

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 97 (1979)  
**Heft:** 50: SIA-Heft 6

**Artikel:** Evolution ou révolution du hardware  
**Autor:** Dysli, Michel  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-85594>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 04.04.2026

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

a débuté avec deux activités:

- Le recensement des programmes disponibles sur le marché suisse et la publication de leurs caractéristiques.
- La modification des calculs d'honoraires pour tenir compte de l'utilisation des ordinateurs.

Il est nécessaire que ces activités se diversifient et s'intensifient si les professions techniques veulent faire entendre leur voix auprès des fabricants de matériels et de programmes, et éviter à cha-

cun d'investir des efforts souvent disproportionnés par rapport aux résultats à atteindre.

### Conclusion

«L'informatique est trop sérieuse pour être traitée par des informaticiens.» Cette célèbre boutade donne un des éléments du problème. Il faut cependant l'équilibrer en admettant que l'amateur

risme, même éclairé, n'est plus suffisant pour utiliser rationnellement les moyens actuels de l'informatique, et surtout pour se préparer à utiliser ceux qui seront proposés au cours de ces prochaines années.

Adresse des Verfassers: J. Vaisy, ing. EPFZ/SIA, Président de la Commission SIA de l'Informatique, p.a. c/o Société générale pour l'industrie, 71, av. Louis-Casaï, 1216 Cointrin (Genève).

## Evolution ou révolution du hardware

par Michel Dysli, Lausanne

Ces deux dernières décennies ont vu un développement révolutionnaire et l'effondrement des coûts du hardware associé au calcul sur ordinateur. En l'espace de quelque quinze ans, le coût d'un calcul sur ordinateur, sans tenir compte des frais inhérent au logiciel, a été réduit d'un facteur d'environ mille et la vitesse de calcul a crû dans une même proportion. Qui plus est, cette évolution ne paraît pas devoir aujourd'hui se ralentir. Parallèlement à ce développement foudroyant du hardware, le logiciel d'application du domaine de l'ingénierie s'est développé relativement très lentement et son coût n'a pratiquement pas varié. Pendant la prochaine décennie, ces deux tendances contradictoires vont s'affronter de plus en plus et leur harmonisation va demander de gros efforts de la part des écoles d'ingénieurs et des sociétés professionnelles.

Die beiden letzten Jahrzehnte brachten eine revolutionäre Entwicklung und den Zusammenbruch der Hardwarekosten verbunden mit Computerberechnungen. Innerhalb von ungefähr fünfzehn Jahren haben sich diese Berechnungspreise um einen Faktor von etwa tausend verringert, dies ohne Berücksichtigung der Softwarekosten; gleichzeitig ist die Berechnungsgeschwindigkeit in demselben Ausmass angestiegen. Zudem scheint sich diese Entwicklung in nächster Zeit nicht zu verlangsamen. Parallel zu der blitzartigen Entwicklung der Hardware verlief die der Software auf dem Gebiet des Ingenieurwesens verhältnismässig langsam, und die Kosten haben sich praktisch nicht verändert. Im nächsten Jahrzehnt werden sich diese beiden gegensätzlichen Tendenzen mehr und mehr bestätigen, und ihre Harmonisierung wird grosse Bemühungen von Seiten der technischen Hochschulen sowie den entsprechenden Fachgesellschaften erfordern.

The last twenty years have seen an absolutely astonishing development as well as a total collapse of costs of hardware necessary for computer calculations. Neglecting the expenditure of software, computer calculation costs have, during the last fifteen years, been reduced by about a thousand times. The speed of calculations has grown similarly. Moreover, this tendency does not, at present, seem to slow down. In contrast to this dramatic development of hardware, the engineering software has evolved rather slowly and its cost has remained more or less unchanged. In the next ten years, the confrontation of these two tendencies will increase even more requiring universities and professional associations to make great efforts to bring these two trends together.

### Evolution depuis les années 60

En Suisse, dans le domaine de l'ingénierie, l'ordinateur fut pour la première fois utilisé vers 1957, mais c'est seulement vers le milieu des années 1960 que son usage s'est un peu généralisé et que plusieurs bureaux d'ingénieurs et d'entreprises ont acquis leur propre ordinateur.

A cette époque, un ordinateur IBM 1130, qui fut acquis par plusieurs bureaux d'ingénieurs suisses, d'une capacité de mémoire centrale de 16 Ko (kilooctet, 1 octet = 8 bits = 1 caractère), possédant une mémoire de masse à accès direct (disque) contenant 1 Mo, 1 lecteur-perforateur de cartes et une im-

primante d'une vitesse de 100 lignes/minute, coûtait environ SFr(79) 500 000.- (franc suisse en 1979; tous les prix donnés dans cet article sont actualisés à 1979 sur la base de l'indice suisse des prix à la consommation). Un octet de la mémoire de l'ordinateur coûtait environ SFr(79) 5.- et cinq octets occupaient 1 cm<sup>2</sup> sur une plaque de la mémoire centrale. Enfin, l'exécution d'un million d'instructions en virgule flottante prenait 900 secondes (1100 FLOPS = Floating point operations/sec).

En admettant un amortissement de cet ordinateur sur 48 mois, son utilisation pendant 200 heures par mois et un coût de sa maintenance et de son logiciel de base de SFr(79) 2500.- par mois, l'exé-

cution de ce million d'instructions en virgule flottante coûtait quelque SFr(79) 20.-.

Un jeune ingénieur, fraîchement diplômé d'une de nos deux écoles polytechniques, recevait, à cette époque, un salaire annuel brut d'environ SFr(79) 30 000.-.

Cet ingénieur, s'il désirait utiliser cet ordinateur avec un programme existant, devait préparer un bordereau de données, le faire perforer sur cartes et le remettre à l'opérateur; il recevait le résultat de son calcul quelques heures ou un jour après sous forme d'une liste de chiffres ou, déjà, d'un dessin établi par un traceur de courbe vectoriel. Le processeur et la mémoire de l'ordinateur n'acceptaient qu'un programme et ses données à la fois; la technique de segmentation des programmes entre la mémoire centrale et la mémoire de masse à accès direct existait déjà, ce qui permettait l'exécution de programmes demandant une mémoire importante, mais cependant au prix d'un temps de calcul considérable. La résolution d'un système de 500 équations linéaires prenait, par exemple, plusieurs heures sur l'ordinateur cité en exemple.

L'élaboration d'un programme de calcul sur cette machine se faisait déjà au moyen d'un langage évolué proche du langage de l'ingénieur, tel le FORTRAN, et le coût d'une instruction de ce programme s'élevait à environ SFr(79) 25.-. Ce coût comprend toutes les phases de l'élaboration, des tests et de la documentation du programme.

A cette époque, les travaux de construction de l'aménagement hydroélectrique de la Grande Dixence s'achevaient. Le barrage de cet aménagement avait nécessité la mise en œuvre de 6 millions de mètres cubes de béton et un investissement de quelque un milliard de Sfr(79). Il avait fallu, en outre, 10 ans pour achever sa construction.

Aujourd'hui, soit en 1979, la somme qu'il avait fallu pour acquérir l'ordinateur IBM 1130, soit SFr(79) 500 000.-, permet l'achat, par exemple, d'un ordinateur ayant une capacité de la mémoire centrale de 2000 Ko, des mémoires de masse à accès direct de 350 Mo, une unité de bande magnétique, une imprimante de 600 lignes par minute, un lec-

teur de cartes et des interfaces pour une vingtaine de terminaux (Fig. 1). Un octet de mémoire centrale coûte maintenant SFr(79) 0,025 et sur 1 cm<sup>2</sup> d'une plaque de mémoire, on peut placer 2200 de ces octets (IBM, série 43 X1). L'exécution d'un million d'instructions en virgule flottante prend environ une seconde (1 000 000 FLOPS). Cet ordinateur occupe en outre approximativement le même volume que l'ordinateur IBM 1130.

Calculé sur les mêmes bases, le coût de l'exécution de ce million d'instructions en virgule flottante s'élève aujourd'hui à SFr(79) 0,02.

Le jeune ingénieur fraîchement émoulu d'une école polytechnique reçoit maintenant un salaire annuel de SFr(79) 40 000.-. Il utilise l'ordinateur cité en exemple au moyen d'une console graphique en mode interactif, autrement dit, il frappe sur un clavier les données à la demande de l'ordinateur et reçoit ses résultats quelques secondes après sous forme d'un graphique ou d'une liste de chiffres et commentaires. Plusieurs programmes sont traités en même temps par l'ordinateur et le programmeur n'a plus à soucier de la dimension de la mémoire centrale de l'ordinateur qui est virtuelle.

Les techniques de programmation ont elles peu évolué; le mode de travail interactif et la très grande vitesse de calcul des ordinateurs d'aujourd'hui ont cependant amélioré le rendement des travaux d'élaboration des programmes de calcul. En considérant la légère augmentation réelle des salaires, on peut admettre sans trop se tromper que le prix de revient d'une instruction FORTRAN d'un programme de calcul technique est toujours de quelque SFr(79) 25.-.

Dans cet intervalle d'environ 15 ans, le coût du calcul sur un ordinateur, sans tenir compte des frais inhérents au logiciel, a été réduit d'un facteur de 1000 et celui du stockage en mémoire centrale d'un facteur de 400. La figure 2 illustre cette évolution foudroyante, elle montre la relation qui existe entre la vitesse et le coût des ordinateurs en 1979, soit aujourd'hui et en 1965. Par contre, et cela est très important, le coût de l'élaboration du logiciel n'a pratiquement pas diminué.

Si la technologie des matériaux et les techniques de construction du génie civil avaient évolué de la même manière, nous pourrions construire aujourd'hui en quatre jours (comparaison avec les vitesses de calcul) un barrage - coque de 285 mètres de hauteur et de 750 mètres de couronnement qui aurait 15 cm d'épaisseur moyenne (comparaison avec les densités de mémoire centrale) et dont le coût s'élèverait à quelque un million de SFr(79) (comparaison avec le coût de calcul).

Cette comparaison n'a, bien entendu,

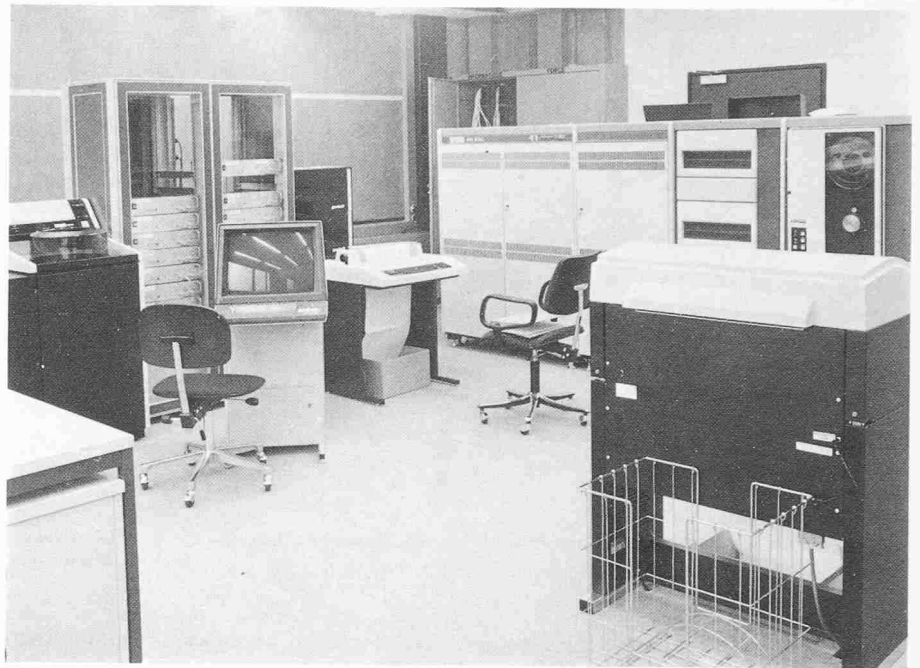


Fig. 1. Un ordinateur récent coûtant environ SFr (79) 500 000.- (VAX11-780)

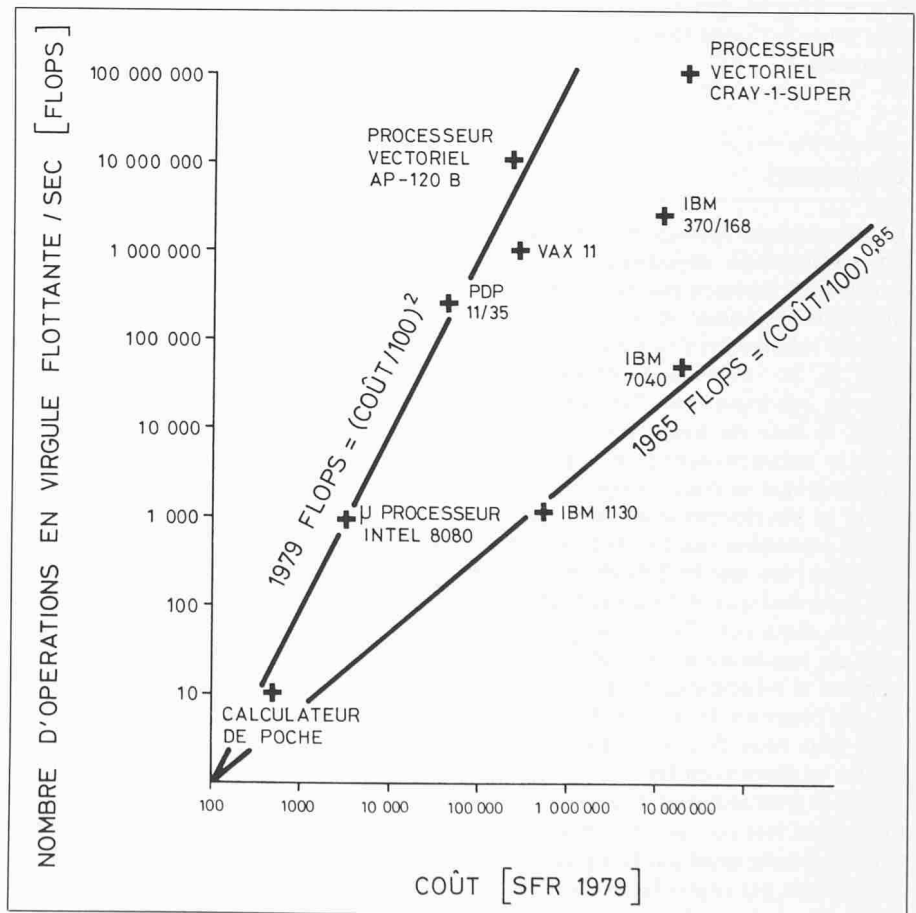


Fig. 2. Evolution du coût des ordinateurs en fonction de leur vitesse de calcul

rien de scientifique, car les lois de la nature fixent des limites qui ne peuvent être dépassées. Celle de la technologie des composants électroniques est encore lointaine alors que celle de la technologie des matériaux de construction du génie civil est presque atteinte.

Nous sommes en train de vivre une révolution dans le domaine du hardware associé au calcul sur ordinateur. Cependant, ce développement révolutionnaire

du hardware est profondément tempéré, dans le domaine de l'ingénierie, par l'introduction relativement lente de l'informatique dans les bureaux d'ingénieurs et les entreprises du bâtiment et du génie civil, et le développement pas très rapide du logiciel d'application. Il est, par exemple, frappant de constater que de nombreux programmes délivrent encore aujourd'hui leurs résultats sous forme de liste de caractères et de



Fig. 3. Ordinateur de table avec traceur de courbes et tablette de digitalisation (HP 9845)

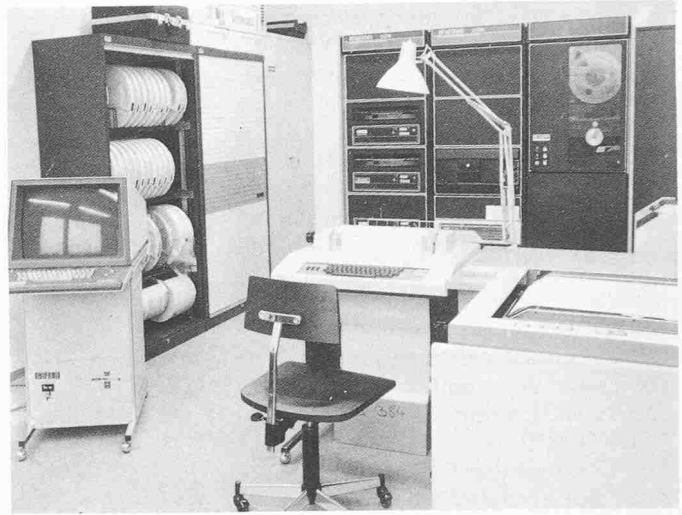


Fig. 4. Mini-ordinateur universel (PDP11-34) avec, entre autres, une imprimante/traceur de courbes électrostatique et un écran graphique

chiffres, alors que le langage graphique est le mode de transfert de l'information le plus utilisé par l'ingénieur et que le matériel nécessaire à la représentation graphique des résultats existe depuis plus de 15 ans (traceur de courbes vectoriel).

### Etat actuel

L'informatique appliquée à l'ingénierie est caractérisée aujourd'hui par un hardware extrêmement performant et diversifié et toujours moins chers, et un logiciel relativement toujours plus coûteux. Si, au milieu des années 60, on pouvait admettre que, dans un service EDP, le coût du hardware (amortissement et maintenance) était approximativement égal au coût du logiciel (acquisition et développement), aujourd'hui, il faut considérer que ce hardware ne représente plus que le 20% du coût total de l'informatique et cette proportion va encore diminuer. Ce rapport entre le coût du hardware et le coût total d'un système d'informatique est cependant un peu fonction de la taille de l'installation: plus cette dernière est importante et plus ce rapport est faible.

Le choix d'un matériel informatique devrait donc être aujourd'hui et à l'avenir surtout conditionné par le logiciel.

Analysons, par exemple, le cas d'un bureau d'ingénieurs de moyenne importance (une vingtaine de collaborateurs) qui veut s'équiper d'une installation propre. Trois possibilités se présentent à lui. Il peut tout d'abord acquérir une installation du type de celle illustrée par la figure 3 (HP 9845) qui lui coûtera le salaire annuel d'un ingénieur confirmé. Cette installation comprend, par exemple, un petit ordinateur de table ayant une mémoire centrale RAM (Random Access Memory) de 56 Ko, quelques mémoires ROM (Read Only Memory) spécialisées, un clavier, un

écran graphique, une imprimante thermique pouvant copier le contenu de l'écran sur papier, deux cassettes magnétiques contenant chacune 217 Ko, un interface de communication permettant l'usage de ce petit ordinateur comme console d'un ordinateur de grande puissance, par l'intermédiaire d'une ligne téléphonique, et deux périphériques graphiques, soit un traceur de courbes et une tablette de digitalisation. Avec cette machine, il pourra développer de petits programmes, les utiliser et aussi accéder à un ordinateur plus puissant.

La deuxième alternative est un *mini-ordinateur universel*, par exemple un PDP11-34 de Digital Equipment Corporation, un NOVA 4 de Data General Corporation, un HP-1000F de Hewlett-Packard ou un PRIME 300. Il aura, par exemple, une mémoire centrale d'une capacité de 256 Ko, deux disques amovibles pouvant contenir au total 10 Mo, une console graphique, une imprimante électrostatique permettant la sortie de dessins comme de listes et un interface de communication pour une liaison par ligne téléphonique avec un ordinateur de grande puissance. Ce système lui coûtera environ deux salaires annuels d'un ingénieur confirmé, et est illustré par la figure 4.

La troisième possibilité est un *terminal graphique sans grande intelligence* liée par une ligne téléphonique à un ordinateur de grande puissance; à ce terminal pourront être connectés différents périphériques tels qu'un traceur de courbes et une tablette de digitalisation. Cette dernière configuration hardware est presque la même que la première, elle s'en différencie par l'absence d'un processeur et de mémoire dignes de ce nom. Son coût sera inférieure à celui de cette première solution.

Nous n'avons, jusqu'à présent, que décrit trois configurations hardware. Qu'en est-il de leur logiciel? Le *logiciel de base* de l'ordinateur de table illustré sur la figure 3 comprend un système

d'exploitation avec des commandes très simples introduites par le clavier alphanumérique ou des touches spéciales de ce dernier, et un langage de programmation «BASIC étendu». Ce BASIC est même tellement «étendu» qu'il n'a plus rien à envier au FORTRAN. Tout à donc l'air d'être parfait dans ce type d'ordinateur de table. Cette solution présente cependant une caractéristique un peu cachée mais qui peut devenir d'une extrême importance: un programme écrit dans le langage de programmation propre à ces petites machines n'est pas transportable facilement sur une autre installation, à moins qu'elle n'appartienne à la même série du constructeur. Si, au bout de quelques années d'usage de son ordinateur de table, et après avoir développé toute une bibliothèque de programmes d'application, le bureau désire acquérir un ordinateur plus puissant, de la même marque ou d'une autre, il devra réécrire tout ou presque tout le logiciel qu'il aura développé à grands frais, et cela risque de lui coûter plusieurs fois le coût de la machine.

Cette solution n'est cependant absolument pas à rejeter d'emblée. Elle doit seulement être choisie en connaissance de cause. En outre, cet inconvénient potentiel sera atténué si le constructeur offre avec sa machine un logiciel d'application important. C'est par exemple le cas en Suisse, dans le domaine du génie civil, de la maison Olivetti.

Avec la deuxième solution, soit le mini-ordinateur universel, ce problème ne se posera presque plus, car tous les programmes pourront être développés en FORTRAN qui est un langage de programmation relativement bien standardisé. L'acquéreur d'une telle machine pourra en outre bénéficier des très importantes bibliothèques de programmes techniques écrites pour la plupart en FORTRAN. Il pourra aussi utiliser des programmes beaucoup plus importants grâce à une mémoire centrale

plus vaste et à la mémoire périphérique à accès direct (mémoire que l'on peut aussi adjoindre à l'ordinateur de table analysé plus haut). L'usage de ce mini-ordinateur sera, par contre, moins simple que celui de l'ordinateur de table, et exigera l'engagement ou la formation d'une personne un peu spécialisée en informatique. Comme sur l'ordinateur de table, ce mini-ordinateur pourra se connecter sur un ordinateur plus puissant et ainsi permettre l'exécution, par son travers, de programmes exigeant une mémoire centrale ou une vitesse de calcul plus importante. Dans ce cas, il pourra se charger des travaux de formulation des données et d'exploitation des résultats, ceci en mode interactif, et ne confier à la grande machine que le calcul proprement dit.

Si le bureau d'ingénieurs a choisi la dernière solution, soit le terminal lié directement à ou aux ordinateurs d'un centre de calcul, il ne rencontrera pas non plus de problèmes de transportabilité de programmes. Les avantages de cette solution par rapport à l'acquisition du mini-ordinateur universel sont son coût initial moins élevé. Les inconvénients sont une moins grande souplesse d'utilisation (horaire, permissions, fiabilité un peu plus faible) et le coût de la liaison téléphonique et des services du centre de calcul qui peut rendre cette solution plus coûteuse que la précédente, malgré le plus faible investissement initial.

Dans les lignes ci-dessus, nous n'avons pas fait un inventaire de tout le matériel informatique disponible aujourd'hui, mais seulement décrit, par un exemple, les problèmes liés à l'acquisition d'un équipement informatique se plaçant dans le bas de la gamme des ordinateurs disponibles actuellement. Cet exemple peut cependant être, dans une certaine mesure, extrapolé à du matériel plus performant et coûteux. Avec ce dernier, les problèmes de transportabilité des programmes d'application ne se posent presque plus dans le domaine de la technique, mais encore beaucoup dans le domaine de la gestion (COBOL, PL1, Systèmes de gestion de banques de données); l'importance du logiciel par rapport au hardware restera cependant la même, notamment en ce qui concerne les systèmes d'exploitation et les compilateurs. Ces problèmes ne préoccupent qu'une fraction infime des ingénieurs que nous sommes et nous ne nous y attarderons pas.

### Evolution prévue durant les années 80

Lors de ces prochaines années, les vitesses de calcul des processeurs vont encore augmenter dans une forte proportion et leur coût, de même que celui des

mémoires centrales, va encore diminuer. L'augmentation des vitesses de calcul des processeurs va découler probablement surtout de progrès dans leur architecture. Les processeurs vectoriels, soit des processeurs traitant parallèlement un grand nombre d'opérations arithmétiques et logiques et les processeurs «pipe line» qui regroupent certaines unités fonctionnelles vont se généraliser dans toutes les gammes d'ordinateur. Avec ces architectures et la technologie des composants électroniques actuels, des vitesses de 100 Méga FLOPS pourront être dépassées. Cette évolution technologique va nécessiter des efforts de la part des constructeurs dans l'adaptation du logiciel aux nouvelles instructions vectorielles de ces processeurs.

Quoique cela ne fasse pas à proprement parler du hardware, il faut signaler la généralisation probable, dans toutes les gammes d'ordinateur, des mémoires virtuelles qui libéreront le programmeur de la contrainte de la mémoire maximale à disposition, mais exigeront de lui une meilleure structuration des programmes et notamment un usage limité de la très controversée instruction «GOTO».

La mémoire centrale maximale des ordinateurs de table va augmenter (Hewlett-Packard vient d'annoncer l'extension de la mémoire RAM du HP 9845 à 449 Ko, soit presque deux fois plus que la mémoire maximale d'un mini-ordinateur PDP11-34!), ce qui va peut-être permettre, avec le développement de mémoire à accès direct bon marché (type mini-disque Winchester d'une capacité de 20 Mo et d'un coût d'environ SFr(79) 3000.-, par exemple), de trouver bientôt sur le marché des calculateurs de cetype supportant le FORTRAN et ne coûtant pas plus que le salaire annuel d'un ingénieur confirmé.

Les réseaux d'ordinateurs vont très certainement connaître un essor important. Dans le domaine de l'ingénierie, ces réseaux permettront l'accès à des programmes se trouvant dans des centres de calcul très éloignés; ainsi que l'établissement de dialogues avec le ou les spécialistes de ces programmes. Le plus important centre de calcul suisse indépendant d'un constructeur est déjà lié à un tel réseau. Le coût de la liaison entre deux ordinateurs par une maille d'un réseau est très faible. Il est, par exemple, aujourd'hui pour une liaison Suisse - USA de l'ordre d'un franc par minute.

En ce qui concerne les périphériques, nous allons assister à la généralisation de la décentralisation de l'intelligence des processeurs centraux vers ceux-ci. Leurs tâches de contrôle vont de plus en plus être assumées par des micro-processeurs et des mémoires tampons faisant partie intégrante du périphérique. Les éditeurs vont, par exemple, devenir

propres à la console, les générateurs de caractères et de vecteurs vont se généraliser sur les traceurs de courbes, les écrans graphiques vont devenir petit à petit de véritables mini-ordinateurs orientés vers l'édition et la représentation graphique et les traceurs de courbes (imprimantes) électrostatiques vont réaliser eux-mêmes la transformation des vecteurs en trames horizontales.

Les écrans graphiques, soit, pour l'ingénieur, un des principaux moyens de communication avec l'ordinateur, vont subir encore d'autres évolutions. Les écrans en couleur vont remplacer les écrans noir/blanc et, ce qui est plus important pour l'ingénieur ou l'architecte, les écrans avec tube à mémoire qui sont aujourd'hui les plus répandus (type Tektronix 401X), vont probablement être graduellement remplacés par des écrans à rafraîchissement (type CRT, soit des tubes fonctionnant sur le principe des tubes de télévision), pilotés par des micro-processeurs pourvus de mémoire tampon, d'une technologie moins coûteuse que les écrans à mémoire. Les possibilités interactives de ces écrans sont beaucoup plus étendues, notamment grâce au fait que chaque point de l'écran peut être modifié à volonté sans altérer le reste de l'écran. Ces écrans existent déjà aujourd'hui, mais leur résolution n'est pas encore celle des écrans à mémoire.

### Conclusion

Un développement révolutionnaire et un coût toujours plus faible du hardware, et une difficile, relativement lente et coûteuse évolution du logiciel, telles sont les données à la base de l'usage et du développement de l'informatique, dans le domaine de l'ingénierie, durant la prochaine décennie. Elles peuvent conduire aussi bien à l'anarchie qu'à une intégration dans notre profession de plus en plus harmonieuse de cet outil encore considéré par d'aucuns comme un peu inhumain.

Cette intégration de plus en plus harmonieuse dépend de nous tous, mais surtout de nos écoles d'ingénieurs et d'architectes qui devront encore faire de gros efforts pour améliorer l'enseignement de l'informatique et de nos sociétés professionnelles qui devront notamment intensifier sérieusement leur œuvre d'information et de coordination.

Adresse de l'auteur: M. Dysli, ing. SIA, Chef de section, Laboratoire de géotechnique, Département de Genie civil, EPFL-Ecublens, 1015 Lausanne.