

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 132 (2006)
Heft: 03: Informatique bio-inspirée

Artikel: De l'informatique à la biologie: une histoire d'arbres
Autor: Mange, Daniel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99445>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

De l'informatique à la biologie : une **histoire d'arbres**

Ce texte constitue un reflet de ma leçon d'honneur, donnée à l'EPFL le 22 novembre 2005¹ et consacrée, dans sa majeure partie, à lancer un pont entre l'informatique et la biologie. Le défi de cette leçon - résumer en moins d'une heure un cours d'un semestre - a été relevé en choisissant comme fil conducteur un représentant très populaire de l'informatique et de la biologie : l'arbre.

Trois modèles essentiels de la biologie, tous trois décrits par un arbre, vont inspirer l'ingénieur informaticien : l'arbre phylogénétique (P), qui constitue l'arbre généalogique de tous les êtres vivants ou ayant vécu, nous conduit aux machines évolutives capables de s'adapter à un environnement changeant ou inconnu; l'arbre ontogénétique (O), qui résume le développement d'un individu isolé, ouvre la voie aux machines susceptibles de croître, de s'autoréparer et de s'autorépliquer; l'arbre épigénétique (E), dont l'illustration la plus classique est l'arborescence du système nerveux, suggère des machines à réseaux de neurones artificiels capables d'apprentissage. La combinaison des trois modèles P, O et E constitue bien entendu le modèle POEtique, qui ouvre la voie à la conception de machines informatiques cumulant toutes les caractéristiques des organismes vivants. L'informaticien de demain sera donc un POEté !

1^{er} acte : le crime presque parfait²

Le crime a été commis il y a quatre milliards d'années, quelque part sur la Terre. Crime énorme : l'irruption de la vie. Crime presque parfait : un auteur improbable, pas de mobile, pas de témoin. Mais des indices, innombrables, qu'une armée de détectives s'emploie sans relâche, depuis des siècles, à traquer, déchiffrer, comprendre; indices dispersés dans le temps et dans l'espace, comme ces fossiles, moulages d'espèces disparues, qui surgissent dans le sol à des

¹ Le film intégral de cette leçon peut être trouvé à l'adresse Web suivante : <<http://islwww.epfl.ch/pages/welcome/home.html>>

² Plusieurs extraits de ce texte se retrouvent dans DANIEL MANGE : « Informatique et biologie : une nouvelle épopée », Lausanne, Éditions Favre, 2005

profondeurs trahissant leur âge. Et, surtout, toutes les espèces vivantes qui sont des témoins indirects, toutes reliées à un monumental arbre généalogique, l'arbre phylogénétique (fig. 1), dont le tronc nous ramène à cet événement sans précédent : l'irruption de la vie, il y a quatre milliards d'années, l'apparition d'un insignifiant unicellulaire, notre unique ancêtre commun.

Par quel prodige, à partir de cet ancêtre, la Nature a-t-elle pu engendrer une si riche palette d'espèces et d'individus? Les détectives s'accordent sur le mécanisme général, même s'ils divergent sur les détails: la Nature joue aux dés, elle brasse sans fin les mots et les phrases du langage chromosomique. Deux loteries sont mises en œuvre pour créer la nouveauté biologique: la plus populaire est la reproduction qui, grâce aux joies du sexe et aux lois de la génétique, mélange les gènes de deux individus pour en créer un troisième. La mutation est moins spectaculaire, puisqu'elle pimente le texte original de quelques erreurs typographiques; le plus souvent sans conséquence, elle est parfois source d'une percée géniale: un mutant, une nouvelle espèce. A chaque coup de dé de Madame Nature surgit un nouvel

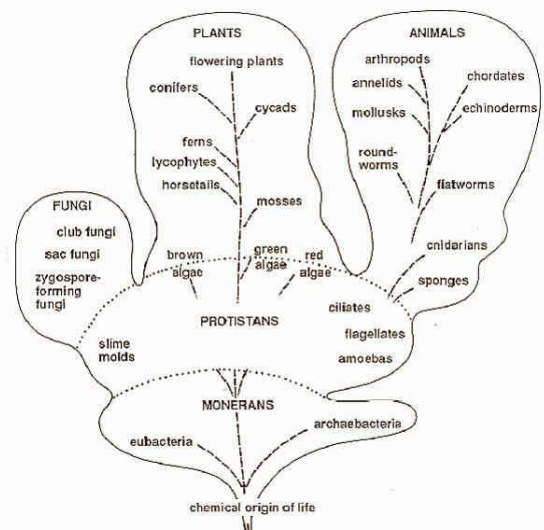
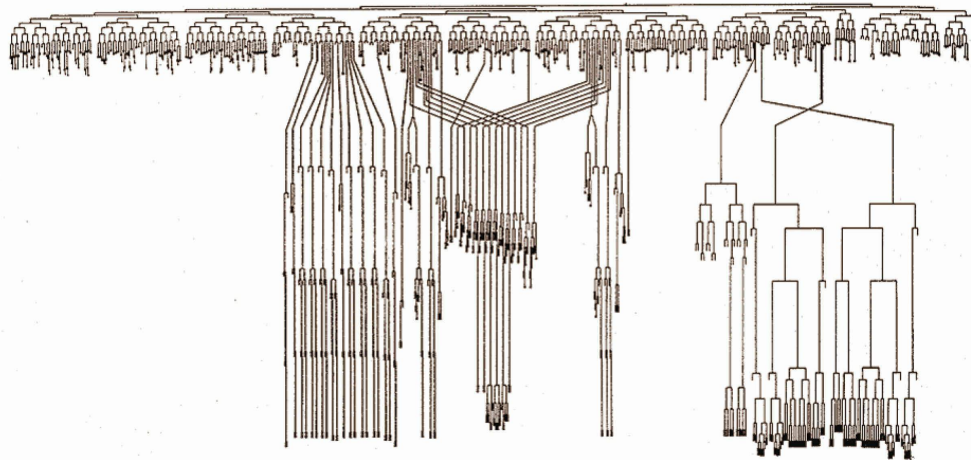


Fig. 1 : Un aperçu de l'arbre phylogénétique des espèces vivantes (Document <www.agen.ufl.edu>)

Fig. 2 : L'arbre ontogénétique du nématode *C.elegans* (Document Sinauer)

Fig. 3 : L'arbre épigénétique, une arborescence de neurones



2

individu ou une nouvelle espèce; mais, conformément à Monsieur Darwin, il n'y a pas d'égalité des chances dans l'univers de la biologie puisque seules subsistent les combinaisons gagnantes, celles qui produisent les individus les plus adéquats: c'est la sélection naturelle.

Pour l'ingénieur, c'est d'abord l'incrédulité: la création naît du hasard, et non d'un plan minutieusement concocté; il suffit de brasser les cartes du jeu de la vie pour produire la nouveauté, puis la complexité. C'est ensuite une opportunité: en copiant grossièrement les mécanismes du développement des espèces, la phylogenèse, l'ingénieur ouvre un premier front sur le nouveau chantier de la bio-inspiration; les algorithmes évolutionnistes, la programmation génétique et leurs multiples variantes constituent aujourd'hui déjà de puissants outils d'optimisation.

2^e acte : le rassurant destin de *C.elegans*

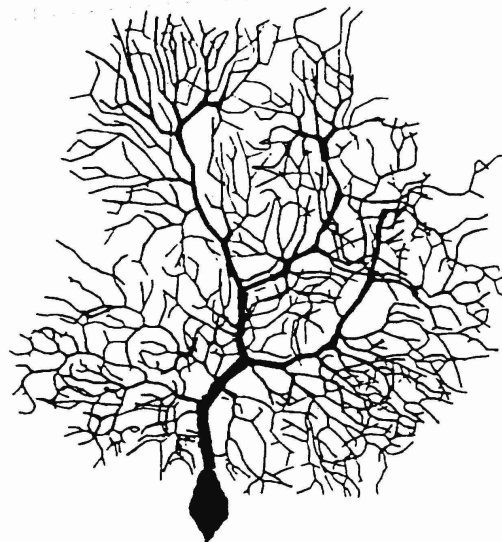
Cænorhabditis elegans, un représentant des nématodes, est une star de la biologie; drapé dans son enveloppe transparente, il ne cache rien de son anatomie. A partir de la conjugaison du spermatozoïde paternel et de l'ovule maternel, l'unique cellule initiale, le zygote, se divise en deux, puis en quatre, huit, seize, et ainsi de suite: le développement de *C.elegans*, comme celui de tout être vivant, peut être décrit par l'arbre ontogénétique (fig. 2), dont chaque branche représente une cellule somatique de l'organisme mature.

Pour l'informaticien, c'est d'abord la stupéfaction: un spécimen de *C.elegans* en bonne santé comporte exactement 959 cellules somatiques; de plus, chacune d'elles va jouer un rôle parfaitement spécifique (cellule nerveuse, du larynx, de l'intestin, etc.) selon sa position dans l'arbre ontogénétique: le développement embryonnaire, réalisé par le double mécanisme de la division et de la différenciation cellulaires, est globalement déterministe, pour autant qu'un nombre minimal de conditions-cadres soient respectées (tempé-

rature adéquate, nourriture suffisante, etc.). Mais l'information cruciale pour l'ontogenèse est interne à l'organisme, et repose dans son génome: le développement ontogénétique est essentiellement autonome, et deux jumeaux vrais seront toujours morphologiquement indiscernables.

Pour l'informaticien, c'est alors la révélation: les ribosomes, baignant dans la cellule, consacrent l'essentiel de leur temps à décoder le programme génétique - l'ARN messager - selon le même processus que celui qui, tapi dans les puces de silicium, gouverne la marche de l'ordinateur. L'attrait du vivant est irrésistible; pourquoi ne pas copier la logique carbonique des organismes vivants pour l'insérer dans la logique au silicium des machines artificielles? Le défi est aujourd'hui relevé: le projet *Embryonique* (pour embryologie électronique) [1, 2]³ vise le développement de nouveaux

³ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article



3

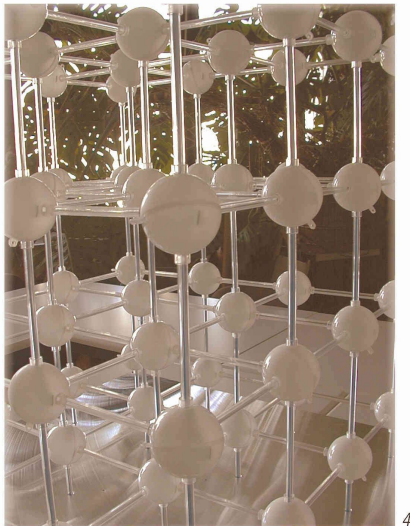
Fig. 4 : Le BioCube, prototype préfigurant le nano-ordinateur

Fig. 5 : Le modèle POE : Phylogénèse-Ontogénèse-Epigenèse

Fig. 6 : L'arbre de vie, une combinaison des arbres phylogénétique, ontogénétique et épigénétique

Le BioCube, version spatiale du BioWall

L'informatique du XXI^e siècle recourra à des ordinateurs bâtis sur un assemblage d'atomes ou de molécules édifié à l'aide des outils des nanotechnologies, à l'échelle du milliardième de mètre. Le prototype *BioCube* développé à l'EPFL incarne une telle machine, grossie un milliard de fois et organisée comme un cube comportant $4 \times 4 \times 4 = 64$ nœuds. Chaque nœud comporte un processeur, réalisé à l'aide des plus récents circuits logiques programmables FPGA (*Field Programmable Gate Array*), et le *BioCube* complet préfigure un nano-ordinateur à trois dimensions où chaque nœud sera un assemblage d'atomes, une molécule.



4

Réduit aux dimensions microscopiques d'un réseau de molécules, le nano-ordinateur sera caractérisé par des propriétés propres aux organismes vivants : il sera autoréparable. D'une extrême robustesse, il se répandra là où doit régner la fiabilité. Aux confins de l'espace, il sera l'outil indispensable aux sondes automatiques ; sur terre, il permettra la conception de dispositifs parfaits même si leurs composants, à l'échelle atomique, sont momentanément ou durablement imparfaits.

Le prototype *BioCube* réalisé aujourd'hui est un cube de 64 sphères électroniques transparentes. Chacune est en contact direct avec ses six voisines immédiates, et calcule son état futur en fonction des états présents de celles-ci. La structure complètement homogène le prédispose en premier lieu à l'implantation d'automates cellulaires tridimensionnels ; parmi les premières applications, le *BioCube* réalisera une version spatiale du « Jeu de la vie » (voir <<http://lslwww.epfl.ch/biowall>>), ainsi que des variantes de cubes capables de s'autorépliquer. Ces dernières doivent ouvrir la voie à la réalisation d'organismes artificiels à trois dimensions, bio-inspirés et capables de croître - par division et différenciation cellulaires -, de s'autoréparer et de s'autorépliquer.

circuits intégrés digitaux, organisés en une structure multicellulaire et mettant en œuvre les deux mécanismes de la division et de la différenciation cellulaires. La redondance massive d'une telle architecture, avec la présence d'une copie du génome dans chaque cellule, lui confère deux propriétés tout à fait originales, réservées jusqu'alors aux seuls organismes vivants :

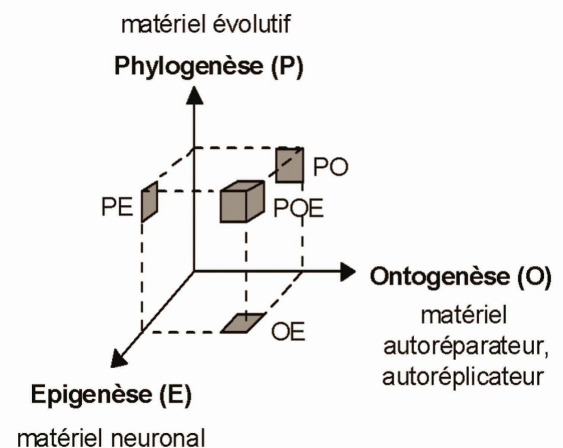
- l'autoréparation, analogue à une cicatrisation, qui permet en cas de défaillance locale, de détecter l'erreur et de la réparer automatiquement ;
- l'autoréplication, analogue au clonage, qui conduit, en cas de défaillance majeure, à produire une ou plusieurs copies de l'original.

3^e acte : inné ou acquis ?

Dans la foulée de l'explosion embryonnaire, une troisième structure démarre, incarnée par la ramification des cellules nerveuses, nos neurones : c'est l'épigenèse, elle aussi représentée par un arbre, l'arbre épigénétique (fig. 3) [3]. Grâce à lui, nous sommes libérés de la fatalité génétique : notre système nerveux (comme notre système immunitaire), grossièrement forgé par l'information génétique, va être finement ciselé par les myriades d'interactions de notre organisme avec le monde extérieur : la mère nourricière, la famille, l'école, la société.

Le cerveau humain, stupéfiant de robustesse et de plasticité, est l'objet de toutes les attentions. Mais, malgré les innombrables percées scientifiques, depuis l'analyse moléculaire des neurotransmetteurs jusqu'aux théories comportementales, les vraies questions restent sans réponse : comment s'élabore le scénario de nos rêves ? Qu'est-ce que la conscience ? L'âme est-elle immortelle ?

⁴ Voir *TRACÉS* n°18/2002, ANDRÉ STAUFFER, DANIEL MANGE, GIANLUCA TEMPESTI ET CHRISTOF TEUSCHER : « Sur le BioWall, l'embryonique se décline de façon ludique », pp. 26 à 33



Pour l'informaticien, les choses semblent être claires : l'inné, c'est une mémoire morte, le livre écrit par nos deux parents ; l'acquis, c'est une mémoire vive, le tableau noir qui se remplit et s'efface tout au long de notre apprentissage, donc de notre vie. Depuis Freud, nous savons qu'une partie du tableau est cachée, c'est l'inconscient, et qu'il faut ruser pour y accéder. Grâce à Piaget, nous observons que l'intelligence se construit par strates successives, selon un immuable enchaînement.

Ce prodigieux organe de carbone, peu doué pour le calcul, est imbattable pour son intuition, sa capacité de distinguer les formes, d'éprouver des émotions, de créer un poème ou une sonate, de rêver et, surtout, de s'observer.

Copier le cerveau est la tentation extrême des informaticiens ; depuis Turing, dans les années 50, les ingénieurs s'efforcent d'imiter la Nature en construisant, grâce à l'électronique et l'informatique, des réseaux de neurones artificiels. Les résultats encore modestes de ces artefacts sont certainement dus aux dimensions très réduites de ces machines, face aux quelque cent milliards de neurones de notre cerveau.

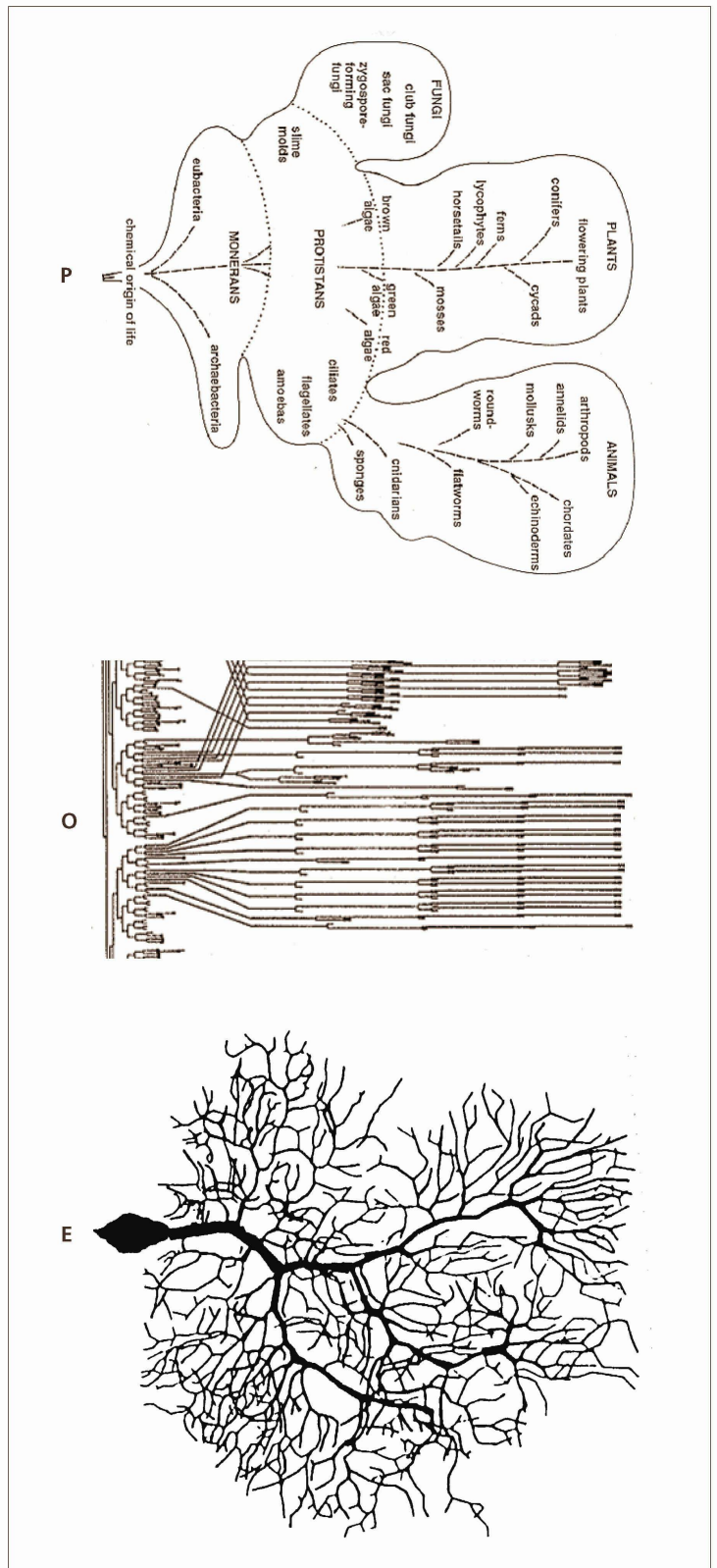
Rien, ni personne, n'interdit la construction d'un cerveau artificiel extrêmement complexe ; il n'est alors pas exclu de nous découvrir un jour, à l'issue de ces travaux, une descendance artificielle et intelligente. Ces machines, comme nous, auront un inné et un acquis. Elevées par nous, elles se comporteront à notre image.

Vers l'écllosion du modèle POEtique

Pour l'ingénieur informaticien, la bio-inspiration peut donc se décliner selon trois grands axes : l'évolution des espèces (Phylogénèse), la croissance de l'individu (Ontogénèse) et le développement, dans cet individu, des systèmes à apprentissage (Epigénèse) : c'est le modèle POE (fig. 5) [4].

Ce modèle constitue le nouveau défi des ingénieurs, car il révolutionne les procédés et dispositifs actuels en suggérant la construction d'artefacts, les machines POEtiques, capables de mimer la vie et de jouir de propriétés nouvelles, réservées jusqu'alors aux seuls êtres carboniques : la capacité d'évoluer, de croître, de s'autoréparer, de s'autorépliquer et d'apprendre.

Même si nos machines POEtiques, incarnées aujourd'hui dans un mur de silicium, le *BioWall*⁴, ou dans la structure cristalline du *BioCube* (voir encadré), sont dépourvues de mobilité, elles constituent une alternative intéressante aux très populaires robots. On pourrait les assimiler à des plantes artificielles, ou arteplantes, douées de tous les attributs normalement réservés aux animaux, en particulier la capacité d'apprendre. Selon le conseil éclairé de Voltaire, nous allons maintenant cultiver nos arteplantes.





L'arbre de vie

Une expérience par la pensée nous permet de raccorder l'arbre épigénétique à l'arbre ontogénétique dont il découle, puis l'arbre ontogénétique à l'arbre phylogénétique dont il détaille un individu. En généralisant ce processus, on constate que tout neurone de n'importe quel être vivant est relié, virtuellement au moins, à tout neurone de n'importe quel autre être vivant. L'un des résultats majeurs de la théorie de l'évolution est l'unicité de la vie carbonique telle qu'elle existe sur cette Terre ; cette unicité se traduit par l'existence d'un seul arbre phylogénétique, ramifié en une myriade d'arbres ontogénétiques, puis épigénétiques, l'arbre de vie (fig. 6).

L'arbre de vie n'est pas seulement une source d'inspiration pour l'ingénieur, mais également pour le peintre : Gustav Klimt (fig. 7), Séverine Pineaux, Marc Chagall l'ont déjà immortalisé. Mais c'est dans la Chapelle des Cordeliers, à Sarrebourg, que l'on découvre le plus monumental arbre de vie : ce vitrail, dû à Marc Chagall encore, mesure douze mètres de haut et se compose de 13 000 morceaux de verre. Ce prestigieux assemblage nous ramène à la parenté étroite entre l'ingénieur et l'artiste : ce sont tous deux des créateurs, des constructeurs, des assembleurs. Si l'ingénieur assemble des poutres, des briques, des transistors ou des instructions, le peintre assemble les morceaux de son vitrail, le compositeur les notes de sa portée, le poète les mots de son texte. Ramuz, dans *Passage du poète*, dit de l'un des personnages du livre : « Besson continue à faire ses paniers, [...] mettant les lignes de l'osier l'une sur l'autre, comme l'écrivain ses vers ou sa prose » [5]. Ingénieurs et artistes recherchent ce qui est beau, l'esthétique au sens le plus large : l'élégance d'une équation ou d'un programme peut se comparer à l'équilibre d'une œuvre picturale, à la plénitude d'une sonate ou à la magie d'un texte.

Ramuz, encore, déclarait dans un discours public, à l'issue de la remise du Prix Schiller, en 1936 [6] : « Nous sommes un petit pays par l'étendue, nous ne pouvons prétendre à une extension de nous-mêmes que sur le plan spirituel. Et c'est bien sur ce plan que travaillent entre autres le peintre, le sculpteur, le musicien, l'écrivain lui-même, cherchant tous à laisser d'eux dans la représentation qu'ils se font du monde quelque chose qui les dépasse en hauteur et leur survive dans le temps. » Avec « entre autres », Ramuz sous-entendait bien sûr le scientifique, l'ingénieur, l'architecte.

Il existe, au centre de l'Europe, un lieu singulier, un espace privilégié par l'histoire, réputé pour la beauté de ses paysages, l'aménité de ses habitants et l'agrément de son climat. Fiancé avec sa voisine, la République de Genève, Vaud est l'un des sommets de l'Arc lémanique dont la production

Fig. 7 : L'arbre de vie selon Gustav Klimt (Document MAK/Georg Mayer, 2006)
(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)

scientifique, par tête d'habitant, est en deuxième position européenne juste après le dipôle Cambridge-Oxford. La conjonction de l'universel, la Science, et du singulier, le Pays de Vaud, fera, et fait déjà, de cet espace un haut lieu de la recherche et de la connaissance.

Une seule ombre plane sur cette vision ; la compétition à outrance, le culte, non pas de l'excellence, mais du « ranking » - le classement des universités -, peut dénaturer nos institutions et en faire des regroupements hétéroclites de « prima donna », débauchées à travers la planète par des chasseurs de grosses têtes. On aboutit, selon l'expression d'Olivier Delacrétaz, à l'université hors sol. « L'excellence coupée d'un enracinement territorial et d'un cadre communautaire, c'est la mort de l'université. » [7]

Mais, à l'opposé de cette vision pessimiste, j'ai pu vivre ma carrière à l'EPFL dans un entourage exceptionnel. Pendant plus de 36 ans, j'ai eu le privilège de rencontrer, de côtoyer et de collaborer avec un très grand nombre d'amis et amies, d'étudiants et étudiantes, de collaborateurs et

collaboratrices, de collègues. Tous m'ont enrichi, et je tiens à leur exprimer ma très chaleureuse reconnaissance : je leur dédie le présent article.

Daniel Mange, ing. électricien dipl. EPF
Prof. honoraire EPFL
EPFL-IC, Station 14, CH - 1015 Lausanne

Bibliographie

- [1] D. MANGE, M. SIPPER, A. STAUFFER, G. TEMPESTI : « Toward Robust Integrated Circuits: The Embryonics Approach », *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No 4, April 2000, pp. 516-541
- [2] M. SIPPER, J. A. REGGIA : « Go Forth and Replicate », *Scientific American*, Vol. 265, No 2, August 2001, pp. 34-43
- [3] A. DANCHIN : « Stabilisation fonctionnelle et épigénèse : une approche biologique de la genèse de l'identité individuelle », in J.-M. Benoist : « L'identité », Ed., Paris, Grasset, 1977, pp. 185-221
- [4] M. SIPPER, E. SANCHEZ, D. MANGE, M. TOMASSINI, A. PÉREZ-URIBE, A. STAUFFER : « A Phylogenetic, Ontogenetic, and Epigenetic View of Bio-Inspired Hardware Systems », *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 1, No 1, April 1997, pp. 83-97
- [5] C. F. RAMUZ : « Passage du poète », in C. F. RAMUZ : « Romans II », Paris, Gallimard, 2005, p.280
- [6] B. PIDOUX : « Ramuz en 1936, honneurs et rancœurs », *L'Hebdo*, 27 juillet 1995, pp. 58-59
- [7] O. Delacrétaz : « Le piège de l'excellence », *La Nation*, No 1736, 9 juillet 2004, p. 1

**Il existe plusieurs manières de faire avancer ses affaires.
Voici l'une des plus économiques.**

Super leasing à 3,9%*

Opel. Des idées fraîches pour de meilleures voitures.

Les véhicules utilitaires Opel proposent pour tous les problèmes de transport une solution sur mesure, personnalisée et, surtout, très économique.
Les Vivaro et Movano bénéficient en outre de l'ensemble de prestations «all-in», une exclusivité Opel. Et sont, suivant la motorisation, disponibles sur demande avec la nouvelle boîte automatisée MTA Tecshift. Faites de bonnes affaires. **Infoline 0848 810 820.**

all-in 3 ans ou 100 000 km
service gratuit** et
réparations gratuites.
*sauf huile moteur

Leasing Opel **Garantie de mobilité Opel** **www.opel.ch**

*Exemple: Opel Combo Van 66 kW/90 ch, 1364 cm³, 3 portes, prix catalogue Fr. 15'500.- (excl. 7,6% TVA), mensualités de leasing Fr. 202.55/mois (incl. 7,6% TVA), taux annuel effectif 3,97%, durée 36 mois, 10 000 km/an, acompte Fr. 3'335.60 (incl. 7,6% TVA), casco complète obligatoire non comprise. GMAC Suisse SA ne signe pas de contrats de leasing avec les consommateurs qui pourraient se retrouver en situation de surendettement. L'offre de leasing à 3,9% est valable jusqu'au 30 juin 2006 pour tous les véhicules Opel.