides et gaz organiques qu'on appelle pétrole et gaz naturel.

Bien des années plus tard, l'homme vint à découvrir ces substances. De l'huile giclant du sol dans la Perse ancienne s'enflammait donnant lieu à une flamme éternelle,

un élément central à toutes les religions de ce coin du monde. De retour en Europe, Marco Polo se buta au scepticisme de ses concitoyens en racontant comment en Chine on se chauffait en faisant brûler des pierres. Mais très rapidement, on reconnut les bienfaits que l'on pouvait retirer de ces substances inflammables.

On pouvait chauffer une maison, alimenter une fournaise, s'éclairer, alimenter une machine à vapeur, générer de l'électricité, construire des usines, alimenter des trains, des voitures, des navires, des avions... On faisait et on fait toujours des guerres pour celles-ci. Le pétrole fut un élément déterminant dans les 1^{re} et 2^e Guerres mondiales. L'entrée en guerre du Japon en 1942 était justifiée par la nécessité de sauvegarder ses réserves de pétrole. Et, n'en déplaise à George Bush, le président des États-Unis de l'époque, la guerre du golfe persique en 1991 n'avait rien à voir avec la préservation de la démocratie au Koweït. Comme Bob Dole, leader de la minorité au Sénat américain, l'a clairement fait comprendre, la guerre du golfe a été déclarée pour une seule et unique raison : « **O-I-L** ».

Ces substances en sont venues à dominer notre économie. Elles sont le moteur de la civilisation technologique. Il n'est pas exagéré de dire qu'elles mènent le monde. Et, comme toujours, il y a un prix à payer.

Le charbon, l'huile et le gaz sont des combustibles fossiles. Ils sont appelés ainsi car ils sont constitués des restes de fossiles qui ont existé il y a des millions d'années.

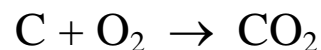
L'énergie chimique qu'ils renferment est de l'énergie solaire qui s'était accumulée dans les plantes d'autrefois. Notre civilisation marche grâce aux restes de ces humbles créatures qui peuplèrent la Terre des centaines de millions d'années avant que l'homme n'entre en scène. Nous sommes, en quelque sorte, des cannibales charognards qui s'alimentent des dépouilles décomposées de nos ancêtres.

La production mondiale de pétrole est d'environ 20 milliards de barils par année, soit 2 % des réserves connues. On peut donc penser que ces réserves seront épuisées dans 50 ans. Mais on continue à en découvrir chaque année et on repousse sans cesse la date fatidique. Mais forcément, il y a une limite aux quantités de charbon, de pétrole et de gaz existants. Après tout, il y a eu un nombre fini d'organismes vivants qui aujourd'hui contribuent à notre confort. Le problème c'est qu'il devient de plus en plus coûteux de découvrir et d'exploiter des nouvelles réserves et, l'histoire le démontre, nous allons nous entre-tuer si elles viennent à manquer. Et puis, bien sûr, il y a le coût environnemental.

Le prix à payer pour les combustibles fossiles ne se mesure pas seulement en dollars. Les usines en Angleterre au début de la révolution industrielle ont pollué gravement l'air et engendré des épidémies de malaises respiratoires sans précédent. Les fameux brouillards caractéristiques des films de Sherlock Holmes, de Jekyll et Hyde ou de Jack l'éventreur étaient créés par la pollution industrielle résultant de la combustion du charbon. Aujourd'hui, les centaines de millions de véhicules routiers à travers le

monde crachent leurs résidus de combustion dans l'atmosphère et toute grande ville est couronnée de son smog. En retour, ce nuage de gaz nocifs affecte la santé, le bonheur et la productivité de tous les gens qui l'alimentent. Il y a aussi les pluies acides et les déversements accidentels de pétrole dans la mer. Mais, comme collectivité, on tolère ces dommages à la santé et à l'environnement car ils sont largement compensés par les bienfaits que nous apportent les combustibles fossiles.

Cependant, un danger plus insidieux encore nous menace (un danger insidieux est un danger qui échappe à nos sens). Dans ce cas-ci, nos sens sont déjoués par l'échelle de temps. En brûlant du combustible fossile, on libère de l'énergie qui était emprisonnée depuis 200 millions d'années. Ce faisant, chaque atome de carbone du combustible se combine à une molécule d'oxygène de l'atmosphère pour donner du gaz carbonique :



Non seulement prive-t-on alors l'atmosphère d'un gaz essentiel à la vie (l'oxygène) mais en plus on lui redonne un gaz qui engendre l'effet de serre.

La chaleur qui nous parvient du soleil, par rayonnement, est responsable du climat hospitalier qui prévaut sur Terre. Si l'on éteignait le soleil tout d'un coup, la chaleur issue des profondeurs de la Terre serait bien insuffisante : la température plongerait

dramatiquement au point où l'air gèlerait. La surface du globe se recouvrirait d'une couche de neige d'azote et d'oxygène d'environ 10 mètres d'épaisseur.

En faisant un bilan d'énergie entre, d'une part, la quantité de chaleur qui nous parvient du soleil et, d'autre part, la quantité de chaleur que la Terre rayonne dans l'espace, on trouve que la température moyenne à la surface de la Terre devrait être environ -20° Celcius. Tous les océans de la Terre formeraient un gigantesque bloc de glace. On imagine que la vie serait fort différente. En effectuant ce calcul, on a omis toutefois un effet important, celui de l'effet de serre. Autrement dit, on a négligé, dans ce calcul, la présence de l'atmosphère.

Normalement, l'air (l'air atmosphérique est constitué de 78 % d'azote et 21 % d'oxygène. Le 1 % restant comprend du gaz carbonique, de la vapeur d'eau, des oxydes d'azote, du méthane, des CFC, etc.) est transparent aux ondes lumineuses dans le spectre visible, entre le bleu et le rouge. Au-delà, dans l'infrarouge il devient beaucoup plus opaque. Le rayonnement arrivant du soleil est principalement visible. Il passe donc à travers l'atmosphère et réchauffe la surface de la Terre (le sol, les océans, les calottes polaires, etc.). En retour, les surfaces chauffées émettent un rayonnement non pas dans le visible mais dans l'infrarouge. Ce rayonnement infrarouge ne passe pas à travers l'atmosphère. Il est absorbé, contribuant à garder la chaleur sur Terre. En prenant en compte cet effet, le calcul de bilan d'énergie révèle que la température moyenne à la surface du globe devrait être 13° C. Une température beaucoup plus

agréable et hospitalière. Cet effet, l'effet de serre, a donc permis de créer un environnement propice au développement de la vie sur Terre, la vie telle que nous la connaissons.

La vie dépend donc de cet équilibre fragile, équilibre dicté par ces gaz invisibles opaques au rayonnement infrarouge et qui ne représentent qu'une fraction minime (le 1 %) dans la composition de l'air atmosphérique. Un peu d'effet de serre est une bonne chose. Mais si on ajoute de ces gaz, l'opacité dans l'infrarouge croît et la Terre se réchauffe davantage.

Pour le public, le politicien, le décideur, cette argumentation semble bien abstraite. Gaz invisibles, infrarouge, opacité, effet de serre, c'est un langage savant que seuls semblent comprendre les scientifiques. Si, comme on le prétend, l'effet de serre pose un danger sérieux à la planète, ne devrions-nous pas avoir un peu plus de preuves tangibles de ce danger avant de prendre des décisions qui risquent de coûter très cher ?

La nature nous a fourni un exemple éclatant d'effet de serre extrême sur la planète voisine, la planète Vénus. Orbitant plus près du soleil que la Terre, cette planète est recouverte d'une épaisse couche de nuages de sorte que sa surface reçoit moins de chaleur solaire que la Terre. Si l'on fait abstraction de l'effet de serre, sa surface devrait donc être plus froide que celle de la Terre. Approximativement de même masse et de même diamètre que la Terre, on peut imaginer, naïvement, que cette planète

pourrait devenir, dans quelques siècles, un endroit touristique couru. Cependant, les sondes soviétiques Vénéra qui plongèrent vers sa surface découvrirent une atmosphère très dense, composée essentiellement de gaz carbonique. À la surface de la planète, une pression écrasante de 90 atmosphères y règne et la température est assez élevée pour faire fondre le plomb ou l'étain. Dans ces conditions, le sol de la planète est lisse et se meut lentement et continuellement comme de la mélasse.

La température élevée au sol est la conséquence directe de l'effet de serre engendré par une atmosphère chargée massivement de gaz carbonique. Vénus est une démonstration sans équivoque de ce que peut entraîner des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Vénus est une expérience naturelle de l'effet de serre à l'échelle planétaire. Doit-on répéter cette expérience sur la Terre pour se convaincre que cet effet existe réellement ?

Chaque année, la consommation de combustibles fossiles et les incendies de forêts (naturels et artificiels) rejettent dans l'atmosphère 7 milliards de tonnes de gaz carbonique. Plus d'une tonne par habitant. Des mesures prises à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï montrent que la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté sans cesse passant de 315 ppm en 1958 à 360 ppm en 1996. Et Hawaï n'est pas une région hautement industrialisée ou décimée par des incendies de forêt. Cet accroissement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est le résultat d'événements qui se produisent partout autour de la planète. Le gaz carbonique est

diffusé et transporté dans la haute atmosphère faisant fi des traités, des accords, des conventions et des frontières.

Puisque l'on connaît la quantité de CO₂ déchargée dans l'atmosphère et que l'on prétend comprendre le phénomène d'opacité dans l'infrarouge, ne peut-on pas alors calculer l'accroissement de la température moyenne sur Terre au cours des dernières décennies résultant de l'accumulation de gaz carbonique ? La réponse est affirmative mais les résultats doivent être pondérés en fonction d'événements imprévisibles. Par exemple, les cycles solaires. Tous les 11 ans, on observe de violentes éruptions solaires et l'énergie dégagée alors par le soleil fluctue brusquement. Les éruptions volcaniques crachent dans l'atmosphère des quantités énormes de matière en suspension qui affectent le bilan d'énergie solaire. L'éruption volcanique du Mont Pinatubo aux Philippines en 1991 a rejeté de 20 à 30 mégatonnes de dioxyde de soufre et d'aérosols dans l'atmosphère. En 3 mois, elles avaient pollué la haute atmosphère autour du monde. Et il y a également l'activité humaine qui parfois est aussi imprévisible. Je pense par exemple à la guerre du golfe et aux puits de pétrole qui furent incendiés. Néanmoins, les calculs des climatologues sont assez précis et se comparent aux observations. Au cours du 20^e siècle, la température moyenne sur la planète Terre a augmenté d'un peu moins de 1° C. De plus, les 10 étés les plus chauds depuis 1860 furent enregistrés au cours de deux dernières décennies.

Sur une échelle de temps plus longue, les climatologues peuvent aussi confronter leurs calculs aux observations expérimentales faites dans des carottes extraites du sol du Groenland et de l'Antarctique. D'un âge glaciaire à un autre, ces carottes révèlent que la température de la Terre et l'abondance de CO₂ dans l'atmosphère croissent et décroissent ensemble. Les modèles prédictifs des climatologues collent à ces observations.

On observe (et on calcule également) que la différence de température typique de la planète entre un âge glaciaire et un âge interglaciaire (qui prévaut actuellement) n'est que de 3 à 6° C. Cette faible différence de température montre à quel point un changement de température de quelques degrés seulement peut être bouleversant.

Avec leurs différents modèles prédictifs étalonnés rigoureusement, les scientifiques du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory du National Oceanic and Atmospheric Administration de Princeton, du Goddard Institute of Space Studies, de la NASA, du National Center for Atmospheric Research de Boulder, Colorado, du Department of Energy's Lawrence Livermore National Laboratory de Californie, d'Oregon State University, du Hadley Center for climate Prediction and Research au Royaume Uni et de l'Institut Max Planck de météorologie d'Hambourg en Allemagne ont calculé qu'en doublant la quantité de CO₂ dans l'atmosphère d'ici la fin du 21^e siècle (et au rythme actuel, cela se produira), la température sur la planète devrait

augmenter de 1 à 4° C. Il est clair que l'activité humaine peut changer le climat de la planète.

La chaîne de conséquences qu'entraînera, si on ne réagit pas, le réchauffement de la planète est difficile à prévoir. Mais tous les climatologues s'entendent pour dire qu'elles seront très sérieuses. Un réchauffement de la planète favorisera le mauvais temps : sécheresses dans les prairies, tempêtes et inondations le long des côtes, étés plus chauds et hivers plus froids. Des changements dans le climat auront aussi des effets sur le monde animal et microbiologique. Des épidémies récentes de choléra, de malaria, de fièvre jaune sont, semble-t-il, reliées aux changements climatiques. On prévoit que, d'ici la fin du siècle prochain, l'augmentation de la population de moustiques porteurs de malaria dans les régions tropicales fera de 50 à 80 millions de victimes de plus annuellement.

Un léger réchauffement de la planète pourrait, à court terme, favoriser l'agriculture dans des pays situés au-delà du 45^e parallèle, comme le Canada, au détriment des pays plus au sud. L'écart entre les pays riches et les pays pauvres se creuserait davantage, envenimant les relations et pavant la voie à une situation explosive. À plus long terme, vers l'an 2050, la situation risquerait de changer toutefois. Les sols nordiques moins fertiles et surexploités ne pourraient plus répondre à la demande et l'agriculture mondiale s'effondrerait. Au fur et à mesure que la Terre se réchauffera, le niveau de la mer montera (fusion des calottes polaires et surtout parce

que l'eau, comme la plupart des fluides, prend de l'expansion en voyant sa température monter). À la fin du 21^e siècle, le niveau de la mer pourrait avoir grimpé de quelques dizaines de centimètres voire d'un mètre. Des villes (Venise, Bangkok, Alexandrie, Miami, La Nouvelle Orléans, New York, etc.), des terres à proximité de grands fleuves (Mississippi, Yang-Tsé Kiang, Rhin, Rhône, Po, Nil, Gange, etc.) et des pays (Bangladesh, Hollande, etc.) pourraient être submergés et des dizaines de millions de personnes déplacées. De telles perturbations détérioreraient l'environnement et éroderaient des sociétés entières.

Si rien n'est fait pour arrêter l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, si on poursuit nos activités comme à l'habitude, la Terre se réchauffera d'année en année. Sécheresses et inondations deviendront endémiques et le niveau des eaux montera. Certes, on construira de nouveaux systèmes d'irrigation et on érigera de nouvelles digues pour contrer ces fléaux. On déploiera des trésors d'ingéniosité pour mater la nature. On inventera peut-être une nouvelle agriculture pour s'alimenter, de nouveaux vaccins pour se protéger des épidémies et de nouvelles armes pour défendre les plus riches face aux plus pauvres envieux. Mais est-ce le monde que nous voulons ?

Tous les ingénieurs connaissent l'effet de rétroaction. Dans tout système, un effet de rétroaction peut être positif (il accentue le résultat) ou négatif (il amortit le résultat). Supposons que le système soit, ici, le climat et que le résultat soit le réchauffement de la planète. Prenons un exemple de rétroaction positive, un exemple au résultat dangereux.

La température augmente à cause de l'effet de serre ce qui favorise la fusion des calottes polaires. Mais la glace réfléchit plus de rayonnement que la mer. Par conséquent, en fondant, la surface réfléchissante se rétrécit et la Terre absorbe plus de chaleur ce qui accentue l'augmentation de la température. En retour, la glace fond plus rapidement, la chaleur s'accumule et la température augmente davantage. Le processus se poursuit ainsi. Le système diverge. Il devient incontrôlable. Un autre exemple de rétroaction positive : un peu plus de CO_2 dans l'atmosphère et la surface de la planète se réchauffe. Les océans étant plus chauds, il y a un peu plus d'évaporation d'eau dans l'atmosphère. La vapeur d'eau est aussi un gaz à effet de serre et, par conséquent, la Terre se réchauffe davantage. Et ainsi de suite.

Considérons maintenant un effet de rétroaction négative, une rétroaction souhaitée. La Terre se réchauffe à cause de la présence accrue de CO_2 dans l'atmosphère. Il y a alors plus d'évaporation à la surface des océans ce qui crée plus de nuages dans le ciel. Les nuages réfléchissent la lumière du soleil dans l'espace et donc moins de chaleur solaire atteint le sol. L'augmentation initiale de la température de la Terre se traduit éventuellement par une diminution de sa température. Voyons une autre possibilité : il y a plus de gaz carbonique dans l'atmosphère. Les plantes se nourrissent de gaz carbonique. Elles poussent donc plus vite, consomment plus de ce gaz et le résultat net est que l'effet de serre se résorbe.

Les effets de rétroaction dans le système climatique sont extrêmement compliqués et les scientifiques ne les comprennent pas suffisamment bien pour jurer des prédictions de leurs modèles. Qui plus est, les effets de rétroaction peuvent mener à des situations où de nouveaux phénomènes font leur apparition. On atteint rapidement les limites de la science moderne.

Certaines industries, grands pollueurs, exploitent ces limites de nos connaissances pour réfuter les conséquences de l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère. Peut-être ont-elles raison. Changer leur façon de faire coûterait, à court terme, très cher (en dollars). Elles préfèrent risquer l'avenir de la planète à long terme plutôt que les revenus de leurs actionnaires à court terme.

Il est clair cependant que plus le climat changera rapidement, plus il sera difficile, même dans le cas le plus favorable de rétroaction négative, de le stabiliser et de le contrôler. Nous ne sommes pas assez intelligents pour tout prédire. Personne ne le niera. Il est très peu probable cependant que la somme de tout ce que nous ignorons va nous sauver. Peut-être pas ? Qui sait ? Mais sommes-nous prêts à gager notre vie là-dessus ?

Notre civilisation technologique est une menace pour elle-même. Partout dans le monde, les combustibles fossiles dégradent les conditions de santé, la vie des forêts, des lacs, des côtes et des océans et le climat. Personne, je pense, ne voulait faire ce mal.

Les dirigeants de l'industrie des combustibles fossiles voulaient simplement faire fructifier leurs investissements et celui de leurs actionnaires et fournir un produit en demande. Personne au départ ne pouvait prévoir les conséquences. Aujourd'hui on est en mesure, grâce à la science, de le faire. Et, fort heureusement, il n'est peut-être pas trop tard pour agir. Aucune nation, aucune génération, aucune industrie nous a mis, d'elle-même, dans cette situation et aucune nation, aucune génération et aucune industrie nous en sortira d'elle-même. Si nous voulons éviter des dommages irréparables à l'environnement, nous devons le faire ensemble et pour longtemps. Les principaux obstacles seront, bien sûr, l'inertie et la résistance aux changements, des changements majeurs et planétaires dans les systèmes industriels, économiques et politiques.

LES SOLUTIONS

Que pouvons-nous faire ? Le gaz carbonique que nous rejetons aujourd'hui dans l'atmosphère y restera pendant quelques décennies et les efforts que nous ferons pour réduire ces rejets ne seront récompensés que dans une génération.

Les États-Unis sont les plus grands producteurs de CO₂ au monde (Le Canada est toutefois le plus grand producteur de CO₂ par habitant au monde). Ils sont suivis par la Russie et la Communauté des États Indépendants et les pays en voie de développement. Viennent ensuite l'Europe de l'Ouest, la Chine et le Japon. Tous ces pays font face au

même problème de réchauffement de la planète et toutes mesures prises pour le contrer ne peuvent être efficaces que si elles sont prises collectivement.

Les dirigeants et les politiciens de ces nations devront cependant suivre un scénario qui ne leur est pas familier : prendre des décisions impopulaires à court terme, c'est à dire instaurer des mesures qui bouleverseront notre façon de faire au cours de leur mandat et attendre des retombées positives dans 20, 40 ou 100 ans, une époque où ils risquent de ne plus être au pouvoir ou même en vie. On doit être prudent de ne pas prendre des décisions qui risquent de coûter très cher, d'être dangereuses et d'entraîner peu ou pas de retombées souhaitables. Mais il serait encore plus irresponsable de nier le problème et de ne rien faire.

L'ingénieur qui conçoit un pont, un édifice, une voiture, un avion envisage toujours la possibilité d'une défaillance catastrophique. Dans ses calculs il en tient compte à l'aide de marges de sécurité. Ces marges gonflent inévitablement les coûts mais nous les acceptons car nous reconnaissons les conséquences graves de l'effondrement d'un édifice ou de l'écrasement d'un avion. L'ingénieur se plie à des normes de construction, à des critères de sécurité. Ne pas les suivre est une faute professionnelle très grave et les ignorer est criminel. Alors pourquoi n'instaurerions-nous pas une procédure semblable, aussi stricte et incontournable, à l'égard d'activités humaines dont les conséquences pour l'environnement (et la survie de l'espèce humaine) sont beaucoup plus sérieuses ?

Je souhaiterais faire ici quelques suggestions pratiques qui pourraient atténuer et, à la limite, éviter le problème du réchauffement de la planète. Bien entendu, je ne prétends pas connaître la solution miracle. Je m'inspire toutefois du consensus qui émane de la communauté scientifique internationale.

Le proverbe dit qu'un homme averti en vaut deux. Je pense qu'il en va ainsi pour l'environnement. Plus nous repousserons les limites de nos connaissances à propos de la biosphère, plus nous serons en mesure de la protéger, de nous protéger. Pour ce faire, il est donc indispensable de poursuivre et même d'intensifier les observations du soleil, de l'atmosphère, des nuages, des terres et des océans à partir de stations terrestres ou spatiales en recourant à une panoplie grandissante de systèmes de détection et de mesures. Pour la première fois de notre histoire, nous avons les outils pour observer la pollution régionale et ses effets, pour mesurer la déforestation et la progression de la désertification, pour suivre les changements des calottes polaires et des glaciers, pour jauger le niveau des océans, pour examiner la chimie de la couche d'ozone, pour observer la dispersion de cendres volcaniques et ses effets sur le climat et pour estimer la grandeur du rayonnement solaire incident sur la Terre.

Quand des gaz à effet de serre sont rejetés dans l'atmosphère, le climat terrestre ne réagit pas instantanément. On estime que les deux tiers des effets sont ressentis au bout d'un siècle seulement. Alors même si on cessait aujourd'hui toutes émissions de CO₂ dans l'atmosphère, l'effet de serre continuerait de croître jusqu'à la fin du 21^e

siècle. Voilà la raison principale pour laquelle on ne peut pas se permettre d'ignorer le problème, d'espérer qu'il disparaisse naturellement et d'attendre pour réagir.

De 1973 à 1979, une crise mondiale du pétrole a sévi. Au cours de ces quelques années, le prix de l'essence à la pompe a quadruplé. Comme société, nous nous sommes ajustés avec une rapidité foudroyante : on a accru les taxes pour réduire la consommation, construit des plus petites voitures et abaissé les limites de vitesse. Aujourd'hui, tout est revenu à la « normale ». Le pétrole coule à flot, les taxes ont relativement baissé, les voitures grossissent et les limites de vitesses sont plus élevées.

Pour éviter que l'effet de serre prenne des proportions incontrôlables au 21^e siècle, il faudrait que le monde entier coupe sa consommation de combustibles fossiles de moitié. Bien sûr, à court terme, nous sommes prisonniers des combustibles fossiles. Le Canada et les États-Unis comptent 5 % de la population de la planète et consomment près de 25 % de l'énergie mondiale. Leurs automobiles sont responsables du tiers de leurs rejets de CO₂ dans l'atmosphère. Chaque année, la voiture nord-américaine moyenne rejette plus que son propre poids en CO₂ dans l'atmosphère. Pourquoi se contente-t-on d'une voiture qui consomme 10 litres aux 100 kilomètres ? Une voiture qui consomme 5 litres aux 100 kilomètres rejette en bout de ligne deux fois moins de CO₂ dans l'atmosphère. Concevoir une telle voiture est un défi que l'ingénieur est, à l'heure actuelle, parfaitement capable de relever. Il peut même faire mieux. En fait le véritable défi n'est pas technologique mais plutôt social et politique. Plus le niveau

d'éducation scientifique de la société s'élèvera, plus nombreux nous serons à comprendre les enjeux planétaires de la pollution et la classe politique n'aura d'autre choix que de voter des lois qui favoriseront la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En ce sens, je crois que nous sommes sur la bonne voie. À la conférence de Kyoto en décembre 1997, le Canada s'est engagé à réduire entre 2008 et 2012, les émissions de gaz à effet de serre de six pour cent par rapport aux niveaux de 1990.

D'autre part, la conception de nouvelles voitures moins gloutonnes, moins polluantes, plus sécuritaires et plus propres, va engendrer de nouvelles technologies qui profiteront économiquement aux nations qui auront su se donner l'avantage technologique. N'y a-t-il pas là la trame d'un discours politique séduisant : sauvons l'environnement tout en créant des emplois dans la haute technologie.

La voiture électrique est une alternative attrayante à la voiture à combustion. Elle n'émet aucun gaz à effet de serre. À l'heure actuelle, les meilleurs véhicules électriques ont quelques centaines de kilomètres d'autonomie et leurs performances sont comparables à la voiture traditionnelle. Le problème majeur de la voiture électrique demeure toutefois le stockage de l'énergie. La voiture électrique ne sera pas inoffensive pour l'environnement tant et aussi longtemps que des batteries plomb-acide seront utilisées. Le plomb est un poison mortel. Et une voiture électrique en transporte quelques centaines de kilogrammes. Il faut ajouter, de plus, qu'un kilogramme de batteries plomb-acide débite à 38 Wh (0.14 MJ) alors qu'un kilogramme d'essence

fournit 13 000 Wh (46.8 MJ) soit 340 fois plus d'énergie. Une étude récente de l'American Association for the Advancement of Science a révélé que les voitures électriques (modèles 1998) munies de batteries plomb-acide rejettent 60 fois plus de plomb par kilomètre parcouru que les anciennes voitures consommant de l'essence au plomb ! Et même en améliorant la technologie des batteries plomb-acide et en resserrant les mesures de contrôle, la production et le recyclage de ces batteries rejettent toujours dans l'environnement des quantités inacceptables de plomb. La présente alternative à ces batteries sont les batteries nickel-cadmium . Malheureusement, ces batteries sont beaucoup plus dispendieuses et le nickel et le cadmium sont aussi des métaux hautement toxiques.

D'autre part, il ne faudrait surtout pas recharger les batteries de la voiture électrique avec de l'électricité générée par une centrale thermique. Aux États-Unis, la moitié de l'électricité est produite par des centrales aux combustibles fossiles. En Alberta, c'est la presque totalité. Dans ces conditions, la voiture électrique ne serait pas d'un grand secours pour s'affranchir des combustibles fossiles et pour résorber le problème d'émission de CO₂.

Contrairement aux réactions chimiques de combustion qui libèrent l'énergie prisonnière de l'atome, les réactions nucléaires libèrent la formidable énergie prisonnière du noyau sans rejeter de gaz à effet de serre (une réaction nucléaire libère approximativement 100 000 fois plus d'énergie qu'une réaction chimique). Depuis les

années 50, des réacteurs nucléaires à fission produisent de l'électricité. En brisant des noyaux lourds tels l'Uranium-235 des particules sont éjectées. En étant ralenties, ces particules dégagent de la chaleur qui fait bouillir de l'eau alimentant ainsi une turbine qui entraîne une génératrice d'électricité. Dans les années 60, l'énergie nucléaire était perçue comme la source d'énergie de l'avenir. C'était l'âge d'or de l'industrie nucléaire. Puis il y eût l'incident de la centrale de Three Mile Island et la catastrophe de Chernobyl. Ce dernier accident nous rappela que des produits radioactifs mortels peuvent s'échapper des réacteurs nucléaires actuels.

Certaines nations, pauvres en ressources hydrauliques et en combustibles fossiles, se sont engagées dans des programmes nucléaires ambitieux afin de s'assurer une certaine indépendance énergétique. C'est le cas notamment de la France et du Japon. En Ontario, la province la plus riche et la plus industrialisée au Canada, 70 % de l'électricité est produite par une vingtaine de réacteurs nucléaires CANDU.

À long terme, on continuera de produire de l'électricité à partir de la fission nucléaire. Toutefois, l'industrie nucléaire ne pourra jamais faire oublier son effroyable naissance dans le désert du Nouveau-Mexique en 1945.

Outre la fission, la fusion constitue également une source d'énergie nucléaire formidable. En fusionnant des atomes légers d'hydrogène, contenus dans les réservoirs inépuisables d'eau sur la planète, on libère de l'énergie et les produits de réaction sont

inoffensifs. En principe, cette forme d'énergie, qui fait briller toutes les étoiles dans notre univers, est la solution. En pratique, il en va tout autrement. Excepté dans les bombes thermonucléaires et dans des laboratoires spécialisés, on n'a pas réussi à exploiter ce phénomène sur Terre. Nous n'avons pas encore inventé la technologie pour maîtriser la fusion nucléaire et on ne prévoit pas, dans les scénarios les plus optimistes, l'exploiter commercialement avant plusieurs décennies. De toute façon, nous ne pouvons pas attendre quelques décennies et si un jour cette technologie est disponible, je doute qu'on puisse la transférer rapidement aux pays en voie de développement. D'ailleurs, les pays en voie de développement sont particulièrement vulnérables au réchauffement de la planète. Ils sont moins aptes à s'adapter à de nouveaux climats, à adopter de nouvelles cultures, à s'adonner au reboisement systématique, à construire des digues et des réseaux d'irrigation, à faire face à des sécheresses plus fréquentes et plus longues. Et, en même temps, ils dépendent fortement des combustibles fossiles. Quoi de plus naturel pour la Chine, qui possède la 2^e plus grande réserve de charbon au monde, que de dépendre de ses combustibles fossiles dans sa phase actuelle d'industrialisation exponentielle. Et comment des pays riches comme le Canada, les États-Unis, le Japon et ceux de l'Europe de l'Ouest peuvent-ils demander à la Chine de restreindre sa consommation de charbon et d'huile quand ces mêmes pays ne se sont pas privés lors de leur industrialisation ? Il est clair que les pays en voie de développement ont besoin d'une source d'énergie alternative aux combustibles fossiles qui ne soit ni dispendieuse ni de haute technologie.

Alors si ce n'est les combustibles fossiles, la fission, la fusion ou une toute nouvelle technologie qui n'a pas encore été inventée, que reste-t-il ?

Une anecdote : pendant son mandat, de 1977 à 1980, le président Jimmy Carter fit installer sur le toit de la Maison Blanche des capteurs solaires pour l'alimenter en eau chaude. C'était l'époque de la crise du pétrole. Dès qu'il accéda à la présidence des États-Unis en janvier 1980, son successeur, Ronald Reagan, fit enlever ce dispositif. Geste symbolique annonçant que les énergies renouvelables ce n'était plus pour l'Amérique. Pendant les douze années qui suivirent, les crédits fédéraux accordés à la recherche et au développement d'énergies renouvelables furent coupés de 90 %. Le Canada ne fit guère mieux en suivant une politique semblable. Douze années perdues à cause de l'ignorance et de l'illettrisme scientifique de chefs d'état et de leur administration.

Il me semble évident que nous devrions, comme habitants de la planète Terre, développer et soutenir toutes les activités scientifiques et technologiques visant à convertir directement ou indirectement l'énergie solaire en électricité. Chaque année, la surface de la planète reçoit environ dix fois plus d'énergie du soleil qu'il y en a dans l'ensemble de toutes les réserves connues de charbon, de pétrole, de gaz naturel et d'uranium ! Cette énergie représente 15 000 fois la consommation annuelle du monde entier. L'énergie solaire est inépuisable et disponible partout sur la Terre. Et l'énergie solaire ne génère ni gaz à effet de serre, ni rejets radioactifs.

La technologie solaire vraisemblablement la plus courante (et le Québec est choyé en ce sens) est l'hydroélectricité. L'eau, évaporée par la chaleur solaire, tombe en pluie dans de vastes réservoirs en amont des rivières. En les descendant, elle cède son énergie potentielle à des turbines qui entraînent des génératrices d'électricité. Mais le nombre de rivières est limité sur la planète, et dans plusieurs pays, elles ne peuvent répondre à la demande.

L'énergie solaire pourrait être utilisée pour produire, par électrolyse de l'eau, de l'hydrogène qui alimenterait les véhicules automobiles. Lorsque brûlé, l'hydrogène se combine à l'oxygène pour donner de l'eau. On peut imaginer l'intérêt que représente une telle technologie pour une province comme le Québec qui dispose de surplus d'électricité. Et aussi pour les pays désertiques. De vastes panneaux de cellules photovoltaïques, semblables à ceux qui alimentent les satellites, pourraient être déployés sur des centaines de kilomètres carrés de désert.

L'énergie éolienne et la conversion de la biomasse sont deux autres formes d'énergie solaire qui méritent d'être supportées. 7 500 éoliennes installées à Alamont en Californie produisent sans arrêt depuis plusieurs années de l'électricité qui est écoulee sur le réseau de la compagnie de gaz et d'électricité du Pacifique. À l'heure actuelle, au Québec, l'énergie éolienne connaît un regain de popularité en particulier pour alimenter des régions isolées comme les Îles-de-la-Madeleine.

Je ne prétends pas que la conversion photovoltaïque, l'énergie éolienne, la conversion de la biomasse ou la production d'hydrogène vont supplanter à court terme les combustibles fossiles. Certaines activités industrielles nécessitent de grandes quantités d'énergie à haute température. J'imagine difficilement, par exemple, une fonderie ou une usine de production d'aluminium fonctionnant à l'énergie photovoltaïque. Par contre, si nous réussissons à réduire notre dépendance à l'égard des combustibles fossiles de moitié, nous aurons fait un grand pas en vue de sauvegarder notre environnement.

Et quels seront les coûts de ces nouvelles technologies ? Quand on considère qu'il en va de la survie de l'espèce humaine, je pense que cette question n'a aucun sens. Mettons tout de même, en perspective, le coût réel des combustibles fossiles. Présentement, en 1998, le prix du baril de pétrole dans les marchés internationaux est d'environ 20 \$ US. Ce prix ne prend pas en compte toutefois l'aide internationale considérable apportée aux pays producteurs de pétrole, ni les forces militaires déployées pour protéger leurs réserves (y compris la coûteuse guerre du golfe en 1991). Sinon on estime que le prix du baril grimperait à 80 \$ US. Ajoutons maintenant les dommages causés à l'environnement comme les déversements accidentels réguliers en mer (qui ne se souvient pas de l'accident de L'Exxon Valdez par exemple) et les rejets de polluants atmosphériques (gaz carboniques, oxydes d'azote, etc.) et le prix du baril de pétrole se

chiffre à quelques centaines de dollars américains ! Comme quoi, le prix est une notion très relative.

J'ai discuté, jusqu'à présent, de moyens pour réduire l'émission de CO₂ dans l'atmosphère. Mais une fois qu'il se trouve dans l'atmosphère, que pouvons-nous faire pour s'en départir et prévenir l'effet de serre ? Le seul moyen qui m'apparaît sûr, fiable et simple est de planter des arbres. Faire pousser des arbres réduit la quantité de CO₂ dans l'air. Aucun système de filtration conçu par l'homme n'est plus efficace qu'un arbre. Mais lorsqu'il a atteint sa pleine maturité, quoi de plus ridicule alors que de le couper et de le faire brûler pour se chauffer. Au Québec, un arbre met d'un demi à un siècle à atteindre sa pleine maturité. Et c'est au Québec que le prix de l'électricité est le plus bas au monde. Alors si ce n'est pour une urgence comme la tempête de verglas de l'hiver 98, pourquoi persister à se chauffer au bois ? Il est moins dommageable de couper un arbre et de le laisser pourrir sur place que de le brûler. On estime qu'il faudrait reboiser une superficie équivalente à celle du Canada tout entier (dix millions de km²) pour qu'un effet bénéfique durable soit ressenti à l'échelle de la planète. Malheureusement, au moment d'écrire ces lignes, l'homme détruit toujours sur la Terre **un acre de forêt à chaque seconde.**

N'importe qui peut planter un arbre. J'en ai planté et chaque fois je ne peux m'empêcher de penser qu'il me survivra et qu'il survivra à mes enfants. C'est un beau geste, un geste durable. L'industrie aussi peut planter des arbres. Particulièrement les

industries polluantes. Pourquoi, par exemple, les grandes pétrolières ne planteraient-elles pas un arbre pour chaque baril de pétrole vendu ? Pourquoi l'industrie métallurgique ne planterait-elle pas un arbre pour chaque lingot produit ? Et pourquoi à Noël ne planterions-nous pas un arbre plutôt que de le couper ?

En exhumant et en brûlant les corps d'espèces végétales qui poussaient sur la Terre il y a quelques centaines de millions d'années, nous nous sommes mis en danger. On peut réduire ce danger en améliorant la façon dont nous les brûlons, en investissant dans des technologies alternatives et en plantant de leurs descendants, les arbres. Les retombées bénéfiques de ces actions sont indiscutables : la purification de l'air, le ralentissement de l'extinction d'espèces animales et végétales, la réduction voire même l'élimination de déversements accidentels de pétrole, l'émergence de nouvelles technologies durables, la création d'emplois, la génération de nouveaux investissements, le renforcement de l'indépendance énergétique des nations, la soustraction des générations futures aux conséquences désastreuses de la pollution atmosphérique et la conversion de l'industrie militaire destructive à l'industrie civile constructive.

Malgré la résistance opiniâtre des grands producteurs et des grands utilisateurs de combustibles fossiles, en particulier l'OPEP, un pilier de l'économie mondiale reconnaît l'urgence de la situation et joue de plus en plus un rôle de leader dans l'instauration de

mesures pour contrer la pollution atmosphérique. Cet allié, inespéré mais ô combien puissant, sont les compagnies d'assurances. En effet, selon le président de l'association des compagnies d'assurances américaines, les tempêtes violentes, les inondations, les sécheresses et toutes autres perturbations climatiques engendrées par l'effet de serre risquent de ruiner cette industrie ! Six des dix pires désastres naturels de l'histoire qui se sont produits au cours des dix dernières années lui ont coûté des dizaines de milliards de dollars américains. Le résultat est que les compagnies font pression auprès des gouvernements du monde entier et des industries polluantes pour adopter des mesures conduisant à la réduction des émissions de CO₂. Elles vont même jusqu'à subventionner des études et des travaux de recherche sur la pollution atmosphérique !

Les molécules de CO₂ sont démunies d'intelligence : elles ne peuvent concevoir l'idée de souveraineté nationale. Elles sont simplement transportées par le vent. Émises dans un pays, elles se retrouvent rapidement dans un autre. L'atmosphère de la planète est leur réservoir. Peu importe leur régime politique, leur culture, leur religion, leur langue, les nations du monde entier devront travailler de concert. Autrement, il ne peut y avoir de solution viable et durable au problème du réchauffement de la planète. Qu'on le veuille ou non, nous sommes tous à bord du même vaisseau spatial. Tout progrès technologique comporte des risques. S'il est mené aveuglément, il devient dangereux. Mais il est en notre pouvoir de dicter son développement, de l'aiguiller en vue du bien être des habitants de la planète. Plus que n'importe quel traité, je pense que les problèmes d'effet de serre et d'amincissement de la couche d'ozone vont contribuer

à la paix mondiale. Face à ces redoutables ennemis communs, les nations seront forcées, au cours du 21^e siècle, de se rapprocher. L'espèce humaine prévaudra enfin, peut-être, sur la race et la nationalité.

LE 20^E SIÈCLE

Chapitre 3

On se souviendra du 20^e siècle pour trois grandes innovations : pour le développement de moyens sans précédent pour sauver, pour prolonger et pour améliorer la vie ; pour détruire la vie, y compris, pour la première fois, d'éliminer l'espèce humaine entière ; et enfin, pour l'atteinte d'un niveau de connaissance sans précédent de la nature et de l'univers. C'est trois innovations sont le produit de la science et de la technologie, une arme à deux tranchants.

LA VIE

Jusqu'à ce qu'il invente l'agriculture et qu'il domestique les animaux, il y a environ dix mille ans, l'homme vivait de la cueillette de fruits et de légumes sauvages et de la chasse. Les ressources étaient à ce point dispersées que la Terre, à cette époque, n'aurait pu soutenir plus de 10 millions d'habitants. À l'opposé, à la fin du 20^e siècle, nous serons six milliards sur cette planète ce qui signifie que 99,9 % d'entre nous devons notre vie à l'agriculture et à la science et à la technologie qui l'ont développée : la génétique végétale et animale, les fertilisants, les herbicides, les insecticides, les agents de conservation, la charrue, les systèmes d'irrigation, de semence, de récolte et d'entreposage, la réfrigération et le transport.

Les mesures d'hygiène et de santé publique, les systèmes de filtration et de traitement des eaux, l'émergence de la théorie des germes, les antibiotiques, les médicaments et autres produits pharmaceutiques, la biologie moléculaire et la génétique ainsi que la science médicale ont contribué de façon spectaculaire à améliorer la vie et

le bien-être des habitants de la planète, en particulier, ceux des pays en voie de développement. La petite vérole a été éradiquée et chaque année le nombre de terres infestées par la malaria diminue. Des maladies redoutables dans mon enfance, comme la polio et la tuberculose, sont aujourd'hui presque disparues dans les pays développés. Au 20^e siècle, on a mis au point des méthodes de contrôle des naissances qui, pour la première fois, permettent aux femmes de contrôler leur pouvoir de procréer et favorisent l'émancipation de la moitié de l'espèce humaine. Ces moyens permettent de réduire la surpopulation sans recourir à des mesures oppressives.

Il est vrai aussi que des composés chimiques et certains rayonnements produits par la technologie ont engendré de nouvelles maladies. On estime que la cigarette tue trois millions de personnes chaque année et, selon l'Organisation mondiale de la santé on prévoit qu'en l'an 2020, elle sera responsable de la mort de dix millions d'individus annuellement.

Mais la science et la technologie ont donné beaucoup plus qu'elles n'ont pris. En 1901, l'espérance de vie en Amérique était de 45 ans alors qu'aujourd'hui elle est de 80 ans. L'espérance de vie est probablement l'indice le plus crédible pour mesurer la qualité de vie. Une fois décédé, la qualité de vie importe peu. Ceci dit, il y a toujours un milliard de personnes qui sont sous alimentées dans les pays en voie de développement, quelques centaines de millions d'obèses suralimentés dans les pays riches et 40 000 enfants meurent chaque jour faute de conditions de vie minimales.

La radio, la télévision, le magnétoscope, le disque compact, le téléphone, le télécopieur, l'informatique et ses réseaux, bref la technologie de l'information ont changé profondément la culture populaire. Des entreprises sur Internet, sans appartenance à aucun pays, échappent à tout contrôle fiscal et légal. En même temps, toutefois, des massacres régionaux sont évités grâce à la présence obstinée des caméras de télévision qui diffusent ces images gênantes dans le monde entier.

Du trombone, la bande élastique, le séchoir à cheveux, le stylo à bille, l'ordinateur, le dictaphone, le photocopieur, le robot culinaire, le four à micro-ondes, l'aspirateur, le lave-vaisselle, la lessiveuse et la sècheuse à linge automatique et l'éclairage artificiel à l'automobile, l'avion, la centrale hydroélectrique ou nucléaire, la machine outil ou la moissonneuse-batteuse, la technologie du 20^e siècle nous a affranchi du travail abrutissant, épuisant et dangereux, a créé plus de temps libre et a amélioré la vie de plusieurs d'entre nous.

Et pourtant, les pays riches comme le Canada sont aussi aux prises avec des problèmes sociaux grandissants. Le chômage, l'éclatement des familles, l'irresponsabilité collective, la tricherie, l'ingérence et l'appétit des gouvernements semblent croître. L'écart entre les riches et les pauvres s'élargit et la classe moyenne disparaît peu à peu. Faute de main d'œuvre spécialisée, certaines entreprises de haute technologie (celles offrant les meilleures conditions et les salaires les plus élevés)

préfèrent s'établir ailleurs qu'au Québec. Au 20^e siècle, le Canada a su exploiter ses ressources naturelles pour s'enrichir. Au 21^e siècle, il devra tirer partie de la transformation de ses ressources naturelles en produits de valeur ajoutée s'il veut maintenir la qualité de vie de ses habitants. Pour ce faire il devra compter sur une main d'œuvre qualifiée. Or, cette main d'œuvre devra parvenir d'une population éduquée scientifiquement. Saurons-nous relever ce défi ?

LA GUERRE

Au 20^e siècle, les moyens de faire la guerre, de tuer massivement et d'annihiler des peuples entiers ont atteint des sommets inégalés. En 1901, il n'y avait pas d'avions de chasse ni de missiles et les canons les plus puissants ne pouvaient tirer un obus qu'à quelques kilomètres seulement. En 1990, 70 000 ogives nucléaires s'accumulaient sur Terre. Plusieurs d'entre elles sont montées sur des fusées prêtes à être lancées de silos ou de sous-marins et peuvent atteindre, avec une précision implacable, n'importe quel point sur la planète. Chacune de ces ogives peut détruire une ville entière entraînant la mort de centaines de milliers de personnes. Depuis l'effondrement du mur de Berlin, on procède au démantèlement de ces engins diaboliques mais l'arme nucléaire ne disparaîtra jamais de la surface de la Terre. Du moins tant qu'il y aura des hommes. D'autres armes aussi dangereuses et meurtrières sont également en circulation. Il s'agit des armes chimiques et biologiques et des mines antipersonnel. Dans ce siècle marqué par le fanatisme, le fascisme et le despotisme, cette formidable accumulation d'armes meurtrières n'est pas rassurante pour l'avenir. Plus de 150 millions d'humains furent

tués dans des guerres et des purges au cours du 20^e siècle. La technologie militaire est devenue si puissante qu'elle peut, volontairement ou par inadvertance, changer l'environnement sur la planète et menacer la survie de plusieurs espèces y compris la nôtre. Dans un livre écrit pendant les années où Ronald Reagan atteignit le sommet de son arrogance à l'égard de l'ex Union Soviétique, Jonathan Schell a décrit le scénario et les conséquences d'un conflit nucléaire mondial. Après plusieurs années, seuls des insectes résistants au froid et au rayonnement nucléaire intense survivraient. D'où le titre glacial de son livre : « Une république d'insectes ». Quelle fin pathétique à une histoire s'échelonnant sur 15 milliards d'années.

Au 20^e siècle, aucun endroit sur la Terre n'a échappé à l'ethnocentrisme et à la xénophobie. Des tentatives systématiques d'éliminer des populations ont été faites. Les plus connues sont l'Allemagne Nazie et plus récemment, le Rwanda et l'ancienne Yougoslavie. Bien sûr, dans les siècles précédents, de telles guerres ont eu lieu. Mais jamais avec les moyens dont on dispose au 20^e siècle. Les fours crématoires des camps d'extermination Nazis ont été conçus et optimisés par des ingénieurs très compétents. Les bombardements stratégiques ou les tirs d'artillerie à longue portée ont l'avantage d'éviter le face à face entre les combattants. On ne voit plus la souffrance, la mort et la misère que l'on inflige à l'ennemi. On ne voit que des consoles et des écrans radar. Le militaire n'a plus d'hésitation ou de problèmes de conscience. À la fin du 20^e siècle, le budget militaire annuel mondial est de plus d'un trillion de dollars (10¹²). Ça représente environ 140 000 dollars annuellement par famille canadienne.

Le 20^e siècle a été marqué par l'effondrement de monarchies et d'empires et l'émergence de démocraties et de dictatures idéologiques et militaires. Thomas Jefferson pensait que la démocratie n'était possible que si le peuple était éduqué. Quel visionnaire. Plus que jamais il a raison. Peu importe les lois constitutionnelles qu'on se donne, il y aura toujours au pouvoir des individus soumis à la tentation de déjouer la volonté collective et de servir leurs propres intérêts. L'antidote à une telle pratique est une opposition éclairée, le débat des idées, une population instruite, renseignée, sceptique et critique. Les mêmes éléments sur lesquels repose la méthode scientifique.

LA SCIENCE

Toutes les branches de la science ont fait un bond considérable au 20^e siècle. Un scientifique mort au 16^e siècle et ressuscité 100 ans plus tard aurait pu se remettre à jour sans trop de difficulté et poursuivre ses travaux. Mais un scientifique du 19^e siècle transporté à la fin du 20^e siècle ne s'y reconnaîtrait plus du tout. Lord Kelvin, un des plus célèbres physiciens du 19^e siècle, déclarait à la fin de sa carrière qu'il n'y avait plus rien à découvrir en physique. Pourtant, au 20^e siècle on découvrit deux nouvelles forces de la nature, l'interaction faible (radioactivité) et l'interaction forte (nucléaire). On connaît quatre forces dans l'univers : la gravité découverte au 17^e siècle, l'électromagnétisme découverte au 19^e siècle et les interactions faible et forte, découvertes au 20^e siècle. La physique a été bouleversée par la théorie atomique, la théorie de la relativité restreinte et générale et la mécanique quantique. On a découvert

la fission, la fusion et une multitude de nouvelles particules atomiques dans les accélérateurs. La compréhension de la désintégration radioactive nous a permis d'établir l'âge de la Terre (4,6 milliards d'années) et l'origine de la vie (4 milliards d'années).

En géophysique, on a découvert la dérive des continents nous permettant de comprendre la nature et l'histoire de la formation du relief terrestre et la topographie des fonds marins. La séismologie a déterminé comment la planète est faite à l'intérieur (croûte, manteau et noyau) contribuant à expliquer la formation de la Terre. L'extinction massive d'espèces animales dans le passé peut maintenant être reliée à des expulsions cataclysmiques de lave du manteau terrestre ou à l'impact d'astéroïdes.

Au 20^e siècle, on a découvert la nature et la fonction de l'acide désoxyribonucléique (ADN) une molécule charnière responsable de l'hérédité chez toutes les espèces vivantes. On est capable aujourd'hui de lire le code génétique d'un nombre croissant d'organismes vivants et les généticiens sont en train d'établir le génome humain, une réalisation dont le potentiel pour faire du bien ou du mal est immense. Ce plan détaillé de la génétique humaine permettra d'éliminer à jamais de terribles maladies héréditaires. Il permettra également de cloner des êtres humains... Je pense que l'aspect le plus significatif de la découverte de la fonction de l'ADN est qu'il nous a permis de comprendre les processus fondamentaux de la vie en termes de physique et de chimie. Il n'y a pas (il n'y a plus) de « force vitale », de « champs

d'énergie », d' « esprit » ou d' « âme » qui doivent intervenir pour donner la vie. De même, en neurophysiologie, on commence à comprendre que ce que l'on désigne par « esprit » est en fait la manifestation du fonctionnement de centaines de trillions (10^{14}) de connections du cerveau plus quelques composés chimiques simples.

La biologie moléculaire nous permet maintenant de comparer gène à gène deux espèces vivantes et d'établir leur degré de relation. Ces expériences ont montré, hors de tout doute, la grande similitude entre tous les êtres vivants sur Terre, appuyant les observations de la théorie de l'évolution. Nous partageons avec le chimpanzé 99,6 % des gènes, confirmant la thèse selon laquelle nous avons un ancêtre commun.

Plusieurs des découvertes les plus spectaculaires en chimie sont reliées à la biologie. Placé dans un cadre plus large, la chimie est la science qui étudie l'association des atomes entre eux. Les forces qui lient ces atomes sont aujourd'hui expliquées grâce à la mécanique quantique. La biologie est de plus en plus assimilée à la chimie et la chimie de plus en plus assimilée à la physique.

En recourant à la physique et à la chimie, couplées à des ordinateurs puissants, on arrive à faire des prédictions météorologiques et climatiques. Ces prédictions permettent de sauver des milliers de vies, de protéger des milliers de km^2 de récoltes et d'évaluer les conséquences de la pollution atmosphérique à long terme.

Au début du 20^e siècle, les astronomes observaient les étoiles dans le visible du fond d'un océan d'air turbulent. À la fin de ce siècle, ils scrutent l'univers avec des télescopes placés en orbite et sensibles aux rayons gamma, aux rayons X, aux rayons ultraviolets, aux rayons visibles, aux rayons infrarouges et aux ondes radio.

En 1901, Marconi établit la première communication radio au-dessus de l'océan Atlantique. Aujourd'hui, on est en contact radio avec quatre vaisseaux spatiaux au-delà du système solaire, on est à l'écoute de quasars situés à 10 milliards d'années lumières de la Terre et on capte le rayonnement fossile qui témoigne de la naissance de l'univers.

Des vaisseaux spatiaux ont été lancés vers 70 nouveaux mondes et ont atterri sur trois d'entre eux. Douze hommes ont marché sur la lune et ont rapporté des centaines de kilogrammes de roches contribuant à expliquer l'origine et la formation du système solaire. Des robots ont mesuré, sur la planète Vénus, des températures de 450° C et des pressions de près de 100 atmosphères mettant ainsi en évidence l'effet de serre extrême. Ils ont permis de découvrir qu'il y a 4 milliards d'années le climat de la planète Mars était semblable à celui de la Terre à cette même époque et ont montré qu'il pleut des molécules organiques à la surface de Triton, le plus gros satellite de Saturne. Ils ont permis également d'estimer que le quart de la masse des comètes est constituée vraisemblablement de matières organiques.

Au début du 20^e siècle, on pensait que la voie lactée était la seule galaxie dans l'univers. Aujourd'hui, on estime qu'il y en a plus de 100 milliards. On pensait que l'univers avait toujours existé et qu'il était statique. À la fin du 20^e siècle, on calcule que l'univers a environ 15 milliards d'années et qu'il est en pleine expansion. On a découvert des mondes fantastiques comme les pulsars, les quasars et les trous noirs. La science a dépassé la fiction. À l'aube du 21^e siècle, l'homme peut, grâce à ses observations, entrevoir, pour la première fois de son histoire, des éléments de réponse aux questions les plus profondes qu'il s'est toujours posées à propos de l'origine, de la nature et du destin de l'univers. La science du 20^e siècle a renversé des croyances séculaires. L'univers anthropocentrique et statique a cédé sa place à un univers immense, violent et froid dans lequel l'homme joue un rôle effacé. Mais c'est un univers intrigant, magnifique et élégant bien au-delà de ce que nos ancêtres auraient pu imaginer. On découvre que l'évolution de cet univers peut être décrite par des lois fondamentales de la physique. Certains, au contraire, y voient l'œuvre de Dieu. Personnellement, je suis de ceux qui trouvent qu'il est tellement plus fascinant de comprendre l'univers tel qu'il est plutôt que le dépeindre tel que nous souhaiterions qu'il soit.

...ET LE 21^E SIÈCLE

Chapitre 4

Prédire ce que la science nous apportera au 21^e siècle est impossible. On peut toujours espérer des découvertes telles une cure définitive pour des maladies génétiques, le cancer ou le SIDA ou la découverte d'une civilisation extraterrestre. Mais on ne peut prévoir de telles découvertes scientifiques. Au mieux, on peut extrapoler la technologie du 20^e siècle. Et c'est ce que je vais tenter de faire dans ce chapitre. Je réalise que c'est un pari téméraire. Il y a 50 ans, à peine, on imaginait le monde de l'an 2000 avec ses robots, ses voitures volantes, ses colonies spatiales, ses bases lunaires, ses villes sous-marines, ses vêtements de papier jetables, bref un monde sans maladie où la semaine de travail ne serait que de vingt heures. Que s'est-il passé ?

Je pense que les « futurologues » sérieux surestiment, en général, les succès de la technologie à court terme et les sous-estiment à long terme. Dans les années 50 et 60, le chercheurs informaticiens travaillant dans le domaine de l'intelligence artificielle prévoyaient, qu'à la fin du siècle, ils auraient réussi à créer une machine simulant le fonctionnement du cerveau humain. Aujourd'hui, ils sont plus humbles et l'intelligence artificielle a cédé sa place aux systèmes experts.

Dans les années septante, les ingénieurs envisageaient la construction d'un cœur artificiel autonome. Après tout, le cœur n'est qu'une pompe. Vingt ans plus tard cet objectif semble, plus que jamais, inaccessible. Construire une pompe infaillible compatible avec les tissus vivants et circulant un fluide aussi complexe que le sang demeure un rêve insaisissable.

Une bonne technologie est par définition utile. Elle doit pouvoir survivre aux forces du marché, aux conditions sociales et économiques, et aux politiques gouvernementales. Et puis, elle doit être de son temps. L'avion supersonique concorde et le réacteur atomique superphoenix sont de grandes réalisations techniques soutenues, il faut bien le dire, par le prestige national français. Mais elles ne sont pas viables économiquement. Du moins à la fin du 20^e siècle.

Pour survivre, une technologie doit non seulement bien fonctionner mais en plus être compétitive. Au début des années quatre-vingt, on prévoyait automatiser la plupart des entreprises manufacturières. Des robots délogeaient les hommes dans les chaînes de montage. Cette transformation connut du succès dans la grande industrie de l'automobile. Toutefois, dans la plupart des entreprises, on se rendit compte qu'il était plus économique de mettre à jour certains équipements et d'assurer une formation continue au personnel.

Une des retombées commerciales du programme spatial est le développement de nouvelles technologies manufacturières. En théorie, dans des conditions d'apesanteur, il devrait être possible de fabriquer de nouveaux matériaux ou de nouveaux composés chimiques exempts des imperfections dues à la gravité. Pourtant les coûts liés aux missions orbitales sont toujours astronomiques (sans jeu de mots) et ceux liés à la construction d'usines spatiales et du transport des matériaux dans l'espace le seront

davantage. De plus, les technologies terrestres ne cessent de progresser justifiant de moins en moins la construction d'usines spatiales.

Les décisions et les politiques gouvernementales peuvent aussi influencer le développement de nouvelles technologies. Les disputes internationales à propos du droit de propriété des fonds marins ont fait avorter tous les projets d'exploitation minière sous-marine.

Parfois aussi, une technologie ne prend pas son essor tant qu'une autre technologie ne la met pas en perspective. Les disques compacts au laser n'étaient pas très répandus jusqu'à ce que les programmes d'ordinateur, particulièrement ceux avec sons et images, deviennent trop gros pour être stockés économiquement sur disquettes.

Il y a de ces technologies qui connaissent des succès inespérés, au-delà de toutes prédictions même les plus audacieuses. Inventé en 1947 dans les laboratoires de la compagnie Bell aux États-Unis, le transistor n'était qu'un dispositif pour amplifier le signal radio et fut utilisé plus tard pour remplacer les lampes à vide. Mais le transistor est beaucoup plus petit que la lampe à vide (quelques ordres de grandeur), il dégage beaucoup moins de chaleur et peut être produit massivement. Le résultat est stupéfiant : des dispositifs électroniques peuvent aujourd'hui contenir des millions de transistors. On rapporte, dans la revue Time Magazine du mois de décembre 1997, qui rend hommage à cette fabuleuse invention, qu'on en fabrique, chaque mois dans le monde,

un demi million... par habitant sur la planète. Sans le transistor, l'ordinateur n'existerait pas. La construction d'un ordinateur moderne avec des lampes à vide serait impossible. Non seulement ses grandes dimensions le rendraient trop lent, mais en plus, il consommerait l'électricité produite par une centrale, et la chaleur dégagée ferait fondre ses composantes.

Dans un article publié en 1946, la revue Popular Mechanics fait l'éloge du tout premier ordinateur électronique inventé récemment. On rapporte que cette machine à calculer, appelée ENIAC, est munie de 18 000 lampes à vide et pèse 30 tonnes. Porté par un élan d'optimisme envers la technologie moderne, le journaliste conclut l'article en spéculant qu'un jour peut-être verra-t-on un ordinateur aussi puissant muni de seulement 1 000 tubes à vide et ne pesant qu'une tonne et demie ! Aujourd'hui, l'ordinateur dans une montre bracelet de quelques dollars est plus puissant que cette merveille d'hier.

L'histoire du laser, de la fibre optique, des plastiques et des cristaux piézoélectriques est tout aussi fabuleuse. En fait la plupart des grandes inventions sont imprévisibles, voire inattendues. Imaginez le professeur rédigeant ces notes de cours à la fin du 19^e siècle. Aurait-il pu prévoir l'invention de l'avion, de la radio, des antibiotiques, de l'électronique, de l'énergie nucléaire, de l'ordinateur ou de l'exploration spatiale ? Même les prévisions de Jules Verne, l'écrivain le plus

visionnaire du siècle dernier, se révélèrent conservatrices. Je me sens aussi démuné et angoissé que ce professeur.

En cette fin de siècle où les nouvelles technologies s'accumulent, il devient impossible de prévoir précisément quelles seront les grands courants technologiques du 21^e siècle. Peut-on dire ce que l'avenir nous réserve si, par exemple, le génie génétique se développe rapidement et atteint sa pleine maturité ?

Je pense néanmoins que les nouvelles technologies vont poser des dilemmes moraux, soulever des défis économiques et engendrer des crises personnelles et sociales. Le défi pour l'homme du 21^e siècle ne sera peut-être pas d'inventer mais plutôt d'apprendre à maîtriser et à vivre avec ses inventions.

Dans les quelques pages qui vont suivre, je vais discuter de certaines technologies qui, selon moi, vont prendre leur essor au prochain siècle. J'ai dû cependant faire un choix de sujets, un choix justifié par mes affinités et mes connaissances. Au fil des années cependant, cette section sera sans doute profondément modifiée.

MACHINES MICROSCOPIQUES

En utilisant les matériaux et les procédés industriels de la microélectronique, les chercheurs ont conçu des leviers, des engrenages, des accéléromètres, des débitmètres, des vannes, des pompes, des manipulateurs et même des turbines dont les dimensions se

mesurent en ... microns. Une fraction de l'épaisseur d'un cheveu humain. Et, tout comme les transistors, des millions de ces composantes peuvent être fabriquées à la fois.

On prévoit, dans les cinquante prochaines années, que l'impact de l'ingénierie des systèmes microélectromécaniques (en anglais *microelectromechanical systems* ou MEMS) sera aussi grand que l'a été la miniaturisation de l'électronique dans les dernières décennies.

Aussi puissants que peuvent être les circuits intégrés, ils ne font rien d'autre que transférer des électrons le long de fils très minces. Les systèmes micromécaniques, au contraire, peuvent détecter et contrôler le mouvement, la lumière, le son, la chaleur et d'autres forces physiques.

Le couplage de microsystèmes mécaniques et électroniques va avoir des retombées importantes dans divers secteurs de la science et de la technologie. Des milliers de faisceaux dont la section est inférieure à un micron pourront balayer une surface plus petite qu'un timbre poste afin d'écrire ou de lire l'information normalement contenue dans une bibliothèque entière. Des microvannes vont relâcher des quantités infinitésimales de médicaments dans le sang à des intervalles réguliers. Des centaines de microturbines à gaz, disposées sur une pièce de monnaie, dégageront dix fois plus d'énergie que ne le font les meilleures piles électriques de mêmes dimensions.

Les systèmes microélectromécaniques sont fabriqués de la même façon que les circuits intégrés. Ils sont gravés chimiquement sur des couches de silicone déposées sur un substrat puis détachés partiellement ou complètement de ce même substrat chimiquement. Les parties mobiles peuvent alors être entraînées par diverses forces. Prenons, par exemple, une micropoutre. Stimulée électriquement, elle vibre à une fréquence bien déterminée. Si sa masse change de quelques atomes, sa fréquence va changer également. On ne peut imaginer alors un système mécanique plus sensible au mouvement, à la pression ou aux propriétés chimiques.

Un tel système est déjà employé pour déclencher le déploiement de sacs gonflables dans les automobiles. Une micropoutre est suspendue dans un condensateur électrique. Au moment d'une décélération brusque, la collision, la micropoutre est déplacée, ce qui change la capacité du condensateur et déclenche le système de protection.

La compagnie Texas Instruments a mis sur le marché un dispositif électromécanique de moins de 2 cm² sur laquelle sont disposés 500 000 miroirs d'aluminium de 16 microns de côté. Chacun de ces miroirs est contrôlé indépendamment par un courant électrique et peut être incliné de plus ou moins 10 degrés pour réfléchir ou non la lumière sur un écran de télévision. Qui plus est, cette composante coûte moins de 100 \$ US. Cette invention va peut être sonner le glas des écrans à cristaux liquides...

Une équipe de chercheurs de l'Université de la Californie à Los Angeles a recouvert les ailes d'un avion prototype de microcapteurs et de microailerons. Les microailerons activés par les microcapteurs contrôlent si bien l'écoulement d'air le long des ailes qu'on a plus du tout recours au système hydraulique traditionnel, lourd et encombrant, pour piloter l'avion.

L'ingénierie des systèmes microélectromécaniques va permettre aux chimistes et aux biologistes d'effectuer leurs expériences avec des instruments qui se logeront dans la paume de la main. Le centre de recherche et de technologie de Westinghouse est en train de mettre au point un spectromètre de masse de la grosseur d'une calculette, un appareil qui traditionnellement coûte très cher et trône dans un laboratoire. Un spectromètre de masse miniature va faciliter et accélérer grandement l'échantillonnage de produits toxiques dans l'environnement, et réduire considérablement les coûts d'analyses chimiques.

Dans la même veine, on a déjà commencé à fabriquer des usines chimiques sur chips. Des réactions chimiques sont produites au sein de cavités microscopiques. Les produits chimiques sont déplacés d'une cavité à l'autre, le long de microcanaux, grâce à des micropompes entraînées par un champ électrique. Les applications de ces usines lilliputiennes sont innombrables et encore insoupçonnées : préparation de nouveaux

médicaments, examens de l'ADN, mélange de produits chimiques pour produire plus d'énergie que des piles conventionnelles, etc.

Il est indéniable que l'ingénierie des systèmes microélectromécaniques élargira le champ des applications de l'électronique bien au-delà du simple traitement et stockage de l'information.

MATÉRIAUX INTELLIGENTS

Imaginez un instant que l'échelle sur laquelle vous vous tenez vous prévienne qu'elle est sur le point de s'affaisser. Ou des édifices et des ponts qui se renforcent au cours d'une secousse sismique et colmatent d'eux-mêmes leurs fissures. Tout comme des tissus vivants, ces matériaux pourraient changer leur structure, prendre en compte leurs dommages, les réparer et nous avertir lorsqu'ils arrivent au terme de leur vie. De tels matériaux semblent sortis tout droit d'un épisode de la série Star Trek. Mais en réalité, des chercheurs ont démontré la faisabilité de produire ce type de matériau.

Trois composantes constituent le matériau intelligent. Il y a tout d'abord le matériau proprement dit couplé à un actionneur qui émet une force (électrique, magnétique, etc.). Cette composante agit comme le muscle. Viennent ensuite les capteurs qui simulent la mémoire et les ramifications nerveuses et enfin, un système pour traiter l'information qui imite la moelle épinière et le cerveau.

Les matériaux intelligents présentent des avantages indéniables par rapport aux matériaux traditionnels. Plutôt que de renforcer le pont ou l'édifice avec des tonnes de métal additionnelles en vue de résister à la fatigue ou à un tremblement de terre éventuel, l'ingénieur pourrait recourir à une quantité plus modeste de ces matériaux tout en respectant les normes de sécurité. En étant sollicitées anormalement, les poutres du pont ou de l'édifice se renforcent grâce au passage d'un courant électrique.

Il existe aujourd'hui quatre types de matériaux intelligents qui peuvent changer leur forme, leur rigidité, leur position, leur fréquence naturelle et leurs propriétés mécaniques en étant soumis à un champ thermique ou électromagnétique.

Les alliages à mémoire retrouvent leur forme originelle lorsqu'ils sont portés à une température donnée. Ce faisant, ils peuvent restituer des forces mécanique utiles. Le nitinol, un alliage de nickel et de titane, est très résistant à la corrosion et à la fatigue et peut retrouver sa forme après un allongement important (jusqu'à 8 %) en le traversant d'un courant électrique. Des chercheurs japonais l'utilisent pour concevoir les pinces manipulatrices de robots. En recouvrant sa forme originelle, les forces dégagées par le nitinol permettent d'imiter la souplesse des muscles de la main et de tenir délicatement un verre d'eau en papier sans en échapper une seule goutte. Enfoui dans un matériaux composite, le nitinol est aussi employé pour changer la rigidité ou les contraintes dans une structure modifiant ainsi sa fréquence naturelle. On peut alors éviter le phénomène de résonance engendré par des forces externes. Un tel matériau aurait pu éviter la

célèbre catastrophe du pont de Tacoma. L'inconvénient majeur des alliages à mémoire est toutefois leur taux de changement lent. Ils ne peuvent réagir plus rapidement que le changement de température le permet.

Les cristaux piézoélectriques réagissent, eux, beaucoup plus rapidement (au millième de seconde). Ils se détendent et se contractent sous l'effet d'une différence de potentiel électrique. Cependant, ils ne peuvent se déformer de plus de 1 %. Ils sont surtout utilisés dans des dispositifs qui doivent réagir rapidement et précisément (systèmes optiques, têtes magnétiques, imprimantes à jet d'encre, haut-parleurs, etc.). J'ai appris récemment que sur le circuit professionnel de ski alpin, plusieurs skieurs utilisent des skis munis de ces cristaux. Cela permet de dissiper les vibrations le long des skis (le ski demeure donc plus longtemps en contact avec la neige) et le skieur a un meilleur contrôle.

D'autres matériaux, les matériaux magnétostrictifs, réagissent non pas à un champ électrique mais plutôt à un champ magnétique. Le Terfenol-D, qui contient un élément aussi rare que le terbium, est un exemple. Enfin, des fluides électrorhéologiques ou magnétorhéologiques renferment des particules micrométriques qui forment des chaînes lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique ou magnétique. Il en résulte alors un changement de viscosité de plusieurs ordres de grandeur en quelques millisecondes. De tels fluides présentent beaucoup d'intérêt dans la conception d'embrayages, de freins,

d'appareils d'entraînement, d'amortisseurs, etc. Ces fluides sont toutefois, pour l'instant, abrasifs et instables chimiquement.

Les capteurs permettent de décrire l'état physique du matériau. Les progrès récents réalisés en ingénierie des systèmes microélectromécaniques permettent d'entrevoir des matériaux peuplés de capteurs microscopiques. Mais, présentement, on a recours à des fibres optiques ou à des cristaux piézoélectriques comme capteurs. Le moindre événement, la moindre perturbation est ressentie par ces capteurs qui acheminent très rapidement l'information à l'actionneur via un système de traitement du signal. En effet, bien que les actionneurs et les capteurs soient des éléments cruciaux dans les matériaux intelligents, les signaux doivent être traités rapidement afin de poser les actions nécessaires. C'est l'intelligence du matériau. Plutôt que de recourir à un élément central de traitement, les chercheurs tentent de distribuer cette tâche dans un réseau neuronal, un programme d'ordinateur qui imite le comportement de neurones. Un tel programme peut apprendre, se modifier selon les circonstances, anticiper ses besoins et même corriger ses erreurs.

Dans l'avenir, le succès technologique et commercial des matériaux intelligents sera dicté par la capacité de l'électronique et des algorithmes à traiter la formidable information reçue des capteurs et transmise aux actionneurs.

SUPRACONDUCTIVITÉ À HAUTE TEMPÉRATURE

Découverte en 1911 par le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes, la supraconductivité est le phénomène par lequel l'électricité est conduite dans un matériau sans résistance. Malheureusement, les métaux et les alliages qui deviennent supraconducteurs le font à des températures en dessous de 23 K, des températures plus basses que celles qui prévalent à la surface de la planète Pluton. Pour atteindre ces températures, il faut recourir à des systèmes de réfrigération très sophistiqués ou utiliser de l'hélium liquide. Les applications pratiques sont forcément limitées.

Au cours des années quatre-vingt toutefois, les chercheurs ont mis au point des centaines de nouveaux matériaux (des céramiques surtout) qui deviennent supraconductrices à des températures au-dessus de celle de l'azote liquide (77 K). Et l'azote liquide est abondant et relativement peu coûteux à produire. Il n'est peut-être pas exagéré alors de dire que les supraconducteurs seront au 21^e siècle ce que les semi-conducteurs ont été au cours de la deuxième moitié du 20^e siècle. J'ai peine à imaginer la multitude d'applications que permettra la transmission d'électricité sans résistance. Avec des aimants supraconducteurs, les trains à grande vitesse et les métros fonctionnant par lévitation magnétique deviendront courants, favorisant l'utilisation de l'énergie propre, l'électricité, dans les transports et contribuant ainsi à réduire les émissions de CO₂ dans l'atmosphère. On pourra concevoir de grands systèmes de transmission et de stockage d'électricité, des ordinateurs ultrarapides, des systèmes de détection de signaux électromagnétiques trop faibles pour être captés par la technologie

conventionnelle ou des systèmes de protection contre le survoltage des réseaux électriques.

LA THÉRAPIE GÉNÉTIQUE

Au cours de son histoire, la médecine a connu trois grandes révolutions en vue de prévenir et de traiter les maladies. Il y eut tout d'abord l'instauration de mesures de santé publique qui freinèrent la dissémination de maladies infectieuses. Ensuite, la chirurgie sous anesthésie permit aux médecins, pour la première fois, de guérir une maladie. Par exemple, l'ablation de l'appendice malade résout le problème une fois pour toutes. Enfin, l'avènement de vaccins et d'antibiotiques prévient et corrige certaines maladies propagées par les microbes.

Sans aucun doute, la quatrième révolution en médecine sera celle de la thérapie génétique. La transmission de gènes correcteurs dans les cellules somatiques du patient va permettre de guérir la majeure partie des maladies même celles qui ont résisté à tous les traitements jusqu'à présent. En fait presque toutes les maladies sont le résultat d'une défectuosité génétique. En intervenant directement sur les gènes, les médecins pourront corriger le problème à la source plutôt que de traiter les symptômes. Une des conséquences de cette médecine est qu'en travaillant au niveau moléculaire les coûts des soins médicaux chuteront.

Plus de 4 000 maladies, telle la fibrose kystique, sont engendrées par un seul gène défectueux à la naissance. Plusieurs autres, telles le cancer, le SIDA, l'arthrite ou la sénilité sont le résultat de l'altération d'un ou plusieurs gènes du système immunitaire.

Présentement, pour transmettre les gènes correcteurs aux cellules malades, les médecins utilisent des virus transporteurs. Les virus sont très utiles car ils ont la capacité naturelle de pénétrer les cellules et d'y insérer leur information génétique. Avant de les utiliser en thérapie, toutefois, les chercheurs modifient leur structure et y insèrent les gènes correcteurs qui seront ainsi transportés dans les cellules malades.

Une autre approche, dite *ex vivo*, consiste à extraire des cellules malades du patient, leur donner des copies normales d'ADN puis de les injecter à nouveau dans le corps. L'inconvénient est que les cellules sanguines ont une vie limitée. Les cellules corrigées disparaissent alors lentement et il faut répéter le traitement régulièrement pour obtenir les résultats escomptés.

Le traitement dit *in situ* est aussi employé pour traiter des organes malades. Les gènes correcteurs sont injectés directement dans le tissu malade.

Dans l'avenir, les chercheurs prévoient développer le traitement *in vivo* dans lequel les gènes correcteurs seront injectés directement dans le flux sanguin exactement comme un médicament conventionnel. Une fois à l'intérieur du corps, les transporteurs

de gènes correcteurs trouveront les cellules malades et leurs transmettront leur information.

Mais la thérapie génétique soulève de graves questions morales. Si l'homme se donne les moyens techniques de corriger l'information génétique contenue dans les cellules pour éliminer les maladies, il peut aussi utiliser son savoir à des fins moins nobles. Certaines sociétés seront tentées par l'eugénique. Il n'y a qu'un pas entre permettre à un individu malade de retrouver une existence normale et permette à un individu normal d'améliorer son existence. Et qui va définir ce qu'on entend par « normal » ? La situation sera davantage dangereuse et imprévisible si on se livre à des manipulations génétiques de virus en vue de créer de nouvelles armes biologiques. Au 20^e siècle, l'homme s'est précipité aveuglément dans l'âge nucléaire. Jusqu'à présent il l'a échappé belle. Mais je ne pense pas qu'il pourra se permettre, au 21^e siècle, de répéter la même erreur avec le génie génétique. Les conséquences pourraient être désastreuses.

QUATRE GRANDES IDÉES EN PHYSIQUE

Chapitre 5

La physique regorge d'idées lumineuses. Je ne saurais toutes les énumérer mais j'en ai retenues quatre. Il s'agit de la première et de la deuxième loi de la thermodynamique, de la théorie de la relativité, restreinte et générale, et de la mécanique quantique. Les deux premières idées sont issues du 19^e siècle alors que les deux dernières sont le fruit de la science du 20^e siècle. Chacune de ces idées a bouleversé notre vision du monde et a eu des répercussions bien au-delà de la science.

LA PREMIÈRE LOI DE LA THERMODYNAMIQUE

La première loi de la thermodynamique est la loi de la conservation de l'énergie. Elle stipule que l'énergie d'un système ne change pas peu importe les évolutions que subit ce système. Cette loi est un exemple fondamental de la logique et de la formidable capacité prédictive de la science.

Julius Robert Mayer (1814-1878), un physicien allemand, fut le premier chercheur à proposer l'équivalence de toutes les formes d'énergie, incluant la chaleur, et à formuler la conservation de l'énergie totale. James Prescott Joule (1818-1889) consolida cette idée à travers ses expériences au laboratoire.

Même si la découverte de la loi de la conservation de l'énergie mit de l'ordre dans la pensée scientifique au 19^e siècle, elle contribua également à miner l'idée séculaire d'un monde éternel. En effet, la principale source d'énergie sur Terre est le soleil. Or, selon la première loi de la thermodynamique, le soleil ne peut irradier sa chaleur et sa

lumière pour toujours. Autrement, il aurait besoin d'un apport infini d'énergie et le soleil, comme tous les corps, n'en renferme qu'une quantité finie.

En 1862, le physicien écossais William Thompson (1824-1907), connu aussi sous le nom de Lord Kelvin, estima que le soleil n'avait pu illuminer la Terre pendant plus de 100 millions d'années. D'autres scientifiques, partisans d'un univers éternel, proposèrent diverses alternatives : le soleil compense ses pertes d'énergie par des réactions chimiques, ou en s'alimentant d'impacts de météorites ou encore en libérant son énergie gravitationnelle. Thompson réfuta toutes ces théories. Selon lui, l'énergie chimique du soleil serait épuisée en 1 000 ans. D'autre part, la quantité de matière pour alimenter le soleil serait telle que le flux de météorites s'abîmant dans le soleil perturberait de façon significative les orbites des planètes. Enfin, en libérant son énergie gravitationnelle, le soleil ne pourrait rayonner à son rythme actuel, que pendant 10 millions d'années. Thompson arguait que le soleil irradiait grâce à la chaleur contenue dans ses gaz. Inévitablement, le soleil se refroidissait et s'éteignait lentement. Il ne pouvait avoir existé au-delà de 100 millions d'années. C'était l'âge du soleil et, implicitement, celui aussi de la Terre.

Charles Lyell (1797-1875), célèbre géologue de son époque et fondateur de la Uniformitarian School of Geology, s'opposait à l'idée de la durée de vie du soleil et de la Terre. Lyell refusait obstinément de considérer que la Terre ait eu une origine. La

Terre, disait-il, est aujourd'hui comme elle a toujours été et comme elle sera toujours. Elle est éternelle.

Cette idée de la durée de vie du soleil et de la Terre fut une étape cruciale dans l'évolution de la pensée humaine. Graduellement, l'homme devait accepter l'idée de mortalité de l'univers et des limites des ressources d'énergie. Pour nous, vivant au 20^e siècle, cela semble évident. Mais, pour l'homme du 19^e siècle, cette idée était choquante.

Bien que Thompson ait défendu et calculé la durée de vie finie du soleil, il ne connaissait pas l'énergie nucléaire qui fut découverte au 20^e siècle. Le soleil tire son énergie de la fusion de noyaux d'hydrogène et on estime que sa durée de vie n'est pas 100 millions d'années mais plutôt 10 milliards d'années. La première loi de la thermodynamique indique que le soleil n'a pas toujours rayonné et, qu'un jour, il s'éteindra.

À la fin des années 1920, le principe « sacré » de la conservation de l'énergie fut toutefois remis en question. Dans un type de désintégration radioactive, la désintégration Bêta, le noyau atomique émet un électron. Or, quand un noyau atomique émet une particule, le principe de conservation d'énergie exige que l'énergie transportée par la particule éjectée soit égale à l'énergie perdue par le noyau. Puisque le noyau atomique ne peut changer son énergie que par des quantités discrètes (tout comme

l'atome d'ailleurs), on s'attendait alors à ce que l'électron émis ait une énergie discrète bien définie. Les mesures prises au laboratoire montrèrent, au contraire, que l'énergie des électrons émis couvrait toute une plage ! C'est un peu comme si, après avoir accordé un piano, en touchant deux notes distinctes sur le clavier, on entendait des milliers de notes entre elles. Les physiciens étaient stupéfaits. Niels Bohr (1885-1962), un des physiciens les plus célèbres du 20^e siècle et prix Nobel de physique (1922), proposa alors, courageusement, que le principe de conservation d'énergie pouvait, à l'échelle atomique, être violé. Même s'il l'avait proposée, cette idée lui déplaisait. La communauté scientifique était déchirée. Werner Heisenberg (prix Nobel de physique 1932) se rangea aux côtés de Bohr. Wolfgang Pauli (prix Nobel de physique 1945), Ernest Rutherford (prix Nobel de physique 1908) et Paul Dirac (prix Nobel de physique 1933), d'autre part, s'y opposèrent malgré l'évidence expérimentale. En décembre 1930, Pauli suggéra alors, qu'en plus de l'électron une autre particule, difficilement détectable, était émise. Ainsi, le principe de conservation de l'énergie pouvait être respecté. Vingt-cinq années s'écoulèrent avant que cette particule, qu'on appelle neutrino, ne soit découverte. Le principe de conservation de l'énergie était sauvé.

LA DEUXIÈME LOI DE LA THERMODYNAMIQUE

Le deuxième principe de la thermodynamique stipule que le désordre dans tout système isolé croît inévitablement et irréversiblement avec le temps. Il explique

pourquoi il faut faire le plein d'essence régulièrement pour rouler, pourquoi la bière se réchauffe et le café se refroidit, pourquoi la fumée de cigarette diffuse partout dans la pièce plutôt que de s'accumuler dans un coin, pourquoi le pendule s'arrête de lui-même et non l'inverse, pourquoi le temps s'écoule dans une direction et non dans l'autre, et pourquoi toute forme d'organisation meurt un jour. Tout comme pour la première loi, on n'échappe pas à la deuxième. Formulée pour la première fois par Thompson en 1852, la deuxième loi implique que la chaleur dans l'univers s'écoule, continuellement, des corps chauds vers des corps froids et que, par conséquent, l'univers perd graduellement sa capacité à produire un travail. La première loi stipule que la quantité totale d'énergie dans l'univers est constante alors que la deuxième loi implique que la quantité totale d'énergie utile diminue constamment. La quantité est à la première loi ce que la qualité est à la deuxième.

Dans la vie courante, perdre de l'énergie signifie la convertir en une forme moins utile. Une unité de haute qualité d'énergie est plus utile que trois unités de basse qualité. Par exemple, une quantité finie d'énergie calorifique à haute température est beaucoup plus intéressante pour l'ingénieur attaché à la production d'électricité dans une centrale thermique que la vaste quantité d'énergie calorifique à basse température disponible dans tous les océans tropicaux de la Terre.

Dans la culture nord-américaine, nous sommes fascinés par la quantité (1^{re} loi) et nous portons moins d'attention, bien que cela change lentement, à la qualité (2^e loi).

Mais la quantité ne peut pas tout décrire. La qualité doit aussi être prise en compte. Dans la mesure du possible, les questions devraient être abordées du point de vue de la première et de la deuxième loi de la thermodynamique et ce même dans des domaines non techniques.

L'industrie milliardaire (et scandaleuse) des régimes amaigrissants est un exemple instructif. Sa philosophie repose essentiellement sur la première loi de la thermodynamique. On compte les calories et les kilos. Mais si on considère que plus de 90 % des gens qui perdent du poids le reprennent éventuellement, et avec intérêt, il devient évident que la première loi ne dépeint pas correctement toute la situation. Une calorie issue de matières grasses est plus susceptible d'être emmagasinée comme une matière grasse qu'une calorie issue d'hydrates de carbone ou de protéines. Les chinois mangent plus que les américains (grammes et calories équivalents), et pourtant ils sont plus petits et moins gras. Au-delà de trente ans, le métabolisme chez l'humain ralentit sensiblement. Des régimes alimentaires frugaux prolongés enseignent à l'organisme à vivre avec moins de calories, le rendant ainsi plus efficace. Cela explique, en partie, pourquoi les adeptes de régimes d'amaigrissement reprennent tout le poids perdu aussitôt qu'ils abandonnent leur cure.

Je vois la thermodynamique comme la science qui étudie la conservation de la masse et de l'énergie (1^{re} loi), la génération d'entropie et la destruction d'exergie (2^e loi).

L'entropie est une mesure du désordre d'un système. Les gens efficaces mènent une vie pauvre en entropie. Ils sont organisés. Chaque chose a sa place et ils mettent peu d'effort (énergie) pour se retrouver. Les gens moins efficaces, d'autre part, sont plus désorganisés et mènent une vie riche en entropie. Ils doivent mettre plus d'effort pour retrouver leurs choses et ce faisant, ils ne s'y prennent pas correctement. Il m'arrive de penser que l'entropie a un sexe. Ma femme et ma fille mènent une vie dépourvue d'entropie alors que mon garçon et moi en rayonnons naturellement.

Une armée à haute teneur entropique est à peu près inutile. C'est la raison pour laquelle, lors d'un conflit, on s'empresse de bombarder le quartier général de l'ennemi. On veut la désorganiser (accroître son entropie). Une armée constituée de dix divisions est dix fois plus redoutable que dix armées constituées chacune d'une seule division. De même, un pays constitué de dix états est plus puissant que dix pays indépendants. Les États-Unis ne seraient pas aussi incontournables dans le monde s'ils étaient constitués de cinquante pays différents. Je me demande si, dans sa quête de souveraineté, le Québec saura faire mentir la deuxième loi de la thermodynamique... La version moderne du vieux dicton « divisons pour conquérir » pourrait être « accroissons l'entropie pour conquérir ».

L'ingénieur mécanicien et le psychologue travaillent tous deux inlassablement à réduire la génération d'entropie. L'un à réduire la friction entre les corps, l'autre entre

les gens. Malheureusement pour le psychologue, l'entropie humaine est beaucoup plus difficile à quantifier...

On peut concevoir l'exergie d'un individu comme étant le maximum de travail qu'il puisse faire à un temps et à un endroit donné. Alors la différence entre l'exergie (X) et le travail réellement fait dans ces conditions (W) représente l'irréversibilité ou la perte de potentiel à faire du travail (I) :

$$\mathbf{X - W = I}$$

Dans tout système, l'ingénieur traque les principales sources d'irréversibilité et tente de les supprimer du moins de les minimiser pour maximiser la performance. Il en va ainsi dans la vie courante. L'exergie physique d'une personne croît avec l'entraînement alors que l'exergie intellectuelle croît avec l'éducation. Le vieillissement et l'inaction diminuent, par contre, l'exergie. Certains viennent au monde avec plus d'exergie (ils sont plus talentueux). Une personne reposée a plus d'exergie intellectuelle qu'une personne fatiguée. Le repos est donc un moyen de diminuer l'irréversibilité .

En thermodynamique, l'efficacité, définie selon la première loi, est le rapport entre le travail fait et la chaleur ajoutée. Cette efficacité ne considère pas cependant la meilleure performance. L'efficacité, définie selon la deuxième loi, est, d'autre part, une mesure de la performance réelle par rapport à la meilleure performance possible dans les mêmes conditions. Alors l'efficacité d'une personne, selon la première loi, peut être

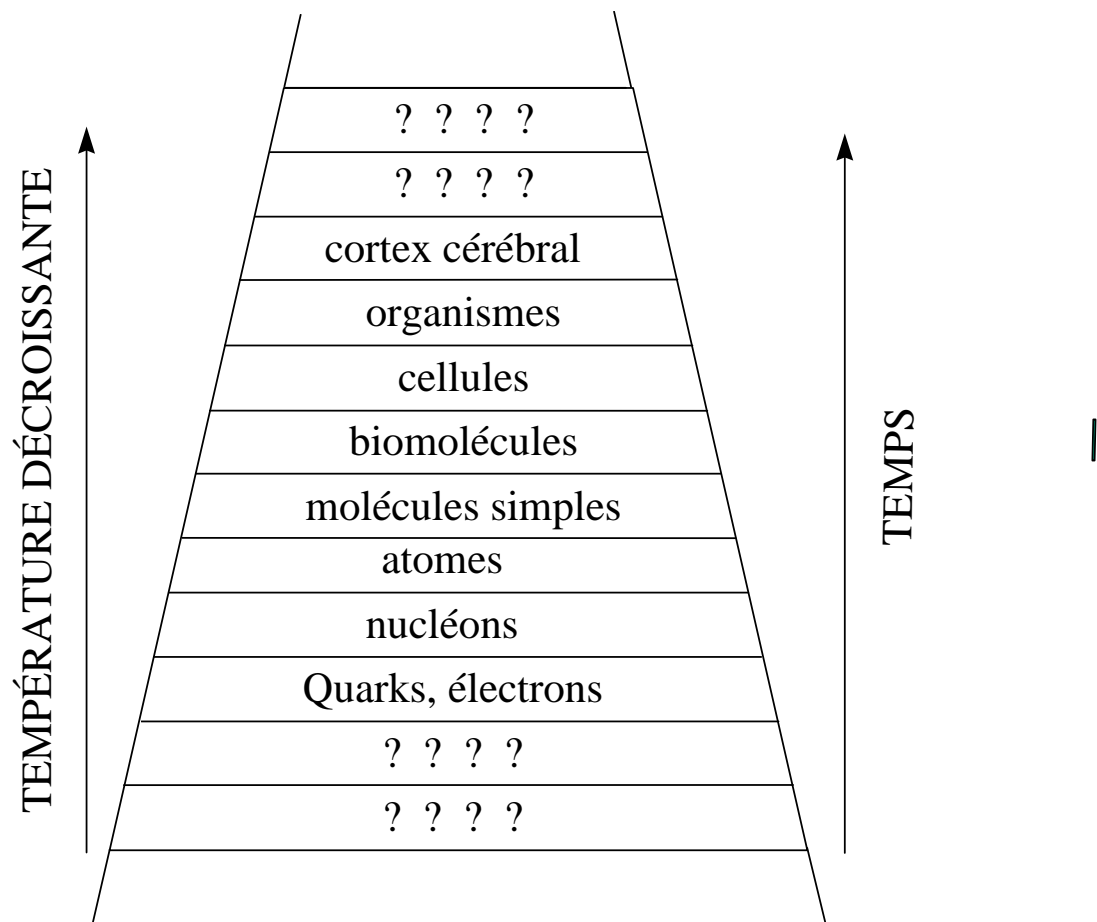
vue comme sa réalisation par rapport aux efforts qu'elle a déployés. Selon la deuxième loi, son efficacité est sa performance par rapport à la meilleure performance possible dans les mêmes conditions.

Le bonheur est intimement lié à l'efficacité définie selon la deuxième loi. Les bébés sont vraisemblablement les êtres humains les plus heureux car ils peuvent faire peu de choses, mais ce qu'ils font, ils le font bien. L'efficacité thermodynamique de leur vie est élevée.

Pour accomplir une tâche manuelle routinière, une personne handicapée physiquement doit déployer beaucoup plus d'efforts qu'une personne en possession de toutes ses capacités physiques. Du point de vue de la première loi, elle est moins efficace. Selon la deuxième loi, toutefois, elle est beaucoup plus efficace car ce qu'elle accomplit est à peu près ce qu'elle peut faire de mieux dans les circonstances.

Un des corollaires de la 2^e loi de la thermodynamique est la mort inéluctable de tout système organisé. Dans l'univers, la matière a tendance à se structurer en systèmes hiérarchisés. Tous ces systèmes jouissent alors de propriétés plus riches que celles de leurs composantes. Sans contredit, la plus merveilleuse histoire d'organisation de la matière dont le scénario se précise au gré des découvertes scientifiques est la nôtre, celle de l'univers. On peut la schématiser par ce qu'Hubert Reeves appelle la pyramide de la complexité. Au bas de cette pyramide se trouve le système naturel le plus simple

alors qu'au sommet trône le système le plus complexe que l'on connaisse. Il y a 15 milliards d'années l'univers se situe au bas de la pyramide. Toutes les particules de matière sont maintenues dans un état de dissociation complète et permanente par l'état d'extrême chaleur qui règne à cette époque. Toute association entre les quarks est impossible. C'est le chaos originel. L'organisation est absente. Cet univers est cependant en expansion. Il se refroidit. La température et la densité diminuent avec le temps. Quand la température passe au-dessous du trillion de degrés (10^{12}), les quarks, s'unissant trois par trois, donnent naissance aux nucléons (neutrons, protons). Quand on arrive à un milliard de degrés, une fraction des nucléons s'associe pour engendrer les premiers noyaux d'hélium. L'horloge cosmique marque alors environ une minute. Un million d'années plus tard, les premiers atomes et les premières molécules d'hydrogène se forment quand, grâce à la diminution de la température, les électrons peuvent se fixer et rester en orbite autour des protons. C'est l'heure de l'émission du rayonnement fossile qui sera détecté pour la première fois par les astronomes Penzias et Wilson en 1965.



PYRAMIDE DE LA COMPLEXITÉ

À grande échelle cette fois, c'est quelques centaines de millions d'années plus tard qu'apparaissent les premières galaxies. En se fragmentant, la matière galactique donne naissance aux étoiles. À partir de cette époque, les événements associatifs pourront se multiplier dans ces creusets nucléaires. Les nucléons s'associent en noyaux lourds (hélium, carbone, silicium, fer). Projetés dans l'espace interstellaire à la mort de l'étoile (lorsqu'elle a épuisé son carburant nucléaire), ces noyaux capturent des électrons pour se constituer en atomes. S'associant entre eux, ces atomes forment des molécules ainsi que de minuscules grains de poussière de l'espace sidéral. En s'agglutinant, ces grains forment éventuellement des astéroïdes puis des planètes sur lesquelles se déposent, en certains cas, des atmosphères et des océans. C'est le cas, par exemple, de la planète Terre il y a 4,6 milliards d'années. Au sein de ces nappes fertiles, les molécules légères s'associent pour devenir des molécules géantes, puis des cellules vivantes, des organismes végétaux, animaux et enfin le cortex cérébral. C'est le sommet de la pyramide. Sur une échelle de temps de 15 milliards d'années, l'évolution, loin de ralentir, semble plutôt s'accélérer. En quatre millions d'années le cerveau de notre lignée est passé de 500 grammes à 1 400 grammes. Cette période est une fraction extrêmement faible de la durée de l'évolution biologique sur la Terre. Pour s'en rendre compte, résumons en un jour la durée de notre planète. À cette échelle, chaque minute vaut trois millions d'années. La Terre se forme à zéro heure. À quatre heures du matin, les algues et les bactéries prolifèrent déjà dans les mares tièdes. Les premiers mollusques et crustacés entrent en scène vers 18 ou 19 heures. À 23 heures apparaissent les premiers dinosaures. Ils s'éteindront quarante minutes plus tard. Au

cours des vingt dernières minutes, les mammifères envahissent la planète et se différencient rapidement. Nos ancêtres font leur apparition dans les dix dernières minutes et voient leur cerveau tripler au cours des deux dernières minutes ! La science moderne voit le jour 0,008 seconde avant minuit. Pour cette raison, il est sage de ne pas fermer le sommet de la pyramide au cortex cérébral...

En redescendant la pyramide de la complexité, la matière se désorganise. Chez l'humain, la mort est prononcée lorsque l'activité organisée du cortex cérébral cesse. Le cortex n'est plus alors qu'une masse de tissus. On tombe d'un échelon. Les cellules (les composantes du système) n'étant plus alimentées, elles meurent rapidement. La chute se poursuit aux biomolécules et la perte d'organisation s'accroît. Les biomolécules se défont à leur tour en molécules simples puis elles sont relâchées dans l'air ou sont absorbées par la matière organique du sol. C'est la putréfaction. Les molécules ainsi libérées participeront à la construction d'un autre organisme vivant.

La mort est en réalité une perte de complexité, une perte d'organisation. Et non une perte de matière. On peut dire, en quelque sorte, que selon la 1^{re} loi nous sommes éternels (conservation de l'énergie) alors que selon la 2^e loi nous sommes mortels (perte de complexité). La mort est le prix à payer pour atteindre les niveaux supérieurs de la pyramide de la complexité et assurer la continuité des espèces. Mais tout compte fait, je crois que ça en vaut le coût.

Une société est aussi un système hautement organisé et elle n'échappe pas non plus aux conséquences de la 2^e loi de la thermodynamique. La chute de l'empire romain est un exemple instructif. L'empire romain reposait sur une erreur capitale : Rome elle-même, une ville d'un million d'habitants dans un système technique néolithique. Si l'on tient compte de la médiocrité et du faible rendement des terres, cette ville ne pouvait être nourrie qu'aux dépens de l'empire tout entier. Il y fallait le blé, l'huile, le bétail et le vin provenant de Sicile, d'Égypte, du Maghreb et de la Gaule. L'empire n'était qu'une immense machine à nourrir la ville.

Pour faire fonctionner cette machine, il fallait des fonctionnaires, des marins, des soldats qui devaient eux aussi se nourrir aux dépens de l'empire. Cette énorme machine administrative fonctionnait avec le rendement décroissant dans le temps qui est de règle : chaque fonctionnaire n'avait d'autre ambition que de recruter d'autres fonctionnaires dont le nombre devint énorme. La corruption de ceux-ci pesa de plus en plus lourd dans le circuit économique. Le peuple de Rome, lui-même, vivant dans l'oisiveté faute de pouvoir travailler dans une industrie inexistante, n'avait pas d'autre fonction sociale que d'organiser la rotation rapide des empereurs par le système des émeutes urbaines. Pour distraire, accéder à la charge impériale ou s'y maintenir, il fallait recourir aux jeux, mobilisant des ressources supplémentaires.

Dans ce système, où le parasitisme constitue la seule forme de promotion sociale, les charges fiscales ne cessèrent d'augmenter pour atteindre 100 % à la fin de l'empire.

Il fallut recourir aux mesures les plus extrêmes pour recouvrer les impôts : confiscation des biens, torture, vente du contribuable comme esclave. Les riches se faisaient exempter de fait en se réfugiant à la campagne, ce qui concentrait encore davantage de charges sur les classes moyennes, perdant petit à petit le goût du travail dans ce système spoliateur. Comme la matière imposable ne cessait de se raréfier, le recours à l'inflation devint une ressource habituelle pour se procurer des finances. Ainsi, de 335 à 368, le taux d'inflation atteignit 1 000 %. N'en pouvant plus, l'empire commença à s'écrouler en 410 lorsque Rome fut prise par les Wisigoths d'Alaric.

Rome montre, de façon limpide, les effets irrésistibles de la croissance de l'entropie dans un système fermé dont le désordre politique ne fera que refléter le chaos physique. La ville constituait au sein de l'empire un système ouvert qui puisait son énergie dans le système fermé du bassin méditerranéen. Les habitants de la ville pouvaient donc nourrir l'illusion qu'ils avaient accès à des ressources infinies. Le luxe, le gaspillage, le gigantisme de l'architecture avaient pour fonction de nier de façon spectaculaire l'existence de la loi de croissance de l'entropie. Plus l'empire se rapprochait de sa mort, plus ces spectacles devinrent nécessaires à l'illusion.

J'ai parfois l'impression désagréable que Rome est un prototype restreint de notre société moderne. La seule différence c'est qu'à cette époque les gestionnaires ne connaissaient pas la 2^e loi de la thermodynamique alors qu'aujourd'hui ils l'ignorent. Si l'éducation coûte trop cher, peut-on alors se payer l'ignorance ?

Une des caractéristiques de l'évolution technique propre à la 2^e loi est son irréversibilité. Cette caractéristique résulte naturellement de la croissance de l'entropie ou, de façon équivalente, de l'épuisement progressif des ressources. Imaginons, pour un instant que la Terre soit une entreprise. D'une part se trouve le stock constitué de combustibles fossiles, de minerais, d'eau, d'air et de terres arables. D'autre part, il y a un flux constitué uniquement d'énergie solaire à l'exclusion de toute matière. L'un est le capital et l'autre le revenu. En principe, l'entreprise constituée par l'espèce humaine ne pourrait utiliser son capital que pour s'équiper afin de mieux capter son revenu. Tel est le cas lorsque l'on construit un barrage, des capteurs solaires, un moulin à vent, un réseau d'irrigation, une serre, une maison bien isolée.

Cependant, cette utilisation du capital ne constitue qu'une petite fraction de ce qui est dépensé. La plus grosse partie sert à faire rouler des voitures, à chauffer des maisons, à fabriquer des canettes de bière ou des boîtes de conserve. Nous mangeons notre capital de basse entropie et nous le mangeons de plus en plus vite lorsque le produit national brut (PNB) augmente.

Aucun économiste oserait donner à une entreprise industrielle ou commerciale le conseil de se contenter de manger son capital sans se soucier de se créer un revenu sous le prétexte que le capital de l'entreprise est grand au point d'être mal comptabilisé. Il aurait encore moins l'idée saugrenue de mesurer le progrès de l'entreprise au rythme

croissant auquel elle dévore son capital. Cependant, il y a très peu d'économistes qui aient le courage de donner à l'entreprise Terre les mêmes conseils judicieux que ceux qu'ils prodiguent à toutes les autres entreprises.

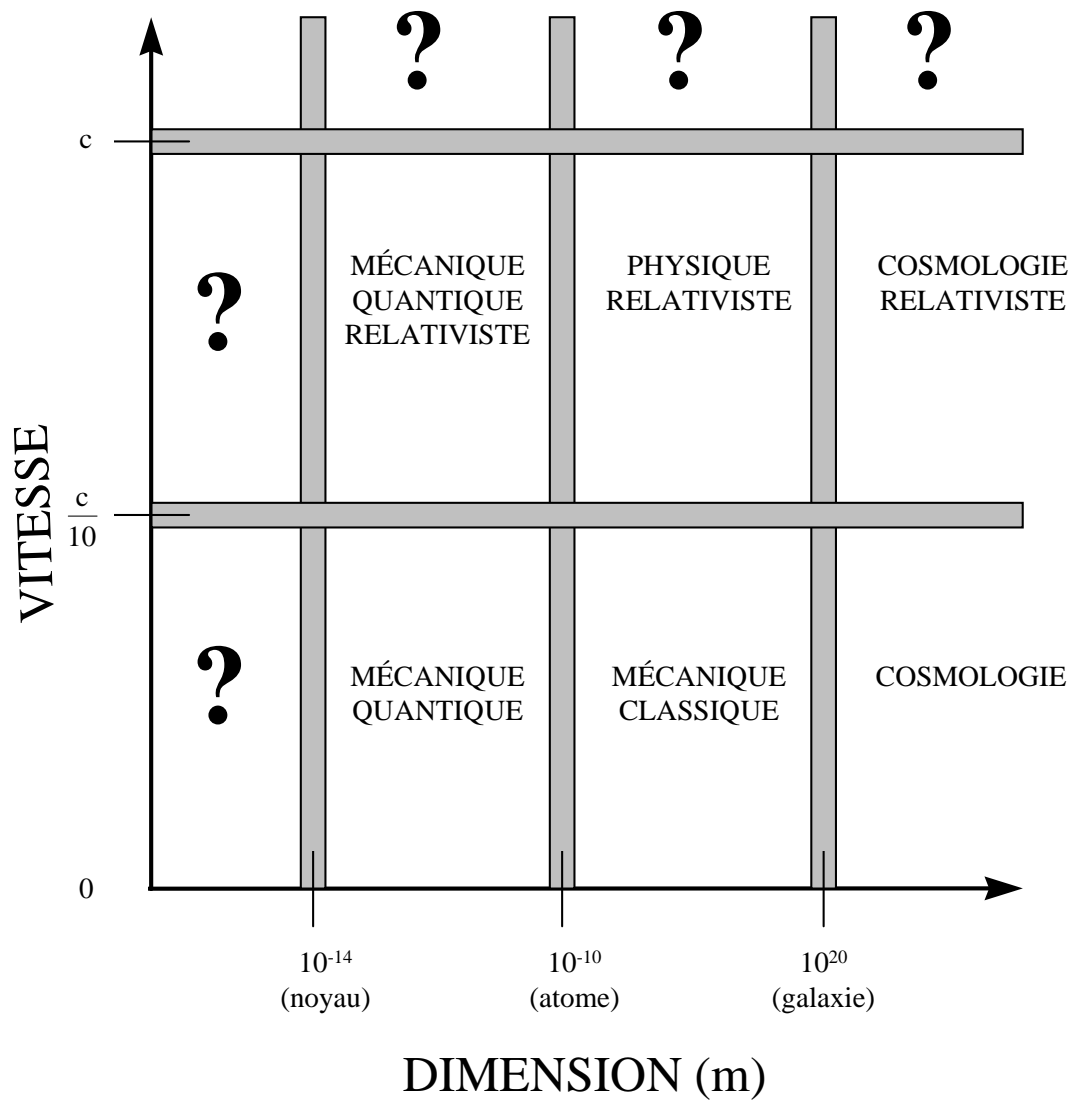
La solution est pourtant incontournable (2^e loi) : le fonctionnement de l'entreprise doit s'appuyer sur la consommation du flux plutôt que sur la dilapidation du stock. Il s'agit de n'utiliser, comme énergie, que le flux solaire incident. Le capital d'énergie, sous forme de charbon, de pétrole et de matériaux fossiles doit être réservé, en principe, à la construction d'installations destinées à compter le flux solaire. Et aussi, de n'utiliser les matières premières qu'avec la plus extrême parcimonie. Ce n'est pas par hasard si les conclusions auxquelles nous conduit la 2^e loi de la thermodynamique coïncident avec les recommandations que j'ai faites dans le chapitre à propos de la science et de l'environnement.

LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ

La structure de notre univers est déterminée non seulement par les quatre interactions fondamentales (gravitationnelle, faible, électromagnétique et forte) mais aussi par des lois mathématiques qui déterminent notamment comment les particules microscopiques et les corps macroscopiques se déplacent sous l'influence de ces forces. Par exemple, dans un champ de gravitation, ce sont les lois de la mécanique newtonienne qui régissent le mouvement des corps matériels, comme celui d'un ballon de football ou d'un satellite artificiel autour de la terre.

Il existe cependant un certain nombre de circonstances où les lois de Newton, chères à l'ingénieur mécanicien, cessent d'être valides. Tout d'abord, lorsque les vitesses des corps impliqués s'approchent de la vitesse de la lumière, auquel cas il convient d'utiliser la théorie de la relativité restreinte. D'autre part, si le champ de gravitation devient trop intense, la théorie classique de Newton s'effondre et doit céder sa place à la théorie de la relativité générale. Enfin, lorsque la taille du système matériel considéré devient microscopique, une taille comparable à celle de l'atome, la mécanique Newtonienne doit à nouveau faire place à une autre théorie, la mécanique quantique, qui permet de décrire avec succès le comportement des particules élémentaires et des champs physiques fondamentaux.

Contrairement à la première et à la deuxième loi de la thermodynamique, l'ingénieur mécanicien du 20^e siècle n'est pas familier avec les théories de la relativité et de la mécanique quantique. C'est on ne peut plus normal. Il travaille rarement avec des corps ou des machines qui se déplacent à des vitesses comparables à celle de la lumière ou dans des champs gravitationnels intenses ou encore dont les dimensions sont atomiques. Au 21^e siècle, toutefois, il en sera autrement. Les



Graphique des théories (c = vitesse de la lumière)

nouvelles technologies demanderont à l'ingénieur mécanicien de se pencher de plus en plus sur des problèmes au-delà des frontières de la mécanique newtonienne. Je pense, en particulier, à la conception de machines et de systèmes nanométriques et de systèmes spatiaux.

La théorie de la relativité restreinte et la théorie de la relativité générale sont l'œuvre d'Albert Einstein (1879-1955). C'est, à mon avis, la plus grande réalisation scientifique que l'on puisse attribuer à une seule personne. Ces théories sont le résultat d'une pensée déductive illuminée. Einstein posa certains postulats, en déduisit les conséquences et formula une théorie. Il soumit ensuite ses théories à l'expérience. Et les expériences, se poursuivant toujours, n'ont cessé de les confirmer.

Dans la pensée inductive, beaucoup plus courante, le scientifique fait des observations, tente de découvrir une tendance, formule cette tendance sous la forme d'une loi (ou d'un principe) puis confronte cette loi (ou ce principe) à d'autres observations expérimentales. C'est le cas, notamment, des première et deuxième loi de la thermodynamique, des lois de Kepler et de la théorie de la sélection naturelle.

À la fin du 19^e siècle et au début du 20^e siècle, la plupart des scientifiques tentaient d'expliquer, mais sans succès, divers phénomènes électromagnétiques et mécaniques de façon inductive. Einstein connut plus de succès en raisonnant autrement, et en déduisit la théorie de la relativité générale en 1915.

Le principe fondamental de la théorie de la relativité restreinte est que la description d'un phénomène physique qu'en donne un observateur par l'intermédiaire d'une loi ne peut pas dépendre de la vitesse de cet observateur supposé en mouvement uniforme (non accéléré). Ce principe dit de covariance des lois physiques oblige à abandonner certaines notions qui, dans notre expérience quotidienne, nous paraissent intuitives. L'espace tridimensionnel dans lequel se déroulent les phénomènes physiques et le temps ne peuvent plus être considérés comme des entités disjointes. Ils sont assemblés en une structure quadridimensionnelle, appelée espace-temps. De plus, tout observateur non accéléré doit mesurer pour la propagation de la lumière exactement la même vitesse, c'est à dire environ 300 000 km/s. Cette vitesse est une constante universelle de la nature. Cette situation à première vue paradoxale est à la base d'une série d'effets physiques comme la contraction des longueurs et la dilatation du temps, qui nous paraissent tout à fait déroutants parce que étrangers à l'expérimentation quotidienne limitée à des vitesses faibles par rapport à celle de la lumière (la navette spatiale, une des machines les plus rapides inventées par l'homme, vole à 25 000 km/h soit 0,0023 % la vitesse de la lumière).

Le point de départ de la théorie de la relativité générale est le postulat émis par Einstein que les lois de la physique devraient être les mêmes pour tout observateur, même accéléré. C'est le principe de covariance générale. En ce sens, cette théorie constitue une généralisation de la théorie de la relativité restreinte. Le fait d'introduire

dans la description du monde physique des observateurs accélérés conduit à incorporer dans la théorie de base le phénomène de gravitation et ainsi, la relativité générale est, avant tout, une théorie du champ de gravitation conceptuellement différente de celle de Newton. La notion de force n'est plus un élément central. Einstein ne voit pas la gravitation comme une force. Il la décrit plutôt en termes de géométrie de l'espace. L'espace-temps quadridimensionnel est courbé sous l'influence de la gravitation.

Cette idée est révolutionnaire. L'espace-temps est gauchi par la distribution de masse et d'énergie qu'il contient. Des corps comme la Terre ne sont pas obligés de se mouvoir sur des orbites courbes à cause d'une force appelée gravitation. Ils suivent en fait ce qui se rapproche le plus d'une trajectoire rectiligne dans un espace courbe, c'est-à-dire une géodésique. Une géodésique est la plus courte (ou la plus longue) trajectoire entre deux points voisins. Par exemple, la surface de la Terre est un espace courbe à deux dimensions. Une géodésique sur la Terre est appelée un grand cercle et c'est le plus court chemin entre deux aéroports quelconques. C'est la route qu'un navigateur indiquera au pilote de l'avion.

La masse du soleil incurve l'espace-temps de telle sorte que, bien que la Terre suive une trajectoire géodésique dans un espace-temps à quatre dimensions, elle nous apparaît comme se mouvant le long d'une orbite dans un espace à trois dimensions. En fait, les orbites des planètes prédites par la relativité générale sont très exactement les mêmes prédites par la théorie newtonienne de la gravitation. Cependant, dans le cas de

Mercure, la planète la plus proche du soleil qui en ressent les effets gravitationnels le plus fortement, la relativité générale prédit que le grand axe de l'ellipse devrait tourner autour du soleil au rythme d'environ un degré tous les dix mille ans. Aussi petit que soit cet effet, il avait été remarqué avant 1915 et a été l'une des premières confirmations de la théorie d'Einstein.

Les rayons lumineux doivent aussi suivre des géodésiques de l'espace-temps. Encore une fois, le fait que l'espace soit courbe signifie que la lumière ne peut plus apparaître dorénavant comme voyageant en ligne droite dans l'espace. La relativité générale prédit que la lumière devrait être déviée par les champs gravitationnels. Cela signifie que la lumière d'une étoile lointaine qui passerait près du soleil serait légèrement déviée ce qui fait que l'étoile n'apparaîtrait pas au bon endroit pour un observateur sur Terre. La prédiction d'Einstein sur la déviation de la lumière n'a pu être immédiatement vérifiée en 1915, à cause de la première Guerre mondiale. Ce n'est qu'en 1919 qu'une expédition britannique, observant une éclipse en Afrique Occidentale en apporta la preuve. Cette confirmation d'une théorie allemande par des savants anglais fut saluée comme un grand acte de réconciliation entre les deux pays. Il est assez drôle toutefois qu'un examen postérieur des photographies prises lors de cette expédition a révélé des erreurs aussi importantes que l'effet qu'elles étaient censées mesurer. Les mesures de l'époque découlèrent de la chance pure et simple, et sont typiques du cas où l'on connaît à l'avance le résultat de ce que l'on veut obtenir. Cela

n'est pas si rare en science. La déviation de la lumière a été, cependant, confirmée avec exactitude après nombre d'observations ultérieures.

Une autre prédiction de la théorie de la relativité générale est que le temps s'écoule plus lentement près d'un corps massif. Cette prédiction fut mise à l'épreuve en 1962, à l'aide d'une paire d'horloges très exactes installées au sommet et au pied d'une tour. On trouva que l'horloge du pied, plus près de la Terre, marchait plus lentement en accord avec la relativité générale. Cette différence de vitesses des horloges à différentes hauteurs au-dessus de la Terre est de nos jours d'une importance pratique considérable avec l'avènement de systèmes de navigation très exacts basés sur des signaux de satellites. Si l'on avait tenu aucun compte des prédictions de la relativité générale, les positions que l'on aurait calculées avec la mécanique newtonienne auraient été erronées. Une erreur aux conséquences désastreuses quand il s'agit de naviguer un superpétrolier dans un golfe étroit...

Les lois newtoniennes du mouvement ont mis fin à l'idée de position absolue dans l'espace. La théorie de la relativité s'est débarrassée du temps absolu. L'espace et le temps sont maintenant des quantités dynamiques. Ils n'affectent pas seulement tout ce qui arrive dans l'univers, ils en sont aussi affectés. Tout comme l'on ne peut parler d'événement dans l'univers sans notions d'espace et de temps, il est devenu dénué de sens en relativité générale de parler de l'espace et du temps hors des limites de l'univers.

Cette nouvelle compréhension de l'espace et du temps a révolutionné notre conception de l'univers. Au début du siècle, l'univers était perçu comme statique, immuable et éternel. La théorie de la relativité générale prédit, au contraire, un univers dynamique, en pleine expansion marqué par un début et possiblement une fin. Les découvertes faites au 20^e siècle confirment ces prédictions. Même Einstein, lorsqu'il formula sa théorie en 1915, était si sûr que l'univers devait être statique qu'il y introduisit une constante cosmologique, un facteur de correction, afin d'éviter que les équations prédisent un univers en expansion. Einstein n'arrivait pas à croire aux prédictions de ses propres équations ! Le physicien et mathématicien russe Alexandre Friedman, au contraire, prit les équations telles quelles et proposa l'explication suivante : l'univers semble identique quelle que soit la direction dans laquelle on regarde, et cela serait aussi vrai si nous observions l'univers de n'importe où ailleurs. Friedman conclut alors, tel que prédit par les équations d'Einstein, que nous ne devons pas nous attendre à ce que l'univers soit statique. Quelques années plus tard, Edwin Hubble, un astronome américain, découvrit que les galaxies s'éloignent d'autant plus vite qu'elles sont éloignées. L'univers se détend tel que prédit par la théorie de la relativité générale. Einstein regretta amèrement ce facteur de correction superflu. Un exemple où science et croyance ne font pas bon ménage.

LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

La mécanique quantique, essentiellement développée au cours des années vingt, permet de décrire les phénomènes à l'échelle microscopique, qui ne peuvent pas être compris à l'aide des théories classiques, telles que la mécanique newtonienne. Ainsi, la lumière et la matière peuvent se comporter suivant le type d'expériences dans lesquelles elles sont impliquées, soit comme une onde soit comme une particule. Alors qu'en mécanique classique, l'état d'un système matériel macroscopique peut être décrit de manière complète par la donnée, à tout instant, de sa position spatiale et de son impulsion (le produit de sa masse au repos par sa vitesse), il en va tout autrement en mécanique quantique, vu qu'il est impossible d'attribuer à une particule subatomique quelconque, à n'importe quel instant, une position et une impulsion simultanément bien définies.

Cette idée a été formalisée par Werner Heisenberg en un principe dit d'incertitude, qui constitue un des piliers de la mécanique quantique. Plus on mesure avec exactitude l'impulsion d'une particule plus grande est l'incertitude qui affecte la position de la particule et inversement. Si on était capable de déterminer la vitesse d'une particule quelconque dans l'univers avec une précision absolue, sa position serait complètement inconnue : elle pourrait se trouver n'importe où dans l'univers !

Ce principe d'incertitude s'applique également à d'autres couples de grandeurs physiques, comme l'énergie et le temps. Ainsi, la connaissance précise de l'énergie

d'une particule interdit de savoir pendant combien de temps cette particule peut demeurer dans cet état d'énergie. Cette forme du principe d'incertitude permet à des particules d'être créées pendant des périodes de temps très courtes même si l'énergie disponible pour le faire est insuffisante. L'énergie empruntée est alors restituée de façon à ce que les particules créées disparaissent peu après et ne puissent être observées individuellement.

Le principe d'incertitude a eu de profondes répercussions sur la façon dont nous envisageons le monde. Même après plus de cinquante ans, ses implications n'ont pas été entièrement admises par nombre de philosophes et font l'objet de polémiques. Le principe d'incertitude met fin au rêve de Laplace d'élaborer une théorie de la science et un modèle de l'univers complètement déterminé : comment prédire les événements futurs avec exactitude si l'on n'est même pas capable de mesurer l'état présent de l'univers avec précision ?

Le langage de la mécanique quantique est fondamentalement probabiliste. Seule, en effet, peut être évaluée la probabilité pour qu'une particule individuelle possède une certaine position ou une certaine impulsion, au moment où la mesure correspondante est effectuée. L'objet mathématique qui permet d'évaluer cette probabilité est la fonction d'onde. L'équation qui régit l'évolution temporelle de la fonction d'onde est la célèbre équation proposée par Erwin Schrödinger (1887-1961) au milieu des années vingt. Cette équation permet, par exemple, de prédire le phénomène naturel de désintégration

nucléaire Bêta des atomes lourds ou de calculer, de la même façon, la probabilité pour un être humain de passer sans mal à travers les murs...

La mécanique quantique introduit donc un élément inévitable de hasard dans la science. Einstein s'y opposa fermement en dépit du rôle important qu'il joua dans le développement de ces idées. Einstein, prix Nobel de physique pour sa contribution à la mécanique quantique, n'a jamais admis cependant que l'univers soit gouverné par le hasard. Il a exprimé son sentiment dans la célèbre boutade : « Dieu ne joue pas aux dés ». La plupart des autres scientifiques de son époque, et d'aujourd'hui d'ailleurs, admettent la mécanique quantique parce qu'elle s'accorde parfaitement avec l'expérience. Théorie exceptionnellement couronnée de succès, elle sous-entend presque toute la science moderne et la technologie. Elle gouverne le comportement des transistors et des circuits intégrés, qui sont les composantes essentielles de tous les appareils électroniques (télévision, ordinateurs, téléphones, photocopieurs, etc.). La mécanique quantique est aussi la base de la chimie moderne et de la biologie.

SCIENCE, PSEUDO-SCIENCE

ET

DÉMOCRATIE

Chapitre 6

Il m'arrive régulièrement de rencontrer des gens qui m'entretiennent d'extraterrestres, d'OVNIs, de perception extrasensorielle, de la puissance des cristaux, des prophéties de Nostradamus, d'astrologie, du suaire de Turin, de l'Atlantide, etc. Ces conversations sont, en général, à sens unique. Je me contente de les écouter avec plus ou moins d'attention, et de hocher la tête de temps en temps par politesse à l'égard de mon interlocuteur. Si, exceptionnellement, on me demande mon avis, ma réponse est toujours aussi laconique : l'évidence est faible, il y a sûrement une explication plus simple. Loin de décourager mon interlocuteur, cette réplique relance à chaque fois, et de plus belle, le monologue. Sans porter un jugement, ce qui me fascine le plus chez ces gens, c'est la passion que ces histoires éveillent en eux, c'est le goût de l'émerveillement qu'elles suscitent et l'acharnement avec lequel ils les défendent. Pourtant la progression et les découvertes de la science sont tellement plus fascinantes. Comment peut-on ne pas être émerveillé devant la découverte de molécules interstellaires qui pourraient être à l'origine de la vie sur Terre, ou ailleurs dans l'univers ? Comment peut-on rester impassible devant les photos de notre planète prises par les astronautes des missions Apollo ? Comment peut-on ignorer les prédictions extraordinaires de la mécanique quantique, les découvertes fascinantes de mondes bizarres qui peuplent notre univers ou l'invention de nouvelles molécules ?

Monsieur tout le monde connaît peu ou pas de choses à propos de la science moderne. La science ne le touche, dans sa vie quotidienne, qu'à travers des gadgets ou des informations souvent superficielles et prématurées, glanées à un bulletin de nouvelles télévisées. Certes, il est curieux, il veut connaître la science mais la science ne réussit pas à le rejoindre. La culture, le système d'éducation, les médias le laissent tomber. Ils ne lui ont jamais appris à distinguer la science de la supercherie. Le vrai du faux. Il ne connaît rien à propos de la démarche scientifique. Il est désespéré. Il doit, par conséquent, se satisfaire de ce qu'on veut bien lui présenter.

Des centaines de livres ont été écrits au sujet de l'Atlantide, ce continent mythique qui, dit-on, aurait existé il y a 10 000 ans dans l'océan Atlantique. Cette fable remonte à l'époque de Platon. Des livres récents vont jusqu'à décrire la technologie avancée de la civilisation Atlante, leurs valeurs spirituelles et morales et bien sûr la tragédie de son ensevelissement sous les vagues. Puis il y a l'Atlantide du nouvel âge (comme la musique), cette civilisation vouée au culte des cristaux. Dans une trilogie intitulée « Crystal Enlightenment » de Katrina Raphaell, les cristaux de l'Atlantide permettaient, rapporte-t-elle, de lire les pensées d'autrui, de communiquer par télépathie, et même d'emmagasiner l'histoire du monde. Cette trilogie vendue à des millions d'exemplaires en Amérique est, semble-t-il, à l'origine de cet engouement pour les cristaux. Pourtant, aucune preuve scientifique ne supporte ces assertions. N'est-il pas étonnant, d'ailleurs, qu'on retrouve rarement dans les bibliothèques publiques, kiosques à journaux, ou

émissions de télévision, des images reconstituées ou des relevés topographiques du fond de l'océan qui montrent hors de tout doute qu'il n'existe aucune preuve qu'un tel continent ait pu exister entre l'Amérique et l'Europe ?

Les ouvrages sceptiques sont plus difficiles à trouver. Le scepticisme ne vend pas. Un individu curieux et intelligent qui dépend entièrement de la culture populaire pour être informé à propos de questions telles l'Atlantide a beaucoup plus de chances de tomber sur une fable que de dénicher un traité sobre et critique.

Des sondages récents effectués en Amérique montrent que 95 % de la population ne maîtrise même pas les notions scientifiques les plus élémentaires. La population est illettrée scientifiquement. Le même pourcentage d'analphabétisme prévalait chez les esclaves noirs avant la Guerre de sécession, une époque où vous étiez en danger de mort si on vous surprenait à enseigner à lire à un esclave. Il y a 2 400 ans, Platon déplorait déjà le manque de culture scientifique de ses contemporains. Je ne sais à quel point l'ignorance des sciences et des mathématiques a contribué au déclin d'Athènes, mais les conséquences de l'illettrisme scientifique sont infiniment plus dangereuses à notre époque qu'à toute autre époque auparavant. Il est périlleux pour le citoyen, l'électeur et l'élus, de ne pas comprendre des enjeux aussi cruciaux que le réchauffement global de la planète, l'amincissement de la couche d'ozone, la pollution de l'environnement, les déchets toxiques et radioactifs, les pluies acides, l'érosion des sols fertiles, la désertification, la déforestation, la croissance exponentielle de la population. Nos emplois, notre bien être et

celui de nos enfants dépendent de la science et de la technologie. Si notre nation, peu importe laquelle, ne peut pas créer des produits de qualité et à bon marché, les industries vont continuer à périliter et à déménager ailleurs dans le monde. Imaginez un instant les ramifications sociales, économiques et culturelles de la fission et de la fusion nucléaire, des superordinateurs, des télécommunications, de l'avortement thérapeutique, du radon, de la télévision à haute résolution, de la sécurité aérienne, des transplantations d'organes, des produits de conservation et des additifs alimentaires, des médicaments, des droits de l'homme, de la supraconductivité, des méthodes de contraception, des maladies héréditaires, du génie génétique, des stations orbitales, du cancer et du SIDA. Comment peut-on, comme citoyen, choisir et décider intelligemment et lucidement si on ne comprend pas ces enjeux ? En ces temps de lutte au déficit et de rationalisations budgétaires, les gouvernements fédéral et provinciaux, malgré des discours démagogiques sur l'importance de la recherche et du développement, coupent aveuglément dans l'éducation, dans les universités et dans les laboratoires nationaux. Que peut-on attendre d'une classe politique illettrée scientifiquement ? Avons-nous déjà eu un premier ministre doté d'une solide formation scientifique ? Aux États-Unis, le dernier président avec des connaissances scientifiques fut Jimmy Carter. Ingénieur nucléaire de formation, il comprenait plus que tout autre politicien l'horreur d'un conflit nucléaire avec l'URSS et il utilisa tout son pouvoir pour détendre les relations avec ce pays. Malheureusement, son successeur, un acteur aussi inculte qu'arrogant, relança la course insensée aux armements nucléaires. Sous l'administration Reagan, les États-Unis engouffrèrent près de 5 000 milliards de dollars dans l'armement creusant un déficit plus grand que la somme de tous

les déficits des gouvernements précédents remontant jusqu'à George Washington ! Avec une telle somme il aurait été possible d'éliminer la faim, l'analphabétisme, la pauvreté et l'ignorance dans le monde entier. On aurait pu développer l'agriculture et la rendre autosuffisante sur toute la planète atténuant ainsi les conflits et les guerres. La richesse qui aurait rejailli sur l'Amérique aurait été déferlante et fabuleuse.

Hippocrate est reconnu comme étant le père de la médecine. Après 2 500 ans, au moment d'être reçu médecin, on prononce toujours son célèbre serment. Pourtant Hippocrate est davantage reconnu pour les efforts qu'il a déployés afin d'extirper la médecine de la superstition et de lui insuffler de la science. Il abhorrait l'idée d'assigner un dieu à tout phénomène incompris. Pour lui l'épilepsie n'avait rien d'une intervention divine. C'était quelque chose qu'on ne comprenait pas et qu'il fallait élucider. Hippocrate introduisit donc le diagnostic de maladies, ce que l'on reconnaît aujourd'hui comme étant l'un des éléments de la méthode scientifique. Il prônait l'observation attentive et méticuleuse. « Rien ne doit être laissé au hasard » disait-il. « Relevez même des observations contradictoires puis réfléchissez-y. » Honnête, il admettait les limites de ses connaissances. Plus de la moitié de ses patients moururent de diverses maladies qui aujourd'hui sont considérées bénignes. Il faut dire, à sa décharge, qu'il ne pouvait compter que sur peu de médicaments : quelques laxatifs et quelques narcotiques.

Pendant que la médecine florissait dans le monde islamique, l'Europe s'enfonçait dans la grande noirceur. Les connaissances acquises en anatomie et en chirurgie

d'Hippocrate jusqu'au déclin de l'Empire romain (VI^e siècle) disparaissaient. On s'en remettait de plus en plus aux prières et aux cures miraculeuses. Incantations, potions, horoscopes et amulettes étaient surtout utilisées. La dissection de cadavres était sévèrement limitée ou interdite, et ceux qui la pratiquaient ne pouvaient s'adonner à la médecine. La recherche médicale était au point mort (sans jeu de mots).

À ce propos, l'histoire du médecin André Vésale, professeur d'anatomie à l'Université de Padoue, illustre cruellement le climat de superstition qui régnait à cette époque en Europe. S'adonnant à la dissection de cadavre, Vésale infirma plusieurs croyances (et connaissances) admises depuis des siècles. Il découvrit, par exemple, que la mâchoire n'est pas constituée de deux os mais d'un seul, que l'os de la cuisse n'est pas incurvé comme celui chez la race canine et que les corps de l'homme et de la femme comptent le même nombre de côtes. En collaboration avec l'artiste Jan Calcar, Vésale publia en 1543 un remarquable ouvrage d'anatomie en sept volumes intitulé : « À propos de la structure du corps humain ». Cette publication marque le début de la science moderne de l'anatomie. Elle souleva aussi l'ire de plusieurs collègues médecins et fut critiquée sévèrement puis proscrite par l'église catholique. N'y tenant plus, Vésale brûla ses notes et devint médecin particulier à la cour de Charles V. Vingt ans plus tard, il fut surpris renouant avec sa passion de pathologiste. Pour le punir, l'Empereur lui imposa un pèlerinage en terre sainte. En chemin, le navire à bord duquel il s'était embarqué fit naufrage et il mourut de faim dans l'île de Zante.

Anne fut la dernière reine d'Angleterre de la lignée des Stuart. Dans les dernières dix-sept années du 17^e siècle, elle fut enceinte dix-huit fois. Treize de ses enfants furent morts nés, un seul franchit l'enfance et n'atteignit pas l'âge adulte. Pourtant, à cette époque, la reine Anne avait accès aux meilleurs soins de santé qu'on pouvait se permettre dans le monde occidental.

Des maladies qui autrefois fauchaient sans vergogne d'innombrables enfants ont été éradiquées par la science grâce à la découverte du monde microbiologique. L'hygiène, la stérilisation des instruments, la nutrition, les mesures de santé publique, les antibiotiques, les médicaments, les vaccins, la découverte de la structure et de la fonction de l'ADN, la biologie moléculaire et la thérapie génétique sont responsables de l'essor de la médecine. Dans les pays développés, les parents ont énormément plus de chances de voir leurs enfants grandir en santé qu'en avaient les plus puissants monarques à la fin du 17^e siècle. La petite vérole a été éliminée de la planète. Les régions de la Terre infestées de moustiques porteurs de la malaria rétrécissent. L'espérance et la qualité de vie des enfants atteints de leucémie croît d'année en année. La science moderne permet de nourrir cent fois plus d'humains et dans de meilleures conditions qu'il y a mille ans. On peut prier pour les victimes du choléra ou on peut leur administrer une dose de 500 mg de tétracycline à toutes les douze heures. Pourtant, au moment où j'écris ces lignes, il y a une religion, la Science Chrétienne, qui réfute l'origine germinale de ces maladies. Si la prière n'y peut rien, ces croyants préfèrent voir leurs enfants mourir que de leur donner des antibiotiques. A-t-on demandé l'avis de ces enfants ?

Abandonner la science c'est bien plus que renoncer à l'air climatisé, aux disques compacts, à Internet et à la voiture performante. Au paléolithique, il y a plus de 10 000 ans, avant l'invention de l'agriculture, l'espérance de vie était de 20 à 30 ans. Elle n'avait guère changée au Moyen Âge (14^e siècle). À la fin du 19^e siècle, elle était de 40 ans. Elle atteint 50 ans en 1915, 60 ans en 1930 et 70 ans en 1955. Aujourd'hui, elle approche les 80 ans. Quelle est la cause de cette progression spectaculaire ? La prière ? La religion ? Ou la théorie germinale des maladies, les mesures de santé publique, la médecine moderne et les découvertes scientifiques ?

L'espérance de vie est probablement le meilleur indice de la qualité de vie. Si on est mort, la qualité de vie n'a plus aucune importance. Le plus beau cadeau de la science à l'humanité, c'est la vie. Mais il y a l'envers de la médaille. Des microorganismes sont en mutation. De nouvelles maladies apparaissent et se répandent. Une guerre est engagée entre les microbes et les virus nuisibles et l'homme. On peut mener ce combat non seulement en inventant de nouveaux traitements et de nouveaux médicaments mais aussi en approfondissant progressivement nos connaissances de la nature (recherche fondamentale).

Pour que la Terre supporte 10 à 12 milliards d'individus à la fin du 21^e siècle (d'ailleurs devra-t-elle supporter une telle population ?), on devra inventer une agriculture plus durable accompagnée de systèmes d'irrigation, de fertilisation, de transport, de

réfrigération et de stockage plus efficaces. Il faudra également promouvoir le contrôle des naissances, l'éducation, l'égalité des hommes et des femmes et l'amélioration des conditions de vie des pays sous développés. Comment peut-on envisager ces problèmes sans l'apport de la science et de la technologie ?

Mais la science est le fruit de l'homme. Et où il y a l'homme, il y a de <<l'hommerie>>. Des scientifiques ont conçu la bombe atomique et la bombe à hydrogène et, exacerbé par la guerre froide et l'avidité de l'industrie militaire, on a produit plus de 70 000 de ces engins de la mort. En 1985, on estimait à 16 000 mégatonnes la puissance destructive de l'ensemble des ogives nucléaires sur la planète Terre. Une folie insensée. Une seule bombe de quelques mégatonnes explosant à une hauteur convenable au-dessus du Mont-Royal tuerait instantanément, par l'effet de souffle et de chaleur, la plupart des êtres vivant sur l'île de Montréal ; à plus ou moins long terme, les habitants de la banlieue (Laval, Longueuil, Brossard, etc.), périraient massivement par l'effet des radiations, des retombées, de la famine, du manque de soins et de l'anarchie généralisée. Pendant la guerre froide, des militaires des États-Unis, de l'Union Soviétique, de la Chine et d'autres nations, ont exposé leurs propres concitoyens à des doses mortelles de rayonnement ionisant en vue de préparer une guerre nucléaire. Étrangement, au moment où je relis ces lignes (mai 1998), l'Inde suivie du Pakistan, deux pays pauvres et aux prises avec de graves problèmes sociaux, viennent tout juste d'effectuer des essais nucléaires afin de démontrer, je présume, leur puissance technologique.

Les cruautés perpétrées par les médecins nazis aux cours de la 2^e Guerre mondiale n'en sont pas moins connues et infâmes. La science et la technologie ont produit la thalidomine, les CFC, l'agent orange, les gaz paralysants, la pollution de l'air et de l'eau, l'extinction de centaines d'espèces vivantes et des industries qui menacent le climat de la planète. Près de la moitié des scientifiques de la Terre travaille plus ou moins directement pour l'industrie militaire. Ce sont des ingénieurs machiavéliques qui ont conçu des mines antipersonnel faites de matériaux non-métalliques les rendant difficilement détectables une fois enfouies dans le sol. Leurs éclats, conçus pour déchiqueter les chairs et blesser gravement la victime sans toutefois la tuer immédiatement (puisque'un blessé grave nécessite des soins coûteux), sont transparents aux rayons X. Il devient alors presque impossible pour le médecin traitant de retrouver tous les fragments et de les retirer du corps de la victime lui infligeant de longues souffrances insoutenables.

En 1998, on estimait à plus de 100 millions le nombre de ces mines dispersées dans 70 pays dont la plupart sont en voie de développement. Chaque année, 26 000 personnes sont tuées et des centaines de milliers d'autres sont estropiées par l'explosion de mines. Qu'à cela ne tienne. Le marché de la mine est légal et lucratif. Elle se vend à plusieurs centaines de dollars pièce alors que son coût moyen de fabrication n'est que de trois dollars. Déminer toutes les terres arabes sur la planète coûterait très cher. Et qui payerait ? Une lueur d'espoir cependant : des chercheurs du Centre des technologies de Savannah River en Caroline du Sud étudient des bactéries luminescentes qui vivent dans le sol et qui s'alimentent de trinitrotoluène. Cette substance explosive, plus connue sous

le nom de T.N.T., est émise, estime-t-on, par 90 % des mines. Saupoudrées dans un champ miné, ces bactéries se rassembleront naturellement autour des mines les rendant visibles à l'œil la nuit. Une fois la mine retirée du sol, les bactéries meurent faute de nourriture.

Il n'est pas surprenant alors que l'homme de la rue craigne la science et la technologie. L'image du scientifique à demi fou (D^r Frankenstein, D^r Strangelove, Jurassic Park) est bien ancrée et perpétuée.

Malgré tout, on ne peut pas conclure que la science met entre les mains de dirigeants démesurément ambitieux et de politiciens corrompus trop de pouvoir et donc décider de s'en départir. Les progrès de la médecine et de l'agriculture ont sauvé beaucoup plus de vies humaines que toutes les guerres en ont fauchées. Les progrès dans les transports et les communications ont transformé le monde et rapproché ses habitants. Le sabre de la science est à deux tranchants. Il nous incombe, nous les scientifiques et nous les ingénieurs, d'exercer une grande vigilance et de faire preuve de responsabilité à l'égard des conséquences que la technologie peut entraîner. **Nous n'avons pas hérité de la Terre de nos parents ; nous l'empruntons à nos enfants.**

Découvrir que l'univers est âgé de 15 milliards d'années nous permet de saisir sa grandeur. Réaliser que nous sommes faits de milliards de cellules chacune constituée de milliards de molécules et d'atomes, les mêmes qui alimentent la combustion nucléaire des

étoiles les plus lointaines nous fait prendre conscience que nous n'émergeons pas d'une étincelle divine mais que nous sommes plutôt le fruit d'une complexité croissante. Observer que notre planète est un monde parmi des milliards dans la voie lactée et que la voie lactée est une galaxie parmi des milliards dans l'univers nous rend plus humbles. Trouver que nos ancêtres furent les descendants des singes (nous partageons avec le chimpanzé 99,6 % des gènes) nous rapproche et ne peut qu'accroître notre respect pour toutes les formes de vie sur la Terre.

Qu'on le veuille ou non, qu'on aime ou pas, nous sommes pris avec la science. À nous alors de l'utiliser à bon escient. Mais la superstition et les pseudo-sciences sont omniprésentes dans les médias électroniques et les journaux. Un des salons les plus courus à Montréal est le salon des sciences occultes. Les librairies populaires regorgent de livres à propos d'ésotérisme, d'arts divinatoires, d'OVNIs, d'extra-terrestres, d'énergies pyramidale, affective, amoureuse ou sexuelle, d'anges gardiens, de sorcières, de réincarnation, de prophéties des Andes, du tarot, de la cartomancie, d'astrologie, de magie, des nombres du bonheur, d'affinités astrales, des rêves et des symboles mystérieux, de vies antérieures, des codes secrets de la bible, etc. Oui je l'avoue, le monde serait plus excitant si on pouvait se balader à bord d'OVNIs ou si les morts se mettaient à communiquer avec nous par l'entremise de nos pensées. Ne serait-il pas fascinant de prédire notre avenir avec une boule de cristal ou de déplacer des objets par la seule puissance de la concentration ?

Une pseudo-science est plus facile à inventer qu'une science car elle n'a pas à être confrontée à la réalité. Elle n'a pas le fardeau de la preuve sinon ce ne serait plus une pseudo-science. Mais cela ne peut expliquer entièrement la popularité des pseudo-sciences. Les pseudo-sciences comblent des besoins émotionnels que la science délaisse parfois. Il est tellement plus rassurant pour le Sagittaire de savoir que demain sera une journée bien remplie agrémentée d'une rencontre séduisante que d'entendre parler de l'amincissement de la couche d'ozone ou des effets du tabagisme sur la santé. Il n'est pas faux de prétendre que la pseudo-science est aussi populaire que la science est incomprise. Des religions sont souvent le berceau de la pseudo-science. Dans certains pays, on croit fermement, incluant les leaders politiques, à l'astrologie. Dans les années septantes, Uri Geller, d'Israël, en a épaté plus d'un grâce à son regard perçant et sa capacité de faire plier des cuillères en les caressant doucement. En Allemagne, on est préoccupé par des « rayons terrestres » non détectables par la science moderne. La chirurgie psychique fleurit aux Philippines. Les fantômes sont une obsession nationale en Angleterre. Le Japon est une pépinière de nouvelles religions et le pays compte plus de 100 000 entreprises de diseuses de bonne aventure. En Thaïlande, on traite des maladies à l'aide de pilules de textes sacrés pulvérisés. Des « sorcières » sont brûlées vives aujourd'hui en Afrique du Sud. L'astrologie est une religion aux Indes et la géomancie largement répandue en Chine. Le Québec n'est pas en reste avec ses disciples du temple solaire ou de Raël.

Peut-être la pseudo-science la plus lucrative, et qui est devenue jusqu'à un certain point une religion, est la doctrine Hindoue de la méditation transcendante (MT). Son fondateur et leader spirituel est le yogi Maharishi Makesh. Apparaissant sur toutes les télévisions du monde entier, assis en position de yogi et entouré de fleurs, cet homme à la chevelure et à la barbe hirsutes, a bâti un empire estimé à quatre milliards de dollars. Moyennant un généreux don, vous apprendrez, grâce à la méditation transcendante, à traverser les murs (sans passer bien sûr par une porte ou une fenêtre), à vous faire invisible et à voler. Les disciples du yogi prétendent être responsables, seulement par la pensée, de la chute du mur de Berlin et de l'effondrement du communisme. Makesh contrôle des entreprises d'import-export, des cliniques médicales, et même des universités....

La Russie présente un cas fort intéressant. Sous le régime tsariste, qui prit fin par l'éradication de la famille de Nicolas II en juillet 1918, la superstition religieuse était encouragée mais l'esprit critique était brutalement réprimé. Ivan dit le terrible qui régna de 1547 à 1584 était aussi religieux que cruel. Sadique et mystique à la fois, il se considérait comme le vicaire de Dieu sur la Terre. À genoux, entre deux oraisons, il donnait des ordres les plus sauvages.

Parmi tous les tsars, Pierre le Grand fit exception. Quand ce géant parut aux portes de Moscou, le 6 octobre 1689, le peuple hurla sa joie et pleura d'émotion. À dix-sept ans, il montait sur le trône des tsars et s'abattait comme une tornade sur son pays, pour le tirer de sa torpeur et l'imposer à une Europe médusée. Il sacrifia les Russes à la gloire de la

Russie : il coupa des têtes, rasa les barbes, arracha des dents, donna une marine à la Russie, édifia St-Petersbourg sur des marais... Pendant tout son règne, qui s'acheva en 1725, il combattit avec acharnement et souvent avec brutalité, il faut bien le dire, les superstitions séculaires de son pays et ouvrit ses frontières au vent de renaissance balayant l'Europe de l'Ouest.

Sous le régime communiste, la religion et la pseudo-science furent systématiquement supprimées. L'esprit critique, excepté peut-être parmi des scientifiques isolés, était une activité intellectuelle périlleuse et punie sévèrement. La science, au service et à la gloire des républiques socialistes, fut, au contraire, élevée au rang de dogme. Après la chute du mur de Berlin en 1989, plusieurs russes devinrent méfiants à l'égard de la science. Le résultat ne se fit pas attendre. Aujourd'hui guérisseurs, fumistes et charlatans, sont de retour. L'espérance de vie a chuté dramatiquement depuis 1989. La mortalité infantile est alarmante et des épidémies incontrôlables se déclarent. L'ultra-nationaliste Vladimir Zhirinovsky, membre de la Douma, prétend guérir des maladies allant du simple rhume au SIDA simplement en vous regardant à travers votre poste de télévision.

Une situation un peu semblable prévaut également en Chine. Suite au décès de Mao Zedong et à l'émergence d'une économie de marché, les OVNI et autres pseudo-sciences de l'Ouest ainsi que des rites ancestraux tels l'astrologie et la bonne aventure resurgissent.

Ainsi la pseudo-science ne croît pas qu'en Amérique. Ce phénomène est mondial. Des charlatans achètent du temps d'antenne avec l'assentiment des grands réseaux de télévision. Il existe même au États-Unis un réseau de télévision « Psychic Friends Network » qui recrute plus de un million de nouveaux membres chaque année. Des fumistes spécialisés conseillent des PDG, des analystes financiers, des banquiers ou des avocats. Pendant ses deux mandats à la présidence des États-Unis, Ronald Reagan consultait régulièrement, bien sûr à l'insu de ses électeurs, un astrologue sur des questions d'intérêt public. N'est-il pas horrifant d'apprendre que les décisions de l'homme le plus puissant de la planète étaient influencées par des charlatans ?

La science progresse lentement par essais et erreurs. De fausses conclusions sont continuellement tirées et les hypothèses admises au départ sont corrigées, formulées à nouveau, confrontées à l'expérience et à l'observation. Les idées s'entrechoquent, sans aucun égard aux sentiments et aux croyances des scientifiques. Nos connaissances de la nature évoluent. La science ne peut progresser qu'en s'auto-critiquant et qu'en s'auto-corrigeant. En bombardant des noyaux d'Uranium-235 avec des neutrons lents, le phénomène de fission sera déclenché peu importe la nationalité, la couleur, le sexe, la langue ou les croyances religieuses des scientifiques qui effectuent l'expérience.

La pseudo-science progresse tout à fait à l'opposé. Les hypothèses, lorsqu'elles existent, sont formulées de façon à ce qu'elles ne puissent être vérifiées expérimentalement. Donc, en principe il est impossible de les invalider. Les tenants de

la pseudo-science sont sur la défensive. Le scepticisme est formellement interdit et toute discussion sensée hors de question.

La capacité motrice chez les gens en bonne santé est remarquable. On peut apprendre à marcher, à patiner, à sauter à la corde ou à conduire une voiture et s'en souvenir tout notre vie durant. On peut enfourcher un vélo dix ans plus tard et retrouver instantanément la griserie d'autrefois. Cette habileté, chez l'humain, de retenir et de maîtriser si facilement ses capacités motrices lui confère cependant une confiance aveugle dans tous ses talents. Nos perceptions sont faillibles. Nous sommes bons dans certaines activités mais pas dans toutes. La sagesse repose sur la reconnaissance de nos limites. Voilà une distinction entre la science et la pseudo-science. La science circonscrit les imperfections et les limites humaines alors que la pseudo-science les ignore (ou les exploite).

En ce sens, je me demande comment l'homme de la rue (et l'étudiant) peut faire pour distinguer la science de la pseudo-science si on ne lui enseigne que les résultats et les découvertes de la science sans lui communiquer la méthodologie critique sur laquelle ils reposent. La méthode scientifique, aussi imparfaite, ardue, rébarbative et parfois ennuyeuse puisse-t-elle paraître, est, en fin de compte, aussi importante que les découvertes auxquelles elle donne lieu.

Nous avons construit une civilisation dont les éléments principaux (les transports, les communications, l'industrie, l'agriculture, la médecine, l'éducation, la protection de l'environnement et même la démocratie) reposent entièrement sur la science et la technologie. Nous avons également fait les choses de sorte que peu de gens comprennent la science et la technologie. Cette recette est désastreuse. On peut s'en sortir pendant un certain temps, mais tôt ou tard ce mélange volatile d'ignorance et de puissance va exploser. Au cours de l'histoire, des civilisations entières se sont éteintes non pas à cause de la stupidité mais à cause de l'ignorance. Bien sûr la science ne peut tout expliquer. Combien de mystères, même encore inconnus, restent-ils à élucider ? Dans un univers comprenant, estime-t-on, au-delà de 10^{80} particules et de diamètre de quelques dizaines de milliards d'années-lumière, je pense que la science ne pourra jamais tout expliquer. Chaque année des découvertes extraordinaires sont faites. La science est une tentative, relativement réussie, de comprendre le monde. La science est loin d'être un instrument parfait de la connaissance. C'est simplement ce que nous avons de mieux. En ce sens, la science ressemble à la démocratie. La science ne peut pas dicter nos actions, mais plutôt nous éclairer sur les conséquences de celles-ci.

Les données expérimentales dans toutes publications scientifiques sont toujours accompagnées de barres d'erreur. Elles nous rappellent qu'aucune connaissance est complète ou parfaite. Elles permettent de pondérer la certitude dans ce que nous pensons connaître. Si les barres d'erreur sont petites, alors la précision des connaissances empiriques est élevée. Au contraire, si elles sont grandes, l'incertitude des connaissances

est appréciable. Exception faite des mathématiques pures, rien n'est certain. (On peut toujours prétendre que la mort est une certitude. Encore faut-il préciser la mort biologique.)

L'humain peut aspirer à la vérité absolue. Plusieurs religions prétendent l'avoir atteinte. Mais l'histoire des sciences, de loin la tentative humaine la plus réussie d'accession au savoir, nous enseigne que ce que nous pouvons espérer de mieux c'est une amélioration progressive de nos connaissances, à travers nos erreurs. La vérité absolue nous échappera toujours. La prochaine génération réduira, au mieux, les barres d'erreur...

Un des grands commandements de la science, si je puis m'exprimer ainsi, est « méfiez-vous de l'autorité ». À nouveau, l'histoire des sciences montre qu'aucune idée, qu'aucune théorie, qu'aucune découverte, soit-elle le fruit du plus grand scientifique, n'est admise sans critique. Je reviendrai plus tard sur ce point avec un exemple au sujet de la théorie générale de la relativité.

La science peut être difficile à comprendre. Elle peut défier les croyances les plus sacrées. Placée entre les mains de politiciens irresponsables ou d'industriels peu scrupuleux, ses produits peuvent mener à des armes terribles ou menacer l'environnement. Mais une chose est certaine : la science livre la marchandise. Par exemple, pour connaître la prochaine éclipse du soleil, on peut toujours consulter un astrologue mais il serait préférable de s'en remettre à la science. L'astronome pourra vous indiquer à la

minute près quand se produiront les éclipses partielles, totales ou annulaires au cours du millénaire à venir et quel sera le point sur la planète Terre le plus favorable à leur observation. On peut toujours aller chez le charlatan pour guérir une anémie chronique, ou prendre de la vitamine B₁₂. Si l'on veut sauver un enfant de la polio, la prière peut reconforter mais l'inoculation fera le travail. On peut s'en remettre à la cartomancienne pour déterminer le sexe d'un fœtus (statistiquement elle a 50 % de chances de réussite) ou s'en remettre à l'échographie ou à l'amniocentèse (99% de précision).

Pensez un instant à toutes ces religions qui ont tenté et qui tentent toujours de se valider à travers leurs prophéties. Pensez à tous ces fidèles qui s'appuient sur ces prophéties aussi vagues, aussi vides soient-elles pour nourrir leurs croyances. Y a-t-il eu dans l'histoire du monde une religion dont les prophéties ont été aussi précises et fiables que les prédictions scientifiques ? Doit-on alors percevoir la science comme religion ? Halte là ! La science n'est pas une religion. Elle n'est pas une doctrine. On ne croît pas dans la science. La science est une façon de penser et de faire les choses. S'il existait une institution humaine fonctionnant mieux que la science, avec tous les mécanismes de transparence, de critique et d'autocorrection, j'y souscrirais immédiatement. Mais pour l'instant il n'y en a pas. La science, même imparfaite, est ce que nous avons de mieux.

Au risque de me répéter, la raison pour laquelle la science fonctionne si bien est qu'elle s'est dotée de règles d'autocorrection. Il n'y a pas de questions interdites en science, il n'y a pas de sujets tabous, peu importe les sensibilités et les croyances. Cette

ouverture d'esprit, conjugée à l'examen rigoureux et sceptique des idées se retrouve peut-être dans une seule autre institution humaine : la démocratie. La diversité et les débats sont encouragés. Au-delà de la race, de la couleur, de la nationalité, de la langue et de la religion, ce qui compte, c'est de démontrer et défendre ce que l'on avance aux critiques.

L'étudiant a les mains moites et tremblantes et la bouche sèche. Sa cravate lui cisaille la gorge. Il fait chaud dans la pièce. Le tableau est couvert de symboles hétéroclites. Il n'arrive pas à répondre correctement à la dernière question qui lui a été posée. Depuis des années qu'il prépare cet examen doctoral. Il se doit de démontrer à ce comité d'experts critiques qu'il a les connaissances et le savoir faire pour poursuivre ses études doctorales.

Le chercheur a enfin reçu des nouvelles à propos de l'article scientifique qu'il a soumis pour publication. Fébrilement, il décachète l'enveloppe et parcourt rapidement la lettre. Ouf ! L'article est accepté mais des corrections et des précisions devront être apportées. Les critiques sont sévères mais justes. Elles ne lui sont pas adressées personnellement. Elles ne concernent que les résultats d'un travail qu'il poursuit avec acharnement depuis deux ans et qu'il a exposé dans cet article. Le comité d'experts, des collègues dans le même domaine et dont il ignore le nom, ont relevé des points à éclaircir. Pourquoi avoir retenu telle hypothèse ? Justifiez le calcul d'erreur. Démontrez le résultat. Précisez les conclusions.

Ces deux exemples illustrent la vie du scientifique. Que ce soit au moment de déposer une demande de subvention, de soumettre un article, de présenter une conférence, de faire une demande de promotion, ses activités sont constamment passées à la loupe. La critique fait partie du quotidien. Pourquoi subir tout ça ? Aillons-nous être critiqués constamment ? Je ne le crois pas. Le scientifique est humain et l'humain n'aime pas être l'objet de critiques. Le scientifique éprouve un sentiment de pérennité à l'égard de ses idées et de ses découvertes. Ce n'est pas facile de les voir critiquées parfois même démolies. Mais quelle joie, quelle euphorie, quelle fierté éprouve-t-il lorsqu'elles ont franchi la barrière des critiques et qu'elles sont finalement acceptées par la communauté scientifique.

Certaines gens perçoivent la science arrogante en particulier lorsqu'elle s'attaque à des croyances séculaires. Aussi choquant qu'une secousse sismique qui se permet de dérober le sol immuable sous nos pieds. Prenons un exemple. L'attraction gravitationnelle est inversement proportionnelle au carré de la distance. Cette loi, énoncée par Newton en 1686, est considérée comme une des réalisations les plus importantes de l'esprit humain. Trois cents ans plus tard, on l'utilise toujours pour prédire les prochaines éclipses. Des années après son lancement, la sonde spatiale atteint un point précis en orbite autour d'une autre planète, prédit par la loi de Newton (légèrement corrigée). La précision est stupéfiante. Newton savait ce qu'il faisait.

Mais les scientifiques sont insatisfaits. Ils ont cherché la faille dans l'armure newtonienne et ils l'ont trouvée. À des vitesses s'approchant de la vitesse de la lumière et en présence de champs gravitationnels intenses, la mécanique newtonienne s'effondre. Au début du siècle, un jeune employé du bureau des brevets de Berne, en Suisse, du nom d'Albert Einstein, aborde ce problème. En 1905, il présente sa théorie de la relativité restreinte et en 1915 sa théorie de la relativité générale. Cette œuvre, d'un seul homme, est aussi colossale que la découverte de Newton. Au-delà de toute théorie scientifique, elle influencera profondément la pensée humaine. Peut-on, pour autant, prétendre qu'Einstein s'est attaqué à Newton ? Bien au contraire. Einstein ne fit que repousser les frontières du savoir.

Dans la vie quotidienne, dans des conditions que nos sens peuvent percevoir, les théories de la relativité restreinte et générale sont semblables à la mécanique newtonienne. Leurs prédictions sont exactement les mêmes. Toutefois, hors de ces limites, les prédictions des théories de la relativité sont renversantes. Et pourtant, elles sont, jusqu'à présent, en parfait accord avec les observations expérimentales. La mécanique newtonienne est donc une approximation de la réalité, une approximation qui dans la plupart des cas de la vie quotidienne est suffisamment précise. Alors la théorie de la relativité générale est une vérité ? Non. C'est une théorie et elle le demeurera. Jusqu'à ce jour elle a passé tous les tests. Mais les scientifiques cherchent à nouveau la faille. Par exemple, cette théorie prévoit l'existence d'ondes gravitationnelles. Elles n'ont jamais été

détectées directement. On cherche. Si elles n'existent pas alors c'est tout un pan de la théorie qui croule.

Les pulsars sont des étoiles à neutrons, aux limites de l'univers, tournant rapidement sur elles-mêmes et émettant des rayons X détectables avec une grande précision sur Terre. Deux pulsars très denses, en orbite, devraient irradier des ondes gravitationnelles qui, avec le temps, vont perturber leur orbite et la période de rotation. Joseph Taylor et Russel Hulse de Princeton University ont utilisé cette méthode pour vérifier les prédictions de la théorie générale de la relativité. Ils s'attendaient à des mesures contraires à la théorie de la relativité générale, ce qui aurait renversé un des piliers de la physique moderne. Non seulement étaient-ils prêts à défier cette théorie mais ils y furent encouragés par la communauté scientifique. Leurs observations s'avérèrent en parfait accord avec la théorie. En 1993, ils partagèrent le prix Nobel de physique pour cette expérience.

Les efforts pour mettre à l'épreuve la théorie générale de la relativité, de même que toute autre théorie scientifique d'ailleurs, vont se poursuivre. On sait que la théorie de la relativité générale est inadéquate au niveau quantique, mais même si elle était valable à toutes les échelles de grandeur et pour toujours comment pourrait-on en être plus convaincu qu'en cherchant constamment à déterminer ses failles et ses limites ?

C'est la raison majeure pour laquelle les religions organisées ne m'inspirent aucune confiance. Quel leader religieux reconnaît que les croyances qu'il prône sont incomplètes ou erronées et est prêt à établir des mécanismes indépendants pour déterminer les failles et les limites de sa doctrine ?

On rapporte qu'il y a quelques décennies, à l'occasion d'un dîner, on demanda au physicien Robert W. Wood de porter un toast à la physique et à la métaphysique. La métaphysique représente la philosophie. Mais elle peut aussi bien englober la pseudo-science. Wood sauta sur l'occasion et répondit à peu près en ces termes : « Le physicien a une idée. Plus il y pense, meilleure elle lui semble. Il consulte la littérature scientifique. Plus il lit, plus prometteuse apparaît son idée. Il conçoit une expérience, descend au laboratoire et la met en œuvre. L'expérience est délicate. Les mesures sont recueillies. L'expérience est reprise. La précision des mesures est raffinée. Les barres d'erreur sont réduites. Le physicien se consacre à ce que l'expérience lui enseigne. À la toute fin, après un examen méticuleux des résultats, il découvre que ce n'était pas une bonne idée. Il oublie cette idée et passe rapidement à autre chose. La différence alors entre le physicien et le métaphysicien n'est pas que l'un soit plus intelligent que l'autre. La différence est que le métaphysicien n'a pas de laboratoire. »

Il y a quatre raisons principales pour lesquelles il est impératif d'éduquer scientifiquement chaque citoyen par l'intermédiaire de la radio, de la télévision, de films, de journaux, de livres, de programmes d'ordinateurs, de parcs thématiques et surtout bien

sûr de l'école. Il est insuffisant et même dangereux de ne produire que quelques professionnels hautement compétents. Au contraire, une compréhension fondamentale des découvertes et de la méthodologie de la science doit être accessible au plus grand nombre de gens possible.

1. Malgré les nombreuses occasions de l'utiliser à de mauvaises fins, la science semble la seule voie pour extirper les nations en voie de développement de la pauvreté, de la misère et de la noirceur. C'est la science qui fait l'économie d'un pays et qui fait marcher une civilisation. Plusieurs nations l'ont compris. Et c'est pourquoi un si grand nombre d'étudiants à la maîtrise et au doctorat dans les universités canadiennes et américaines viennent de pays étrangers.
1. La science est la seule institution humaine, le seul outil à notre disposition, pour nous alerter quant aux périls que nous encourons avec la technologie. La science nous fournit le meilleur système d'avertissement.
1. La science nous enseigne des choses à propos de l'origine, de la nature et du sort des espèces, de la vie, de la planète, de l'univers. Pour la première fois dans l'histoire de l'homme on peut démystifier des questions fondamentales. À long terme, le plus beau cadeau que la science puisse nous faire, c'est de nous faire découvrir qui nous sommes et notre relation avec le cosmos.
1. Les valeurs de la science et les valeurs de la démocratie sont concordantes et dans bien des cas indiscernables. La science et la démocratie ont commencé à la même époque et au même endroit en Grèce au 6^e et au 7^e siècles avant Jésus-Christ. La science ne progresse que par l'échange des idées. La science et la démocratie encouragent des points de vue non conventionnels et des débats engagés. Toutes les deux reposent sur le raisonnement, l'argumentation, des standards rigoureux et l'honnêteté. La science

est une façon de mettre à jour la supercherie. La science est le seul rempart contre le mysticisme, la superstition et les religions appliquées où elles ne devraient pas l'être. Plus son langage, ses règles, ses méthodes seront promulgués, répandus et compris, plus fortes seront nos chances de préserver la démocratie que Thomas Jefferson et ses collègues prônaient.

Des extraterrestres ont atterri sur Terre. Ils nous observent. Ils étudient ce que nous présentons à nos enfants à la radio, à la télévision, dans des films, des journaux, des magazines, des livres. Ils ne tardent pas à en conclure qu'on attache beaucoup d'importance à leur enseigner le meurtre, la tricherie, la cruauté, la superstition, la crédulité, le consumérisme. On s'applique et, à force de répéter, on connaît un certain succès. Quel genre de société aurions-nous si, à la place, on y mettait autant d'efforts à leur enseigner la science, la beauté et l'espoir ?

MOT DE LA FIN

En terminant la rédaction de ces notes de cours, je voudrais répondre à une question qui m'est souvent posée par des étudiants finissants au baccalauréat. Cette question est la suivante : « Pourquoi devrais-je faire des études de maîtrise et peut-être de doctorat ? »

S'il y a une chose dans ma vie pour laquelle je n'éprouve aucun regret, mais plutôt de la nostalgie, c'est bien d'avoir fait des études de deuxième et de troisième cycles. Et si aujourd'hui j'en avais l'occasion, je recommencerais volontiers. Non seulement la formation et le savoir-faire que je me suis donnés en faisant des études supérieures m'ont permis de décrocher divers emplois passionnants et de gagner ma vie en faisant ce qui me plaît, mais en plus, je garde de ces années d'études les plus beaux souvenirs de ma carrière professionnelle. Comme un enfant, j'apprenais et je découvrais avec émerveillement le monde de la recherche scientifique. Je me retrouvais parmi des gens passionnés et passionnants qui font de la recherche, qui développent la technologie et qui contribuent à façonner le monde dans lequel nous vivons. Enfin je pouvais concentrer tous mes efforts dans une direction, une direction que j'avais choisie et qui m'absorbait pleinement. Je me faisais plaisir. Et ça n'a pas cessé depuis. Voilà, à mon avis, la seule raison valable pour faire des études supérieures : la curiosité intellectuelle, l'aventure de l'esprit humain, le goût d'acquérir de nouvelles connaissances et un savoir faire plus approfondi, la satisfaction personnelle.

Entreprendre des études de maîtrise (ou de doctorat) pour toute autre raison, risque d'être décevant et de mener à l'échec ou à l'abandon.

Contrairement aux programmes de baccalauréat pour lesquels l'encadrement et la durée des études sont rigides, les programmes de maîtrise et de doctorat sont beaucoup plus souples. L'étudiant profite d'une grande liberté intellectuelle et peut décider, jusqu'à un certain point, de la durée et du déroulement de ses études. Mais il doit aussi faire preuve d'autonomie et de responsabilité accrues. La réussite ne dépend plus de la moyenne du groupe. Elle dépend surtout de l'individu.

La maîtrise est fort différente du doctorat. Dans la maîtrise de recherche, on dépose un mémoire alors qu'au doctorat on soutient une thèse. C'est une nuance très importante que même des étudiants aux cycles supérieurs ne saisissent pas immédiatement. Le doctorat n'est pas une maîtrise bonifiée.

Dans un projet de maîtrise, l'étudiant est initié à la recherche scientifique et à sa méthodologie. Il est confronté à un problème, en général, bien défini par son directeur de sorte qu'il puisse compléter sa recherche en une année environ. On s'attend à ce que son travail soit rigoureux mais pas nécessairement innovateur et original.

Au doctorat, l'étudiant connaît très bien, en principe, la méthode scientifique. Ses connaissances, son savoir faire ainsi que sa maturité scientifique lui permettent de

cerner le problème auquel il va se mesurer. Il ne s'agit plus ici de faire une étude mais d'apporter un regard nouveau, de suggérer et de défendre de nouvelles solutions, d'innover, de faire preuve d'originalité, bref d'apporter une contribution remarquée à l'avancement des connaissances. Les études doctorales exigent un effort soutenu et intense. Mais ô combien gratifiantes sont-elles !

Par rapport à un étudiant détenteur d'un baccalauréat, l'étudiant titulaire d'une maîtrise est plus qualifié et a démontré des aptitudes à mener à bien un projet hautement technique. Les employeurs le reconnaissent et davantage de portes leur sont ouvertes. Et pas forcément dans leur domaine de spécialité. Le projet de recherche à la maîtrise n'est pas un engagement de carrière. C'est un gage de compétence technique. Nombre de mes anciens étudiants qui ont complété une maîtrise en transfert de chaleur oeuvrent dans des secteurs complètement différents. Ils ont été embauchés pour leurs compétences techniques et leurs aptitudes professionnelles qu'ils ont acquises à la maîtrise.

Une statistique révélatrice : Près de 40 % des ingénieurs membres de l'Ordre des ingénieurs du Québec sont détenteurs d'une maîtrise.

Par ailleurs, en s'engageant dans des études doctorales, l'étudiant fait un choix de carrière. Ce ne sera pas nécessairement dans son domaine de spécialité, quoique rare, mais plutôt dans le type d'emploi qu'il occupera. Un ingénieur détenteur d'un doctorat

ne postule pas un emploi pour lequel on exige le baccalauréat seulement et, à l'inverse, un employeur ne considérera pas la candidature d'un docteur pour combler le poste d'un bachelier. Le docteur en ingénierie n'est pas assuré, non plus, et contrairement au docteur en médecine en Amérique, d'une rétribution plus élevée (1^{ère} loi de la thermodynamique). Par contre, son diplôme lui donne accès aux emplois les plus intéressants (2^e loi de la thermodynamique). Ce sont des chercheurs et des ingénieurs pour la plupart détenteurs de doctorat qui font les découvertes scientifiques et qui sont à l'origine des nouvelles technologies. Ce sont eux qui oeuvrent à la fine pointe des connaissances humaines. Ce sont les penseurs et les découvreurs. Nombreuses sont les entreprises qui dépendent de leurs découvertes et de leurs innovations pour connaître du succès. Il n'est pas étonnant alors de trouver une très forte proportion de docteurs en science et en ingénierie dans les centres de recherche nationaux et ceux des entreprises telles Alcan, Noranda, Pratt and Whitney, Atomic Energy of Canada et Hydro-Québec.

Enfin, je dois dire que j'ai très souvent rencontré des gens qui regrettaient de ne pas avoir poursuivi leurs études. Mais à ce jour je n'ai jamais rencontré quelqu'un regrettant d'avoir trop d'éducation.

Marcel Lacroix, juillet 1997.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEVERIDGE, W.I.B., « The Art of Scientific Investigation », Vintage Books, 1957.
- ANDREWS, P., « Les Tsars », Éditions du fanal, 1984.
- BORSTIN, D., « Les découvreurs », Robert Laffont, 1986.
- ÇENGEL, Y. & BOLES, M.A., « Thermodynamics : an Engineering Approach », McGraw Hill, 1994.
- CHARPAK, G. & GARWIN, R., « Feux follets et champignons nucléaires », Éditions Odile Jacob, 1997.
- DEMARET, J. & LAMBERT, D., « Le principe anthropique », Armand Colin, 1994.
- DYSON, F., « From Eros to Gaia », Penquin Books, 1993.
- FRENCH, M., « Invention and Evolution : Design in Nature and Engineering », Cambridge University Press, 1994.
- FIVAZ, R., « L'ordre et la volupté », Presses polytechniques romandes, 1989.
- HAWKING, S., « Une brève histoire du temps », Éditions j'ai lu, 1989.
- HORGAN, J., « The End of Science », Addison-Wesley, 1996.
- JACQUARD, A., « Cinq milliards d'hommes dans un vaisseau », Éditions du Seuil, 1987.
- JACQUARD, A., « J'accuse l'économie triomphante », Calmann-Lévy, 1995.
- JACQUARD, A. « Idées vécues », Flammarion, 1989.
- LIGHTMAN, A., « Great Ideas in Physics », McGraw-Hill, 1992.
- MARCH, R. H., « Physics for Poets », McGraw-Hill, 1992.
- NEIRYNCK, J., « Le huitième jour de la création », Les presses polytechniques romandes, 1986.
- POLKINGHORNE, J., « Beyond Science », Cambridge University Press, 1996.

-
- REEVES, H., « L'heure de s'enivrer : l'univers a-t-il un sens ? », Éditions du Seuil, 1986.
- REEVES, H., « Malicorne : réflexions d'un observateur de la nature », Éditions du Seuil, 1990.
- REEVES, H., « Patience dans l'azur : l'évolution cosmique », Éditions du Seuil, 1988.
- ROY, J.R., « Les héritiers de Prométhée », Les presses de l'Université Laval, 1998.
- SAGAN, C., « Billions and Billions : Thoughts on Life and Death at the Brink of the Millennium », Random House, 1997,
- SAGAN, C., « Cosmic connection ou l'appel des étoiles », Éditions du Seuil, 175.
- SAGAN, C., « The Demon-Haunted World », Random House, 1996.
- SAGAN, C., « Pale Blue Dot », Random House, 1994.
- TREFIL, J., « The Edge of the Unknown », Houghton Mifflin company, 1996.
- TROYAT, H., « Pierre le Grand », Éditions j'ai lu, 1979.
- TROYAT, H. « Ivan le Terrible », Flammarion, 1982.
- SCIENTIFIC AMERICAN : A Special Issue, « Key Technologies for the 21st Century », W.H. Freeman and Company, 1996.