

**G. Berry, Collège de France**  
**Chaire Algorithmes, machines et langages, mars 2013**

**Thème de la chaire**

La science informatique étudie cinq grands domaines fortement reliés entre eux : la représentation de l'information sous forme numérique, les interfaces qui permettent de recevoir et de numériser l'information du monde réel et d'agir sur ce monde, les algorithmes conceptuels pour manipuler l'information, les programmes qui implantent ces algorithmes dans des langages précis, et les machines qui exécutent les programmes. Comme l'indique le nom de la chaire, c'est au triangle formé par les algorithmes, langages et machines que sera consacrée l'essentiel des cours et des recherches, sans ignorer bien sûr les deux autres domaines. Nous étudierons en particulier les différents modèles mathématiques pertinents pour ce triangle et leurs interrelations, en lien constant avec la programmation et la vérification des systèmes informatisés modernes.

**Thème du cours 2013-2014 (et des quelques années qui suivront) : le temps et les événements en informatique**

Les premières années de la chaire seront consacrées à la manipulation explicite du temps et des événements en informatique, sujet particulièrement important dans plusieurs domaines de conception et de vérification de systèmes informatisés : logiciels de contrôle en temps-réel de systèmes de transports, de systèmes industriels et d'objets très divers, systèmes électroniques sur puces qui remplacent désormais les circuits mono-fonctions du XX<sup>e</sup> siècle, simulateurs informatiques de systèmes complexes, orchestration de services Web pour construire de nouvelles applications par composition d'applications existantes, composition et interprétation musicale mêlant interprètes humains et ordinateurs. Gérer parfaitement le temps et les événements est crucial dans tous ces domaines d'action. Pourtant, les méthodes et langages de programmation classiques ne parlent quasiment pas du temps et ne gèrent les événements qu'à partir de primitives de programmation pour le moins rustiques et souvent sans sémantique claire.

Après avoir constaté que la langue parlée du temps est fort poétique mais bien trop floue pour nos besoins, nous étudierons quels modèles mathématiques peuvent être utilisés selon les problèmes concernés, comment ces modèles peuvent fonder des langages de programmation comprenant réellement le temps et les événements, et comment on peut vérifier formellement la validité des programmes obtenus en se fondant sur ces modèles. Au moins pour les systèmes temps-réels de haute sécurité et les systèmes sur puce, la vérification formelle automatique ou assistée par ordinateur devient essentielle car les erreurs de l'informatique embarquée dans des objets comme les avions, les trains et les voitures peuvent avoir des conséquences dramatiques ou ruineuses.

Nous verrons que les modèles mathématiques doivent être bien plus variés que le modèle classique du temps linéaire mesuré par des nombres réels en physique, et qu'ils sont encore loin d'être figés. Nous étudierons la notion d'*épaisseur de l'instant*, qui permet de regarder les phénomènes temporels à différents niveaux d'abstraction, et ses rapports avec la notion informatique d'atomicité des actions. Nous montrerons la nécessité d'étendre le modèle

linéaire standard du temps en un modèle bien plus riche de *temps multiforme*, où des formes temporelles spécifiques sont engendrées par la succession des occurrences régulières ou irrégulières d'un événement particulier. Nous étudierons la délicate relation entre les modèles en temps continu et en temps discret, qui posent depuis longtemps des difficultés illustrées par le paradoxe de Zénon (ou d'Achille et la tortue).

En termes de langages de programmation, nous porterons une attention particulière aux langages parallèles synchrones développés en France depuis 30 ans, qui donnent des idées très nouvelles pour la gestion du temps et des événements. Ces langages possèdent des sémantiques mathématiques précises, disposent d'implémentations efficaces par traduction en langages classiques ou directement en circuits électroniques, ont des liens forts avec la logique mathématique. Ils sont utilisés dans des systèmes industriels d'importance majeure, en particulier dans les transports. Il est étonnant de voir à quel point leurs concepts de base s'appliquent parfaitement dans des domaines aussi variés que ceux cités plus haut ; la pluridisciplinarité concerne ici davantage la variété des applications effectives que la nature des idées de base.

Mais le monde numérique évolue vite, et les concepts initiaux du synchrone ne suffisent plus pour rendre compte des systèmes plus complexes désormais développés ou envisagés : systèmes électroniques sur puces qui utilisent des horloges multiples et non-synchronisées, systèmes de contrôle physiquement distribués et reliés en réseau, systèmes de simulation à grande échelle posant des questions subtiles liées au mélange des simulations partielles en temps discret et en temps continu. Ces sujets en plein essor nous demanderont l'accrétion de nouvelles idées venues d'autres domaines. Ils seront des thèmes privilégiés pour la recherche et l'enseignement pendant la durée de la chaire. Nous insisterons en particulier sur les moyens de les développer et de les vérifier formellement, seule méthode pour garantir leur sûreté et leur sécurité à terme.

### **Structure de la première année de cours**

Les cours 2013 commenceront par la leçon inaugurale du 28 mars destinée à un vaste public, suivie d'une leçon plus technique d'introduction à l'ensemble de la problématique et à la constitution de notre méthode de travail le 2 avril. Ils seront ensuite consacrés à la modélisation et à la programmation en temps discret, en traitant à la fois de circuits électroniques et de logiciel.

Le 9 avril, nous étudierons les circuits électroniques synchrones, largement dominants dans les systèmes actuels, et leurs relations avec la théorie mathématique des nombres 2-adiques. Cette approche très élégante, due à Jean Vuillemin, permet de grandement simplifier et systématiser la conception et la vérification des circuits synchrones, tout en fournissant une base mathématique aux échanges espace-temps qui sont des clefs de leur optimisation. Ce cours sera accompagné d'un séminaire d'Olivier Temam (Inria) sur les évolutions de l'architecture des microprocesseurs,

Les cours du 16 avril et du 23 avril seront consacré au langage synchrone Esterel v5, premier langage de programmation spécifiquement dédié au temps et aux événements. Nous verrons comment s'exprime en Esterel le flot de contrôle temporel et événementiel des applications. Nous étudierons les sémantiques mathématiques d'Esterel, discuterons des questions délicates de causalité et de déterminisme comportemental des programmes Esterel, puis présenterons les algorithmes de compilation d'Esterel en circuits synchrones ou en codes logiciels classiques. Le séminaire d'Emmanuel Ledinot (Dassault Aviation)

présentera les applications industrielles d'Esterel en avionique, et le séminaire de Bruno Pagano (Esterel Technologies) présentera l'incorporation des concepts d'Esterel dans le nouveau langage SCADE 6 développé par la société Esterel Technologies. Ce langage combine les primitives d'Esterel avec celles du langage SCADE / Lustre développé à Grenoble, dans un formalisme graphique d'automates parallèles hiérarchique. SCADE 6 est doté d'un compilateur certifié au plus haut niveau de certification logicielle en avionique et est utilisé dans de nombreux systèmes critiques (avions, trains, etc.).

Les cours des 14 et 21 mai seront consacrés au langage Esterel v7, qui a été développé par Esterel Technologies et utilisé en production par des acteurs majeurs de l'industrie électronique pour la conception et la vérification de systèmes sur puce. Esterel v7 reprend les primitives de contrôle d'Esterel v5 et les étend aux circuits multi-horloges en conservant la rigueur de leur sémantique mathématique. Il contient également des primitives innovantes pour la gestion des flots de données et des programmes de grande taille : types de données permettant l'optimisation automatique de la taille des bus de données, tableaux de valeurs et des processus, modules d'ordre supérieur, etc. Il permet enfin la synthèse et la vérification formelle de circuits très optimisés, souvent plus efficaces que les circuits conçus par les méthodes traditionnelles. Les deux séminaires associés, seront donnés par Jordi Cortadella (Université polytechnique de Catalogne). Le premier concernera les circuits asynchrones, qui remplacent les horloges par des protocoles dynamiques de contrôle de flux. S'ils n'ont pas eu le même succès industriels que les circuits synchrones, ils restent fondamentaux au niveau des principes et de la recherche. Le second séminaire présentera les circuits élastiques, remarquable mélange de techniques synchrones et asynchrones, développés en collaboration avec Intel. Ils permettent de conjuguer la simplicité de conception des circuits synchrones avec la souplesse temporelle des circuits asynchrones, conduisant à de nouvelles possibilités d'optimisation micro-architecturale.

Le cours / séminaire du 28 mai sera consacré à l'orchestration d'applications Web et donné conjointement avec Manuel Serrano (Inria). Le Web fournit une formidable plateforme de calcul distribué fondé sur le protocole client-serveur standardisé HTTP. Les très nombreux services Web peuvent être utilisés pour construire de nouvelles applications à partir de sources de données pas conçues *a priori* pour collaborer. Manuel Serrano a développé le système Hop, qui permet d'avoir une vision unifiée et transparente de la programmation client-serveur. Nous lui avons adjoint la couche synchrone HipHop inspirée d'Esterel, pour orchestrer l'ensemble des activités locales ou distantes impliquées dans une application composite : envoi des données, récupération et synchronisation des résultats, traitement des erreurs, etc. HipHop ajoute à Esterel une liaison intégrée avec le monde asynchrone du Web et une programmation beaucoup plus dynamique.

Le dernier cours du 4 juin sera consacré à l'Informatique musicale. Nous discuterons du rapport entre temps logique de la partition et temps physique de l'interprétation, ainsi que de l'apport des langages synchrones à la conception de partitions algorithmiques plus générales que les partitions linéaires usuelles. Antescofo permet la synchronisation automatique des parties électroniques sur le tempo humain, supprimant ainsi la fixité des parties électroniques pré-programmées et rendant possible une "interprétation" des musiques de synthèse par les musiciens eux-mêmes. Dans le séminaire qui suivra, le compositeur Philippe Manoury (Conservatoire de Strasbourg), discutera de la musique du temps réel. Il analysera l'ensemble des notions de temps que doit traiter le compositeur, de la période de la composition à celle de l'exécution.