

Synthèse du rapport du Comité des Experts «AUTOMATIQUE» du CNRS

La problématique fondamentale de l'automatique est celle de la conception, de la mise en œuvre et de l'exploitation des moyens permettant à l'homme de maîtriser le comportement de systèmes complexes, naturels ou artificiels. Science des systèmes, elle se fonde sur des concepts spécifiques (rétroaction, modélisation, système dynamique, état, signal, optimalité...) qui présentent une efficacité pratique indéniable et un fort impact économique.

Parmi les défis scientifiques en relation avec la recherche en Automatique, on peut citer

- La maîtrise des grands systèmes dynamiques interagissant (réseaux de distribution d'énergie, de communication ou de transports mais également réseaux de régulation biologiques)
- La prise en compte des hétérogénéités pour la commande et la prédiction (échelles temporelles, échelles spatiales, variables de nature différentes quantitatif, qualitatif, continu, discret, symbolique, présence de l'opérateur dans la boucle...)
- L'assurance de la sécurité et des performances des systèmes contrôlés dans des environnements incertains (réactivité aux défauts, reconfiguration ...)
- L'intégration de nouvelles technologies dans les systèmes de contrôle - commande (réseaux sans fil, télé-opération par réseau avec retour haptique, «drive by wire», nouveaux matériaux, nano-capteurs et nano-actionneurs ...)

Les thèmes de recherche pouvant répondre à ces défis sont nombreux et ne relèvent pas uniquement de l'Automatique. Cependant, l'accent est mis sur les questions qui semblent aujourd'hui les plus pressantes compte tenu de la complexité croissante des systèmes, des mutations technologiques et des efforts nécessaires pour progresser vers des recherches pluridisciplinaires. Ainsi, les thèmes de recherche en Automatique sont présentés en trois catégories

1. Thèmes fondamentaux

- Commande multi échelle ou à complexité variable
- Interaction optimisation – commande ou optimisation dans la boucle
- Identification, estimation et observation

2. Thèmes en lien avec l'évolution technologique

- Commande collaborative
- Automatique embarquée
- Commande des réseaux

3. Thèmes en collaboration interdisciplinaire

- Automatique et Mathématiques Appliquées
- Contrôle des systèmes dynamiques et Sciences du Vivant

Les problèmes scientifiques associés à ces thèmes sont précisés dans ce rapport.

Avertissement ce rapport est issu des discussions au sein du comité des experts nommés par le CNRS. Il propose quelques pistes pour la recherche en Automatique et ne prétend pas couvrir toute la discipline ni toutes les voies possibles.

Rapport du Comité des Experts «AUTOMATIQUE» du CNRS Prospectives de recherche

L'évolution de la recherche en Automatique est étroitement liée à des défis scientifiques et économiques. Une meilleure maîtrise des systèmes demande d'apporter des réponses à plusieurs questions fondamentales non encore élucidées. Cette évolution est également influencée par des progrès technologiques qui font émerger de nouvelles problématiques. Enfin, l'approche système développée par les automaticiens qui s'appuie sur une analyse des propriétés structurelles des systèmes dynamiques pour mieux prédire leur comportement, mieux connaître et repousser les limites des performances atteignables, ouvre des pistes de recherche où un enrichissement croisé entre l'Automatique et d'autres disciplines devrait conduire à des avancées importantes.

1. Thèmes fondamentaux

1.1. Commande multi échelle ou à complexité variable

La généralisation des techniques numériques dans la modélisation des systèmes complexes aboutit à des modèles de simulation précis où des phénomènes locaux sont bien identifiés. Le revers est que les modèles issus de ces techniques sont souvent de très grande dimension. Le problème en automatique est alors de concevoir une loi de commande susceptible d'assurer à la fois un comportement global satisfaisant du système et une maîtrise des phénomènes locaux. Les méthodes actuelles de conception des contrôleurs ne permettent pas de gérer convenablement ce compromis entre le micro, le méso et le macroscopique. Les systèmes décrits par des équations aux dérivées partielles (EDP) sont un exemple typique de cette situation. Trouver une commande de dimension finie garantissant la stabilité et les performances d'un système décrit par des EDP reste un problème ouvert (Bacciotti et Rosier, 2005). D'une manière plus générale, il n'existe pas à l'heure actuelle une méthode systématique pour synthétiser une loi de commande stabilisante de complexité donnée, même dans le cas linéaire réputé plus simple, ou pour certifier l'inexistence d'une telle loi de commande. Ce problème de synthèse de contrôleur à complexité donnée est d'une grande importance pratique. La difficulté essentielle semble résider dans l'absence d'une théorie mathématique consolidée pour l'analyse spectrale et variationnelle du cône (non-convexe) des matrices non-symétriques stables. Il est à noter que l'étude systématique du cas symétrique (qui est convexe) dans les années 1980 a débouché sur la création d'une nouvelle branche des mathématiques appliquées: la programmation semi-définie, connue par les automaticiens sous le nom d'optimisation LMI (inégalités matricielles linéaires) voir par exemple Boyd, El Ghaoui, Balakrishnan, Feron, 1994 et Scherer, Weiland, 2005). Dans le cas de la synthèse de contrôleurs à précision finie, le problème réside essentiellement dans le caractère combinatoire dû à l'optimisation sur des ensembles discrets de très grandes tailles.

La reconfiguration de la structure et des algorithmes de contrôle suite à une défaillance est un autre exemple où une commande à complexité variable devient indispensable. En effet, la présence de défauts (perte d'un actionneur ou d'un capteur par exemple) représente la situation type d'un changement dans l'environnement pour lequel les méthodes classiques de synthèse d'une loi de commande nécessitent d'être revisitées. Ainsi, parmi les problèmes à traiter, on peut citer les suivants:

- Il n'existe pas de relation univoque entre le nombre et le type de défauts pouvant affecter le processus et leurs conséquences sur le comportement du système et chaque situation requiert une méthodologie particulière: optimisation multi-critère, stabilisation simultanée...

-L'apparition du défaut peut être rapide et brutale, et impose de minimiser le temps requis pour le détecter et le compenser. De plus, l'isolation correcte du composant défectueux est nécessaire pour assurer le succès de l'opération. Il s'agit d'un problème délicat quand le système fonctionne en boucle fermée.

-La perte totale d'un ou plusieurs instruments nécessite de revoir les objectifs initiaux et d'envisager une spécification dégradée des performances du système tout en maintenant des propriétés essentielles comme la stabilité et la commandabilité.

1.2. Interaction optimisation/commande ou optimisation dans la boucle

L'interaction entre la commande et l'optimisation n'est pas un fait nouveau. Les deux pistes suivantes (parmi tant d'autres, certainement) semblent mériter une attention particulière.

- La gestion de l'optimisation (non convexe) en ligne
- L'analyse systémique des itérations d'optimisation

1.2.1. La gestion de l'optimisation (non convexe) en ligne

Pour la grande majorité des systèmes non linéaires contraints, la synthèse explicite hors ligne de lois de commande optimales est tout simplement impossible. Or, pour accroître les performances tout en respectant les contraintes de fonctionnement, le recours à l'optimisation est souvent associé à un affinement des modèles non linéaires avec l'objectif de s'approcher des performances ultimes.

L'absence de forme explicite de lois de commande peut être contournée par le recours à l'optimisation en ligne. Ce raisonnement a conduit, il y a une trentaine d'années, au développement de la technique de commande prédictive consistant à résoudre numériquement un problème d'optimisation généralement non convexe à chaque instant d'échantillonnage. Le développement croissant des moyens de calcul élargit sans cesse les domaines d'application de cette technique qui a été longtemps réservée aux procédés chimiques lents. Cependant, beaucoup de questions restent ouvertes et méritent, par l'enjeu qu'elles représentent, une attention particulière. Parmi ces questions, on peut citer.

- ✓ Comment définir un problème d'optimisation, calculable en temps réel, traduisant des objectifs concurrents, voire contradictoires, et les contraintes de fonctionnement tout en assurant la stabilité du système.
- ✓ Comment gérer l'interruption du processus d'optimisation tout en garantissant la stabilité.
- ✓ Peut-on définir un problème d'optimisation admettant une parallélisation des calculs pour la rapidité mais également pour la fiabilité ?
- ✓ Peut-on introduire dans le critère des considérations sur la qualité des estimations en cours sur la robustesse de la boucle fermée résultante (voir également le paragraphe 1.3.1)
- ✓ Comment introduire dans le critère de qualité d'une loi de commande la possibilité de «récupérer» le système suite à une défaillance.
- ✓ Comment quantifier la fiabilité du résultat, en particulier en présence de problèmes d'optimisation non convexes et de relativement grande taille. Doit-on commencer à envisager des notions de type «stabilité à 99.99 %».

Relever ce défi n'est possible qu'en adoptant une approche multidisciplinaire regroupant des spécialistes en automatique, en analyse numérique, en génie logiciel et en architecture

embarquée. Dans cette situation, la culture de la preuve formelle et déterministe devrait peut-être céder la place à une culture plus probabiliste.

1.2.2. L'analyse «systémique» des itérations d'optimisation

Certains liens entre automatique et optimisation sont bien connus et ont donné lieu à des constructions fructueuses. Par exemple, il est assez classique pour un automaticien de calculer la dérivée d'une fonction obtenue par simulation d'une équation de récurrence (c'est-à-dire, un système à temps discret) par une technique d'état adjoint. Considérer un programme informatique (code de simulation) comme un système dynamique à temps discret permet alors de développer des outils de différentiation automatique par la construction d'un code adjoint qui repose sur l'utilisation de techniques similaires.

On peut poursuivre ce type d'analogie et considérer plus généralement un algorithme d'analyse numérique (par exemple pour la recherche du zéro ou du minimum d'une fonction) comme un système dynamique. Une re-normalisation appropriée du domaine de recherche permet alors d'analyser finement le comportement de l'algorithme : au lieu de rechercher un objet fixe dans un domaine qui se contracte au cours des itérations, le domaine devient fixe et c'est l'objet recherché qui s'y déplace. Ceci permet d'étudier des propriétés plus précises que la convergence de l'algorithme, à partir de l'évolution du système dynamique qui caractérise l'évolution du point recherché dans l'espace re-normalisé (Akaike, 1959, Forsythe, 1968, Bhaya, Kaszkurewicz, 2006). Certains algorithmes font apparaître un phénomène de chaos, d'autres des attracteurs, dont on peut étudier la stabilité, etc. L'étude est souvent difficile, mais est prometteuse en termes de développement de nouvelles techniques, non seulement pour analyser des algorithmes existants mais aussi pour améliorer leurs performances. Ainsi, il ne s'agit pas de développer des outils d'optimisation pour l'automatique (comme c'est le cas par exemple pour les méthodes de programmation convexe utilisées pour la résolution de problèmes à inégalités matricielles linéaires ou LMI) mais à l'opposé, d'utiliser des outils d'étude de systèmes dynamiques pour analyser et construire des algorithmes d'optimisation.

1.3. Identification, estimation et observation

1.3.1. Modèles paramétriques

Le problème de l'identification d'un système (ou celui de l'estimation de paramètres lorsque la structure du modèle – les équations qui régissent l'évolution du système – est connue) est le plus souvent découplé de celui de sa commande, qui poursuit un objectif spécifique (poursuite de trajectoire, rejet de perturbation, etc.). Ainsi, on estime généralement les paramètres d'un modèle à partir de mesures obtenues en excitant suffisamment le système étudié, puis on commande le système pour l'objectif donné en supposant les paramètres fixés à leur valeur estimée (ou autour de celle-ci lorsqu'on utilise une approche de type «commande robuste»). Quand le système est «en boucle fermée», son identification ne diffère parfois que faiblement de ce schéma, l'excitation du système en phase d'identification étant simplement fournie par la loi de commande qui suit son objectif propre, mais que l'on espère suffisamment excitante pour identifier correctement le modèle. Cependant, les choses se compliquent de façon notable lorsque la loi de commande ne permet plus de garantir cette identification correcte. C'est le cas en particulier quand la commande est adaptée aux paramètres estimés au fur et à mesure de leur estimation. C'est là toute la problématique de la commande adaptative. Les résultats obtenus dans les années 1980-1990 permettent de construire des lois de commande satisfaisantes, sur le plan théorique (consistance et normalité

asymptotique des paramètres estimés, etc.), pour des modèles de structure particulière et sous des hypothèses précises mais parfois assez restrictives (voir en particulier les travaux de T.L. Lai et C.Z. Wei). Le caractère très académique de ces résultats explique sans doute leur assez faible pénétration dans la communauté automatique, qui s'est plutôt tournée vers des techniques du type commande robuste. Celles-ci conduisent cependant à des lois souvent très prudentes, et donc parfois fortement sous-optimales. De nouveaux développements en commande adaptative, éventuellement couplée à des approches robustes, pourraient permettre une amélioration sensible des performances. Les techniques robustes et adaptatives ont atteint un degré de maturité permettant un mixage pour améliorer les performances. Ceci revêt un intérêt particulier quand il s'agit de systèmes pour lesquels une dégradation de performance, même légère, est très pénalisante.

Pour la sûreté de fonctionnement d'un système, la commande est souvent couplée à un module de diagnostic en ligne. Or la conception de la loi de commande fait souvent abstraction du générateur de résidus utilisé pour le diagnostic. La valeur des résidus permet de détecter et de localiser éventuellement une défaillance. Ainsi, la sensibilité du générateur de résidus dépendra du modèle utilisé et il faut considérer le problème conjoint de l'identification et du diagnostic comme un problème d'optimisation multi-critère.

1.3.2. Modèles non paramétriques

La majorité des résultats obtenus en commande adaptative ou robuste concerne des systèmes pour lesquels un modèle de forme paramétrique est connu. Les travaux en statistique non paramétrique datant des années 60 (estimateur à noyau d'une densité de probabilité par E. Parzen en 1962, estimateur à noyau d'un modèle de régression par E. Nadaraya et G. Watson en 1964) ont été popularisés par le succès des méthodes «l'apprentissage statistique» sur des problèmes réputés difficiles (voir les travaux de V. Vapnik en particulier). L'utilisation de modèles non paramétriques en commande ouvre de nouveaux horizons (pour toutes les applications où l'on ne dispose pas d'un modèle dynamique fiable) et soulève en même temps de nouveaux défis par les problèmes théoriques qui en découlent.

2. Thèmes en lien avec l'évolution technologique

2.1. Commande collaborative

Le problème de la *collaboration* entre différentes entités relativement indépendantes mais travaillant autour d'un objectif commun constitue aujourd'hui un enjeu important tant sur le plan économique que scientifique.

Cette problématique s'inscrit dans plusieurs domaines d'application prioritaires tels que *la santé* (robotique chirurgicale télé-opérée, réalité virtuelle, retour d'effort...) où, par exemple, plusieurs chirurgiens doivent, par l'intermédiaire d'un réseau, intervenir à distance sur un même patient au moyen d'interfaces robotisées□*les transports* (formations de robots mobiles, drones...) où, par exemple, une flotte de mini-robots doit réaliser l'exploration d'un site, ou plusieurs véhicules autonomes doivent transporter un objet encombrant□*l'environnement* pour la surveillance continue de zones à risque (incendies, pollution)□*la défense* où des intervenants matériels et personnels doivent collaborer□*l'espace* faisant intervenir des constellations de satellites, des robots d'exploration, etc.

Sur le plan scientifique, cette thématique comporte d'importants verrous de nature fondamentale relevant du *domaine de l'automatique, de la robotique, des capteurs, de la théorie de l'information, des réseaux*. En particulier, la commande des systèmes en réseau («*Networked Controlled Systems*») pose encore de nombreuses questions

- commande prise en compte des retards (contrôleurs et observateurs, identification), systèmes distribués sous contraintes de communication, commande décentralisée, synchronisation, commande multi-résolution
- théorie de l'information codage, quantification, échantillonnage, temps réel
- réseaux de communication (voir paragraphe 2.3) contrôle de congestion et perte de paquets, bande passante et QoS, graphes (topologie des liens de communication)
- autonomie, décision non supervisée, systèmes hybrides, apprentissage

Les enjeux de la commande collaborative sont de développer une base scientifique couplant (au moins) trois domaines le *contrôle* (automatique, software), l'entité *technologique* (robotique, hardware), la *communication* (informatique, protocole). Les aspects «*signal*» (capteurs) doivent aussi être présents (dans les deux premiers items, ou en tant que tels).

2.2. Automatique embarquée

La commande des systèmes embarqués (appelés également systèmes enfouis) concerne des applications dont le fonctionnement est géré automatiquement par des logiciels. L'objectif fondamental est que ces systèmes puissent être autonomes et en particulier se passer des interventions humaines ou pallier des déficiences.

Des problèmes scientifiques nouveaux et complexes sont induits par les spécificités que présentent généralement ces systèmes et qui sont liées à :

- leur durée de vie (supposée illimitée), avec des interventions sporadiques et rares pour la maintenance ou l'évolution ;
- des propriétés temporelles (échéances strictes, délais, latences) et de réactivité ;
- des exigences sur la sécurité souvent critique (sécurité des biens et des personnes) et sur la qualité de service ;
- éventuellement des contraintes dues à l'hostilité de l'environnement (espace restreint, vibrations, température) ou à la consommation d'énergie (à capacité éventuellement limitée),
- des contraintes induites par l'architecture matérielle considérée (systèmes répartis, etc.).

Les algorithmes de mise en œuvre des lois de commande destinées à ces systèmes sont donc fortement orientés par la prise en compte de ces différents facteurs, et de nouvelles solutions doivent souvent être recherchées.

Les problèmes scientifiques rencontrés pour l'Automatique embarquée sont les suivants :

- l'élaboration d'algorithmes plus efficaces et mieux adaptés aux caractéristiques de l'application de façon à prendre en compte les différents types de contraintes qui portent sur l'espace mémoire disponible ou les temps de calcul. Ceci conduit à des notions de complexité d'algorithme, de précision de calculs, de structures de données, de décidabilité, etc.,
- des problèmes de sûreté de fonctionnement, de tolérance aux fautes, de reconfiguration dynamique, de commutation de modes de marche, d'ordonnancement,
- la programmation concurrente et répartie : des mécanismes de synchronisation et de communication,
- l'appréhension conjointe des phénomènes de nature continue et à événements discrets (systèmes hybrides),
- l'élaboration de modèles d'exécution permettant de vérifier formellement les propriétés spécifiées (sûreté, vivacité, compteurs, temps bornés).

2.3. Commande des réseaux□

Sans aucune perte de généralité, le *réseau* est défini par un ensemble (ouvert ou fermé) d'éléments (ou des structures) interconnectés (ou en relations interactives) pour assurer la continuité et/ou améliorer le comportement d'une ou plusieurs tâches prédéfinies (distribution et production ; transport et communication) en fonction d'un ou plusieurs critères (quantitatifs et/ou qualitatifs). Selon le support mis en jeu, on définira des réseaux permettant l'échange d'énergie, de matières, d'information ou combinant un ou plusieurs supports comme, par exemple, matière et information dans le cas générique des réseaux de distribution.

Un des problèmes majeurs dans l'analyse de tels systèmes est lié à la complexité de la modélisation, complexité induite par la grande taille, l'hétérogénéité et le caractère dynamique des interconnexions (équilibres, transfert ou échange des flux), la présence ou non du facteur humain dans la boucle de décision (comme, par exemple, dans le cas des systèmes de transport, de distribution et/ou de production). À ce titre; il faut considérer également les interactions (fortes ou faibles, persistantes ou non) avec l'environnement (caractère ouvert ou fermé du réseau mentionné ci-dessus).

Les phénomènes rencontrés dans ces processus, et surtout leurs interprétations, permettent d'adapter des modèles issus des lois de la physique□ *macroscopiques*□(par exemple, hydrodynamiques basées sur la théorie des fluides) ou *microscopiques*□(modèles basés sur les cinétiques des gaz), en temps continu (modèles de trafic des flux décrits par des équations différentielles aux dérivées partielles) ou en discret (du type automates cellulaires où espace et temps sont simultanément discrétisés). Ensuite, le transport et/ou la propagation entre les éléments du réseau se caractérisent par la présence des *retards*, dont les effets sont parfois contradictoires (synchronisation/désynchronisation, stabilité/instabilité). D'une manière schématique, les trois facteurs essentiels qui dominent la dynamique de ces systèmes sont les suivants□la *compétition* entre flux ayant une fonction différente dans les nœuds du réseau, la concurrence entre les ressources et le niveau d'engorgement (qui induit du *retard* dans le réseau). La présence des interconnexions et des structures, hiérarchiques ou non, et le caractère dynamique des interconnexions font penser que l'approche la mieux adaptée est représentée par l'approche système dynamique, propre à l'Automatique.

En fonction de processus de décision (assurer la continuité ou améliorer le comportement), la modélisation considérée ci-dessus (issue des lois de la physique) est sujette à une analyse locale ou globale avec des approches déterministes ou stochastiques, fortement dépendante de la structure (organisation dans l'espace, hiérarchie) des interconnexions. Dans ce contexte, il est important de mettre en évidence le *caractère dynamique des réseaux* indépendamment de la typologie considérée.

3. Thèmes en collaboration interdisciplinaire

Ces thèmes de recherche sont à mener en collaboration avec plusieurs communautés scientifiques. Il ne s'agit en aucun cas d'un recensement mais plutôt d'une évocation de quelques thèmes qui pointent dans les programmes de recherche internationaux.

3.1. Interaction Automatique – Mathématiques Appliquées

3.1.1. Géométrie algébrique en automatique:

Les récents progrès en analyse numérique non linéaire et en programmation semi-définie (optimisation LMI) ont permis très récemment d'élargir l'horizon de la géométrie algébrique réelle. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer les programmes des séminaires spécialisés financés récemment par la NSF aux Etats-Unis, notamment à l'AIM (Palo Alto), au MSRI (Berkeley) ou à l'IMA (Minneapolis). Il semble maintenant que la géométrie algébrique offre un cadre général pour résoudre numériquement et efficacement (en un temps de calcul raisonnable sur un ordinateur de bureau) de nombreux problèmes fondamentaux en automatique, et notamment pour les systèmes non linéaires et la commande optimale (Lasserre, 2001 et Parrilo, Lall, 2003). Il pourrait en découler une nouvelle série d'outils logiciels pour la commande, intégrés aux plates-formes Matlab ou Scilab.

3.1.2. Automatique numérique et algèbre polynomiale numérique:

Depuis les travaux fondateurs de James Wilkinson au Royaume-Uni dans les années 1960, l'analyse numérique est devenue une discipline incontournable lors de la conception de logiciels de calcul scientifique. L'exemple typique est le logiciel Matlab, très utilisé par les automaticiens et dont le noyau est composé de routines d'algèbre linéaire numérique (calcul de valeurs propres, formes canoniques de matrices). L'algèbre non linéaire numérique, et en particulier l'analyse numérique pour les polynômes, est nettement moins développée cependant. Ceci est d'autant plus problématique que les polynômes et les fonctions rationnelles sont des objets très souvent utilisés pour modéliser les systèmes dynamiques. Des travaux récents (voir par exemple H. J. Stetter. Numerical Polynomial Algebra, SIAM, Philadelphia, 2004) menés à la frontière entre la géométrie algébrique réelle et l'analyse numérique, devraient être applicables pour résoudre des problèmes d'automatique formulés à l'aide des polynômes.

3.1.3. Automatique et Statistique

De nombreux problèmes traditionnellement considérés comme étant de nature statistique amènent à manipuler des notions familières aux automaticiens ou parfois même sont directement formulés comme des problèmes de commande pour des systèmes stochastiques. Ils constituent autant de domaines pour lesquels les automaticiens pourraient apporter leurs compétences. Ainsi par exemple, l'étude des problèmes d'indépendance en théorie bayésienne de la décision (réseaux bayésiens) utilise des notions voisines de celle de variable d'état. Les problèmes de planification d'essais cliniques (où l'on observe un succès ou un échec comme réponse suite à l'administration d'une dose de médicament, la probabilité de chaque événement étant modélisée comme fonction de cette dose) ont été essentiellement abordé par des statisticiens. Les méthodes utilisées conduisent cependant en général à des modèles de type chaînes de Markov.

3.2. Contrôle des systèmes dynamiques et Sciences du Vivant

Du point de vue historique, la connexion entre le comportement du vivant et des systèmes automatiques remonte à l'analogie suggérée par Norbert Wiener dans les années 40 pour expliquer certains comportements humains (mécanismes cérébraux pour contrôler un

mouvement mécanique) par le mécanisme de la rétroaction négative. Dans la même période, Schrödinger affirmait également l'existence des similitudes entre les lois de la physique et les lois qui gouvernent le «*vivant*» et il suggérait une approche basée sur la physique pour la modélisation et l'analyse des comportements spécifiques aux systèmes du vivant. Sans être exhaustif sur la méthodologie en question, ces idées ont permis l'apparition et la définition de beaucoup des modèles mathématiques par analogie avec des procédés (électriques, mécaniques, chimiques) «*équivalents*» en termes de «*comportement*». Simultanément, elles ont permis une «*unification*» des approches existantes et ont créé le cadre interdisciplinaire nécessaire pour des nouvelles découvertes et/ou interprétations dans les domaines du vivant (voir les travaux de Mackey et Santillan, 2005 et Wellstead, 2005).

Les systèmes spécifiques aux Sciences de la Vie (SDV) sont très complexes avec souvent des contre-réactions naturelles. L'Automatique peut intervenir dans la modélisation et l'analyse des systèmes biologiques dès que le caractère dynamique des systèmes considérés doit être pris en compte pour une bonne compréhension de l'action sur ces systèmes et de leur évolution temporelle. Autrement dit, tout comportement d'un système biologique par rapport à une (ou plusieurs) échelle(s) temporelle(s) peut être interprété dans un contexte de type «*système dynamique*» en utilisant les outils de l'Automatique pourvu qu'un certain nombre de variables du système soient mesurables ou observables, même s'il n'est pas toujours possible de contrôler l'évolution du système en question.

Réciproquement, les processus biologiques, malgré leur complexité, montrent souvent une très grande robustesse avec de nombreuses contre-réactions naturelles. À ce titre, ils peuvent être une source d'inspiration pour l'asservissement des systèmes complexes.

Par ailleurs, l'homme ou l'animal est en train de devenir un terrain d'application de l'Automatique, que ce soit dans le domaine des actions médicamenteuses, de la radiothérapie, de la chirurgie robotisée, des systèmes prothétiques ou des systèmes implantables. Pour ces applications, la modélisation et l'identification de systèmes dynamiques (métabolisme, organes en mouvements, système sensori-moteurs, ...) sont nécessaires.

Enfin, l'homme n'est pas toujours le système sur lequel sont appliqués différents asservissements, il peut être aussi l'actionneur dans la boucle comme, par exemple, dans un système télé-opéré. Dans ce cas, une modélisation dynamique du processus sensori-moteur pour l'intégration dans la commande est pertinente.

3.2.1. Biologie et Automatique

Sans être exhaustif, on peut différencier deux axes de recherche à l'intersection entre de la Biologie et l'Automatique

- La modélisation, l'identification, l'observation et la perception des structures du vivant,
- l'analyse des interconnexions dynamiques dans les systèmes biologiques.

Dans chacun de ces axes, on rencontre des problématiques similaires, qui sont les problématiques d'échelles, les équilibres dynamiques et la gestion de l'incertitude.

- *Problématiques d'échelle*: niveau microscopique (structures cellulaires) ou niveau macroscopique (système ou structure ayant une spécificité fonctionnelle prédéfinie comme, par exemple, le système digestif) et l'évolution temporelle des populations en interaction dans le même environnement et l'influence de plusieurs échelles de temps.

- *Équilibres dynamiques*: l'équilibre d'une structure biologique est dynamique. Par exemple, la maladie peut être vue comme l'interaction des deux populations dynamiques (anticorps et virus) dans une «*lutte pour la survie*» (la population majoritaire ou dominante anéantissant la population minoritaire ou dominée).

-**Incertitudes** □ tout processus de modélisation induit des incertitudes et des erreurs de modélisation. Deux idées semblent faire leur chemin □ contrôler (c'est-à-dire appliquer des signaux externes) pour minimiser les incertitudes et/ou contrôler pour mieux observer.

3.2.2. Biomédical et Automatique

Sans être exhaustif, on peut considérer les problématiques suivantes □

- *Biomédical, identification et commande* □ Des apports possibles de l'Automatique sont très certainement dans le domaine de l'identification et de la commande. Des exemples en médecine sont l'identification de modèles d'organe en mouvement, la commande de systèmes d'assistance au gestes médico-chirurgicaux (robots médicaux, systèmes de radio-thérapie, cathéters actifs, ...), la création de simulateurs réalistes avec modèle du patient pour l'apprentissage du geste médical ou la planification pré-opératoire, la commande de prothèses et la stimulation électrique fonctionnelle.
- *Compréhension et optimisation des actions (thérapies)* □ Les systèmes biologiques sont très complexes avec souvent des contre-réactions naturelles, les actions des substances chimiques sont multiples, les outils et techniques de l'Automatique devraient permettre une meilleure compréhension (réduction de la complexité si possible) et une optimisation des actions (par exemple, la prise de médicament dans des multi-thérapies en fonction de l'état de certains paramètres biologiques du patient, la régulation des dispositifs implantés dans le patient, ...). Sous cette problématique, on peut également mettre la modélisation de l'homme dans la boucle, comme dans les dispositifs de télé-opération.

20 Avril 2006

Hisham ABOU-KANDIL, Mazen ALAMIR, Jean-Louis BOIMOND, Michel de MATHELIN, Didier HENRION, Silviu NICULESCU, Luc PRONZATO, Jean-Pierre RICHARD, Olivier ROUX, Dominique SAUTER.