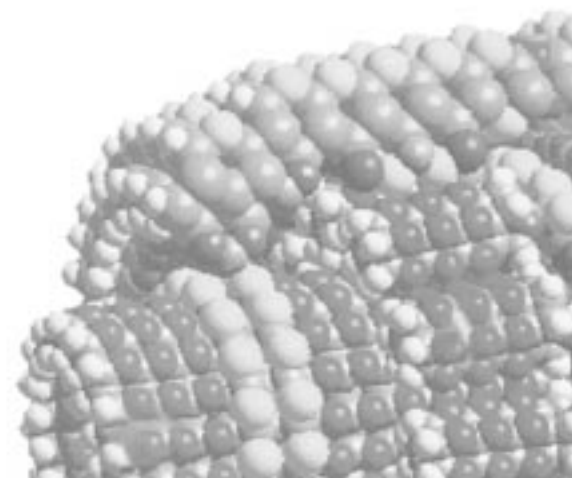


Actes du colloque

SCIENCES ET TECHNOLOGIES : DES VISÉES D'AVENIR

Tenu à Montréal le 17 mai 2000
dans le cadre du 68^e Congrès de
l'Association canadienne-française
pour l'avancement des sciences



Le texte qui suit est tiré d'une transcription de conférences présentées à Montréal, le 7 mai 2000, lors du Colloque « *Sciences et technologies : des visées d'avenir* » organisé par le Conseil de la science et de la technologie du Québec dans le cadre du 68^e Congrès de l'ACFAS

Conseil de la science et de la technologie

1200, route de l'Église
3^e étage - Local 3.45
Sainte-Foy (Québec)
G1V 4Z2

Téléphone : (418) 644-1165

Télécopieur : (418) 646-0920

Ce document est disponible sur le site Web
du Conseil de la science et de la technologie
<http://www.cst.gouv.qc.ca>

Typographie, mise en pages et conception graphique
Alain Gingras communication conseil

(c) Gouvernement du Québec 2001
Premier tirage, janvier 2001
Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2001

Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada

ISBN : 2-550-36949-1



Table des matières

Avant-Propos

Résumé des conférences 7

Programme du Colloque 17

Présentation 19

Camil Guy

Conseil de la science et de la technologie

**Les nanotechnologies : de la manipulation des atomes aux matériaux
et aux machines nanostructurées** 21

Mohamed Chaker, INRS-Énergie et matériaux, Université du Québec,

Institut national de la recherche scientifique

**Les nouveaux horizons de la molécularisation de la
biologie et de la médecine** 45

Richard Béliveau, Laboratoire de médecine moléculaire

Hôpital Sainte-Justine

Université du Québec à Montréal

**Les mutations de la numérisation : l'informatique électronique,
photonique, quantique, biomoléculaire** 61

Denis Poussart, Laboratoire de vision et systèmes numériques,

Université Laval

Écologie, nouveaux modes de vie et développement durable 99

Jean-Pierre Revéret, Institut des sciences de l'environnement,

Université du Québec à Montréal

La maîtrise du développement de l'activité scientifique et technologique 115

M^{me} Bartha-Maria Knoppers,

Faculté de droit, Université de Montréal

Session plénière 131

Animatrice :

M^{me} Sophie Malavoy, Icotop



AVANT-PROPOS

Soucieux d'intégrer une dimension prospective à l'élaboration de sa programmation, le Conseil de la science et de la technologie a organisé le Colloque « Sciences et technologies : des visées d'avenir » dans le cadre du 68^e Congrès de l'ACFAS qui s'est tenu à l'Université de Montréal, le 17 mai 2000.

Les objectifs de ce colloque étaient non seulement de contribuer à la planification des activités du Conseil mais aussi d'alerter la communauté des chercheurs et décideurs sur les directions que prennent certains domaines scientifiques, de manière à positionner le Québec sur un horizon de dix à quinze ans.

Ce colloque comprenait cinq présentations d'une durée approximative de trente minutes chacune, suivies de périodes de questions également d'une durée de trente minutes. Chaque conférencier a été choisi pour la qualité de son expertise dans le domaine, mais aussi pour sa capacité à articuler de manière large une vision de l'avenir et ce, en langage accessible à des interlocuteurs non spécialistes. Ils ont été invités à esquisser les percées stratégiques prévisibles dans leur domaine, à évaluer leur potentiel d'innovation, à jauger la position du Québec (potentiel de R-D actuel, forces et faiblesses, positionnement concurrentiel, etc.).

Les trois premières présentations de l'avant-midi ont exploré les percées plausibles et probables dans trois grands domaines de recherche : nanotechnologies, nouvelles frontières de la molécularisation de la biologie, nouveaux horizons des technologies numériques.

Les deux présentations de l'après-midi ont eu un caractère plus « horizontal ». Le premier thème a exploré les avenues nouvelles de prise en charge de l'environnement durable et des nouveaux milieux de vie. Le second a interrogé l'avenir de la prise en charge sociétale de l'activité scientifique et technologique de deux points de vue : d'abord pour assurer le développement et le maintien de conditions favorables au développement de la recherche et au déploiement des technologies innovatrices; ensuite, pour en maîtriser et en optimiser les incidences sur les personnes, les collectivités et l'environnement.

Le Conseil remercie les conférenciers et toutes les personnes qui ont contribué à faire de ce colloque un franc succès.

Camil Guy
Président par intérim

RÉSUMÉ DES CONFÉRENCES

LES NANOTECHNOLOGIES : de la manipulation des atomes aux matériaux et aux machines nanostructurées



Conférencier :

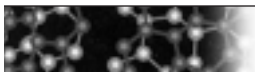
*M. Mohamed Chaker, INRS-Énergie et matériaux,
Université du Québec,
Institut national de la recherche scientifique*

Les nanotechnologies se définissent d'abord par une échelle spatiale, celle du nanomètre qui équivaut à un milliardième de mètre, soit quatre fois le diamètre d'un atome. À titre d'exemples, un cube de 2,5 nanomètres de côté contiendrait 1000 atomes alors que l'épaisseur d'une feuille de papier, qui mesure 100 micromètres, en contiendrait à peu près 400 000.

Depuis le début des temps, la fabrication d'objets se fait essentiellement de la même manière, en sculptant la matière avec des outils de plus en plus fins. Dès la préhistoire, on utilisait le silex pour façonner la matière et obtenir des formes utiles. Depuis, nos silex sont devenus de plus en plus fins et complexes pour nous permettre de « sculpter » des outils sophistiqués, comme des transistors, par exemple. Cette approche qui va du plus grand au plus petit est dite *top down*.

Par définition, la nanotechnologie utilise l'approche inverse (*bottom-up*), c'est-à-dire partir du plus petit pour aller vers le plus grand. Dans ce nouveau contexte, on utilise directement les atomes individuels en les manipulant et en faisant appel à des procédés d'assemblage, ce qui permet la formation de groupes d'atomes. En les organisant correctement, il serait ainsi possible de former des nanomatériaux ou des dispositifs fonctionnels : les nanomachines.

Le premier à évoquer cette idée fut le Prix Nobel Richard Feynman en 1959, lorsqu'il énonça que « les lois physiques autorisent *a priori* la manipulation et le positionnement contrôlé des atomes et des molécules, individuellement, un par un ». De là lui vint l'idée de poser la question devenue célèbre : « Pourquoi ne pourrait-on pas écrire les 24 volumes de l'encyclopédie Britannica sur une tête d'épingle? »



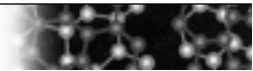
Le domaine des nanotechnologies couvre trois grands aspects : la synthèse de nanomatériaux, les procédés de fabrication de nanostructures et le développement de dispositifs fonctionnels à l'échelle nanométrique.

La synthèse de différents nanomatériaux : nanoparticules, nanotubes, nanocristaux, matériaux polymériques, etc., n'est pas un domaine de recherche nouveau; il existait avant même que le vocable « nanotechnologie » ne soit répandu dans le milieu scientifique. Ce domaine atteint presque déjà les applications industrielles, mais la simulation des phénomènes physicochimiques à l'échelle nanométrique demeure extrêmement complexe.

Les procédés de fabrication reposent actuellement sur des techniques d'autoassemblage et sur la manipulation atomique directe. Par ailleurs, pour reproduire des dessins de nanostructures, des chercheurs pensent à de nouvelles techniques de lithographie, qu'on appelle lithographie par nano-impression. Ces techniques pourraient permettre de reproduire avec une très grande rapidité les systèmes ou nanomachines que l'on désire créer.

Quant au développement de dispositifs fonctionnels, beaucoup de travaux ont été menés ces dernières années sur la réalisation de nanodispositifs et sur l'étude de leurs caractéristiques. On trouve des applications potentielles dans pratiquement tous les secteurs : barrières thermiques, catalyse à haute sélectivité, piles à combustible, batteries, stockage d'hydrogène, prothèses, dispensateurs de médicaments, dispositifs électroniques, photoniques, magnétiques, bio-détecteurs, nanosenseurs, etc. Plusieurs de ces dispositifs ont déjà été développés dans les laboratoires. Il reste encore beaucoup à faire en matière de recherche fondamentale dans le domaine de la nanotechnologie, mais certaines applications ne sont déjà plus de la fiction.

Un signal important vient des États-Unis où le budget consacré aux nanotechnologies sera doublé l'année prochaine. En ce qui concerne le Québec, deux aspects sont à considérer. Il faut développer le savoir-faire en nanofabrication, l'approche *top-down*, à cause de ses implications économiques importantes pour les dix ou quinze prochaines années dans les domaines de la microélectronique, des télécommunications, des biosenseurs et de la photonique, etc. Il faut également développer les bases scientifiques de l'approche *bottom-up* et se préparer à la convergence de la microélectronique, des télécommunications et de la photonique. Ces objectifs pourraient être atteints en mettant sur pied un programme de recherche d'envergure nationale sur les nanotechnologies, qui consisterait en deux ou trois projets structurants qui réuniraient des chercheurs de différents horizons scientifiques dans une approche multidisciplinaire.



Les nouveaux horizons de la molécularisation de la biologie et de la médecine



Conférencier :

*Richard Béliveau, Laboratoire de médecine moléculaire
Hôpital Sainte-Justine
Université du Québec à Montréal*

La formation d'un être humain est un processus d'une extrême complexité. Nos débuts sont toutefois extrêmement humbles. Nous venons tous d'une seule cellule, d'un seul ovule fécondé par un seul spermatozoïde, ce qui nous donne au départ un seul génotype, et c'est par le processus de différenciation cellulaire que certains gènes vont être sélectionnés et donner naissance aux neurones, aux cellules musculaires, aux cellulaires osseuses, aux globules rouges, etc.

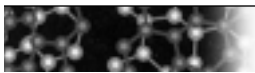
Notre arrivée est également très récente dans l'histoire de l'évolution de la vie sur la terre vieille de trois milliards et demi d'années. Certains gènes primordiaux contenus dans nos cellules sont apparus très tôt et remontent à des milliards d'années d'évolution. Par exemple, certains cytochromes dans nos mitochondries, qui nous permettent de respirer, ont des centaines de millions d'années d'évolution.

À partir d'une cellule embryonnaire qui est pluripotentielle, qui possède tous les gènes, on produit des cellules hépatiques ou des cellules nerveuses qui n'expriment que certains de ces gènes. C'est là que nous distinguons ce que nous appelons le protéome du génome. Alors que le génome est universel dans nos cellules, le protéome constitue une expression phénotypique spécifique. On estime le génome humain à environ 40 000 gènes, qui, une fois les protéines exprimées, composeraient un tableau périodique du monde vivant d'une taille de 500 000 protéines.

La protéomique est donc l'étude de l'expression biologique des protéines codées par un gène et de leurs interactions avec des ligands naturels ou des médicaments exogènes. La protéomique est le prolongement logique de la génomique

Le modèle classique de Watson et Crick propose qu'à un gène sont associées une protéine et une fonction biologique. Ce modèle est maintenant dépassé et le modèle protéomique actuel suggère qu'à un gène, sont associées « n » protéines et « n » fonctions. À partir d'un gène, différentes protéines sont produites et à chacune de ces protéines sont associées de multiples fonctions. Une protéine est une mégastucture complexe qui ne remplit pas les mêmes fonctions avec une portion ou l'autre de sa structure.

Les applications pratiques de la protéomique vont devenir extrêmement diversifiées. En neuro-psychologie, il est à prévoir que nous aurons, dans un avenir très rapproché, des



molécules qui nous permettront de modifier le comportement. La pharmacoprotéomique vise l'identification de nouvelles cibles moléculaires afin de permettre la découverte et le développement de nouveaux médicaments. L'impact de la protéomique dans ce domaine sera énorme car, grâce à la cartographie des enzymes qui nous composent, nous serons capables d'identifier de nouvelles cibles. Elle aura de plus un impact social extrêmement important dans la réduction des coûts et des délais de développement de nouveaux médicaments.

Le clonage est un secteur en évolution accélérée, et il faut sérieusement considérer que le clonage humain va se réaliser dans un avenir extrêmement rapproché.

Les maladies respiratoires sont un autre exemple qui est souvent négligé quand on parle de l'évolution de la médecine. Les causes de mortalité les plus importantes à l'échelle planétaire ne sont pas les maladies cardiaques ni le cancer, mais bien les maladies infectieuses respiratoires, et la protéomique va jouer un rôle majeur dans la compréhension des mécanismes qui rendent les bactéries résistantes aux antibiotiques.

Le principe de la thérapie génique consiste à identifier les mutations ponctuelles dans le génome qui sont responsables d'une maladie et de synthétiser un gène correcteur de la mutation défectueuse. On pourrait réinjecter au patient l'ADN corrigé, avec un système de ciblage vers la cellule dont on veut corriger l'ADN. Bien que cela relève encore un peu de la science-fiction, les outils existent et la recherche est très active dans ce secteur.

Un autre secteur à évolution extrêmement importante est celui du génie tissulaire. L'idée de cette technique est d'utiliser des tissus pour corriger certaines maladies neurodégénératives ou osseuses ou encore cultiver de la peau en laboratoire pour la greffer sur des grands brûlés. C'est un secteur de recherche qui évolue de façon extrêmement rapide.

Le Québec se classe huitième en Amérique du Nord en termes de biopharmaceutique et de biotechnologie. Il constitue une capitale de la biotechnologie à l'échelle internationale, grâce à la présence des centres sociaux des compagnies pharmaceutiques et des politiques gouvernementales québécoises, qui ont favorisé l'implantation des compagnies de biotechnologie. Toutefois, un des principaux problèmes que vivent les directeurs de laboratoires publics de recherche médicale réside dans leur capacité à garder les chercheurs seniors à l'intérieur de leurs équipes avant qu'ils ne quittent pour le secteur privé.

LES MUTATIONS DE LA NUMÉRISATION : l'informatique électronique, photonique, quantique, biomoléculaire



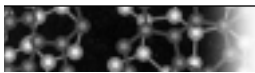
Conférencier :

*Denis Poussart,
Laboratoire de vision et systèmes numériques,
Université Laval*

La convergence des domaines de la physique, des communications et des interfaces explique la multiplication des applications informatiques et, surtout, leur accessibilité au plus grand nombre. Une perspective historique nous permet de suivre cette convergence à travers les réalisations de quelques grands personnages.

Van Neumann définit une architecture de calcul qui a survécu jusqu'à nos jours. Turing réalise des travaux exceptionnels au début de ce qui allait devenir l'intelligence artificielle. Vanevar Bush articule déjà en 1945 les concepts de l'ordinateur individuel – le Memex – et de l'hypertexte. C'est à Shannon que nous devons une définition opérationnelle du concept d'« information ». Bardeen, Brattain et Shockley inventent en 1947 le transistor au germanium. Dix ans plus tard, Kilby et Noyce déposent des demandes de brevets, à quelques mois d'intervalle, du premier circuit imprimé. Dans les années 60 naît l'idée de segmenter les messages en paquets ce qui constitue l'assise d'Internet. Sutherland réalise en 1962 le premier prototype d'un affichage graphique relié à un ordinateur. La même année, Engelbart publie un document où l'on découvre déjà toute la vision de ce qui constitue maintenant Internet. À la même époque, Alan Key et ses collègues du Xerox Parc inventeront nombre de ressources que nous tenons maintenant pour acquises en informatique, comme la programmation orientée objet, le fenêtrage graphique, l'affichage point-à-point, la méthodologie de conception des circuits intégrés à grande échelle, des langages importants comme Small Talk et Postscript, l'impression laser, l'éthernet, etc. Sur une période de quelques années – fin 1960 début 1970 – la notion du gros ordinateur centralisé et uniquement accessible au spécialiste va se muter en celle de l'ordinateur personnel et mobile, que s'approprie l'individu grâce à la notion essentielle de convivialité et d'interface.

La croissance exponentielle de la complexité des circuits imprimés s'exprime par la loi de Moore. Cette croissance se poursuivra pendant plusieurs années encore, mais de sérieux obstacles pointent à l'horizon. La dimension minimum de la structure la plus fine est aujourd'hui de l'ordre de 150 nanomètres; une dimension 3 fois plus petite, de 50 nm, qui correspondrait à la loi de Moore autour de 2010 n'est pas acquise mais probablement atteignable. D'autres contraintes physiques, comme la dissipation thermique, prennent cependant une plus grande importance au fur et à mesure que se rapetissent les dimensions et qu'augmentent les fréquences d'exploitation. La qualité des conducteurs doit être améliorée. Au niveau de la fonction mémoire, il devient critique de modifier le diélectrique afin d'augmenter la charge dans ce condensateur qui devient de plus en plus microscopique. On doit



également recourir à l'ultraviolet pour améliorer la lithogravure de si petites dimensions. L'utilisation des rayons X, si on doit éventuellement y recourir, impliquera des réinvestissements immenses.

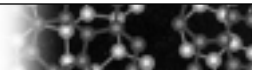
À terme cependant, apparaissent des facteurs fondamentaux qui relèvent de la nature physique de la matière. Les signaux deviennent si ténus que les phénomènes quantiques, avec leur aspect statistique, ne peuvent être ignorés. La fiabilité logique deviendra alors hautement problématique, et il est probable que l'on devra recourir à de nouveaux paradigmes de représentation des données.

En fait, il est probable qu'une limite économique entre en jeu bien avant celle de la physique. Le coût d'investissement d'une usine de fabrication double à peu près à chaque génération. Le coût actuel est de l'ordre de 2 milliards de dollars. Est-il raisonnable que des montants de l'ordre de 10, 20 ou 30 milliards soient investis dans de telles usines?

Il est donc assez certain que, dans un avenir pas très lointain, surgira un mur difficilement franchissable si la technologie continue sur la même lancée. Mais d'autres approches sont possibles, qui permettent d'entrevoir des éléments de solution. Une de ces approches alternatives consiste en une utilisation beaucoup plus étendue des architectures parallèles, domaine sur lequel un nombre considérable de travaux de recherche ont été effectués mais dont les percées concrètes sont encore rares. On peut également signaler l'utilisation de la logique multiniveau qui consiste à recourir à une logique ternaire ou quaternaire, plutôt que binaire. Un autre développement en cours consiste à explorer des architectures qui soient tolérantes aux fautes, ceci en anticipation du comportement probabilistique des dispositifs hyperminiaturisés. Il s'agit ici d'assurer l'exactitude de fonctionnement par des considérations d'architecture et d'encodage plutôt que par l'intégrité des composants. Une voie prometteuse consiste à s'inspirer du modèle de notre propre cerveau qui atteint un niveau de fiabilité globale remarquable, en dépit des variabilités importantes au niveau cellulaire. Cette fiabilité provient de l'architecture sous-jacente, architecture dont la compréhension profonde demeure une des grandes frontières de la connaissance.

Dans le domaine du calcul scientifique à haute performance, la tendance contemporaine est de « faire petit pour faire gros ». Les machines anciennes, telle la famille Cray, recouraient à des technologies hyperrapides, mais exotiques, qui exigeaient presque de fonctionner à la température de l'azote liquide. L'approche plus récente consiste à utiliser des processeurs conventionnels, donc économiques, et à en réunir un grand nombre à l'intérieur d'une architecture appropriée. Une autre possibilité consiste à réunir des milliers de machines réparties sur la planète, en misant sur les réseaux à haute performance. Le projet SETI représente une expérience particulièrement significative à cet égard.

Dans le domaine des communications, le transfert des données supplante maintenant les communications téléphoniques. La photonique connaît un immense essor et remplace rapidement les technologies plus anciennes. Cet impact est particulièrement sensible avec le passage à l'utilisation de longueurs d'ondes multiples sur une même fibre. Les débits atteignent des niveaux tels que des efforts considérables sont actuellement en cours dans le domaine du routage complètement optique, à la fois par de nouveaux dispositifs et par le déploiement de protocoles mieux appropriés.



Écologie, nouveaux modes de vie et développement durable



Conférencier :

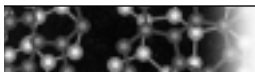
*Jean-Pierre Revéret,
Institut des sciences de l'environnement,
Université du Québec à Montréal*

Le concept de développement durable a pris forme avec le rapport Brundtland en 1987. Bien qu'il soit flou, ce concept présente un certain nombre d'actions et pistes de recherche. L'interprétation de ce concept oppose les pays du Nord et du Sud. Pour le Nord, l'important était de s'assurer que le développement des pays du Sud se fasse de façon à ne pas détruire l'intégrité des écosystèmes alors que pour le Sud, la variable importante de la dégradation de l'environnement au niveau mondial était les modes de vie et de consommation du Nord.

Entre 1987 (le rapport Brundtland sur le développement durable) et 1992 (le Sommet de la Terre à Rio), un certain nombre d'autres engagements internationaux se sont pris. Deux conventions-cadres nous touchent particulièrement, celle sur les changements climatiques et celle sur la diversité biologique. La première s'impose à partir du protocole de Kyoto qui représente un certain nombre d'engagements quant aux limitations des gaz à effet de serre sur les dix prochaines années. Sa mise en œuvre pose cependant de nombreux problèmes. En ce qui concerne la deuxième, il faut rappeler que les États-Unis ne l'ont toujours pas ratifiée, ce qui fait qu'un des acteurs majeurs de cette convention n'est pas encore partie prenante à sa mise en œuvre, même s'il joue un rôle important dans les négociations qui entourent le protocole qui va être appliqué à ce sujet.

Un certain nombre d'engagements ont été pris dans la foulée de la Conférence de Rio dont une convention sur la lutte contre la désertification et l'Agenda 21 qui était l'ensemble de la programmation devant théoriquement être mise en œuvre pour diminuer les enjeux environnementaux mais aussi aller de l'avant en direction d'un développement un peu plus durable. Un groupe de travail international travaille de façon constante depuis Rio sur les stratégies de gestion forestière. Il y a eu aussi un traité sur la conservation et la gestion des stocks de poissons qui chevauchent les zones de 200 milles.

Il y a eu également un certain nombre de principes qui ont été réaffirmés depuis, mais qui n'ont pas le même statut que les conventions. Le principe pollueur/payeur, qui fait que le pollueur doit être tenu responsable pour la pollution qu'il rejette dans l'environnement. Le principe de précaution qui dit que l'absence de certitude scientifique ne doit pas empêcher l'action si les conséquences de l'inaction sont très graves. Le principe de subsidiarité qui dit que lorsqu'on a le choix de gérer un enjeu à différents paliers hiérarchiques, il faut le gérer



au niveau le plus bas tout en restant efficace. Les principes d'équité intra et intergénérationnelle renforcent la question de la prise en compte du futur, ce qui légitime la question de la lutte contre la pauvreté.

L'écologie industrielle est une lecture écosystémique des rapports entre les industries. C'est dans la ville de Kalemberg, au Danemark, que l'on retrouve son expression la plus concrète, où on a véritablement des interrelations entre des industries pour lesquelles les résidus de l'une sont des intrants de l'autre. À titre d'exemple, Chaparal est une entreprise américaine d'acier qui est parfaitement bien intégrée avec un ensemble d'autres activités de production de ciment, de recyclage automobile, etc. La performance de chacune des entreprises qui compose ce conglomérat est supérieure à ce qu'elle serait individuellement.

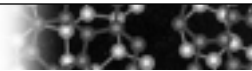
L'autre point qui émerge très fortement est celui de la durabilité des produits. On trouve des travaux extrêmement intéressants avec des compagnies allemandes d'automobiles. La compagnie reste propriétaire de la voiture et ne fait que vendre son utilisation. Alors que la location actuelle ne remet pas en cause la conception de l'automobile, ce nouveau système demande une reconception de la part de l'ingénieur, car l'automobile est alors faite pour durer, le profit résidant dans la vente du service et non dans la vente de l'objet.

Un certain nombre d'associations professionnelles se sont faites les promoteurs du concept de développement durable. Le WBCSD, le World Business Council for Sustainable Development représente 132 grandes compagnies dans 34 pays. Ce sont elles qui ont la légitimité auprès des gouvernements, de la Banque mondiale et de l'Union européenne pour être les porte-parole du secteur privé en matière de développement durable.

Un autre réseau qui se généralise à très grande vitesse est l'initiative suédoise *Natural step*. C'est une approche qui propose un cahier des charges permettant à des municipalités ou à des entreprises de s'autoanalyser pour voir si elles rencontrent des objectifs de développement durable. Un des aspects intéressants est l'approche en termes de *back-casting* plutôt que *forecasting*. Au lieu d'extrapoler à partir des tendances actuelles, on définit un avenir souhaité, idéal. On fait ensuite une analyse des choix et des décisions à prendre pour réussir à atteindre cet avenir choisi en ne créant pas les irréversibilités qui le rendraient inaccessible, par exemple. Ce mode de prévision se développe chez les futurologues.

Un troisième mouvement s'articule autour du « Facteur 4 », un rapport du Club de Rome postulant que nous sommes au siècle qui doit passer de la hausse de la productivité du travail à celle de la hausse de la productivité des ressources naturelles : doubler la richesse et couper par deux l'utilisation des ressources. Ce livre, qui s'intitule *Factor Four*, comprend une panoplie impressionnante de *success stories* où se pose cependant le problème de généralisation. On ne réussit pas à passer de petits projets à la société en général.

Un grand nombre de problèmes environnementaux s'inscrivent dans une perspective à long terme qui s'arrime mal avec le processus actuel d'aide à la décision. Il faut arriver à réinculquer l'idée que le long terme dépasse largement les 20 ou 25 ans visés par les planifications énergétiques, par exemple.



La maîtrise du développement de l'activité scientifique et technologique



Conférencier :

*Mme Bartha-Maria Knoppers,
Faculté de droit, Université de Montréal*

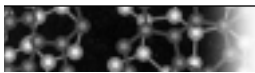
Il y a maintenant près de 50 ans que Crick et Watson ont décrit la « double hélice », suscitant l'espoir dans le public du développement de nouvelles thérapies et de la prévention des maladies génétiques. Bien qu'on parle d'espoir, d'avenir et de promesses liées à la recherche en génétique humaine, on a commencé à comparer le pouvoir de cette science à celui de la bombe atomique comme l'illustre, en 1996, la couverture de *The Economist*, intitulée *The Genetic Illusion*, montrant la double hélice maintenant l'être humain par des chaînes.

La naissance de Louise Brown (premier « bébé-éprouvette ») en 1978, et celle de Dolly (premier animal « cloné »), en 1997 constituent des points de repère importants qui marquent l'entrée de la bioéthique dans la culture populaire. Ces deux naissances mettent en lumière des réalisations scientifiques majeures dont ni le public ni les chercheurs n'étaient prêts à accueillir toutes leurs conséquences et toutes leurs répercussions. Faut-il encadrer cette recherche par une politique, gouvernementale ou autre? Pour y arriver il faut tenir compte des perceptions publiques et des représentations sociales que l'on se fait de la génétique.

Les représentations populaires de la génétique humaine prennent quatre grandes formes. D'abord l'eugénisme qui est le plus souvent assimilé aux atrocités nazies. On parle également du « bébé parfait », et il ne faut pas s'étonner de voir, aux États-Unis comme au Canada, des poursuites judiciaires lorsque ces attentes ne sont pas rencontrées. En troisième lieu, on retrouve les connaissances populaires sur l'identification génétique qu'illustre parfaitement le procès très médiatisé d'O.J. Simpson. Une dernière représentation est la stigmatisation et la discrimination. Les maladies monogéniques transmises entre générations étaient souvent vues dans l'histoire comme une malédiction, une punition des dieux.

Il importe donc de s'interroger sur l'impact des perceptions publiques sur les nouvelles tendances de la recherche, pour orienter l'élaboration de politiques gouvernementales.

On peut identifier quatre tendances principales. La pharmacogénétique nous promet aujourd'hui des médicaments individualisés. Si on connaît les susceptibilités ou l'individualité génétique d'une personne, on pourra cibler les médicaments qui lui conviennent le mieux. L'apparition des compagnies de bio-informatique comme Celera, qui ont des bases de données, constitue une deuxième grande tendance. On ne sait pas à qui appartiennent ces bases de données, comment les protéger, ou comment les contrôler juridiquement. Les biopuces



sont un troisième développement. Elles permettent de dépister des milliers de maladies avec une seule goutte de sang. Dès la naissance, et même avant, nous pourrions avoir l'information sur la santé future d'une personne, avec les implications pour la prévention, le traitement ou même l'absence de traitement. La génétique des populations est la quatrième nouvelle direction de la recherche. Elle pose le problème de l'élaboration de politiques visant les populations, alors que tous nos outils juridiques et éthiques sont concentrés sur les droits de l'individu.

Deux grandes approches sont possibles pour l'encadrement des sciences de la vie. L'approche traditionnelle laisse la recherche sans réglementation spécifique, et si un problème apparaît, un comité d'éthique est créé pour valider l'approche qui a été utilisée. L'approche prospective, adoptée par l'UNESCO dans sa Déclaration universelle sur le génome humain et les droits de l'homme en 1997, établit des principes au début de la recherche et laisse ensuite les pays adopter ou non des lois, suivant leur culture, leurs traditions, et leurs priorités.

Les deux approches ont toujours été en opposition, bien que ni l'une ni l'autre ne soit idéale *a priori*. Il faut plutôt encourager l'interaction de ces approches en parallèle et communiquer avec les ONG, les chercheurs, avec les communautés de personnes malades, les populations, les instances, etc., pour créer un système complexe qui pourrait être mis en œuvre au moyen de quatre outils. Le premier est le recours aux « droits de la personne ». Cela consiste à attendre que quelqu'un amène devant le tribunal une cause, reliée à une nouvelle technologie ou à une nouvelle science, pour que soit évaluée sa conformité aux chartes, aux constitutions ou aux codes de droits de la personne.

L'autoréglementation constitue un deuxième outil. Les sociétés professionnelles ou les chercheurs devraient, non seulement être conscients des problèmes tant éthiques que socio-juridiques que leurs travaux soulèvent, mais aussi essayer, avec leurs communautés, leurs patients, leurs participants à la recherche, de trouver un cadre d'autoréglementation, par des codes d'éthique par exemple.

Le troisième moyen, généralement favorisé par le public, est l'adoption d'une loi. Toutefois, des législations qui visent des techniques plutôt que des finalités à éviter peuvent se révéler inefficaces. Une grande attention doit accompagner l'élaboration de lois dans des domaines scientifiques en développement.

Le dernier outil préconisé par les États-Unis est l'approche du marché. Le marché va, par ses propres forces, éliminer les mauvais et garder les meilleurs. Ceux qui offrent la meilleure technique avec la plus grande sécurité, vont survivre. Les consommateurs d'aujourd'hui, étant avertis, abandonneront les techniques qui ne donnent pas les résultats escomptés. Les recours en responsabilité renforcent cette approche.

Les quatre approches peuvent cohabiter dans une approche complexe. Nous devrions adopter aujourd'hui une approche fiduciaire ou écosystémique, qui tienne compte des valeurs des citoyens.



PROGRAMME DU COLLOQUE

SCIENCES ET TECHNOLOGIES : DES VISÉES D'AVENIR

17 mai 2000

Université de Montréal

8 h 15 - 8 h 30

Présentation

M. Camil Guy

Conseil de la science et de la technologie

Les nanotechnologies : de la manipulation des atomes aux matériaux et aux machines nanostructurées

La recherche actuelle en nanotechnologies laisse déjà entrevoir des applications spectaculaires dans les domaines des matériaux, de la médecine et de l'environnement et annonce des changements fondamentaux dans des domaines aussi divers que les technologies manufacturières ou les outils thérapeutiques.

Conférencier :

M. Mohamed Chaker, INRS-Énergie et matériaux, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique

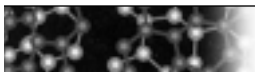
9 h 30 - 10 h 30

Les nouveaux horizons de la molécularisation de la biologie et de la médecine

L'accélération des techniques de séquençage permet maintenant une analyse rapide de la composition des génomes humains, végétaux et animaux. L'immense quantité d'information accumulée par ces projets donne naissance à de nouveaux domaines d'expertise qui devraient assurer à la génomique fonctionnelle et à la protéomique un développement extrêmement rapide au cours des prochaines années.

Conférencier :

M. Richard Béliveau, Laboratoire de médecine moléculaire, Hôpital Sainte-Justine; Université du Québec à Montréal



10 h 45 - 11 h 45

Les mutations de la numérisation : l'informatique électronique, photonique, quantique, biomoléculaire

On aura de plus en plus recours dans l'avenir à la réalité virtuelle et à la modélisation dans les procédés de fabrication de nouveaux matériaux, dans l'évaluation des propriétés de nouvelles molécules, dans l'analyse des processus complexes comme les changements climatiques. Le vaste domaine des technologies numériques repose autant sur la foudroyante progression des matériels que sur les avancées dans les domaines du logiciel et de l'intelligence artificielle

Conférencier :

M. Denis Poussart
Laboratoire de vision et systèmes numériques
Université Laval

11 h 45 - 13 h 30

Dîner libre

13 h 30 - 14 h 30

Écologie, nouveaux modes de vie et développement durable

De nombreux domaines du savoir seront mobilisés pour rencontrer les exigences du développement durable : écologie, protection et gestion de la biodiversité, modélisation des phénomènes globaux, économie environnementale, nouvelles technologies énergétiques, etc. La protection de l'environnement est au cœur du développement durable et nécessite l'adoption de nouveaux comportements individuels et collectifs.

Conférencier :

Jean-Pierre Revéret
Institut des sciences de l'environnement,
Université du Québec à Montréal

14 h 30 - 15 h 30

La maîtrise du développement de l'activité scientifique et technologique

Dans un contexte d'évolution technologique rapide, l'État comme les composantes de la société civile, doivent se poser la question de la maîtrise du développement de l'activité scientifique et technologique et de ses retombées. La poursuite de l'effort de recherche et la promotion de la science et de la technologie ont aujourd'hui pour contrepartie l'affirmation de la nécessité d'en baliser le développement et les utilisations.

Conférencier :

Mme Bartha-Maria Knoppers
Faculté de droit, Université de Montréal

15 h 30 - 16 h 30

Session plénière**Animatrice :**

Mme Sophie Malavoy, Icotop

PRÉSENTATION



M. Camil Guy

Conseil de la science et de la technologie

Je vous souhaite la bienvenue à ce colloque organisé par le Conseil de la science et de la technologie. Notre organisme avait trois objectifs en organisant ce colloque. Il voulait d'abord mieux comprendre les directions que prennent certains domaines scientifiques dont les applications technologiques potentielles pourraient s'avérer très importantes. Trois domaines de pointe ont ainsi été choisis dont nos conférenciers vont décrire les plus récents développements. Le Conseil était aussi préoccupé par les impacts sociaux, économiques et environnementaux de la recherche et du développement technologiques. C'est pour cette raison que deux thèmes plus horizontaux ont été retenus : celui du développement durable et celui de la maîtrise sociale des technologies.

Le deuxième objectif du Conseil était d'enrichir la démarche d'orientation quant à ses activités pour les prochaines années. Les derniers avis du Conseil ont porté davantage sur des questions de politique scientifique plus générale. Le Conseil était intéressé à faire le point sur certains développements de la science et de la technologie elles-mêmes.

Le troisième objectif était d'associer des partenaires du Conseil à cette réflexion. Votre présence ici aujourd'hui concrétise cette intention et je vous remercie d'être là pour discuter de ces développements scientifiques avec nous. Je voudrais remercier aussi nos conférenciers, MM. Mohamed Chaker, Richard Béliveau, Denis Poussart et Jean-Pierre Revéret ainsi que Mme Bartha-Maria Knoppers. Ce sont tous des chercheurs de haut calibre, comme vous le savez, et je suis certain que nous allons profiter grandement de leur contribution à cette journée de réflexion.

Je voudrais aussi remercier les membres du comité organisateur de ce colloque : MM. Michel Desrochers, Denis Poussart, Camille Limoges et José Vinals. Ils ont su identifier des questions scientifiques majeures et surtout intéresser des chercheurs actifs et reconnus à nous en parler aujourd'hui.

Je vous confie aux bons soins de Mme Sophie Malavoy, elle-même engagée depuis longtemps dans la diffusion de la science et qui a accepté d'animer cette journée de réflexion.

LES NANOTECHNOLOGIES :

DE LA MANIPULATION DES ATOMES AUX MATÉRIAUX ET AUX MACHINES NANOSTRUCTURÉES



Conférencier :

*M. Mohamed Chaker, INRS-Énergie et matériaux,
Université du Québec,
Institut national de la recherche scientifique*

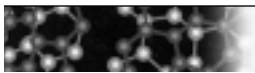
PRÉSENTATION DE SOPHIE MALAVOY

Je vais vous présenter le premier conférencier, M. Mohamed Chaker. M. Chaker enseigne depuis 11 ans et est également chercheur à l'INRS. Il dirige depuis septembre 1999 l'INRS Énergie et matériaux. Il est également membre du centre d'excellence en microélectronique MICRONET depuis 1990. Son expertise est dans le domaine des plasmas appliqués au traitement des matériaux. Il a plusieurs réalisations à son actif, entre autres la création de plasmas avec des impulsions laser ultracourtes ainsi que d'autres réalisations dans le domaine de la micro et nanofabrication. C'est justement dans ce domaine des nanotechnologies que va nous entraîner M. Chaker, le monde des nanotubes, des nanosondes, des nanocapteurs. Les nanotechnologies recouvrent toutes les technologies qui permettent de manipuler et de fabriquer des composants qui sont de la taille des composantes élémentaires de la matière : les atomes et les molécules.

Note :

Les références (exemple: [1]) renvoient aux principales figures qui ont accompagné la présentation.

Aujourd'hui, je vais vous parler des nanotechnologies. Le titre de ma présentation est « **De la manipulation des atomes aux matériaux et aux machines nanostructurées** ». Comme j'ai la chance d'être le premier présentateur de ce colloque où l'on essaie de prédire l'avenir, je vais rappeler une phrase de Peterson du Foresight Institute qui dit : « Si vous essayez de prédire ce qui passera dans le futur, dans 30 ans par exemple, et que ça ressemble à de la science-fiction, ça pourrait être faux; mais si ça ne ressemble pas à de la science fiction, c'est certainement faux [1]. »



La nature des matériaux

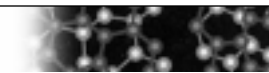
Avant d'aller plus loin, je vais rappeler très rapidement ce que sont les matériaux. Comme vous le savez tous, les matériaux sont constitués d'atomes. Leurs propriétés macroscopiques – celles qu'on exploite pour différentes applications – dépendent du type d'atomes et de leur agencement. Ainsi, la seule différence entre le charbon et le diamant, dont les propriétés macroscopiques sont extrêmement différentes comme par exemple la dureté, est la manière dont les atomes sont disposés dans le réseau.

Par ailleurs, que fait-on pour fabriquer une machine? Depuis toujours, on extrait des matériaux, on les modifie, on les chauffe, on leur applique des pressions, on y suscite des réactions physico-chimiques, on les assemble, on les soude, on les colle, etc. Tout cela utilise beaucoup d'énergie (ce qui entraîne aussi beaucoup de déchets!). C'est sur ce principe de base que repose la technologie actuelle de production industrielle. Vous allez voir qu'avec les nanotechnologies, l'approche va être un peu différente [2].

Comme l'a précisé à l'instant notre modératrice, la nanotechnologie se définit d'abord par l'échelle spatiale, c'est-à-dire le nanomètre ou un milliardième de mètre. C'est quatre fois le diamètre d'un atome. Si vous prenez un cube de 2,5 nanomètres de côté, il contient 1000 atomes. Si vous prenez l'épaisseur d'une feuille de papier, vous obtenez 100 micromètres, ce qui représente à peu près 400 000 atomes arrangés le long de l'épaisseur de la feuille.

Comment s'est faite l'évolution de la technologie jusqu'à ce jour? Depuis le temps des temps, pour fabriquer un objet, comment s'y prend-on? Dès la préhistoire, on prenait un gros silex et on en travaillait la matière pour obtenir une certaine forme. Depuis ce temps, nos silex sont devenus de plus en plus fins pour nous permettre de sculpter la matière, des transistors par exemple. Depuis les années 50, vous avez constaté l'évolution, que dis-je, la révolution dans le domaine de la microélectronique. Cette révolution a résulté du fait que nous sommes à présent capables d'imaginer des silex de plus en plus fins qui permettent de dessiner des transistors ou des composants de plus en plus petits. Ceci a été rendu possible par l'utilisation de procédés de micro et nanofabrication basés sur ce qu'on appelle la lithographie, le dépôt, la gravure de couches minces. Cette approche est appelée *top-down*, c'est-à-dire qu'on part du plus grand pour aller vers le plus petit.

Par définition, la nanotechnologie, c'est l'approche inverse (*bottom-up*), c'est-à-dire partir du plus petit pour aller vers le plus grand. Dans ce contexte, on utilise directement les atomes individuels et, en les manipulant et en faisant appel à des procédés d'assemblage, on forme des groupes d'atomes. Si on était capable de les organiser correctement, on pourrait ainsi former des nanomatériaux ou des nanomachines. Il y a donc une nuance importante quant à la manière de faire les choses. Ce que j'appelle ici « nanotechnologie », c'est cette façon d'aborder la technologie de la miniaturisation. Il est important de faire cette distinction car au cours des dix dernières années, on a appelé « nanotechnologie » toute technologie liée à l'échelle du nanomètre ou même jusqu'à 100 nanomètres, quel que soit le type d'approche [3].

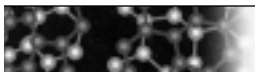


Par exemple, on peut citer la fameuse nanoguitare qui a été réalisée par des procédés de micro et nanofabrication (approche *top-down*). Pour fabriquer cet objet, on a pris un silicium extraordinaire basé sur les faisceaux d'électrons et on a sculpté la matière pour en faire une guitare de l'ordre de 10 micromètres de longueur, c'est à dire le dixième de l'épaisseur d'un cheveu. La largeur des cordes est d'à peu près 50 nanomètres et la fréquence de vibration des cordes de 10 mégahertz (évidemment ç'a été calculé et non entendu, car c'est inaudible). Mon petit garçon qui a six ans et demi m'a dit : « C'est une guitare pour des fourmis. » Je lui ai répondu que c'était plutôt pour une grosse bactérie... À côté de cette nanoguitare, on voit une nanobalance basée sur un nanotube de carbone, c'est-à-dire un nanomatériau fabriqué directement à partir d'atomes (approche *bottom-up*). On l'utilise ici pour peser une sphère de carbone en mesurant la fréquence de résonance du nanotube avec et sans la sphère : celle-ci pèse 22 femtogrammes [4].

Rappel historique

Faisons à présent un bref rappel historique. D'où vient l'idée de nanotechnologie? Le premier qui y a pensé est le Prix Nobel Richard Feynman qui évoqua cette idée lors d'une conférence de l'APS entre Noël et le jour de l'An 1959. C'est basé sur un principe simple. Feynman dit : « Les lois physiques autorisent *a priori* la manipulation et le positionnement contrôlé des atomes et des molécules, individuellement, un par un. » De là lui vint l'idée de demander : « Pourquoi ne pourrait-on pas écrire les 24 volumes de l'encyclopédie Britannica sur une tête d'épingle? » Il répond avec une phrase que j'aime beaucoup : « Pourquoi devrait-on le faire, et qui devrait le faire? J'ai parlé de certaines applications économiques (remarquons que déjà à cette époque les chercheurs étaient sensibles à la pertinence des travaux de recherche!), mais je sais que la vraie raison pour laquelle il faut le faire, c'est d'avoir du plaisir! » C'est aussi cela la recherche : on éprouve beaucoup de plaisir à faire les choses et à les faire avancer. En 1986, Eric Drexler, dans son livre *Les engins créateurs*, que je vous conseille de lire, pousse un peu plus loin ce concept de nanotechnologie. Il fonde également par la suite l'institut américain Foresight dont l'objectif depuis une dizaine d'années est de sensibiliser le grand public à ce domaine.

Pour définir la nanotechnologie, on peut donc dire que c'est la création de nouveaux matériaux, dispositifs ou systèmes, par le contrôle de la matière à l'échelle atomique. C'est également l'exploitation de nouveaux phénomènes ayant lieu à l'échelle nanométrique, parce qu'il est maintenant clairement établi, grâce aux travaux des dix dernières années, qu'à cette échelle, les propriétés fondamentales des matériaux, c'est-à-dire les propriétés biologiques, mécaniques, thermiques, électriques, magnétiques, optiques, et j'en passe, dépendent de la taille des nanostructures et peuvent différer énormément du matériau *bulk*. Cela est dû à plusieurs raisons incluant le comportement quantique, l'importance des phénomènes interfaciaux, le rapport surface/volume élevé, etc. Par exemple, des nanostructures peuvent posséder des propriétés mécaniques extraordinairement plus élevées que les propriétés du même matériau sous forme de *bulk* [5].



Un tournant important dans le domaine de la nanotechnologie fut l'invention du microscope à effet tunnel (STM) et du microscope à force atomique (AFM). Au départ, ces outils ont été conçus pour permettre l'observation de la matière au niveau atomique. Leur principe de base est assez simple. En bref, disons que l'essentiel de ces systèmes consiste en une pointe – le tout est de trouver la bonne pointe – travaillée pour être parfaite de sorte qu'elle soit terminée par un seul atome. On déplace la pointe le long de la surface de l'échantillon à examiner. On peut alors soit se baser sur le champ électrique entre la pointe et les atomes de la surface sans qu'il y ait contact mécanique : c'est le STM. S'il y a contact, on appelle l'outil un AFM. On peut se servir du STM ou de l'AFM pour imager la structure atomique de la surface. Par la suite, ces outils ont été utilisés pour manipuler les atomes [6].

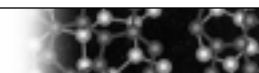
On dispose donc d'outils permettant de manipuler des atomes, mais peut-on pour autant fabriquer des nanomachines? Même si on possédait un appareil capable de manipuler un million d'atomes par seconde, il faudrait à l'heure actuelle 13 milliards d'années juste pour reconstruire une feuille de papier [7]!

Le défi est donc de développer de nouvelles techniques et procédés permettant la fabrication dans un temps raisonnable (inférieur évidemment au million d'années) de machines intelligentes à partir de l'agencement précis d'atomes et de molécules. Quels sont les moyens dont on dispose? On les appelle « assembleurs ». Une approche est la construction directe en utilisant des manipulateurs d'atomes. Certains chercheurs envisagent l'utilisation des AFM et/ou STM avec de nombreuses pointes. Cette méthode demeure néanmoins très lente. Une autre approche est l'autoassemblage. En effet, les lois naturelles font que des atomes peuvent se regrouper ou s'écartier spontanément les uns des autres selon leur nature. On peut penser à former ainsi des nanostructures.

Actuellement, pour le développement de nanomachines, l'approche la plus réaliste consisterait à combiner l'intégration de procédés d'assemblage *top-down* (ceux qu'on connaît, qu'on maîtrise et qui sont toujours en évolution pour permettre la réalisation de dispositifs de plus en plus petits) avec les procédés *bottom-up*. On pourrait aussi se mettre à rêver et à se dire qu'on pourrait imiter la nature qui applique les principes de la nanotechnologie depuis toujours. En effet, la nature utilise des machines moléculaires, l'ADN, l'ARN, les ribosomes pour construire des êtres vivants. Elle a aussi inventé quelque chose d'extraordinaire. Comme nous l'avons tous appris dans nos cours de biologie, une cellule se reproduit par division : c'est ce qu'on appelle la croissance géométrique. Si on arrivait à faire des répliqueurs basés sur ce principe, notre feuille de papier se ferait en deux minutes. Voilà le défi de taille auquel nous devons faire face au niveau des nanotechnologies [8].

Nanomatériaux, nanofabrication et nanomachines

L'examen de la littérature scientifique montre que la nanotechnologie est un domaine en pleine effervescence touchant à peu près toutes les disciplines scientifiques. On a tendance à appeler « nanotechnologie » tout ce qui touche le domaine du nanomètre. J'ai essayé lors de cette présentation de classer les différents aspects des nanotechnologies en trois grandes catégories.



Un premier aspect est celui de la synthèse de nanomatériaux, c'est-à-dire la capacité de fabriquer des nanomatériaux. Un second aspect est celui des procédés de fabrication de nanostructures. Enfin, le troisième est relié au développement de dispositifs fonctionnels à l'échelle nanométrique.

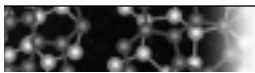
En ce qui concerne le premier aspect, on s'intéresse à la synthèse de différents nanomatériaux : nanoparticules, nanotubes, nanocristaux, matériaux polymériques, etc. Notons que ce domaine de recherche n'est pas forcément nouveau et qu'il existait avant même que le vocable « nanotechnologie » soit répandu dans le milieu scientifique.

En ce qui concerne les procédés de fabrication, on dispose à l'heure actuelle de techniques d'autoassemblage, telles que celles dont je viens de parler, et de la manipulation atomique directe. Par ailleurs, pour reproduire des dessins de nanostructures, des chercheurs pensent à de nouvelles techniques de lithographie, qu'on appelle lithographie par nano-impression. Sans entrer dans le détail, ces techniques pourraient permettre de reproduire avec une très grande rapidité les systèmes ou nanomachines que l'on veut produire.

Quant au développement de dispositifs fonctionnels, beaucoup de travaux ont été menés ces dernières années sur la réalisation de nanodispositifs et sur l'étude de leurs caractéristiques. Dans le domaine de l'électronique, par exemple, il existe des travaux visant à développer des transistors extrêmement petits et très puissants. Dans le domaine de l'optique, on envisage également la réalisation de nanolasers [9].

Nous nous proposons à présent d'examiner quelques exemples reliés à ces différents aspects. Examinons tout d'abord le domaine des nanomatériaux. Comme je l'ai déjà précisé, on sait produire des nanoparticules depuis très longtemps. Il faut noter par ailleurs que ce n'est pas nécessairement de la haute technologie. Par exemple, on peut produire des nanoparticules par broyage mécanique très poussé. Ces nanoparticules ont des caractéristiques intrinsèques intéressantes qui peuvent être mises à profit dans différentes applications. Il existe d'autres procédés pour fabriquer ces nanoparticules, entre autres celui que je connais le mieux parce que je l'utilise, soit l'interaction d'un laser avec une cible solide. Ce travail est accompli en collaboration avec mon collègue Daniel Guay et un étudiant. Dans ce cas, l'interaction d'un laser avec une cible solide génère un plasma, c'est-à-dire un gaz partiellement ionisé. Les atomes et les ions du plasma interagissent avec le milieu environnant gazeux où ils se regroupent pour former ainsi des nanoparticules. Je n'entrerai pas dans les détails, mais les applications technologiques de ces nanoparticules sont diverses et incluent les dispositifs électroniques, les catalyseurs pour les piles à combustible, les matériaux pour les batteries, etc [10].

En ce qui a trait à certaines applications de « haute technologie », le défi est de contrôler la dimension des nanoparticules et d'éviter une grande dispersion de leur taille. Dans ce contexte, nous avons pu produire des nanoparticules de l'ordre de 4 nanomètres avec une dispersion relativement faible en utilisant un plasma créé par laser [11].



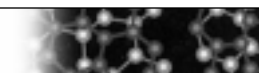
Parlons à présent des nanotubes. J'ai parlé plus tôt du diamant et du graphite. Vous avez aussi sans doute entendu parler des fullerènes, du C_{60} par exemple. Les nanotubes sont encore une autre variété du carbone, une disposition d'atomes de carbone sous forme de tube qui peut être ouvert. La première observation de ce nanomatériau a été faite par le japonais Iijima, en 1991, suite à l'analyse de la suie provenant d'un arc électrique. Ceci montre qu'on a dû faire des nanotubes depuis fort longtemps sans avoir la possibilité de les observer [14]!

Ainsi, si on prend un arc électrique et qu'on applique une tension entre deux électrodes de graphite, il se forme à l'intérieur de l'arc des nanotubes. Une technique un peu plus perfectionnée est basée sur l'ablation laser (technique sur laquelle nous travaillons actuellement). Cette méthode plus récente a été proposée par Smalley. Dans ce cas, comme le montre ce schéma on fait interagir un faisceau laser avec un tube de graphite en présence d'un catalyseur. Les nanotubes de carbone monoparois vont alors se condenser sur un collecteur [15].

Les nanotubes de carbone ont des propriétés absolument exceptionnelles. D'un point de vue mécanique, leur module de Young (caractéristique des propriétés mécaniques des matériaux) est de 2 térapascals, ce qui est exceptionnel. De plus, selon leur dimension et leur forme, les nanotubes peuvent être conducteurs, semi-conducteurs ou isolants, ce qui est intéressant en ce qui a trait aux applications en nanoélectronique. Notons que récemment, un dispositif électronique basé sur ces nanotubes et fonctionnant à 10 terahertz a été mis au point. Des nanotubes ont également été utilisés pour des applications dans le domaine des écrans plats parce que ce sont d'excellents émetteurs d'électrons. On prévoit aussi les employer pour le stockage d'hydrogène, pour les pompes à chaleur à absorption, pour le renforcement de matériaux. J'ai même appris que les militaires pensent les utiliser pour fabriquer des nanobombes [16]!

Je n'ai illustré ici que quelques exemples de nanomatériaux, pour éviter de faire de la zoologie. Ce qu'il faut retenir, c'est que ce domaine est, pour certaines applications, pratiquement rendu à la production industrielle en utilisant parfois des méthodes de fabrication très conventionnelles.

A présent, je voudrais illustrer la difficulté de comprendre et de simuler les phénomènes physico-chimiques liés à l'échelle nanométrique. Afin de donner une idée de la complexité du problème, mais sans entrer dans les détails, examinons d'abord le point de vue temporel. On devrait être capable de modéliser des phénomènes se déroulant depuis la femtoseconde (reliés au déplacement de l'atome) jusqu'à la seconde (la seconde peut même s'avérer relativement rapide pour certains événements macroscopiques). On a donc une gamme dynamique extrêmement grande, ce qui complique beaucoup les calculs, parce que les échelles de temps sont très différentes. C'est à peu près la même chose au niveau dimensionnel. On part de l'atome qui est de l'ordre de l'angström jusqu'au micromètre ou plus, selon ce qu'on désire simuler. Ainsi, la mise au point de codes numériques qui nous permettraient de simuler les phénomènes physico-chimiques dans le domaine de la nanotechnologie s'avère en général très complexe [12, 13].



Le second aspect des nanotechnologies évoqué plus haut nous ramène au problème des procédés de fabrication. On pourrait, en utilisant l'AFM ou le STM, manipuler les atomes pour faire des dessins ou des nanostructures. Par exemple, plusieurs d'entre vous ont vu cette photo de *Nature* parue en 1990 où l'on voit des atomes de xénon sur du nickel assemblés de telle manière à reproduire le logo de la compagnie IBM. Un peu plus tard, on a également produit le caractère *kanji* qui signifie « atome » en japonais en manipulant des atomes de fer sur du cuivre. Notons que cette nanostructure a été réalisée à température ambiante [17].

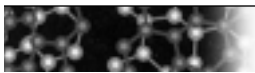
Mon favori est le corail quantique réalisé en 1993 et constitué de 48 atomes de fer sur cuivre. Ces arrangements sont formés par manipulation directe d'atomes [18].

Par ailleurs, j'ai parlé précédemment d'autoassemblage. Je vais tenter d'en donner une définition exacte, telle que proposée par Kuhn et Ullman. Il s'agit d'un procédé dans lequel on trouve une organisation hiérarchique supramoléculaire qui s'établit en un système complexe de composants interreliés. Les mécanismes qui produisent cette hiérarchie sont déterminés par des interactions moléculaires qui sont en compétition les unes avec les autres, comme, par exemple, des composants hydrophiles avec des composants hydrophobes, les forces de Van der Waals, les liens coulombiens, etc. En mettant à profit ces différentes interactions, on pourrait créer des séparations de micro et nanophases dans la matière ou des agrégats, résultant ainsi en la formation de matériaux nanostructurés. Ce procédé de fabrication permet donc la production de nanostructures à grande échelle, avec un rendement de production élevé [19].

On peut produire par autoassemblage des nanostructures aussi bien avec des matériaux organiques qu'avec des matériaux inorganiques. On voit ici la formation spontanée en quelques secondes d'une pyramide formée d'atomes de germanium déposés sur une surface de silicium. La base de cette pyramide est de 10 nanomètres et sa hauteur de 1,5 nanomètre. On peut aussi fabriquer des jonctions entre deux plots. On voit ici une molécule de soufre allant spontanément se poser entre deux plots d'or pour former une jonction qui pourrait, par exemple, servir pour un dispositif électronique.

Il faut se poser à présent la question de savoir si les lois de la nature peuvent faire en sorte que les nanostructures formées par autoassemblage soient bien celles que l'on souhaite obtenir pour fabriquer des nanomachines. On peut faire de superbes photos avec ces nanostructures, mais peut-on penser en obtenir des systèmes qui fonctionnent réellement? C'est là que réside la grande difficulté, mais c'est aussi le défi le plus important à relever [20].

Enfin, en ce qui a trait au développement des nanodispositifs, plusieurs démonstrations ont été faites jusqu'à maintenant. Par exemple, on a démontré récemment qu'on peut fabriquer un transistor à effet de champ, basé sur un nanotube de carbone de 1,6 nanomètre de diamètre, ce dernier assurant la connexion entre la source et le drain (l'électron étant confiné à l'intérieur du nanotube). Ce qui est intéressant c'est que, selon l'enroulement du nanotube, on peut changer les caractéristiques électriques du transistor. Plus récemment, dans



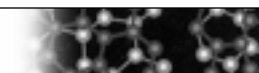
Nature est parue l'image de deux plots séparés de 8 nanomètres entre lesquels est posée une molécule d'ADN. En mesurant les propriétés électriques de l'ADN, on a observé un comportement non linéaire, un peu comme dans un transistor. Je ne veux pas extrapoler trop vite, mais cette expérience suggère qu'on pourrait utiliser la matière biologique pour les futurs, futurs transistors [21]...

Recherche et applications

Examinons à présent l'évolution de la recherche dans le domaine des nanotechnologies. En termes de recherche fondamentale, la grande innovation a été l'invention des microscopes AFM et STM qui permettent d'observer spatialement (au niveau de l'atome) la matière. Du côté de la résolution temporelle, certains chercheurs ont également développé des systèmes ayant des résolutions dans le domaine de la femtoseconde pour examiner les mécanismes d'appariement des atomes et des molécules. Ces outils de caractérisation vont nous permettre de mieux comprendre les phénomènes physicochimiques liés à l'échelle nanométrique et d'établir le lien entre la structure des nanomatériaux et leurs propriétés macroscopiques. Cette compréhension nous permettra de mieux contrôler la taille et l'agencement des nanostructures pour le développement de nanomachines [22].

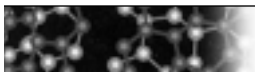
En ce qui a trait aux applications de la nanotechnologie, on en trouve pratiquement dans tous les secteurs. En ce qui a trait, par exemple, aux applications potentielles des nanomatériaux, on peut nommer les barrières thermiques, la catalyse à haute sélectivité, les piles à combustible, les batteries, le stockage d'hydrogène, les prothèses, les dispensateurs de médicaments, etc. Pour celles des nanostructures, citons les dispositifs électroniques, photoniques, magnétiques, les bio-détecteurs, les nanosenseurs, etc. Notons que plusieurs de ces dispositifs ont déjà été développés dans les laboratoires. En conclusion, il reste encore beaucoup à faire en matière de recherche fondamentale dans le domaine de la nanotechnologie, mais certaines applications ne sont déjà plus de la fiction [23, 24].

Mettons-nous à rêver à présent, on est là pour ça! *A priori*, si on arrive vraiment à manipuler les atomes et à former de la matière à partir de ceux-ci, que pourrait-il arriver? On pourrait ainsi auto-fabriquer à partir d'atomes de la matière, des objets, sans produire de déchets (recyclage à 100 %). Avec de l'air, de l'eau et le produit des déchets organiques, on pourrait reproduire toute la chaîne alimentaire en laboratoire. Vous avez un hamburger ou du caviar selon les atomes impliqués et vous pouvez ainsi produire de la nourriture... Ce rêve est fascinant. Y arrivera-t-on? On ne le sait pas. On pourrait imaginer faire des matériaux sans défaut, parfaitement optimisés pour une application donnée. On pourrait aussi imaginer des nanomachines complètement intelligentes et dotées des cinq sens. J'ose souhaiter que le sixième continue à être notre propriété... On pourrait créer des nanoréparateurs de cellules malades ou même des nanorobots qui permettraient d'identifier des cellules. En fait, on reproduirait en laboratoire ce que la nature a réussi à réaliser au cours de centaines de millions d'années d'évolution, c'est-à-dire une maîtrise exceptionnelle de la miniaturisation pour le développement de vrais systèmes intelligents [25].



Même si ces projections sont encore du domaine de la fiction, rappelons que la technologie a souvent été plus rapide que les prédictions humaines. Permettez-moi de citer un exemple. Lorsque les premiers transistors sont apparus, un comité d'experts fit la prédiction suivante en ce qui a trait aux ordinateurs : « C'est bien, on va arriver à la fin du siècle à faire 5000 opérations par seconde avec un appareil de 3000 livres qui consommera des kilowatts. » Il est donc facile de se tromper quand on fait des prédictions à partir d'un raisonnement évolutionniste. Cette erreur est due au fait que la microélectronique a été une véritable révolution et non une évolution. Le même comité affirmait qu'on aurait besoin au maximum d'une dizaine d'ordinateurs aux États-Unis. Ceci montre qu'on peut donc se permettre de rêver sans trop se tromper. Ma prédiction personnelle, c'est que l'on verra de plus en plus d'applications industrielles mettant en jeu des nanomatériaux. Je n'invente rien, c'est quasiment devenu la réalité, et ça se développe continûment à la fois dans les domaines de l'énergie, de l'industrie chimique et de l'environnement. En ce qui a trait aux nanostructures, ce dont je suis convaincu personnellement, c'est que les grands développements se feront dans le domaine de la nanoélectronique-photonique, simplement parce que les besoins externes de technologies de l'information et des communications ne cessent de croître [26].

Bien sûr, il faut rêver, mais il ne faut tout de même pas enterrer les technologies existantes. Si l'on regarde l'évolution des puces, on a eu il n'y a pas si longtemps le 286, le 486, puis le Pentium pro réalisés en utilisant l'approche *top-down*. A présent, on parle des systèmes sur une seule puce. Cette évolution s'appelle la loi de Moore du nom de la personne qui l'a énoncée. Le nombre de transistors par puce double tous les 18 mois. Ceci explique le progrès faramineux des ordinateurs. Évidemment, le coût des usines de production (*fabs*) devient de plus en plus grand parce qu'elles deviennent de plus en plus sophistiquées. Pour l'an 2005, on parle d'un coût de cinq milliards de dollars. Avec la technologie CMOS telle qu'on la connaît actuellement (avec le silicium qui devient de plus en plus fin), on pense amener les dimensions critiques jusqu'à 30 nanomètres. Il y a d'ailleurs déjà eu des démonstrations en laboratoire de tels transistors. Ceci a été rendu possible grâce à l'avancement des techniques de lithographie. Au début des technologies *top-down*, on utilisait pour la lithographie la lumière visible, puis l'UV, les lasers et maintenant, on pense utiliser, du moins c'est en développement, les rayons X ou la lumière X-UV etc. Ce que je peux vous dire, c'est que l'effort mondial dans ce domaine est extrêmement important. Il est probable que pour le développement de ces nanodispositifs, on assistera dans un avenir plus ou moins proche à la rencontre des technologies *top-down* et *bottom-up*. Il en résultera certainement de nouveaux nanodispositifs dont on aura besoin pour les communications et autres applications [27 à 32].



La position du Québec

Pour terminer, juste un mot pour dire que Clinton a annoncé que le budget des États-Unis dans le domaine des nanotechnologies sera doublé l'année prochaine. En ce qui concerne le Québec, à mon avis, il y a deux aspects à considérer. Il faut à la fois développer le savoir-faire en nanofabrication, c'est l'approche *top-down*, à cause des implications économiques importantes pour les dix ou quinze prochaines années dans le domaine de la microélectronique, des télécommunications, des biosenseurs et de la photonique, tout en développant les bases scientifiques de l'approche *bottom-up*. Il faudra aussi se préparer à la convergence des différents secteurs de la haute technologie puisque, à un moment donné, on ne pourra plus faire la différence entre la microélectronique, les télécommunications et la photonique. Ces objectifs peuvent être atteints en entreprenant un programme de recherche d'envergure nationale sur les nanotechnologies qui consisterait en deux ou trois projets structurants, basés sur le principe de l'autoassemblage des chercheurs, c'est-à-dire les liens naturels. On pourrait avoir un projet autour de la technologie de la micro et de la nanofabrication pour viser les applications à court et à moyen termes dans les domaines que je viens de citer, incluant les biosenseurs. De plus, à mon avis, on peut également envisager un projet dans le domaine relié à l'approche *bottom-up* [33 à 36].

Je vous remercie et j'espère que je vous ai transmis ma passion.



PÉRIODE DE QUESTIONS

Question 1 – Sur la position du Québec en nanotechnologies

J'aimerais savoir la position du Québec en termes de cette recherche est pointue, mais aussi industrielle si on la compare avec l'Europe, les Japonais et les Américains. J'aimerais aussi que vous me fassiez la distinction entre les possibilités de la microtechnologie parce que les Japonais sont très forts en microtechnologie, alors qu'il me semble que les Américains s'en vont vers la nanotechnologie. Est-ce qu'il y a une distinction à faire ou les deux vont se rejoindre éventuellement? J'aime beaucoup votre passion...

Merci beaucoup. J'ai mis ici une liste concernant la position du Québec. Elle n'est pas exhaustive. J'ai essayé d'identifier les joueurs. Il y a l'INRS-Énergie-matériaux, l'Université McGill, l'Université de Montréal, l'École polytechnique, l'Université de Sherbrooke.

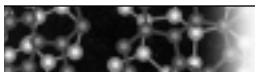
À l'INRS-Énergie-matériaux, on travaille par exemple sur la technologie de micro et nanofabrication incluant la lithographie à rayons X qui est la prochaine génération de fabrication de transistors pour 2005. Les technologies de micro et nanofabrication, c'est donc l'approche *top-down*. Nous avons également une activité de recherche importante dans le domaine des nanomatériaux incluant les nanoparticules et les nanotubes. Si vous désirez en savoir plus, vous pouvez me contacter.

À McGill, il y a actuellement un groupe de recherche qui travaille sur la nanotechnologie avec l'approche *bottom-up*, principalement en utilisant la manipulation AFM et STM, la modélisation et l'autoassemblage. Mon collègue Peter Gruter pourrait vous en dire beaucoup plus à ce sujet.

L'université de Montréal et Polytechnique ont un groupe qui s'appelle le Groupe des couches minces qui travaille dans le domaine des matériaux et des couches minces nanométriques avec des applications par exemple dans le domaine du nanomagnétisme. Vous avez aussi des chimistes de l'Université de Montréal qui travaillent sur l'imagerie AFM, STM et je citerai mon collègue Bob Cochrane du Département de physique de l'Université de Montréal, si vous désirez en savoir plus.

Enfin, à l'Université de Sherbrooke, des chercheurs travaillent sur la lithographie par faisceau d'électrons pour le développement de dispositifs nanométriques ainsi que sur les couches organiques auto-organisées. Mon collègue Jacques Beauvet a également été l'instigateur de la création d'une compagnie œuvrant dans le domaine de la nanotechnologie.

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive, mais elle montre que des efforts sont déployés dans différentes universités autour de chercheurs œuvrant en physique, chimie, et génie. Il n'y a cependant pas d'effort concerté entre ces différents chercheurs. Ça pourrait faire l'objet d'un projet structurant dans ce domaine.



Maintenant, quand vous me dites que les Américains vont vers la nanotechnologie plutôt que vers la microtechnologie, ce n'est pas aussi simple. Si vous comparez l'investissement qui est fait en nanotechnologie, même les 500 millions de dollars qu'on a investis dans cette recherche aux USA représentent peu de chose par rapport aux billions qui sont investis en microtechnologie. A elle seule, une unité de fabrication représente 1,5 billion de dollars. Le simple fait de changer un procédé de fabrication coûte à l'heure actuelle des centaines et des centaines de millions de dollars. En d'autres termes, les Américains continuent à investir massivement en microtechnologie. Que peut-on faire au Québec en matière de microtechnologie? Je pense, comme je l'expliquais récemment à quelqu'un, qu'on pourrait jouer un rôle au niveau de la microélectronique et des télécommunications. Cette personne me demanda : « Va-t-on faire des micro-ordinateurs au Québec? » La réponse est non! Par contre la microélectronique, c'est bien plus vaste que cela en termes de marché. On pourrait, par exemple, développer nos propres créneaux dans des domaines touchant le développement des produits de télécommunications ou des senseurs.

Question 2 – L'atteinte du régime quantique

Quand la micro et la nanotechnologie vont rencontrer le régime quantique, que va-t-il se passer à votre avis?

Il existe déjà des transistors qui fonctionnent dans le régime quantique. En laboratoire, on a même démontré la faisabilité de ce qu'on appelle des transistors à un électron dont les dimensions sont de quelques nanomètres. On profite justement de l'effet quantique dans le mode de fonctionnement de ces transistors. C'est ce qu'on a toujours fait en science : profiter des lois de la nature pour les utiliser à notre avantage.

Question 3 – La formation en nanotechnologies

J'aimerais savoir où on en est en termes de capacité de formation dans ces domaines-là. On voit que les applications s'en viennent rapidement. Est-ce qu'on a suffisamment de doctorats qui sont déjà là-dedans et est-ce que vous prévoyez un développement dans les prochaines années?

Je vous répondrai : « pas assez ». Je fais partie d'un réseau de recherche qui a établi une stratégie pour essayer de convaincre nos politiciens, au fédéral, d'investir dans le domaine de la microélectronique pour répondre aux besoins de formation, car les industriels dans ce domaine nous disent qu'ils ont un besoin criant et croissant de personnel. Il faut également tenir compte de la compétition de nos voisins du Sud qui ont même libéralisé les lois de l'immigration pour attirer des gens œuvrant dans le domaine de la haute technologie. En conclusion, on a besoin d'accroître le nombre de personnes formées au M.Sc. et Ph.D. Pour être très précis, à l'heure actuelle, sur le plan canadien, juste au niveau de la microélectronique, sans parler des autres secteurs, on forme 250 M.Sc./Ph.D. Dans quatre ans, l'industrie existante aura besoin de 900 M.Sc./Ph.D. par année au Canada, ce qui représente quatre fois plus d'étudiants. Ça veut aussi dire quatre fois plus de professeurs. Il y a donc un besoin réel. Toutes



les industries qui travaillent dans ce domaine ont des croissances de l'ordre de 20 % par année. Il devient même difficile de retenir ou d'attirer des professeurs dans ce domaine, compte tenu de la compétition salariale vis-à-vis des industries. Oui, il y a un besoin de formation, mais il faut des politiques beaucoup plus agressives à mon avis que celles qu'on a actuellement au Québec et au Canada.

Question 4 – Infrastructures en nanotechnologies

Une question complémentaire. Vous avez parlé de deux ou trois projets structurants qu'il faudrait mettre en place au Québec dans l'un ou l'autre de ces domaines. Est-ce que ce sont des sciences, des technologies qui exigent beaucoup en termes d'équipements, d'infrastructures ou ce sont des développements qui se font surtout à partir du personnel?

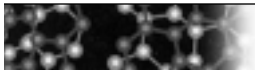
Si vous prenez les technologies de micro et nanofabrication, ce sont des domaines qui exigent des infrastructures importantes et à la fine pointe, et c'est certain que si, au Québec, on vise un développement dans ce secteur, il faut également établir un projet d'envergure nationale. Actuellement, dans les universités, on n'est pas assez équipés à ce niveau là. La FCI est venue donner un certain baume à cette situation. Plusieurs demandes ont été faites au Québec dans ce secteur et j'espère qu'elles vont toutes réussir. Par contre, dans l'avenir il faut viser à regrouper nos forces, un peu comme les Flamands ont fait avec l'IMEC qui est un excellent exemple. On ne pourrait pas avoir chacun son propre laboratoire dans chaque université, parce que si on veut avoir accès aux équipements les plus avancés et qu'on veut les maintenir très avancés, il faut absolument qu'il y ait un regroupement. Mais il faut une volonté politique pour le faire et oublier les chicanes interinstitutionnelles.

Question 5 – Les femtotechnologies

Vous parlez de manipulations à l'échelle des atomes et des molécules, des nanotechnologies. Est-ce qu'on pourrait penser, dans l'avenir, si on rêve de manipulations à des échelles encore plus petites, du genre du proton ou même d'autres constituants plus élémentaires comme le quark, les femto ou les attotechnologies?

Ce matin je parlais avec mon épouse qui est physicienne... « Ah! C'est fini la nanotechnologie! Il faut passer à la femtotechnologie! ». On commençait à rêver sur la femtotechnologie en se disant « pourquoi pas... ». On aura évidemment toujours à faire face aux lois naturelles.

Je travaillais avec Gérard Mourou dans le domaine de la femtoseconde. Il est le père, à mon avis, de ce domaine, à l'Université du Michigan à Ann Arbor. À cette époque, on parlait de laser terawatt (c'est toute la Baie James, mais en une picoseconde!) et on était justement en train de développer un tel laser dans son laboratoire avec un certain nombre de difficultés. La veille du jour où il devait faire sa présentation au comité visiteur pour la mise sur pied d'un centre d'excellence en optique ultrarapide, il est venu me voir et me dit : « Mohamed, je pense que la prochaine génération de lasers dont je vais parler au comité, c'est le laser petawatt! J'ai




regardé hier dans le dictionnaire, après le tera, c'est le petawatt! » J'ai dit : « Écoute Gérard, tu déliras, on n'a pas encore réussi à faire le tera que tu parles déjà du peta! » C'est pourtant une réalité aujourd'hui. Et je suis encore jeune, cette histoire ne s'est pas passée il y a 50 ans. En effet, le laser petawatt existe en laboratoire à l'heure actuelle et il opère à 100 femtosecondes.

Quand j'ai commencé à travailler sur la lithographie à rayons X, dans les années 90, les gens disaient que l'utilisation de la lumière visible ou UV pour la lithographie s'achèverait dans cinq ans. Mais vous savez qu'aujourd'hui, on fabrique pourtant des pentiums pro à 250 nanomètres en utilisant encore des technologies basées sur la lumière. On fabrique donc des structures dont la dimension est voisine de la longueur d'onde de la lumière! On nous disait qu'il y aurait tellement de problèmes que ça serait impossible. En d'autres termes, je pense qu'on ne rêve pas assez. À ce moment-là, je serais d'accord avec vous, pourquoi pas des manipulations à des échelles encore plus petites.

FIGURES

1



68ème Congrès de l'ACFAS
17 mai 2000


Les Nanotechnologies de la Manipulation des Atomes aux Matériaux et aux Machines Nanostructurées

“If you're looking 30 years out and it sounds like science fiction it may be wrong; but if it doesn't sound like science fiction, it 's definitely wrong”

Chris Peterson
Executive Director of the Foresight Institute


Mohamed Chaker
INRS-Energie et Matériaux
chaker@inrs-ener.quebec.ca

2

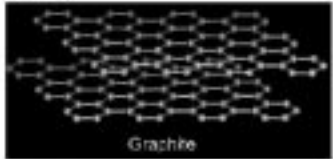


Introduction

- **Matériaux**
 - ◆ toute la matière est constituée d'atomes: ses propriétés macroscopiques dépendent du type et de l'agencement de ces atomes (e.g. charbon vs diamant)

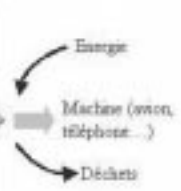


Diamant



Graphite

- **Fabrication d'une machine**
 - ◆ extraction des matériaux
 - ◆ modification des matériaux (chauffage, pression, processus physico-chimique ...)
 - ◆ assemblage (soudure, collage...)



3



Introduction

- **Le nanomètre, c'est un milliardième de mètre (10^{-9} m)**
 - ◆ un nanomètre, c'est 4 fois le diamètre d'un atome
 - ◆ un cube de 2.5 nm de côté contient 1000 atomes
 - ◆ l'épaisseur d'une feuille de papier (100 μ m) contient 400 000 atomes
- **Evolution de la technologie**
 - Micro/nanotechnologie (s'approche top-down s)*



Micro/nanodispositifs

Procédés de micro/nanofabrication (lithographie, dépôt et gravure de couches minces, etc.)


 - Nanotechnologie (s'approche bottom-up s)*



Nanomatériaux
nanomachines

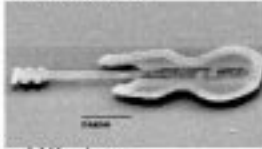
Outils de manipulation ou procédés d'assemblage

4

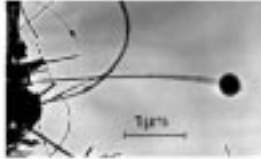


Introduction

- **Nanoguitare (Cornell, 1997): procédés de micro/nanofabrication**



 - ◆ faisceau d'électrons
 - ◆ longueur 10 μ m (dixième de l'épaisseur d'un cheveu)
 - ◆ largeur des cordes: 50 nm (f=10 MHz)
- **Nanobalance (Poncharal et al., Science, 1998): nanomatériaux**



 - ◆ fréquence de résonance: avec la sphère de carbone (968 kHz) et sans la sphère (3.28 MHz)
⇒ masse = 22 ± 6 femtogrammes



Historique

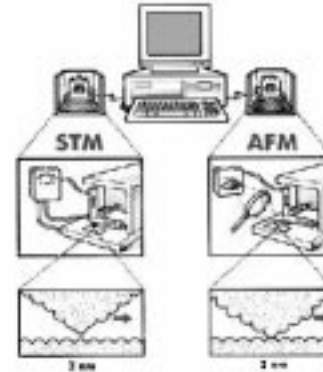
- Richard P. Feynmann (Conférence de l'APS, 29 décembre 1959)
 - ◆ Les lois physiques autorisent la manipulation et le positionnement direct et contrôlé des atomes et des molécules, individuellement, un par un:

"Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopedia Britannica on the head of a pin?"
 - ◆ Il conclut: **"Who should do this and why should they do it? Well I pointed out a few of the economic applications but I know that the reason that you would do it might be just for fun"**
- Eric Drexler
 - ◆ en 1986, E. Drexler pousse plus loin le concept de nanotechnologie dans le livre « les engins créateurs » (Engine of creation). Il a également créé l'institut américain Foresight
- Binnig et al.
 - ◆ invention du microscope à effet tunnel (STM) en 1982 et du microscope à force atomique



Voir et manipuler les atomes

- Microscopes à effet tunnel et à force atomique




Définition

- La nanotechnologie, c'est :
 - ◆ la création de nouveaux matériaux, dispositifs et systèmes via le contrôle de la matière à l'échelle nanométrique
 - ◆ l'exploitation de nouveaux phénomènes ayant lieu à cette échelle
 - ◆ il est clairement établi à présent qu'à l'échelle nanométrique, les propriétés fondamentales de matériaux (biologiques, mécaniques, thermiques, électriques, magnétiques, optiques, etc.) dépendent de la taille des nanostructures et peuvent différer énormément de celles d'un matériau solide « bulk »: comportement quantique, importance des phénomènes interfaciaux, rapport surface/volume élevé, etc.
- Faisabilité
 - ◆ On peut manipuler les atomes. Peut-on pour autant fabriquer des nanomachines?
 - assembler une feuille de papier en insérant un million d'atomes par seconde prendrait plus de 13 milliards d'années!




Défi

- Objectif
 - ◆ développement de nouvelles techniques et/ou procédés permettant la fabrication en un *temps raisonnable* de machines intelligentes à partir de l'agencement précis d'atomes et de molécules
- Moyens: les assembleurs
 - ◆ construction directe en utilisant des manipulateurs d'atomes (AFM, STM, etc.)
 - ◆ l'auto-assemblage
- Modèles
 - ◆ Approche basée sur les capacités technologiques actuelles:
 - intégration de concepts d'assemblage « top-down » à ceux « bottom-up » pour le développement de systèmes fonctionnels
 - ◆ Approche biologique
 - la nature utilise des machines moléculaires (ADN, ARN, ribosomes, etc.) pour construire des êtres vivants (i.e. croissance géométrique: dédoublement des cellules). Avec ce principe, on peut reconstruire une feuille de papier en 2 mn.

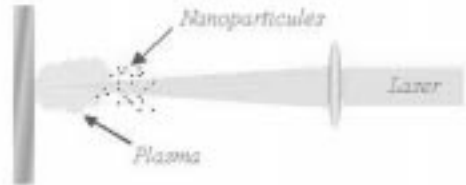



Présentation

- **Synthèse de nanomatériaux:**
 - ◆ nanoparticules, nanotubes, nanocristaux, matériaux polymériques, etc.
 - ⇒ mise au point de méthodes de production industrielle
- **Procédés de fabrication de nanostructures:**
 - ◆ auto-assemblage, matériaux microporeux, manipulation atomique directe, lithographie par nanoimpression, etc.
 - ⇒ développement de méthodes de positionnement précis pour le développement de nanomachines
- **Développement de nanodispositifs:**
 - ◆ nanodispositifs électroniques, optiques, électromécaniques, senseurs, etc.
 - ⇒ démonstration de principe

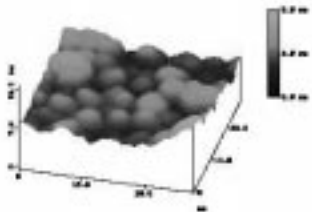
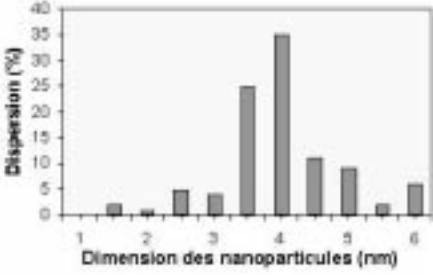


Nanoparticules


- **Formation de nanoparticules**
 - ◆ broyage mécanique
 - ◆ procédés chimiques (e.g. technique sol-gel)
 - ◆ procédés thermiques
 - ◆ procédés plasma (CVD, ablation laser)
- **Ablation laser**

- **Applications**
 - ◆ dispositifs électroniques, catalyseurs pour piles à combustible, matériaux pour les batteries, médicaments, etc.



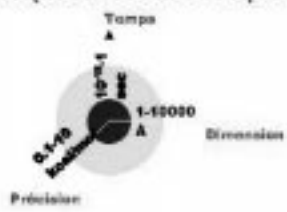
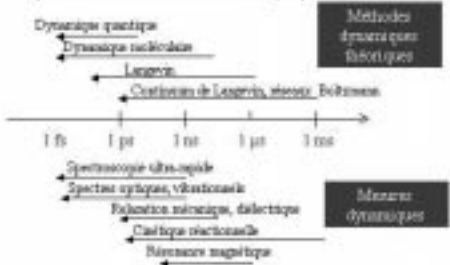
Nanoparticules

- **Observation de nanoparticules (AFM)**

- **Dimension des nanoparticules**


Dimension des nanoparticules (nm)	Dispersion (%)
1	2
2	1
3	5
4	35
5	10
6	5



Nanoparticules

- **Simulations (modèles théoriques)**

- ◆ **Echelle temporelle:**
 - 1 fs (déplacement d'atomes) → 1 s (relativement rapide pour plusieurs phénomènes macroscopiques)

Nanoparticules

◆ Echelle spatiale:
• 1 Å (échelle atomique) → 1 µm

Méthodes théoriques

- Structure électronique
- Mécanique dynamique moléculaire
- Modèle à gaz gras, soologie, etc.

Diagnostic

- Spectroscopie vibrationnelle, rra, rayon-X, neutron, lumière
- Détecteurs de masse
- SEM, TEM

Méthodes de préparation

- Synthèse contrôlée
- Assemblage d'aggrégats
- Traitement, modification de structure

Nanotubes

■ Différentes formes du carbone

→ nanotubes de carbone: S. Iijima (1991), T. Ebbesen et P. Ajayan, tubes monoparois (1993), R.E. Smalley, procédé laser (1996)

Nanotubes

■ Production de nanotubes

◆ Arc électrique

Anode: graphite + catalyzeur
Cathode: graphite

◆ Ablation laser

Four à 1200°C
Graphite + catalyzeur

Nanotubes

■ Propriétés exceptionnelles

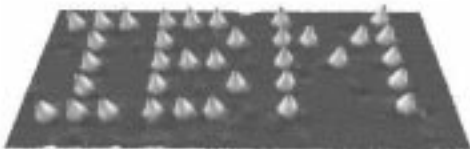
- ◆ module de Young = 2 Tpa
- ◆ la dimension et la forme du tube déterminent ses caractéristiques électriques (conducteur, semiconducteur, isolant)
- ◆ conducteur balistique: densité de courant = 10^9 A/cm², émetteur d'électrons, etc.

■ Applications

- ◆ sonde pour STM (Dai et al., 1996, Wong et al., 1998)
- ◆ nanoélectronique → tube-FET: nanotube de carbone connecté à 3 électrodes de plutonium (vitesse calculée du dispositif = 10 THz pour un tube de 100 nm de long)
- ◆ écrans plats
- ◆ stockage d'hydrogène
- ◆ pompes à chaleur à adsorption
- ◆ renforcement de matériaux

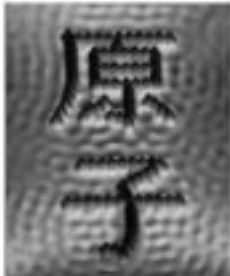
Manipulation atomique directe

- Eigler et Schweltzer, *Nature* **344**, 524 (1990)



35 atomes de xénon sur nickel; réalisé avec un microscope à effet tunnel à -270°C (source IBM)

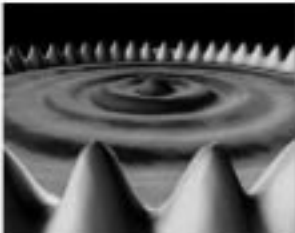
- Lutz & Eigler (le caractère Kanji pour atome)



Atomes de fer sur cuivre; réalisé avec un microscope à effet tunnel à température ambiante (source IBM)

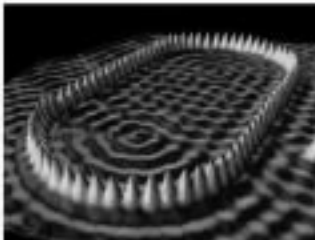
Manipulation atomique directe

- Crommie, Lutz et Eigler, *Science* **262**, 218 (1993)



Corail quantique: 48 atomes de fer sur cuivre (source IBM)

- Crommie, Lutz, Eigler et Heller, *Surface Rev. and Lett.* **2**, 127 (1995)



Stade: atomes de fer sur cuivre (source IBM)

Auto-assemblage


- Définition (Kuhn et Ullman)
 - ◆ l'auto-assemblage est un procédé dans lequel une organisation hiérarchique supra-moléculaire s'établit en un système complexe de composants inter-reliés. Les mécanismes qui produisent cette hiérarchie sont déterminés par des interactions moléculaires en compétition les unes avec les autres (e.g. composants hydrophobes vs hydrophiles, liens coulombiens, Van der Waals) → séparation de microphase ou agrégation → matériaux nanostructurés




Matériau nanostructuré (silice/surfactant)

Auto-assemblage/ dispositifs

- Formation spontanée d'une pyramide (quelques secondes)
 - ◆ pyramide (10 nm X 10 nm X 1.5 nm) d'atomes de germanium déposés sur une surface de silicium




- Jonction moléculaire déposée par auto-assemblage (Reid, 1999)
 - ◆ molécule (jonction) formée d'atomes de surface et terminée par des atomes d'or déposée par auto-assemblage entre deux plots d'or: dispositif électronique




Dispositifs

- FET basé sur un nanotube de carbone de 1.6 nm de diamètre (Martel et al. 1998)



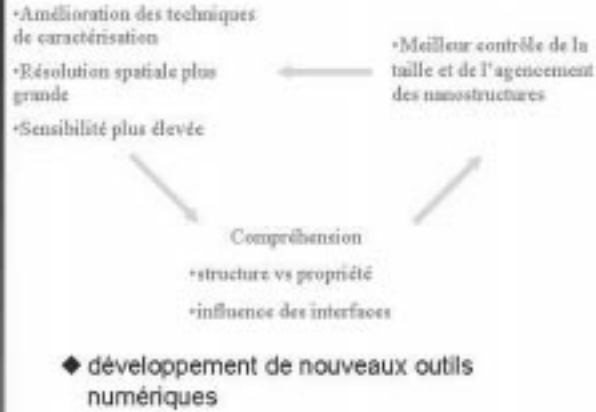
- Mesure électrique d'une molécule d'ADN (Porath et al., Nature 403, 635, 2000)



- Molécule d'ADN: 10.4 nm
- Observation de $I=f(V)$: variation non-linéaire

Recherche

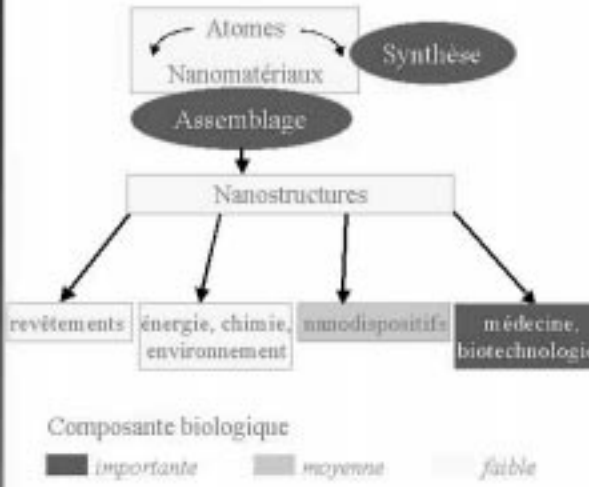
- Recherche fondamentale
 - ◆ interaction entre la caractérisation, la compréhension et un meilleur contrôle de la synthèse et de l'assemblage des nanostructures



- Amélioration des techniques de caractérisation
- Résolution spatiale plus grande
- Sensibilité plus élevée
- Meilleur contrôle de la taille et de l'agencement des nanostructures
- Compréhension
 - structure vs propriété
 - influence des interfaces
- ◆ développement de nouveaux outils numériques

Recherche

- Applications



Composante biologique

- importante
- moyenne
- faible

Applications en cours ou en développement

- Nanomatériaux
 - ◆ barrière thermique
 - ◆ catalyse à haute sélectivité
 - ◆ piles à combustible, batteries rechargeables, stockage de l'hydrogène
 - ◆ nanocomposites pour matériaux légers et résistant à la corrosion
 - ◆ polymères nanoporeux pour purification de l'eau, nanostructures pour absorption de métaux lourds, senseurs à gaz
 - ◆ nanoparticules pour les prothèses, dispensateurs de médicaments, dispensateurs de gènes (« Gene Gun ») → plantes et animaux
- Nanostructures
 - ◆ dispositifs électroniques ultra-rapides: transistors, mémoires
 - ◆ dispositifs photoniques: fibres optiques, nano-lasers, nanocomposants
 - ◆ dispositifs magnétiques (GMR): tête de lecture de disques magnétiques
 - ◆ biodétecteurs (e.g. Anthrax), nanosenseurs pour les applications médicales



Applications si on se met à rêver!

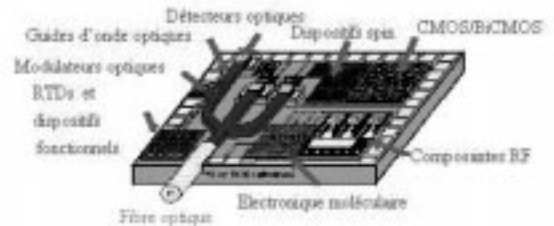
- **Matériaux auto-fabriqués à partir des atomes: recyclage à 100%**
 - ◆ air+eau+déchets → nourriture: reproduire la chaîne alimentaire en labo
 - ◆ matériaux sans défauts aux propriétés macroscopiques optimisées pour une application industrielle donnée
- **Nanomachines intelligentes douées de 5 sens, le 6ème continuera à être cependant le propre de l'être humain**
- **Nanoréparateurs de cellules malades**

Tenter de reproduire en laboratoire ce que la nature a réussi à réaliser au cours de centaines de millions d'années d'évolution, soit une maîtrise exceptionnelle de la miniaturisation pour le développement de vrais systèmes intelligents



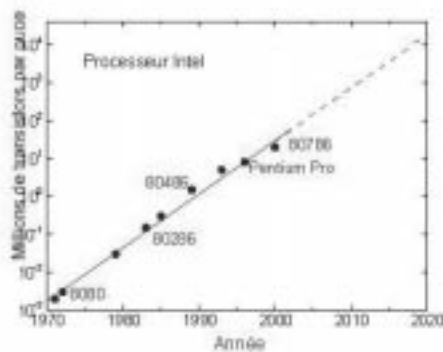
Prédiction personnelle

- **On verra de plus en plus d'applications industrielles mettant en jeu des nanomatériaux** → énergie, industries chimiques, environnement, etc.
- **En ce qui a trait aux nanostructures, le développement de la nanotechnologie se fera d'abord pour la nanoélectronique/photonique**



Micro/nanoélectronique Evolution

- **Evolution des puces (→ SOC: system on chip)**

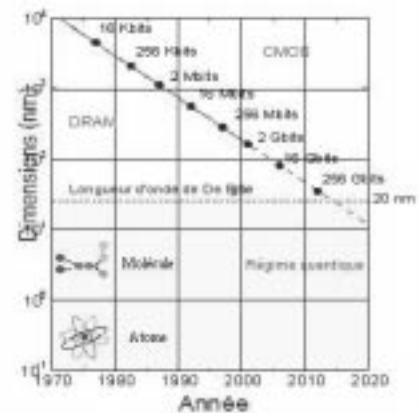


- ◆ **Loi de Moore: le nombre de transistors par puce double chaque 18 mois**



Micro/nanoélectronique Evolution

- **Evaluation des dimensions critiques des mémoires (DRAM)**



Micro/nanoélectronique *Evolution*

Année	1997	1999	2002	2005	2008	2011
Dimension critique (nm)	250	180	130	100	70	50
Horloge interne (GHz)	0.75	1.25	2.1	3.5	6	10
Coût/transistor (¢cent)	3000	1735	580	255	110	50
Coût d'une Fab	1.5 B\$			> 5 B\$		

■ La technologie CMOS pourrait opérer jusqu'à 30 nm →

il faut une alternative pour la technologie téra-bit

Micro/nanoélectronique *Lithographie*

Année	1999	2002	2005	2008	2011	2014
Dimension critique (nm)	180	130	100	70	50	35
248 nm/PSM	Production	Production	Production	Production	Production	Production
193 nm/PSM	Préqualification	Préqualification	Préqualification	Préqualification	Préqualification	Préqualification
157 nm/PSM	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise
EUV/rayons X	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise
Faisceaux d'électrons	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise
EUV/rayons X	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise
Faisceaux d'électrons	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise
EUV/rayons X	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise
Faisceaux d'électrons	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise
Technologies alternatives	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise	Recherche requise

■ Recherche requise ■ Développement en cours
■ Préqualification ■ Production

Micro/nanoélectronique *Lithographie*

benzène hémoglobine ribosome bactérie

0,1 1 10 100 1000 nm

Dispositif atomique SET Sub-0.1 µm CMOS

Micro/nanoélectronique *Dispositifs et applications*

■ Alternatives au CMOS

- Quantum Cellular Automata
- Single Quanta Memory
- Nanoscale Tunneling Joints
- Micro-robotics
- Quantum Dots
- Smart Engineering

■ INCREASED FUNCTIONALITY ■ HIGH PERFORMANCE

■ HIGH SPEED ■ LOW POWER ■ HIGH DENSITY

- AD conversion
- Matched filters
- Adders
- Sample and hold
- Memory
- Multi-resolution
- Mobile sensors
- Satellite communications
- Network data transfer
- EW receivers
- Image processing (pattern recognition)



Position du Québec

Cette liste n'est pas exhaustive

■ INRS-EM

- lithographie X, dépôt et gravure de couches minces, en collaboration avec UdeM, etc.
- production et caractérisation de nanomatériaux (nanoparticules et nanotubes) → M. Chaker et al.

■ McGill

- structures nanométriques, manipulation (AFM/STM), modélisation, auto-assemblage, détermination structure vs propriétés des nanostructures → P. Grutter et al.

■ UdeM/Poly

- couches minces, couches épitaxiales, nanomagnétisme, imagerie AFM/STM, etc. → R. Cochrane et al.

■ U Sherbrooke

- lithographie électronique, structures sub-100 nm, couches organiques auto-organisées, systèmes mésoscopiques → J. Beauvais et al.
- création d'une entreprise R&D (Quantiscript Inc.)



Effort aux USA

■ Budget « nanotechnologie » des différentes agences du gouvernement fédéral (millions de \$ US)

	1997	1999	2000	2001
NSF	65	80	97	217
DOD	32	60	70	110
DOE	7	54	58	96
NASA	3	5	4	20
DOC (NIST)	4	12	8	18
NIH	5	21	32	36
TOTAL	116	255	270	497

- ◆ Discours de Clinton: « Perspective de l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux d'usage par l'introduction de plus en plus forte de nanomatériaux dans le monde industriel (des aciers 10 fois plus résistants et bien plus légers) »



Besoins au Québec

■ Développer le savoir et le savoir-faire reliés aux technologies de micro- et de nanofabrication (approche « top-down ») pour les applications

- ◆ microélectronique/télécommunications
- ◆ microélectronique/biosenseurs
- ◆ photonique

→ convergence: microélectronique/télécommunications/photonique

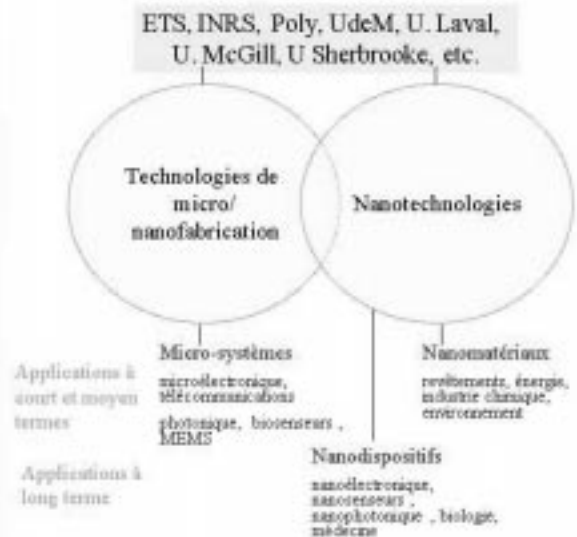
■ Initier un projet sur les nanotechnologies

- ◆ production de nanomatériaux
- ◆ contrôle de la taille et de l'agencement des nanostructures
- ◆ techniques de caractérisation
- ◆ compréhension: structure vs propriétés
- ◆ développement de dispositifs



Conclusion

■ Développement de deux ou trois projets structurants basés sur le principe de l'auto-assemblage



LES NOUVEAUX HORIZONS DE LA MOLÉCULARISATION DE LA BIOLOGIE ET DE LA MÉDECINE



Conférencier :

*M. Richard Béliveau,
Laboratoire de médecine moléculaire
Hôpital Sainte-Justine
Université du Québec à Montréal*

PRÉSENTATION DE SOPHIE MALAVOY

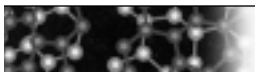
Le conférencier, M. Richard Béliveau, qui dirige le laboratoire de médecine moléculaire au centre de cancérologie Charles-Bruneau de l'Hôpital Sainte-Justine, est professeur titulaire de biochimie à l'UQAM et professeur associé au Département de physiologie de la Faculté de médecine de l'Université de Montréal. Il est également membre du Groupe de recherche en transport membranaire (centre FCAR), du Groupe de recherche en neuro-oncologie de l'Hôpital Notre-Dame et du Canadian Brain Tumor Network. Ses travaux de recherche portent sur la barrière sang-cerveau, les tumeurs cérébrales, l'angiogenèse, le cancer et sur les greffes d'organe.

La biologie moléculaire actuellement fait les manchettes, ne serait-ce qu'avec le séquençage du génome ou les organismes génétiquement modifiés. M. Béliveau va nous parler de ce secteur et de ce qu'il nous réserve.

Je voudrais d'abord remercier les organisateurs du colloque ainsi que le Conseil de la science et de la technologie, de m'avoir invité. C'est avec grand plaisir que j'ai accepté cette invitation.

La formation d'un être humain

La formation d'un être humain est un processus d'une extrême complexité. Nos débuts sont toutefois extrêmement humbles. En effet, il faut se rappeler que nous venons tous d'une seule cellule, d'un seul ovule fécondé par un seul spermatozoïde, ce qui nous donne au départ un seul génotype, et c'est par un processus que nous appelons la différenciation cellulaire que



certains gènes vont être sélectionnés et donner naissance aux neurones, aux cellules musculaires, aux cellulaires osseuses, aux globules rouges, etc.

Nous oublions souvent par quel processus se réalise cette différenciation. C'est un processus extrêmement important puisque, dans le cas du cancer, c'est le phénomène inverse qui s'observe. La cellule cancéreuse, essentiellement, est une cellule qui se différencie, qui perd son phénotype spécifique et régresse vers un phénotype de type embryonnaire.

Nous venons de parler de nanotechnologies et, pour situer l'ordre de grandeur dans lequel nous évoluons, disons que la dimension d'une cellule est de quelques microns de diamètre. Un être humain compte environ 60 000 milliards de cellules. Rappelons-nous que nous provenons tous d'une seule cellule.

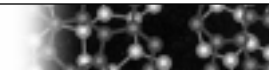
C'est là un phénomène extrêmement complexe, et lorsque nous le regardons en microscopie électronique, à balayage coloré par ordinateur, nous découvrons des phénotypes d'une beauté extraordinaire. Quand nous regardons des globules rouges dans un caillot sanguin d'une cicatrice qui est en train de se former, des cellules épithéliales des bronches, un macrophage, partie de nos systèmes de défense immunitaire, en train d'attaquer une bactérie, nous nous retrouvons véritablement dans un monde de science-fiction. Prenons l'exemple du pseudopode. Un macrophage détecte une bactérie et fait une projection de sa membrane qui va engouffrer cette bactérie. C'est ainsi que nous contrôlons nos invasions. Ou encore une cellule cancéreuse qui est attaquée par des globules blancs; les globules blancs attaquent la cellule cancéreuse et la digèrent littéralement, ne laissant que son cyto-squelette. On voit donc qu'à partir d'une seule cellule on aboutit à une diversité de phénotypes extrêmement élevés, tous provenant de 23 paires de chromosomes qui codent ce que nous sommes.

L'ère postgénomique

La tenue de cette conférence coïncide avec un événement majeur dans l'histoire scientifique. En effet, au mois de mai de l'an 2000, nous passons de l'ère pré-génomique à l'ère post-génomique. Il est d'ailleurs incroyable qu'une telle information ait passé presque inaperçue dans les journaux. Elle constitue pourtant un passage pour l'humanité aussi important que le fût l'invention de la roue, de l'imprimerie, de l'écriture ou la découverte de l'atome; c'est une étape majeure de l'histoire de l'humanité que nous vivons présentement. Mai 2000, la séquence du génome humain est connue pour la première fois. C'est trois milliards de paires de bases qui ont été codées, l'équivalent d'une chambre complète remplie de dictionnaires Larousse représentant le génome.

Deux projets différents se partagent cette belle histoire. D'un côté, le projet de Celera, entreprise entièrement privée, et de l'autre celui d'un consortium de chercheurs universitaires. Les deux groupes complètent leurs travaux à peu près en même temps. Rappelons que lorsqu'on consulte des articles de périodiques sur le génome datant de décembre 1999, les projections pour l'obtention finale des séquences se situaient vers 2005.

Depuis novembre, donc en cinq mois, nous avons séquencé à peu près 80 % du génome humain. Jamais n'avons-nous assisté à pareille accélération. Je me permettrais d'ajouter quelque chose à ce que le conférencier précédent a mentionné plus tôt. Au tout début de



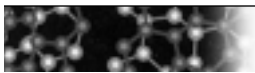
l'exploration de l'électricité, les commentateurs de l'époque déclaraient que l'électricité ne serait jamais qu'un gadget de laboratoire. Nous sommes donc toujours loin de la réalité lorsque nous essayons de prédire le futur dans un domaine donné.

Lorsqu'il a été conçu, au milieu des années 80, le projet de génome humain devait être complété vers 2025. Il y a trois ans, les prévisions étaient revues pour 2015. En décembre dernier, on prévoyait 2005, et voilà aujourd'hui que c'est fait. C'est un développement extrêmement rapide. Nous sommes donc entrés dans l'ère postgénomique. Et pourquoi sommes-nous dans l'ère postgénomique? Vous comprendrez que si chacune de nos 60 000 milliards de cellule a le même génome, comment se fait-il que nous ayons des cellules du gros orteil, des cellules cardiaques, des neurones... comment se fait-il que les cellules se différencient en des phénotypes spécifiques? Eh bien c'est que chacune de nos cellules n'exprime qu'une portion de notre génome. Si nous consultons une projection qui a été faite à partir de certaines données de la physiologie du protéome pour le nombre de gènes qui s'expriment dans un organe donné, nous voyons que tous nos organes ne sont pas égaux. Le globule rouge peut exprimer 8 gènes essentiels alors que le cerveau en exprime 3000, l'os 904, etc.

Il faut également se rappeler que notre arrivée est très récente dans l'histoire de l'évolution de la vie sur la Terre qui est déjà vieille de trois milliards et demi d'années. Ce sont des chiffres tellement grands que nous pouvons difficilement les comprendre. La meilleure façon d'appréhender ce chiffre est d'en faire une projection : si vous représentez l'âge total de la Terre par la hauteur d'un édifice de 25 étages, les premières bactéries sont apparues en haut de l'édifice; les dinosaures sont apparus à peu près au 2^e étage de l'édifice et ils ont vécu jusqu'à peu près 30 cm du sol. Et toute l'histoire de l'humanité, de l'homme des cavernes jusqu'à aujourd'hui, est représentée par la couche de peinture du plancher du rez-de-chaussée. L'histoire de l'humanité est négligeable si on la regarde dans un contexte évolutif par rapport à la pression de sélection qui a été faite.

Pourquoi introduire cette notion? Bien, vous pouvez regarder votre voisin de droite ou de gauche, l'embrasser ou le prendre par le cou parce que c'est votre frère, votre cousin en termes évolutifs. Vous pouvez faire la même chose lorsque vous arriverez chez vous : embrassez votre chien parce que vous avez 85 % de vos gènes qui sont parfaitement identiques aux siens... Embrassez votre plante aussi, parce que vous partagez 35 % de vos gènes avec elle... Les Chinois ont compris cela très tôt. Les premiers textes du bouddhisme zen nous disent que les moines bouddhistes marchaient pieds nus pour éviter d'écraser des insectes. D'autres textes nous enseignent que si vous arrachez un brin d'herbe, vous ébranlez l'univers. Très tôt dans la tradition orientale, un lien a été établi entre l'homme et le microcosme qui est très différent de ce que nous avons dans la tradition judéo-chrétienne qui situe l'homme à l'aboutissement de la création, comme s'il ne partageait rien avec le reste du monde. C'est faux d'un point de vue biologique, et il faut avoir ces concepts présents à l'esprit quand on voit que les Américains se battent présentement avec les créationnistes qui veulent réintroduire l'idée de la création biblique comme substitution à l'idée de l'évolution. Ce ne sont pas des batailles qui sont terminées.

Ce qu'il faut retenir, c'est que les gènes primordiaux sont apparus très tôt. Nous avons dans nos cellules certains gènes qui remontent à des milliards d'années d'évolution. Certains



cytochromes dans nos mitochondries, qui nous permettent de respirer, ont des centaines de millions d'années d'évolution. Et c'est ainsi que le séquençage de certains organismes, comme la drosophile, a permis une approche qui a fait avancer de façon très rapide la séquence du génome humain.

Il faut également mentionner ce que nous appelons les gènes homologues que l'on retrouve dans une variété d'espèces et qui nous servent aujourd'hui à construire les arbres évolutifs. C'est de cette façon que nous pouvons déterminer l'âge d'une espèce ou le fait qu'une espèce soit un précurseur de telle autre espèce. Nous avons également des familles de gènes et de protéines qui sont apparues très tôt dans l'évolution et qui ont été sélectionnées comme des nanomachines ou des micromachines par des critères d'évolution de niches écologiques. Ces machines étaient tellement efficaces que le gène en duplication a muté successivement pour produire plusieurs gènes et plusieurs fonctions qui proviennent d'un gène primordial.

Une note d'humilité... Le génome humain n'est pas le plus grand, contrairement à ce que l'on pourrait penser. Le génome humain contient trois milliards de paires de bases alors que la simple fougère a un génome qui est 100 fois plus grand. La taille du génome n'est pas un indice de la complexité des fonctions qui sont exercées. En réalité, seule une faible portion du génome est exprimée. La grande majorité de notre ADN, est constituée de déchets (*Junk DNA*, en anglais). Il n'y a environ que 3 % du génome qui est exprimé de façon correcte au niveau des protéines. Le reste est constitué de vestiges évolutifs, un peu comme des objets qui ne sont pas vraiment utiles mais qui s'entassent dans le garage et que l'on découvre lorsqu'on fait le ménage. Dans nos cellules, on aurait besoin de quelqu'un pour faire un ménage !

Voici un exemple de l'importance de ce fait. Présentement, beaucoup de chercheurs sont en train d'établir la séquence de l'ADN du tétodon. Or, ce tétodon présente à peu près la même quantité de gènes que le génome humain, sauf que son génome est 10 fois plus petit parce qu'il ne contient pratiquement pas de *Junk DNA*. Paradoxalement, nous apprendrons peut-être beaucoup d'un poisson pour savoir ce que nous sommes, parce que son ADN est beaucoup plus compacté en quelque sorte. La taille du génome n'a donc pas vraiment d'importance. C'est plutôt sa capacité de coder de l'information qui est importante. C'est ce qui nous amène à introduire le concept de protéome.

À partir d'une cellule embryonnaire qui est pluripotentielle, qui possède tous les gènes, on produit des cellules hépatiques ou des cellules nerveuses qui n'expriment que certains de ces gènes. C'est là que nous distinguons ce que nous appelons le protéome du génome. Alors que le génome est universel, dans nos cellules le protéome constitue une expression phénotypique spécifique. Comparons le monde chimique et ses 106 éléments du tableau périodique avec le monde biochimique tel que nous le connaissons actuellement. On estime le génome humain à environ 40 000 gènes, qui, une fois les protéines exprimées, composeraient un tableau périodique du monde vivant d'une taille de 500 000 protéines.

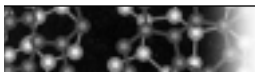


La protéomique

La protéomique est donc l'étude de l'expression biologique des protéines codées par un gène et de leurs interactions avec des ligands naturels ou avec des drogues, des médicaments exogènes. La régulation de la fonction protéique constitue l'*output* dynamique du génome et la protéomique est le prolongement logique de la génomique. C'est pour cette raison que j'ai parlé plus tôt de l'ère postgénomique. Pourquoi est-ce important? L'ADN est associé au génotype et la protéine est associée au phénotype. La protéine est codée par l'ADN et c'est elle qui est la cible des médicaments. Lorsque vous prescrivez n'importe quel médicament, ce n'est pas l'ADN que vous ciblez, c'est la fonction enzymatique codée par une protéine associée à l'ADN. Et au phénotype est associée l'action biologique et à la protéine l'activité catalytique. Lorsque vous obtenez un effet d'un médicament qui est une réponse pharmacologique, c'est au niveau de l'activité catalytique que vous agissez; lorsque vous avez un effet secondaire d'un médicament, c'est également au niveau de l'activité catalytique d'un enzyme cible. Les modèles de régulation enzymatique classiques où un enzyme réagit avec un seul substrat sont déjà très complexes. Dans le modèle de cascades, les enzymes sont associés les uns aux autres mais dans le modèle protéomique actuel, les enzymes contrôlent non seulement la dégradation ou la transformation de la matière, mais sont également interreliées les uns aux autres dans une matrice d'une complexité démentielle... ou divine, selon vos affinités... 500 000 protéines interagissant les unes avec les autres composent une réalité d'une extrême complexité.

Du génomique on débouche sur le protéomique qui permet l'identification de nouvelles cibles enzymatiques ou de nouvelles cibles protéiques, dans un but de pharmaceutique pour la découverte de nouveaux médicaments, mais également dans un but de nutraceutique pour la prévention de maladies, ainsi que dans un but de recherche fondamentale pour accroître l'éventail de nos connaissances. Le modèle classique de Watson et Crick qui propose un gène, une protéine, une fonction est dépassé. Le modèle protéomique lui substitue un gène, avec N protéines et N fonctions. À partir d'un gène, des protéines sont produites et nous obtenons des domaines spécifiques associés à chacune de ces protéines. Une protéine est une mégastructure un peu comme nous : nous avons des pieds, nous avons des jambes, nous avons des bras, nous avons une tête, une bouche et on ne fait pas la même chose avec la bouche que ce que l'on fait avec ses pieds. La protéine ne fait pas la même chose avec une portion ou l'autre de sa structure.

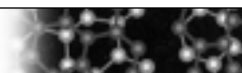
Plusieurs activités biologiques sont donc associées à une même structure mais, qui plus est, ces protéines sont également modifiées par une panoplie de modifications covalentes, chimiques que nous appelons la lipidation, la méthylation, la phosphorylation, la glycation, la glycolisation... Il y a plus de 150 modifications chimiques des protéines qui ont été identifiées et qui donnent un ensemble de protéines différentes, toujours à partir de la même protéine initiale. Et, de façon encore plus diabolique, chacune de ces formes est également transformée et on découvre encore des domaines spécifiques associés à chacune de ces formes. Donc, à partir d'une seule protéine, on peut aboutir à 10, 20, 30, 50 fonctions différentes pour un seul gène. Et c'est dans cette direction que la médecine moléculaire a avancé. Cela est très important. Regardons, par exemple au niveau hormonal, où un seul messenger aboutit, après une cas-



cade d'évènements, à des millions et à des milliards de molécules transformées par la matière, et c'est pour ça que nous sommes là. C'est la puissance de la catalyse enzymatique des enzymes, donc des protéines, qui a permis l'évolution du vivant. Ce ne sont pas les gènes, mais bien la capacité des enzymes de transformer la matière vivante qui en est responsable.

Je donne toujours l'exemple de la différence entre la technique de la chimie et la technique de la biochimie. Si vous voulez hydrolyser une protéine, prenons une protéine de lait, de bœuf, de soya selon que vous soyez végétarien ou carnivore, si vous voulez donc la briser chimiquement pour en absorber les acides aminés et construire vos propres protéines, vous devez la traiter dans l'acide chlorhydrique 6 normal, pendant 24 heures à 100°C. Vous prenez la même protéine, vous la mettez en présence de 1 nanogramme de trypsine, à PH 7, à 37 °C et elle est hydrolysée en quelques heures. Pourquoi? Parce que la trypsine que vous avez dans vos sucs digestifs sécrétés par le pancréas a comme fonction de digérer les protéines dans un contexte physiologique. Elle a été sélectionnée par l'évolution pour distorsionner, modifier la structure des protéines qu'elle digère et couper le lien chimique à des coûts énergétiques extrêmement réduits. Si on applique ce concept à l'échelle d'une cellule, les phénomènes qu'on y observe deviennent extrêmement complexes.

Pourquoi l'approche protéomique a-t-elle connu une percée majeure? Comme toujours en science, c'est à cause de l'évolution des technologies et, essentiellement, à cause de l'évolution des méthodes que nous appelons électrophorétiques bidimensionnelles, qui permettent d'identifier des nouvelles cibles pour la découverte de maladies ou de nouveaux médicaments. En pratique, c'est à peu près l'équivalent de la presse de Gutenberg, une étape majeure dans l'histoire de la médecine et de l'humanité. C'est une représentation cartographique de l'ensemble de ce que nous sommes au niveau cellulaire. C'est l'expression des protéines. Avec les outils analytiques appropriés, nous sommes en mesure de séparer les protéines selon le poids isoélectrique de la protéine à première dimension et selon la taille moléculaire de la protéine à deuxième dimension, ce qui nous permet de faire toutes sortes d'études. Il existe des systèmes robotisés qui permettent d'exciser, de détecter chacun des spots, de les digérer, de les injecter dans des spectromètres de masse, ce qu'on appelle des *matrix assisted laser desorption ionisation-time of flight*; ce sont des systèmes extrêmement complexes, qui permettent, par des analyses spectrales, de déterminer la masse des polypeptides générés et d'identifier les protéines avec l'aide des banques d'expression des étiquettes protéomiques, que l'on retrouve sur Internet. On peut également numériser ces données, les mettre sur des sites Internet et établir une cartographie. Nous sommes donc en mesure de produire une empreinte cartographique de ce que nous sommes comme individu. Non pas comme être humain, ce que le génome nous dit, mais bien comme individu et c'est ce qui distingue le protéome du génome. Le génome humain est une description globale de l'espèce humaine que nous avons reçue de notre Ève universelle et de notre Adam universel. Nous venons tous d'un père et d'une mère communs très, très loin dans l'histoire de l'évolution. Ce que la protéomique nous donne, c'est une cartographie de ce que nous sommes en tant qu'individu.



Les applications de la protéomique

Les applications pratiques de la protéomique vont devenir extrêmement diversifiées. Puisque le but du colloque est un peu de faire de l'extrapolation et de voir quelles directions est susceptible de prendre la science dans ces domaines, je consacrerai la deuxième partie de ma présentation à dresser une liste non exhaustive des directions probables de cette ère post-génomique. J'ai donc choisi certains sujets qui me semblaient d'actualité et qui paraissent porteurs d'avenir.

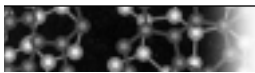
La neuropsychologie

Voyons d'abord la neuropsychologie ou la molécularisation du comportement, dont on ne parle pas assez. Nous assistons à une transition majeure dans la compréhension des patterns moléculaires qui font ce que nous sommes. Le Prozac représente une découverte majeure dans l'histoire de la recherche, dans l'étude du comportement et dans la correction de certains comportements ou de certains états mentaux. La psychologie et la psychiatrie utilisent depuis longtemps des molécules qui agissent au niveau du système nerveux central mais, au fur et à mesure que la protéomique et la génomique vont évoluer, nous comprendrons mieux comment les systèmes de neurones fonctionnent et serons en mesure de les corriger. Présentement, on les utilise dans le contexte de pathologies; les gens souffrent de psychoses maniacodépressives ou de la maladie d'Alzheimer et on leur donne des médicaments appropriés à leur état, mais il est à prévoir, que dans un avenir très rapproché, nous aurons à notre disposition des molécules qui agiront pour provoquer la tristesse, si vous voulez écrire un roman triste, ou l'euphorie si vous voulez provoquer un état d'euphorie ou la joie ou peut-être même l'amour dans un contexte futur. Nous avons déjà des phéromones qui le font très bien. Il y a énormément de recherche qui va se développer dans ce domaine. Le Prozac n'est que le début de cette nouvelle ère La pharmacoprotéomique, sont des domaines très importants. Dans les prochaines minutes, je vais développer certains de ces thèmes.

La pharmacoprotéomique

La pharmacoprotéomique vise l'identification de nouvelles cibles moléculaires afin de permettre la découverte de nouveaux médicaments et leur développement. Ce qu'on appelle la protéomique différentielle c'est l'analyse comparative des profils des protéines, dans des tissus, dans des cellules d'animaux qui ont été exposés à des médicaments ou dans des spécimens pathologiques.

Si nous considérons le vieillissement de la population, il est évident que les maladies dégénératives vont jouer un rôle majeur dans l'avenir et représenter des coûts sociaux absolument faramineux. Et les coûts associés au développement d'un médicament sont tout aussi élevés. Le coût moyen de développement d'un médicament par l'industrie pharmaceutique, de la phase préclinique à la phase de mise en marché, est de l'ordre de 300 millions de dollars US. Il peut s'écouler environ 10 ans entre le moment de la découverte d'un médicament et sa mise en marché. Sur 10 000 molécules découvertes en laboratoire, il y en aura une qui



va se retrouver sur les étagères des pharmacies, qu'elle soit destinée à traiter votre rhume des foins, votre cancer ou votre pathologie maniacodépressive.

Il y a plusieurs phases dans le développement de médicaments : une phase clinique 1 où on s'assure de la sécurité, une phase 2 où on s'assure de l'efficacité, et une phase 3 où on mesure les effets secondaires et où l'on compare cette nouvelle thérapie avec d'autres.

L'impact de la protéomique dans le développement des médicaments va être énorme car, grâce à la cartographie des enzymes qui nous composent, nous sommes capables d'identifier de nouvelles cibles. Supposons, par exemple, que nous voulions développer un bloqueur de la pompe à protons dans votre estomac, afin de traiter les ulcères d'estomac. On isole les cellules de l'estomac, on fait une analyse bidimensionnelle et on s'aperçoit que chez ceux qui font des ulcères d'estomac, il y a des protéines nouvelles qui apparaissent. Nous sommes en mesure de numériser ces cartes et l'ordinateur permet de comparer toutes les protéines, une tâche impensable manuellement, de comparer par analyse numérique et de vous indiquer que de nouvelles protéines sont apparues, que vous pourrez séquencer et ainsi identifier une nouvelle cible pharmacologique. À partir de la structure cristallographique de cette protéine vous pouvez modéliser de nouveaux médicaments qui vont vous permettre de la contrôler. À partir de la carte protéomique d'un état de maladie, vous pouvez avoir de nouvelles protéines qui apparaissent ou de nouvelles protéines qui augmentent leur intensité, et avec un médicament approprié vous pouvez ramener cet état pathologique à un état plus normal et corriger l'expression de certaines protéines. Donc, la protéomique va avoir un effet au niveau social extrêmement important dans la réduction des coûts du développement des médicaments et dans la réduction des temps alloués pour le développement de ces médicaments.

Je voudrais également signaler des observations qui sont un peu plus fondamentales, pour expliquer que le contrôle de l'expression des enzymes qui fait que nous sommes ce que nous sommes est associé à un ensemble de traitements que la génomique classique n'est pas en mesure d'évaluer. À partir de l'analyse du génome, il est impossible de savoir quelles modifications post-traductionnelles les enzymes vont subir. Il n'est pas possible de savoir si les enzymes vont être modifiés par traitement protéolytique ou s'ils vont être associés avec d'autres protéines, ce qui est extrêmement important.

Par exemple, nous savons que la formation des cancers provient, entre autres choses, du fait qu'il y a des récepteurs à la surface de nos cellules cancéreuses qui sont activés par des facteurs de croissance qui stimulent la cellule cancéreuse à se développer de façon anarchique. Comment se fait cette stimulation? C'est à travers une cascade de relais d'informations biochimiques qui aboutit au niveau du noyau pour amplifier l'expression de certains gènes, de certaines protéines qui va faire que la cellule va se diviser.

Comment se fait ce relais d'information? Il se fait par associations non covalentes des molécules de récepteurs avec d'autres enzymes, et ce sont ses associations qui forment des mégacomplexes que j'appellerai de la sociologie moléculaire! On a toujours pensé en termes d'un enzyme = une fonction, et jusqu'à la fin des années 70, on pensait que la seule façon de modifier les activités d'un enzyme était de le modifier de façon covalente ce qui implique une énorme quantité d'énergie. Disons, pour faire image, qu'il s'agirait d'appliquer un bon



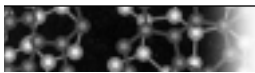
coup de poing alors que l'observation nous montre que la majorité des fonctions biologiques est régulée par des poignées de main. Ce sont des associations qui font qu'il y a des changements transitoires dans la structure des enzymes associés par la présence de ligands ou de molécules d'origine synthétique, comme les médicaments, et c'est par des modifications subtiles de la conformation des enzymes que se produisent ces modifications. Imaginons cela comme la présence d'un simple petit caillou dans votre soulier qui va modifier toute la dynamique de la marche; un caillou tout petit, de moins de 0,1 gramme va changer la conformation d'un individu qui pèse 70 kilos. De la même façon, une simple association transitoire avec un petit médicament change la structure et modifie l'information. La seule façon de comprendre ces phénomènes, c'est par des approches protéomiques.

Le cancer est un exemple. Le risque de développer un cancer et d'en mourir est de 1 sur 3. Nombre de causes du cancer sont bien identifiées, dont le tabagisme. Le cancer qui a le plus évolué durant les 20 dernières années est le cancer du poumon chez la femme et il est absolument désolant de voir que nous avons encore de la difficulté à passer le message du tabagisme associé au cancer.

Si on regarde la survie à cinq ans, pour une grande variété de cancers, on s'aperçoit qu'il y a des variations énormes et que, dans le meilleur des cas, on obtient des taux de survie à cinq ans de 80 à 90 %, mais il y a de nombreux cancers où le taux de survie est très faible, comme les cancers du cerveau, du pancréas ou de l'œsophage. De nouvelles approches thérapeutiques sont essentielles. Je vais l'illustrer par un développement majeur dans le secteur de l'oncologie, qui s'appelle l'angiogenèse et qui représente certainement l'une des percées les plus majeures des 20 dernières années dans ce secteur. Rappelons qu'une tumeur primitive ne peut pas évoluer au-delà de quelques millimètres de diamètre si elle ne stimule pas la prolifération des vaisseaux sanguins qui l'entourent. C'est un phénomène de vascularisation qu'on appelle l'angiogenèse : la formation de néovaisseaux sanguins qui viennent alimenter la tumeur. La tumeur en a besoin puisque autrement, privée d'oxygène, elle étouffe. Elle se donne donc un réseau de circulation qui lui permettra de libérer des cellules cancéreuses qui vont se déplacer, extravaser du réseau circulatoire, et former des métastases. Et comme vous le savez, ce qui tue dans le cancer c'est rarement la tumeur primaire, mais bien les métastases. Le phénomène d'angiogenèse est donc étroitement associé à la mortalité due au cancer.

Il y a beaucoup de médicaments en développement, dont le but est de bloquer les tumeurs de la phase prévasculaire à la phase postvasculaire. Les cellules tumorales sécrètent des facteurs qui provoquent la réticulation, la formation d'un vaisseau sanguin qui vient alimenter la tumeur et permettre sa croissance de façon extrêmement rapide. Voici un exemple classique où la protéomique doit être utilisée de façon optimale. Rappelons que, dans ce cas précis, nous ne parlons même pas d'un millième des réactions qui sont impliquées, ce qui donne une idée de la complexité du phénomène.

J'insiste ici sur le fait qu'à l'intérieur de la même structure protéique on peut retrouver plusieurs activités enzymatiques différentes et plusieurs activités biologiques différentes; nous avons un cas absolument fascinant d'activités antagonistes retrouvées à l'intérieur de la même molécule. Prenons le cas du plasmilogène; si vous faites un arrêt cardiaque, vous pouvez recevoir du TPA en intraveineuse, c'est le *Tissue prosmiinogène activator* qui dégrade le



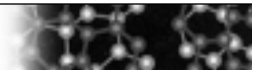
plasmilogène en plasmine, et la plasmine digère le caillot et permet la circulation de l'oxygène dans vos artères. Mais la plasmine qui est libérée est un enzyme qui participe au processus que je viens de vous décrire et qui va favoriser la formation des vaisseaux sanguins. Dans nos tissus, la plasmine est transformée par des agents réducteurs en une autre molécule que l'on appelle l'angiostatine qui est antiangiogénique. Donc, à l'intérieur d'une protéine qu'est le plasminogène, codée par un seul gène, on retrouve deux activités biologiques qui sont antagonistes. Une activité de promotion des cancers et une activité d'inhibition des cancers. Mesurons la complexité de ces mécanismes : lorsqu'on administre un médicament, on ne peut pas prédire la portée ou les effets secondaires qu'il va produire parce qu'on ne comprend pas ces processus complexes, parce qu'on ne dispose pas des outils pour les étudier. Pourquoi est-ce important? Continuons avec l'exemple du cancer. Si on les regarde dans un contexte global, on peut associer environ 30 % des décès dus au cancer uniquement au tabagisme et environ un autre tiers associé à la diète. Le tiers des cancers chez l'humain pourraient être associés à des habitudes de comportement uniquement associé à l'alimentation, ce qui est énorme. Comment peut-on dissocier la source des cancers qui nous affectent? Eh bien c'est par des analyses de protéomique et de génomique et des analyses également épidémiologiques. Pour comprendre ces interactions complexes, la médecine d'aujourd'hui est extrêmement multidisciplinaire, et il y a des équipes constituées de biophysiciens, de biochimistes, de neurochirurgiens, d'épidémiologistes, et c'est à partir de la combinaison de ces expertises que l'on essaie de comprendre pourquoi ces maladies apparaissent. Voilà un secteur porteur d'avenir également.

Le clonage

Le clonage. Du côté du clonage, il y a eu une hystérie médiatique qui, à mon avis, est parfaitement injustifiée. Il ne faut pas oublier que la nature fait du clonage depuis des centaines de millions d'années : les jumeaux identiques. J'ai écouté je ne sais combien d'émissions de télévision autant aux États-Unis qu'en Europe et ici, où des panels discutaient de toutes sortes de choses sans que jamais personne ne dise : « Ne paniquons pas, des clones ce ne sont que des jumeaux identiques » Or, il est très rare que ceux d'entre nous qui avons des jumeaux identiques, veuillent prendre le foie ou l'intestin de leurs frères jumeaux pour se faire une greffe... Or, le clonage ce n'est que la reproduction de ce que la nature fait depuis que la reproduction sexuée existe.

Je n'irai pas dans le détail, mais c'est un secteur qui est en évolution extrêmement accélérée. Si on veut faire des projections un peu comme on faisait tout à l'heure, je pense qu'il faut sérieusement considérer le fait que le clonage humain va se réaliser, dans un avenir extrêmement rapproché. Si le clonage des chèvres, des moutons et des porcs est possible, le clonage humain n'est qu'une question de temps. C'est une réalité qui fera certainement l'objet d'un débat de société. Mais je pense qu'il faut se rappeler qu'un clone est avant tout un individu partageant un même bagage génétique avec un autre individu. Il faut se rappeler l'exemple des jumeaux identiques. C'est son environnement qui fera de lui un être distinct.

Les maladies respiratoires



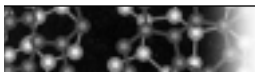
Les maladies respiratoires sont un autre exemple qui est souvent négligé quand on parle de l'évolution de la médecine. Les causes de mortalité les plus importantes, à l'échelle de la planète, contrairement à ce que nous pourrions penser comme occidentaux bien nourris, souffrant des maladies de l'ère postindustrielle, ne sont pas les maladies cardiaques ni le cancer, mais bien les maladies infectieuses respiratoires. Il est évident qu'à l'échelle de l'humanité, la recherche en médecine moléculaire doit évoluer pour comprendre par quels mécanismes les bactéries résistent aux antibiotiques. Il y a eu évidemment une période sombre dans l'histoire de la médecine, où on a administré trop d'antibiotiques, ce qui a eu pour effet de sélectionner les bactéries résistantes aux antibiotiques, et c'est une réalité qui nous rattrape aujourd'hui. Dans les pays occidentaux, présentement, les hôpitaux sont envahis de souches de staphylocoques, de streptocoques qui sont résistantes à tous les antibiotiques connus. Ce problème n'est pas négligeable, et c'est certainement encore un secteur où le protéomique va jouer un rôle majeur. Comment s'exprime la résistance des bactéries aux antibiotiques? Par toutes sortes de mécanismes. Les bactéries développent des systèmes de pompage leur permettant, aussitôt que l'antibiotique est administré, de le repomper à l'extérieur de la cellule. Les bactéries développent des mécanismes de dégradation enzymatique qui transforment les antibiotiques en composés inactifs. Elles modifient leurs propres gènes de façon à ce que la cible ne soit plus reconnue par l'antibiotique. Et il est évident que l'antibiothérapie, dans un contexte global de santé humaine à l'échelle de la planète, est un secteur de recherche qui doit évoluer et qui évolue d'ailleurs déjà à une vitesse absolument phénoménale.

La thérapie génique

La thérapie génique est également un secteur de recherche qui est porteur d'avenir. On ne doit pas l'envisager dans un horizon de 2 ans, mais peut-être dans 10 à 20 ans. Le principe de la thérapie génique consiste à identifier les mutations ponctuelles dans le génome qui sont responsables de telle ou telle maladie et de synthétiser un gène correcteur de la mutation défectueuse et d'utiliser différents vecteurs d'administration pour corriger le défaut. On réinjecte au patient l'ADN corrigé, avec un système de ciblage vers la cellule dont on veut corriger l'ADN. Évidemment, tout cela relève encore un peu de la science-fiction. Mais ces outils existent et la recherche est très active dans ce secteur; les thérapies géniques sont appelées à vivre une évolution draconienne.

Le génie tissulaire

Un autre secteur à évolution extrêmement importante, c'est celui du génie tissulaire. Pour comprendre ce secteur, il faut définir une cellule pluripotentielle : ce sont des cellules néo-embryonnaires qui apparaissent très tôt dans le développement, par exemple dans la formation des différentes cellules sanguines. Ainsi, les globules blancs, les globules rouges et les plaquettes proviennent d'une seule cellule souche et ce sont des facteurs de croissance spécifiques qui permettent à la cellule souche de donner naissance aux neutrophiles, aux globules blancs, aux lymphocytes, aux plaquettes, donc à des cellules qui ont des fonctions biologiques différentes provenant d'une cellule souche unique. En génie tissulaire, on prélève dans l'embryon ces cellules pluripotentiels, et en utilisant des facteurs de croissance spécifiques, il est possible de recréer en laboratoire du tissu musculaire, osseux ou différents autres

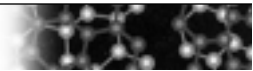


types de tissu. L'idée de cette technique est d'utiliser ces tissus pour corriger certaines maladies neurodégénératives ou osseuses ou encore cultiver de la peau en laboratoire pour la greffer sur des grands brûlés. C'est un secteur de recherche qui évolue de façon extrêmement rapide.

Je termine en rappelant l'importance du protéome. Nous entrons dans la phase post-génomique en recherche médicale. Alors que le génome ne donne pas une image globale de la réponse cellulaire au stimulus, l'analyse du protéome donne un état de la nature et de la proportion des enzymes de notre carte individuelle, de la modification du niveau des enzymes présents et de leur association avec d'autres enzymes et de leur localisation sub-cellulaire. Il faut retenir que si le génome a défini ce que l'être humain est dans sa globalité, le protéome nous permettra d'obtenir une cartographie individuelle de ce que nous sommes comme individu et nous permettra dans un contexte thérapeutique, de mieux cibler les thérapies, d'optimiser l'efficacité thérapeutique et de minimiser les effets secondaires.

L'avenir de la recherche

En concluant, j'aimerais également souligner que l'avenir de la recherche repose sur les gens en formation. Ce sont les chercheurs, ce sont les étudiants gradués, les étudiants diplômés qui font des maîtrises, des doctorats; ce sont les chercheurs postdoctoraux, ce sont les techniciennes de laboratoires, ce sont les chercheurs seniors dans les laboratoires. Ce sont eux qui représentent la matière grise et qui, par leur travail quotidien, font avancer la science. On a tendance à mettre beaucoup d'accent sur le financement gouvernemental, sur les infrastructures, et bien que cela soit important, je pense qu'on néglige les aspects de soutien global aux étudiants et aux chercheurs. Le problème majeur que je vois en recherche médicale réside dans la compétition incroyable que les directeurs d'un laboratoire de recherche ont à subir pour que leurs chercheurs seniors restent dans leur équipe. On leur offre, dans l'industrie, des salaires trois ou quatre fois supérieurs à ce que nous sommes en mesure de leur offrir dans les universités ou les hôpitaux. C'est là un problème majeur qu'aucune infrastructure présente, au Québec ou au Canada, ne permet d'affronter présentement. Les biotechnologies et la biopharmaceutique sont en évolution extrêmement rapide. Le Québec se classe huitième en Amérique du Nord en matière de biopharmaceutique et de biotechnologique. Il constitue une capitale de biotechnologie à l'échelle internationale à cause de la présence des sièges sociaux des compagnies pharmaceutiques et à cause des politiques gouvernementales québécoise qui ont favorisé, avec raison, l'implantation des compagnies de biotechnologie. Le problème que nous vivons comme chercheurs, dans le développement de la recherche médicale, c'est celui de garder nos chercheurs seniors à l'intérieur de nos équipes et de leur offrir des carrières. Quand aurons-nous l'intelligence de récompenser ces jeunes scientifiques, en leur offrant de vraies possibilités de carrière en recherche scientifique?



PÉRIODE DE QUESTIONS

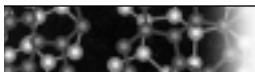
Question 1 – La complexité de la protéomique

Une question qui est peut-être un peu plus fondamentale parce que je suis impressionnée, dans le modèle protéomique, de la complexité qui est devant vous, vous pouvez, à la limite lire les bases qui ont été faites, mais de là à interpréter le sens de tout ça... Est-ce que c'est un des défis justement la biologie moléculaire qui vous attend? Parce qu'un gène, plusieurs fonctions ça va devenir compliqué assez vite, non?

On commence à peine à comprendre. La bio-informatique va devenir extrêmement importante pour catégoriser et essayer de prédire des phénomènes, malgré une grande variabilité interindividuelle. Ce n'est pas l'information qui est limitative, c'est le traitement de l'information. Le dimanche matin, lorsque je m'assois devant mon ordinateur à la maison et que je tape mes mots clés (j'en ai 74), j'extrait des banques de données à peu près 800 articles qui ont été publiés durant la semaine, uniquement avec ces mots clés. Et lorsque je parle de mots clés, je parle de recherches très spécifiques. Sur ces 800 articles, j'en commande à peu près une soixantaine chaque semaine, et ce sont là des articles très avancés. Chaque semaine, il faut lire ce niveau de littérature, ne serait-ce que pour se maintenir à jour, pour savoir ce que les autres chercheurs de la planète ont réalisé. Il faut, de plus, interpréter ces résultats. Le simple fait de digérer l'information produite par les autres est déjà une tâche énorme. Donc, ce n'est pas l'information qui est limitative dans notre secteur, c'est la gestion de l'information, le traitement de l'information, l'intégration de l'information. C'est ça qui est difficile.

Je prédis que de nouvelles carrières vont se développer, telle celle de gestionnaire d'informations scientifiques. Je suis en phase de recruter quelqu'un dans mon laboratoire qui va seulement lire. Il va être assis de 8 h le matin à 5 h le soir et va lire tout ce qu'il y a à lire puis, à la fin de la journée, il va me donner une heure de *briefing*, de résumé de tout ce qui s'est fait dans la littérature médicale qui nous concerne.

Nous sommes noyés d'informations. Il y a une masse d'informations absolument démentielle dans ce secteur qui est due à la somme de chercheurs dans les universités, l'industrie pharmaceutique, les facultés de médecine. Une telle intensité de recherche dans le privé ne se retrouve pas dans d'autres secteurs. Le projet génome est un exemple très concret où le secteur privé a coiffé au fil d'arrivée le consortium des chercheurs universitaires où on avait pourtant mis des centaines de millions de dollars US à l'échelle de la planète.

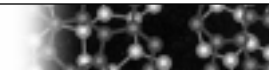


Question 2 – Les directions de recherche à privilégier

On voit un nombre pratiquement infini de besoins ou de directions dans lesquels la recherche pourrait s'orienter. Si on regarde le système de recherche scientifique dans ce domaine au Québec, j'imagine qu'il y a des forces, des faiblesses, mais j'imagine aussi que ça se développe principalement dans le sens de la force des chercheurs et des laboratoires que nous avons.

Ma question est la suivante : il va y avoir des sommes importantes qui vont être investies au cours des prochaines années, dans ce domaine, avec Génome Canada par exemple, Génome Québec aussi, peut-être devrait-on dire Protéome Canada ou Protéome Québec... Est-ce que vous pensez que ces investissements devraient être faits dans une direction que vous pourriez privilégier, est-ce qu'il y a une approche?

Le problème qui existe dans ce secteur, c'est que l'évolution s'est faite de façon tellement rapide que tout le monde a été pris de vitesse. Les gens travaillaient chacun dans leur secteur et tout d'un coup ces outils apparaissent, les programmes apparaissent encore plus rapidement. Par exemple, cette année, entre septembre et février, j'ai écrit 16 demandes de subvention. Les concours réguliers du CRM, du CRSNG, de la Fondation canadienne du rein, plus la Fondation canadienne de l'innovation, Valorisation-Recherche Québec. Tous ces programmes ont été annoncés rapidement et parfois nous avons deux semaines pour rédiger nos demandes. C'est insensé. Il y a un problème de coordination et il y a un problème d'évolution très rapide dans ce secteur. Je pense que nous sommes à une époque où on doit réaliser des synergies entre les équipes. On doit créer des collaborations avec les équipes, ce qui n'est pas dans la tradition des chercheurs. La création de réseaux et d'associations n'est pas dans la culture universitaire. La culture universitaire c'est l'individu, le culte de l'individu et il faut qu'on ait des *King pin*. On ne recrute pas à l'intérieur des départements universitaires dans le but de créer des équipes, on recrute plutôt le meilleur candidat dans un secteur. Alors, il y souvent plusieurs individus qui ne collaborent pas les uns avec les autres. S'il est difficile d'établir de telles politiques, à l'intérieur d'un même département, d'une même université, imaginez les collaborations interuniversitaires. Nous avons reçu l'héritage d'une politique de recrutement des 30 dernières années mais je pense que nous devons prendre des positions claires et nettes dans ce secteur et favoriser le regroupement des équipes dans un contexte de synergie et établir des axes de priorités. Le Québec n'a rien à envier à qui que ce soit en Amérique du Nord ou sur la planète, en termes d'expertise, en termes de développement pharmaceutique. Quand je reçois des collègues de Harvard, de Cornell ou de Duke, de Stanford, ils sont sidérés quand ils regardent les installations que nous avons. Des appareils comme les nôtres, ils en ont un pour leur département; moi, j'en ai pour mon laboratoire. Nous ne sommes pas en retard de ce côté, sauf qu'il y a des choix à faire dans le soutien au personnel. Je pense que ce qui est le plus négligé en termes de politique de développement, c'est le personnel, le personnel, le personnel...



Le FCI pour les infrastructures matérielles, c'est très bien, mais mon problème quotidien n'est pas de savoir si je vais avoir telle génération d'appareil ou telle autre, c'est plutôt de savoir, à chaque année si je vais être capable de générer assez de subventions pour garder tous mes chercheurs. Voilà le lot de tous les directeurs de laboratoire. C'est de se dire que la personne qu'on forme depuis 12 ans, qui est un leader dans son secteur à l'échelle de la planète va peut-être accepter une offre dans l'industrie et qu'on va la perdre. Le problème de la recherche biomédicale, de la recherche pharmaceutique dans ce contexte c'est le soutien du personnel. Arrêtons d'investir dans le béton et investissons dans les cerveaux.

Question 3 – Les finalités de la recherche

Je trouve ça très intéressant et très impressionnant de connaître la vie et toutes ses origines. Je comprends vos préoccupations au niveau de la recherche, mais je me pose la question, bête et méchante : « Si on découvre tout ça, si on maîtrise tout ça, quand est-ce qu'on va mourir? À quoi ça sert finalement de toujours vouloir aller plus loin? »

Je ne crois pas à l'immortalisation. Si on reprend l'exemple du cancer, le but n'est pas de rendre les gens immortels, mais d'empêcher un enfant de 4 ans de mourir d'une leucémie, un enfant de 8 ans de mourir d'une tumeur cérébrale et les gens de 50 ans, qui sont dans la force de l'âge, de mourir d'un myélome multiple. Ce n'est pas de prolonger la vie, de nous rendre immortels mais bien de donner une espérance de vie optimale qui permette aux gens de vivre une meilleure vie.

...Mais ça cause des problèmes éthiques, de savoir à quel âge on arrête de soigner quelqu'un?

Je pense que ces problèmes se posent même aujourd'hui, à un âge où l'espérance de vie est de 80 ans - 82 ans pour les femmes et 78 ans pour les hommes.

...Alors que les enfants d'aujourd'hui vont vivre 100 ans et plus?

Ça reste à établir. On comprend encore très peu comment les cellules vieillissent. On parlait des clones tout à l'heure; il ne faut pas oublier que Dolly a l'âge de sa mère. Même si c'est un bébé, elle a l'âge des gènes qui lui ont été transférés. Donc, on ne comprend pas beaucoup encore comment ce vieillissement se produit. Et je pense que c'est un débat qui se situe à un autre niveau et qui va probablement se préciser dans quelques années, qui touche effectivement l'éthique et qui est déjà là. Ces choix éthiques se font déjà en clinique. Ils vont s'amplifier avec le vieillissement de la population et je pense que c'est l'avenir qui va nous dire quelle position nous devons adopter.

LES MUTATIONS DE LA NUMÉRISATION :

L'INFORMATIQUE ÉLECTRONIQUE,
PHOTONIQUE, QUANTIQUE, BIOMOLÉCULAIRE



Conférencier :

*M. Denis Poussart, Laboratoire de
vision et systèmes numériques,
Université Laval*

PRÉSENTATION DE SOPHIE MALAVOY

Le prochain conférencier est M. Denis Poussart qui dirige le laboratoire de vision et systèmes numériques à l'Université Laval où il enseigne également au Département de génie électrique et informatique. Il a été coordonnateur, de 1990 à 1998, du réseau IRIS (Institut de robotique et d'intelligence des systèmes). Il a reçu de nombreux prix, dont le prix OCTAS remis par la Fédération informatique du Québec pour une innovation, soit un outil de formation simulateur de machines dangereuses dans le domaine des sciences forestières. La prochaine conférence va donc nous amener dans le monde du numérique, de l'électronique, du virtuel, de la modélisation et de l'intelligence artificielle.

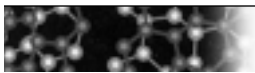
Note :

Quelques précisions ont été ajoutés par des notes en bas de page. Les références (exemple: [1]) renvoient aux principales figures qui ont accompagné la présentation.

J'ai sous-titré cette conférence « Regards sur le passé et le futur des technologies » [1]. Au cours des prochaines minutes nous tenterons d'entrer dans la boule de cristal du futur [2].

Quand je pensais à la structure de la présentation, j'ai été confronté au même problème que sans doute mes prédécesseurs : « Il y aurait tant de choses à dire; le défi est de choisir quoi ne pas dire » ... Je me suis donc inspiré de la pensée de Churchill : « Le futur a déjà commencé depuis longtemps. » [3].

Je vais donc prendre un certain temps pour tenter de « déconvolutionner » en quelque sorte le passé, pour examiner d'abord comment il nous a amenés là où nous sommes et, peut-être, nous aider ainsi à mieux nous projeter dans le futur.



Rappel historique

En guise de préambule, j'aimerais d'ailleurs souligner l'importance de saisir la perspective historique de la technologie et dire à quel point je regrette qu'elle ne soit pas mieux présentée à nos étudiants, ceux et celles qui en seront les prochains créateurs. Dans cet univers de changements accélérés, le recul est une aide précieuse à la navigation. Il y a du clapot, il y a de la marée, il y a des tsunamis, il y a des vagues de fond, il y a une complexité dynamique. Mais dans le chaos actuel et la rapidité des développements, il existe néanmoins certains invariants qu'il s'agit de capturer.

Une première caractéristique qui s'impose : les sciences informatiques et les technologies dont nous parlerons ici relèvent purement de l'artificiel. A la différence, peut-être, des objets de la biologie et de la physique qu'ont exposés mes deux collègues ce matin, le domaine que nous abordons est pure création de l'homme¹. Herbert Simons l'a bien signalé dans son remarquable ouvrage, *The Science of the Artificial*, publié en 1969 [4].

On peut identifier trois grands affluents de ce fleuve – ou de ce torrent – qui coule aujourd'hui : la physique, les communications et les interfaces. L'accélération s'amorça dès lors que ces disciplines s'engagèrent dans un enrichissement mutuel régénératif qui fit émerger leurs synergies. Puis, dans l'espace plus récent, leur convergence aboutit à une fusion sans frontières précises qui en a multiplié les applications et, surtout, les a rendues accessibles au plus grand nombre [5].

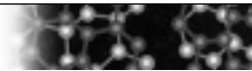
Nous sommes à cet égard immensément redevables à quelques grands personnages.

Après les premiers travaux de précurseurs du 19^e siècle, comme Babbage et Lady Lovelace [6]², Van Neumann [7] amorcera cette grande convergence contemporaine en définissant une architecture de calcul qui a survécu jusqu'à nos jours et qui porte son nom. Van Neumann a cette idée, géniale et simple, qui consiste en ce que l'information et les instructions qui vont traiter cette même information seront toutes deux codées de même manière, stockées de même manière et transportées dans les mêmes canaux³. Il en résulte que notre ordinateur ne contient qu'une seule mémoire et que c'est l'ordonnancement temporel du flux des données qui indique qu'un bit est considéré comme donnée ou comme instruction. Ce concept d'unification est extrêmement puissant. On le retrouve aujourd'hui réappliqué avec les retombées que l'on connaît dans le multimédia : qu'il s'agisse de texte, de son, d'image ou d'autres types d'information, toutes les données sont représentées par un même code binaire. Il en découle non seulement des économies considérables, mais il s'ensuit des possibilités d'interaction et d'intégration qu'il serait très difficile, voire impossible, de réaliser autrement.

¹ R. Béliveau, « Les nouveaux horizons de la molécularisation de la biologie et de la médecine », et M. Shacker, « Les nanotechnologies : de la manipulation des atomes aux matériaux et aux machines nanostructurées », communications présentées lors de ce même colloque. En fait, et c'est là une dimension fondamentale des percées récentes dans ces deux domaines, on sent que les connaissances en arrivent au point où de nouveaux types de matière artificielles – biologiques ou physiques – deviennent réalisables.

² Il faudrait noter que cette histoire débute 2000 ans avant notre ère, avec les premières horloges à eau égyptiennes. Elle se poursuit par les progrès remarquables de l'horlogerie et les premiers automates : Vaucanson réalise un métier à tisser programmé en 1745, et en 1801 Jacquart développe son célèbre métier à tisser automatique programmable. Des géants, comme Diderot et Pascal, avaient déjà précédé Babbage ...

³ L'alternative consiste à utiliser des mémoires distinctes pour les instructions et les données. Il s'agit de l'architecture dite « Harvard », avantageuse pour certains traitements spécialisés.



Turing [7] réalisera des travaux exceptionnels au début de ce qui allait devenir l'intelligence artificielle. Il demeure également très connu pour ses réalisations en cryptographie et en encodage.

Vanevar Bush est certainement un des premiers grands visionnaires de l'aboutissement contemporain. Dans son essai *As We May Think*, publié en 1945, il articule déjà les concepts de l'ordinateur individuel – le Memex – et de l'hypertexte [8]. Le transistor n'est pas encore inventé...

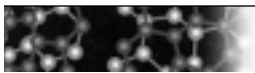
C'est à Shannon que nous devons une définition formelle, mathématique, donc opérationnelle, de ce que nous entendons techniquement par « information » [9]. Le codage, la cryptographie et la compression de données, qui permettent à des millions d'internautes de récupérer des fichiers mp3 en se raccordant à Napster, ou d'emmagasiner deux heures de vidéo numérique sur une cassette de la taille d'un paquet d'allumettes, trouvent leur source chez Shannon. Il y a déjà 50 ans.

En 1947, avec l'invention du transistor au germanium par Bardeen, Brattain et Shockley survient la rupture du support physique de l'information [10]. Dix ans plus tard ce sera le premier circuit intégré. Kilby et Noyce déposent des demandes de brevets à quelques mois d'intervalle [11]. C'est Noyce qui verra l'opportunité de fabriquer les circuits par photogravure sur un seul substrat de silicium. Pour Kilby il s'agira de placer les transistors sur une plaquette et de les interconnecter⁴.

À la même époque, l'idée que « le réseau est l'ordinateur » prend racine [12]. Ce concept deviendra par la suite un slogan commercial très appuyé de Sun Microsystems. A la même occasion, d'abord dans le contexte des communications, va se développer une notion aux immenses conséquences, soit celle qu'il faut « faire simple pour (pouvoir) assembler d'immenses ensembles ». Les systèmes d'information vont se complexifier au fil des années, mais leur développement va surtout se réaliser par de gigantesques assemblages d'éléments individuels relativement simples, à la limite identiques comme les millions de transistors que l'on retrouve à l'intérieur d'une barrette de mémoire. Ce même principe de synthèse du complexe à partir de « particules » élémentaires est repris aujourd'hui dans ces nouveaux domaines biologiques et physiques dont nous ont entretenu nos collègues ce matin.

Dans les années 60 naît l'idée que plutôt que de transmettre un message de manière continue, en un seul bloc, il y aurait avantage à le segmenter en fragments – en paquets – capables de se comporter en entités relativement autonomes. Ces paquets, en encapsulant simultanément données et instructions de contrôle, pourraient circuler à travers les mailles d'un réseau sans nécessité de directions centralisées. Les règles de circulation seraient formalisées dans des protocoles. L'aiguillage aux nœuds du maillage – le routage – pourrait ainsi s'effectuer automatiquement. Les paquets d'un même message circuleraient indépendamment, en suivant éventuellement des routes différentes, pour se rabouter correctement lorsque parvenus à destination. L'assise d'Internet était posée [13].

⁴ Kilby a reçu le prix Nobel de physique le 12 octobre 2000.



On voit donc que le principe d'Internet repose sur des idées relativement anciennes, du moins dans notre vision du temps comprimé qui caractérise notre époque. On ne peut être qu'impressionné qu'une idée aussi élégante, conçue à l'origine dans un environnement de laboratoire, ait si bien survécu jusqu'à son déploiement planétaire.

Des éléments clés, le circuit intégré, le réseau, l'encodage étaient dès lors placés sur l'échiquier. Mais pour que la partie puisse se développer pleinement et que l'évolution passe en mode accélérée, il manquait une dimension qui s'avérera critique : l'interface personne – machine.

Sutherland combla cette lacune en réalisant en 1962 le premier prototype d'un affichage graphique relié à un ordinateur [14]. La même année Engelbart publie un document substantiel qu'il est fascinant de relire [15]. On y découvre déjà toute la vision de cette intelligence collective dont il est aujourd'hui question⁵ et de l'émergence d'une communauté planétaire dotée de moyens nouveaux d'échange et de collaboration. À ce stade embryonnaire de ce qui deviendra connu sous le nom d'Internet, pas de velléité commerciale ou mercantile mais une vision authentiquement humaniste dont on doit s'inquiéter qu'elle tende actuellement à s'estomper au profit de simples intérêts financiers. Engelbart invente aussi la souris qu'il utilise pour activer des hyperliens affichés sur un environnement visuel primitif. Il ne prend pas la peine de faire breveter immédiatement l'invention dont les droits d'exploitation seront éventuellement cédés pour 40 000 \$⁶. À la même époque, Alan Key et ses collègues du Xerox Parc inventeront nombre des ressources que nous tenons maintenant pour acquises en informatique, comme la programmation orientée objet, le fenêtrage graphique, l'affichage point-à-point⁷, la méthodologie de conception des circuits intégrés à grande échelle, des langages importants comme Small Talk et Postscript, l'impression laser, l'éthernet, etc... [16, 17]

L'observation à saisir ici est que, sur une période de quelques années – fin 1960 - début 1970 – la scène bascule sous la puissance de cette notion essentielle de convivialité et d'interface : la notion du gros ordinateur centralisé et uniquement accessible au spécialiste va se muter en celle de l'ordinateur personnel et mobile, que s'approprie l'individu. Les graines de l'informatique nomade contemporaine sont semées : Alan Key avec son *Dynabook* anticipera le portable et projettera la métaphore et l'ubiquité du livre de poche « intelligent » [18, 19].

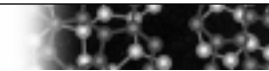
On doit aussi noter que le transfert de technologies s'est presque uniquement exercé à travers ces chercheurs qui, ayant quitté Xerox, fondèrent de nombreuses entreprises. Xerox profita fort peu de ce foisonnement d'idées nouvelles qui allaient révolutionner l'horizon technologique, confirmant en cela l'adage que « nul n'est prophète en son pays » [20]⁸.

⁵ 30 ans plus tard, Pierre Lévy publie *L'intelligence collective*, (Paris, La Découverte, 1994).

⁶ British Telecom a récemment tenté de réclamer des droits d'exploitation pour un brevet touchant à l'hypertexte (US4873662) et enregistré en 1976, bien après cette démonstration. Pour apprécier la problématique de la propriété actuelle qui prend parfois des dimensions surprenantes, voir par exemple : <http://www.salon.com/tech/log/2000/06/21/hyperlink/index.html>.

⁷ Dans ce type d'affichage, maintenant universel, chaque pixel de l'écran est adressé individuellement. Précédemment et depuis Sutherland, l'affichage était réalisé par une suite de vecteurs produits par un circuit *ad hoc*, ce qui limitait énormément la possibilité de modification dynamique de l'image.

⁸ Xerox commercialisa avec succès l'impression laser, cependant. Le 19 octobre 2000, dans un cruel revers de fortune, le *New York Times* annonçait que pour éviter une faillite imminente, Xerox explorait la vente de son centre de recherche Xerox Parc : <http://www.nytimes.com/2000/10/19/technology/19XERO.html>.



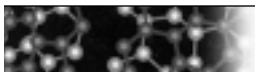
Un des autres concepts charnières qui a sous-tendu le développement fulgurant de nos technologies a consisté à chercher à exploiter des propriétés naturelles de la physique, et ainsi à en tirer profit, habilement et gratuitement.

Par un heureux concours de circonstances, le silicium présente une panoplie d'attributs qui facilitent considérablement la réalisation d'un élément logique, et éventuellement de millions d'entre eux inscrits sur un même substrat. Au-delà du « faire simple pour réaliser complexe » que nous avons évoqué précédemment, la microélectronique constitue un remarquable exemple de la stratégie du « faire petit pour faire très gros et très rapide » [21].

Pour réaliser l'élément de base – le transistor d'une porte logique élémentaire – il suffit en effet de croiser deux conducteurs définis de manière appropriée sur le substrat, et de les séparer par un isolant [22] en les fabriquant grâce à un processus de lithogravure [23]. Dans la région de cette intersection se produisent des phénomènes bien contrôlés qui font en sorte que le flux de courant circulant dans le premier conducteur est modulé par la tension appliquée au second. Or, dans le cas du silicium cet isolant est gratuit : il s'agit de verre, de silice, obtenu par simple oxydation du silicium. La position dominante du silicium est largement tributaire de cette propriété naturelle : d'autres filières, qui possèdent par ailleurs des caractéristiques intéressantes, ne disposent pas de cet avantage intrinsèque et leurs difficultés plus grandes de fabrication les confinent à des applications plus spécialisées⁹.

Il est aussi intéressant de noter que plus de 90 % des transistors fabriqués de nos jours se retrouvent au niveau des circuits de mémoire. Un ordinateur de table en contient typiquement plus de 100 millions pour cette fonction alors que son unité de calcul n'en renferme que le dixième. Mais l'utilisateur ne réalise pas que cette mémoire – dite mémoire vive ou mémoire de travail – est d'une précarité extrême : sa durée de vie n'est que de quelques millisecondes ! Alors qu'il ou elle croit disposer d'un ordinateur numérique, la quasi-totalité de sa machine est véritablement analogique : chaque bit d'information y est représenté sous forme d'une micro-charge emmagasinée dans la minuscule capacité que représentent les deux conducteurs séparés par l'isolant de silice. À nouveau, cette capacité essentielle est gratuite, fournie uniquement par une géométrie soigneusement optimisée. Mais sa charge se dissipe spontanément. Pour assurer l'intégrité des données, chacune des ces millions de cellules de mémoire doit être lue, 500 fois par seconde, et régénérée à sa valeur nominale. Il s'agit d'un débit de communication bien plus important que celui de l'unité de calcul : qu'il puisse s'exécuter sans faille, automatiquement, à l'insu de l'utilisateur et sans impact significatif sur la performance globale fut une percée tout à fait remarquable.

⁹ L'arséniure de gallium, par exemple, possède un avantage sensible pour les circuits à très haute fréquence, car les porteurs de charges peuvent s'y mouvoir plus rapidement que dans le silicium. Le dépôt d'isolant y est cependant une opération nettement plus délicate. Il s'agit d'un composant important pour la photonique.



Cette volatilité de la mémoire de travail fait néanmoins problème, tels le temps prohibitif de démarrage, où dans le cas de systèmes critiques, la nécessité de systèmes d'alimentation de sauvegarde en cas de panne du secteur. Le développement de mémoires non volatiles fait l'objet d'intenses travaux et de préparatifs de fabrication. Leur apparition dans le marché de masse est proche.

Grâce à la synergie des facteurs que nous avons évoqués plus haut, la taille et la complexité des circuits intégrés n'ont cessé de croître. Cette évolution s'est vue identifiée avec la « première loi » empirique de Moore [24], qui modélise une complexité qui double à tous les 18 mois [25]. Lorsqu'une modification aussi radicale survient en l'espace de quelques années, ce changement quantitatif devient qualitatif. La ressource n'est pas seulement moins coûteuse; elle est tellement extraordinairement moins coûteuse que survient un véritable changement de phase. La technologie informatique que nous tenons pour acquise relève pour beaucoup de cette caractéristique, inédite dans l'histoire des sciences.

Le futur des technologies informatiques

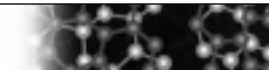
Parvenus au présent de ce voyage rétrospectif, que pouvons-nous escompter du futur?

Il est assuré que cette croissance exponentielle se poursuivra pendant plusieurs années encore, mais de sérieux nuages pointent à l'horizon. La dimension minimum de la structure la plus fine est aujourd'hui de l'ordre de 150 nanomètres; une dimension 3 fois plus petite, de 50 nm, qui correspondrait à la loi de Moore autour de 2010 n'est pas acquise [26] mais probablement atteignable. D'autres contraintes physiques, comme la dissipation thermique, prennent cependant une plus grande importance au fur et à mesure que se rapetissent les dimensions et qu'augmentent les fréquences d'exploitation. La qualité des conducteurs doit être améliorée¹⁰. Au niveau de la fonction mémoire il devient critique de modifier le diélectrique afin d'augmenter la charge dans ce condensateur qui devient de plus en plus microscopique¹¹. On doit également recourir à l'ultra violet pour améliorer la lithographie de si petites dimensions. L'utilisation de rayons X, si on doit éventuellement y recourir, impliquera des réinvestissements immenses [27].

À terme apparaissent des facteurs fondamentaux qui relèvent de la nature physique de la matière. Les signaux deviennent si ténus que les phénomènes quantiques, avec leur aspect intrinsèquement statistique, ne peuvent être ignorés. La fiabilité logique deviendra alors hautement problématique, et il est probable que l'on devra recourir à de nouveaux paradigmes de représentation des données [28].

¹⁰ Déjà l'industrie est passée récemment à l'utilisation du cuivre plutôt que de l'aluminium pour les conducteurs déposés sur le substrat microélectronique.

¹¹ Traditionnellement, ce sont les circuits de mémoire qui atteignent la plus haute densité, à cause de la régularité de leur organisation interne qui facilite la compaction maximale des cellules. Le volume très élevé de leur fabrication autorise également des investissements considérables pour les améliorer.



En fait, il est probable qu'une limite aussi concrète que celle de la loi économique entrera en jeu bien avant celle de la physique. Le coût d'investissement d'une usine de fabrication double à peu près à chaque génération : on désigne parfois cette observation sous l'appellation de « seconde loi » de Moore [29]. Le coût actuel est de l'ordre de 2 milliards de dollars. Des montants de 10, 20 ou 30 milliards pointent à l'horizon. Est-il imaginable qu'en 2020 on investisse 200 milliards pour une seule usine? Toute la ressource économique d'un pays? Cela est d'autant plus problématique si on tient compte du temps nécessaire pour préparer de telles infrastructures, qui se mesure en années. La question de la robustesse et de la fiabilité sur le plan corporatif devient un facteur primordial de l'équation. Il suffit, pour s'en rendre compte, d'observer les problèmes considérables qui ont suivi de modestes tremblements de terre survenus récemment à Taiwan, problèmes qui ont perduré de longs mois. Imaginons les risques encourus si l'ensemble de la technologie devenait tributaire d'une seule usine de 200 milliards.

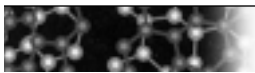
Des approches alternatives

Il est donc assez certain que pas très loin dans le temps surgira un mur difficilement franchissable – du moins si la technologie continue sur la même lancée. Mais d'autres approches sont possibles, qui permettent d'entrevoir des éléments de solution.

Une de ces approches alternatives consiste en une utilisation beaucoup plus étendue des architectures parallèles, domaine sur lequel un nombre considérable de travaux de recherche ont été effectués mais dont les percées concrètes sont encore rares. La raison de cet état de choses est entièrement liée au succès de l'approche conventionnelle du mono-processeur, avec la loi de Moore qui a constamment doublé de puissance au fil des ans. Jusque récemment, celle-ci a procuré une solution « facile » à la problématique de la puissance de calcul et a empêché l'alternative parallèle de sérieusement prendre racine.

Cette observation illustre bien une dimension très humaine de la technologie. Dans toute évolution, il est des passages qui sont incrémentaux, d'autres qui sont discontinus, et qui correspondent à des changements de phase. La nature humaine préfère généralement les premiers et a horreur de sauter dans le vide des seconds, surtout si ceci implique des risques – financiers, par exemple – significatifs. Cette attitude, bien ancrée, couplée à la grande difficulté d'évaluer les risques à court terme par rapport aux bénéfices à long terme, constitue un frein majeur au changement. Implanter un nouveau processus de fabrication est extrêmement risqué pour une entreprise, et ce doute devient une contrainte tout aussi importante que la physique fondamentale.

Il est prévisible que les architectures parallèles doivent revenir, car la rupture qu'elles proposent est relativement peu « douloureuse » par rapport à celle d'autres solutions. Plusieurs entreprises ont tenté de percer ce domaine il y a dix ou quinze ans. La plupart ont disparu. Le moment était prématuré, mais alors que la première loi de Moore commence à s'essouffler et que la seconde projette son ombre, la possibilité de leur renaissance devient certes plus favorable.

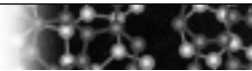


D'autres voies sont possibles. On peut signaler l'utilisation de la logique multiniveau sur laquelle de nombreux travaux ont aussi été effectués. Il s'agit ici de recourir à une logique ternaire ou quaternaire, plutôt que binaire. Un autre développement en cours consiste à explorer des architectures qui soient tolérantes aux fautes, ceci en anticipation du comportement probabilistique des dispositifs hyperminiaturisés. Il s'agit ici d'assurer l'exactitude ou la robustesse de fonctionnement par des considérations d'architecture et d'encodage plutôt que par l'intégrité des composants. Une contribution majeure de Shannon, dont nous avons évoqué le nom précédemment, n'a-t-elle pas été de démontrer qu'en utilisant un encodage approprié il est possible de réduire immensément la probabilité d'erreur lors de la transmission d'un signal, même lorsque le canal utilisé est bruité.

Une voie prometteuse et déjà activement explorée consiste à s'inspirer du modèle de notre propre cerveau. J'ai d'ailleurs commencé ma carrière en travaillant dans ce domaine et passé de nombreuses années excitantes à étudier les processus ioniques à travers les membranes, au niveau nanoscopique. Pris individuellement, un neurone est un élément de calcul très bruité. Notre système atteint un niveau de fiabilité globale remarquable en dépit des variabilités importantes au niveau cellulaire, et ceci dans un contexte où une partie de nos cellules cessent de fonctionner. Il est assez clair que cette fiabilité globale provient de l'architecture sous-jacente, architecture dont la compréhension profonde demeure une des grandes frontières de la connaissance.

Cette inspiration de notre propre constitution chimique suscite des travaux intenses sur le plan de nouveaux dispositifs. On a pu montrer des capacités d'autoassemblage de certaines molécules - anneaux de benzène et soufre, par exemple - qui laissent croire en la possibilité de créer des dispositifs - des micropores - qui commenceraient à ressembler étrangement à la membrane de nos cellules [31,32]. Celle-ci est en effet constituée d'une couche de lipides relativement inerte, qui fait office de substrat. Sur ces lipides sont localisés des sites actifs dont les protéines revêtent une configuration spatiale particulièrement « exquise ». Sous l'influence du champ électrique transmembranaire, des changements de configuration s'opèrent et, ce faisant, la diffusion des ions est modulée, avec modification de ce même champ. Ce couplage est à la base du fonctionnement du système nerveux du vivant et de sa capacité de « calcul ». Il est donc plausible que la chimie prenne le relais de la physique et fournisse éventuellement des dispositifs extrêmement intéressants.

Mais il importe de bien réaliser que la disponibilité de dispositifs performants est une condition nécessaire mais non suffisante pour obtenir une puissance de traitement élevée. Grâce à l'auto-assemblage il sera en effet (peut-être) possible de créer facilement ces dispositifs, et ceci en grands nombres. Mais comment réussir à les structurer spatialement, topologiquement, pour en extraire des structures utiles. Parce que les forces naturelles qui président à l'autoassemblage sont fondamentales et régulières, comment obtenir une organisation spatiale qui présente la variabilité locale nécessaire pour supporter des traitements arbitraires? Dans le neurone, la topologie spatiale de l'arborescence synaptique joue ce rôle essentiel, mais il n'est pas clair que des lois fondamentales de la chimie pourront être transcendées, et il est probable que le micro-contrôle de la commande génétique soit nécessaire. C'est ce que l'on



peut espérer, à terme, des machines biologiques. Mais il existe encore des obstacles immenses à franchir avant qu'on retrouve de telles machines « imprimées sur une cravate ou sur un ongle » comme on a pu le lire dans la littérature de la science-fiction! [33]. Bref, le routage des signaux dans un réseau de calcul composé de dispositifs chimiques demeure une énigme qui apparaît difficile à résoudre.

Le calcul à haute performance

Ne serait-ce que pour « fermer la boucle », il convient ici d'aborder brièvement le domaine du calcul scientifique à haute performance. Je pense ici à certains travaux effectués sur le génome – ceux de Celera notamment – qui ont exploité d'énormes moyens de calcul pour accélérer l'analyse des données.

Dans ce domaine également, la tendance contemporaine a confirmé la tendance, devenue leitmotiv, de « faire petit pour faire gros ».

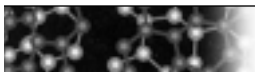
Les machines anciennes, telle la famille Cray, recouraient à des technologies hyperrapides, mais exotiques, qui exigeaient presque de fonctionner à la température de l'azote liquide.

L'approche plus récente consiste à utiliser des briques simples – des processeurs conventionnels donc économiques – et à en réunir un grand nombre à l'intérieur d'une architecture appropriée pour en arriver à un assemblage de grande dimension ... et nettement plus accessible [34, 35].

Cette idée de prendre comme point de départ, soit des atomes ou des circuits assez élémentaires ou des petits paquets de messages ou encore de simples processeurs, cette idée de prendre en quelque sorte les briques interchangeables d'un jeu Lego™ et de les réunir en structures complexes, voilà bien un concept qui m'apparaît fondamental et qui traverse tout ce domaine des technologies de l'information sur des échelles d'ordres de grandeur considérables.

La communauté de recherche maintient, au niveau mondial, un répertoire dynamique des 500 machines réputées les plus puissantes. La plus performante (en novembre 1999) est constituée de 9500 processeurs. Elle est réalisée en utilisant des technologies relativement simples et atteint une puissance de pointe de quelques Teraflops [36]. Au Canada, j'en profite pour le signaler ici, et notamment au Québec, nous accusons un retard considérable en cette matière. Seulement quelques-unes de ces 500 installations se retrouvent au Canada : trois au Québec (dans des secteurs d'utilisation non scientifiques cependant). Deux sont associées à la météorologie et une à la gestion de données aéronautiques mondiales. La seule machine scientifique canadienne qui se qualifie est localisée au Conseil national de la recherche et se classe 470^e [37]. Le retard est assez évident. Il existe une volonté de fédérer nos maigres ressources et des projets ont récemment été agréés en ce sens auprès de la Fondation canadienne pour l'innovation. Une demande récemment déposée conjointement par McGill, Laval et l'UQAM, à laquelle je participe, vise à renforcer les ressources en calcul scientifique au Québec¹².

¹² Cette demande a reçu l'accord de la FCI en juillet 2000.



Cette tendance actuelle à regrouper des éléments simples en une fédération de grande taille est particulièrement visible dans l'approche au supercalcul de type Beowulf qui reprend la métaphore de la ruche. De simples abeilles – des processeurs grand public – sont réunies dans une configuration d'envergure, avec une économie d'échelle qui bénéficie de la production de masse de ces unités de traitement. Il en résulte un coût qui n'atteint pas 10 % de celui d'un superordinateur traditionnel de puissance comparable [38].

Lorsque l'on examine l'histoire des sciences, on ne peut manquer de constater un mouvement continu vers l'abstraction, vers l'intangible. L'humanité a commencé avec une utilisation très physique des ressources et s'est progressivement dirigée vers l'exploitation des connaissances et du virtuel. Un certain futur du supercalcul repose sur cette virtualisation émergente. Plutôt que d'exploiter quelques machines réunies dans un même laboratoire, pourquoi ne pas agrandir la ruche et en réunir des milliers réparties sur la planète, en misant sur les réseaux à haute performance qui se généralisent? Le projet SETI constitue un modèle que beaucoup connaissent et représente une expérience particulièrement significative à cet égard. Deux millions d'utilisateurs y sont inscrits et acceptent de « donner » leurs cycles machine libres au profit d'un calcul collectif. Cette approche écologique recycle une ressource qui serait autrement perdue. En mai 2000, la moyenne de puissance de calcul ainsi récupérée atteignait 9 Teraflops. C'est 3 ou 4 fois plus que la plus grosse installation au monde [39].

Internet

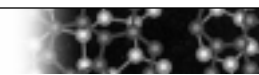
Cette loi de Moore que nous avons signalée s'est reproduite au niveau du nombre de machines raccordées à Internet. Avec une croissance de 100 % par an depuis 30 ans, on arrive aujourd'hui à un estimé d'environ 42 000 000 de machines¹³ [40, 41].

Comme je l'ai signalé plus haut pour l'informatique personnelle, la convivialité s'est révélée le détonateur de la croissance explosive. Des protocoles pertinents avaient été proposés depuis les années 70, le concept d'hypertexte était connu depuis longtemps déjà, mais il aura fallu attendre l'arrivée du premier logiciel fureteur convivial¹⁴ pour que le Web devienne une expression connue de l'homme de la rue [42].

L'impact de cette technologie sur l'identité culturelle est important et il convient d'examiner brièvement la situation du français dans ce nouvel univers. Le français est probablement condamné à rester relativement faible en termes de pourcentage; on l'estime à 4,4 % [43]. Environ la moitié des internautes actuels sont anglophones. Il ne faut pas oublier que dans nos sociétés Internet commence à avoir fait le plein de son potentiel. En 2005, le nombre de chinois branchés à l'Internet pourrait atteindre près de 300 000 000 – et dépasser celui des anglophones. On prévoit alors autour d'un milliard d'utilisateurs, dont 200 000 000 seulement seront anglophones.

¹³ Ce chiffre sous-estime probablement la réalité : un grand nombre de machines utilisées en mode « intranet » derrière des systèmes de protection d'accès ne sont pas visibles. D'autres utilisent des numéros IP dynamiques. De plus, ce nombre ne comprend pas les quelques 200 000 000 de téléphones cellulaires « branchés » qui sont imminents.

¹⁴ Mosaic, réalisé par Marc Andreessen, alors étudiant à l'Université d'Illinois.



L'anglais risque-t-il de se retrouver sur la défensive? [44]

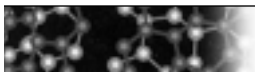
Ces changements démographiques sont certainement importants, et déjà on assiste, chez les Américains à une préparation accélérée en matière de communication multilingue. Le domaine de la traduction automatisée, qui représente un des grands défis de l'intelligence artificielle, y est en pleine activité. On peut aussi signaler les travaux en cours sur le *gisting*, un terme dont je n'ai malheureusement pas trouvé d'équivalent français, qui signifie « une traduction fort approximative ». Ici, au Québec, une firme comme Alis Technologies développe des outils en ce sens, du type de ceux qui feraient que je pourrais visiter un site chinois et, sans en obtenir une traduction sérieuse, en tirer néanmoins un résumé rapide. À terme, notre rapport au langage risque donc de se retrouver profondément influencé par ces nouveaux types d'échanges culturels.

L'essor des communications

Ce bref survol serait incomplet si je n'évoquais l'essor des communications, que j'ai identifié dès le début comme un des trois grands affluents de la révolution en cours. Le transfert des données supprime maintenant les communications téléphoniques [45]. À cet égard, il convient de signaler l'essor immense de la photonique et la vitesse avec laquelle elle supprime d'autres technologies plus anciennes. C'est qu'ici elle offre des améliorations qui dépassent très largement l'ordre de grandeur, lequel constitue fréquemment la barrière au changement de phase. Cet impact est particulièrement sensible avec le passage à l'utilisation de longueurs d'ondes multiples sur une même fibre [46]. Le débit atteint des niveaux où il devient illusoire de tenter de procéder au routage des paquets par des moyens électroniques qui impliquent des conversions optiques - électroniques laborieuses. Un effort considérable est actuellement en cours dans le domaine du routage complètement optique, à la fois par de nouveaux dispositifs et par le déploiement de protocoles mieux appropriés [47, 48, 49, 50].

Nous avons la chance au Canada et au Québec d'être exceptionnellement bien pourvus en matière de réseautique. Avec le nouveau réseau CaNet3 qui a été piloté par Canarie, le Canada s'est donné une infrastructure de recherche qui est considérée comme la meilleure au monde et qui n'a rien à envier à ce que sont donnés les États-Unis. Au moment de sa mise en service initiale, en 1999, il s'agissait du premier réseau national complètement optique utilisant la modulation multi-longueur d'ondes.

Au Québec, le RISQ – au départ une initiative du CRIM – assure l'interconnexion des universités et centres de recherche avec CaNet3. Sur un tronçon universitaire comme celui de Québec – Montréal, on prévoit que le débit utilisable atteindra le Gb / sec au printemps 2001.



L'imagerie électronique

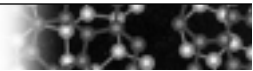
Alors qu'approche la fin de cet exposé, permettez-moi de signaler un domaine des technologies de l'information qui m'apparaît particulièrement porteur parce que rejoignant l'imagerie.

Appréhender sans voir, saisir sans toucher, se transporter sans se déplacer dans le temps et dans l'espace, voilà qui définit l'essentiel de la virtualisation [52].

Une de ces belles applications consiste à rendre plus accessibles des trésors de la muséographie. Grâce aux techniques les plus récentes de l'imagerie, il est maintenant possible de numériser des œuvres d'art avec une précision de l'ordre de quelques microns et de produire des mesures d'une qualité telle qu'elles deviennent la référence pour des restaurations futures. Le Canada est largement reconnu pour sa contribution remarquable en la matière [53, 54, 55, 56].

Cette capacité de virtualisation, lorsqu'elle se couple au calcul à haute performance, peut permettre de remonter le temps. Je donne ici l'exemple d'une glaciation qui s'est produite durant l'ordovicien, il y a 400 000 000 d'années, paradoxale parce qu'elle est survenue, semble-t-il, malgré une concentration très élevée d'oxyde de carbone [57].

Finalement, j'évoque des recherches en virtualisation que nous réalisons dans mon laboratoire. Il s'agit de combiner des représentations tridimensionnelles avec des modèles détaillés de comportement physique afin de planifier et superviser des interventions critiques. Nous en étudions l'application dans le domaine de la robotique sous-marine, dans le contexte de la réparation de grands ouvrages, en collaboration Hydro-Québec [58, 59, 60]. Nous l'étudions également en collaboration avec l'Hôpital Saint-François-d'Assise, de Québec, pour le support de la chirurgie cryogénique, une procédure expérimentale prometteuse pour le traitement de certaines tumeurs du sein et du foie [61]. Dans les deux cas, il s'agit d'opérations où toute erreur peut entraîner de graves conséquences et où il est certainement préférable de procéder à des simulations et à des répétitions soignées avant d'intervenir. L'originalité de notre approche tient au couplage intime que nous introduisons entre la visualisation interactive et la simulation temps réel des objets qui sont virtualisés, cherchant ainsi à donner une base beaucoup plus sérieuse à l'interactivité que celle que l'on retrouve dans la plupart des environnements virtuels.



La dimension humaine de la technologie

En ce début du 21^e siècle, la maturation de ces technologies, déjà bien engagée, nous porte à nous interroger sur l'essentiel de la poursuite de l'intégration de cette convergence que j'ai évoquée ici, sur sa dimension humaine, sur la gestion de la complexité qu'elle permet, sur la complexité organisationnelle qu'elle peut entraîner, bref sur l'humain sous tous ses rapports [62].

Le grand invariant humain demeure le référentiel [63]. La technologie a radicalement changé, mais sur cet horizon d'un siècle, nous avons finalement peu changé dans notre essence. Notre propre temps biologique demeure relativement constant, même si celui qui nous entoure nous donne l'impression de s'accélérer sans cesse.

C'est ainsi que la dimension d'une main demeure encore incontournable dans la réalisation d'une interface tactile.... Ce n'est pas encore demain que vont apparaître des mutants qui auraient des mains nanoscopiques...

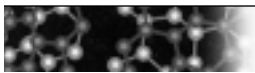
Les limites à la complexité... On sait que la capacité d'un humain à cogérer simultanément un certain nombre de concepts est limitée¹⁵. Et le rôle du langage qui demeure l'outil privilégié dont nous disposons pour nous aider à encapsuler les complexités, et donc à les appréhender correctement. Là aussi il s'agit d'invariants sur l'horizon temporel prévisible.

Je terminerai en évoquant le fameux « I love you », et ce qu'il signifie comme message écologique et comme danger de la monoculture¹⁶ [64]. Celle-ci vaut pour l'informatique comme pour l'agriculture. Notre planète est maintenant couverte de systèmes qui sont uniformes et donc vulnérables. Il suffit qu'un virus apparaisse et nous pourrions perdre toute la production de maïs. Il suffit qu'un virus informatique apparaisse et des millions d'ordinateurs cessent de fonctionner. Ne perdons pas de vue que ces outils remarquables demeurent fragiles.

Je proposerais comme ultime observation que ces technologies de l'information constituent un extraordinaire amplificateur du potentiel humain. De sa bêtise comme de son génie. C'est lui, et non elles qui demeure la clé de notre futur collectif [65].

¹⁵ Miller, The Magic Number Seven.

¹⁶ Au printemps 2000, des millions d'ordinateurs, tous de type Wintel, ont été infectés par ce virus. On a estimé le coût de cette épidémie à plusieurs milliards de dollars.



PÉRIODE DE QUESTIONS

Question 1 – La réalité virtuelle

Il y a quatre ou cinq ans, on investissait beaucoup d'espoir dans la réalité virtuelle. C'était la façon de présenter aux yeux un certain nombre de données numériques difficiles à modéliser, à entrevoir. C'était présenté comme la façon intuitive d'arriver à un autre niveau de connaissance. Est-ce que vous avez toujours espoir que la réalité virtuelle va rencontrer les passions qu'elle avait suscité il y a trois ou quatre ans?

La question est très intéressante. Il y a des changements qui se sont opérés. On imaginait la réalité virtuelle avec des casques, avec des salles très coûteuses. Ce qui se prépare actuellement, là encore, c'est faire petit, rendre la ressource plus accessible. Il existe des systèmes d'écriture directe dans l'œil qui pourraient être construits à des coûts très économiques. La réalité virtuelle est certainement là pour rester en autant qu'on saura l'utiliser à bon escient.

Pour venir ici, j'ai été obligé de m'excuser d'une autre conférence. En ce moment à Montréal se tient la conférence annuelle de notre réseau de recherche, IRIS, où, justement, ont eu lieu de nombreuses discussions sur le sujet. Bombardier nous annonçait hier que son prochain avion serait construit virtuellement de A à Z. Mais ses ingénieurs y vont avec une grande prudence parce qu'ils ont les mêmes inquiétudes que celles que vous avez évoquées. La projection de modèles, la virtualisation a un grand potentiel mais il faut s'assurer que derrière ces modèles s'exercent rigueur et validation.

La plus grande partie de la réalité virtuelle qu'on voit dans les jeux est en fait un exercice de théâtre en carton, un jeu de décor, du faux. Pour simuler du mouvement, on exploite des mouvements de texture. Cela donne des effets qui peuvent être très saisissants, mais ce n'est pas fiable pour du travail très sérieux. Mais avec cette fusion de virtualisation, de la modélisation et de la simulation j'ai confiance que l'on en arrivera au point où la plupart des interventions complexes seront simulées, virtualisées, avant d'être réalisées. Les moyens techniques pour ce faire commencent à être disponibles, mais il reste des problématiques importantes en ce qui concerne les architectures les mieux appropriées.



Question 2 – Recherche et formation en technologies de l'information

On regarde les annonces que notre vice-premier ministre Landry fait de ce temps-ci avec les deux milliards qu'il va donner dans la cité de l'électronique, la cité du multimédia, etc. Quand on regarde les inscriptions dans les facultés d'informatique au Québec, il me semble que c'est assez stable depuis une dizaine d'années. Alors je me pose comme question : où est-ce qu'on s'en va? et on connaît la pénurie actuellement; je pense qu'il y a deux ans on parlait d'un million aux États-Unis où on manquait de personnel en technologies de l'information. Ne risque-t-on pas rapidement au Québec de frapper un mur, surtout avec la concurrence qu'on a avec les Américains. C'est ma première question...

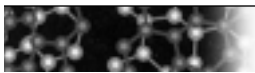
Deuxième question, concernant la recherche en technologies de l'information. Je pense que vous êtes toujours vice-directeur de la recherche au CRIM. Pourriez-vous rapidement nous dire ce qu'il en est actuellement. On sait que le CRIM a vu ses ressources diminuer.

Vous avez raison de signaler le problème de la main-d'œuvre. Non seulement le recrutement en sciences informatiques est stagnant mais il diminue au niveau nord-américain. La pénurie est sérieuse. Je pense qu'en partie elle est due à une certaine image que les jeunes peuvent avoir des technologies de l'information où on voit le *nerd* assis derrière l'écran toute la journée. C'est ce qui explique probablement l'absence de jeunes femmes qui est tragique dans ce domaine-là. Je vois, par exemple, des jeunes qui imaginent qu'il y a encore des ingénieurs qui montent dans les poteaux. Il y a un problème d'orientation et de perception de l'image.

Sur le CRIM. Comme tous les organismes, y compris les laboratoires de recherche universitaire, il a à vivre dans le chaos de la compétition. Le monde des chercheurs est très actif; il est facile de perdre du personnel si on ne peut pas le soutenir, si des budgets ne sont pas suffisants pour mener des actions de recherche à long terme. C'est d'ailleurs le gros problème que nous avons dans les universités où, de plus en plus, la part des budgets libres qui nous sont accordés a fait peau de chagrin.

Il existe un balancier très fort du côté de la recherche orientée industrielle. J'en suis, j'y ai passé une bonne partie de ma vie, mais là encore il ne faut pas tomber dans la monoculture. Il n'y a pas de robustesse des systèmes qui soit possible sans diversité. Un laboratoire, quand on essaie de bien le gérer, doit avoir une granularité appropriée de la taille des projets, du type de ces projets et de leur étalement temporel. Il faut du moyen, du court et du long termes. En ce moment les programmes de subventions, y compris ceux qui alimentent le CRIM, sont liés à des attentes qui sont relativement à court terme.

Si on avait agi comme cela il y a 40 ans nous ne serions pas ici ce matin. Je vous ai signalé quelques géants qui ont pu fonctionner dans un environnement où on leur faisait confiance. Mes deux prédécesseurs ont évoqué l'enfer du chercheur qui devient administrateur et qui



Il passe son temps entre les demandes et les rapports d'activités. On approche effectivement du point où il y a une diminution des capacités. À certains égards, avec l'augmentation des programmes, on peut penser à une certaine diminution des capacités de recherche, parce qu'il y a une partie croissante du temps qui est prise sur des opérations qui n'ont rien à voir avec la création. On a évoqué le besoin en infrastructures. Il est relativement facile d'aller chercher une bonne subvention pour monter une belle installation ou pour obtenir un appareil spécial. Mais, avoir le soutien du technicien ou de l'ingénieur de système qui va faire en sorte que ça va vraiment tourner, c'est la croix et la bannière. Le réseau des universités québécoises est largement en déroute de ce côté-là.

Question 3 – Explosion de l'information

Une question d'ordre plus général. Vous avez soulevé le défi de la croissance de la complexité et il y a aussi la croissance de la quantité d'information. Une crainte reliée à ceci, c'est d'entrer dans une ère d'obscurantisme où la population en général perdrait le contrôle. On n'est plus capables de saisir cette ampleur d'information, et à ce moment on tombe dans une ère où on n'est plus capables, en tant qu'êtres humains d'absorber cette croissance. Par analogie, une entreprise qui va croître trop rapidement va imploser, car sa structure ne lui permet pas une croissance aussi rapide. C'est ce qu'on est en train de vivre en termes d'expansion d'information. Est-ce que vous voyez des éléments de solution à un tel danger?

Il y a sûrement des outils utiles qui sont développés. Le *gisting*, l'indexation automatique, les résumés automatiques. Ce sont de beaux moyens, mais il n'y aura jamais de substitut au sens critique de l'individu, au jugement. On n'est pas rendu à ce niveau de capacité en intelligence artificielle, c'est évident.

Nous sommes plongés dans une mer de données. La compréhension repose sur un mécanisme de segmentation, de digestion, de contextualisation. La solution ne réside pas dans la technologie. La technologie peut donner certains outils, mais certains risquent de créer leurs propres problèmes. Il n'y a pas de substitut à une saine éducation avec une dimension humaine, humaniste très sérieuse, et ça on l'a un peu perdu.

Il existe un livre merveilleux sur le sujet : *The Bridge to the Eighteenth Century*, de Neil Postman, qu'il faut lire. On y trouve deux ou trois chapitres extraordinaires sur ce dilemme de l'information, de la connaissance et de la sagesse. Postman décrit très bien à quel point l'humanisme du 18^e siècle avait réalisé des percées remarquables et que les choses se sont un peu banalisées par la suite.

1

Les mutations de la numérisation

Regard sur le passé et le futur des
technologies de l'information

Denis Poussart

2



3

« The further backward you look,
the further forward you can see. »

Winston Churchill

4

La science de l'artificiel

The Science of the Artificial

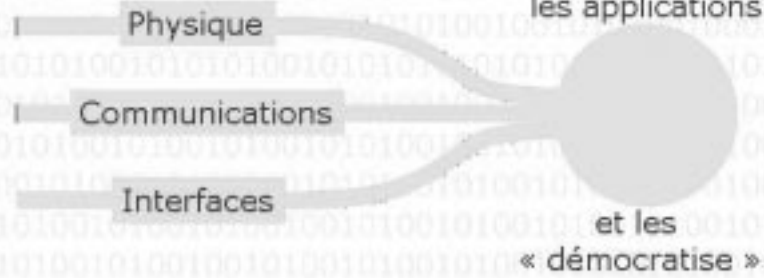
Herbert Simon, 1969

« The computer programmer is a creator of universes for which he alone is the lawgiver... No playwright, no stage director, no emperor, however powerful, has ever exercised such absolute authority to arrange a stage or a field of battle and to command such answeringly dutiful actors or troops. »

Joseph Weizenbaum

5

3 grands affluents



6

Les précurseurs



Charles Babbage
1823: moteur différentiel
1831: machine analytique



Ada Byron,
Lady Lovelace

7



John Louis
von Neumann

Alan Turing



8



1945: Vannevar Bush
publie l'essai
« *As We May Think* »
dans l' *Atlantic Monthly*.

Il propose le *Memex*, « a device in which an individual stores all his books, records, and communications, and which is mechanized so that it may be consulted with exceeding speed and flexibility ».

Il introduit également le concept
« noeud - lien », qui annonce l'hypertexte.

9

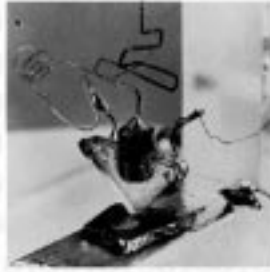


En 1948 Claude Shannon
publie *The Mathematical
Theory of Communication*
avec Warren Weaver.

En formalisant le concept d'information, Shannon jette les bases de sa représentation sous forme numérique, et de son encodage robuste.

10

La rupture



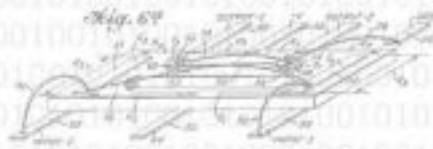
1947: Bardeen, Brattain et Shockley inventent le transistor (Bell Labs).

11

Le développement exponentiel débute



1958: Jack Kilby (TI) et Robert Noyce (Fairchild) inventent le circuit intégré.



12

« Le réseau est l'ordinateur »

13

Faire simple pour assembler d 'immenses ensemble de communication

- segmentation du message en paquets
Kleinrock, MIT, 1961
- vision d 'une communication « galactique »
Licklider, MIT, 1962
- routage autonome des paquets
MIT, RAND Corp, 1964
- réseautage en architecture ouverte,
adressage global, pas de contrôle global
Kahn, DARPA, 1972
- protocole TCP / IP, adresse 32 bits
prévoyant 256 réseaux (-> IPV6 de 64 bits)
Cerf, Stanford, 1973

14

L 'interface personne - système



Ivan Sutherland explore
la visualisation 3D
et la réalité virtuelle

Sketchpad sur le
TX-2, MIT, 1963



"Knowledge is a rare thing - you gain by giving it away."

15



Doug C. Engelbart

*Augmenting Human Intellect:
A Conceptual Framework, Rapport
au Directeur des Sciences de
l 'Information, Air Force Office of
Scientific Research,
SRI Project No. 3578
octobre 1962 **

Il invente (aussi) la souris
en 1963 - 1964



brevet 3,541,541, 17 nov 1970, X-Y Position Indicator For A Display System

* <http://www.histechi.net/~aschen.de/www/quellen/engelbart/ahif62index.html>

16



Alan Kay

A Xerox Parc, à partir de 1972, il introduit le concept de l'utilisation centrée sur l'utilisateur.

Un des architectes du langage Smalltalk et de l'approche « orientée objet ».

Il propose l'ordinateur portable - le *Dynabook*.
Considéré comme le pionnier de l'environnement de fenêtrage graphique universellement exploité aujourd'hui.

« The best way to predict the future is to invent it. »

« Simple things should be simple; complex things should be possible. »

17

A Xerox Parc, au cours des années '70, seront inventés

- l'interface graphique et ses métaphores
- le paradigme de l'« orienté objet »
- l'approche rigoureuse à la conception VLSI
- l'éthernet
- le postscript
- l'ordinateur comme poste de travail individuel
- l'impression laser

Steve Jobs visite Xerox Parc en 1979 et

18



Alto, Xerox 1973
Le Star, diffusé en 1981, sera un échec commercial.



septembre 1975

Altair 8080, le premier PC, janvier 1975, \$397 en kit, avec un BASIC écrit par Bill Gates



<http://www.obsoletecomputermuseum.org/>

19



Lisa Apple, janvier 1983



PC IBM, 1983

20

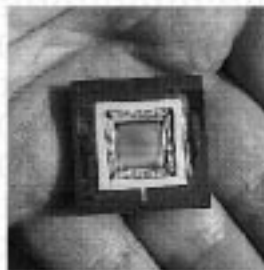
« 640K ought to be enough for anybody »

Bill Gates 1981

« This telephone has too many shortcomings
to be seriously considered as a means
of communication »

Western Union, 1876

21



Faire **petit** pour faire
très gros et
très rapide.

Capteur de vision « intelligent » réalisé au
Laboratoire de Vision de l'Université Laval

Et à l'horizon des obstacles fondamentaux:

- En diminuant les dimensions, on doit augmenter la concentration des dopants; mais il se produit des amas néfastes.
- L'épaisseur de l'isolant devient si petite, 2 nm, que la probabilité d'effet «tunnel» devient significative.
- La dispersion statistique des caractéristiques des portes devient préoccupante, comme la variabilité associée au petit nombre d'électrons impliqués, de quelques centaines.
- La fiabilité logique devient donc problématique.

La seconde « loi » de Moore

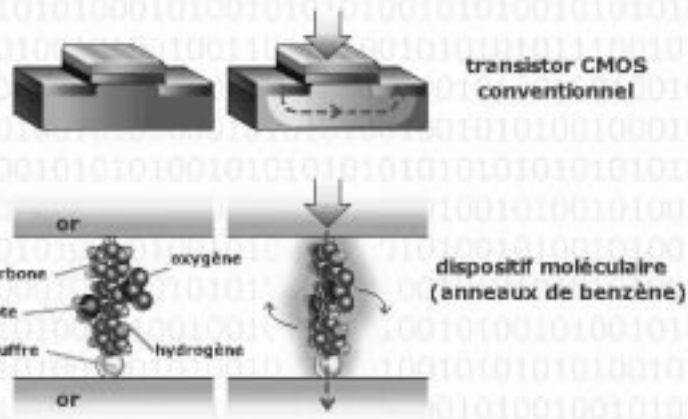
- Le coût d'une grande usine microélectronique double tous les 3 ans, dépasse maintenant les 2 milliards. 50 milliards en 2010???
- Depuis ses début, la résolution lithographique s'est améliorée de 14% par an. Mais son coût a augmenté de 28%.

Au delà de Moore

- Architectures parallèles
- Logique multi-niveaux
- Architectures tolérantes aux fautes, constitués d'éléments imparfaits
 - Le projet Teramac chez HP, Philip Kuekes, *Science* 12 juin 1998
 - Le modèle de notre propre cerveau: le rapport signal / bruit d'un neurone est faible et pourtant ...
- A l'horizon lointain, de nouveaux éléments logiques auto-assemblés 2010 ...

31

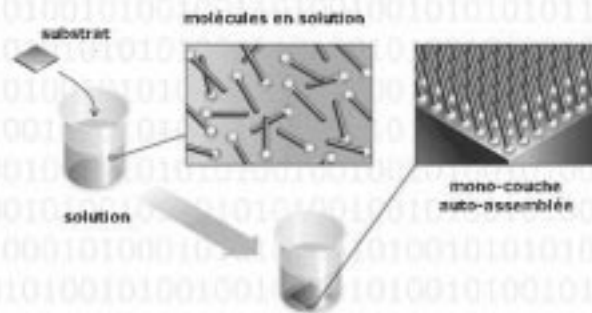
La relève du silicium: le dispositif moléculaire ?



Scientific American, juin 2000

32

Auto-assemblage



Scientific American, juin 2000

33

Encore des obstacles immenses à surmonter



HP / UCLA

- dispositif avec gain
- à 3 bornes
- stabilité
- routage des signaux
- mémoire ...

avant que ...

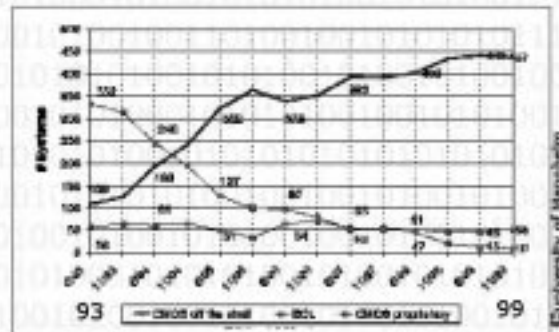
« These molecular computer processors could wind up in wristwatch-sized supercomputers woven into clothing or even in fingernail polish. »

Le supercalcul

ou ce qui était exceptionnel
devient accessible

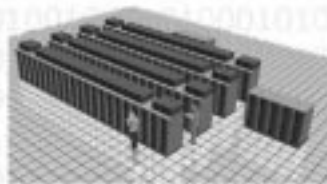
Traditionnellement, les superordinateurs recouraient à des technologies exotiques comme l' ECL chez Cray.

Utiliser des
briques
"ordinaires"
pour bâtir
d'immenses
édifices...



La tendance future consiste à exploiter plutôt des processeurs CMOS à grande diffusion: Pentium (Intel), PowerPC (IBM) et à en exploiter des centaines parallèle.

La machine la plus puissante (novembre 1999*)



ASCI Red TOPS
Sandia Laboratory,
US Dept. of Energy,
Albuquerque

- 9536 processeurs Intel Pentium II Xeon, matrice de noeuds 38 x 32 x 2
- mémoire vive: 1.2 Toctets, 500 Moctets / sec
- 3.15 TFLOPS pointe, 2.15 Linpack
- Unix


*<http://www.top500.org/>

Au Canada

- 5 installations dans la liste des 500 plus puissantes au monde
- Dont 3 au Québec
 - #53, NEC 96 proc., Environnement Canada
 - #73, NEC 16 proc., Environnement Canada
 - #410, SUN 56 proc., Sita Montréal
- HPCnet
- Demandes auprès de la FCI ...

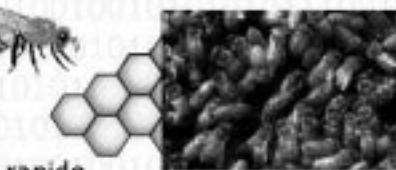
La démocratisation du supercalcul

Beowulf - la métaphore de la ruche

- NNN processeurs courants
- connectés par réseau local rapide (Gigabit Ethernet, Myrinet)
- typiquement sous Linux 

Avantages & inconvénients ...

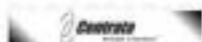
Ex: Avalon, 265e, 48.6 GFLOPS, 140 alpha,
Alamos National Laboratory
Center for Nonlinear Studies



La virtualisation du supercalcul

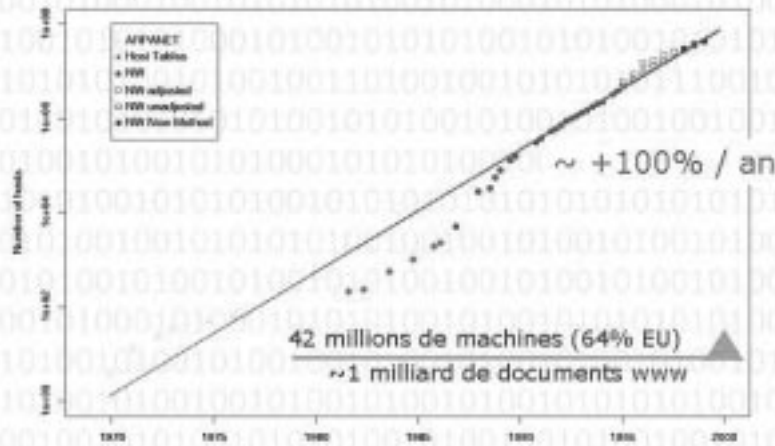


- SETI@home, a commencé en 1996.
Analyse des signaux du radiotélescope de 305 m d'Arecibo.
2 millions d'usagers.
Dans la journée du 10 mai 2000:
moyenne de 9.17 TeraFLOPS / sec.



- Vise à fédérer les ressources de calcul inutilisées de millions d'internautes, et à créer le plus gros superordinateur en réseau (Teraflops et Petaoctets). Finaliste, le 8 mai 2000, au 11e concours d'entrepreneuriat du MIT.
- Le modèle « Napster ».

machines raccordées à l'Internet, sur 30 ans



Et de nouvelles "machines" arrivent, en masse !

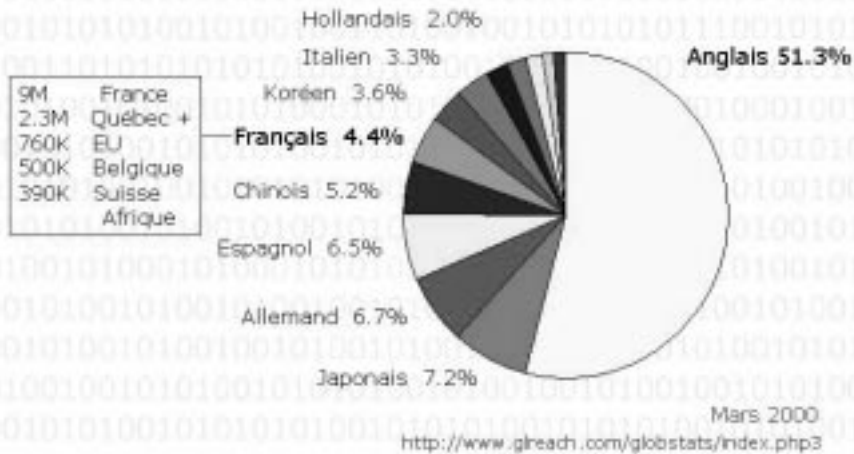


<http://www.geog.ud.ac.uk/casa/martin/atlas/geographic.html>

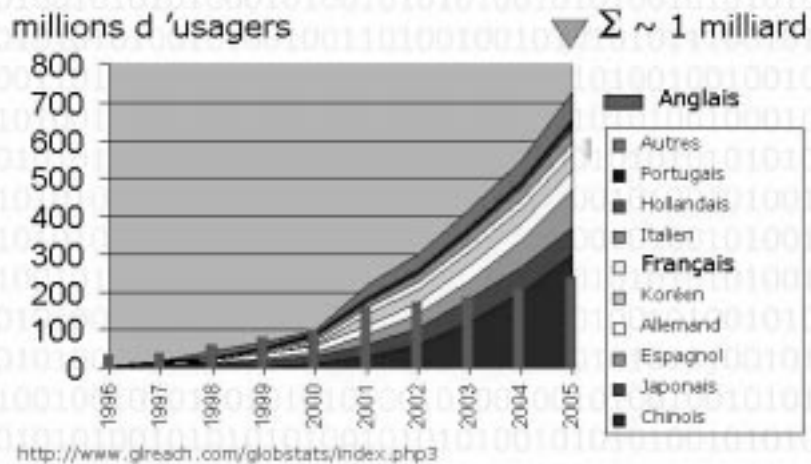
Internet prend vraiment son envol avec

- la puissance de la métaphore de l'hypertexte
 - Ted Nelson invente le terme en 1965 (Xanadu)
 - Engelbart l'utilise au SRI la même année
 - Tim Berners-Lee crée le WWW en 1989 au CERN:
 - html
 - http
 - le fureteur client
 - les rend disponibles dans *alt.hypertext* en août 1991
 - amplifiée par la convivialité de l'interface graphique.
 - En 1993, Marc Andreessen développe Mosaic au NSCA.

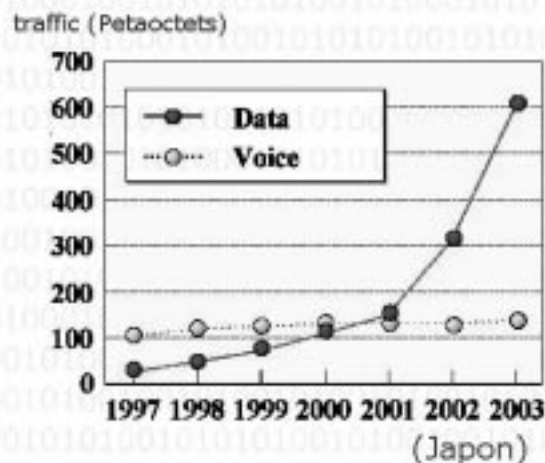
Le français sur l'Internet



Prévisions sur l'évolution des langues de l'Internet



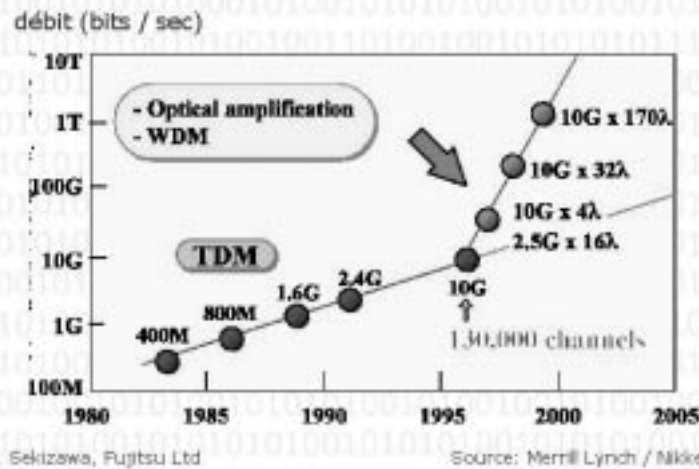
Les données supplantent la voix



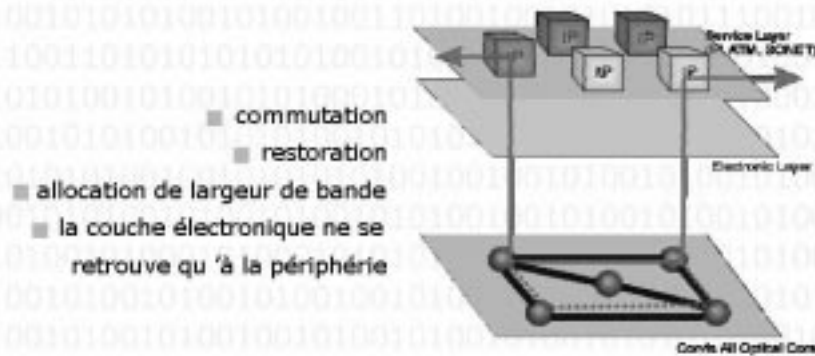
T. Sekizawa, Fujitsu Ltd

Source: Merrill Lynch / Nikkei Comm.

Le passage obligé à la communication optique multi longueurs d'onde



Routage optique intégral



Winod Khosla, Kleiner Perkins Caufield & Byers, Mars 2000

De nombreux défis techniques

- intégration évolutive
- interopérabilité
- décodage et commutation intégralement optiques
- protocoles « bout-à-bout »
- matériaux, ex. modulateurs électro optiques à base de polymères, UWAs

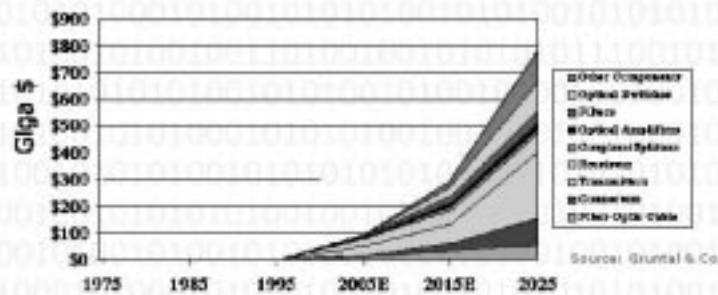
Aujourd'hui

Demain

100 Mb sur le bureau
1 Gb sur le réseau local
100 Gb sur le réseau national

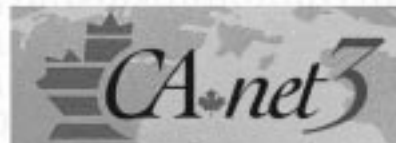
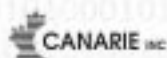
1 Gb sur le bureau
1 Tb sur le réseau local
1 Pb sur le réseau national

Et un énorme marché en devenir



Avec l'émergence de l'accès à large bande:

« In the next five years we don't see any ability of service providers in the U.S. to keep up with the demand. »
Mouli Ramani, Directeur du marketing de l'Internet optique chez Nortel Networks, février 2000.



RISQ
Le réseau
de l'enseignement
supérieur et
de la recherche

CA*net3 IPv6



52

Modéliser, simuler, virtualiser

Appréhender sans voir

Saisir sans toucher

Se transporter sans se déplacer

Dans le temps et dans l'espace

53

Appréhender sans y être

Par exemple la virtualisation 3D
de trésors culturels

54

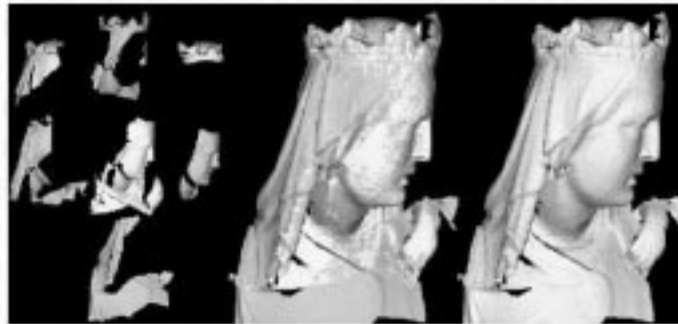


Campagne 1997 du CNRC

Madonna col Bambino
de Giovanni Pisano
Cappella degli Scrovegni
Padoue

http://www.vit.itnrc.ca/biris_Italy/padova/padova.htm

- Acquisition au moyen de la caméra 3D BIRIS
- Calibration
- Intégration optimale de vues multiples



Model with 1.34 million polygons:
X=1 mm, Y=1 mm, Z=0.25 mm



Se transporter sans se déplacer
 et reculer dans le temps ...

- Par exemple en climatologie, tenter de comprendre * en simulant un modèle couplé atmosphère - océans comment une glaciation majeure a pu se produire, il y a 400 millions d'années, alors que le CO_2 atmosphérique était 10 fois plus élevé.
- ~ 150 jours « virtuels » simulés par jour de calcul réel sur un réseau IBM RS/6000 : « expériences » de plusieurs semaines.
- Problématique de la cohérence des modèles, de la convergence des algorithmes.

* Poussart, P.F., A.J. Weaver and C.R. Barnes, 1999: Late Ordovician glaciation under high atmospheric CO_2 : A coupled model analysis *Paleoceanography*, 14(4), 542-558.

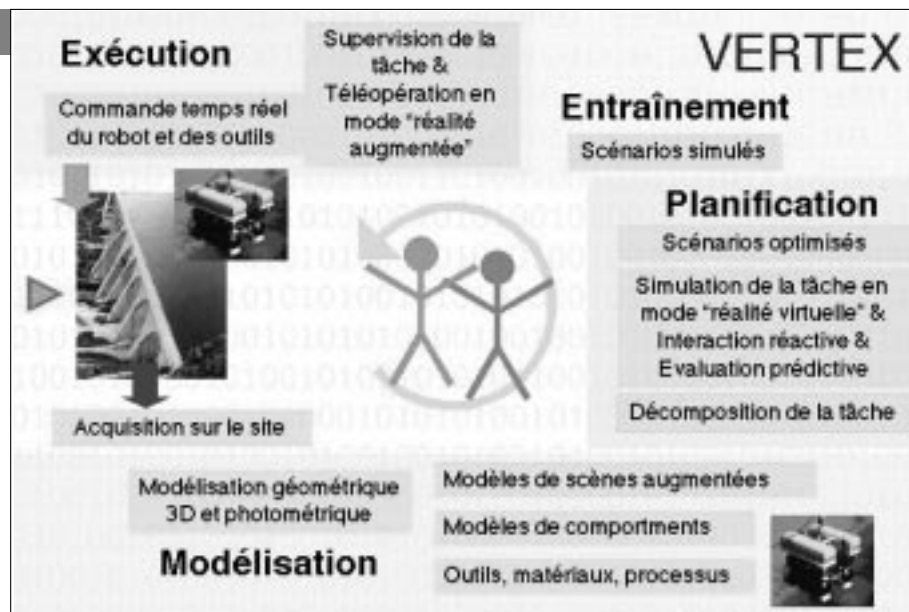
Saisir sans toucher

VERTEX

- Visé à faciliter la planification et l'exécution de tâches critiques,
- là où des erreurs pourraient entraîner des conséquences très graves sur les personnes, les biens ou l'environnement.

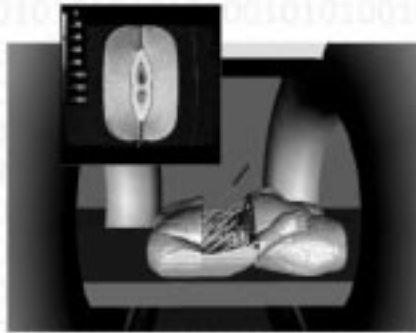
VERTEX

- Projet de la Phase 3 du réseau IRIS, du programme des Réseaux d'Excellence du Canada.
- Réalisé en collaboration notamment avec les universités McGill, Western Ontario et Victoria, avec l'Institut de Recherche de l'Hydro Québec et l'Unité d'intervention en imagerie nucléaire du CHUQ.
- Cette recherche est aussi financée par le FCAR, le CRSNG, et la FCI.



61

Assistance à la chirurgie par cryogénie



62

Les grands défis

- l'intégration de la convergence
- en elle-même **et** avec les autres domaines
- la gestion de la complexité
- l'humain, sous tous ses aspects
- les finalités, plutôt que les moyens



63

L'invariant humain

- Le temps
- La dimension de sa main
- Ses limites à gérer simultanément
Plusieurs idées (nombre sept
magique +/-2) George Miller 1956





ÉCOLOGIE,

NOUVEAUX MODES DE VIE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE



Conférencier :

Jean-Pierre Revéret, Institut des sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal

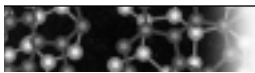
PRÉSENTATION DE SOPHIE MALAVOY

Cet après-midi, nous allons aborder des sujets totalement différents, on va même faire un saut quantique. Ce matin, on était dans le petit, les nanotechnologies, la miniaturisation. Maintenant, le moins que l'on puisse dire, c'est qu'on va prendre du recul et voir à des systèmes, à des échelles un tout petit peu plus grandes.

La 1re conférence sera donnée par M. Jean-Pierre Revéret, professeur à l'Institut des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Montréal. M. Revéret a agi aussi à titre d'expert pour de nombreuses organisations. J'en cite quelques-unes seulement : l'UNESCO, la Banque mondiale, l'ACDI.

De formation, il est économiste et il a également une formation dans le domaine de l'écologie appliquée. Son expertise s'étend dans le domaine de la gestion, de l'économie des ressources naturelles et surtout de l'environnement avec quelques mots clés qui reviennent dans tous ses travaux : le développement durable, la biodiversité et les études d'impact environnemental.

Dans sa conférence, M. Revéret va nous parler évidemment de développement durable mais aussi de la gestion des ressources naturelles, d'écologie et de l'intégration de tout cela.



Introduction

Merci beaucoup, Sophie, et merci aux organisateurs de m'avoir invité, de me permettre de partager avec vous un certain nombre de réflexions, cet après-midi. Je dirais que c'est un défi de poursuivre avec un sujet comme celui-là qui a une connotation si générale. La question du développement durable est parfois même presque perçue comme un peu bateau, je dirais, tarte à la crème diraient d'autres, après avoir pu rêver sur les nanotechnologies, ce matin... On s'est promené dans un infiniment petit qui savait susciter le rêve.

Donc, je vais essayer de partager avec vous des réflexions, des cheminements qui se passent en ce moment dans la société, au niveau de certaines sciences, chez les acteurs, les acteurs importants que sont les universitaires, mais le secteur privé aussi et les secteurs gouvernementaux, de grands acteurs dans ces domaines-là par rapport au concept de développement durable. Nous verrons aussi ce qu'il implique justement au niveau d'un certain nombre de variables, comme entre autres nos modes de vie, nos modes de consommation.

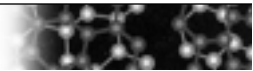
Une tout autre échelle que celle de ce matin, mais pourtant, il en ressort des conclusions qui, pour certaines des questions, restent les mêmes : un besoin de plus d'interdisciplinarité, de garder la place du social, même quand on est dans la dimension technologique

Le flou du concept

Le concept de développement durable est là depuis maintenant 13 ans, avec le rapport Brundtland en 1987. On sait tous qu'il est flou mais on sait tous aussi que pendant ces 13 années, il a été extrêmement fédérateur, il a permis et légitimé un certain nombre d'actions et de pistes de recherche. On va insister, durant les premières années du débat sur le développement durable, sur le fait que ce concept est flou, ce qui a été vu comme un vice profond. Il fallait s'empresse de trouver une interprétation unique du concept. Un très bon analyste de ces questions aux États-Unis, Herman Daly, a fait une autre lecture en disant, au contraire, que c'était intentionnel dans l'équipe de Mme Brundtland. Il était intentionnel de garder le terme flou; il était intentionnel d'en donner une multiplicité de définitions, de façon à ce que de très nombreux acteurs, de très nombreux intervenants, s'y reconnaissent et que s'entame un processus de discussion. Les efforts de clarification qui auront été faits par la suite ont effectivement permis de montrer qu'il y avait des contradictions entre les acceptions du terme, selon les différents acteurs. Je ne veux pas passer tout mon exposé sur la redéfinition du concept, je pense qu'on l'a tous vu et lu, mais il y a quand même quelques points à préciser avant d'aborder les implications sur les plans politique, économique, industriel, etc.

Le premier grand point de divergence dans l'acception de ce terme était que pour le Nord – et globalement aussi bien pour les scientifiques, que les États, que le secteur privé –, l'important était d'écologiser le Sud; de s'assurer que le développement des pays du Sud se fasse de façon à ne pas détruire plus encore que nous ne l'avons fait l'intégrité des écosystèmes. Et cela aura des implications en termes de biodiversité, de changements climatiques, etc.

Donc pour le Nord, le message était d'écologiser le Sud. Pour le Sud, la variable importante de la dégradation de l'environnement au niveau mondial était les modes de consommation, les modes de vie du Nord : c'était l'interprétation qui en était faite.



Il y a eu une polarisation pendant plusieurs années autour de ces dimensions, et même si la multi-dimensionnalité du concept était quand même mise de l'avant par un grand nombre d'analystes, à savoir que, oui, dans le développement durable, il y a le terme « développement » qu'on a beaucoup oublié, car on s'est centré sur la question environnementale qui était derrière. On avait fait ressortir les dimensions sociales, alors qu'on savait que le développement économique, qui devait induire automatiquement le développement social, ne l'avait pas induit dans les pays du Sud. Cette équation n'existait pas, donc on a ramené la dimension sociale à côté de la dimension économique. On a aussi amené la dimension écologique, qui, je crois, était celle qui arrivait le plus clairement et le plus fortement, on a aussi amené – pas tous mais un certain nombre d'acteurs, l'ACDI en particulier –, la dimension culturelle en la distinguant du social, en disant que le maintien des diversités culturelles fait partie du concept de développement durable.

Un autre concept est présent dans certaines définitions mais ne l'est pas dans toutes, c'est la notion du politique qui est arrivé, sous le couvert du terme « gouvernance », la notion de gouvernance étant aussi un élément important.

Donc, il n'y a pas que trois piliers à la notion de développement durable. On a souvent tendance à dire que c'est l'environnemental, le social et l'économique, mais les définitions se sont affinées pour ajouter au moins la culture et le politique (la gouvernance).

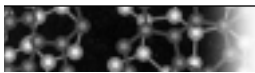
Retour sur le concept de développement

Alors, deux petits mots sur la question de développement. Le terme développement durable est flou, mais le bébé a de qui tenir parce qu'en fait on vient accoler à un adjectif problématique (durable), un substantif (développement) qui lui-même n'a jamais fait l'unanimité sur ce qu'il voulait vraiment dire.

On retrouve une très belle analyse de la question du développement par un collègue suisse, Gilbert Rist, dont le titre de l'ouvrage est *Le développement, histoire d'une croyance occidentale*. Il nous montre que la question, la notion de développement est, d'une part, au sens où on l'entend maintenant (au sens où on lui a appliqué le terme durable), une notion relativement récente qui remonte à l'après-guerre et qui, dans le fond, est un produit du Nord, un produit des pays occidentaux. Une multitude de définitions roulent en parallèle là aussi autour de ce concept, sans être forcément comprises de la même façon et on ne donne pas le même poids à chacune de ses facettes. Je les brosse très rapidement.

Le développement est un processus de changement social qui amène un progrès collectif, lequel n'est pas inscrit de façon intemporelle et a-historique. Il s'inscrit dans les bienfaits, dans les gains de la révolution industrielle dont on sait qu'elle a eu lieu en Occident et non pas en Afrique de l'Est. D'autre part, la notion de développement a quelque chose de très qualitatif, l'espoir d'un progrès matériel et social qui découle du processus de changement social. Enfin, cela peut aussi être vu comme l'expansion à l'échelle mondiale du système de marché, du système qu'on appelle encore le système capitaliste.

Vous avez donc ces multitudes de visions de la notion de développement qui cohabitent et qui font que c'est considéré comme « bien ». Le développement est bon, en tout cas dans



notre perception des choses, et on n'a pas toujours interrogé ceux à qui on voulait, en quelque sorte, l'imposer pour savoir si la forme de développement qu'on voulait imposer était effectivement « bonne », si elle était vue comme bonne dans toutes les cultures, dans tous les milieux.

Ainsi, la notion est relativisable beaucoup plus qu'on ne le croit. Elle n'a rien d'absolu. Elle est peut-être une croyance occidentale. Donc, ce terme « durable » qu'on lui ajoute ne véhicule au fond pas exactement ce qu'on voudrait dire, puisque dans le terme de développement durable, le mot durable vient faire le constat du fait que les pratiques de développement qui nous ont amenés, dans les pays occidentaux, à une sorte de mal-développement, ont généré un décalage et une inadéquation de notre rapport à la nature.

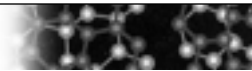
Dans ce contexte où l'on sait que les pratiques antérieures ne fonctionnaient pas, on a effectivement les éléments d'un paradigme qui ne fonctionne plus. Dans le système mis en place, la science qui est derrière n'a pas livré ce qu'elle aurait dû livrer. Donc, au sens des épistémologues, il y a un paradigme qui ne fonctionne plus, ce qui amène à chercher un paradigme alternatif et qu'on a nommé développement durable.

Mais le terme durable est statique. Et c'est là où, dans la littérature, il y a encore un débat en ce moment qui n'est pas clos. En fait, c'est le béton qui est durable. Il est dur parce qu'il reste exactement comme il était. Alors que ce que l'on cherche à obtenir, c'est au contraire une adéquation entre le développement, la société et la nature qui évoluent. Il y a toute une école qui promeut l'idée de développement viable, la viabilité étant beaucoup plus organique que ne l'est la durabilité. Je ne pense pas qu'on va clore le débat aujourd'hui là-dessus, mais il est là, il est vivant, il est d'ailleurs plus vivant en français qu'en anglais parce que le terme *sustainable* n'est pas remis en question, alors que « durable » et « viable » permettent la réflexion sur cette notion d'adaptabilité.

Les acquis depuis 1987

Ce que je voudrais faire maintenant avec vous, c'est partager un certain nombre d'acquis qui sont liés au fait que, entre 87 (le rapport Brundtland sur le développement durable) et 92 (le Sommet de la Terre à Rio), puis dans la foulée de Rio, un certain nombre d'autres engagements se prennent. On va les parcourir rapidement et ensuite voir en quoi, dans cette mouvance-là, un certain nombre d'acteurs tentent de changer leurs pratiques avec plus ou moins de succès et comment certaines disciplines soit se réorganisent, soit émergent, soit prennent du poids, etc.

On va donc passer par les différentes facettes de la mise en œuvre du développement durable. Je ne chercherai pas à répondre si c'est effectivement un changement de paradigme ou pas. Pour l'instant, faisons simplement le constat de ce qui se fait au nom du développement durable puisque cet aspect fédérateur du terme légitime un certain nombre d'actions.



Des conventions...

Parlons tout d'abord des grands engagements internationaux qui se sont faits, soit à Rio, soit dans la mouvance de cette rencontre. Il est bien important de se rappeler qu'il n'y a pas eu d'unanimité à propos de la déclaration de Rio qui aurait dû être la charte de la Terre, ce qui aurait été vraiment un engagement fort qui aurait permis de se dire vers quoi nous devons aller face à l'état de cette planète Terre. Il n'y a pas eu de consensus entre le Nord et le Sud à ce niveau-là. Donc, nous avons eu simplement une déclaration de Rio. Politiquement, ça me paraît très important qu'on n'ait pas réussi à atteindre, à négocier quelque chose qui se serait appelé la charte de la Terre.

Présentement, deux conventions nous touchent beaucoup, celle sur les changements climatiques et celle sur la diversité biologique, qui sont des conventions-cadres, donc qui ont besoin de protocoles pour vraiment acquiescer des dents.

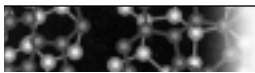
On va quand même rappeler que parmi les grands pays, les États-Unis n'ont toujours pas signé la convention sur la diversité biologique. Elle a été signée, oui, mais elle n'a pas été ratifiée, ce qui fait qu'un des acteurs majeurs de cette convention n'est toujours pas partie prenante à sa mise en œuvre, même s'il joue un rôle important dans les coulisses, dans les négociations qui entourent le protocole qui va être mis en place à ce sujet.

Je ne veux pas insister sur le contenu de la convention sur les changements climatiques. Vous savez qu'elle est en train de prendre des dents du fait du protocole dit de Kyoto, qui représente un certain nombre d'engagements quant aux limitations des gaz à effet de serre sur les dix prochaines années. On sait aussi que la mise en œuvre de ce protocole pose problème, fait l'objet de fortes oppositions.

Dans la foulée de Rio a aussi continué à se négocier une convention sur la lutte contre la désertification, dont il a été longtemps débattu pour savoir si elle devait être véritablement une convention. Est-ce que l'enjeu avait ce côté global qu'ont les deux autres conventions? La dimension politique dans celle-ci est encore plus grande qu'elle ne l'a été dans les deux autres. Plusieurs l'interprètent de façon presque cynique comme une convention cadeau à l'Afrique, puisque la question de la désertification est bien sûre présente dans le monde mais tellement criante en Afrique. Aussi, le poids des pays africains pour exiger l'accès au financement des questions environnementales globales a été suffisant pour obtenir qu'une convention aille dans cette direction.

On ne peut pas oublier, dans les engagements qui ont été signés à Rio, mais qui tardent à se mettre en œuvre en termes concrets, ce qu'on appelle l'Agenda 21, qui était l'ensemble de la programmation qui devrait théoriquement être mise en œuvre pour, d'une part, diminuer les enjeux environnementaux, mais aussi aller de l'avant en direction d'un développement qu'on va qualifier d'un peu plus durable.

S'il y a un lieu où on voit se manifester l'Agenda 21 de façon plus concrète, ce n'est pas tellement encore au niveau des États, ce n'est pas là où les engagements sont les plus forts. Il y a une sorte de déplacement de l'action vers le niveau local et régional. Je crois qu'on a beau-



coup plus d'exemples concrets d'application d'Agenda 21 au niveau local, une sorte de réappropriation à ce niveau-là qui est beaucoup plus forte qu'elle ne l'est au niveau des États.

En ce qui concerne les forêts, il n'avait pas été possible à Rio de négocier une convention sur les forêts, mais il y a un groupe de travail international qui travaille de façon constante depuis Rio sur les stratégies de gestion forestière. Dans la foulée de Rio, là encore, les discussions avaient commencé et entre temps le processus a abouti.

Il y a eu aussi un traité sur la conservation et la gestion des stocks de poissons chevauchants, c'est-à-dire qui chevauchent les zones de 200 milles, les zones qui sont des territoires nationaux et qui donc présentent un enjeu extrêmement important en termes de cogestion, et pour les stocks de poissons de grands migrateurs qui sont en eaux internationales, comme le thon en particulier.

Vous remarquerez qu'au fond, la plupart de ces engagements reflétaient avant tout la dimension environnementale du développement durable. Les engagements les plus forts ne prenaient pas la forme d'engagements de réduction de la pauvreté ou d'engagements quant à la dimension développement. C'est bien la dimension environnement comme condition préalable ou condition de base au développement qui a dominé l'agenda international, ce qui a amené à plusieurs reprises les pays du Sud à dire, et pendant Rio et après : « Mais où est donc le développement? »

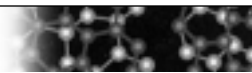
Quelques principes

On a donc là un déséquilibre dans les prises de conscience et dans les engagements. Il y a eu un certain nombre de principes que l'on voit de plus en plus et qui ont été réaffirmés soit à Rio même, soit dans des textes parallèles périphériques, et qui n'ont pas le même statut.

Prenons le principe pollueur/payeur, qui était bien antérieur à Rio. Depuis 1972, l'OCDE avait émis le fait que le pollueur devait être comptable de la pollution qu'il rejetait dans l'environnement; mais en n'ayant jamais dit qu'il devait en être le payeur final. Il était l'intermédiaire par lequel on percevait, quitte à répercuter au consommateur le coût de la pollution. De fait, ce principe était dans les lettres mais nullement appliqué, même dans les pays qui l'avaient adopté. Le principe utilisateur ou usager-payeur est aussi remis de l'avant.

Le principe de précaution est probablement celui qui a fait le plus de chemin dans cette période. On l'a d'abord trouvé dans le débat sur la gestion des stocks de poissons. C'est vraiment autour du débat à la FAO qu'on a amené, non pas le principe de précaution d'ailleurs, mais l'approche précautionneuse ou l'approche de précaution. Le principe de précaution, qui se veut un principe d'action, est souvent mal compris, parce qu'il y a une interprétation très douce, très molle qui en est faite qui dit d'agir prudemment, mais ce n'est pas ça. Le principe de précaution tel qu'il a été formulé à la réunion des ministres de l'Environnement de Bergen en 1994, dit que l'absence de certitude scientifique ne doit pas empêcher l'action si les conséquences de l'inaction sont de l'ordre du très important, du très grave.

Donc, c'est en fait un principe qui vise à faire en sorte que les politiciens, si je peux m'exprimer ainsi, ne se cachent plus derrière le syndrome que les Anglais appellent le *nimtof* ou



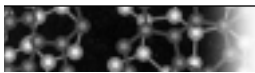
le *snyc*. *Snyc* étant « *science is not yet clear* » (la science n'est pas encore complètement définitive à ce sujet), et c'est en fait cette formulation : « la science n'est pas encore claire », qui amène bien souvent les hommes ou les femmes politiques à repousser une action alors que c'est plutôt le deuxième syndrome qui prévaut, le « *not in my term of office* » (*nimtof*). Parce qu'en réalité, les coûts d'une mesure importante au plan environnemental sont si élevés qu'on ne veut pas la supporter au cours de son mandat et on la repousse. On n'ose pas le dire, donc on se masque derrière le fait que la science n'est pas claire. Rappelons-nous le débat sur les pluies acides et le président Reagan qui voulait toujours plus d'études, ce qui faisait bien l'affaire des scientifiques d'ailleurs, et nous étions complices de ce *snyc* et de ce *nimtof* en cherchant du financement pour affiner un peu plus une recherche qui, dans le fond, ne fait que justifier l'inaction. Lorsque le danger semble important, « agissons ». Il s'agit là d'un principe qui est maintenant débattu très souvent et qui n'a pas le même statut d'un pays à l'autre. La France en est très friande et le met de l'avant; de nombreux colloques et ouvrages portent sur ce thème.

Le principe de subsidiarité est un principe qui, lui, n'a pas la force du principe de précaution. Il n'a pas été entériné avec le même poids dans des déclarations, mais il est là. On le retrouve dans la littérature, on le met de l'avant et il me semble lui aussi très intéressant parce qu'il revient à ce que je disais à sujet de l'Agenda 21 tout à l'heure.

Le principe de subsidiarité, est né, lui, dans le contexte de la Suisse. C'est très clairement là où l'on peut en retracer l'origine. Le concept de subsidiarité nous dit que lorsqu'on a le choix de gérer un enjeu à différents niveaux, à différents paliers hiérarchiques, il faut le gérer au niveau le plus bas tout en restant efficace.

Or, si j'illustrais ça de façon très caricaturale, et en pensant qu'on peut gérer depuis l'État jusqu'à la famille : faut-il gérer les déchets au niveau de l'État ou au niveau de la famille? Si on applique le principe de subsidiarité, on ne le gèrera ni au niveau de l'État, parce qu'on pense qu'en dessous, il y a un niveau plus opérationnel, mais on ne le gèrera pas non plus au niveau de la famille, parce que ça n'est pas plus efficace. Si on applique consciemment le principe de subsidiarité, on donne toute légitimité à l'idée que c'est bien au niveau municipal ou inter-municipal qu'il faut gérer une question comme celle-là, non pas le faire simplement par une déconcentration de pouvoir mais par une véritable décentralisation vers le niveau le plus bas possible. C'est un outil intéressant pour des stratégies de développement durable et on le voit dans la pratique, en particulier dans la mise en œuvre de cet Agenda 21.

Encore plus mous en termes d'acceptation du principe, les principes d'équité intra et inter-générationnelles se retrouvent dans le discours. C'est présent, mais par contre ça n'a aucune force, ça n'a pas été entériné aussi clairement que ceux qui précèdent. En revanche, ils renforcent quand même la question de la prise en compte du futur. Cela légitime la préoccupation de la prise en compte de l'intergénérationnel et amène aussi les pays du Sud à poser la question de la répartition en termes de centre, de périphérie, etc. Donc, la question de la lutte contre la pauvreté est légitimée, s'il le fallait, par le discours sur le principe de l'équité intragénérationnelle.



Quelle mise en œuvre?

La mise en œuvre sur le plan politique, où en est-on? Les États mettent en pratique, ou tentent de le faire, les conventions ratifiées, et là on a vu qu'effectivement, il y a loin de la coupe aux lèvres. Des pays comme le Canada qui était très à l'avant-garde au moment de la négociation des conventions, ont des positions que je qualifierais de beaucoup plus conservatrices – tant au niveau des changements climatiques que de la biodiversité – lorsqu'il s'agit de passer à des protocoles qui soient des engagements réels. Je terminerai cette partie en m'interrogeant sur « où en est-on effectivement sur l'utilisation du concept entre alibi, bonne conscience et changements réels? ».

Ce qui se passe au niveau canadien, au niveau québécois, c'est que, de façon concrète, après Rio et dans les cinq ou six années qui ont suivi, on a créé des structures qui devaient officiellement prendre en compte le développement durable dans les politiques. Je pense que ça n'a pas encore complètement réussi, mais c'est une première étape extrêmement intéressante, une étape du moins nécessaire.

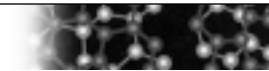
Ce qui est caractéristique, c'est que l'on a d'abord créé des commissions du développement durable, une exigence des suivis de Rio, de la Commission du développement durable des Nations Unies qui demande aux pays de remettre leur état des lieux, en matière de développement durable. C'est ce qui est fait dans plusieurs pays par une commission, c'est le cas de la plupart des pays européens. Au Canada, le choix était un peu différent, il n'y a pas de commission canadienne du développement durable. Il y a cependant des lieux de concertation qui jouent un rôle tout à fait semblable et acceptable pour la même chose et la création d'un poste de vérificateur général à l'environnement et au développement durable.

Au Québec, on retrouve le terme développement durable dans à peu près toute nouvelle structure politique qui se crée. J'en prendrai pour exemple la nouvelle Régie de l'énergie et je cite de mémoire une phrase de la loi qui la crée : « La Régie de l'énergie devra mettre en œuvre ses analyses quant à la satisfaction des besoins énergétiques des Québécois dans une perspective de développement durable. » Là non plus, il n'y a pas une qualification précise de ce que ça veut dire, mais la toile de fond est là.

Au Québec et au Canada encore, ce qui a été très clair, c'est que l'on est probablement un des pays dans lequel la question environnementale a dominé pendant le plus longtemps la question du développement durable. Le premier poste de sous-ministre au Développement durable a été créé au ministère de l'Environnement. Il a fallu plusieurs années avant qu'on retrouve une fonction identique dans d'autres ministères. Donc, on a vraiment eu ce parti pris environnement de la lecture du développement durable.

Appropriation du concept par les professions

Alors, puisque le concept semble beaucoup plus légitime qu'il ne l'était avant (mais dans le fond, être pour la vertu est assez facile pour tout le monde), on ajoute à sa discipline, à sa profession le label de développement durable, et en fait ce qui est intéressant, c'est que plusieurs professions – et là je ne parle pas de discipline au sens scientifique mais de professions

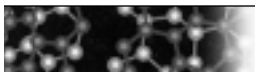


fondées sur une discipline – se sentent investies de la mission. Mais là encore, le poids de la dimension environnementale est très lourd et je prendrais pour exemple type un aspect sur lequel je travaille de façon un peu plus concrète, qui est les études d'impact environnemental. L'étude d'impact environnemental est présentée comme un outil qui contribue au développement durable. Le Québec et le Canada ont de très nombreuses années d'expertise dans le domaine, expertise qui s'exporte à l'extérieur du pays, maintenant qu'il y a moins de grands travaux à analyser au Québec. Un mouvement à l'intérieur des études d'impact environnemental actuellement est de passer à un niveau plus stratégique, de s'éloigner de l'analyse du projet pour aller vers l'analyse des programmes, des plans, des politiques, etc. Tout cela au nom de « mieux contribuer au développement durable ».

On assiste à une volonté, dans cette profession, des spécialistes de l'étude d'impact environnemental de devenir le chien de garde des politiques en matière de développement durable. S'assurer qu'une politique de transport, une politique de développement forestier, etc. sera conforme au développement durable. Cela conduit à des enjeux de professionnalisation extrêmement intéressants qui dépassent la question des disciplines mais qui affectent beaucoup la vie professionnelle, parce que d'autres ont aussi appris la leçon du développement durable, les planificateurs entre autres, les forestiers – on parle maintenant de plus en plus d'aménagements forestiers durables plutôt que de simple foresterie. On a donc modifié un peu les pratiques et on légitime sa cause, ce qui donne lieu à des conflits qui peuvent apparaître comme des conflits de méthode mais qui sont aussi des conflits de protection d'un territoire professionnel.

Je crois qu'il ne faut pas négliger cet aspect-là. La science n'est pas toujours totalement pure! J'en prendrai pour exemple cette volonté presque hégémonique des spécialistes d'études d'impact environnemental, d'être ceux qui se prononcent sur la capacité d'un produit de développement régional à être bon pour le développement durable au Nord comme au Sud. Ce à quoi répondent les spécialistes de la planification d'aménagement du territoire, qui ont fait leurs erreurs dans le passé aussi bien sûr, mais qui disent : « Nous aussi, nous avons été à Rio, nous aussi avons compris et nous intégrons les variables socio-politico-environnementales, nous n'en sommes plus à faire que de la planification physique des choses. Donc au nom de quoi, vous, qui venez de l'analyse strictement environnementale, vous proposez-vous d'être ceux qui évaluent une question de développement dans toute sa complexité, sa multidimensionnalité? » Si vous le lisez dans la littérature, ça peut n'apparaître que comme un débat d'école. Mais c'est aussi un débat de territoires et de contrats. Et ça, je crois qu'il ne faut pas le négliger, c'est très présent.

Un autre domaine dans lequel un outil a gagné des points dans ce contexte de développement durable, c'est la question des outils économiques pris au sens large, que ce soit en termes d'incitatifs économiques, aussi bien pour la gestion d'une réserve de biosphère au sud du Zimbabwe que pour gérer les gaz à effets de serre. Il y a une généralisation de l'outil économique comme outil de gestion qui est très forte et qui est complètement légitimée dans la mouvance actuelle. Non seulement légitimée par le concept de développement durable mais aussi par l'approche en termes de marché, en termes économiques, qui est sous-tendue par l'autre grande tendance que l'on vit actuellement avec la déréglementation et la mondialisation des échanges.



Parlons de Jeremy Rifkin, dont plusieurs doivent connaître les travaux sur la biotechnologie. Enfin, le 21^e siècle, « le siècle biotech » comme le dit le titre de son récent livre, présente une superbe analyse de cette question par rapport à la domination très forte de l'approche économique. Il dit : « Nous sommes en fait dans l'ultime étape du processus d'enclosure. » C'est le titre d'un de ses chapitres, et il ajoute : « Cette enclosure des terres a commencé du 16^e au 19^e siècle en Angleterre, lorsque les territoires communaux ont été balisés et où on a rendu la propriété privée à chaque petit paysan. Ce mouvement s'est poursuivi avec les océans, en un premier temps avec les zones de 200 milles, puis avec les espaces aériens, les couloirs aériens étant attribués à différentes compagnies, à différents pays. Maintenant, c'est le spectre hertzien qui est attribué pour que nos téléphones cellulaires fonctionnent et que tout le système d'échanges aéroportés puisse se faire. » On assiste aussi à la création de droits de pêche pour les parties de l'océan qui n'étaient pas privatisables de toute façon, mais c'est la même idée, on privatise le poisson à prendre parce qu'on ne peut pas baliser le fond de l'océan.

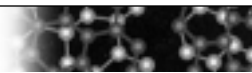
C'est la même idée encore dans les droits d'émission échangeables de gaz à effet de serre. Cet outil devient totalement universel et Rifkin dit donc que le dernier retranchement, c'est le droit de propriété intellectuelle sur le vivant où l'on vient de privatiser en quelque sorte ce qui s'est fait au fil de millions d'année par la nature.

La notion de droit de propriété échangeable a probablement plus de sens dans une société dans laquelle un grand nombre de nos actions sont marchandes que dans une société comme le Nord-Cameroun dans lequel moins de 30 % des échanges sont des échanges marchands. On impose une certaine vision du monde à l'ensemble de la planète avec ces outils-là, et c'est présent dans les conventions dont nous parlions tout à l'heure. Il y a là un enjeu auquel il faudra faire attention.

L'écologie industrielle

L'un des champs qui est véritablement une ouverture disciplinaire et interdisciplinaire extrêmement intéressante, qui ne remonte qu'au milieu des années 90 et que j'ai choisi de pointer parmi les apparitions, parmi les nombreuses modifications que l'on voit apparaître, faisant le lien avec l'écologie qui est un des points centraux de la présentation, c'est l'émergence de ce qu'on appelle l'écologie industrielle. Celle-ci est véritablement une des lectures scientifiques d'une approche plus intégrée, plus interdisciplinaire des rapports entre l'homme et la nature, dans les entreprises entre elles et qui est une lecture écosystémique des rapports entre les industries. C'est dans la ville de Kalemberg au Danemark où l'on retrouve son expression la plus concrète, où on a véritablement des interrelations entre des industries pour lesquelles les résidus de l'une sont des intrants de l'autre.

Ce qui paraissait évident sur un plan analytique est beaucoup plus difficile à mettre en œuvre en termes concrets. Mais de fait, maintenant que l'on connaît mieux les bilans de masse, mieux les flux qui circulent d'une entreprise à l'autre, on pense qu'il est concevable de les organiser de façon à maximiser les interrelations entre elles. Cela donne donc une philosophie d'éco-parcs industriels qui est beaucoup plus intégrée que ne l'a été le développement industriel jusqu'à maintenant.



C'est un domaine en pleine effervescence. À partir du moment où les choses démarrent, par un colloque, on commence par lancer l'idée, quelques mois après une revue est créée et trois manuels sortent. Et maintenant l'écologie industrielle a ce statut. Les premiers manuels ne datent que de 95-96, donc c'est en effervescence. Je dirais que c'est manifestement aux États-Unis que le concept avance le plus vite en ce moment. Les thèses sortent les unes après les autres, plusieurs au MIT particulièrement.

Si l'on fait le parallèle avec l'Europe, nous voyons que les Scandinaves sont en avance, que la France est tout à fait en retard, le premier colloque portant ce titre-là n'a eu lieu qu'en octobre 1999. Le premier colloque au Québec, sur ce thème, eut lieu en 1997, à Sorel. On est loin d'être en retard, il y a des universités qui ont vraiment pris ce problème à bras-le-corps. Je crois que les deux qui dominent, on peut le dire en ce moment, c'est Dalhousie d'une part, avec Ray Côté, et une équipe à UBC aussi. Ici, au Québec, il y a plusieurs individus mais ce n'est pas encore fédéré, la région de Sorel semble avoir acheté le concept et essaie de voir comment le rendre opérationnel.

Je pense que si on doit pointer des avenues stratégiquement importantes, c'en est une qui est extrêmement intéressante. Il y a même une écologie industrielle à forte dose sociale dans une région du nord de l'Italie, dans laquelle la solidarité ne va pas que dans les échanges de déchets mais va aussi dans une solidarité financière où les gens utilisent le mutualisme, qui est aussi un concept que l'on connaît en écologie, pour permettre de passer les mauvais moments qu'une entreprise pourrait avoir. Il y a des pistes de solidarité qui fonctionnent très bien. Donc, je pense qu'il y a là une lecture qui s'inscrit bien dans les logiques de développement durable, et je vous encourage à suivre ce qui va arriver sur ce plan.

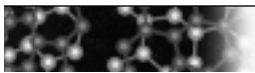
Il y a bien sûr de très nombreux sites Web, entre autres celui de Chaparal qui est le modèle américain. Chaparal est une entreprise d'acier qui est parfaitement bien intégrée avec un ensemble d'autres activités de production de ciment, de recyclage automobile, etc., dans une unité physique où on peut montrer non seulement l'économie au sens matériel mais une très nette économie aussi au point de vue financier. La performance de chacune des entreprises qui composent ce conglomérat est supérieure à ce qu'elle serait individuellement.

La durabilité des produits

L'autre point qui émerge très fortement est celui de la durabilité des produits. Là aussi, on trouve une importante littérature. La durabilité, c'est, je dirais, pour après le recyclage. Nous avons vécu une phase dans laquelle récupération, recyclage, réduction étaient les mots clés.

L'idée avancée tout d'abord par Walter Stahel, un Suisse Allemand reconnu au niveau mondial, est de passer de produits dans lesquels l'obsolescence est planifiée, donc qui ont une durée de vie courte, et qu'on va recycler, à des produits qui sont conçus dès le départ pour durer et dans lequel la compagnie productrice reste propriétaire du produit et ne vend que le service, l'accès au produit.

On retrouve là des travaux extrêmement intéressants avec des compagnies allemandes d'automobiles : la compagnie, dans cette théorie, reste propriétaire de la voiture et ne fait que vendre son utilisation. Bien sûr, cela est très proche de la location, sauf que la location actuelle



ne remet pas en cause la conception de l'automobile. Alors que dans ce système, la voiture est faite pour durer parce que le profit est sur la vente du service et non pas sur la vente de l'objet. On le voit déjà apparaître dans le domaine du photocopieur. C'est le premier domaine où plusieurs compagnies ne vendent plus le photocopieur mais le service. Et ça demande une reconception pour l'ingénieur, c'est un travail complètement différent. Il y a là une piste, à mon avis prometteuse à observer, mais qui requiert des changements sociaux dont on va parler dans un instant.

Quelques lobbys du développement durable

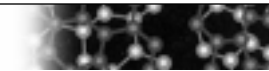
Maintenant, en deux mots, disons qu'il existe actuellement un certain nombre de structures professionnelles qui ont pris à bras-le-corps le concept de développement durable et qui en sont les promoteurs. J'en pointe deux mais il y en a des milliers. Il y a des associations à tous les niveaux, des ONG partout; j'ai fait un choix arbitraire parce qu'il me semblait que ce sont des groupes qui ont réussi à avoir une influence. Un en particulier est le WBCSD, le World Business Council for Sustainable Development qui représente 132 grandes compagnies dans 34 pays. C'est le lobby privé officiel et influent dans le domaine. Ce sont eux qui ont la légitimité auprès des gouvernements, de la Banque mondiale, de l'Union européenne pour être les porte-parole du secteur privé en matière de développement durable.

Donc, il est important d'écouter ce qu'ils disent, à quel choix stratégique cela correspond. Ils font toute la pression possible auprès des États pour dire que maintenant, nous, le secteur privé, sommes conscients de nos obligations, « déréglementez, nous allons continuer de bien faire ».

C'est donc un lobby puissant qui a adopté ce discours et qui réussit des partenariats extrêmement impressionnants dans le Sud avec la Banque mondiale, dans des financements conjoints où il fournit son expertise professionnelle, et avec l'Union européenne. Ce sont les promoteurs du concept d'éco-efficacité sur lequel je reviendrai dans un instant.

L'autre réseau qui semble intéressant parce qu'il est aussi porteur de changements, c'est une initiative suédoise qui se généralise à très grande vitesse et qui s'appelle « Natural step ». C'est autant un réseau qu'une approche et, en fait, il a un cahier des charges avec quatre termes clés, si vous voulez, bien classiques mais bien organisés et qui permettent à des municipalités ou à des entreprises de s'autoanalyser pour voir si elles sont « performantes et correctes » quant à des objectifs de développement durable.

Les deux aspects très intéressants sont, d'abord de pousser à une meilleure analyse systémique, alors que généralement cela n'est pas fait, et ensuite c'est l'approche en termes de *back-casting* plutôt que *forecasting*. Et là je pense qu'il s'agit de quelque chose d'intéressant qui permet de rêver un peu plus, comme le disaient ce matin les collègues. Au lieu d'extrapoler à partir des tendances actuelles, on définit un futur souhaité, idéal. On fait ensuite une analyse des choix et des décisions à prendre pour réussir à atteindre ce futur choisi en ne créant pas les irréversibilités qui le rendraient inaccessible, par exemple. J'insiste beaucoup sur ce mode de prévision qui se développe chez les futurologues, mais qui en fait un outil de travail que j'ai eu l'occasion de tester dans des situations réelles et qui est extrêmement intéressant.



Dans la même mouvance, c'est le troisième et dernier, ce mouvement autour du « facteur 4 », qui est un rapport au Club de Rome publié il y a deux ans, et qui dit que nous sommes au siècle qui doit passer de la hausse de la productivité du travail à celle de la hausse de la productivité des ressources naturelles. Donc, doubler la richesse et couper par deux l'utilisation des ressources. Ce livre qui s'appelle *Factor Four* en anglais est une panoplie impressionnante de *success stories*, de cas où ç'a effectivement fonctionné, mais où se pose le problème de généralisation. Cela est vraiment l'un des enjeux, de la même façon que dans les années 70, l'écodéveloppement n'a pas réussi à passer de petits projets à la société en général. On assiste ici au même phénomène. Beaucoup de cas concrets mais peu de généralisation et là je reprends la formulation du président de la Fondation pour le progrès de l'homme, Pierre Calame, qui disait : « Il faut appliquer le principe fractal de la gouvernance », c'est à dire que ceux qui ont réussi à faire quelque chose à une petite échelle devraient communiquer à l'échelle immédiatement supérieure. Ne pas vouloir faire le saut à un autre niveau, mais avoir des communications entre différents niveaux de gestion pour voir comment réinterpréter les conditions du succès ici, au niveau immédiatement supérieur.

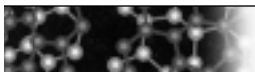
Mode de consommation durable

Je terminerai avec la question du mode consommation durable. Parce que, quand le Sud dit que nous consommons mal, c'est probablement que nous nous sommes relativement mal posé la question de notre consommation. Le seul groupe bien structuré autour de cette interrogation est un groupe qui travaille de façon continue à l'OCDE depuis 1995 sur ce que voudrait dire « consommation durable », mais sa définition, je la trouve triste. On nous répète la même chose, dans le fond. On nous dit que c'est un type de consommation qui permet d'amener une meilleure qualité de vie, en réduisant l'utilisation des ressources naturelles et le rejet de matériaux toxiques dans l'environnement, de façon à ne pas pénaliser les générations futures.

Oui, bien sûr, mais quand on fait l'analyse des rapports que l'OCDE a produits là-dessus dans les dernières années, les concepts pertinents qui y sont développés sont en termes d'économie stationnaire, donc économie sans croissance, écoefficacité, on l'a déjà vu, capacité de support des écosystèmes, on connaît bien en écologie. Mais rien ne nous interroge sur la question du psychosocial. Sur ce que sont vraiment les déterminants de nos modes de consommation.

Je reprends l'expression de Pierre Dansereau, « austérité joyeuse », qu'il a souvent avancée quant aux changements que l'on devrait avoir. Mais le constat que l'on peut faire aujourd'hui, c'est que l'offre est plus prête à changer que la demande. Je m'explique : il y a plus d'approches au niveau des technologies nouvelles, de produits nouveaux plus acceptables pour l'environnement qu'il n'y a de préparation chez l'individu à changer son mode de vie. Voyez les réactions face aux changements liés à l'automobile pour mieux lutter contre les gaz à effets de serre, par exemple.

Il manque une recherche sur les modes de consommation au-delà de leur dimension soutenable. On connaît les échecs incroyables qu'il y a eus en Afrique sur les types de four solaire et autres, parce qu'on n'avait pas compris la culture qui sous-tendait la cuisine et on est en train



de répéter cela. Il y a un décalage entre la recherche et l'acceptation de nouveaux modes de vie et de nouveaux produits.

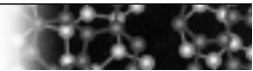
Transdisciplinarité et approche systémique

Alors, transdisciplinarité et approche systémique semblent être des pistes intéressantes. « Relier les connaissances » c'est le titre du dernier livre d'Edgar Morin, question qu'il qualifie comme l'enjeu du 21^e siècle. Relier les connaissances. Je pense que ç'a été souvent dit ce matin. Mais les cloisons intérieures de nos universités restent plus fortes que les murs extérieurs. On va plus facilement sur le terrain collaborer avec des partenaires qu'on ne collabore encore entre départements, entre institutions, à l'intérieur. C'est un constat que Pierre Dansereau, entre autres, fait depuis des années. La véritable interdisciplinarité, se fait beaucoup plus à l'extérieur sur des cas concrets qu'elle ne se fait dans les laboratoires. Ça n'exclut pas la mono-disciplinarité, mais on a du chemin à faire. Lubchenko, dans un rapport significatif aux États-Unis il y a deux ans, disait : « Il faut un nouveau contrat social pour la science, il faut rapprocher la science des décideurs, il faut lui donner un langage qu'elle peut rendre accessible aux décideurs, sinon on maintient les solitudes. Et pour ça, il faut aussi former des chercheurs capables non pas de changer de lunettes, mais d'emprunter de temps en temps les lunettes des autres pour pouvoir voir ce que les autres voient. »

Parce que l'un des problèmes auxquels on fait face, est qu'un grand nombre de ces problèmes environnementaux sont dans le long terme et actuellement, on ne voit plus qui se charge du long terme. Le processus d'aide à la décision obscurcit le long terme. Le taux d'actualisation, le principe même de l'actualisation utilisé comme outil fondamental d'aide à la décision pour les économistes obscurcit tout ce qui se passe au-delà de 25 ans.

Les États vivent en fonction des échéanciers des gouvernements, de la prochaine élection, alors que ce sont eux qui devraient être garants du long terme. Chez les ONG et le secteur privé, je laisse la question ouverte, ces secteurs ne sont pas monolithiques. Le chercheur n'est pas qu'à l'université, il peut aussi être dans le privé. On peut donc voir apparaître des choses étonnantes, on l'a vu ce matin dans le privé, qui peut avoir parfois une meilleure conscience du long terme que l'État.

Quand on parle de 20 ans, on a l'impression de faire du long terme. Là, je crois qu'il faut arriver à réinculquer l'idée que le long terme c'est bien au-delà des 20 - 25 ans dont on nous parle dans les planifications énergétiques, par exemple. En effet, nous vivons dans une société profondément marquée par des événements qui ont eu lieu il y a deux mille ans.



PÉRIODE DE QUESTIONS

Question 1 – Informatique et développement durable

J'aimerais savoir comment vous réagissez, parce que ce matin finalement, on était dans des technologies qui sont un peu dans des développements éphémères. C'est vraiment l'éphémère quand on pense à l'informatique, quand tous les 18 mois le nombre de transistors double. Quand vous parlez de développement durable, mais en termes de produits, développer des produits durables, s'il est bien un domaine où ça semble a priori ne pas s'appliquer, c'est bien l'informatique. Comment vous, qui êtes plutôt dans le domaine de l'environnement mais qui réfléchissez au développement, vous réagissez à ça?

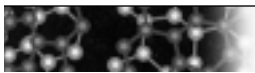
J'ai justement eu la chance d'avoir une conversation avec Walter Stahel sur cette question-là, sur les domaines dans lesquels on peut envisager le durable. Et selon lui, l'informatique, contrairement à ce qu'on croit, est conçue pour que, effectivement, lorsque le Pentium n+1 sort, on ne l'intègre pas encore dans le Pentium n-1 mais on change. Or, c'est un choix, c'est un choix stratégique de l'entreprise. Il est tout à fait envisageable, la caisse et un bon nombre de composantes pourraient rester beaucoup plus longtemps les mêmes et on le voit émerger, on sent que ça vient et pour lui, c'est un des domaines dans lesquels ça va avoir lieu. Donc, il est persuadé, comme chercheur dans ce domaine, que l'obsolescence planifiée va être réduite dans le domaine de ces technologies qui avancent vite et qu'on les rendra beaucoup plus modulables.

Question 2 – Le backcasting

Rapidement, parlez-nous un petit peu plus de ce qu'est le back-casting et deuxièmement qui donc est responsable de la planification de long terme. Vous nous posez la question, vous laissez voir des réponses un petit peu attendues, mais vous ne donnez pas votre point de vue.

Oui, alors le *back-casting*, on en parle beaucoup en ce moment dans le domaine des changements climatiques entre autres, mais c'est l'idée qu'au niveau où vous voulez planifier, que ce soit le développement de votre entreprise ou le développement de votre village sur les prochaines années, au lieu de faire une analyse des tendances et de les extrapoler, vous faites une réflexion collective. C'est une beaucoup plus grande appropriation du processus de développement, du processus de mise en œuvre des décisions pour aller vers ce futur souhaité que si le futur souhaité est le produit d'une approche mathématico-technocratique, si je peux dire.

À titre d'exemple, une des façons de voir le futur par les différents acteurs serait de demander au président d'une compagnie, non pas d'écrire le discours d'ouverture de l'usine projetée, mais le discours de clôture. Nous sommes 40 ans plus tard et vous le laissez rêver, et par



l'analyse du discours qu'il va faire pour clore, vous verrez l'image qu'il a de la région. Si vous faites faire le même discours de clôture de l'usine au maire de la ville et au responsable de l'ONG environnementale, vous allez ensuite confronter trois discours qui vous feront le portrait d'une société telle que vue par ces acteurs et vous verrez les points de convergence, les points de divergence et ce, en ne voyant pas le conflit comme un obstacle mais au contraire, comme quelque chose de très créateur, si vous savez vous mettre en mode de gestion de conflits.

Il y a des techniques de plus en plus développées où vous pouvez demander aux enfants, par exemple, de rentrer à la maison et de collaborer avec eux. Et l'enfant ramène un dessin de l'avenir que le père voit pour lui quand il sera grand. Une multitude d'approches vous permettent de connecter les projets futurs et de les approprier beaucoup mieux.

Pour répondre à la deuxième question, je pense qu'actuellement on est encore trop dans un système caricatural. Devant l'échec des États dans les pays du Sud, les organismes d'aide du Nord ont favorisé le développement d'ONG. Et l'ONG, la société civile, a remplacé l'État comme partenaire dans de très nombreux et énormes projets. Et parfois, il vaut mieux être ONG, sans aucune légitimité quelconque, pour avoir de l'argent, pour faire quelque chose dans un pays africain que je ne nommerai pas, que d'être l'État, le représentant de l'État de ce pays-là. On ne fait plus confiance à l'État. Les ONG n'ont pas plus la vertu environnementale et développementale que le secteur privé ou que les États. Il y a de bonnes ONG au sens de leur mode de développement, de leur philosophie. Il y en a qui sont dans une compétition farouche pour occuper des territoires. Donc ces catégorisations du bon, du méchant, etc., je pense qu'elles ne tiennent plus et que c'est beaucoup plus difficile de fonctionner. Ça demande des analyses plus fines.

Les États ne sont pas tous complètement corrompus, enfin tout le monde dans l'État n'est pas complètement corrompu. Le secteur privé, oui, a comme objectif le profit maximum, c'est très clair, mais ça n'exclut pas dans certains cas une prise en compte du long terme. Ça n'exclut pas l'idée que le chef d'entreprise du 21^e siècle aura ce que plusieurs appellent la triple *bottom line*, il sera évalué par ses actionnaires, non pas seulement sur sa performance financière mais sur une triple performance, financière, sociale et environnementale. Cela est en train de prendre beaucoup de poids. Il faut bien s'y préparer, il faut changer sa mission. Je ne suis pas en train de dire que les méchants ont changé de côté. Je dis juste qu'il y a des bons et des méchants partout.

LA MAÎTRISE DU DÉVELOPPEMENT DE L'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE



Conférencier :

*Mme Bartha-Maria Knoppers,
Faculté de droit, Université de Montréal*

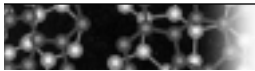
PRÉSENTATION DE SOPHIE MALAVOY

M. Réveret a abordé des questions de droit dans sa présentation, et nous allons rester dans le même thème avec la prochaine conférencière. Mme Bartha-Maria Knoppers est professeur de droit à l'Université de Montréal et chercheuse principale au Centre de recherche en droit public. Elle est présidente du International Ethics Committee de la Human Genome Organisation (HUGO), et fut membre du Comité international de bioéthique de l'UNESCO, qui a rédigé la Déclaration universelle sur le génome humain et les droits de l'homme, 1997.

Mme Knoppers, on l'aura deviné, on la voit assez souvent à la télévision, dès qu'il y a quelque chose qui touche l'éthique. Elle est spécialiste de la recherche génétique, du droit de l'éthique et elle va s'entretenir avec nous de la maîtrise du développement de l'activité scientifique et technologique et des balises déontologiques qu'on doit y mettre.

Il est difficile de faire une transition, un lien, mais je pense que, dans ma conclusion, je pourrai rejoindre certaines des conclusions du conférencier précédent.

J'ai comme but, aujourd'hui, de vous amener avec moi dans un voyage un peu impressionniste, pour terminer sur des conclusions qui, je l'espère, seront un peu plus concrètes. Vous vous rappelez que ça fait à peu près 50 ans que Crick et Watson ont décrit la « double hélice », et toutes les attentes qu'on avait à ce moment-là comme quoi ça pourrait mener à des thérapies, à des traitements, à de la prévention pour les maladies génétiques. Ça soulevé beaucoup d'espoir dans la population, et surtout des fonds pour démarrer les recherches, à un point tel que, comme vous le savez, depuis 1990, on a lancé le projet Génome humain, un projet international.



Néanmoins, bien qu'on parle d'espoir, d'avenir et de promesses liées à la recherche en génétique humaine, on a commencé à comparer le pouvoir de cette science à celui de la bombe atomique. Cela nous mène en 1996, à la couverture de *The Economist*, intitulée *The Genetic Illusion*, montrant la double hélice maintenant l'être humain par des chaînes. On se demande alors pourquoi, et où allons-nous dans l'avenir.

Pour répondre à ces questions, le pourquoi et où allons-nous, je vais vous amener dans des tournées « impressionnistes » assez rapides. Le but est de nous amener à décider s'il faut ou pas une politique, gouvernementale ou autre. Pour cela, il faut tenir compte des perceptions publiques, des représentations sociales que l'on se fait de la génétique.

Les représentations sociales de la biotechnologie

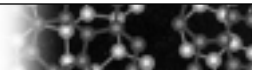
Et quand on dit génétique, on ne peut plus ignorer le côté « biotech ». Je vais donc commencer avec la biotechnologie, c'est-à-dire toutes les technologies de la vie, touchant les organismes vivants, pour ensuite regarder la génétique humaine que j'appelle classique, c'est-à-dire la génétique humaine monogénique, et ici encore avec les représentations sociales. Ensuite, je m'aventurerai dans le domaine de l'avenir, en me demandant quel est l'impact de ces perceptions sociales de la biotechnologie et de la génétique humaine classique sur les nouvelles avenues, les nouvelles directions de la recherche. En conclusion, je me demanderai si oui ou non nous voulons aller dans cette(ces) direction(s), et si oui, par quels moyens pourrait-on encadrer, contrôler ou même encourager le développement dans les sciences de la vie. Autrement dit, quels sont les outils que l'on a, et quels sont les principes directeurs qui peuvent nous aider.

Qui dit biotech dit donc nécessairement science de la vie. Si vous suivez un peu les sections économies/affaires dans les journaux, vous constaterez que les compagnies qui étaient auparavant spécialisées en pétrochimie ou en recherche avec des animaux ou des plantes – en fait les compagnies pharmaceutiques – s'intéressent maintenant à tous les génomes, génomes des plantes, des animaux, et des humains.

La naissance de Louise Brown (premier « bébé-éprouvette ») en 1978, fut un des phénomènes les plus frappants de notre époque, le genre de phénomène qui pousse les décideurs à agir. Ensuite, il y eut bien sûr la naissance de Dolly (premier animal « cloné »), le 27 février 1997.

Dolly est devenue dans un certain sens un symbole de la science et un lien avec l'entrée de la bioéthique dans la culture populaire. Beaucoup plus que Louise Brown en 1978. Mais les deux naissances illustrent le fait que, dans les deux cas, la science est venue nous présenter un fait, une réalisation, sans que nous le public, ni même la communauté des chercheurs, soyons prêts pour accueillir ces développements, toutes leurs conséquences et toutes leurs répercussions.

Dolly fut tout de suite suivie par Polly. On a commencé à utiliser une technique de clonage, et surtout toutes ces connaissances sur la possibilité d'insérer des gènes, pour insérer par exemple des gènes humains dans les animaux. On peut ainsi produire des protéines humaines dans des animaux, comme par exemple ici c'était le facteur 9, pour les hémophiles. Et donc on pourrait, dans le lait d'une chèvre, récolter le facteur qui sert à protéger contre les impacts



de l'hémophilie. Donc, les animaux sont non seulement clonés dans le sens industriel, mais ils sont aussi devenus des sources de produits pharmaceutiques, ce qu'on appelle le *pharming*.

Tout cela a aussi donné lieu à une industrie impliquant non seulement les animaux mais aussi les plantes, donc les aliments, qui sont maintenant utilisés comme vecteurs de vaccins ou de vitamines. On les appelle des *nutraceuticals*. Et tout cela est fait par ces mêmes compagnies, par l'industrie des sciences de la vie.

Lorsque je parle aux enfants et qu'ils me demandent ce que je fais, et que je dis « la biotechnologie et l'éthique », ils parlent toujours des *Frankenfood*. C'est un sujet où l'idée de protection, de préservation, d'amélioration – avoir une meilleure couleur ou une tomate qui ne va pas pourrir, etc – au lieu d'être accueillie, fait peur. Juste chez moi par exemple, mes ados ne veulent pas manger ces fraises géantes qui sont actuellement dans les magasins, parce qu'ils ont peur, en mangeant ces aliments, ces *Frankenfoods*, d'être eux-mêmes génétiquement modifiés. On voit donc encore là l'influence de la biotech, du progrès biotechnologique, sur les perceptions sociales.

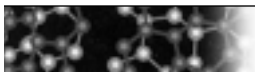
Nous sommes donc à un moment où nous voulons « préserver la nature », mais la nature dans un sens statique, ce qui est bien sûr totalement antinaturel. On commence à assister à une prise de conscience sur l'importance de la biodiversité, sur la nécessité de sauvegarder des espèces en voie de disparition. La Convention de Rio sur la biodiversité a aussi eu son impact. On a peur qu'en transformant, en améliorant, bref en touchant le patrimoine génétique, on ne puisse plus récupérer ce qui était dans l'ordre naturel.

Finalement, reste la question de la « brevetabilité » du vivant. Elle peut évoquer, par exemple, des plantes provenant de pays en voie de développement, qui ont un certain potentiel comme médicaments. Elle peut aussi évoquer la possibilité de modifier des animaux pour rendre leurs organes compatibles avec l'être humain, dans le but de pratiquer des « xéno-greffes ». C'est là quelque chose qui est actuellement en cours. Bien qu'elle ne soit pas encore approuvée, sauf dans des cas d'urgence, la technique est actuellement utilisée en urgence à l'extérieur du corps, en attendant par exemple le don d'un rein ou d'un foie. Mais on prévoit que les premiers essais cliniques de dons d'organes « xénos », donc entre espèces, du cochon à l'être humain, auront lieu dans six à huit mois probablement.

Alors on se demande ce qui est arrivé à la hiérarchie biblique, où l'Homme était au sommet de la pyramide, suivi par les animaux, puis les plantes et les organismes inférieurs.

Sachant que maintenant on peut avoir des hanches en plastique, des *pacemakers* ou des organes provenant de cochons, on en arrive à se poser la question : qu'est-ce que l'être humain? Est-ce que l'être humain n'est qu'une autre forme du vivant? Sommes-nous tellement interchangeable? On ne semble pas avoir les moyens d'arrêter le progrès dans le domaine des sciences de la vie.

En somme, les animaux, les plantes et l'être humain sont étroitement associés dans l'esprit du public. Faisons donc maintenant une deuxième tournée, pour parler de la génétique humaine.



Les représentations sociales de la génétique humaine

Si on demande : « C'est quoi la génétique humaine? », il y a toujours deux réponses. À 99 %, on répondra : « les Nazis », ou « l'eugénisme ». Il est vrai qu'il ne faut pas oublier toute l'histoire des abus perpétrés par des programmes étatiques qui visaient à éliminer ou sélectionner des individus par rapport à une supériorité qu'on présumait génétiquement fondée, mais qui était inexacte.

Si on ne répond pas « Nazis » ou « eugénisme », alors on parle du bébé parfait. On pense qu'il est possible de sélectionner son bébé, d'éliminer ses défauts, avant même la conception ou avant l'implantation *in utero*. La génétique monogénique, basée sur l'approche des petits pois de Mendel, affiche ces deux conceptions dans l'appréciation publique. On ne peut pas s'étonner qu'on commence à constater, non seulement aux États-Unis mais aussi ici au Canada, des poursuites judiciaires, tant ces attentes du bébé parfait ne sont pas rencontrées.

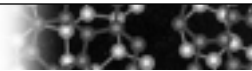
Les poursuites prennent la forme de *wrongful birth* ou *wrongful life*, la naissance non désirée ou la vie non désirée. C'est peut-être ici qu'il faut légiférer pour interdire les poursuites, non pas contre les médecins quand il y a une faute classique qui rencontre tous les autres critères pour poursuivre en responsabilité civile, car un généticien ne devrait pas être plus à l'abri qu'un orthopédiste, un anesthésiste, etc. Mais plutôt pour interdire les poursuites des enfants contre leurs parents et surtout contre leur mère pour les choix de qualité de vie, une qualité qu'on présume être capable de choisir même avant la conception, comme je l'ai dit. On a vu une telle poursuite devant notre Cour suprême l'an dernier¹⁷, contre une femme enceinte qui avait conduit une auto, et qui a eu un accident qui a affecté son enfant.

Après les Nazis et les bébés parfaits, on arrive en troisième lieu avec les connaissances populaires sur l'identification génétique : O.J. Simpson, Guy Morin, on peut trouver des exemples. Ça n'a rien à faire avec la génétique médicale, mais on utilise les mêmes technologies pour permettre l'identification d'une personne, que ce soit en filiation ou paternité, par exemple, ou encore dans les causes de droit pénal. On peut penser au gant d'O.J. Simpson; ou à « la robe de Monica »... C'est dans ce genre de situations qu'on va parler d'identification génétique.

En quatrième lieu, viennent la stigmatisation et la discrimination. C'est parce que les maladies monogéniques étaient souvent vues dans l'histoire comme une malédiction, une punition des dieux. On peut voir ça dans l'art, dans l'histoire. La notion de maladie comme étant quelque chose qui courait dans nos familles, qui était familial, où il y avait transmission entre les générations, se rattachait à cette notion de punition.

Aujourd'hui, discrimination et stigmatisation ont un autre sens. Les populations qui sont souvent étudiées, comme celles de l'est du Québec, de la Finlande, comme les Amish, les Mormons, ou les populations en disparition qui ont des gènes « intéressants », sont souvent identifiées comme étant « tarées ». Donc, la discrimination et la stigmatisation n'affectent pas seulement les individus et les familles mais aussi les régions et les populations. En réalité, ce n'est pas que ces populations ont plus de maladies, c'est juste qu'on les a plus étudiées, qu'elles nous donnent plus de renseignements. Malheureusement, le résultat de cette mau-

¹⁷ Dobson c. Dason, [1999] 2 R.C.S. 753.



vaïse interprétation est qu'on a peur des tests, et qu'on ne participe pas à la recherche, parce qu'on a peur de ne pas avoir d'assurance-vie ou on a peur de ne pas trouver un emploi. Cela est d'autant plus vrai aujourd'hui, maintenant que les études portent non plus sur les maladies monogéniques, mais surtout sur les facteurs génétiques impliqués dans les maladies multifactorielles (cancer, hypertension, diabète...).

De plus en plus, on trouve pour ces maladies « normales » et polygéniques des facteurs génétiques qui ne vont cependant pas s'exprimer tout de suite. Il ne s'agit que d'une susceptibilité ou d'une probabilité, d'un « facteur de risque » ou d'une maladie à apparition tardive. Mais, le fait même pour un individu de participer à la recherche, ou le fait même d'être testé, même si on est asymptomatique, suffit, pense-t-on, pour être sujet de discrimination. C'est là un deuxième domaine (après l'interdiction des poursuites contre les mères) où il faut probablement légiférer pour mieux protéger les données médicales, et pas seulement génétiques. Je reviendrai, dans la conclusion, sur les raisons pour lesquelles il ne faut pas avoir de lois génétiques.

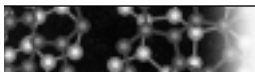
Si la conjoncture entre l'informatique et la génétique y est favorable, on peut imaginer une juxtaposition des banques de données sur la population avec la génétique humaine, avec des maladies, conditions, ou au moins des susceptibilités, et on comprend les craintes légitimes de *Big Brother* qu'ont les citoyens.

Personnellement, je pense que la source de notre incompréhension, et de notre perception des dangers attribués à la génétique humaine, provient plutôt de l'approche que j'appelle l'approche réductionniste. Le gène est la maladie, la maladie est la personne, et donc, la personne devient le gène. Par exemple, *Life Magazine* a fait sa couverture avec le titre : « Were You Born that Way? » Et selon cette approche, tous les attributs, non seulement des maladies, mais aussi l'homosexualité, l'alcoolisme, l'agressivité, ... auraient tous une explication, sinon une source génétique. C'est là l'idée que notre vie quotidienne, que chacun de nos gestes, que chacune de nos idées aurait donc une source génétique.

Selon cette notion réductionniste, la personne ne compte pas, l'important ce sont les échantillons d'ADN pour la recherche. On parle donc aujourd'hui de banques, non pas de banques de données mais de banques d'ADN, l'ADN étant à la fois le contenu et le contenant de l'information génétique. Ces banques de tissus et d'ADN vont devenir très, très importantes. En même temps qu'on ne peut pas dire que nous ne sommes que notre ADN, ni que nous ne sommes que la somme totale de notre code génétique, on ne peut pas nier non plus que les gens traitent leur ADN, ou en ont une perception, qui est différente des choses qu'ils abandonnent quotidiennement dans la vie.

Avec la commercialisation de la recherche arrive un problème nouveau : les grandes orientations de la recherche viennent de plus en plus du secteur privé. L'idée est donc que les priorités de la recherche, de même que la direction de la recherche, sont dictées, non par des buts humanitaires ou des buts « thérapeutiques », mais plutôt selon le profit qu'on peut espérer en tirer.

Ainsi prend fin cette petite tournée impressionniste des biotechnologies et de la génétique humaine. Maintenant, il faut s'interroger sur l'impact de ces perceptions publiques sur les



nouvelles avenues, les nouvelles tendances de la recherche, pour ensuite examiner les options pour l'adoption de politiques gouvernementales.

Tendances de la recherche en génétique et en biotechnologie

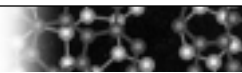
Il y a quatre tendances principales. Ici encore, le titre de la revue *The Economist* nous éclaire sur l'industrie pharmaceutique : *The Alchemists*. Les alchimistes du Moyen Age cherchaient à faire de l'or, et en même temps à trouver la formule de l'immortalité. On prétend que les alchimistes de notre temps visent les mêmes buts, mais par la pharmacogénétique, génétique dans le sens des sciences de la vie traversant tous les génomes (végétal, animal et humain).

Avec le résultat qu'on nous promet aujourd'hui des médicaments individualisés. En bref, cela veut dire que, si on connaît vos susceptibilités ou votre individualité génétique, on pourra cibler les médicaments qui vous conviennent le mieux. Peut-être êtes-vous déjà en train de prendre ces médicaments, mais sous certaines conditions qui, pour vous, pourraient être toxiques ou inefficaces. Cependant, grâce à la carte de la séquence du génome, et grâce aussi à une carte qui reste encore à faire, la carte de la variation normale, les gens partageant une même condition pourraient être traités avec des médicaments beaucoup mieux adaptés à leur profil génétique individuel. Pour l'asthme, par exemple, où on a quatre ou cinq produits sur le marché, dont probablement plus d'un tiers ne seront pas efficaces, ou même toxiques pour certains individus; la connaissance des susceptibilités individuelles permettra alors d'utiliser le bon produit dans les meilleures conditions possibles.

Donc, on a actuellement les essais cliniques classiques des médicaments. Ils sont très bien contrôlés et très bien encadrés, il y a même des règlements au niveau international, auxquels souscrivent le Canada, le Japon, l'Union européenne, les États-Unis. Mais depuis peu de temps, lors des mêmes essais cliniques classiques, on prend un autre petit 10 ou 30 ml de sang, et on commence à faire la mise en banque de l'ADN. C'est l'arrivée de la pharmacogénomique. Pharmaco dans le sens où on va encore tester des médicaments, mais cette fois par rapport à la génomique. Les compagnies pharmaceutiques sont donc entrées dans le monde des banques d'ADN.

L'apparition des compagnies de bio-informatique comme Celera, qui ont des bases de données, constitue une deuxième grande tendance. Ces bases en elles-mêmes, on ne sait même pas à qui elles appartiennent, comment les protéger, ou comment les contrôler juridiquement. La question relève-t-elle de la propriété intellectuelle, et si oui, à qui cela appartient-il? Celera est une compagnie privée qui a réussi à séquencer à une vitesse phénoménale le génome humain, dont la carte sera terminée bientôt. Celera a profité de toutes les données qui sont dans le domaine public, en les incorporant à sa propre banque aussitôt qu'elles sont publiées. Celera donne accès à ces données à la condition de la cession des droits sur la propriété intellectuelle potentielle.

Il y a deux ans, les généticiens ont réalisé qu'on était en train de créer dans le secteur privé une espèce de monopole sur les connaissances génétiques. Alors, pour la première fois dans l'histoire du monde, un consortium d'une dizaine de compagnies pharmaceutiques, de fondations, et de trois universités ont collaboré pour s'assurer que les connaissances en géné-



tique humaine restent dans le domaine public. Et toutes les 48 heures, lors du séquençage – avec le même type de machines qu'utilise Celera Genomics – toutes ces données sont publiées par le Consortium, et en même temps incorporées bien sûr par Celera dans sa propre banque. Le 14 mars dernier, Tony Blair et Bill Clinton ont déclaré que les séquences brutes devaient rester dans le domaine public, et y circuler librement.

Maintenant, et c'est le troisième développement, après la pharmacogénomique et les banques de données, viennent les biopuces. Vous avez eu une conférence sur le sujet ce matin. Les bio-puces sont minuscules, et permettent de dépister des milliers de maladies avec une seule goutte de sang. Dès la naissance, et même avant, nous pourrions avoir l'information sur la santé future d'une personne, avec les implications pour la prévention, le traitement ou même l'absence de traitement!

Enfin, la quatrième nouvelle direction de la recherche, c'est la génétique des populations. Et là on est complètement dépourvu. Pourquoi? Parce que toutes les discussions à ce jour portent sur des populations traditionnelles déjà connues et identifiées comme étant à risque. On a toute une liste d'associations entre des populations, des sous-populations ou des régions, et certaines maladies. C'est cela la génétique traditionnelle des populations.

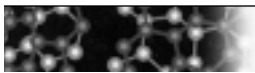
Mais ce qu'on veut, et ce qu'on a besoin de faire, sinon cette carte de la séquence du génome ne nous mènera nulle part, c'est connaître et étudier la variation normale du génome à travers toutes les populations. En d'autres termes, il faut établir la carte de la diversité (des polymorphismes), et ça implique la participation de tout le monde. Ce n'est pas spécifique d'une population, ou de personnes malades, ou d'une race, ou d'une ethnie, ou d'une région. La génétique des populations, c'est l'étude de la variation normale.

Mais comment faire une étude à travers la population, quand tous les outils juridiques et éthiques qu'on a développés depuis le code de Nuremberg visent l'individu, l'autonomie de l'individu, l'éthique de l'individu, le respect de l'individu, le refus de l'individu? On a perdu, dans un certain sens, l'éthique de participation de la population au nom de l'intérêt public. La santé publique ne semble viser que les cas d'épidémies ou de maladies infectieuses ou transmissibles. Puisque nous nous sommes concentrés sur les droits de l'individu, comment élaborer maintenant des politiques visant les populations?

L'encadrement des sciences de la vie

Je n'ai nommé que quatre des nouvelles directions de la génétique humaine. Quatre directions qui sont fortement influencées par les perceptions populaires à la fois des manipulations génétiques, de la biotechnologie, et de la génétique humaine monogénique classique. Comment envisager l'encadrement éthique (sinon légal) nécessaire? Quelles sont les voies possibles pour l'encadrement des sciences de la vie?

Il y a deux grandes approches. Premièrement, l'approche traditionnelle qui commence avec la recherche sans réglementation spécifique. Il ne faut pas oublier que la liberté de la recherche et le droit de profiter du progrès de la science sont des droits reconnus dans les traités et les conventions. On commence donc avec la recherche, et s'il y a un problème, alors on crée un comité d'éthique devant lequel on va obligatoirement valider l'approche. Et si les



sociétés de professionnels rencontrent encore des problèmes, alors elles créent des directives internes. Finalement, si le public n'est pas content, on met de la pression sur les décideurs. Alors ceux-ci vont créer une commission royale ou un comité auprès des gouvernements, bref une instance plus haute dans le gouvernement pour finalement décider, oui ou non, d'adopter une loi. Et dix ans après l'introduction d'une technologie, on commence à parler à nos collègues en Europe.

Par exemple, avec la transplantation d'organes et avec les technologies de reproduction, on a attendu à peu près 10 ans avant d'intervenir au niveau international avec des normes. À ce moment, les différences entre les pays étaient telles que l'harmonisation (je ne parle même pas de standardisation mais au moins d'harmonisation) était devenue impossible. Car à l'apparition de ces technologies, certains pays ont réagi tout de suite en légiférant pour interdire, ou pour approuver et réglementer, alors que d'autres pays ont adopté d'autres approches. Le résultat fut qu'on ne pouvait pas, lors par exemple de l'adoption de la Convention européenne sur la bio-médecine, arriver à un consensus, car les pays étaient déjà bloqués dans leurs positions.

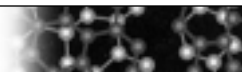
En second lieu, il y a l'approche prospective. C'est l'approche adoptée par l'UNESCO dans sa Déclaration universelle sur le génome humain et les droits de l'homme, en 1997. On commence avec les principes, alors qu'on est encore au début de la recherche, et on laisse ensuite les pays, suivant leur culture, leurs traditions, leurs priorités, adopter des lois (même plus restrictives) ou non.

Les deux approches (traditionnelle et prospective) ont toujours été en opposition. Mais je maintiens que l'approche traditionnelle qui monte (*bottom up approach*) ou l'approche prospective internationale, ne sont *a priori* ni l'une ni l'autre idéales. Il faut plutôt encourager l'interaction des approches en parallèle et communiquer avec les ONG, les chercheurs, avec les communautés des personnes malades, les populations, les instances, etc., pour créer un système complexe.

La mise en œuvre des politiques

Si nous adoptons cette nouvelle approche qui reconnaît la complexité, par quels moyens pouvons-nous la mettre en œuvre? Si vous êtes constitués aujourd'hui ici en assemblée, dans une assemblée nationale par exemple, ou une chambre des communes, quels seront les options qui vous seront disponibles? Quels sont les avantages et les désavantages de ces outils?

Il y a quatre types d'approches. L'approche connue ici au Canada est le recours aux « droits de la personne ». Elle consiste à attendre que quelqu'un amène devant le tribunal une cause, reliée à une nouvelle technologie ou une nouvelle science, sur leur conformité aux chartes ou aux constitutions ou aux codes de droits de la personne. Les tribunaux se prononcent, comme on l'a fait pour l'avortement, comme on l'a fait pour l'euthanasie. L'avantage, c'est que tous les acteurs peuvent intervenir et ajouter au débat. Le résultat est que, quand on a une décision, qu'on aime ou pas la décision de la Cour suprême, peu importe, on sait que les enjeux, les options, les pour et les contre, ont été étudiés, que tout le débat de fond est bien structuré, car il y a eu beaucoup de participation. C'est un avantage important, mais il y a aussi



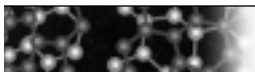
des désavantages : ça prend souvent une décennie et c'est très coûteux, et lorsque la décision est rendue, probablement que les technologies en question sont déjà installées, déjà intégrées dans le système. Car, avec les nouvelles technologies, on ne parle pas du choix personnel de Sue Rodriguez de se faire aider à mourir, ni de celui de Chantal Daigle de se faire aider à ne pas porter l'enfant d'un homme qu'elle n'aimait pas. On parle des technologies qui sont déjà en place et disponibles. Il y a donc des avantages en termes de clarté et des désavantages en termes de lenteur.

Un deuxième outil, aussi adopté chez nous, c'est l'autoréglementation. Les sociétés professionnelles ou les chercheurs devraient, non seulement se tenir au courant des problèmes tant éthiques que sociojuridiques que leurs travaux soulèvent, mais aussi essayer, avec leurs communautés, leurs patients, leurs participants à la recherche, de trouver un cadre d'autoréglementation, par des codes d'éthique par exemple. On dira oui, mais un code n'est pas une loi, ça n'a pas de force obligatoire. Ça a beaucoup plus de force que vous ne le pensez. Car si quelque chose arrive et qu'il n'y a pas de « loi », les tribunaux se tournent vers ces codes et les citent, les utilisent comme sources de normes. Donc, s'il est vrai qu'elles n'ont pas la même valeur contraignante qu'une loi, à première vue, mais au bout du compte ces normes d'autoréglementation ont une force contraignante que les gens oublient, et elles peuvent donc être très efficaces.

Ici encore, il y a des désavantages. D'abord, on a un groupe de professionnels qui font de l'autoréglementation, et qui peuvent donc être en conflit d'intérêts. Ils sont perçus comme étant en conflit d'intérêts. C'est une forme d'autogérance, ce qui est mal vu, car le fait même de travailler dans le domaine laisse présumer que l'on est en conflit d'intérêts, n'ayant pas la distance nécessaire, l'indépendance requise. L'autre désavantage provient de la rapidité des changements technologiques et du besoin d'être à jour, ce qui n'est pas toujours le cas.

La troisième approche – que tout le public favorise – c'est une loi. C'est efficace, oui, mais avant de légiférer dans un domaine comme la génétique humaine, il faut y penser à deux fois. C'est possible lorsqu'il y a consensus sur le fait que la technique est moralement répréhensible, comme pour le clonage humain par exemple. Je ne parle pas de clonage thérapeutique, ou thérapie génique, c'est-à-dire de cellules ou de tissus humains, mais plutôt de l'idée que la finalité peut être d'essayer de créer un clone d'une personne. Dans de tels cas répréhensibles, on a des outils, comme le Code criminel. Il faut juste que la société arrive à un consensus.

Hormis les activités « moralement répréhensibles », il faut plutôt penser pour l'avenir à régler par une loi la qualité de la recherche et des services cliniques, par l'accréditation et la surveillance continue. Mais des lois qui répondent l'une après l'autre, technique par technique, ou domaine par domaine, présentent de grands dangers. En essayant d'être très spécifique et par rapport à une technologie précise, on peut créer une loi inefficace, parce qu'au lieu de se concentrer sur une finalité à éviter, on décrit une technique à éviter, et souvent la technique devient dépassée. L'exemple parfait est le cas de Dolly. Au moment où elle est née, certains pays avaient des lois interdisant le clonage, mais la technique utilisée pour Dolly ne correspondait pas aux techniques décrites dans leurs définitions. La législation était impuissante. C'est ainsi que les lois dans le domaine de sciences en développement méritent toujours qu'on leur accorde beaucoup d'attention avant de les élaborer.



Parmi les outils législatifs, on peut songer aussi à ajouter « génétique », ou « caractéristiques génétiques » dans une charte sur les droits de la personne. La charte interdit notamment la discrimination fondée sur la race, l'origine nationale ou ethnique, la couleur, la religion, le sexe, l'âge ou les déficiences mentales ou physiques. Faut-il ajouter « caractéristiques génétiques »? Non, car c'est comme si les caractéristiques génétiques étaient une déficience, ou en tout cas quelque chose qui n'est pas normal. On risque de contribuer à la stigmatisation des conditions génétiques ou même des personnes à risque, tout en voulant éviter la discrimination. Il y a donc des problèmes avec l'ajout des « caractéristiques génétiques » dans un code ou une charte. Il faut plutôt songer à renforcer l'interdiction de la discrimination en général, en ajoutant « la perception » à la liste, car c'est le traitement des personnes asymptomatiques, bien qu'à risque, comme étant malades qui est discriminatoire.

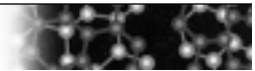
Personnellement, je vous propose qu'on légifère plutôt pour renforcer la protection des données médicales, en considérant les données génétiques comme des données médicales « normales » mais sensibles. Nous arrivons maintenant au moment où il faut protéger les données génétiques comme les données médicales.

Le dernier outil en est un préconisé par nos voisins du Sud. C'est l'approche du marché. Selon cette approche, le marché va, par ses propres forces, éliminer les mauvais et garder les meilleurs. Ceux qui offrent la meilleure technique avec la plus grande sécurité, vont survivre. Les consommateurs d'aujourd'hui sont avertis, ils n'iront pas vers des techniques qui ne donnent pas les résultats escomptés. De toute façon, les recours en responsabilité renforcent cette approche.

Je vais vous donner deux exemples de pays dans le monde qui ont cette approche de marché. L'Italie et les États-Unis n'ont pas de lois dans le domaine des technologies de reproduction (sauf pour la filiation, etc.). Pourquoi? C'est parce que les lobbies sont tellement forts – c'est là un des désavantages de l'outil du marché –, à la fois les lobbies fondamentalistes et les lobbies pro-industries, qu'il n'y a rien qui se passe. Avec pour résultat, que c'est dans ces pays qu'on retrouve le plus grand nombre de cliniques non contrôlées, absolument libres, qui offrent toutes sortes de services et d'interventions qu'on ne pourrait pas imaginer, dans des pays où l'Eglise est très forte. On voit donc les faiblesses du marché.

Et des comités de sages, alors, peuvent-ils nous guider sinon nous sauver?

Certains pays, qui ont une homogénéité d'approche ou qui ont une tradition de culture très homogène, ont réussi à avoir leur comité national d'éthique, par exemple. Mais le résultat peut être un professionnalisme ou monopole de l'éthique. Ça peut devenir une éthique statique, une éthique politique. Prenons l'exemple de la France, qui a adopté les lois de bioéthique – je trouve que c'est un nom bizarre, « lois de bioéthique » – avec maintenant à peu près 300 ou 400 pages de décrets les accompagnant. On y a maintenant la « bioéthique » administrée un peu comme le droit fiscal, alors que la bioéthique est censée plutôt être une forme de questionnement.



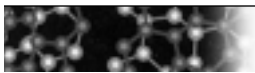
Conclusion

Où sont donc nos décideurs? Pourquoi créer une autre instance, quand on a des décideurs qu'on a élus pour représenter nos intérêts et nos préoccupations? Il ne faut pas leur substituer des comités d'éthique, pour assumer une responsabilité qui est plutôt politique. C'est là où le débat devrait aussi se situer.

Dans un tel débat, nous ne pouvons pas ignorer les préoccupations spirituelles des gens.

Pensons, si vous voulez, aux valeurs qu'ont les gens, dans notre prise de décision, en vue d'un encadrement ou d'une politique éventuelle.

Alors, où allons-nous? J'espère ne pas avoir démolé toutes les voies possibles. Je ne suis pas méfiante de toutes ces approches. Je pense que toutes les quatre, droits de la personne, auto-réglementation, statutaire et marché, peuvent fonctionner ensemble dans une approche complexe. Il y a cependant une chose que nous devons nous rappeler, c'est que nous ne sommes plus dans la hiérarchie biblique. Nous devrions probablement plutôt avoir aujourd'hui une approche fiduciaire ou encore, et je rejoins donc l'intervenant précédent, une approche d'écosystème, qui tient aussi compte des valeurs des citoyens.



PÉRIODE DE QUESTIONS

Question 1 – Autoréglementation et conflits d'intérêts

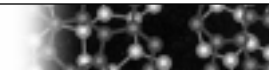
Je me demandais, quand vous parliez de l'autoréglementation, d'après votre pratique, votre expérience, sentez-vous une ouverture à cette autoréglementation de la part des scientifiques, ou y a-t-il encore des résistances, en dehors du fait que certains sont taxés de conflit d'intérêts? Par exemple, en biologie moléculaire.

Si vous faites de l'autoréglementation, vous êtes perçus comme étant en conflit d'intérêts. Personnellement, je n'y crois pas. Je pense qu'être professionnel veut dire avoir une certaine expertise, avoir une certaine liberté de jugement. Pour sauvegarder cette liberté, je pense qu'il faut agir de façon responsable, sinon on devient des mécaniciens ou des techniciens. Mais cette liberté est perçue comme étant un conflit d'intérêts. Donc, probablement qu'il faut non seulement adopter ces codes, ces principes, ces pratiques, ces directives, mais il faut aussi les garder à jour, toujours les renouveler, toujours les revisiter, les remettre en question. Il faut impliquer autant qu'on le peut les patients, les participants à la recherche, les gens âgés et les groupes de consommateurs, dans le développement de ces normes. C'est ça qui était absent jusqu'à présent. Des professionnels ont agi de bonne foi mais n'ont pas assez consulté, pour rendre ça plus vivant et viable, et plus visible dans les communautés. Mais je trouve que c'est une avenue très intéressante. Très participative quoi, ou qui pourrait l'être en tout cas.

Question 2 – Les comités de bioéthique

Ce que vous dites - surtout à la fin - m'a un peu étonné. Vous parlez effectivement de ces comités de bioéthique. Je sors d'un débat sur les OGM où on n'arrête pas de parler de ça, de l'intervention du citoyen dans les débats concernant leur nourriture, etc. En France, c'est vrai qu'il y a beaucoup de comités et beaucoup d'experts. Il y a effectivement un comité de bioéthique. D'ailleurs la présidente du Comité international de bioéthique de l'Unesco était Noëlle Lenoir du Conseil constitutionnel. Mais la décision in fine est laissée aux politiques. Lorsque vous prenez, par exemple, des structures comme l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments, qui au niveau du Canada correspond à l'Agence d'inspection des aliments par exemple, si on donne un avis d'experts, on va laisser aux politiques la marge de manœuvre qui leur permet de décider. On n'est pas toujours bienvenus, notamment des Anglais quand on refuse, par exemple, des importations de bœuf parce qu'on sait qu'eux ils ont la vache folle et qu'on ne voudrait pas que nos Français aient le Creutzfeldt-Jakob. Mais la décision finale est laissée aux politiques.

Maintenant, ce qu'on ne trouve peut-être pas ailleurs, mais je ne sais pas si vous l'avez abordé au début de votre exposé, c'est la responsabilité du politique. Et lorsqu'un politique en France, même un premier ministre, prend une décision sur le sang contaminé et que les citoyens considèrent qu'il y a eu erreur, le politique va devant le tribunal et est mis à l'examen, comme on dit actuellement. Je crois que ce



genre de chose est quand même une partie importante, c'est-à-dire que même la décision du politique est une décision qui peut être contestée par le citoyen devant des cours spéciales.

Le débat que vous avez abordé est un débat excessivement important, mais je crois qu'il y faudra la responsabilité de chacun, et actuellement on a un certain résumé de tout cela dans un certain principe de précaution dont on parle beaucoup.

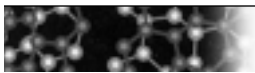
Mais là aussi, pour avoir pas mal travaillé avec la Faculté de droit de l'Université d'Ottawa sur la comparaison des systèmes juridiques, je crois tout à fait sincèrement que lorsqu'on a travaillé d'une part sur la Common law et d'autre part sur le droit civil, on ne parle pas forcément de la même chose, on n'est pas de la même culture.

La Common law étant un peu un système de la faute avérée que l'on juge par rapport à une jurisprudence, le droit civil étant quand même quelque chose de l'a priori, on a d'un côté l'a priori, de l'autre côté l'a posteriori. Est-ce que c'est tout à fait la même chose?

Deux réponses. Je vous rejoins complètement au sujet de la responsabilité des décideurs, et je pense que c'est là où on devrait voir ces débats. Je ne peux pas exclure les autres, comme les professionnels ou les ONG, etc. Mais finalement c'est une décision politique. Ce n'est pas chaque pays qui veut avoir des lois de bioéthique, mais ça ne veut pas dire qu'il ne doit pas y avoir de débats, et c'est ça qui manque ici. Mais la réponse française, c'est bien connu, est tout à fait dans sa culture et ses traditions.

Par rapport à votre deuxième commentaire, je suis comparatiste depuis 25 ans. Donc, je navigue dans les deux domaines. J'ai fait mon doctorat dans votre pays. Mais, en ce qui concerne les cultures par rapport au droit privé, vous avez raison de dire que, dans le passé au moins, les pays de tradition civiliste commençaient avec des principes – des principes souvent lapidaires, qui pouvaient résister au temps, comme la notion de faute dans le code Napoléon. Tandis qu'on dit que la common law, c'est la *case law*, qui se construit par précédents, etc.

On commence à voir un certain chevauchement, même en droit privé, entre les deux régimes, avec l'augmentation du nombre de lois spécifiques, sujet par sujet, que ce soit en common law ou en droit civil. Mais ce qui est encore plus intéressant, c'est que les deux systèmes se rejoignent en ce domaine, face au droit international et au droit de la personne au niveau international. Et c'est pour ça que j'ai argumenté qu'il fallait procéder par les deux approches à la fois (d'ordre privé et d'ordre public), que si on fait notre approche privatiste selon notre propre culture c'est tant mieux. En Angleterre ils sont souvent très en avance, l'approche pragmatique à l'anglaise est très bien faite. En France, vous avez les lois sur la bioéthique. Mais ces différences d'approche n'empêchent pas qu'on devrait, au même moment, travailler ensemble au niveau international, parce que les droits nationaux et internationaux se rejoignent.



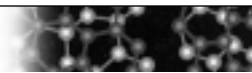
Question 3 – Aspects sociaux, légaux et éthiques

Dans une de vos dernières diapositives, vous aviez une espèce de schéma d'encadrement public de la recherche et d'utilisation de ces résultats, avec au cœur la génomique, une couronne qui indiquait la recherche en médecine et la recherche en génétique, et le tout était encadré de « ELSI », donc « ethical, legal and social issues ». Ne craignez-vous pas que pour avoir une gestion publique de plus en plus éclairée des résultats de la recherche et de son utilisation, un écart risque de se creuser entre l'accélération de la recherche en génomique, en médecine et en génétique, et le processus quand même beaucoup plus lent de la recherche sur les aspects sociaux, légaux et éthiques, et qu'il risque de se créer un fossé qui mettrait en péril une saine gestion ou un sain encadrement public?

Oui, je pense que le conférencier précédent disait la même chose : toujours un écart. Le seul moment dans l'histoire où on n'a pas laissé se créer un tel fossé, hormis l'Unesco et cette initiative de principes directeurs, c'est au moment où on a commencé le projet Génome humain aux États-Unis en 1991. Watson, le Watson de la double hélice, avait plaidé pour obtenir – et a obtenu – un pourcentage – c'était 3 % à ce moment-là en 1991 – du budget du projet Génome aux États-Unis pour les ELSI. C'était un moment historique, qu'on va d'ailleurs célébrer l'an prochain à Washington, et ç'a donné l'exemple aux autres pays. La Commission européenne y alloue 5 %, le Canada en est à 11 %. À un moment donné, il y a eu une espèce de compétition, mais au moins on s'est préoccupé de cet aspect dès le début, au lieu de réagir après coup.

Mais l'écart est toujours là. Quand les gens me disent qu'il suffit d'éduquer, d'informer le public et que ça va aller mieux là, je ne suis pas d'accord. J'ai parlé au début de biotechnologie, les gens me parlent de Dolly... Je pense qu'ils ont raison parce que ça peut sembler impressionniste, de mélanger plantes et animaux, Nazis et tout ça, mais ce n'est pas vraiment mélanger. C'est peut-être une approche naturelle, holistique, parce que les gens ont vu, grâce à tout ce qu'on a déjà eu dans l'histoire – avec l'environnement et le reste –, qu'il faut justement intégrer, dans le sens d'encadrement potentiel, comme ça se fait dans les autres domaines, et ne pas cloisonner.

Personnellement, je fais beaucoup confiance au public. Ce qui nous manque, ce sont des lieux d'écoute. Autant on a des débats ici aujourd'hui qui sont calmes, autant ça prend parfois beaucoup de courage pour se présenter devant des groupes publics professionnels, qui sont là pour exprimer leur point de vue, parce qu'ils n'ont pas d'autres lieux. Et c'est ça qui nous manque, parce que moi je suis presque sûre que si on commence un débat, dans un lieu qui devient une tradition, on va commencer avec les phobies, les polémiques, etc. Les gens doivent dire ce qu'ils ont à dire. Et je pense qu'alors on peut construire pas mal de choses. Une fois qu'on a passé le noir et le blanc, on peut voir les nuances... Je suis convaincue de ça, mais on n'a pas un tel lieu.



Question 4 – L'imputabilité des chercheurs scientifiques

Je reviens sur la question de la responsabilité. Et ce matin, probablement que d'autres auditeurs comme moi ont été frappés de voir la puissance divine ou démoniaque de la science sur la vie, même sur le non-vivant. Mais en même temps, ce qui est frappant, c'est que les grandes découvertes scientifiques qui se font et qui nous chavirent, qui nous préoccupent, sont des découvertes collectives. Or, la préoccupation que j'ai, c'est en cas de catastrophe. Quel est l'état de la réflexion juridique actuellement pour aborder la question de l'imputabilité, si une catastrophe avait lieu? On sait qu'on essaie d'en limiter les probabilités, qu'on fait des politiques pour les chercheurs pour essayer d'encadrer a priori les risques, mais par ailleurs - regardez les enfants de Duplessis, c'est un tout autre champ de réflexion - on comprend à quel point c'est complexe. Et par ailleurs, on sait que les chercheurs, même les mieux intentionnés, ont une vision nanoscopique des impacts possibles de leurs recherches. Et donc qu'il y a comme un hiatus là, qui nous préoccupe. Quel est l'état de la réflexion là-dessus?

Je ne sais pas s'il y a d'autres juristes dans la salle, en fait ça ne prend pas un juriste, c'est vraiment une réflexion au niveau de la société que vous êtes en train de poser. Les outils traditionnels de santé publique couvrent surtout les épidémies. Aujourd'hui, avec la montée de l'individualisme et de la protection de l'individu, on a évincé la notion du bien commun, du devoir de la collectivité, de l'État. Donc, les outils d'intervention sont vraiment minimes en matière de santé publique. En termes de catastrophes, à part les mesures d'urgence qu'on peut invoquer à n'importe quel moment, pour protéger les citoyens contre les forces extérieures ou même intérieures, il n'y a rien. On n'y a pas encore pensé, comme vous venez de le dire, au niveau de la collectivité. Donc vraiment, à part les épidémies ou les principes directeurs prospectifs, il n'y a rien.

En terminant, je voulais vous dire quelque chose que j'ai entendu la semaine passée et qui m'a complètement abasourdi. J'oublie où j'étais, mais j'étais quelque part où il y avait une directrice de l'Institut national de la santé aux États-Unis, qui a fait des sondages. Et lorsqu'on a demandé aux gens : « D'où viennent vos connaissances médicales? » – ça c'est aux États-Unis, mais quand même – pour 95 % des gens, c'était de l'émission de télévision *E.R.*

Il manque la communication. À part la télévision – ce qui m'a frappé c'est que c'était la télévision – je pense qu'Internet arrivait troisième, les livres n'étaient pas deuxième, il y avait quelque chose entre eux, entre télévision et Internet. Mais l'information donc qui est en circulation, il n'y en a pas. C'est sur cette question qu'il faut travailler.

SESSION PLÉNIÈRE



Animatrice :
Mme Sophie Malavoy, Icotop

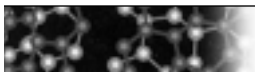
Sophie Malavoy

J'inviterais tous les conférenciers à venir s'installer à la table. M. Poussart a dû s'absenter car il couvrait, en même temps, un autre colloque.

Ce fut une journée très riche. Pour démarrer la séance plénière, qui en fait va donner la parole à l'auditoire, je demanderais aux conférenciers de nous livrer ce qu'ils ont retenu de cette journée. Il y a eu cinq présentations majeures qui ont eu le temps, pour une fois, d'aller en profondeur, ce qui est souvent rare dans les colloques. Peut-être pourrions-nous leur demander rapidement une ou deux idées principales qu'ils ont retenues de la journée.

Jean-Pierre Revéret

Je pense qu'un premier point qui m'a marqué, c'est la différenciation des temps. Les temps peuvent être de plus en plus courts ou de plus en plus longs et il faut s'adapter à la prise en compte de ces différences. Les systèmes fonctionnent avec des périodicités très différentes. Or, il y a des décisions à prendre, qui sont de l'ordre de la gestion et qui parfois sont conditionnées par un temps qui n'est pas forcément le bon. Je crois que l'on fait face à un défi d'harmonisation des temps dans différents systèmes et c'est une interrogation qui ressort de ce que nous avons dit.



Bartha Maria Knoppers

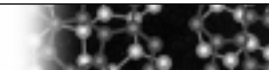
Ce qui m'a frappée c'est l'expression utilisée dans la dernière question de la salle sur la vision « nanoscopique ». Elle va rester dans ma tête, et ça va mijoter pendant un bout de temps... Mais, si on ne veut pas être « nanoscopique » devant nos responsabilités de chercheurs, il faut soulever la question des outils. Les différents phénomènes se déroulent à l'échelle internationale. Est-ce qu'il faut dorénavant créer des outils de prévoyance et de prévention des catastrophes dont nous ne disposons pas à l'heure actuelle? Je pense que oui et on n'a pas encore assez travaillé dessus.

Une autre idée que je retiens est celle de l'équité inter et intragénérationnelle qu'a soulevée M. Revéret dans sa conférence. Je pense qu'elle s'applique en génomique. Pourquoi interdire la thérapie germinale, sans même en parler? Est-ce que ce n'est pas une justice vis-à-vis des générations futures de ne pas recommencer le traitement de certaines maladies. Il y a une question de justice intergénérationnelle vis-à-vis de la thérapie germinale et d'équité en termes de partage des bénéfices.

Si la pharmacogénomique devient une réalité, et que les gens se prêtent à la création d'une espèce de banque internationale de variations génétiques, dans toutes les populations et, qu'un jour, on arrive à faire des profits avec toutes sortes d'outils, de tests, etc, comment seront alors partagés ces bénéfices en toute équité? Je pense qu'on n'a pas encore assez parlé de ces deux notions, d'équité et de justice intergénérationnelle.

Mohamed Chaker

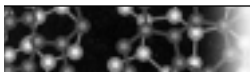
Une rencontre avait été prévue entre les conférenciers pour harmoniser le contenu de nos présentations. Finalement, tout le monde étant très pris, cette rencontre n'a pas eu lieu. Heureusement, parce que vous avez la preuve que des gens qui ne se parlent pas et qui sont dans des domaines a priori très différents, ont les mêmes préoccupations, suivent les mêmes chemins. Par exemple, je viens personnellement du secteur des matériaux et je parlais de biologie, un de mes collègues discutait de nanotechnologies alors qu'il est spécialisé en génétique et un autre collègue qui travaille à la conception parlait de nanomatériaux et, finalement, je parlais d'applications dans le domaine énergétique, dans l'« énergie verte ». L'idée principale que je retiens c'est que l'approche disciplinaire est finalement terminée. Ce n'est pas simplement un discours, c'est une réalité et, dans tous les problèmes auxquels nous avons à faire face, il y a un aspect multidisciplinaire. J'ai aussi été intéressé par l'aspect éthique, justement parce que ces problèmes sont pluridimensionnels et, fondamentalement, je pense que, contrairement à l'idée qu'on avait dans le passé, suivant laquelle les disciplines s'éloignent les unes des autres, j'ai l'impression qu'elles se rapprochent, ce qu'on pourrait appeler la grande convergence. Le deuxième point que j'ai apprécié lors de ce colloque, c'est le fait que la vie des chercheurs dans différents domaines au Québec est finalement à peu près la même. On a, à peu près, les mêmes sentiments, les mêmes plaisirs, les mêmes passions mais aussi les mêmes frustrations et les mêmes difficultés. On ressent aussi le fait que nous sommes tous dans un domaine dans lequel il faut aller vite, travailler fort tout en étant soumis à une somme importante de contraintes. Je vais un peu copier ce que disait mon collègue ce matin : la recherche c'est l'individu, c'est les chercheurs et c'est dans l'être humain qu'il faut investir.



Richard Béliveau

Je ferai deux commentaires : Le premier confirme que la multidisciplinarité est certainement un des aspects fondamentaux de la science moderne, particulièrement dans le secteur médical. On le vit surtout depuis environ cinq ans. Les congrès auxquels nous assistons sont constitués d'oncologues, de radiologistes, de physiciens... L'époque où l'on tenait des congrès réservés aux biochimistes est bien terminée. En angiogénèse, je me dois de suivre la littérature en arthrite rhumatoïde, en oncologie, en diabète.... La recherche est éclatée. C'est une observation qui est importante et qui contraste avec l'image classique du savant isolé dans sa sphère qui ne correspond plus à la réalité. Un chercheur qui survit aujourd'hui, c'est parce qu'il a une vision large et qu'il adopte une approche multidisciplinaire. Je vais poursuivre dans ce sens pour mon deuxième commentaire.

Je pense qu'il faut distinguer le réductionnisme analytique du réductionnisme de la pensée. C'est un commentaire qui est souvent adressé aux scientifiques. Je ne pense pas qu'il y ait un seul scientifique dans mon secteur qui soit réductionniste de la pensée. Si les chercheurs en médecine, par exemple, sont réductionnistes c'est pour comprendre. Il faut analyser comme les Grecs nous l'ont appris avec l'analyse et la synthèse. Il faut analyser dans un premier temps, et la démarche réductionniste est essentiellement analytique. Elle demande de fragmenter pour comprendre. Mais je pense que ce qui anime fondamentalement le chercheur, c'est une vision globale. J'en ai parlé ce matin lorsque j'ai parlé du protéome. Je ne pense pas qu'il y ait un seul chercheur présentement dans le domaine médical qui ait une vision réductionniste, parce que, comme je l'ai montré ce matin, la vision du gène associé à une protéine et à une fonction est finie depuis longtemps. La constatation que l'on fait au quotidien lorsqu'on essaie de comprendre les maladies, c'est qu'il s'agit là de problèmes plurifactoriels : ce sont des gènes multiples, des contributions environnementales, des contributions nutritionnelles, toutes sortes de contributions qui font que la maladie surgit. Donc, on ne peut pas avoir une approche réductionniste de la pensée lorsqu'on vit dans un secteur comme celui-là. Je pense que c'est là une mauvaise compréhension qui est souvent associée à l'image du Dr Frankenstein... Je suis fatigué de voir toujours les mêmes clichés hollywoodiens qui dépeignent les savants comme des docteurs Frankenstein. Je pense que les chercheurs ont une conscience beaucoup plus élevée que ce que la majorité des gens peuvent supposer.



Question 1 - La formation multidisciplinaire

En tant qu'enseignante au niveau collégial, j'aimerais avoir une information, de votre part à tous. Vous avez mentionné plusieurs fois la nécessité de la multidisciplinarité, vous venez justement d'en faire l'éloge. Comme prof de physique, je me demande parfois si on doit encore former les jeunes dans des spécialités ou si, à vous entendre parler, il faudrait les former dans « tout ». J'aurais peur alors du temps qu'ils vont passer à l'étude! Ils vont être découragés, ces pauvres. Est-ce que vous estimez qu'il est encore nécessaire d'avoir une formation disciplinaire? En tant que personnes qui auront à former les jeunes, il faudrait que nous ayons quelques grandes lignes pour nous orienter dans ce problème.

Mohamed Chaker

Je pense qu'il y a deux aspects à cette question. Comme je l'ai toujours dit à mes étudiants, ce qu'on apprend, ce n'est pas tellement les connaissances mais les méthodologies.

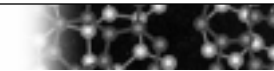
Pour l'instant, je dirais que ce qui est important pour un jeune c'est d'avoir de bonnes bases. Comme vous êtes professeur de physique, je suis physicien moi-même, je pense que ce qui est important c'est qu'ils comprennent qu'il y a des lois de la nature et qu'ils puissent jouer avec ces lois pour les appliquer à des exemples. Ce qui est important, à mon avis, dans l'éducation c'est les bases. Et finalement, on se rend compte souvent, très souvent, que quand on analyse différents phénomènes on a besoin de peu de choses au départ. À la base, les lois de la nature ne sont pas si nombreuses et c'est ça qu'ils doivent acquérir. Par la suite c'est dans les applications qu'ils deviendront multidisciplinaires.

Bartha-Maria Knoppers

Je pense que la multidisciplinarité sera affaiblie si on pense qu'on peut être généraliste avant d'être spécialiste. Il faut vraiment s'assurer de certaines bases, que ce soit des bases scientifiques, des bases mathématiques ou des bases historiques, peu importe le domaine. On a besoin de fondements qui nous permettent ensuite d'être ouverts aux autres méthodologies, aux autres approches et compréhensions. Mais, j'ai grande, grande, grande peur quand je vois que les gens pensent que l'on peut apprendre par extraits. C'est un ersatz. Selon moi, ce n'est pas vrai. Il faut avoir des connaissances fondamentales et ensuite partager des méthodologies et des concepts avec d'autres domaines. Je pense que d'aller tout de suite vers la multidisciplinarité sans avoir des fondements, ce serait une grande erreur.

Jean-Pierre Revéret

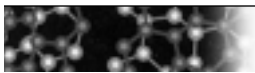
Je vais renfoncer le même clou. Cette question se pose autant au niveau collégial qu'au niveau universitaire. Un des grands débats qui a lieu depuis peut-être 15 ans dans le domaine des sciences de l'environnement, c'est faut-il « enseigner les sciences de l'environnement? », et Dieu sait si personne ne sait bien les définir encore. Faut-il les enseigner dès le baccalauréat ou faut-il y arriver par une formation disciplinaire solide et ensuite s'y ouvrir au niveau de la maîtrise? Le discours était assez cohérent jusqu'à il n'y a pas longtemps : il faut une for-



mation disciplinaire solide et s'ouvrir ultérieurement. Mais pour des raisons, qui sont parfois proches du clientélisme, il y a une tendance à ouvrir une formation générale plus tôt, avec le résultat qu'il n'y a aucun ancrage méthodologique solide. Par contre, ce que j'ajouterais peut-être à ce débat, c'est qu'il faut peut-être donner plus d'humilité disciplinaire à nos étudiants. En injectant un petit peu d'histoire des sciences dans le programme qui permettrait de relativiser les choses, de voir qu'on est toujours sur des trajectoires, on adopterait une position un peu moins disciplinairement arrogante si je peux dire, et il y a des disciplines avec lesquelles l'interdisciplinarité est moins facile qu'avec d'autres. Pas seulement parce qu'il n'y a pas de variables passerelles. Devenir multidisciplinaire, ce n'est pas acquérir les méthodologies de chacune des sciences en fait. Je crois que l'on doit bien dissocier ce que l'on fait dans la vie professionnelle de chercheur et ce qu'on apprend dans ce qu'on appelle formellement l'apprentissage universitaire. L'interdisciplinarité vient probablement plus tard encore par l'identification de variables passerelles avec lesquelles on communique avec d'autres disciplines. Et je crois que ça vient avec le temps, et on s'ouvre soi-même si on a eu de bonnes bases. Si on a appris à apprendre, on peut accumuler quelques-unes des autres disciplines, dont on comprend la logique. Mais il y a toujours un cœur disciplinaire et puis on s'en va vers quelques autres disciplines, que l'on maîtrise un petit peu moins que la première, mais on apprend à travailler avec celui qui sait. Je donne beaucoup d'importance à l'idée d'humilité disciplinaire, entre autres, pour favoriser l'interdisciplinarité.

Richard Béliveau

Je peux rajouter peut-être deux commentaires. Je dis toujours à mes étudiants en maîtrise, doctorat, et postdoctorat que l'apprentissage de la science, c'est l'apprentissage d'un langage. Le baccalauréat correspond à l'apprentissage du vocabulaire, la maîtrise à l'apprentissage de la grammaire et ce n'est qu'au doctorat qu'on devient écrivain, qu'on commence à écrire et c'est au niveau postdoctoral qu'on commence à savourer les joies de l'écriture. Donc, si je situe le vocabulaire au niveau du baccalauréat, le cours collégial est certainement à un niveau d'apprentissage de base. J'abonde dans le même sens que mes collègues, je pense que les connaissances de base sont fondamentales. Pour comprendre les liens entre les phénomènes, il faut d'abord connaître ces phénomènes et la complexité du monde qui nous entoure, ce qui m'amène à mon deuxième commentaire. Les jeunes sont d'une culture de fast food, de vidéoclips. La quantité de données qu'ils doivent digérer est énorme. J'ai parlé ce matin des 800 articles que je retrouve hebdomadairement en utilisant des mots clés pointus, et du travail que demande la lecture d'environ 80 articles sélectionnés sur ces 800. Je ne suis pas sûr que la formation de base que l'on donne à nos étudiants valorise, au niveau où elle devrait l'être, l'importance du travail, du travail de base constant et permanent. On a beaucoup de sprinters, mais on n'a pas de coureurs de fonds. C'est pourtant un travail qui demande une grande constance. Je vais faire une digression qui m'apparaît importante : souvent, des étudiants qui ont terminé leur baccalauréat avec des notes excellentes, arrivent à la maîtrise et abandonnent après six ou neuf mois, parce qu'ils n'ont pas été habitués à l'échec. Dans notre système d'éducation, on n'a pas habitué les étudiants à l'échec. Je donne parfois la cote « E » dans mes cours à des étudiants de 22, 23 ou 24 ans, et c'est la première fois que quelqu'un leur dit : « Tu n'as pas raison, tu as tort. Ton raisonnement est faux, tes données sont fausses. » Et on a alors un problème lorsqu'on arrive au niveau de la recherche, à habituer les



étudiants à l'échec. Et Dieu sait qu'en recherche il y a beaucoup d'échecs et que suivant l'expression consacrée « il y a de bonnes journées et de mauvaises années en recherche ». Il y a du travail à faire au niveau de la méthodologie du travail intellectuel même sur le plan des études secondaires.

Question 2 - Responsabilité des chercheurs dans la relève

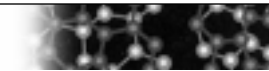
Vous avez mentionné plusieurs fois le manque de relève qui semble affecter vos secteurs ... Un des facteurs qui semble influencer les jeunes c'est le fait qu'ils ne savent pas exactement en quoi consiste le travail de la recherche. Ils n'ont aucune idée de ce que les chercheurs font. Ils ont l'impression, pour reprendre un peu les éléments que vous évoquiez plus tôt, que les chercheurs portent une chemise blanche, dans le fond de leur laboratoire, qu'ils sont seuls; ils ne voient pas les contacts que ces chercheurs peuvent avoir. Jusqu'où, comme scientifiques, voyez-vous votre responsabilité dans le recrutement de la relève. Vous dites « on manque de gens », mais est-ce que vous auriez des suggestions? Quelles sont les actions que vous pourriez faire? Par exemple, est-ce que vous accepteriez de rencontrer les jeunes?

Richard Béliveau

En recherche médicale, si je peux répondre le premier, la relève n'est pas un problème. Il y a beaucoup, beaucoup de candidats, ça se bouscule aux portes. J'ai dû refuser une quinzaine de candidats à la maîtrise cette année; il y a une liste d'attente d'à peu près 22 candidats pour les laboratoires. Les jeunes sont informés, ils lisent beaucoup, ils ont Internet, la télévision aussi où ils ont de bonnes émissions. On dénigre toujours la télévision, mais il y a de bonnes émissions d'information scientifique même sur les chaînes générales. Les gens lisent et s'informent beaucoup. Donc, il n'y a pas un problème de recrutement en biologie ou en médecine. Le problème, c'est de les garder. Je vous donne un exemple. Présentement, j'ai une étudiante qui a terminé sa maîtrise avec une note moyenne de 3,9 sur 4,3 et qui va quitter parce qu'elle n'a jamais eu de bourse. Est-ce normal pour une société de laisser sans bourse un de ses meilleurs étudiants qui a, de plus, postulé à tous les concours. Comment peut-on encourager alors des jeunes à faire carrière en recherche? C'est là que se situe le problème. Les structures de soutien à la recherche n'ont pas suivi l'évolution de la recherche dans notre secteur.

Mohamed Chaker

Il y a un problème sur le plan de la relève en technologies de l'information et des communications. Il n'y a pas assez de candidats au départ et, de plus, il y a une compétition extrême. Je pense qu'à McGill, par exemple, si je ne m'abuse, 85 % des futurs ingénieurs en génie électrique ont déjà un travail aux États-Unis. Il y a donc une très forte compétition. Les industriels, dans ce cas-là, disent qu'il faut accroître le nombre de candidats et il y a eu des actions de la part du ministère de l'Éducation. Ce que vous dites est vrai, il faudrait faire du travail auprès des jeunes pour les attirer dans le domaine scientifique. Ça se fait beaucoup aux États-Unis, dans les centres d'excellence. Le problème actuel, évidemment, c'est dans la disponibilité des



professeurs. Comme le disait mon collègue tout à l'heure il ne nous reste que le samedi soir et le dimanche pour faire de la recherche...

Bartha-Maria Knoppers

J'ajouterais qu'il faut garder un pied dans l'enseignement, même si la recherche devient de plus en plus valorisée et, deuxièmement, il est vrai qu'il y a un problème systémique. Il y a 15 ans il était plus facile d'obtenir des bourses convenables, non seulement pour étudier ici mais également pour étudier à l'étranger. On ne peut pas encourager les jeunes si on n'a pas les moyens de leur fournir de quoi vivre.

Jean-Pierre Revéret

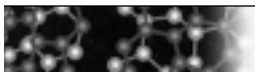
Le seul point que je voudrais rajouter sur le recrutement dans le domaine des sciences de l'environnement c'est une redéfinition assez complète ces dernières années, pas seulement à l'UQAM mais dans un bon nombre d'universités, de la notion de sciences de l'environnement qui avait été historiquement liée à la géographie, à la biologie, à la physique, aux sciences de la terre, etc., et qui, par une demande qui vient plutôt du milieu professionnel et des étudiants que par une action spontanée des gestionnaires de programmes et d'universités, s'ouvre vers les sciences humaines. En termes de recrutement, ç'a complètement modifié le portrait et il y a une très forte demande de gens avec une formation initiale en sciences sociales qui deviennent des spécialistes de l'environnement mais avec une perspective de sociologue, d'économiste, etc., sans pour autant en faire des spécialistes des disciplines dites traditionnelles de l'environnement mais qui contribuent à la mise en œuvre des solutions environnementales. C'est une des grosses modifications du portrait du recrutement. Près du tiers maintenant des candidats proviennent de disciplines non traditionnellement appelées sciences de l'environnement.

Question 3 - Perception des chercheurs par le public

J'étais au colloque sur les OGM, il y a deux jours, et je crois que tout le monde sait qu'il n'a pas attiré le public qui avait été prévu, mais toutefois, moi j'ai noté de la part de ceux qui étaient présents une grande méfiance face au chercheur et même face au chercheur qui explique son travail. J'aimerais savoir, en faisant référence à votre modèle du Dr Frankenstein, qu'est-ce que les chercheurs pourraient faire pour essayer de changer cette impression qu'a le public, et vraiment lui montrer qu'il n'est quand même pas dans de si mauvaises mains quand il se fie à la compréhension des chercheurs non seulement sur leurs recherches très très pointues mais aussi sur l'ensemble des recherches des autres?

Richard Béliveau

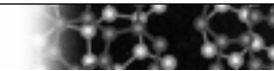
Je suis un peu embêté de répondre à cette question parce que personnellement c'est un sujet que je trouve très délicat. On a évoqué plus tôt la perception du public qui considérait les chercheurs comme de nouveaux alchimistes. Je pense qu'il y a une grande différence entre les alchimistes et les biotechnologues d'aujourd'hui. L'approche d'aujourd'hui est une



approche scientifique basée sur des contrôles de répétition, alors que les alchimistes se basaient sur la magie et sur les perceptions. Avec les OGM on se rapproche de l'alchimie. Autant suis-je enthousiaste en ce qui concerne le développement pharmaceutique, autant c'est là un sujet qui est très discuté à l'intérieur même des communautés scientifiques, à cause des impacts des organismes génétiquement modifiés (OGM) qui, à l'échelle d'un écosystème, sont extrêmement difficiles à prédire. Nous sommes très loin d'une compréhension globale des écosystèmes. Il n'y a pas un scientifique sur la planète qui peut prédire l'impact que va avoir la modification d'une protéine de la surface du cuticule d'un grain de riz sur la reproduction de tel type de papillon ou de tel coléoptère dans tel écosystème, et voilà que la cascade démarre. Je pense que la méfiance du public est très « scientifique » et qu'elle est partagée par beaucoup de scientifiques. On fait des essais cliniques avec des centaines, des milliers de patients et quand on arrive en phase 4, ces études ont porté, classiquement, sur de jeunes hommes blancs, âgés entre 35 et 45 ans, non fumeurs comme l'exige le protocole clinique... alors que dans la vraie vie, vous avez une femme enceinte, des patients asiatiques, noirs, des jeunes, des vieux, des gens qui prennent d'autres médicaments... vous avez des interactions que vous n'avez jamais vues et même si on administre un médicament très contrôlé à un patient hospitalisé où tous les paramètres sont standardisés, il arrive des événements, des interactions non prévus. Alors, quand on regarde les organismes génétiquement modifiés à l'échelle des écosystèmes, j'ai peur, comme la majorité des gens, et je pense qu'il est normal d'avoir peur parce qu'on intervient sur des paramètres que j'estime dangereux à manipuler. Je reviens à ce que je disais au départ quand j'ai cité les premiers poètes, les premiers haikus : « vous arrachez un brin d'herbe, vous ébranlez l'univers ». Il est difficile de prédire ce que l'on va faire génétiquement même si on contrôle une espèce. Ces contrôles sont d'ailleurs impossibles en laboratoire à cause de la complexité des écosystèmes réels et de l'absence de modélisation mathématique vraiment adéquate de ces écosystèmes. Comme scientifique, je partage tout à fait cette inquiétude, et s'il y a un secteur où je vois des Dr Frankenstein, c'est bien le secteur des organismes génétiquement modifiés...

...Voilà. Je veux justement dire que l'ensemble de la population scientifique a exactement les mêmes préoccupations que la société, comme vous par exemple qui êtes critique face à cette question. Je ne vois donc pas pourquoi la société se méfie des chercheurs, étant donné que parmi eux il y en a qui sont pour, d'autre qui sont contre et qu'ils représentent exactement ce qu'est la société. Qu'est-ce qu'on peut faire pour changer ça.?

Il faut tout faire, je pense. Mais la société se nourrit encore du cinéma hollywoodien. Personnellement je me suis impliqué de façon concrète en agissant à titre de consultant pour la série télévisée Urgence. Les producteurs étaient venus visiter les laboratoires à l'UQAM et quand ils ont comparé un véritable laboratoire de recherche avec le plan de développement qu'ils avaient en tête, ils se sont aperçus qu'il y avait une énorme différence, et on m'a demandé d'agir comme consultant. Le scénario de départ était un scénario classique hollywoodien avec un mauvais scientifique, machiavélique. Et mon implication dans ce dossier a pu changer, corriger certains faits. Je pense que les scientifiques doivent prendre une partie du blâme, et je pense que la plupart de mes collègues ne sont pas assez conscients du rôle qu'ils ont à jouer, de l'image publique qu'ils véhiculent. Il n'y a pas assez d'implications dans les débats publics, il n'y a pas assez de visibilité dans les médias, il n'y a pas assez de prises



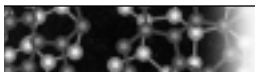
de conscience. Les images caricaturales des scientifiques les montrent gros, vieux, laids avec des lunettes. Ils ont l'air fou! C'est classique, mais ce n'est pas ça l'image de la science. Venez dans un laboratoire. La majorité des scientifiques ont moins de 35 ans. Dans la plupart des disciplines, les chercheurs sont jeunes. C'est un monde jeune, mais ce n'est pas ce que les caricaturistes véhiculent, ce n'est pas ça que les chroniqueurs véhiculent, ce n'est pas ça qui est présenté comme image. À l'origine, la description physique du rôle de chercheur dans la série Urgence, c'était un gros, avec des lunettes, bossu et qui boitait! C'était vraiment ça! Le bossu du Dr Frankenstein! C'est suite aux interventions que j'ai faites avec l'auteur, Réjean Tremblay, que le comédien Marc Messier a été recruté pour camper ce rôle, ce qui donnait une meilleure image du scientifique que l'image classique! Mais, j'ai dû mettre du temps là-dessus. J'ai passé des fins de semaine à relire des textes pour cette série. C'est un exemple qui peut sembler farfelu, mais pas si farfelu que cela, quand on considère la quantité de gens qui regardent ces images caricaturales du savant fou. Quand vous parlez avec des étudiants à la maîtrise, au doctorat ou au postdoctorat, vous découvrez des personnes conscientes et sensibles. Je pense que c'est un travail quotidien qui doit être fait par toute la communauté scientifique pour corriger l'image extrêmement négative qui est souvent donnée de la science.

Question 4 - Vulgarisation scientifique

La recherche pour la recherche, je trouve ça extrêmement intéressant. Finalement, avec la recherche on est toujours à la pointe du devenir... On peut chercher dans un domaine, mais on peut être intéressé aussi à certaines recherches dans d'autres domaines. Je vais vous donner un exemple : moi, j'ai beau travailler avec des chercheurs, je peux être intéressée aux découvertes sur la maladie d'Alzheimer parce que mes parents subissent la maladie ou pour toutes sortes d'autres raisons. Alors, je me demandais : l'apport du chercheur au niveau de la vulgarisation scientifique, est-ce que ça ne serait pas un moyen de le rapprocher de la société?

Mohamed Chaker

Oui, je pense certainement qu'on a un rôle. Et croyez-moi, je vous assure que notre travail c'est 15 heures par jour, samedi et dimanche ... Cependant, j'accepte souvent des invitations à des activités de vulgarisation parce que je pense qu'on a un rôle à jouer, parce que finalement nous sommes payés par les deniers publics, par les impôts, et nous avons aussi des comptes à rendre. Je trouve que nous avons un métier passionnant; on est payé pour rêver, pour construire, pour aller de l'avant et, en plus, on nous donne même les moyens et l'argent nécessaires pour faire avancer le rêve. Je trouve qu'on est quand même un peu chanceux, et c'est normal qu'on redonne au public une partie de ces avantages. Dans ce sens-là, je suis entièrement d'accord avec vous, je trouve qu'on devrait s'impliquer beaucoup plus au niveau de la vulgarisation, de dire en mots simples ce qu'on fait, parce que finalement ce n'est pas très compliqué et c'est accessible à tout le monde. Et non seulement les directeurs de recherche mais l'ensemble du personnel devraient s'impliquer : les étudiants, les jeunes docteurs, les postdoctorat, tout le personnel d'un laboratoire de recherche. Le rôle du chercheur comme vulgarisateur doit être valorisé plus tôt, puisqu'il est un homme public finalement, qui doit par-



ler de ce qu'il fait comme travail comme tout autre homme public. Personnellement, je trouve nécessaire d'avoir à rendre des comptes et d'expliquer ce qu'on fait avec ce que nous donne la population. Quand on ouvre des laboratoires à 500 000 \$ ou 1 000 000 \$ par année, cela représente beaucoup d'argent. Il est normal d'expliquer ce qu'on fait et comment on aide la société à travers notre travail.

Question 5 -Les finalités individuelles des chercheurs - Sélection des priorités de recherche

Première question : Ce matin, M. Poussart a présenté un défi extrêmement passionnant. Il nous a dit, ce qui a été confirmé par M. Chaker plus tôt, qu'il n'y aurait pas vraiment de limites aux découvertes scientifiques, que le vrai défi, un de ceux les plus importants va être non pas de l'ordre des moyens mais des finalités. Et donc, de votre point de vue, quelles sont les finalités des chercheurs actuellement comme individus?

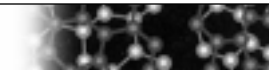
Deuxième question : Les gouvernements fédéral et provincial, animés au moins par des contraintes financières, sont en train de devenir extrêmement directifs dans leur choix des champs d'intervention en matière de recherche et développement et on les sent malgré tout démunis en termes de guides, de capacité d'analyse pour faire la sélection des champs en question. Auriez-vous des conseils à leur donner pour faire cette sélection des champs pour les prochaines années?

Bartha-Maria Knoppers

Si j'ai bien compris la première question, c'était par rapport à la finalité personnelle qu'on a comme chercheur? Quand j'étais en catéchisme, je connaissais toutes les réponses, et si on me demandait « C'est quoi l'enfer? », je savais exactement ce qu'il fallait répondre, mais je contestais tout ce qu'il fallait répéter à haute voix pour démontrer qu'on avait une capacité de mémoire : je me suis dit : « L'ennui c'est ça pour moi. » C'était ça, l'enfer. Donc, pour revenir à nos finalités personnelles de chercheur disons qu'il y a beaucoup de plaisir intellectuel. Et le plus grand plaisir, c'est d'être capable de partager cette curiosité intellectuelle. Et c'est là où l'université fait défaut, par exemple. Quand on soumet nos CV à la fin de l'année, on pourrait oublier toutes les conférences que l'on donne dans les milieux publics, dans les communautés, dans les écoles, devant les jeunes, etc., car elles ne comptent pas. Et là, on est en train de miner d'une façon systémique la passion qu'on a non seulement à découvrir mais aussi à communiquer d'une autre façon que dans un article avec 15 000 renvois en bas de page, etc. Je pense qu'on doit avoir plus de soutien et même un devoir de démontrer qu'on est allé dans la communauté parler aux gens et partager notre passion.

Jean-Pierre Revéret

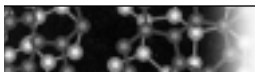
Je pense qu'il y a un côté, ça paraîtrait pas très grandiose, mais il y a un côté ludique qui est là, qui est très important. Richard Béliveau l'a mentionné ce matin, il y a un côté ludique à la recherche, et même si au-delà il y a une finalité qui a plus de sens sur le plan social, on s'ac-



croche beaucoup à régler une question qui nous mobilise pendant des années. Alors, dans un premier temps, pour ma part, je pourrais répondre que ce n'est pas l'amélioration de l'environnement en soi qui est ma finalité, mais beaucoup plus les questions d'inégalités dans le développement. L'environnement est arrivé après, comme un moyen, mais la question de l'inégalités dans l'accès au développement, l'accès à un progrès social était très forte. À un moment donné dans le courant de mes études, je me suis posé des questions liées aux logiques qu'il y avait derrière les actions qu'on posait et j'ai été confronté au problème (j'ai commencé des études en économie) d'une logique économique qui n'était pas toujours compatible avec une logique écologique, ou disons biosystémique, dans la gestion des ressources renouvelables et de l'environnement. C'est resté une des questions que j'ai essayé de décortiquer sous différentes facettes tout en essayant de contribuer à des enjeux socialement plus importants que des questions strictement méthodologiques. Mais je ne cache pas que le côté ludique, le fait de s'amuser intellectuellement avec des outils, les théories qui les sous-tendent, etc., est un luxe extraordinaire, mais en n'oubliant pas que la résolution de cette question peut contribuer, à un développement plus égal entre les groupes qui composent la planète. L'environnement n'est arrivé après, que comme une des variables à prendre en compte, mais en termes de finalités, je ne me vois pas comme un militant de la cause environnementale, par exemple, alors que c'est souvent presque attendu des gens qui sont impliqués en environnement, qu'ils aient ce comportement-là, ce qui n'est pas mon cas.

Mohamed Chaker

Je ne vous apprends rien en disant que la première finalité, c'est la passion. Dans ce métier, on ne peut pas y aller sans passion. La première chose que je dis à mes étudiants quand ils entrent dans mon bureau et qu'ils disent : « Je veux faire en doctorat », je leur réponds : « Vous savez, c'est avec les tripes qu'on entre là-dedans. » Et je pense que ce métier, on ne peut pas le faire si on n'est pas passionné, et dès qu'on devient un fonctionnaire de la recherche, malheureusement, le bois mort n'est pas loin. C'est vrai aussi qu'il y a un côté ludique. Maintenant, pour répondre à la deuxième question concernant l'aide que l'on peut apporter aux gouvernements pour faire des choix, c'est une question extrêmement difficile. Parce que finalement, comme tous les passionnés on voit un peu notre domaine comme étant extrêmement important. On est un peu en conflit d'intérêts si on veut établir des priorités. Cela dit, je crois qu'il est important d'avoir une base au niveau recherche fondamentale. Denis Poussart l'a précisé tout à l'heure, je crois que c'est important parce que cette recherche fondamentale c'est une masse de réflexions. Et il y a maintenant presque une mode, à mon avis dangereuse, où on parle de contreparties. Il n'y a plus personne qui veut payer pour quoi que ce soit, il faut qu'il y ait des contreparties. Finalement, on ne peut pas former un jeune dans un domaine où il n'y aurait pas de contreparties. Et ça devient extrêmement dangereux, ça veut dire qu'il faut orienter la recherche. Dans ce sens-là, je crois qu'il faut revenir à financer une recherche de base, et je crois qu'aux États-Unis il y a à ce sujet un retour du balancier. Il y a beaucoup de choses qui ont été trouvées par hasard. Vous ne vous rendez pas compte du nombre de choses qui ont été faites par erreur! C'est pas ça qu'on voulait faire et puis on a trouvé autre chose! Donc, il ne faut pas oublier complètement cette partie de la recherche. C'est sûr qu'on a des comptes économiques à rendre, mais surtout au niveau des applications où là, par contre, on doit avoir des priorités, de vraies priorités. C'est-à-dire qu'à l'échelle du



Québec on ne va pas faire tout ce qui se fait aux États-Unis dans tous les domaines. On n'est pas assez nombreux et on ne peut pas se permettre de se payer ça comme société. Si on veut être les meilleurs, il faut concentrer nos efforts. En d'autres termes, je dirais qu'on doit financer une recherche de base qui serait générale, mais par contre au niveau des applications, il faudrait cibler des projets au lieu de saupoudrer l'argent, pour maximiser notre impact, car la compétition est extrêmement ardue.

Question 6 - La place des sciences humaines

Vous parliez de multidisciplinarité tout à l'heure. Vous disiez qu'un tiers des étudiants en environnement viennent de disciplines des sciences humaines et que ces gens-là veulent participer aux discussions. M. Béliveau a fait référence à son équipe multidisciplinaire, mais qui était composée uniquement de scientifiques. Est-ce qu'une rencontre multidisciplinaire est possible aussi avec des sociologues, des psychologues, étant donné que vous traitez le corps humain et que le corps humain ça regarde aussi plusieurs disciplines de sciences humaines?

Richard Béliveau

Ça existe déjà à l'intérieur des équipes. On a des équipes de recherche en clinique dans lesquelles je travaille, par exemple le groupe de recherche en neuro-oncologie de l'Hôpital Sainte-Justine, où il y a dans l'équipe une psychologue, un travailleur social. C'est la même chose avec le groupe de neurooncologie à Notre-Dame. Il y a des gens qui proviennent autant du milieu des sciences sociales que de celui des sciences « dures ». Je pense que c'est la tendance à l'intérieur des organismes. C'est quelque chose qui est en train de se faire, qui n'est pas à grande échelle encore, mais qui est en train de se manifester de façon concrète. Je pense qu'il n'est pas difficile de comprendre que le cancer pédiatrique comporte évidemment une composante psychologique et sociale assez importante. J'ai des étudiants qui travaillent à Sainte-Justine qui ne peuvent pas passer sur l'étage parce que mon laboratoire est juste en-dessous de la clinique externe du pavillon de cancérologie. Ils ne peuvent pas passer à l'étage de la clinique externe parce que ça les bouleverse trop! Il y a des étudiantes diplômées qui ont des enfants et le simple fait de voir les enfants cancéreux les bouleverse. Alors, c'est évident que l'impact personnel de travailler dans un secteur comme celui-là est important, et c'est évident que ces équipes sont déjà multidisciplinaires même au plan des sciences humaines. Maintenant, comment ça va s'appliquer dans tous les autres secteurs? Je pense que c'est le futur qui va le dire.

Sophie Malavoy

Je pense qu'on va clore la journée ici. Je voudrais remercier les conférenciers. Ils ont beaucoup donné. Je vous remercie.