

### ARCHITECTE D'ORDINATEURS AUJOURD'HUI

#### Quelques réflexions sur les challenges actuels

##### **Introduction**

Du point de vue matériel, un ordinateur est toujours constitué par au moins un processeur, de la mémoire, et des ports dits d'entrées et de sorties. Le mot « ordinateur », élément construit ultime, a une grande variété de significations. Les autres termes « processeur, mémoire, ports », uniques composants de l'ordinateur, peuvent être analysés séparément, mais ne peuvent fonctionner séparément. La façon de les faire coopérer pour obtenir un ordinateur est conceptuellement toujours la même, mais les variantes sont à l'échelle de la définition de l'ordinateur : nombreuses et variées. La mémoire de l'ordinateur contient des programmes, et c'est ce couple qui fait que l'ordinateur est un calculateur personnel (PC) ou un assistant personnel (PDA), un téléphone mobile, une console de jeu, un lecteur MP3, une unité de commande du moteur de la voiture ou de la centrale de pilotage de l'avion, une montre digitale, etc. La liste exhaustive des applications où l'ordinateur joue un rôle central, si tant est que l'on puisse l'établir, pourrait remplir quelques pages et s'enrichir tous les jours. Identifier les grands challenges qui sont face à l'architecte d'ordinateur n'est pas une opération simple et doit se faire en croisant une analyse que l'on peut qualifier d'horizontale concernant les challenges des éléments constitutifs du matériel, et de verticale en ce qui concerne les domaines d'utilisation, c'est-à-dire les applications. Matériel et logiciel constituent évidemment un tout, mais les challenges associés peuvent quand même être analysés séparément, et seuls certains aspects essentiels de la partie matérielle vont être considérés ici.

##### **L'architecture des ordinateurs**

L'architecture des ordinateurs est une spécialité souvent mal identifiée. Chaque informaticien de formation en a perçu les divers aspects à travers les cours d'architecture des ordinateurs qui lui ont été dispensés durant sa scolarité, souvent réduits à une simple description du fonctionnement général de l'ordinateur et avec un niveau de détails variables selon les centres de formation. Dans le monde de la recherche, l'architecte d'ordinateur est encore quelquefois perçu avec un fer à souder à la main. L'architecte de l'ordinateur est, comme l'architecte en bâtiment, chargé de

l'étude qualitative. Il prend en compte le besoin du client et s'appuie sur les connaissances techniques du moment. Dans le bâtiment, c'est l'ingénieur en bâtiment qui sera ensuite chargé de l'étude qualitative et de la vérification de la cohérence de l'ensemble. Dans les cas courants, l'architecte joue aussi le rôle d'ingénieur du bâtiment, ces deux spécialités se retrouvant complémentaires dans le cas de chantiers prestigieux. L'architecte d'ordinateur joue un rôle identique. Il prend en compte les besoins de l'application, caractérise le système répondant au besoin, puis le réalise ou le fait réaliser. Là aussi il faut distinguer les applications courantes, qui relèvent plus de l'ingénierie d'application, et la conception des systèmes à finalité(s) nouvelle(s) (plus performants, plus autonomes, plus fiables, plus sécurisés...) qui relèvent du domaine de la recherche et de plus en plus s'appuient sur des équipes aux compétences pluridisciplinaires.

Le métier d'architecte d'ordinateur a évolué avec la technologie, et se décline en diverses spécialités. Le travail le plus « noble » (ou du moins considéré comme tel par certains...) est probablement celui qui concerne la conception des processeurs dits généralistes que l'on retrouve par exemple dans les PC. C'est en quelque sorte le domaine de la motorisation pour Formule 1. De même que la voiture a besoin d'un châssis, de roues, etc., pour fonctionner, le PC doit intégrer autour de son processeur de la mémoire et des ports d'entrées et de sorties pour constituer l'ordinateur, autant de points critiques qui sont devenus autant de spécialités des architectes d'ordinateurs. L'ordinateur est maintenant ubiquitaire et intègre d'autres fonctionnalités, comme par exemple tout ce qui est relatif au traitement du signal dans un contexte multimédia (TV, récepteur satellite...) ou bien relatif au domaine des hyperfréquences en cas de communication sans fil (téléphone mobile, réseau WiFi...) support de l'ordinateur « pervasif ».

Pour réaliser ces systèmes, l'architecte d'ordinateur s'appuie sur des outils de description, de simulation et de synthèse de plus en plus complexes, dont l'évolution est stratégique pour la maîtrise du domaine, qui prend ses racines dans la microélectronique et s'étend jusqu'à la spécification du problème à traiter.

### **La microélectronique**

Le transistor, décliné sous diverses formes, est l'unique composant du circuit intégré, né en 1965. Depuis cette date, les techniques de fabrication n'ont jamais cessé de progresser, et selon les projections de la S.I.A Roadmap (<http://public.itrs.net/>) cette technologie va probablement continuer d'évoluer au même rythme pendant au moins les 15 prochaines années. Les limites physiques de fabrication, annoncées régulièrement comme une échéance prochaine mais toujours reculée, finiront par être atteintes, et l'alternative, si elle existe, reste à ce jour une préoccupation à long terme et relève de la recherche fondamentale.

Le circuit intégré est une pastille de silicium dont le procédé de fabrication comporte plusieurs centaines d'étapes. Sa taille est aujourd'hui de quelques cm<sup>2</sup>, contient quelques centaines de millions de transistors pouvant changer d'état (0 et 1) jusqu'à plusieurs milliards de fois par seconde, et le tout avec une consommation qui reste toujours de l'ordre de quelques watts par puce. L'évolution principale de la technologie repose sur des procédés de gravure des circuits de plus en plus fins (moins de 100 nanomètres aujourd'hui), ce qui a pour effet de permettre la réalisation d'un transistor de taille plus réduite. Conséquences : on met plus de transistors sur une même surface (qui par ailleurs augmente...), chaque transistor change d'état plus rapidement et consomme moins. Seule contrepartie : le procédé de fabrication devient de plus en plus complexe et la conception même du circuit nécessite des outils de plus en plus sophistiqués.

A chaque pas technologique – caractérisé donc de façon synthétique par une largeur de trait de dessin – on obtient un gain non négligeable notamment sur le paramètre fréquence de fonctionnement. Un système logique, comme un processeur, fabriqué à l'identique mais dans cette nouvelle technologie verra sa performance augmenter naturellement. Mais dans le même temps le crédit en transistors augmente, ce qui permet d'ajouter des dispositifs qui accroissent encore cette performance.

Comme la progression de la technologie est continue, la combinaison augmentation de la fréquence de fonctionnement et intégration de dispositifs accélérateurs de la performance fait que la puissance de calcul (mesurée sur des jeux d'essais de programmes) est multipliée à peu près par 10 tous les 5 ans. Cette progression suit toujours la loi empirique dite de Moore énoncée il y a quelques 30 ans, et d'après les projections de la S.I.A. roadmap, devrait se poursuivre sans rupture technologique durant au moins les 15 prochaines années. Ainsi en 30 ans (le premier microprocesseur date du début des années 70), la performance a donc été multipliée par 1 million, et le sera par un milliard avec 15 ans de plus...

Pour essayer de faire la part de l'évolution de la performance liée à ces deux facteurs, observons l'évolution de la performance sur une période de temps suffisamment longue. La fréquence de l'horloge est passée d'environ 5 MHz autour des années 80 pour atteindre environ 5 GHz autour des années 2005, soit une augmentation d'un facteur 1000 sur 25 ans, le taux d'augmentation étant relativement constant. Dans le même temps, la performance a augmenté de 5 ordres de grandeur (10 tous les 5 ans). La part liée à l'aspect architectural peut donc être évaluée à 100 (on parle ici exclusivement de performance, l'aspect architectural étant bien sûr étroitement lié à la technologie *via* la possibilité d'implémentation).

En résumé, l'évolution de la performance est due pour 3/5 à la technologie et pour 2/5 à l'architecture. Cette proportion se retrouve à peu près sous cette forme quel que soit l'échantillon de temps considéré, et peut donc être considérée comme une référence.

### **Le processeur : quelques repères**

Le premier microprocesseur date de 1971. Sa montée en puissance, continue et rapide, a progressivement rapproché sa performance de celle des « grands ordinateurs ». Au fur et à mesure des possibilités offertes par la quantité de transistors disponible sur une puce, on a progressivement intégré dans la puce tous les dispositifs indispensables au fonctionnement d'un système informatique. Le premier processeur 32 bits, standard encore actuel, est apparu en 1985. On lui a progressivement associé une unité de gestion de la mémoire, des opérateurs pour l'arithmétique flottante et de la mémoire sous forme de mémoire cache. C'est la situation de l'année 1990. On a généralisé le fonctionnement pipeline (le travail à la chaîne), puis introduit le fonctionnement superscalaire (dédoublé puis quadruplement des chaînes), puis le fonctionnement multithreadé (entrelacement de l'exécution de plusieurs programmes) en augmentant progressivement la taille de la mémoire intégrée, ce qui nous amène à la période actuelle. Mais cette évolution est celle des processeurs que l'on trouve dans les PC et ordinateurs haut de gamme, et elle n'est pas la seule. L'informatique qui concerne le traitement du son et de l'image a sa propre spécificité et fait usage de processeurs dits de traitement du signal (« DSP » en anglais) et qui ont suivi une évolution équivalente. Parallèlement, on a proposé des circuits contenant des structures régulières de blocs logiques configurables (« FPGA ») dont le nombre par puce ouvre la porte à de nouvelles applications.

La puissance de calcul est bien sûr multipliée par la mise en fonctionnement parallèle de plusieurs processeurs, et la façon de le faire remplit des ouvrages dont la norme est maintenant le millier de pages.

Il semble cependant que cette évolution se diversifie, en ce sens que d'autres critères sont à prendre maintenant en compte. La puissance de calcul est devenue suffisante pour beaucoup d'applications « de masse » et le problème est devenu dans ce contexte produire vite et au meilleur coût, ce qui passe par de la réutilisation de l'existant et donc une possibilité d'assemblage qui ne remet pas en cause tout le travail déjà réalisé.

En ce qui concerne les processeurs les plus performants, Intel prévoit à l'horizon 2008 de commercialiser un processeur de traitement comportant 1 milliard de transistors avec une fréquence de fonctionnement de 10 GHz. Il est probable que ce processeur exécutera plusieurs dizaines de milliards d'opérations par seconde. Le facteur technologique est lié à la fréquence annoncée de 10 GHz. Qu'en est-il de la complexité du processeur avec un milliard de transistors ?

Un budget de 10 millions de transistors est probablement suffisant pour réaliser un processeur haut de gamme intégrant tous les dispositifs essentiels, hors mémoire. On peut certes disserter sur ce chiffre, mais même si 20 millions de transistors s'avèrent indispensables, on ne passe guère que de 1 % à 2 % d'un milliard ! Que

fait-on du reste ? La tendance est de consommer ce budget en mémoire, car la mémoire, comme on va le voir, représente un vrai challenge, et aussi la solution la plus simple pour utiliser ces transistors. L'alternative qui consiste à placer plusieurs processeurs sur la même puce, avec toujours de la mémoire, ouvre la voie aux systèmes multiprocesseurs qui a ses propres spécificités.

### **La mémoire : capacité versus temps d'accès**

La mémoire de l'ordinateur est aussi constituée de puce comportant des structures régulières de transistors, donc *a priori* plus facile à concevoir. Mais la technologie de la mémoire ne suit pas la même évolution que celle du processeur. Si la capacité de la mémoire augmente de façon spectaculaire, il n'en va pas de même de son temps d'accès : on considère que la capacité de la mémoire (nombre de bits que l'on peut placer dans une puce) augmente de 400 % à peu près tous les 3 ans, alors que le temps d'accès à la mémoire ne s'améliore lui que d'environ 7 % l'an. Or, le processeur ne peut fonctionner à pleine puissance que si la mémoire lui fournit les instructions du programme et les données manipulées par ce dernier sans délai d'attente. Ce fossé entre le besoin du processeur (qui est multiplié par 10 tous les 5 ans) et ce que peut fournir la mémoire (multipliée par un facteur inférieur à 2 tous les 5 ans) ne cesse de se creuser et on a même parlé dans la littérature technique de « memory wall ». Mais la technologie et l'architecture arrivent à contourner ce mur. Si on sait faire des mémoires de grande capacité mais lentes, on sait aussi faire des mémoires très rapides mais de petite capacité. On associe ces technologies sous forme d'une hiérarchie de mémoire à 2 ou 3 niveaux, le premier niveau lié au processeur étant de très petite capacité mais très rapide, le dernier niveau étant situé juste devant la mémoire, d'un peu plus grande capacité mais aussi un peu plus lent. Ces niveaux de mémoire – les niveaux de caches – contiennent chacun des sous-ensembles d'information du niveau directement supérieur. De cette façon, le processeur arrive à être servi la plupart du temps par le premier niveau de cache, donc sans attente. Il faut cependant signaler que cette organisation mémoire ne concerne que les systèmes informatiques performants qui ont besoin de mémoires de grande capacité.

### **Les ports d'entrées et de sorties**

Un port représente un moyen de communication entre le processeur et le monde extérieur. Le processeur se contente de lire ou d'écrire des données dans le port. Mais le port lui-même contient de la logique qui interprète ces données pour en faire une interface. Deux interfaces sont à privilégier : l'écran de visualisation et le disque mémoire de masse, prolongement de la mémoire centrale. Tous deux évoluent à leur propre rythme et toujours de façon aussi spectaculaire. L'écran plat n'est-il pas en

train de prendre la place du traditionnel écran cathodique ? Le disque (classique, qui comporte une partie mécanique, ou le disque statique qui n'est rien d'autre que de la mémoire à semi-conducteur d'un type particulier), n'est-il pas en train de coloniser de nombreux appareils : récepteurs satellites, lecteurs MP3, etc. ?

Un port et la logique associée qui constitue une interface est un moyen de communication avec d'autres équipements informatiques. Le dialogue n'est possible que si tous deux parlent le même langage : la normalisation est de rigueur. Est-ce la technologie qui crée de nouveaux besoins, ou les besoins orientent-ils la technologie ? Il y a probablement une interaction entre les deux phénomènes, et un nouveau besoin peut conduire à la définition d'une nouvelle norme et donc de l'interface associée. Le challenge semble être dans ce domaine des ports d'entrées et de sorties plus au niveau des applications, sous réserve que puissance de calcul, moyens de communication et moyens de mémorisation soient à la hauteur. Les volumes de données échangés croissent de façon continue mais les supports de mémorisation ont une évolution qui permet d'en assurer le suivi sans problème. Par ailleurs, du fait également de l'augmentation continue des débits de transmission, le temps de transfert de ces données toujours plus volumineuses reste à peu près toujours du même ordre de grandeur. Enfin, dans ce monde ouvert, la puissance de calcul autorise des transferts de données sécurisés avec la mise en œuvre d'algorithmes de cryptage de plus en plus sophistiqués.

### **Le « haut de gamme »**

Les paragraphes précédents traitent du processeur, de la mémoire et des ports de communications que l'on trouve dans les machines haut de gamme : tous ces produits sont conçus exclusivement aux Etats-Unis. Intel et AMD dominent le marché de ces processeurs haute performance. L'Europe et l'Asie ne sont plus présentes sur ce créneau. Les bas prix de ces produits fabriqués en masse ont permis d'assembler des PC performants à coût très bas. Le fonctionnement en grappe de ces PC a permis d'obtenir des puissances de calcul comparables à celles des superordinateurs à un coût bien moindre, ce qui a tué le marché des superordinateurs. Les processeurs vectoriels Cray adaptés aux calculs scientifiques ont disparu, remplacés par des grappes de PC, sauf au Japon qui a conservé une activité dans ce domaine et garde même la palme de la machine la plus performante à ce jour : un NEC vectoriel à l'Earth Simulator Center, mais juste devant une longue liste de grappes de PC (voir <http://www.top500.org/>).

L'Europe est absente de ce marché et la recherche universitaire ne compte que quelques centres qui ont pour la plupart du mal à maintenir une activité dans ce domaine par manque de retours industriels. Il semble cependant stratégique de maintenir une activité dans ce domaine pour deux raisons principales. La première concerne la veille technologique : tout ou partie des mécanismes que l'on trouve

dans ces processeurs haut de gamme coloniseront progressivement tous les types de processeurs. La seconde est liée au fait que les idées continuent de progresser très rapidement et que participer à cet effort de recherche de nouvelles architectures de processeur est le seul moyen de ne pas dériver et être à la traîne de l'innovation.

Si l'Europe est absente de cette compétition, elle est cependant bien présente dans d'autres domaines plus ciblés du point de vue marché mais qui font aussi usage de systèmes informatiques où les besoins ne sont pas tout à fait de même nature que les systèmes haut de gamme, c'est-à-dire où la performance n'est pas l'unique critère de décision. En fait, il existe aujourd'hui toute une gamme de processeurs dont la puissance s'étage de façon continue des moins performants, ceux que l'on a par exemple dans les calculatrices de poche voire les convertisseurs de devises, aux plus performants *via* ceux que l'on retrouve dans les téléphones portables, les assistants personnels, etc.

Comme signalé en introduction, un processeur ne suffit pas pour faire une machine informatique. Le niveau d'intégration est aujourd'hui tel qu'il est possible pour bien des applications d'intégrer dans une même puce le processeur la mémoire et les ports d'entrées et de sorties. Il semble alors naturel non pas de réinventer à chaque fois une partie l'existant, mais de réutiliser tout ou partie de l'existant : on arrive ainsi aux concepts actuels complémentaires de bloc IP « Intellectual Property » et de SOC « System-On-Chip ».

### **System-On-Chip : réalité ou challenge ?**

Le SOC est aujourd'hui une réalité. Preuve en est qu'on le trouve dans bien des applications, la plus banalisée étant probablement le téléphone mobile. Comme son nom l'indique, un SOC n'est rien d'autre qu'un système informatique assemblé sur une puce. Assemblé est bien le mot qui convient. Une maison préfabriquée est un assemblage de pièces au format normalisé : des murs, des blocs fenêtres, des blocs portes, etc. Bien sûr, ces pièces existent dans divers formats « compatibles » c'est-à-dire qu'il est possible d'assembler divers formats de fenêtres sous réserve que les murs soient prévus pour ces divers formats. Un SOC est également un assemblage de pièces, ces dernières étant constituées de processeurs, de blocs de mémoire et des bloc d'interfaces d'entrées et de sorties. Mais il existe une grosse différence de conception : les pièces de la maison sont d'abord fabriquées puis assemblées tandis qu'un SOC est d'abord assemblé puis fabriqué. Les pièces utilisées dans l'assemblage d'un SOC ne sont rien d'autres que des descriptions virtuelles. Virtuelles au sens où les pièces sont fournies sous forme de fichiers de données prêts à être utilisés et nommés blocs IP. Réaliser un SOC revient ainsi à assembler des blocs IP. Mais il est évident que le bloc IP dont on peut avoir besoin n'existe pas forcément, et il faut alors le créer, ce qui représente une activité inventive à part entière. De plus, les blocs IP assemblés ne restent pas statiques comme les fenêtres

dans un mur : ils communiquent entre eux et ce point pose le problème de l'assemblage de ces blocs IP, qui doit donc se faire par une structure particulière, sorte de mur porteur commun, mais qui doit présenter des critères de qualité suffisants en termes de bande passante et de latence de communication, dont on sait qu'ils ne font qu'augmenter, ce qui fait que le SOC reste un challenge. Mais comme son nom l'indique « System-On-chip » ne fait « qu'assembler » sur une puce des blocs fonctionnels, ce qui ne représente en fait qu'une évolution technologique des circuits intégrés assemblés sur une carte de circuit imprimé voire sur un ensemble de cartes placées dans un châssis.

Les challenges viennent essentiellement des applications visées, liées au monde de la communication et du multimédia qui ajoute de nouveaux aspects. Le premier vient du mot multimédia, qui adjoint au processeur de traitement « classique » un processeur de traitement du signal (DSP)... ou l'inverse, tant il est difficile de dire qui a le rôle principal. Le second provient du mot communication ou plus exactement à sa variante télécommunication, qui fait intervenir le monde des hyperfréquences, spécialité à part entière. Le troisième provient du critère de mobilité souvent associé, ce qui signifie autonomie du point de vue énergétique. Le quatrième est une conséquence de la rapide évolution du marché (Nokia a présenté plus de 30 nouveaux modèles de téléphones portables en 2002), le « time to Market ».

L'intersection de ces aspects donne deux dénominateurs communs : norme et CAO. Norme implique interopérabilité, CAO implique aide à la conception et réalisation.

Dans un contexte SOC, et d'un point de vue architecture, les normes définissent la façon ou les façons de connecter un bloc IP à d'autres blocs IP. Il n'existe pas de solution unique, car le SOC peut être un système relativement simple et l'assemblage des blocs IP alors réalisé de façon simple *via* un bus unique de communication par exemple. Mais le SOC peut aussi être un système performant et nécessiter un système de connexion plus sophistiqué. Ce système de connexion est un challenge actuel : disposer d'une gamme de systèmes de connexion couvrant tous les niveaux de performances nécessaires (actuels et à venir...), transparente du point de vue connexion à tout type de blocs IP, représente un travail de recherche important.

La CAO est l'autre volet dans lequel l'investissement a été jusqu'à présent colossal, mais probablement en proportion faible face à ce qui va probablement être nécessaire de développer. Il s'agit non seulement de développer des outils, mais aussi des méthodes et probablement de nouvelles approches de conception. Se faire assister de plus en plus dans toutes les étapes de conception et de réalisation n'est plus un challenge mais une réalité. Ce qui reste un challenge est de rendre cette assistance plus conviviale, plus fiable, etc.



### SOC versus haut de gamme

La présentation ci-dessus semble placer le SOC en retrait par rapport aux systèmes dits « haut de gamme ». Cela est vrai si l'on reste sur le plan traditionnel de la performance en environnement calcul scientifique. Il n'en est rien dans la plupart des autres cas où la performance n'est pas le critère principal. Un SOC est un système tout aussi complexe qu'un système haut de gamme, et peut être même plus dans la mesure où il associe plusieurs spécialités et des contraintes plus sévères. Il a aussi un marché plus large que celui des systèmes haut de gamme, lesquels restent un peu une vitrine technologique pour les quelques constructeurs (américains) présents sur ce créneau. Ces derniers ont pour objectif de faire des bénéfices et se sont orientés vers le marché du jeu, plus vaste que celui du calcul scientifique. Comme les besoins en puissance de calcul pour le jeu réaliste sont, en gros, du même ordre de grandeur que ceux du calcul scientifique, le PC est entré en concurrence avec la console de jeu, et curieusement depuis peu on découvre que cette dernière peut aussi faire du calcul scientifique à moindre coût (voir <http://arrakis.ncsa.uiuc.edu/ps2/index.php>).

A l'inverse des systèmes haut de gamme, l'Europe est très présente sur le marché du SOC appliqué au monde de la communication et du multimédia. Elle arrive à imposer ses normes sur le plan international (Bluetooth pour la communication, Amba comme bus de communication pour SOC, etc.) et est en passe de le faire aussi pour d'autres domaines liés aux systèmes informatiques dédiés.

Compte tenu du nombre de transistors que l'on peut placer sur une puce, il semble assez naturel de penser que tout finira par un SOC, y compris les processeurs haut de gamme. En effet, si l'on se place sur le plan de la performance à chaque cycle d'horloge, le processeur a besoin de plusieurs instructions et plusieurs données. La contrainte de temps est donc liée à ce cycle d'horloge. L'onde électrique, qui véhicule l'information, se propage au mieux dans la puce aux environs des  $2/3$  de la vitesse de la lumière, soit 200 000 km par seconde. Ce chiffre faramineux, rapporté aux fréquences d'horloge actuelles, devient dérisoire : entre deux tops d'une horloge à 10 GHz, l'onde électrique n'a le temps de parcourir que 2 cm ! Cela implique que les composantes d'un système fortement couplé, c'est-à-dire comportant de nombreux échanges de messages courts et nécessitant des synchronisations fréquentes, devront être de plus en plus proches physiquement. C'est là une nouvelle dimension que les architectes de machine devront intégrer.

### Conclusion

Pour le grand public, l'ordinateur est une bête à calcul. Il se trouve que la part de marché qui lui correspond est de moins en moins importante, non pas que le domaine devienne moins important, mais simplement parce que le champ d'application de

l'informatique s'étend. Les fabricants de microprocesseurs font les produits qui correspondent au besoin (business first), et le processeur de calcul s'est spécialisé ces dernières années dans le jeu, tout en continuant à satisfaire globalement le besoin en calcul. Du jeu, on passe naturellement on monde du multimédia, qui fait un usage abondant de processeurs plus spécialisés, les DSP. Cette informatique est maintenant devenue mobile et s'est associée au monde de la téléphonie. De nouvelles contraintes sont apparues avec ces applications. Cette informatique ubiquitaire permet un accès de plus en plus simple à des masses colossales de données, qui apportent de nouvelles contraintes aux systèmes informatiques.

Ces quelques points ne représentent qu'un échantillon des domaines d'application de l'informatique. Il est aujourd'hui difficile d'isoler complètement tous ces domaines. Au cœur se trouve le SOC, décliné sous toutes les formes présentées dans les paragraphes précédents, et la part de l'architecte de machine, si elle apparaît comme moins fondamentale au sein de cette approche pluridisciplinaire du problème, n'en reste pas moins stratégique car c'est elle qui conditionne les choix matériels.

Daniel Litaize, Abdelaziz M'zoughi

{litaize, mzoughi}@irit.fr