

troubles de l'équilibre et déclenche des mouvements réflexes des yeux. Une fois les vertiges passés, l'hémisphère opposé à l'oreille «refroidie» est en sursurveillance et ne remplit plus son rôle. À l'inverse, la stimulation du lobe pariétal d'un des hémisphères cérébraux par un champ magnétique de un tesla interrompt temporairement la plupart des activités neuronales de ce même hémisphère.

Et les histoires drôles ? On ne connaît pas exactement les effets d'un bon fou rire sur le cerveau bien que l'on ait repéré en imagerie cérébrale des régions spécifiquement activées. Cependant, de longs accès d'hilarité entraînent souvent des faiblesses, des manques de coordination, des difficultés à respirer, et une sudation. Par ailleurs, les individus atteints de cataplexie (un trouble du sommeil) souffrent parfois d'une paralysie partielle ou totale pendant plusieurs minutes après un éclat de rire. Selon le neurobiologiste australien, des anomalies des connexions entre les deux hémisphères expliqueraient ces symptômes.

Les résultats sont étonnants : la plupart des sujets testés qui ont reçu de l'eau froide dans l'oreille perçoivent

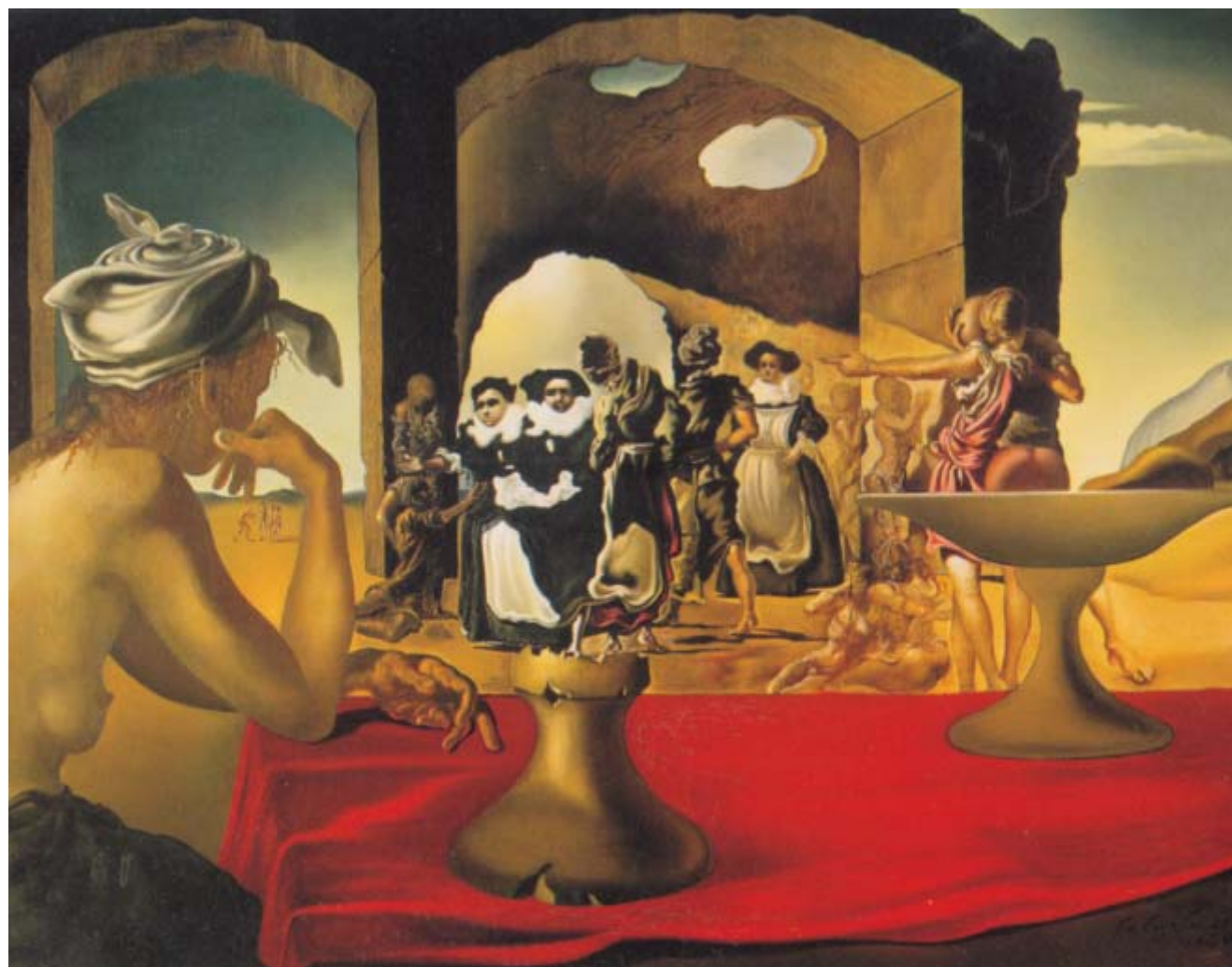
plus longtemps l'un des deux motifs du stéréoscope, alors que les sujets témoins qui ont reçu de l'eau tiède alternent de façon équilibrée entre les deux perceptions. Les impulsions magnétiques émises sur l'hémisphère gauche ont interrompu l'alternance des deux représentations du cube chez cinq des sept personnes testées. Et parmi tous les 20 volontaires testés, le fou rire a supprimé, ou atténué, la rivalité binoculaire pendant presque une demi-heure : ils voient dans le stéréoscope une grille de lignes horizontales et verticales.

De ces résultats découle une interprétation nouvelle de nos perceptions illusoirs devant des tableaux de peintres surréalistes. Face à la scène ambiguë du tableau de Dali, l'hémisphère gauche construit une représentation, par exemple le marché aux esclaves, tandis que le cerveau droit en élabore une autre, le buste de Voltaire. Un interrupteur entre les deux hémisphères alterne la conscience de l'une ou de l'autre. Le rire court-circuite l'interrupteur ou bien l'accélère, on l'ignore encore, si bien que, sous son emprise, nous voyons les deux repré-

sentations simultanément : il crée un nouvel état d'esprit hybride.

Cette superposition d'états n'est pas sans rappeler la schizophrénie, une psychose caractérisée par une ambivalence des pensées et une conduite paradoxale, une sorte de dédoublement de la personnalité. Keith White, de l'Université de Floride, a découvert que de nombreux schizophrènes avaient une rivalité binoculaire déficiente. Des résultats de J. Pettigrew naîtra peut-être un test diagnostic original recommandant la visite du Musée Dali de Saint Petersburg. Les gardiens du musée seront tous diplômés en neuropsychologie clinique. Ils auront pour tâche d'observer la réaction des visiteurs devant les tableaux de Dali, alors que leurs collègues raconteront des histoires drôles. À chaque instant, des nonnes s'enfuient à l'entrée de Voltaire. Cette nouvelle forme de dépistage de la schizophrénie n'aurait certainement pas déplu au Maître espagnol.

Yves FRÉGNAC est directeur de l'unité de neurosciences intégratives et computationnelles, à Gif-sur-Yvette



Musée Salvador Dalí, Saint Petersburg, Floride © État espagnol, Fondation Gala-Salvador Dalí, ADAGP Paris, 2001



Jusqu'où l'ordinateur calculera-t-il?

JEAN-PAUL DELAHAYE

Votre ordinateur de bureau finira-t-il par avoir la puissance de calcul du cerveau humain?

*Si tu t'imagines, fillette, fillette,
Si tu t'imagines que ça va durer,
Ce que tu te goures, ce que tu te goures...*

En 1949 déjà, quand Juliette Gréco chantait la chanson *Si tu t'imagines* dans les caves de Saint-Germain-des-Prés, on peut penser que le célèbre Dr. Schutz célébré par Boris Vian comparait des machines qui n'avaient même pas la puissance de calcul de nos

téléphones portables à des cerveaux électroniques! Pourtant, après cinquante ans de progrès, nos ordinateurs n'égale-tout pas nos cerveaux sur de nombreux points.

Lorsque tout va très vite, on perd ses marques, et, en matière de performances informatiques, il y a si longtemps qu'on nous prétend que la nouvelle machine est incomparablement supérieure aux précédentes qu'on finit par ne plus rien y comprendre.

Dans le vertige du progrès rapide et continu, on pourrait croire que tout est possible... y compris ce qui ne l'est pas : certains calculs sont à la limite de ce qui est envisageable, certains autres devront attendre quelques années, d'autres enfin sont hors de portée pour des décennies, voire pour des siècles ou à tout jamais. Tentons de fixer des repères.

LES LOIS DE MOORE

En avril 1965, dans un article publié dans la revue *Electronics Magazine*, Gordon Moore (qui dirige alors la recherche chez *Fairchild Semiconductors* et qui cofondera avec Robert Noyce la firme *Intel* en 1968) remarque que, depuis l'invention du circuit intégré (en 1958), on observe un doublement annuel du nombre de transistors par unité de surface. Il prédit que ce doublement durera encore dix ans.

Sa prévision se réalisera assez bien ; pourtant, en 1975, dans un exposé où on lui demande de proposer un nouveau pronostic, G. Moore, analysant les difficultés technologiques présentes, annonce cette fois un doublement du nombre de transistors par unité de surface tous les deux ans (au lieu de tous les ans).

En prenant en compte l'augmentation de la fréquence d'horloge des microprocesseurs (la vitesse avec laquelle on les fait calculer), ou en faisant la moyenne entre les prédictions de 1965 et celles de 1975, certains des collègues électroniciens de Moore ont reformulé les prédictions et ont parié sur un doublement de performance tous les 18 mois. C'est ce qu'abusivement aujourd'hui nous dénommons la *Loi de Moore* et que nous dénommerons ici la loi de Moore *standard* : «les performances informatiques doublent tous les 18 mois».

Il existe dans la littérature d'autres versions de ce qu'est la loi de Moore, mais la réalité (que G. Moore lui-même atteste quand on l'interroge) correspond

1. CAPACITÉS DE CALCUL DEPUIS LE DÉBUT DU SIÈCLE

La loi de Moore n'a de sens que pour la période, commençant en 1958 et se terminant sans doute prochainement, des circuits imprimés obtenus par lithographie optique. Pour savoir s'il existe une loi plus générale incluant plusieurs technologies de calcul différentes, Ray Kurzweil dans son livre *The Age of Spiritual Machines* (Penguin Books, New York, 1999) a évalué la puissance de calcul des machines en instructions par seconde pour un dollar sur toute la durée du XX^e siècle. Durant cette période, cinq technologies de calcul différentes se sont succédé.

Ray Kurzweil évalue que, de 1900 à 2000, nous sommes passés de 10^{-8} à 10^5 instructions par seconde pour un dollar. En un siècle, la puissance de calcul pour une somme d'argent donnée a donc augmenté d'un facteur 10^{13} , ce qui correspond à un accroissement moyen de 35 pour cent par an, soit un doublement tous les 2,4 ans.

Ce résultat suggère que la loi de Moore est généralisable. On peut donc espérer que, lorsque la technologie de la gravure optique des circuits intégrés aura atteint ses limites (vers 2020 ou avant), elle sera remplacée par une autre technologie qui prendra le relais et permettra la poursuite des gains réguliers des performances informatiques.

Indiquons quelques repères indiqués par le spécialiste Ray Kurzweil (les chiffres représentent le nombre d'instructions par seconde, par dollar dépensé).

Machine analytique 1900	10^{-8}
Tabulateur IBM 1919	10^{-6}
Calculateur Bell Modèle I 1940	10^{-5}
ENIAC 1946	10^{-3}
Univac1103 1953	10^{-2}
DEC PDP1 1960	10^{-1}
DEC PDP8 1965	2
Altair 8800 1975	10
IBM PC 1982	10^{+2}
Pentium II 1999	10^{+5}



à la version que nous avons donnée : deux énoncés, l'un en 1965, l'autre en 1975 concernant la densité des transistors, conduisent à l'énoncé de la loi standard de Moore : un doublement de performance tous les 18 mois.

Notons qu'il ne s'agit pas, bien sûr, d'une loi mathématique ou physique, mais d'une simple règle hypothétique permettant l'évaluation de l'avenir des performances informatiques. Ces performances résultent d'une combinaison de facteurs sociaux, économiques, technologiques et physiques : les succès des techniques informatiques auprès du public (facteur social) et la concurrence entre firmes (facteur économique) déterminent les bénéfices de l'industrie des semi-conducteurs, qui fixent à leur tour l'investissement en recherche de cette industrie (facteur technologique), lui permettant de surmonter les obstacles qu'oppose la réalité matérielle (facteur physique).

Un doublement de performance tous les 18 mois est équivalent à une multiplication par 1 000 tous les 15 ans (dix doublements valent exactement une multiplication par 1 024) et à une multiplication par un million tous les 30 ans. Si les performances des voitures avaient suivi le même rythme, nous roulerions aujourd'hui un million de fois plus vite qu'en 1970, soit environ à 30 000 kilomètres/seconde... et dans six ans nous dépasserions la vitesse de la lumière ! G. Moore, voyant que chaque prédiction concernant l'évolution de l'informatique lui est attribuée dit avec humour qu'il est l'inventeur de la fonction exponentielle comme Al Gore est l'inventeur d'*Internet* (Gordon Moore est républicain!).

Menons un petit calcul pour tester la loi de 1975. Nous sommes passés de 2 300 transistors pour le *Intel-4004* de 1971, à 42 millions de transistors pour le *Pentium 4* disponible depuis novembre 2000. Cela correspond à un facteur multiplicatif de 18 260 en 29 ans, soit une multiplication par $18\,260^{2/29} = 1,967$ tous les deux ans, valeur remarquablement proche du facteur 2 du second pronostic de Moore.

L'augmentation de densité prédite s'est précisément réalisée entre 1971 et aujourd'hui, mais, comme Moore le fait remarquer, sa prophétie était «auto-réalisatrice» : l'industrie (et lui-même en particulier comme acteur de premier plan de cette industrie) s'est fondée sur elle pour fixer ses objectifs et ses plans d'investissements.

Gordon Moore, aujourd'hui milliardaire et âgé de 71 ans, a évalué que les usines de circuits produisent chaque année plus de transistors (10^{17} environ), qu'il n'existe de fournis sur terre (10^{16} ,

nombre proposé par le naturaliste Edward Wilson). Ramené au nombre d'humains sur terre, on peut aussi noter que, chaque année, plus de dix millions de transistors sont dessinés pour chaque être humain : les inventeurs du transistor de 1947 (W. Shockley, W. Brattain, J. Barden) peuvent être fiers d'eux !

EST-CE QUE CELA VA CONTINUER? NON

Gordon Moore prévoit maintenant que sa loi ne restera pas indéfiniment vraie. Il pense que, dans les dix prochaines années, elle sera satisfaite, mais au-delà, il prédit un ralentissement, le rythme se réduisant à un doublement du nombre de transistors par unité de surface tous les quatre ans (donc un doublement de performance tous les trois ans environ).

Si l'on s'en tient au perfectionnement des techniques de gravure optique des puces, on devra utiliser des longueurs d'onde de plus en plus courtes. Or, au mieux, on ne peut graver des traits qu'avec une précision de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière utilisée. Comme plus rien n'est transparent pour les longueurs d'onde très courtes, on ne peut plus concevoir et réaliser des lentilles pour contrôler la gravure au-delà d'une limite qu'on n'est pas loin d'atteindre. Aujourd'hui, les longueurs d'onde utilisées se situent entre l'ultraviolet et les rayons X. Le récent *Pentium 4*, par exemple est dessiné avec une gravure de 180 nanomètres. On étudie déjà ce que l'on va pouvoir faire avec des longueurs d'onde de 130 nanomètres et l'on envisage pour la prochaine décennie des longueurs d'onde de 15

2. QUELLE EST LA PUISSANCE DU CERVEAU HUMAIN?

- Se fondant sur une étude détaillée de la rétine humaine, Hans Moravec, de l'Université *Carnegie Mellon*, évalue que le cerveau humain est équivalent à un ordinateur d'une puissance de 10^{14} instructions par seconde.
 - Nick Bostrom, de l'Université de Yale, propose une évaluation fondée sur le raisonnement suivant. Dans le cerveau humain, il y a environ 10^{11} neurones, chacun possédant environ 5 000 synapses ; les signaux circulent au travers de ces synapses à la vitesse de 100 décharges par seconde environ, et chaque signal porte approximativement 5 bits d'information. Au total, le cerveau opère donc un calcul d'environ 25×10^{16} opérations binaires par seconde qui, ramenées en instructions par seconde, donnent le nombre approximatif de 10^{17} instructions par seconde.
 - Ray Kurzweil, par un calcul analogue, arrive au nombre un peu inférieur de 2×10^{16} instructions par seconde.
 - Ralph Merkle qui, lui, fait une estimation en se fondant sur la consommation d'énergie par un neurone comparée à la consommation totale du cerveau, obtient une fourchette : le cerveau humain aurait une puissance comprise entre 10^{13} et 10^{16} instructions par seconde.
 - Certains spécialistes, arguant de la complexité interne des neurones, qui seraient chacun de petits calculateurs, suggèrent que ces nombres doivent être multipliés par 100, ce qui conduit à 10^{19} instructions par seconde.
- Notons encore que le véritable équivalent informatique en calcul du cerveau pourrait être plus faible que l'estimation la plus basse de 10^{13} (Merkle). En effet, il est certain que, pour effectuer une multiplication comme 43×52 , un cerveau humain mobilise une énorme force de calcul impliquant des millions de neurones pendant plusieurs secondes, qui effectuent donc l'équivalent de millions d'instructions, alors qu'une puce fait une telle multiplication en quelques instructions. Si d'autres activités mentales sont aussi "mal programmées" dans notre cerveau, alors l'imitation du cerveau pourrait être obtenue avec une puissance bien inférieure à celle qu'il possède.

En résumé, les estimations de la puissance du cerveau humain oscillent entre 10^{13} et 10^{19} instructions par seconde, cette fourchette pouvant peut-être être élargie vers le bas. Cela est certes très imprécis, mais reflète l'ignorance où nous sommes de ce que fait un cerveau.



nanomètres, qui semblent la limite des méthodes actuelles.

Au-delà, les procédés de lithographie devront utiliser les rayons X (technologie étudiée par *IBM*) ou des faisceaux d'électrons (technologie étudiée par *Bell*), mais ces nouvelles méthodes ne sont plus de simples prolongements de ce qu'on sait faire, elles demanderont donc des investissements nouveaux colossaux... et de la chance, car on ne peut être certain que cela va marcher.

Quant aux projets de développements de calculateurs quantiques ou à ADN étudiés dans certains laboratoires de recherche, Gordon Moore, comme la plupart des spécialistes, pense que cela ne pourra jouer un rôle que dans un avenir lointain, et en tout cas pas dans les dix ans à venir.

Parmi les variantes de la loi de Moore, la *loi de Rock* inquiète de nombreux observateurs. Elle énonce que le coût en investissements double tous les quatre ans. L'industrie du microprocesseur est une industrie de l'ordre de 200 milliards de dollars par an, qui investit 10 pour cent de ses revenus dans la recherche et le développement. La loi de Rock, freinerait peut-être plus les progrès envisageables (les doubléments de performances prévus tous les 18 mois) que les difficultés liées à la physique, car rien en économie ne croît aussi vite et, tôt ou tard, il y aura un manque de ressources financières, en tout cas avant

que la totalité des richesses économiques terrestres ne soient consacrées à la fabrication de microprocesseurs ! La limitation économique imposera sa contrainte à la courbe exprimant la densité de transistors en fonction du temps.

Notons, en passant, que la *loi de Machrone*, variante humoristique de la loi de Moore, est étonnamment exacte : l'ordinateur dont vous rêvez vaut toujours 5 000 dollars (ou euros).

EST-CE QUE ÇA VA CONTINUER ? OUI !

Lorsqu'on observe certains aspects particuliers des performances informatiques, on découvre que la loi de Moore (standard) a été récemment dépassée dans trois domaines où l'augmentation des performances a été plus rapide que le fameux doublement tous les dix-huit mois. Ces trois domaines sont l'affichage graphique, le stockage sur disques magnétiques et la capacité des fibres optiques.

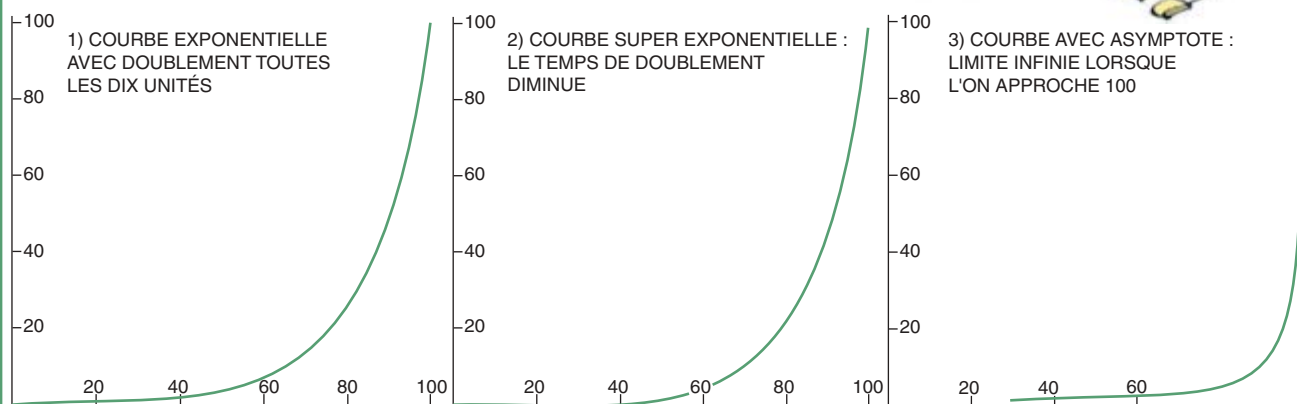
Fin 1998, pour 250 \$, on pouvait disposer d'une carte graphique traitant un million de polygones par seconde et produisant donc de belles animations 3-D en images de synthèse. Les spécialistes annoncent, pour un prix équivalent, des cartes capables d'afficher 100 millions de polygones par seconde à la fin 2001. Le gain en performance sera donc d'un facteur 100 en trois ans, ce qui

correspond à un facteur 10 en 18 mois, bien plus que le doublement habituel. L'explication de ces progrès accélérés se trouve dans le succès commercial des jeux utilisant les simulations 3-D qui ont conduit à la mise au point de puces spécialisées ; celles-ci bénéficient à la fois des progrès d'intégration (le nombre de transistors par unité de surface) de la fréquence plus élevée des processeurs (ces deux facteurs conduisent au doublement tous les 18 mois), et tirent aussi avantage d'une meilleure conception des algorithmes et du dessin optimisé des circuits. C'est là que les progrès dans la maîtrise mathématique et le savoir-faire spécialisé sont responsables de ce dépassement des prévisions : non seulement l'électronicien avance, mais aussi le mathématicien et l'informaticien.

Dans le domaine du stockage des données sur disques magnétiques, la loi



3. LES PRÉVISIONS DE L'AUGMENTATION DE LA PUISSANCE DE CALCUL



L'augmentation des performances informatiques franchit les transitions technologiques produisant des doubléments à intervalles réguliers, qui semblent même à certains analystes de plus en plus rapprochés. Trois hypothèses sont à envisager. (1) La courbe de performance informatique est déterminée par une fonction exponentielle, c'est-à-dire une fonction de type : $t \rightarrow C \cdot a^t$: l'espace entre deux doubléments est constant. (2) La courbe de performance est déterminée par une fonction super-exponentielle, par exemple $t \rightarrow C \cdot t^t$: la durée entre deux doubléments diminue. (3) La courbe de

performance possède une asymptote verticale comme celle de la fonction $t \rightarrow C/(s - t)$: lorsque t s'approche de s , la singularité, la performance, tend vers l'infini. Si la troisième hypothèse est vérifiée, alors se pose la question de l'interprétation de cette singularité. Ce changement radical a été théorisé par V. Vinge, du Département de mathématiques de l'Université de San Diego, qui considère qu'elle correspond à la mise au point de machines plus intelligentes que l'homme. Bien sûr, ces réflexions prospectives proches de la science-fiction sont considérées avec méfiance par la majorité des scientifiques.

de Moore s'est appliquée sans fantaisie jusqu'en 1998, mais, depuis, suite à des avancées techniques accélérées (ici, il ne s'agit plus de densité de transistors, mais de maîtrise des constituants magnétiques), l'augmentation de la capacité de stockage est multipliée par 3,5 tous les 18 mois, beaucoup plus que ce que prévoit la loi de Moore standard. Les disques durs d'un téraoctet (10^{12} octets, c'est-à-dire mille milliards de caractères) dont nous allons pouvoir disposer d'ici peu permettront de stocker l'équivalent d'un million de livres de 200 pages, ou 400 cassettes vidéo VHS, ou encore toutes les conversations d'une personne durant toute sa vie!

Enfin, dans le domaine du transport optique d'informations on assiste, grâce au procédé de multiplexage (passage simultané de plusieurs lumières de longueurs d'onde différentes dans la même fibre) à un doublement de capacité tous les six mois (multiplication par 8 tous les 18 mois) largement supérieur encore à ce qu'une traduction directe de la loi de Moore standard laisse espérer.

Ces accélérations dans des domaines particuliers seront peut-être momentanées, et la loi de Moore d'un doublement de performance tous les 18 mois semble pour l'instant le repère général le plus fiable pour envisager l'avenir des performances informatiques dans les dix prochaines années.

PRÉVISIONS À LONG TERME

La loi de Moore, relativement précise, s'applique sur une assez courte période de temps, car, dans l'esprit de son inventeur, elle ne concerne vraiment que la technologie des circuits intégrés qui sont dessinés en utilisant une lithographie optique classique sur du silicium. Les autres méthodes de lithographie étudiées, les idées d'ordinateurs optiques, quantiques ou à ADN constitueront des sauts technologiques dont personne aujourd'hui ne peut vraiment être certain du succès. Dans 20 ans, ou bien nous aurons rencontré un mur, et les performances auront cessé de croître au rythme actuel, ou bien nous aurons réussi une transition technologique.

La prévision pour le siècle qui commence doit donc se fonder sur une vue plus générale provenant de l'étude du passé sur une période incluant des transitions technologiques importantes. Plusieurs de ces études ont été menées, dont celle de Ray Kurzweil (*The Age of Spiritual Machines*, Penguin Books, 1999) qui couvre le xx^e siècle dans sa totalité.

4. LE PLUS GROS ORDINATEUR D'AUJOURD'HUI ET CEUX DE DEMAIN

Le plus puissant ordinateur du monde aujourd'hui est un ordinateur IBM répondant au doux nom de *ASCI-White-SP-Power-3-375-MHz*. Installé depuis novembre 2000 en Californie, il dispose d'une puissance de 5 000 GFLOPS, ou, en gros, 10^{13} instructions par seconde. Le FLOPS (Opération en virgule flottante par seconde) qui donne naissance au MFLOPS (10^6 FLOPS) et au GFLOPS (10^9 FLOPS) et au TFLOPS (10^{12} FLOPS) est utilisé pour l'évaluation des ordinateurs destinés aux calculs avec des nombres réels dont on a besoin en météorologie et dans le domaine de la physique atomique. On peut sommairement évaluer qu'un FLOPS vaut de 2 à 10 instructions par seconde, d'où notre conversion des 5 000 GFLOPS en 10^{13} instructions par seconde. L'ordinateur numéro un n'est pas un «micro», loin s'en faut : il occupe une surface au sol équivalente à celle de deux terrains de basket, pèse plus de cent tonnes, et possède 8 192 processeurs de calculs travaillant en parallèle pour réaliser des simulations d'explosions atomiques, ce qui est moins polluant que de les réaliser dans l'atmosphère. Jusqu'à présent, la physique atomique était la plus grosse consommatrice de puissance informatique. Les choses sont en train de changer, et les sciences de la vie devraient rapidement passer en tête.

Un système dédié à des calculs bioinformatiques d'une puissance de 10^{14} instructions par seconde est en cours de conception et sera opérationnel en 2004. Ce projet résulte d'une association entre *Celera* (firme privée s'occupant du séquençage des génomes et ayant déjà apporté une contribution majeure au projet de séquençage du génome humain), *Compaq* (Société informatique) et le *Sandia Labs* (Laboratoire du Département de l'énergie américaine qui s'occupe aujourd'hui de physique nucléaire). Cet effort sans précédent dans le domaine des sciences de la vie est une réponse au défi lancé par J. Craig Venter, président de *Celera*, qui a déclaré que «les plus puissants systèmes informatiques d'aujourd'hui ne sont pas en mesure de satisfaire les besoins en calcul rencontrés dans le domaine de la génomique».

La firme IBM, qui n'est pas en reste, développe un système appelé *Blue Gene* dont la puissance prévue est dix fois supérieure encore, soit 10^{15} instructions par seconde environ. Si l'on accepte le chiffre moyen de 10^{15} pour la puissance d'un cerveau, *Blue Gene* sera le premier ordinateur à égaler un cerveau.

Nous assistons à un changement de perspectives, et les gros ordinateurs qui, depuis l'ENIAC, ont toujours été développés dans le cadre de projets militaires, vont maintenant laisser la place à des systèmes développés à des fins plus pacifiques dans le cadre de la recherche en biologie. Paul Robinson, président des Laboratoires *Sandia*, confirme ce changement de tendance : «L'industrie des armes nucléaires pensait depuis des années que rien n'était plus complexe que la physique atomique. En réalité, rien ne dépasse la complexité de la biologie, le génome humain et les défis qu'il soulève».

Les machines à calculer mécaniques ou à relais électromécaniques n'utilisaient pas de transistors. La première question à résoudre pour traiter du XX^e siècle dans son entier est donc : comment comparer la puissance de machines, dont certaines ne pouvaient faire que quelques additions par minute, à d'autres qui affichent des millions de pixels par seconde.

Aucune unité précise de calcul ne peut être proposée, et les organismes qui aujourd'hui expertisent les machines et les comparent (par exemple, *Top500* à l'adresse www.top500.org) le font tou-

jours à partir de jeux de tests variés (dénommés *benchmarks*) qui leur fournissent des indices de comparaison spécifiques. Les méthodes fondées sur ces jeux de tests ne permettent que de comparer des machines proches dans le temps et la conception : on comprend qu'il soit difficile de demander à l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*) de 1945 d'exécuter un programme de traitement de texte actuel ou le dernier jeu avec images animées en «full 3D». D'ailleurs, aucun ENIAC n'est aujourd'hui en état de marche!



5. QUI DISPOSE DE PLUS DE PUISSANCE DE CALCUL AUJOURD'HUI : LES MILITAIRES, LES PROPRIÉTAIRES DE PC OU LES ENFANTS ?



La puissance cumulée des 500 plus grosses machines actuelles est évaluée à 88 TFLOPS, ce qui donne environ 10^{15} instructions par seconde, qu'on peut en gros considérer comme la puissance dont disposent les militaires aujourd'hui. La puissance cumulée des PC (cinq cents millions de machines ayant une puissance moyenne d'environ

2×10^8 instructions par seconde) est

plus de cent fois supérieure (10^{17}). Même les enfants avec leurs consoles de jeux battent les militaires. En effet, les consoles de jeux se vendent par dizaines de millions – 76 millions d'exemplaires de la *Playstation* première génération de *Sony* – et disposent d'une puissance de calcul cumulée du même ordre de grandeur que celle de tous les micro-ordinateurs du monde. À vrai dire, les données qui permettraient de départager les ordinateurs personnels des consoles de jeux ne sont pas disponibles avec assez de précision (ce qui, de toutes les façons, ne permettrait pas une conclusion très intéressante, puisque de nombreux PC sont utilisés... comme console de jeux!)

En comptabilisant tous les ordinateurs petits et moyens, tous les microprocesseurs (dans les téléphones portables, les machines à laver, etc.), on peut sommairement évaluer qu'aujourd'hui l'humanité dispose d'une puissance de calcul électronique de 10^{18} instructions par seconde, ce qui dépasse sans doute la puissance de calcul du cerveau humain (rappelons la fourchette 10^{13} – 10^{19} proposée pour évaluer cette puissance).

En définitive, sur une longue période, on ne peut éviter d'avoir recours aux unités de mesure. Comme aucune méthode ne définit d'unités précises et fiables, il faut se contenter de mesures assez vagues. Cela n'est pas très grave, car dans un univers en croissance exponentielle comme celui de l'informatique, une incertitude d'un facteur dix, voire cent, correspond à une courte période de temps et ne compromet pas l'analyse générale.

Une opération élémentaire de calcul devrait en toute logique correspondre à une opération binaire élémentaire comme le calcul d'un OU ou d'un ET entre deux données binaires : «0 ou 1 = 1», «1 et 0 = 0», etc. Le plus souvent, on désigne par opération élémentaire (ou instruction élémentaire, ou calcul élémentaire) une manipulation (copie, transfert, duplication, etc.) d'un mot de l'ordinateur auquel on s'intéresse, mot comportant plusieurs informations binaires. Selon la longueur du mot (qui change d'un ordinateur à l'autre), une instruction équivaut donc à un nombre d'opérations binaires élémentaires compris entre 10 et 100, voire plus. Toutes sortes d'autres raisons rendent impossible la définition d'une mesure universelle précise et fiable de l'unité de calcul,

et il faut se contenter de mesures approximatives pour suivre le progrès des ordinateurs sur le long terme. L'unité instruction, aussi imparfaite soit-elle, est cependant le moins mauvais outil de comparaison qui existe, et c'est lui qu'on retient en général.

L'instruction donne naissance à l'unité de puissance IPS (instruction per second), qui conduit à l'unité la plus souvent mentionnée aujourd'hui, le MIPS : million d'instructions par seconde. Cependant cette unité est tellement manipulée commercialement que certains en plaisantent et disent que MIPS signifie *Meaningless Indicator of Performance for Salesmen* (indicateur de performance sans signification pour commerciaux).

Le prix des machines informatiques pouvant varier considérablement, une étude sérieuse se devait d'en tenir le plus grand compte : c'est pourquoi finalement Ray Kurzweil a adopté dans son étude futuriste l'unité «instruction par seconde pour 1 \$». Il constate une évolution allant de 10^{-8} en 1900 à 10^5 en 2000, soit une augmentation de puissance – pour une somme donnée – d'un facteur 10^{13} , ce qui correspond à un accroissement moyen de 35 pour cent par an, équivalant à un doublement tous les 2,4 ans.

Au cours du XX^e siècle, une multitude de technologies de calcul ont défilé : machines mécaniques (à base d'engrenages et de tringles métalliques), puis machines électromécaniques (assemblage d'interrupteurs commandés par électroaimants – appelés «relais» – et connectés), puis machines électroniques (construites avec des kilomètres de fils et des milliers de lampes), puis machines à transistors isolés (fichés individuellement sur des cartes), et enfin machines à circuits intégrés (comportant des transistors dessinés simultanément par lithographie optique par centaines, puis par millions).

Les transitions technologiques se sont non seulement faites à chaque fois que cela a été nécessaire, sans que jamais la capacité de calcul ne stagne, mais, en fait, les transitions ont conduit à un progrès qui s'est légèrement accéléré, passant d'un doublement de performances tous les trois ans au début du XX^e siècle, à un doublement tous les ans aujourd'hui.

LA SINGULARITÉ ?

Comparée à l'analyse sur tout le XX^e siècle, la période de 1965 à 2000 que couvre la loi de Moore, n'est donc pas exceptionnelle et, bien au contraire, se conforme à une loi plus générale que l'on peut imaginer valable encore au XXI^e siècle.

L'augmentation des performances de calcul saute par-dessus les transitions technologiques et produit des doublements de performances à intervalles de plus en plus rapprochés. Reste que la diminution du temps nécessaire à un doublement nous amène à nous interroger. La variation de la performance en fonction du temps t ne serait pas une exponentielle de la forme a^t , mais une courbe à croissance superexponentielle, par exemple t^t , ou même une courbe à asymptote verticale en $1/(s-t)$ (lorsque t s'approche de s , la singularité, $1/(s-t)$ tend vers l'infini).

L'hypothèse de la courbe superexponentielle conduit à imaginer un futur où non seulement le progrès se poursuit, mais s'accélère sans cesse, de nouvelles technologies prenant le relais de celles qui, épuisées, ne produisent plus de puissance nouvelle.

Si, comme le pensent certains experts, quantité de problèmes informatiques que chacun rencontre (instabilité des systèmes d'exploitation et des programmes, incompatibilités des logiciels les uns avec les autres ou avec les matériels utilisés, complexité mal maîtrisée à tous les niveaux, etc.) proviennent de la rapidité trop grande des

changements, alors il faut s'attendre à ce que tout empire ; les utilisateurs d'ordinateurs risquent de rencontrer des ennuis de toutes sortes dus aux défaillances et aux caprices de leurs outils, «en progrès» accélérés, mais de moins en moins contrôlés.

Cependant l'hypothèse de la courbe superexponentielle n'est rien à côté de l'hypothèse de la courbe à asymptote verticale (la courbe hyperbolique de la figure 3), car celle-ci signifie que nous approchons d'un instant où le progrès deviendra infini, ce qui bien sûr est matériellement impossible et implique un changement radical avant l'instant s de la singularité. Ce changement radical a été théorisé par Vernor Vinge, du Département de mathématiques de l'Université de San Diego, en 1993. V. Vinge écrit : «Je défends l'idée que nous sommes tout proches d'un changement comparable à l'apparition de la vie humaine sur Terre. La cause précise de ce changement est la création imminente, par notre technologie, d'entités possédant une intelligence plus grande que celle des humains.»

D'autres textes prophétiques ont depuis lors repris l'idée de la singularité créée par l'explosion de la courbe du progrès informatique provoquant ou provoqué par (tout n'est pas très clair !) l'apparition d'intelligences supérieures à celle de l'homme. Bien sûr, rien n'est établi de manière définitive, et il s'agit de spéculations comme la science-fiction les aime depuis longtemps (V. Vinge est d'ailleurs auteur de livres de science-fiction). Certains arguments numériques sont cependant intéressants à examiner et pourront peut-être vous troubler.

L'argument le plus amusant est, sans aucun doute, la comparaison de la puissance de calcul d'un cerveau humain avec la puissance de calcul informatique calculée avec la loi de Moore simplement prolongée (sans même prendre en considération un éventuel raccourcissement de la période de doublement de performances).

CAPACITÉ DE CALCULS DES CERVEAUX

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour mesurer la puissance de calcul d'un cerveau humain, et ont donné lieu à de nombreuses dissertations conduisant à une estimation qui oscille entre 10^{13} et 10^{19} instructions par seconde. Cette grande imprécision ne fait que refléter l'ignorance où nous sommes encore aujourd'hui quant au fonctionnement détaillé du cerveau humain et illustre la difficulté qu'il y a à comparer des puces électroniques et des neurones.

Du côté des machines, le plus puissant ordinateur du monde aujourd'hui, est un ordinateur IBM destiné à la simulation d'essais atomiques au *Lawrence Livermore Laboratory* en Californie, aux États-Unis. Il dispose d'une puissance d'environ 10^{13} instructions par seconde.

La plus puissante machine, avec ses 10^{13} instructions par seconde, en est donc précisément arrivée aux estimations basses de puissance du cerveau humain. Si le rythme du progrès se maintient, en 2015, l'ordinateur le plus puissant du monde atteindra 10^{16} instructions par seconde et, en 2030, 10^{19} instructions par seconde correspondant à l'estimation la plus haute proposée pour la puissance du cerveau humain qui serait ainsi, selon toute vraisemblance, largement dépassée à cette date. Quelques années de plus, et ce seront les ordinateurs personnels qui atteindront la puissance du cerveau, avant les téléphones portables quelques mois plus tard !

Ray Kurzweil de son côté évalue avec plus de précision (mais en prenant sans doute plus de risques) qu'un ordinateur de 1 000 \$ atteindra la puissance du cerveau humain en 2030 (et atteindra la puissance de tous les cerveaux humains réunis en 2060).

Tout semble assez cohérent, et c'est là une grande nouvelle : pour ce qui est de la puissance de calcul, l'espèce humaine est entrée dans l'ère où elle construit des machines égalant ses propres capacités. Aurons-nous pour autant des machines intelligentes ?

L'INTELLIGENCE N'EST-ELLE QUE DU CALCUL ?

Ce n'est pas sûr du tout. En effet il ne suffit pas d'avoir à sa disposition une grande puissance de calcul pour obtenir de l'intelligence... ce serait bien trop simple.

En voici la preuve. En connectant par le réseau internet les cent millions d'ordinateurs de bureau vendus en l'an 2000, nous disposons déjà d'une sorte de gros ordinateur d'une puissance de calcul de 10^{16} instructions par seconde (les ordinateurs de bureau vendus aujourd'hui ont une puissance dépassant 10^8 instructions par seconde, $5 \cdot 10^8$ même pour les plus récents). Parce que les échanges entre les diverses parties de cet «ordinateur à l'échelle de la Terre» sont trop lents et parce qu'aucun programme ne tente d'utiliser cette puissance pour produire de l'intelligence, ce mastodonte reste essentiellement idiot, bien qu'il dispose sans doute de la puissance d'un cerveau humain.

L'idée un peu trop simple qu'imiter l'intelligence n'est qu'une question matérielle et technique n'est pas nouvelle. En 1950, le célèbre mathématicien anglais Alan Turing prédisait qu'en l'an 2000, avec un ordinateur disposant d'une mémoire d'un milliard de chiffres binaires (pour lui semble-t-il, plus importante que la puissance de calcul et aujourd'hui largement dépassée), nous obtiendrions une machine imitant assez correctement le comportement humain. Cela n'est pas le cas : la «machine de Turing est encore assez bête». Plus proche de nous, Herbert Simon prévoyait, en 1965, qu'en 1985 les machines seraient capables de faire n'importe quel travail qu'un homme réalise. Là encore, la prédiction était trop optimiste.

Le débat sur l'intelligence artificielle, qui a déjà fait couler beaucoup d'encre, n'est donc pas clos. Il entre cependant dans une nouvelle phase. La charge de la preuve – qui était dans le camp des anti-IA, car à défaut de machines puissantes c'était à eux d'argumenter qu'on ne pourrait rien en faire – change de côté, et maintenant qu'une puissance comparable à celle du cerveau est disponible (ou sur le point de l'être), l'échec des tentatives pour rendre intelligentes nos machines prend une nouvelle signification. Les années qui viennent seront déterminantes.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille : delahaye@lil.fr

G. HERMAN, *Benchmarking the Benchmarks*, 1996 : <http://163.18.14.55/datapro/12006-1.htm>

(sur la difficulté de la mesure de la puissance de calcul des ordinateurs)

D. HUTCHESON et J. HUTCHESON, *Le futur de la micro-électronique, Pour la Science*, pp. 50-56, mars 1996.

R. KURZWEIL, *The Age of Spiritual Machines : When Computer Exceed Human Intelligence*, Penguin Book, New York 1999.

R. MERKLE, *Energy Limits to the Computational Power of the Human Brain* : <http://www.merkle.com/brainLimits.html>

H. MORAVEC, *Mind Children. The Futur of Robot and Human Intelligence*, Harvard University Press, Cambridge, 1988.

V. VINGE, *On the singularity. VISION-21 Symposium sponsored by NASA Lewis Research Center and the Ohio Aerospace Institute, March 30-31, 1993* : www.ugcs.caltech.edu/~phoenix/vinge/vinge-sing.html

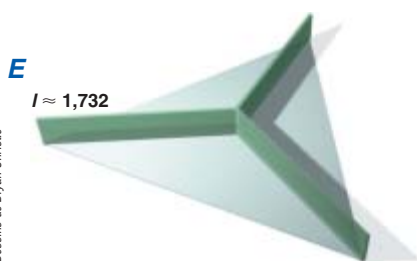
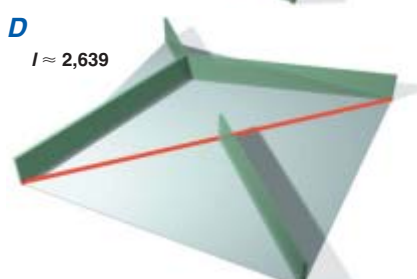
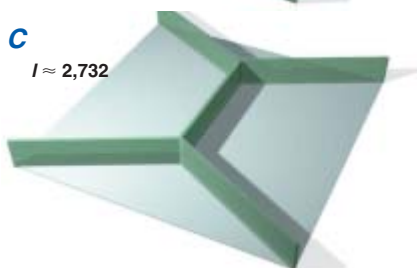
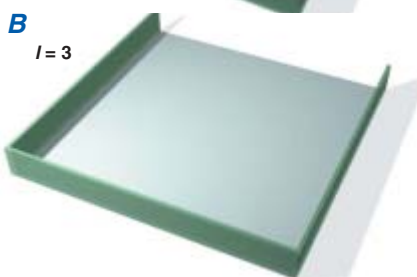
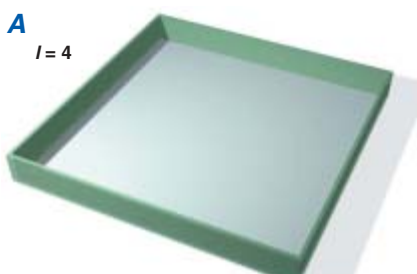
D. YANG, *On Moore's Law and Fishing. Gordon Moore speaks out, U.S. News 7-10-2000* : <http://www.usnews.com/usnews/transcripts/moore.htm>



Obstruction de polygones

IAN STEWART

Ou comment empêcher un rayon lumineux de traverser un terrain devient vite un problème mathématique ardu.



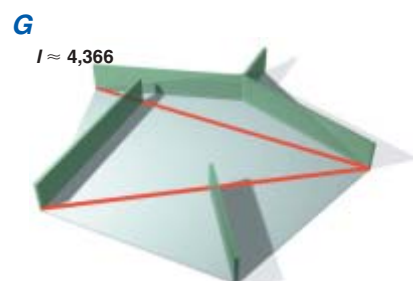
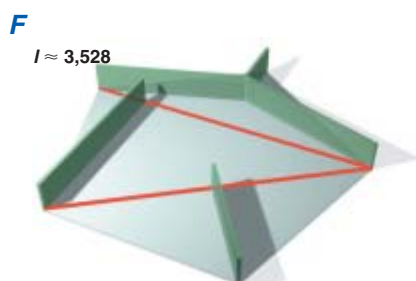
La géométrie combinatoire est un domaine des mathématiques qui fourmille de problèmes simples sans pourtant avoir de solutions connues. Elle consiste à trouver des arrangements de droites, de courbes ou d'autres formes géométriques qui obéissent à des contraintes données. Ce mois-ci, je me consacrerai à la question dite du Problème du carré opaque et à plusieurs variations du même problème. Bernd Kawohl, de l'Université de Cologne, en Allemagne, a attiré mon attention sur ce problème et l'un de ses articles m'a inspiré ces pages.

Supposez que vous travaillez au contre-espionnage de votre pays et vous savez que, dans quelques jours, deux espions situés de part et d'autre du terrain de l'ambassade de votre pays tenteront de communiquer par signaux lumineux. Supposons ce terrain carré, de un kilomètre de côté. Pour empêcher des secrets de passer à l'ennemi, vous décidez de construire une clôture opaque qui interceptera tout rayon lumineux qui traverserait le jardin de l'ambassade. De plus, les finances de votre service sont au plus bas, et vous souhaitez la clôture la plus courte possible. Quelle forme lui donner ? Elle peut être aussi compliquée que vous le voulez, formée de plusieurs parties rectilignes ou courbes.

Votre première idée, la plus simple, est de clôturer le pourtour du carré, soit de construire une clôture de quatre kilomètres (voir la figure 1A). Puis, une courte réflexion vous inspire une amélioration : la suppression d'un des côtés du carré ; il reste alors une clôture en U (voir la figure 1B) de trois kilomètres de longueur. Il s'agit de la plus courte clôture qui suit une courbe simple, sans rupture et sans ramification, polygonale ou non. En effet, une telle clôture doit contenir les quatre sommets du carré.

Cependant, vous pouvez encore faire plus court avec des clôtures toujours d'un seul tenant, mais ramifiées. La figure 1C illustre une clôture de $(1 + \sqrt{3})$ kilomètres, soit environ 2,732 kilomètres. Tous les angles mesurent 120 degrés. De tels motifs sont nommés arbres de Steiner : les angles de 120 degrés en minimisent la longueur. C'est la courbe d'un seul tenant la plus courte possible.

Pouvez-vous faire mieux ? Oui, si vous acceptez des clôtures en plusieurs parties : la clôture la plus courte mesure environ 2,639 kilomètres (voir la figure 1D). Les trois segments de la partie supérieure forment trois angles à 120 degrés. Cependant, vous ne pourrez pas démontrer ce résultat au trésorier du service, car une telle démonstration reste à faire.



1. Les clôtures opaques d'une figure sont des barrières qui empêchent toute droite de traverser cette figure. Pour un carré, une clôture qui suit le périmètre (A) ou seulement trois des côtés (B) est opaque. Un arbre de Steiner (C) ou une clôture en deux parties (D) le sont aussi, mais sont plus courts. La clôture minimale pour un triangle équilatéral est aussi un arbre de Steiner (E). Les clôtures opaques que l'on pense être minimales pour un pentagone régulier (F) ou un hexagone (G) sont constituées de trois morceaux. Dans ces figures où l'on suppose les longueurs des côtés égales à un, toutes les longueurs (I) autres que celles qui correspondent à (A) et à (B) sont approximatives.