

07

SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION (INFORMATIQUE, AUTOMATIQUE, TRAITEMENT DU SIGNAL)

Michel WEINFELD
Président

Pascal Bondon
Jean-Marc Chassery
Yves Chiaramella
Maxime Crochemore
Cécile Durieu
Christophe Fonte
Paul Gastin
Sylviane Gentil
Michel Habib
Claude Jard
Rogelio Lozano
Henri Maitre
Bernard Oriola
Henri Marcel Prade
Isabelle Queinnec
Michel Roussaly
Robert Saglio
Camilla Schwind
Florence Sedes
Jean-Bernard Stefani

La section 07 porte le même nom que son département d'appartenance principal : sciences et techniques de l'information et de la communication. Elle est centrée sur trois grands domaines scientifiques : l'informatique, l'automatique et le traitement du signal. Chacun de ces domaines est en lui-même très varié, recouvrant des disciplines souvent connexes, qui sont par ailleurs très imbriquées avec d'autres disciplines ou domaines relevant du même département scientifique ou d'autres départements comme les sciences de la vie ou les sciences de l'homme et de la société, sans oublier les mathématiques. De plus en plus, les domaines couverts par la section se révèlent pluridisciplinaires et très diffusants, et c'est sans doute une caractéristique particulière et notable.

Les interactions des domaines scientifiques de la section avec ceux d'autres disciplines peuvent sommairement se décliner en deux catégories. D'un côté, des interactions fondamentales, où les questionnements scientifiques s'enrichissent mutuellement, ouvrant des champs de recherche originale et fondamentale. On peut citer par exemple les rapprochements de la mécanique quantique avec la cryptographie, ceux de la physique statistique avec la combi-

natoire, de la génétique avec la théorie des langages, la théorie des systèmes complexes, etc. D'un autre côté, on trouve des interactions instrumentales, dans lesquelles des approches, des techniques et des outils résultant des recherches menées dans le « cœur de disciplines » de la section viennent renforcer les méthodes d'investigation et les procédures théoriques ou expérimentales dans d'autres domaines scientifiques : la robotique enrichit la chirurgie, les techniques de calcul permettent ou facilitent des simulations à grande échelle, les techniques de gestion des bases de données contribuent à la génomique, les recherches en architecture se développent avec la réalité virtuelle, etc. Partageant cette « faculté de fertilisation » quasi-universelle avec la physique, les STIC trouvent, peut-être plus que cette dernière, de nouveaux champs d'investigation fondamentaux dans ces interactions avec les autres domaines de la science, en plus des questionnements de nature « interne ».

Domaines scientifiques en expansion rapide, portés par de courts délais, souvent bien plus brefs que dans d'autres disciplines, entre l'obtention de résultats fondamentaux et leur mise en application, les disciplines des STIC ont connu et continuent cependant à connaître un développement humain insuffisant en termes de potentiel de recherche. Si l'université a su répondre par un accroissement important des effectifs d'enseignants à la demande de la quantité grandissante d'étudiants, motivée elle-même en grande partie par les besoins en emplois qualifiés, le CNRS n'a pas su prendre en compte convenablement les besoins des laboratoires en chercheurs à plein temps, et donc y répondre de façon satisfaisante. La création du département STIC à l'automne 2000, accompagnée par une importante quantité de postes mis au concours en 2001 et, dans une moindre mesure, en 2002, a certes marqué une rupture par rapport au passé, mais cet effort de recrutement est très fortement retombé en 2003, en dépit de l'inscription des STIC comme priorité stratégique de l'organisme. La section 07 est l'une des très rares sections du CNRS dans laquelle la proportion de chercheurs par rapport à celle des enseignants – chercheurs, comptée dans les unités propres ou associées,

est particulièrement faible, de l'ordre de 15 %. Ce n'est que par des efforts continuels et significatifs d'embauche de chercheurs que cette proportion pourrait être ramenée à des valeurs plus satisfaisantes, donnant aux laboratoires la capacité à occuper ou à maintenir des positions de tête dans la très rude et continue concurrence internationale. Les perspectives globales de recrutement dans les organismes publics de recherche en général, et au CNRS en particulier, donnent malheureusement à penser que cet objectif sera extrêmement difficile, sinon impossible à tenir, à moins de défavoriser brutalement et massivement de nombreuses autres disciplines scientifiques, ce qui serait évidemment tout aussi désastreux.

La section 07 est dotée d'un important partenaire, en l'occurrence l'INRIA. Les relations du CNRS et de celui-ci ne sont pas toujours administrativement ou politiquement aussi simples qu'on pourrait le souhaiter, mais de très nombreuses collaborations scientifiques, souvent concrétisées par des laboratoires mixtes en cotutelle, démontrent en permanence la vitalité du milieu scientifique, et améliorent la compétitivité globale de celui-ci. Il a été récemment prôné une séparation, en sorte que les tutelles de laboratoires soient mutuellement exclusives, une sorte de partage géographique et/ou thématique des activités, au nom d'une meilleure gestion des efforts et des moyens. La réalité du terrain et la volonté des chercheurs, toutes tutelles confondues, ne vont pas du tout dans ce sens, et il reste à espérer que l'intelligence et le réalisme prendront le pas sur le dogmatisme, dans un avenir aussi proche que possible.

Beaucoup de comités, de commissions, de conseils, rassemblés à divers titres et à diverses occasions depuis des années n'ont cessé d'insister sur l'importance des disciplines scientifiques rassemblées au sein des STIC, fournissant en abondance des arguments forts, tant sur le plan proprement scientifique que sur les perspectives de développement et d'applications que ces disciplines portent. Il peut donc paraître un peu convenu qu'une instance d'évaluation comme une section du Comité national de la recherche scientifique s'exprime également,

mais avec une constante de temps qui est celle de son mandat, soit quatre ans, notablement trop longue pour suivre de près une conjoncture qui progresse en général bien plus rapidement. De plus, l'usage qui peut être fait de ses remarques (et éventuellement de ses recommandations) est fort aléatoire, surtout quand on peut constater combien des plans stratégiques, par définition réfléchis et forcément dotés d'une certaine stabilité, peuvent être contournés ou même battus en brèche dès le début de leur application, comme cela a été le cas au CNRS il y a peu d'années. La section 07 s'est néanmoins, sans illusions mais avec la conviction de détenir une certaine part de vérité, livrée à cet exercice statutaire. Le texte qui suit résulte de contributions et d'échanges, particulièrement entre les membres de la section, mais aussi avec les membres de la collectivité scientifique qu'elle s'efforce de représenter. Il est organisé en grands thèmes scientifiques, sans prétention à l'exhaustivité. L'ordre de présentation n'est pas significatif de quelque priorité ou hiérarchie de valeur que ce soit, mais reflète seulement l'énonciation linéaire des thèmes qui composent son horizon scientifique.

1 – GÉNIE LOGICIEL, PROGRAMMATION, FIABILITÉ

Le génie logiciel consiste, comme toute science de l'ingénieur, à proposer des solutions pratiques, fondées sur des connaissances scientifiques, afin de produire et maintenir des logiciels avec l'assurance d'en maîtriser les coûts, la qualité et les délais. Dans ce domaine, il est admis que la complexité d'un logiciel croît de façon exponentielle avec sa taille. Or d'une part, la taille elle-même des logiciels est en moyenne multipliée par dix tous les dix ans, et d'autre part, la pression économique a conduit à réduire les durées de développement, et à augmenter les taux de modifications apportées aux logiciels.

Pour faire face à ces problèmes, on s'appuie aujourd'hui sur la notion de composants logiciels développés indépendamment les uns des autres. L'assemblage de ces composants permet de construire des familles de produits partageant de nombreux modules, tout en restant ouvertes à de nouvelles évolutions. Bien que s'appuyant sur un savoir-faire certain qui commence à être formalisé à l'aide de gabarits de conceptions (« design patterns »), ce processus d'assemblage reste essentiellement manuel, donc très coûteux et sujet à erreurs.

Il est donc indispensable à la fois d'outiller le processus de conception par aspect, et d'inventer des techniques qui permettent d'en maîtriser la validation. Il est ainsi nécessaire de pouvoir représenter et raisonner sur de tels assemblages de composants, ce qui se fait par l'élaboration de modèles représentant et isolant différents aspects d'une ligne de produits, comme par exemple les variations fonctionnelles, des aspects structurels (paradigme objet), des aspects dynamiques (langages de scénarios), sans négliger bien sûr des aspects non fonctionnels comme la qualité de service (performance, fiabilité, etc.) décrits sous forme de contrats ou encore les caractéristiques de déploiement, qui deviennent même prépondérants dans le domaine des systèmes répartis réactifs et temps réel. Cette ingénierie du logiciel fondée sur les modèles pose de nombreuses questions fondamentales sur la composition d'aspects.

La robustesse des applications informatiques et leur rapidité de développement sont accrues par l'utilisation de langages de programmation expressifs et sûrs. Ces dernières années ont permis de hisser les environnements de programmation typée, et notamment les langages déclaratifs ou fonctionnels, à un niveau de performance et de sûreté remarquable, et de fait ils ont été utilisés avec succès dans des contextes divers : applications réparties dans le domaine du travail coopératif, gestion et maintenance d'équipements téléphoniques, compilateurs, outils d'accès au Web, linguistique computationnelle, etc. D'un point de vue pragmatique, pour pouvoir être utilisés industriellement, ces outils de haut niveau

nécessitent une bonne interopérabilité avec les bibliothèques et les composants logiciels développés dans d'autres langages, et ceci constitue donc une priorité de recherche.

Le typage statique accroît la sécurité de la programmation, la rapidité du développement d'applications et facilite leur maintenance. Un des objectifs du typage est la détection rapide d'erreurs de programmation. Les recherches dans ce domaine sont donc de portée très générale. Lorsqu'on allie à cette détection d'erreurs des facilités de structuration du code (fonctions, modules, objets), on améliore l'abstraction et la réutilisabilité et l'on se donne les moyens de maîtriser l'évolution des systèmes complexes. Les outils de l'analyse statique et de l'interprétation abstraite, de création française, ont des objectifs similaires et sont actuellement utilisés avec succès pour l'analyse de logiciels critiques temps réel synchrones embarqués.

Les systèmes de types figurent aussi parmi les formalismes principaux de recherche de preuves de programmes où les types sont vus comme des spécifications. En particulier, la spécification et la vérification de politiques de sécurité sont des domaines actuellement très actifs à cause du succès du code mobile et des cartes à puce « ouvertes » (cartes Java), car il s'agit de programmes qui s'exécutent dans un contexte très particulier, et pour lesquels il semble possible de définir des politiques de sécurité raisonnables. Dans le même esprit, on assiste aujourd'hui à une rencontre entre les compétences algorithmiques traditionnelles de la cryptographie et celles plus logiques ou sémantiques qui abordent la sécurité des protocoles cryptographiques avec l'expérience des assistants de preuve et de la sémantique dénotationnelle.

Un autre domaine aujourd'hui très actif est celui de la programmation par contraintes, né il y a une quinzaine d'années d'un rapprochement de la programmation logique, de la programmation linéaire venant de la Recherche Opérationnelle, et des techniques de propagation de contraintes issues de l'Intelligence Artificielle. On assiste à un véritable renouveau de la Recherche Opérationnelle, et ce succès

illustre bien l'apport des recherches sur les langages déclaratifs pour combiner efficacement des techniques de résolution hétérogènes (numériques, symboliques, déductives, heuristiques) pour la modélisation à la fois du problème à résoudre et des stratégies de résolution, entraînant une diminution importante des coûts de développement et de maintenance du logiciel. Cette contribution permet aussi d'attaquer des problèmes nouveaux, NP-difficiles, dans leur globalité, ce qui était difficilement envisageable sans des outils adaptés pour les programmer. L'effort le plus important de recherche porte maintenant sur les langages concurrents avec contraintes, qui ont des applications attendues en bio-informatique, où, au-delà du traitement de problèmes combinatoires en biologie, ils offrent des outils puissants de modélisation et d'analyse des processus biologiques multi-échelles.

La programmation orientée objets évolue aujourd'hui vers des paradigmes à plus grande échelle à base d'aspects et de composants. On citera enfin plus brièvement, parce que ces sujets relèvent principalement d'autres sections de ce rapport, les langages de programmation de haut niveau pour le temps réel (tels que LUCID Synchrones), pour la manipulation de documents XML et plus généralement de données semi-structurées (tels que X-Duce), pour le code mobile (tel que JoCaml, basé sur un calcul de processus mobiles élégant et facilement implantable dans un environnement distribué, le « Join calcul »).

Dans le domaine amont, la fascinante correspondance de Curry-Howard entre programmes et preuves mathématiques, entre spécifications et formules, découverte il y a une vingtaine d'années, continue de fournir des clés pour la compréhension, la conception et l'implantation des langages de programmation. Citons par exemple la très récente découverte d'une interprétation calculatoire de l'axiome du choix de la théorie des ensembles, qui correspond à un mécanisme d'horloge. Cette correspondance est à la base d'un des plus beaux fleurons de la recherche française sur les preuves de programmes, le système Coq, assistant de preuve aujourd'hui utilisé par de nombreuses équipes en France

et dans le monde, aussi bien pour la formalisation de preuves mathématiques que pour la certification de programmes. Le principal défi est maintenant d'étendre ces correspondances entre logique et programmation à des paradigmes tels qu'objets ou calculs de processus, qui sont aujourd'hui encore beaucoup moins bien compris et structurés que la programmation séquentielle, impérative ou fonctionnelle.

Les réseaux et systèmes informatiques prennent un rôle et une place chaque jour plus importante dans tous les aspects des activités humaines, mais l'actualité nous montre bien leur vulnérabilité. Il devient donc indispensable de savoir définir et garantir leur fiabilité, dans une acception large du terme (sûreté de fonctionnement, sécurité, confidentialité, intégrité, etc.). L'industrie prend conscience de la nécessité d'utiliser des méthodes formelles dans les secteurs d'application requérant une grande fiabilité.

Le développement de systèmes fiables repose d'abord sur la détection et l'élimination des fautes. Pour cela, il faut spécifier formellement les propriétés attendues du système avant de vérifier ces propriétés en utilisant par exemple des techniques d'abstraction, d'interprétation abstraite, de preuve de programmes, de vérification automatique (« model checking ») ou de test. La recherche est très active dans toutes ces directions.

Pour compléter ce qui a été évoqué plus haut sur l'interprétation abstraite ou les assistants de preuve, citons que l'un des challenges dans le domaine de la vérification automatique est de traiter d'abstractions infinies pour prendre en compte l'aspect dynamique des programmes (appels récursifs, création de processus, etc.), certaines données non bornées, des familles de programmes paramétrées, etc.

Sur le plan de la validation par le test, le défi est de pouvoir générer automatiquement des jeux de tests à partir du programme et de sa spécification. Une approche consiste à représenter à un haut niveau d'abstraction des patterns de test, et d'en dériver des tests spécialisés. Des problèmes fondamentaux intéressants se posent dans le domaine du test réparti.

Des avancées remarquables ont été obtenues permettant d'appliquer ces méthodes formelles de vérification à des systèmes critiques réels de taille raisonnable. Cependant, de nombreuses recherches sont encore à mener afin d'améliorer l'automatisation de ces techniques et leur capacité à traiter de systèmes de grande taille. Il serait utopique de viser le zéro-défaut pour les systèmes informatiques, ne serait-ce qu'à cause de leur complexité croissante ou de leur évolution constante (ajout de fonctionnalités par rapport aux spécifications initiales, etc.). La recherche s'intéresse donc activement à la tolérance aux fautes afin que les systèmes puissent assurer un service, même minimal, en présence de fautes. Par ailleurs, il est essentiel de pouvoir évaluer la présence de fautes et leurs conséquences. Cette évaluation est basée sur une modélisation stochastique.

2 – SYSTÈMES RÉPARTIS ET RÉSEAUX DE COMMUNICATION

Les recherches en « systèmes répartis et réseaux de communication » informatiques s'intéressent à la construction de systèmes informatiques mettant en œuvre des ressources de traitement et de stockage de l'information géographiquement dispersées, et à celle des infrastructures matérielles et logicielles qui leur sont liées (incluant par exemple les systèmes d'exploitation, les logiciels intermédiaires, les protocoles de communication). Elles portent notamment sur des questions d'architecture de système, de génie logiciel, d'algorithmique, d'analyse et d'évaluation des performances, avec comme ambition la solution de problèmes de communication, de sûreté de fonctionnement (tolérance aux fautes, sécurité, disponibilité, etc.), de gestion de ressources (contrôle d'admission, allocation et partage de charge, etc.), rendus plus difficiles en raison des caractéristiques classiques des systèmes

informatiques répartis : asynchronisme des traitements et des communications, absence d'horloge globale, et occurrence de défaillances.

Un fait déterminant pour ces recherches dans les années qui viennent réside dans l'émergence d'une informatique omniprésente, conséquence de deux tendances de fond qui entraînent un accroissement continu de la complexité des systèmes : d'une part la multiplication des capacités de traitement, de stockage et de communication de l'information à des échelles toujours plus vastes (des étiquettes intelligentes aux grilles de calcul, des réseaux spontanés à l'Internet planétaire), d'autre part l'imbrication croissante d'éléments informatiques dans les artefacts et les procédés humains. Un tel environnement se caractérise par les propriétés suivantes :

- *dynamicité* : les caractéristiques, la configuration et la charge des systèmes concernés ne sont pas fixées à l'avance et peuvent évoluer au cours du temps (nouveaux éléments ajoutés ou enlevés en cours d'exécution, mobilité physique et logique, occurrences de pannes) ;

- *dispersion* : les systèmes visés impliquent plusieurs éléments interconnectés, géographiquement dispersés, et doivent être conçus comme des collections de domaines de ressources et d'administration autonomes ;

- *multi-échelles* : les systèmes visés comportent des éléments de traitement, de stockage et de communication de l'information caractérisés par des capacités très variables et mobilisables à des échelles différentes (hiérarchies de réseaux de processeurs et de nœuds de stockage) ;

- *irrégularité* : les systèmes visés se caractérisent par une très forte hétérogénéité de leurs éléments et de leurs modes d'organisation ; ils comportent des éléments aux capacités et aux fonctions très diverses, accessibles à des conditions et en fonction de politiques d'accès multiples et en constante évolution.

Ces différentes propriétés exacerbent les difficultés liées à la construction de systèmes répartis. Plusieurs progrès notables ont été

réalisés au cours des années récentes. Ainsi, la prise en compte de la dynamique a conduit au développement de systèmes adaptables et dynamiquement configurables, à différents niveaux (système d'exploitation, couches de communication, logiciels intermédiaires), et le développement de modèles de programmation et de technologies logicielles afférentes (composants logiciels, réflexion, programmation par aspects, etc.). La popularité croissante de systèmes de partage de données à grande échelle (réseaux dits « pair à pair » tels Freenet, Kazaa ou BitTorrent) a suscité des avancées importantes en matière d'algorithmique répartie « calable » (notamment, développement de protocoles probabilistes, et d'algorithmes de routage et de localisation basés sur des tables de hachage réparties). La dispersion et l'irrégularité des systèmes concernés commencent à être prises en compte tant dans des modèles de programmation (avec notamment le développement de nouveaux modèles formels de la concurrence tels le Join calcul ou le calcul des Ambients, basés sur des notions explicites de localité), que des modèles de réseaux et de systèmes utilisés en algorithmique. De même, plusieurs progrès notables en matière d'architecture, d'algorithmique et d'analyse de systèmes répartis et réseaux de communication ont été réalisés. Les abstractions de base impliquées dans la construction de systèmes répartis sûrs sont mieux connues et analysées (par exemples détecteurs de défaillances, objets partagés pour la prise de décision fiable en environnement réparti). Avec la constatation que les techniques classiques de réplication à base de protocoles de groupes ne passaient pas à l'échelle au-delà de quelques dizaines de serveurs, de nouveaux mécanismes de tolérance aux fautes (accidentelles ou dues à la malveillance), mieux adaptés à des systèmes à large échelle et à des réseaux WAN ont été introduits (par exemple algorithmes basés sur « quorum replication »). Les questions de cohérence en environnement réparti et les compromis à réaliser entre cohérence et fiabilité d'un côté, et performance et passage à l'échelle de l'autre, sont mieux comprises et plusieurs approches dites « optimistes » ont été proposées pour y répondre. La gestion de la qualité de

service dans les systèmes répartis, à plusieurs niveaux (réseaux, systèmes d'exploitation, logiciels intermédiaires ou « middleware »), est également mieux comprise, tant sur le plan architectural (systèmes d'exploitation et logiciels intermédiaires « resource-aware », différenciation de services dans les réseaux IP) qu'algorithmique (par exemple ordonnancement, contrôle d'admission, contrôle de congestion). La prise en compte de la mobilité physique a vu de nombreux développements, tant au niveau des réseaux de communications (par exemple réseaux spontanés, mobilité IP) que des logiciels intermédiaires.

En dépit de ces progrès, la construction d'infrastructure de communication et d'infrastructures logicielles sûres pour une informatique omniprésente continue de poser de nombreux problèmes ouverts en raison des caractéristiques signalées ci-dessus. On peut regrouper ces différents problèmes, grossièrement, sous la forme de quatre défis principaux :

- le passage à l'échelle concerne la possibilité de déployer et de faire fonctionner ces infrastructures de manière efficace selon plusieurs dimensions : capacités (des processeurs, des réseaux), nombre (des objets matériels et logiciels impliqués, des utilisateurs), espace (dispersion spatiale), organisation (différentes formes d'organisation, depuis des structures locales spontanées jusqu'à des fédérations multi-entreprises) ;

- la qualité de service concerne la fourniture de garanties de correction et de niveau de service au cours de l'exécution d'un système ou d'une application. Un accord sur un niveau de service (« service level agreement ») peut concerner notamment des contraintes temporelles (par exemple temps de réponse), de ressources (par exemple bande passante disponible), ou de sûreté de fonctionnement (par exemple taux de disponibilité, niveau de sécurité) ;

- l'administrabilité concerne la possibilité de superviser et de contrôler, à des échelles multiples, le comportement et l'évolution des systèmes visés, de préférence en minimisant les interventions manuelles et la centralisation. En effet, compte tenu de la complexité et de la dynamique croissante des systèmes visés,

conserver un administrateur humain dans une boucle de commande devient difficile sinon impossible. D'où le défi que constitue la construction de systèmes répartis et de réseaux auto-configurables, auto-administrables et, dans la mesure du possible, auto-réparables ;

- enfin, la programmabilité concerne la possibilité de construire de nouveaux systèmes et applications par composition et coordination, à plusieurs échelles, tout en offrant aux concepteurs et aux programmeurs des garanties de sûreté (par exemple en termes d'absence d'erreurs de communication, de consommation de ressources, de sécurité, etc.) comparables à celles dont ils peuvent disposer dans une programmation centralisée classique.

Aborder ces différents défis impose de revisiter plusieurs services clé d'infrastructure et d'aborder de nouvelles questions. Ainsi en est-il de la fourniture de fonctions intégrées de communication (par exemple via IP), de localisation et de découverte de services couvrant la gamme toujours croissante de technologies de réseaux (optique, sans fil, LAN, MAN, WAN, etc.), permettant des communications entre plusieurs réseaux, la prise en compte de la mobilité physique et d'un fonctionnement en mode déconnecté, la gestion de basculements (« hand-over ») entre réseaux, la prise en compte de réseaux spontanés (« ad-hoc networks »). On peut noter à ce sujet que les frontières traditionnelles entre ingénierie des systèmes informatiques et ingénierie des réseaux s'estompent. Par exemple, dans un réseau spontané, des fonctions de routage, traditionnellement dévolues à l'infrastructure réseau, peuvent se trouver rendues par le logiciel intermédiaire (« middleware ») ou le système d'exploitation des nœuds du réseau. La gestion de la qualité de service de bout en bout pose un grand nombre de questions ouvertes, depuis la définition de protocoles de routage efficaces, performants et « scalables », jusqu'à la gestion à grande échelle de ressources de traitement de l'information (par exemple à des fins de mise en place de grilles de traitement de l'information comme des grilles de calcul (« computational grids »), en passant par la définition d'un contrôle adaptatif du trafic et de la

charge, la définition de spécifications de qualité de service exécutables, ou encore le contrôle d'admission et le contrôle de congestion multi-niveaux. À ce sujet, la construction de réseaux d'« overlay » (entendus au sens de réseaux virtuels superposés à un Internet, par exemple réseaux de distribution de contenu – « content delivery networks » – de type Akami, Digital Island – ou réseaux pair à pair – « peer-to-peer networks » – de type Freenet, Gnutella) fournit une piste prometteuse, au moins pour certains types de service.

Mais il reste largement à déterminer, en fonction du service considéré, comment le mettre en œuvre de la manière la plus efficace et la plus performante, en particulier en considérant les contraintes mutuellement antagoniques de capacités, de localité, de disponibilité, de sécurité et de dynamique. La gestion de la qualité de service de bout en bout, comme l'administration et la programmation de ces systèmes répartis ouverts, hautement dynamiques et multi-échelles, suppose de les concevoir comme des systèmes (re- et auto-) configurables avec les problèmes liés d'intégrité et d'efficacité, y compris en présence de défaillances. Cela implique le développement de modèles de programmation nouveaux prenant simultanément en compte des notions de composants, de localités, de communication et de coordination réparties, de défaillances, de ressources, et des propriétés de sûreté afférentes. Cela implique aussi le développement de techniques d'implantation et de génie logiciel permettant une mise en œuvre efficace de ces modèles, offrant une maîtrise de l'architecture logicielle des systèmes visés, et permettant une prise en compte modulaire d'aspects divers. L'administration, et a fortiori l'auto-administration, de tels systèmes soulève également un grand nombre de questions. La gestion de la sécurité, l'un des domaines traditionnels de l'administration de systèmes et de réseaux, constitue bien sûr en soi un défi majeur dans un environnement ouvert et hautement dynamique, depuis la fourniture de fonctions de base telles l'isolation et l'encapsulation (insuffisamment réalisées dans les infrastructures logicielles actuelles), jusqu'à la

mise en œuvre automatique ou semi-automatique de politiques de sécurité, en passant par la définition des mécanismes nécessaires pour contrer des attaques de déni de service, ou la définition de mécanismes « scalables » d'authentification et de gestion de la confiance (« trust management »). On peut noter à ce sujet qu'une question difficile (et notamment sur le plan technique) portera sur la combinaison d'exigences de sécurité et de respect de la vie privée. La mise en œuvre même des fonctions d'administration pose de redoutables problèmes, surtout à grande échelle : par exemple, d'instrumentation dynamique et multi-échelles, à des fins d'observation, de mesure et de comptabilité ; de construction de systèmes de notification et d'orchestration « scalables » ; de systèmes en ligne et fédérés d'analyse, de diagnostic et de planification, à des fins de supervision et de commande.

3 – BASES DE DONNÉES, RECHERCHE ET SYSTÈMES D'INFORMATION

Les volumes croissants d'information multiforme disponibles, et la nécessité, à l'heure de l'ubiquité et de la mobilité, de donner à l'utilisateur accès à ses données à tout moment, de n'importe où, depuis n'importe quel terminal, constituent les enjeux de nouvelles générations de Systèmes d'Information (SI).

L'information provient aujourd'hui de multiples ressources préexistantes, autonomes, hétérogènes : bases de données relationnelles et/ou objets, documents multimédia, fichiers semi-structurés ou non structurés, etc. Sa gestion requiert donc le recours à la représentation, l'intégration, l'éventuelle unification et la manipulation de données multiformes. Les hétérogénéités sont multiples, tant en terme de contenus (langue, terminologie, sémantique, etc.), que de formats (média, supports, etc.). Malgré

les propositions de normalisation, comme MPEG 7, HyTime, XML et ses dérivés, il faut pouvoir traiter nombre de données légataires qui cohabitent avec des fichiers balisés. C'est dire l'importance des efforts à poursuivre pour la manipulation de données non plus structurées *a priori* mais semi-structurées c'est-à-dire à structure irrégulière, incomplète, inconnue *a priori*, dont les caractéristiques peuvent éventuellement être extraites, mises au jour *a posteriori*. D'autres facteurs d'hétérogénéité relèvent du caractère discret ou continu, spatial et/ou temporel, de la multidimensionnalité des données ou des annotations et descripteurs qui leur sont associés. L'évolutivité constitue également un aspect important de la dynamique des données, posant des problèmes de qualité, en terme de contenu et/ou de structure : fraîcheur, complétude, fiabilité, cohérence, etc.

Offrir l'accès à de gros volumes d'information hétérogène, répartis à grande échelle, sur des configurations allant de la carte à puce aux gisements de données, implique donc de mettre en œuvre des mécanismes d'accès reposant sur des infrastructures de médiation, ou d'entrepôts issus de la fusion de données, ainsi que des solutions aux problèmes de sécurité ou de filtrage d'information. En terme d'interaction, l'adaptation aux profils et la personnalisation sont nécessaires pour l'exploration coopérative et la visualisation de résultats. Les travaux dans les domaines des Bases de Données (BD) et de la Recherche d'Information (RI) sont au cœur des problématiques de développement de ces nouveaux SI. Les avancées dans le monde des BD y contribuent par les modèles et langages de requêtes, l'extension d'opérateurs de manipulation de nouvelles (semi-)structures de données, la persistance des données, la notion de transaction et les techniques d'optimisation (accès et stockage). Ces recherches devront cohabiter avec des approches de RI basées sur l'analyse de contenus afin d'extraire les attributs, caractéristiques, méta-données, inconnus *a priori*, permettant la représentation de contenus ainsi que la prise en compte de modèles d'appariement entre contenus et expression des besoins des usagers.

Le changement d'échelle dans la taille et le volume des données reste un enjeu récurrent dans ce domaine de recherche, lié aux possibilités d'expérimentation et de validation sur des bases de tests, corpus et plateformes fédératives.

4 - INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, RAISONNEMENT, DÉCISION, COGNITION

L'objectif principal des recherches en intelligence artificielle est de construire des systèmes (machines, logiciels, etc.) capables d'effectuer des tâches réputées nécessiter de l'intelligence et en même temps capables de rendre compte de leur fonctionnement. Ainsi, les fondements théoriques en intelligence artificielle s'appuient, ou s'articulent sur de nombreux domaines des sciences exactes ou humaines comme les mathématiques, l'informatique, la philosophie, la psychologie, et la linguistique. Ses relations privilégiées (et nécessaires) avec ces disciplines lui donnent un rôle charnière en informatique dans des thèmes de recherches interdisciplinaires.

Plus particulièrement, les recherches en intelligence artificielle tendent à rendre la machine capable d'acquérir de l'information, de raisonner sur une situation statique ou dynamique, de résoudre des problèmes combinatoires, de faire un diagnostic, de proposer une décision, un plan d'action, d'expliquer et de communiquer les conclusions qu'elle obtient, de comprendre un texte simple ou un dialogue en langage naturel et d'en extraire des éléments d'information. Sur toutes ces questions, de nombreux résultats ont été obtenus depuis dix ou vingt ans montrant qu'au moins, dans une large mesure, ce programme est réalisable. Les principaux développements récents ou en cours de l'intelligence artificielle peuvent se

regrouper autour de quelques grandes problématiques :

- la représentation des connaissances et la formalisation de différents types de raisonnement et de décision ;
- l'algorithmique de l'inférence et des systèmes de contraintes ;
- l'apprentissage et la fouille de données ;
- les systèmes multi-agents et les modèles d'interaction ;
- la résolution de problèmes et la planification des actions.

Les recherches en représentation des connaissances ont engendré l'étude de nouveaux formalismes. Les études portent alors sur leurs propriétés formelles et algorithmiques, ainsi que sur l'adéquation des représentations pour les questions considérées.

Au plan du raisonnement et de la décision, les recherches portent en particulier sur le raisonnement sur le changement, le temps et l'espace, sur le développement de représentation qualitative ou graphique de l'incertitude et des préférences, sur le raisonnement en présence d'incohérences. La maîtrise de ces questions est capitale pour la conception de système d'aide à la décision, d'assistance à l'utilisateur, d'aide à la recherche d'information, de description d'images et de raisonnement sur les perceptions. Pour étudier l'adéquation d'un formalisme de représentation (en dehors de l'étude de ses propriétés formelles et algorithmiques), on fait fréquemment appel à des techniques et recherches en sciences cognitives, voire en biologie. Le but de ces recherches est alors de répondre à une des interrogations fondamentales de l'intelligence artificielle, à savoir si les mécanismes artificiels suggérés simulent assez fidèlement les processus qui se déroulent au niveau du cerveau humain.

De grands progrès ont été réalisés depuis une quinzaine d'années en matière d'algorithmes efficaces pour l'inférence en logique classique, notamment propositionnelle. Au plan inférentiel, la déduction en logiques non-classiques peut souvent se ramener après traduction, à des problèmes d'inférence

classique. Beaucoup de problèmes peuvent s'exprimer sous forme de satisfaction d'ensembles de contraintes, éventuellement flexibles. La recherche dans ce domaine a connu un grand essor dans les communautés de l'intelligence artificielle et de la programmation logique. L'apprentissage est un domaine ancien de l'intelligence artificielle qui a aussi connu des grandes avancées depuis dix ans, avec le développement de la programmation logique inductive, de l'apprentissage par renforcement, des méthodes neuro-floues notamment. Les problématiques de la fouille de données, du résumé d'informations, en encourageant aussi le rapprochement avec les méthodes statistiques et symboliques d'analyse de données a contribué à renouveler les recherches et à les situer dans une perspective appliquée, tout comme les applications à la génomique. Le paradigme de systèmes multi-agents aussi relativement ancien en intelligence artificielle a connu également des développements considérables depuis dix ans, que cela soit au niveau de la simulation de l'activité de société d'agents, ou de la modélisation de processus coopératifs, de négociation, d'argumentation, de décision de groupe équitable, ou de maximisation de gain dans des problèmes d'enchères combinatoires. Les problèmes posés par la formalisation des systèmes multi-agents ont donné lieu à des utilisations et à des développements intéressants de logiques multi-modales mais aussi conditionnelles. Les systèmes multi-agents sont importants pour les applications au commerce électronique, ou à la recherche d'information sur la toile, en particulier.

La résolution de problèmes est un des domaines anciens et fondateurs de l'intelligence artificielle. Ses problématiques se retrouvent en partie en planification. À un niveau abstrait, les deux domaines ont la même tâche, puisque la planification peut être vue comme un type de résolution de problème avec un agent planificateur qui raisonne sur ses actions et leurs conséquences pour chercher et trouver une solution, qui utilise des croyances, observe, perçoit, etc. ! Au niveau théorique et algorithmique, un planificateur est un démonstrateur (ou résolveur de contraintes) très spécialisé qui raisonne efficacement sur des axiomes qui décrivent les

actions. La planification et l'ordonnancement ont de nombreuses et importantes applications en gestion de trafic aérien, en gestion d'entreprise, en robotique, etc. Un fait marquant des recherches actuelles en intelligence artificielle est le fait qu'elles sont de plus en plus développées en synergie avec les sciences cognitives, que cela soit par exemple pour valider l'adéquation des modèles utilisés avec la façon dont les agents appréhendent l'incertitude, ou perçoivent les relations temporelles ou spatiales, ou dont les agents interagissent entre eux, modifiant leurs croyances, ou exprimant leurs préférences ou leurs intentions.

Organiser et traiter de grandes masses d'informations, extraire les connaissances pertinentes pour les questions posées, c'est à l'évidence sur de tels problèmes que les recherches en intelligence artificielle trouvent d'importants champs d'applications. Notons aussi les retombées dans des domaines aussi divers que l'aéronautique et l'espace, l'agriculture, la production industrielle, la banque et la finance, etc. contribuant ainsi à élargir considérablement l'impact de l'informatique sur la transformation en profondeur des activités humaines.

5 – TRAITEMENT, INTERPRÉTATION ET SYNTHÈSE DU SIGNAL, DE LA PAROLE ET DE L'IMAGE

Le domaine du traitement de l'information signal, parole ou image est en pleine effervescence à en juger les avancées scientifiques récentes, les verrous scientifiques actuels ainsi que les enjeux applicatifs décrits ci-après. Une telle avancée s'associe à la reconnaissance d'un propre corps de théories et de méthodes, mis au service d'autres disciplines à travers des applications variées (communications, mécanique, acoustique, robotique, géophysique,

astrophysique, astronomie, sismique, transports, agroalimentaire, génie biomédical, radar, sonar, contrôle non destructif, multi-média, etc.).

Les avancées scientifiques récentes s'intègrent dans le cadre d'une fertilisation entre problèmes, modèles, méthodes et applications.

5.1 LES PROBLÈMES

Si les problèmes posés viennent souvent de l'amont (description fine des phénomènes physiques observés en tant que signal, son ou images), des problématiques nouvelles naissent aussi de développements technologiques nouveaux liés à l'activité humaine (apparition de nouveaux capteurs, explosion des télécommunications, accroissement des volumes de données, multi-modalités, multi-sources, multi-composants, etc.). De manière générale, la prise en compte de la formation des signaux et des images a dynamisé nombre d'activités par exemple sur la restauration, les problèmes inverses, la reconstruction, la compression ou la séparation de sources.

5.2 LES MODÈLES ET MÉTHODES

Pour ce faire, un effort tout particulier a porté sur la mise en adéquation de modèles mathématiques (statistiques, algébriques, géométriques, analytiques, variationnels), ainsi que sur le développement d'approches associées à des modes de représentation adaptés (temps-fréquence, temps-échelle, multi-résolution, multi-fractales, systèmes fractionnaires, etc.), plusieurs types de modèles pouvant être mis en jeu simultanément. Parmi les acquis, il importe de préciser que signal et images ont eu un rapprochement important sur la base à la fois d'outils communs de représentation et de codage (ondelettes, analyse multi-résolution, approches pyramidales) et de modèles

stochastiques (chaînes de Markov cachées, champs de Markov, méthodes de simulation). Aux méthodes mathématiques issues principalement de l'analyse se sont aussi ajoutés des outils statistiques nouveaux particulièrement efficaces en estimation, filtrage ou débruitage. Pour ce qui est plus spécifiquement de l'image, des travaux récents ont mis en valeur l'exploitation des modèles de graphes permettant notamment d'enrichir les méthodes dites à échantillonnage régulier avec des méthodes irrégulières où les éléments de représentation sont gérés par un graphe d'adjacence. De plus, en s'ouvrant sur la vision (notamment avec les modèles surfaciques, volumiques et dynamiques), ces échantillonnages irréguliers deviennent souples (ils accompagnent le mouvement et les déformations) et adaptatifs (ils deviennent fins et denses aux zones porteuses d'information). Ils se sont en outre enrichis de la prise en compte d'une possible multiplicité des points de vues pour constituer des scènes 3D sans calibration ou avec des calibrations minimales. Ces modèles sont également très connus en synthèse d'images, modèles bénéficiant d'une forte activité de recherche en complexité algorithmique et combinatoire avec la géométrie algorithmique.

Toujours en image, analyse ou synthèse, l'apport des méthodes variationnelles est également un événement important permettant de s'appuyer sur les modes de représentation énergétiques par EDP, offrant ainsi des méthodes évolutives et convergentes pour la segmentation et la reconstruction de surfaces. En signal, l'effort a porté plus spécifiquement sur des approches visant à élargir les hypothèses de travail conventionnelles (non-linéaire, non-gaussien, non-stationnaire, non-régulier, mélanges, longue dépendance, représentation en $1/f$, lois d'échelle, etc.). Dans le domaine de l'interprétation, outre l'effort mené en diagnostic sur la base des nouveaux modes de représentation précités (temps fréquence, temps-échelle, analyse spectrale, en lien explicite avec des procédures d'apprentissage et de décision), un important effort a porté sur la fusion, enrichissant les méthodes classiques probabilistes avec le flou, les possibilités, les croyances, etc.

Au niveau des architectures le signal et l'image ont joué un rôle essentiel dans les problèmes d'adéquation algorithme architecture avec un appui des méthodes de synthèse et des travaux sur les FPGA et les circuits spécifiques. Ce point est un des résultats majeurs associant l'architecture logicielle et matérielle à un secteur d'activité. Il bénéficie également des fortes avancées en communication par radio logicielle permettant de valoriser des concepts comme les objets communicants. Devant l'ampleur et la rapidité des progrès accomplis en un demi-siècle depuis les travaux pionniers de Shannon, le futur du traitement du signal peut sembler vidé d'enjeux théoriques majeurs et certains ont pu suggérer qu'il était opportun de préparer dès à présent le prochain grand bond en avant sur des bases complètement rajeunies. De quoi sera-t-il fait ? On voit tout d'abord émerger depuis quelques années des techniques reposant abondamment sur l'analyse statistique et la recherche de lois ou de dépendances, soit à travers des mélanges de sources, soit dans des processus à longue mémoire. On voit ensuite la place importante prise par les modèles, très souples, mais aussi peu contraints, comme les processus à noyaux ou les décompositions en ondelettes et permettant d'aboutir à des techniques d'apprentissage particulièrement puissantes : machines à vecteurs de support et calcul particulière. S'appuyant sur l'outil de simulation, sur les approches géométriques, sur la théorie de l'information, ces méthodes permettent aujourd'hui de ne pas se limiter aux signaux non- X (non-gaussiens, non-linéaires, non-déterministes, non-indépendants, etc.) mais d'aborder de front les signaux chaotiques et leurs représentations multi-échelles et fractales. Des emprunts résolument novateurs à la mécanique quantique permettent de revisiter le codage, la transmission et l'analyse spectrale, tandis que des démarches inspirées des systèmes auto-organisés biologiques rendent plus efficaces les techniques d'apprentissage, de reconnaissance, de poursuite ou d'analyse.

5.3 LES APPLICATIONS

Parmi les secteurs d'applications qui se sont enrichis par des nouveaux capteurs, des nouvelles fonctions on peut citer :

- l'observation satellitaire avec les systèmes radars à haute résolution qui complètent les systèmes optiques ;

- l'observation acoustique que ce soit en sismique de risque, sismique de prospection, en sismique sous-marine ;

- la synthèse d'ouverture avec de nombreuses applications dont l'astrophysique ;

- le médical avec les capteurs corps entiers, les caméras à positrons, l'IRM, la RMN. De même, en médical, il importe de mentionner l'imagerie cérébrale fonctionnelle, l'imagerie cardiaque dynamique, l'imagerie ultrasonore, l'imagerie très haute résolution sur lignes de lumières de synchrotron, etc. ;

- le contrôle non destructif ;

- la vision industrielle avec ses problèmes de formation d'images, de temps réel ;

- la télésurveillance avec les aspects de biométrie ;

- le transport, où le signal joue un rôle fondamental dans les systèmes de sécurité (la voiture est communicante avec des signaux qu'il faut traiter en interne ou traiter à distance) ;

- les télécommunications, dont le traitement du signal et des images accompagne la révolution en jouant un rôle essentiel notamment en antennes, codage de sources, codage de canal, séparation de sources, égalisation.

Cette activité s'est également tournée vers le grand public au travers du multimédia avec les problèmes de représentation de scènes à réalité augmentée, les problèmes d'indexation et de protection ou de tatouage. Les exigences et contraintes du domaine obligent en outre à revoir certains problèmes ou à remettre en cause certaines hypothèses de travail (nécessité de nouveaux modèles de transmission liés

à l'augmentation du débit, de statistiques non standard en télé-traffic).

Parmi les **verrous scientifiques** actuels et les sujets ou thèmes de recherche émergents, on peut citer :

- les aspects « multi » des informations signal ou images, nécessitant la mise en place de recherche de l'information pertinente ;

- l'intégration de niveaux d'abstraction permettant de passer du bas niveau au haut niveau, le développement de méthodes d'analyse en marge des méthodes de traitement, d'appréhension du contenu ;

- l'inférence de traitement, d'analyse, d'interprétation à partir d'exemples ;

- la qualité des données, qualité des traitements, évaluation des performances ;

- les traitements adaptatifs et coopératifs, la stratégie de traitement, la place de l'opérateur humain dans la boucle de traitement, les approches systèmes ;

- la vision dynamique et active, la vision pour la réalité virtuelle et la réalité augmentée associant analyse et synthèse dans un mode immersif ;

- la modélisation des objets à géométrie complexe ;

- les modèles non standard (chaotiques) avec ouverture sur des secteurs autres que les sciences dures (SHS, finances, trafic etc.) ;

- la fusion et gestion des très grands flux d'information (météo, médical).

Des **applications majeures** apparaissent en regard de ces sujets ou thèmes émergents :

- sécurité des données (MPEG3 pour le son, DVD) ;

- transmission, consultation indexation ;

- processus intelligents et communicants (véhicules, terminaux, traitements) ;

- multimédia ;

- réalité virtuelle et augmentée ;

- travail coopératif ;
- industrie cinématographique ;
- valorisation du patrimoine ;
- connaissance de l'environnement ;
- télémédecine.

6 – BIO-INFORMATIQUE

Les premiers outils logiciels pour le traitement automatique des séquences moléculaires biologiques ont longtemps été constitués par la mise en œuvre de techniques statistiques et d'analyse de données. La disponibilité et l'accumulation rapide de données en biologie moléculaire ont soulevé de nouveaux problèmes. Cet état de fait, conjugué au renforcement des moyens de calculs, a conduit à l'émergence d'une véritable algorithmique du vivant. La biologie moléculaire bénéficie d'une base expérimentale solide et d'une modularité des problèmes qui rendent réalistes de bonnes modélisations partielles : sans prétendre comparer l'homme à un robot, on peut espérer modéliser une membrane, une fonction d'une cellule, et pourquoi pas, rêver à une « cellule électronique ».

La rencontre de la génétique et du traitement symbolique de l'information (recouvrant les mathématiques discrètes, la combinatoire, l'informatique théorique, les systèmes dynamiques) doit être source de découverte. La comparaison entre programme génétique et programme informatique qui appartiennent à des sciences nées dans la même période est inévitable. Les bases théoriques du traitement de l'information vont progresser par le dialogue étroit entre deux domaines. Les modèles d'ordinateurs biologiques balbutient et ralentissent la hiérarchie de complexité des calculs. Plus simplement, les données produites par la biologie moléculaire apportent de nouveaux défis à cause de leur nature et de leur taille. À l'inverse, les outils théoriques de traitement

de l'information (combinatoire, théorie de la complexité, cryptographie, théorie ergodique) fournissent des voies de modélisation qui doivent aider les généticiens à percer une partie de leurs énigmes. Un programme de coopération entre généticiens, informaticiens et mathématiciens, fondé sur la synergie des hommes et des idées, donnerait à ses promoteurs une place pilote dans un créneau dont les enjeux sont considérables : mieux connaître les bases du traitement de l'information.

Les aspects informatiques du traitement des éléments biologiques apparaissent pendant les trois stades principaux de l'étude des génomes et des molécules biologiques (protéines, ARN, etc.) : la production des séquences moléculaires, leur stockage et leur analyse. Cette dernière phase comprend aussi des aspects de modélisation qui permettent des études exploratoires. En fait les trois phases ne peuvent être dissociées complètement car l'analyse des séquences guide le fonctionnement des deux autres. En dehors des aspects biologiques, l'instrumentation pour la production des séquences est du ressort de l'automatique (machines à séquencer) et de l'algorithmique (stratégies et méthodes d'assemblage). Le stockage ne peut plus se réduire à un simple système de gestion de bases de données. D'une part, la grande masse de données empêche l'utilisation de techniques ordinaires, et, d'autre part, le besoin fondamental est maintenant celui de bases de connaissance intégrant plusieurs types d'information associés aux éléments biologiques. Chaque gène doit ainsi être relié à sa séquence, sa fonction, et sa structure, mais également doit être décrit par les relations qu'il entretient avec d'autres structures (promoteurs, autres gènes, etc.). La création de ces bases de données intelligentes ne peut se faire qu'en parallèle avec l'analyse des génomes, c'est-à-dire la compréhension complète des mécanismes biologiques qu'ils renferment et des processus d'évolution qui les ont créés. Les méthodes reposent là sur la possibilité de comparer des séquences, d'en localiser des portions significatives, de mettre en évidence des régularités par des procédés statistiques ou combinatoires, travaux qui sont étroitement liés

au développement de plate-formes logicielles pour l'étude et l'enrichissement de ces bases de données. Les aspects de modélisation ne sont pas absents pour l'extraction de motifs significatifs ou l'étude de l'évolution par exemple.

Un des objectifs fondamentaux de la bio-informatique est ainsi de découvrir la structure actuelle des génomes, les mécanismes de leur évolution, et les fonctions de leurs différentes parties. Une des avancées fondamentales actuelles est la production et l'analyse informatique enfin possible de génomes complets d'organismes simples ou plus complexes : on assiste déjà à une véritable révolution dans ce domaine qui associe étroitement informatique et biologie, car cette approche globale, par opposition à l'approche génétique classique, essentiellement expérimentale et descriptive à partir de quelques gènes, permettra l'identification de principes et de lois apportant à la biologie les bases nécessaires pour une science quantitative et prédictive.

7 – MODÉLISATION, ANALYSE, COMMANDE ET SUPERVISION DES SYSTÈMES CONTINUS ET DISCRETS

L'automatique peut être définie comme la discipline de la modélisation, l'analyse, la commande et la supervision des systèmes ou processus continus et à événements discrets. Elle est donc intimement liée à la notion de système, et trouve ses racines dans les mathématiques, où elle puise la plupart de ses outils de base, et la physique, les sciences de l'ingénieur, dont sont issus les problèmes à résoudre. L'automatique est donc à l'interface du monde réel et d'un monde virtuel dans lequel est traitée l'information, par l'intermédiaire d'architectures temps réel en général distribuées, interconnectées et réactives. Ainsi,

ce champ disciplinaire s'appuie et partage des outils de la physique (modélisation, analyse des systèmes, instrumentation), de l'informatique (information, calcul scientifique, réseaux) et de la recherche opérationnelle (optimisation, théorie des jeux).

Toutefois, l'automatique n'est pas simplement une discipline d'intégration, et elle a été amenée à créer ses propres outils en vue de l'analyse et de la maîtrise des systèmes naturels et artificiels. L'automatique est en effet essentiellement une science de l'action et s'est développée à l'origine sur la notion de rétroaction (ou de boucle fermée), visant à modifier le comportement naturel d'un système, ce qui a imposé des études de stabilité approfondies. Elle a introduit le concept de perturbation, non pas comme une gêne que l'on espère passagère ou de faible importance, mais comme une information à traiter, à mesurer ou à prédire, si l'on veut arriver à un comportement souhaité pour le système, voire à un comportement optimal. Enfin, elle est essentiellement une science des systèmes dynamiques, préoccupée par les transitoires, et ne saurait se satisfaire de modèles grossiers fondés sur des bilans statiques.

Son évolution est par nature interdisciplinaire et a un impact sur de nombreux domaines de recherche et d'application.

On la retrouve dans à peu près tous les secteurs de l'industrie et maintenant aussi des services : aéronautique, chimie, énergie, biologie, environnement, électronique, matériaux, robotique, médecine, réseaux, santé, transports, communication, économie, gestion, etc. Dans ces domaines, l'automatique tient ou tiendra sous peu une place extrêmement importante due à ses enjeux technologiques, sécuritaires ou encore économiques. Le point commun et fédérateur des domaines d'application est que ce sont des systèmes pour lesquels les besoins de fiabilité, de robustesse, de sécurité et de disponibilité permanente augmentent sans cesse avec l'évolution des ressources informatiques, des demandes de sécurité provenant des acteurs socio-économiques et des systèmes, de taille ou de complexité de plus en plus grande. Pour illustrer ce

propos, pensons à une station spatiale située à une grande distance, à une usine agroalimentaire dans laquelle des centaines de bactéries travaillent à transformer la matière dans le sens désiré, ou au transport et à la distribution d'énergie dans le cadre de la dérégulation en cours. Même si la plupart du temps les résultats attendus sont indissociables d'une finalité technologique, le concept même de boucle fermée, et les propriétés qui y sont reliées, peut servir à faire progresser la connaissance dans certains domaines (par exemple la médecine).

Le mot anglais « control » au sens plus large que son équivalent français, et traduit en général par « contrôle-commande », renvoie aux différents aspects méthodologiques sous-jacents à ce champ disciplinaire. L'ambition est d'aller de la vision locale, correspondant à un simple procédé bouclé avec un simple contrôleur, vers une vision globale dans laquelle des systèmes physiques et d'informations hétérogènes interagissent et communiquent. Dans ce cadre, une des notions fondamentales est celle de système, décrit par des entrées et des sorties, fonctions du temps et reliées par des équations mathématiques aux propriétés très diverses : elles peuvent être déterministes, stochastiques, différentielles ou encore aux dérivées partielles. Les systèmes émergents combinent des opérations logiques avec des dynamiques continues. Les théories actuelles ne sont pas particulièrement adaptées à ce type de systèmes hybrides, généralement de grande dimension. Le besoin de méthodes constructives s'appuyant sur des théories rigoureuses est réel. Pour agir sur un système, il faut avoir une bonne information sur son évolution. L'automatique est donc fortement reliée au traitement du signal par son besoin de mise en forme des signaux issus de capteurs très divers, de filtrage, de fusion et/ou de classification de données, de transmission sans perte d'information. Les images constituent des « mesures » aux propriétés particulières, que l'on peut intégrer dans une boucle de régulation, comme par exemple en robotique chirurgicale. Toutefois, toute grandeur n'est pas mesurable, que ce soit pour des raisons physiques ou économiques. Il faut alors reconstruire l'information

manquante à partir de celle qui est mesurable. Toute la théorie sous-jacente, celle des « observateurs », a beaucoup évolué depuis le premier filtre de Kalman, mais ce domaine est toujours en évolution, vers des observateurs toujours mieux spécialisés (non linéaires, à grand gain, à horizon glissant, ensemblistes, etc.).

Pour reconstruire l'information manquante, pour anticiper sur les réactions du système aux perturbations, pour garantir la stabilité de la commande, on a besoin du modèle mathématique du système à commander. Là encore, l'automatique s'est inspirée de la physique, mais a aussi créée sa propre vision du problème avec l'identification des systèmes, qui vise à reconstruire un modèle mathématique, en général sous forme d'équations différentielles ou aux différences, à partir de données issues d'expériences soigneusement conçues. Même si cette discipline a atteint une bonne maturité, il reste quelques points difficiles à régler, comme l'identification en présence de certaines non-linéarités dures, l'identification en boucle fermée, en interaction avec la commande. Quelques points de vue novateurs commencent à percer dans le domaine des applications, comme l'estimation ensembliste.

Un autre aspect essentiel pour l'avenir est d'être capable de construire des systèmes fiables à partir d'information pas nécessairement sûre. L'imprécision des mesures, la présence de retards, les limitations des actionneurs et capteurs, l'existence de perturbations externes et l'incertitude sur les modèles rendent particulièrement importantes les exigences de robustesse et d'adaptabilité des commandes. Les défauts ou les pannes de certains composants dans les systèmes embarqués, les problèmes de communications dans les systèmes interconnectés font apparaître de nouveaux besoins de reconfigurabilité des systèmes et donc de développement de théories et d'outils spécifiques permettant de configurer ou reconfigurer en ligne les contrôleurs ou le système physique. Évidemment, avant de reconfigurer, il faut avoir diagnostiqué la source du dysfonctionnement observé et il faut pouvoir, en ligne, valider la nouvelle architecture commande/système. Ceci amène à définir de nouvelles propriétés

des systèmes, aux noms un peu barbares, comme la diagnosticabilité, encore très peu étudiées et qui viennent compléter celles de commandabilité et observabilité. Sur les aspects vérification et validation du système contrôlé, des points d'ancrage avec les études des informaticiens sur les logiciels sont clairs.

L'automatique s'intéresse aussi à la productique, au sens large de ce terme. Cela concerne les procédés manufacturiers, depuis leur conception ou la conception des produits jusqu'à la phase de destruction ou de recyclage du produit, en passant par le suivi de l'exploitation. L'automatique fournit des modèles divers, proches de ceux de l'informatique (automates, réseaux de Petri, chaînes de Markov, etc.). Elle vise à modifier la manière de travailler dans ces entreprises, et leurs relations avec le monde extérieur, de façon à garantir une innovation permanente et la sûreté. On retrouve les problèmes de base de l'automatique, modélisation, commande, supervision, diagnostic, maintenance, mais les outils mathématiques sont profondément différents, et une question très ouverte est de savoir si certains concepts peuvent migrer du monde continu vers le monde discret (ou vice-versa). Les nouvelles organisations des entreprises modifient profondément les manières de travailler, la capitalisation ou le partage de connaissances et de responsabilités, et l'automatique doit se tourner vers les sciences humaines (gestion, économie, sociologie) pour avoir une vision d'ensemble. Ceci amène les chercheurs à proposer de nouveaux modèles de représentation et de spécification (des organisations, des fonctions, des systèmes d'information et de décision, des systèmes de contrôle-commande et de supervision) et d'évaluation de leurs performances. Enfin, la productique s'oriente maintenant non seulement vers la production de biens, mais encore de services, ce qui ne va pas manquer de poser de nouveaux problèmes.

Enfin, que l'homme soit perçu comme une entrée de commande ou comme une perturbation du système, nous ne pouvons pas ne pas en tenir compte dans la conception d'un système de contrôle – commande. En conséquence, les automaticiens sont amenés

à collaborer avec des spécialistes de l'interaction homme-machine. Il ne s'agit pas ici seulement d'ergonomie, mais de travail coopératif, de partage de décision entre l'homme et la machine. On peut penser que les progrès réalisés par ailleurs en réalité augmentée auront un impact assez fort sur ce que les automaticiens proposent à l'heure actuelle comme outils d'assistance à l'opérateur.

Ainsi, les recherches en modélisation, analyse, commande et supervision des systèmes continus et discrets doivent se faire sur deux fronts, tout aussi essentiels pour faire face aux défis à venir. D'une part des contributions théoriques majeures sont encore à apporter dans les domaines cités ci-dessus, motivées par le besoin de développer des techniques rigoureuses et constructives s'appuyant sur des formalismes unificateurs. D'autre part, ces outils théoriques devront être implémentés, ce qui se fera grâce à des outils informatiques adaptés (robustesse des calculs numériques d'une part, architectures spécialisées d'autre part), voire grâce à une implémentation « on chip » de certaines parties de la commande.

L'intégration de l'automatique avec d'autres disciplines, au travers de programmes interdisciplinaires, devrait permettre des avancées majeures à la fois de l'automatique et de ces autres disciplines.

8 – ROBOTIQUE

La robotique aborde aujourd'hui des sujets bien plus vastes que ceux associés aux robots manipulateurs. Elle étudie actuellement au sens large la conception et la commande des systèmes très divers qui ont la capacité de percevoir l'environnement dans lequel ils évoluent, de prendre des décisions et des actions pour accomplir des tâches qui peuvent évoluer au cours du temps. En fonction des applications, les robots doivent être conçus pour avoir un degré d'autonomie prédéfini.

Le fonctionnement des robots doit satisfaire en priorité des contraintes dictées par la sécurité. La conception des systèmes robotisés doit aussi répondre au besoin d'avoir une interaction étroite entre le robot et l'utilisateur. La robotique intervient de plus en plus dans le domaine de la santé : des exemples sont l'aide au geste chirurgical, l'assistance aux personnes handicapées, les fauteuils roulants, les prothèses, etc. Les applications ludiques de la robotique sont aussi en expansion. Ces dernières années sont apparus des robots en forme de chien et des robots humanoïdes qui sont en train de créer un nouveau champ d'application et qui suscitent des nouvelles thématiques de recherche. La robotique de service est concernée par des tâches bien définies. La recherche dans ce domaine a pour but l'amélioration de la performance des systèmes robotisés appliqués aux chantiers (assistance à la commande des pelleteuses, grues mécaniques, etc.), le convoyage automatique, les robots agricoles, etc. Dans la robotique d'intervention les tâches ne peuvent pas être complètement spécifiées parce que l'environnement est mal connu *a priori* et peut changer de manière importante au cours du temps. C'est le cas de l'exploration spatiale, principalement sur Mars ou sur la Lune. L'exploration des océans et des travaux sur des infrastructures maritimes ont donné naissance à la robotique sous-marine.

L'autonomie de ce type de robots est crucial et doit lui permettre d'appréhender son environnement en ligne, de prendre des décisions et d'effectuer des actions sans intervention humaine. Les axes de recherche dans le domaine de la robotique peuvent être déclinés de la manière suivante :

- perception, modélisation de l'environnement, capteurs et fusion multi-sensorielle ;
- prise de décisions autonome et planification d'actions ;
- planification et commande du mouvement (en particulier pour les systèmes non-holonomes comme des chariots tractant des remorques, les bateaux, etc.) ;
- architectures informatiques embarquées pour les systèmes de contrôle en temps réel.

Un axe important de la robotique concerne la conception et la conduite de systèmes artificiels bio-inspirés. La nature est ainsi une source d'idées pour concevoir des nouveaux systèmes de locomotion (drones à ailes battantes, bipèdes, etc.), de nouveaux systèmes de vision, d'évitement d'obstacles et de perception en général. La collaboration et l'interaction entre plusieurs robots pour réaliser une tâche commune sont des sujets de recherche d'actualité. Les applications dans ce domaine sont très vastes. Des projets importants sont aussi mis en place sur des applications de type « véhicules intelligents ». L'assistance à la conduite, la localisation du véhicule, la communication entre véhicules, l'étude du contact roue-sol et la dynamique du véhicule constituent des sujets de recherche courants dans ce domaine. Les robots ou véhicules aériens miniatures ont suscité beaucoup d'intérêt ces dernières années. Le succès des applications militaires et civiles des robots volants reposera sur la maîtrise des aspects tels que la fusion multi-capteurs pour l'estimation de la position et de l'orientation du véhicule, la modélisation aérodynamique, la planification de trajectoires et l'évitement d'obstacles. Une approche multidisciplinaire des sciences et technologies de l'information et de la communication est nécessaire pour aboutir à la réalisation d'un vol complètement autonome. Des études sont en cours également pour concevoir des systèmes capables de réaliser des vols en formation de plusieurs robots aériens.

9 – ÉLECTRONIQUE INTÉGRÉE : DOMINER LA COMPLEXITÉ

Le développement exponentiel de l'électronique intégrée et la place que celle-ci prend dans un nombre croissant d'activités et d'applications s'appuie sur des efforts de recherche dont une partie non négligeable peut et doit

s'appuyer sur des contributions de la recherche amont, telle qu'elle est faite dans les laboratoires du CNRS. Ce domaine est tout spécialement celui qui assure la continuité thématique et scientifique entre les deux sections 7 et 8 dites parfois « cœur des STIC ». Il faut remarquer que le développement technologique rapide des méthodes et technologies de fabrication a des constantes de temps inférieures au taux de développement des systèmes et des logiciels qui leur sont associés. Un gros effort doit donc être fait pour dominer autant que possible l'important accroissement de complexité que permettent et induisent les technologies de fabrication, et qui est déterminant pour les applications. Dans ce cas, la microélectronique a beaucoup à attendre des disciplines de l'informatique proprement dite, en complément de ses propres travaux.

L'évolution très rapide des technologies de fabrication de circuits intégrés sur silicium (CMOS) permet déjà de réaliser des systèmes numériques complets intégrés sur une même puce (les SOC pour « System On Chip »). Les techniques de conception des systèmes électroniques vont évoluer très rapidement vers l'intégration de systèmes de plus en plus complexes (1 milliard de transistors sur une puce à l'horizon 2010) avec des délais d'obsolescence de plus en plus courts. Des blocs fonctionnels (ou « composants virtuels ») appelés généralement IP (pour « Intellectual Property ») seront de plus en plus utilisés. Les classiques bibliothèques utilisées pour la conception des circuits intégrés pour applications spécifiques (ASICs) seront complétées, voire remplacées, par des bases de données de composants virtuels dont la fonctionnalité pourra correspondre à un processeur ou même à un ordinateur complet avec sa mémoire et ses entrées/sorties. De ce fait, les outils classiques de conception assistée par ordinateur dans les domaines de la microélectronique devront évoluer en prenant de plus en plus en compte les aspects système. Diverses alternatives d'architectures (incluant des propriétés de reconfiguration) doivent permettre de trouver un équilibre entre les contraintes d'efficacité et de flexibilité. Le logiciel embarqué ou enfoui, (« embedded ») permettra de plus en plus de

personnaliser et d'adapter le circuit à une application : dans un système intégré, le logiciel et le matériel cohabitent sur un mode nouveau et se partagent la fonctionnalité du système de manière étroite. Lorsque la fonctionnalité complète du système électronique se trouve intégrée sur un substrat unique de silicium, on assiste à un accroissement de la complexité du problème de conception. Il ne s'agit pas que d'un simple changement d'échelle, il s'agit en fait d'une modification totale de la méthodologie de conception et de validation pour gérer entre autres les nouveaux degrés de liberté : gestion des ressources matérielles, des interactions logiciel – matériel, des contraintes environnementales, des interactions hétérogènes, la validation des systèmes intégrés.

Ces systèmes intégrés complexes sont déjà présents dans les objets communicants actuels (téléphones portables, organiseurs, etc.). Ils concernent donc des enjeux sociaux et économiques cruciaux du fait de leur présence dans la totalité des équipements destinés aux technologies de l'information et de la communication.

Les verrous scientifiques, qui devront faire l'objet d'efforts particuliers, sont essentiellement les architectures reconfigurables dynamiquement, les architectures d'interconnexion dans un contexte SOC, les architectures multiprocesseurs hétérogènes, les systèmes d'exploitation temps réel. Dans chaque cas, il faut étudier les interfaces, les protocoles, les outils de développement, l'intégration de ces outils dans un flot de conception.

L'augmentation de la complexité des systèmes électroniques, accentuée par l'intégration de blocs fonctionnels hétérogènes (numérique, analogique, mémoire, RF, MEMS, etc.) au sein du même système, sera également à l'origine de très nombreux défis à relever par la communauté du test au sens large. Si une partie de ces défis souvent très pluridisciplinaires est plus orientée vers les disciplines abordées par nos collègues de la section 8 (test analogique, modélisation de fautes, test RF, etc.) de nombreux autres devront faire l'objet d'efforts particuliers en provenance de la communauté de la 07. À court et moyen

terme, il faudra trouver des solutions aux problèmes suivants : méthodologies structurées de conception en vue du test, transfert de très grand volume d'informations entre les équipements de test et les circuits sous test au travers de canaux à bande passante limitée, techniques de conception en vue du test permettant la réutilisation du test pour les blocs fonctionnels (IP) des systèmes intégrés actuels. À plus long terme, il faudra s'attacher à fournir des bases solides pour aborder l'utilisation généralisée des techniques de test intégré,

voire de tolérances aux fautes supportant des nouveaux modèles de fautes et des fonctions de diagnostic étendues, de nouvelles méthodes de conception en vue du test faisant en particulier appel à la hiérarchie de conception, l'amélioration des techniques de diagnostic pour gérer les défaillances dues aux erreurs de fabrication et aux marginalités, l'amélioration des outils de CAO et des algorithmes de test en terme de capacité (complexité) et de modèles de fautes (prise en compte des nouvelles technologies).

ANNEXE

LISTE DES ACRONYMES

ASIC	Application Specific Integrated Circuit	IRM	Imagerie par Résonance Magnétique (nucléaire)
BD	Base de Données	LAN	Large Area Network
DVD	Digital Versatile Disc	MAN	Metropolitan Area Network
EDP	Équations aux Dérivées Partielles	MEMS	Micro Electro Mechanical System
FPGA	Field Programmable Gate Array	MPEG	Motion Picture Experts Group
IP	Intellectual Property	RF	Radio Fréquence
		RMN	Résonance Magnétique Nucléaire
		SHS	Sciences Humaines et Sociales
		SOC	System on Chip
		WAN	Wide Area Network
		XML	eXtensible Markup Language