Stanford en Californie (qui ont reçu le prix Turing 40 ans après, en 2015, pour leurs travaux), au moment de sa publication. Alors qu'à l'époque, seule la cryptographie à clé secrète – symétrique – était utilisée, les deux cryptologues y proposaient le concept de système à clé publique et montraient l'intérêt de l'arithmétique des grands nombres premiers pour cette approche. Je travaillais alors comme chercheur dans un laboratoire de Philips à Bruxelles dédié aux mathématiques appliquées et, fasciné, je demandai à mon patron la permission de me lancer dans la cryptomathématique. Il accepta et, à sept, nous commençâmes à explorer le domaine, avant même que le premier système à clé publique, l'algorithme de chiffrement RSA, des initiales de ses trois inventeurs, Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman, toujours utilisé aujourd'hui, soit publié (il fut annoncé en 1977 par Martin Gardner dans *Scientific American*).

En décembre 1979, Philips France prit contact avec nous pour nous demander de participer à un appel d'offres du groupement d'intérêt économique (GIE) Carte à mémoire, rassemblant alors la Direction générale des télécommunications et des banques françaises, appel d'offres qui visait à tester la viabilité technique et économique de la carte à puce dans la vie réelle. Deux concurrents, Schlumberger et Bull, relevaient le défi, et Philips France voulait aussi tenter sa chance. Or l'équipe en charge du projet avait le sentiment qu'il fallait mettre de la cryptographie dans la carte à puce, au moins pour l'authentification. D'où son appel, puisque nous étions devenus le laboratoire de Philips dédié à la cryptographie. Ainsi, en 1981, le GIE Carte à mémoire lança trois tests grandeur nature de la carte à puce, respectivement à Blois avec Bull, à Caen avec Philips et à Lyon avec Schlumberger, comptant chacun plusieurs centaines de terminaux et plusieurs dizaines de milliers de cartes à puce. Et en préparation de cette expérience, dès début 1980, nous eûmes des réunions pour ajouter des fonctions cryptographiques et des protocoles de sécurité à la carte à puce.

Seule l'expérience de Blois fut jugée convaincante, et la carte à puce de Bull fut développée par la suite. Néanmoins, les cartes à puce étaient encore loin d'une sécurisation correcte, pour une raison simple : si les protocoles de sécurité entraient bien dans la carte, les algorithmes de cryptographie étaient trop

Trouver un code PIN en 1985

Étant donné la carte à puce, il suffisait d'essayer un premier chiffre du code PIN, de déterminer, avec un oscilloscope, la durée du calcul de vérification effectué par la carte et de stopper à temps l'alimentation de la puce afin d'éviter l'enregistrement d'une tentative erronée dans la mémoire de la carte. Vu l'implantation de l'époque, quand le chiffre était juste, le temps de calcul était moins long que quand il était faux. Par essais successifs, on déterminait ainsi le premier chiffre, puis chacun des suivants selon la même méthode.

L'invention de la carte à puce

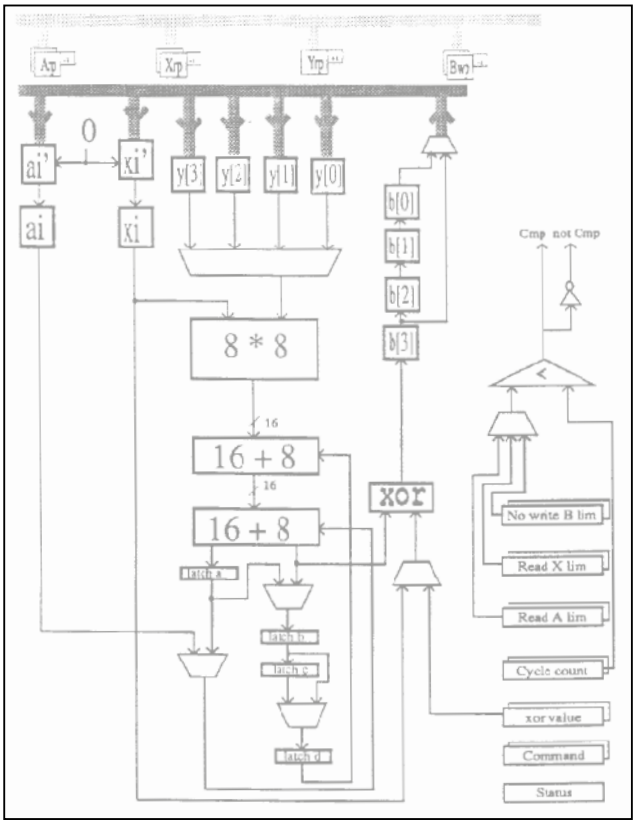
La carte à puce est un morceau de plastique portant au moins un circuit intégré contenant de l'information. On peut donc faire remonter son aventure à 1958, année où Jack Kilby, de Texas Instruments, inventa le premier circuit intégré : il assembla plusieurs transistors sur un support de silicium, ce qui conduisit à la production de processeurs (Intel 4004 en 1969, puis 8008 en 1972) permettant de réaliser de véritables petits ordinateurs miniatures, sur une seule puce.

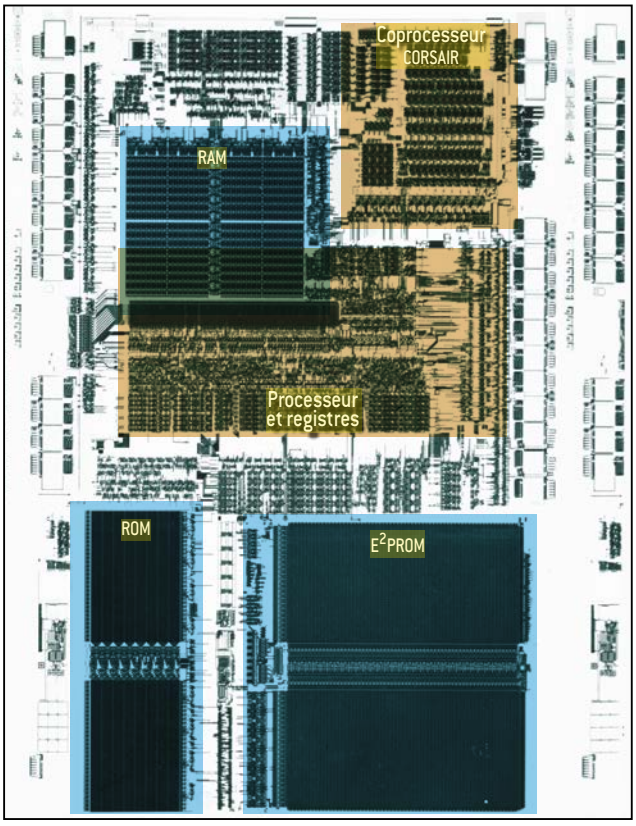
Cette miniaturisation poussa très tôt à imaginer des dispositifs portables pour traiter des paiements. Dès les années 1960, l'auteur de science-fiction René Barjavel décrivait dans son roman *La Nuit des temps* un système de paiement au moyen d'une « bague ». Et entre 1968 et 1972, plusieurs brevets ont été déposés dans ce sens au Japon, en Allemagne, en Grande-Bretagne et aux États-Unis, décrivant des cartes plastiques munies de mémoires électroniques.

La paternité de la carte à puce à mémoire est souvent attribuée au Français Roland Moreno, qui déposa en 1974 le brevet de la carte à mémoire avec l'aide de Jean Moulin. Mais l'ingénieur français Michel Ugon *(médaillon)*, alors chez Bull, est le véritable père de la carte à puce dite intelligente. C'est lui qui inventa, en 1977, la carte intégrant aussi un microprocesseur, indispensable aux applications exigeant une capacité de calcul à des fins de sécurisation. C'est d'ailleurs Michel Ugon qui, en France, s'impliqua le plus, durant de nombreuses années, dans la sécurisation de l'ensemble de la filière Carte à puce.

En 1977 et 1978, Michel Ugon déposa les deux principaux brevets sur les cartes à microprocesseurs. En mars 1979, il fabriqua la première carte à microprocesseur (à deux puces) et, en octobre 1981, la première carte monopuce à microprocesseur, la carte CP8 de Bull, qui conférait une meilleure sécurité. Les premières commandes industrielles furent lancées, qu'il s'agisse de la télécarte à puce ou de la carte bancaire. Toutefois, la cryptographie n'y était pas d'un très haut niveau, même si on y pensait. À une exception notable près, cependant : dans les années 1970, les travaux chez IBM sous la direction de Carl Meyer furent très tôt orientés vers l'utilisation de la cryptographie, et une version expérimentale de carte, très différente du modèle actuel, fut testée avec l'algorithme cryptographique Lucifer, ancêtre du DES, dans le cadre d'une expérience de transfert de données à Londres. Mais IBM ne poursuivit pas dans cette voie, sa banque sponsor n'ayant pas été convaincue et la technologie des cartes n'étant alors pas assez avancée. La carte à puce intelligente n'en était alors qu'à ses balbutiements…

– J.-J. Q. et J.-L. D.





LA PREMIÈRE PUCE À RSA, CORSAIR *(à droite)*, comportait, outre différentes mémoires (ROM, RAM, E²PROM) et un processeur, un coprocesseur qui facilitait la multiplication de grands nombres – le principe sur lequel est fondé l'algorithme RSA. Le schéma décrit l'algorithme de ce coprocesseur. On y distingue un multiplieur de nombres de 8 bits (octet) et deux additionneurs d'octets. Le reste concerne des sélecteurs, pointeurs et des chaînes de registres qui servent à gérer les paramètres de l'ensemble et les adresses des données à traiter. C'est le plus petit coprocesseur jamais conçu. En un seul coup d'horloge, il réalise l'opération $x \times y + a + b$ où chaque élément est un octet. Cette opération est assez magique, car si on imagine que chaque élément est un chiffre décimal entre 0 et 9, le plus grand nombre pouvant être obtenu est $9 \times 9 + 9 + 9 = 99$, soit un nombre de deux chiffres sans report final vers la gauche. Cette opération seule suffit pour réaliser simplement toute multiplication de grands nombres entiers ainsi que leur division avec reste.

gros par rapport aux capacités des cartes pour y être intégrés, surtout ceux à clé publique. Or les contraintes venant du SCSSI étaient grandes: il fallait éviter le détournement des objets qui utilisaient la cryptographie forte, et la carte à puce ne pouvait donc devenir un réservoir de clés secrètes ou fournir des certificats de sécurité que si elle répondait à ces contraintes. En d'autres termes, ses algorithmes devaient être suffisamment puissants pour empêcher qu'un chiffrement soit facilement associé à un déchiffrement.

La course à l'algorithme

Au début, la carte comportait deux puces, l'une avec le processeur, l'autre avec la mémoire, ce qui offrait *a priori* plus de place pour l'algorithme. Mais on s'était aperçu que la connexion entre les deux, fort visible, permettait d'espionner les échanges processeur-mémoire (en détectant les variations d'intensité du courant consommé, par exemple). La monopuce avait résolu ce problème, mais pas celui de la capacité.

Les premiers algorithmes cryptographiques pour la carte à puce furent donc des algorithmes cryptographiques soit à sens unique, soit inversibles, mais toujours à clé secrète (Telepass 1, TDF, Telepass2, Videopass…). Ces algorithmes étaient bien adaptés à leur contexte restreint en vitesse et en mémoire ainsi qu'aux processeurs 8 bits en usage. Ils utilisaient entre 200 et 300 octets pour leur implémentation complète, ce qui est certainement un exploit. Cependant, l'absence de publication de ces algorithmes en rendait certainement l'usage plus restreint et la diffusion en dehors de la France difficile.

Le vrai départ s'est produit à Eurocrypt 1984, première conférence internationale publique sur la cryptographie, à Paris. Louis Guillou y présenta la carte à puce et l'accès conditionnel. Et lorsqu'on lui demanda pourquoi il n'utilisait pas l'algorithme DES, un algorithme à clés secrètes de 56 bits adopté comme standard en 1976, il répondit: « C'est impossible, car la ROM [mémoire vive] est bien trop petite. » Un défi que je proposai alors à mon équipe de relever. Il y avait en effet au même moment en Belgique un projet de transmission interbancaire sécurisée dénommé TRASEC, dont l'idée était de stocker les clés secrètes des transactions dans une carte à puce sous le contrôle d'un code PIN. Toutefois, l'exécution de l'algorithme DES avec cette clé s'effectuait dans un ordinateur non sécurisé. Intégrer l'algorithme à la carte permettrait d'obtenir